



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DE LA DELAMINACIÓN EN FIBRA DE CARBONO MEDIANTE UN SISTEMA DE VISIÓN 3D

Autor:

Mota Oliveros, Alberto

Tutor:

San Juan Blanco, Manuel
Dpto. Ingeniería de procesos de
fabricación

Valladolid, Julio de 2019

RESUMEN

El Trabajo Fin de Grado que se presenta, consiste en analizar y determinar la delaminación existente en una placa de fibra de carbono taladrada, empleando una medidora óptica tridimensional y un software de análisis de imagen.

Se realizará una calibración de la medidora y un estudio del software de análisis de imagen y de la medidora, para así crear un procedimiento de ensayo con el fin de examinar las muestras y obtener datos significativos.

Finalmente se determinarán características geométricas de la delaminación y en base al factor de delaminación, se hará una comparación y análisis entre diferentes métodos que hemos empleado.

PALABRAS CLAVE

Fibra de carbono
Delaminación
Metrología
Comparador óptico
Análisis de imagen

ÍNDICE

RESUMEN	3
1.1. Introducción	7
1.2. Objetivos	8
1.3. Estructura	9
2. ESTADO DEL ARTE	11
2.1. Fibra de carbono	11
2.1.1. Propiedades	11
2.1.2. Fabricación de las fibras	14
2.1.3. Clasificaciones	15
2.1.4. Refuerzo	16
2.1.5. Matriz	18
2.2. Procesos de fabricación	20
2.2.1. Procesos de molde abierto:	20
2.2.2. Procesos de molde cerrado:	25
2.3. Defectos y su determinación	30
2.3.1. Tipos de defectos	30
2.3.2. Delaminación:	32
2.3.3. Determinación de defectos	38
3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	47
3.1. Equipo de medición	47
3.1.1. Medidora tridimensional óptica	47
3.1.2. Bloques patrón longitudinales	53
3.2. Calibración del equipo de medida	54
3.2.1. Operaciones previas	55
3.2.2. Procedimiento de la calibración	55
3.2.3. Toma y tratamiento de los datos	57
3.2.4. Calibración	61
3.3. Procedimiento y análisis de datos	71
3.3.1. Material	71
3.3.2. Software Deltec Vision V140	71
3.3.3. Software ImageJ	74

3.3.4. Procedimiento de análisis	76
4. RESULTADOS	85
4.1. Características geométricas	85
4.1.1. Análisis de la superficie	86
4.1.2. Cuantificación de los tipos de delaminación	90
4.2. Factor de delaminación original	92
4.3. Factor de delaminación corregido	94
4.4. Valoración del dato del error	99
5. CONCLUSIONES	103
5.1.1. Líneas futuras, mejoras y aplicaciones	104
6. BIBLIOGRAFÍA	106

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

A mediados del siglo XX, se comenzó a investigar de forma exhaustiva en las fibras de carbono, debido al potencial que se descubrió para la formación de nuevos materiales compuestos.

El desarrollo de plásticos reforzados con fibra de carbono (CFRP) se ha incrementado en los últimos años, dadas sus excelentes propiedades como una gran resistencia y un peso reducido. Sin embargo, debido a su elevada demanda y múltiples aplicaciones, es necesario obtener productos rentables y de calidad. Para el ensamblaje y terminación de piezas, el mecanizado es un proceso clave en la producción, pero pueden acarrear problemas de delaminación, debido a las propiedades del material y las condiciones de mecanizado empleadas.

Este defecto, muy habitual en materiales compuestos enfibrados consiste en una rotura del compuesto por el cual, las capas se separan entre sí y da lugar a fallos estructurales y dimensiones o tolerancias alteradas.

En condiciones de servicio donde un elemento esté sometido a esfuerzos, la existencia de delaminación puede desembocar en una pérdida de rigidez o rotura total.

Por tanto, la verificación durante y al final del proceso de fabricación es crucial para evitar la puesta en servicio de piezas defectuosas.



Figura 1.1: Muestra de un agujero con signos de daño por delaminación.

[<https://www.elevatedmaterials.com> , 2018]

Aprovechando la existencia de la medidora óptica tridimensional en la EII, emplearemos un método visual para determinar y analizar la delaminación, como si se tratase de un procedimiento aplicable a un proceso industrial.

1.2. Objetivos

La finalidad de este trabajo es poder determinar la delaminación que se forma durante el mecanizado de los compuestos de fibra de carbono, empleando una medidora tridimensional óptica como herramienta principal y una placa de fibra de carbono taladrada con diferentes velocidades de avance y corte que podría reflejar diferentes estados de delaminación .

Para dar trazabilidad a los datos obtenidos, se realizará una calibración de la medidora en los ejes X e Y, de acuerdo a las pautas que establece el CEM (Centro Español de Metrología), con el mismo aumento de la lente y parámetros que los establecidos en etapas y procesos posteriores.

Una vez hecha la calibración, el primer objetivo es explorar las características y funciones de la medidora y en especial, su software. Realizar pruebas ajustando los parámetros de iluminación, enfoque, detección, etc... con el fin de lograr una configuración óptima y adaptada al material que estudiaremos. Con esta herramienta se tratará de tomar capturas de imagen de cada agujero para clasificar y examinar las muestras así como obtener propiedades geométricas.

Las siguientes metas serán hallar los diámetros de los taladros, calcular su factor de delaminación respecto al diámetro nominal, relacionar los datos obtenidos con las condiciones de corte de la placa y determinar la posible influencia del área delaminada en el factor.

Por último, se buscará encontrar patrones o geometrías características en la delaminación y encontrar posibles relaciones entre ellas.

1.3. Estructura

Además de la presente introducción, el presente trabajo se divide principalmente en bloques.

En el primero, Estado del Arte, se plasman los principales conceptos que relacionan a los compuestos de fibra de carbono con este trabajo: Propiedades y características, procesos de fabricación y sus defectos.

En varios apartados, se analizarán estos conceptos con el propósito de conocer todo lo necesario para realizar este trabajo y poder comprender los resultados que podamos obtener. Se hará especial énfasis en el término “delaminación”.

La parte experimental estará enfocada en el segundo bloque, donde se expondrá el proceso de calibración del equipo de medida y sus resultados, el control y análisis de los dos sistemas empleados y la creación, explicación y justificación del procedimiento de ensayo empleado.

Finalmente, todos los datos, cálculos, comparativas y resultados obtenidos quedaran enmarcados en un tercer bloque que finalizará con unas conclusiones.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Fibra de carbono

La fibra de carbono es un material compuesto, formado por fibras trenzadas cuyo material predominante es el carbono y unidas mediante un polímero, dando lugar a un material con alta resistencia, bajo peso, flexible y duradero.

Estas características hacen que sea un material con múltiples aplicaciones en la industria aeroespacial, automovilística, militar o deportiva, entre otras.

Dadas sus buenas propiedades, su demanda cada vez es más elevada, sin embargo, su uso está limitado por los altos costes de producción. Por todo ello, es necesario la investigación y el desarrollo de sus propiedades, así como de técnicas y procesos de fabricación.

2.1.1. Propiedades

- Alta resistencia y dureza específica, bajo peso
- Resistencia y rigidez muy superior a otros materiales. Su módulo de Young oscila entre 100 y 300 GPa y su resistencia a la tracción entre 2000 y 3400 MPa.

Al ser un material compuesto, la resistencia será proporcional al porcentaje de fibras en el material.

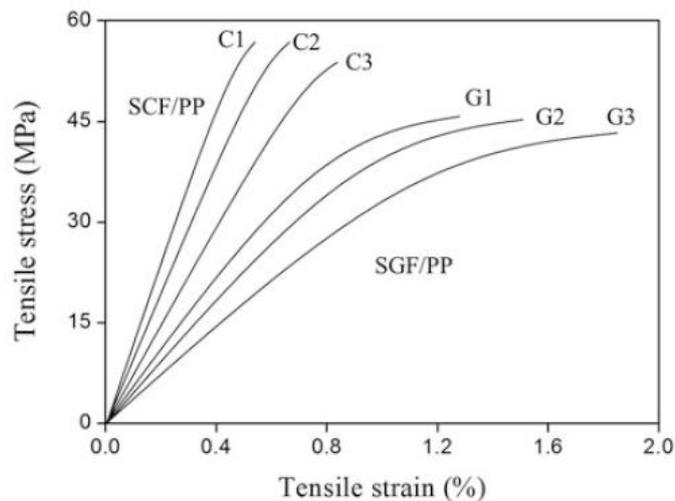


Figura 2.1: Comparación entre la tensión y deformación en diferentes compuestos. (PARK,2014)

- Buena resistencia a fatiga, aunque habitualmente cuando falla, lo hace de forma inminente sin signos de la ruptura. Si la orientación de las tensiones cíclicas coincide con la de las fibras, es poco probable la irrupción de fallos.
- Aplicaciones ignifugas, dependiendo del tipo de fibra, se pueden integrar en ropa protectora
- Baja conductividad térmica y alta conductividad eléctrica
- Bajo coeficiente de expansión térmica, ideal para aplicaciones ópticas donde existen movimientos críticos
- Resistente a la corrosión y estable químicamente, aunque son características propias de la fibra y las del composite, dependerán del tipo de matriz empleada o la protección superficial sobre la pieza final.
- Poca tenacidad: Los compuestos de fibra de carbono, pueden ser frágiles dependiendo del tipo de esfuerzo al que estén sometidos. Las fibras se pueden doblar y se fracturan a baja tensión
- Inerte biológicamente y permeable a rayos X, lo que la hace apropiada para aplicaciones médicas y quirúrgicas. La fibra de carbono no es venenosa y en conjunto con una matriz no tóxica, puede servir para prótesis o implantes.
- Excelente resistencia al impacto, mejorándose con la introducción de MoSi₂ en la matriz. Por ejemplo, es empleado en la construcción de

chasis en vehículos de competición, capaces de soportar durísimos impactos manteniendo la integridad del piloto.

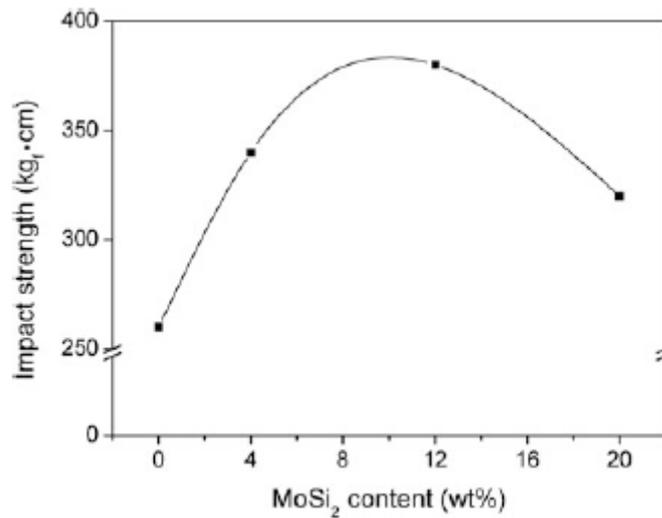


Figura 2.2: Variación de la resistencia al impacto con la introducción de MoSi₂ (PARK, 2014)

- resistencia torsional elevada, comparada con el acero, aplicable en el uso de ejes de transmisión

Property	Steel ^a	Aluminum ^b	E-Glass ^c	Carbon Fibers ^d
Density [g/cm ³]	7.85	2.6-2.8	2.54-2.6	1.75-1.8
Tensile strength [MPa]	276-1882	230-570	3448	3530-6370
Elongation at Break [%]	10-32	10-25	4.8	0.7-2.1
CTE [10 ⁻⁶ /K]	11-16	20.4-25.0	5.4	(-1.1) - (-0.38)
Thermal conductivity [W/m-K]	24-65	237	1.3	10-150
Specific heat [J/g·°C]	0.45-2.1	0.9-0.96	0.81	0.71-0.75
Melting point [°C]	1500	477-660	1725	3650
Resistance [ohm-cm]	1.74×10 ⁻⁵	5.2×10 ⁻⁶	4×10 ¹²	0.9-1.6×10 ⁻³

^aCarbon Steel, www.efunda.com & www.weldtechnology.com

^bwww.matweb.com

^cwww.matls.com

^dwww.toray.com & www.goodfellow.com

Figura 2.3 Comparación de propiedades de la fibra de carbono con otros materiales comunes (KRUEGER, 2010)

2.1.2. Fabricación de las fibras

Para la obtención de las fibras de carbono, se emplea un proceso de pirólisis controlada y ciclización de precursores de fibras orgánicas, siendo el más común y empleado, el poliacrilonitrilo (PAN).

La primera fase es un calentamiento y estirado para dar estabilidad dimensional. Después pasa por una fase de carbonización a una temperatura en torno a 800°, donde el polímero se transforma en anillos hexagonales de carbono. En la grafitización, se eleva la temperatura a unos 2000° para aumentar el tamaño de los cristales y mejorar la orientación de las fibras. Por último, las fibras se someten a un tratamiento superficial para mejorar su adhesión.

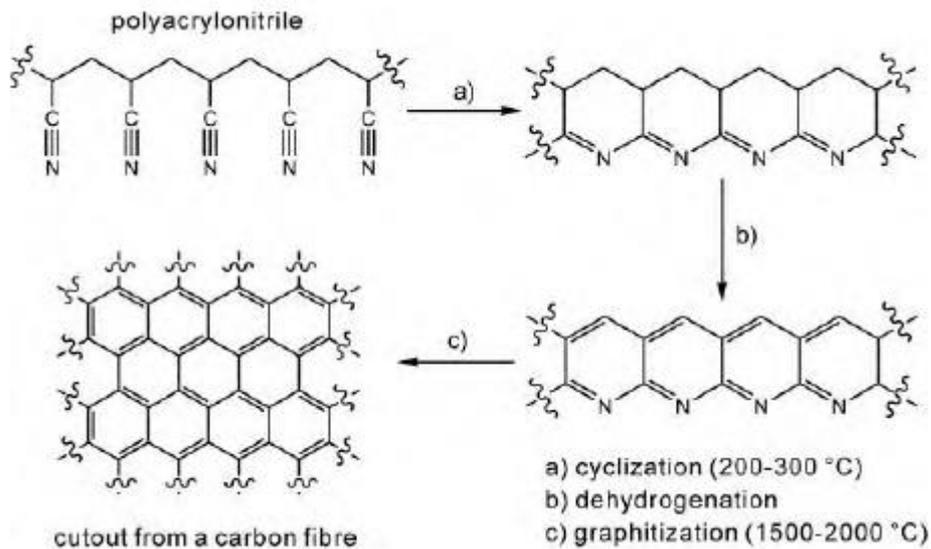


Figura 2.4: Fases en la obtención de las fibras [KRUEGER, 2010]

Del tamaño y orientación de los cristales y la porosidad e impurezas de las fibras, dependen las propiedades físicas de éstas.

Variando las temperaturas de calentamiento en los procesos anteriores, se influye en el módulo de elasticidad de las fibras, dando lugar a distintos tipos como veremos a continuación

2.1.3. Clasificaciones

2.1.3.1. *En función de su rendimiento*

En función del grado de orientación del cristalino y la estructura de la fibra, conseguimos diferentes tipos de compuestos con unas resistencias variadas.

Se organizan según el módulo de elasticidad obtenido.

Las fibras de carbono UHM (Módulo Ultra-Superior) y HM (Módulo Superior) están altamente grafitizadas y se caracterizan por un alto módulo, superior a 500 GPa y 300 GPa respectivamente

Las fibras de carbono IM (Módulo Intermedio) y HT (Alta Resistencia) tienen buena resistencia y bajo módulo debido al tratamiento térmico a temperaturas más bajas. Se obtienen módulos de hasta 300 GPa para las primeras y superiores a 100 GPa para las últimas.

Por último, las fibras de bajo módulo (por debajo de 100 GPa), con estructura isótropa y una baja resistencia. Son las más económicas.

Carbon fiber type	Heat treatment temperature (°C)	Crystallite orientation	Long-distance order	
Type I high modulus	>2,000	Mainly parallel to the fiber axis	High	UHM
				HM
Type II high strength	≈1,500	Mainly parallel to the fiber axis	Low	IM HT
Type III isotropic	<1,000	Random	Very low	Isotropic

Tabla 2.1: Propiedades de las fibras según el tipo (PARK,2014)

2.1.3.2. *En función de la orientación de la fibra*

Las fibras de carbono se obtienen mediante tratamientos de estiramiento y calentamiento de fibras sintéticas. En función del estiramiento de estas fibras, se obtiene un grado de orientación cristalina que va asociado al módulo de elasticidad deseado

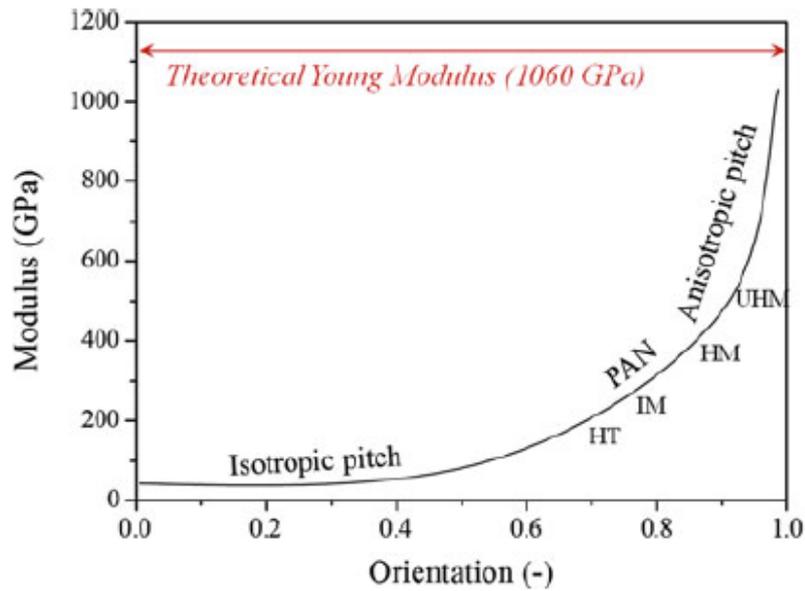


Figura 2.5: Influencia de la orientación en el módulo de Young [PARK, 2014]

2.1.4. Refuerzo

2.1.4.1. Mechas

Consisten en filamentos que se juntan para formar hebras. Si estas fibras están paralelas entre sí, las podemos considerar “mechas”, sin embargo, de forma enrollada, las denominaremos “hilos”. Una mecha puede contener entre 5000 y 12000 fibras, teniendo cada una, un diámetro entre 5 y 8 μm .

Dependiendo del tipo de alineación de estas mechas, podemos tener mechas simples, para casos en los que se requiera refuerzo unidireccional, o mechas múltiples, en los que se cortan estas hebras y se depositan aleatoriamente en la matriz de resina.

Habitualmente este refuerzo se utiliza en compuestos termoestables y en procesos de bobinado y pultrusión.

2.1.4.2. Refuerzos unidireccionales

Se forman por conjuntos de fibras continuas en disposición paralela entre sí, que garantizan una buena resistencia en la dirección de las fibras. Habitualmente requiere la colocación de varias capas para aplicaciones

estructurales. La orientación de estas capas determina las propiedades del material obtenido.

1. Los laminados unidireccionales se fabrican colocando capas en la misma dirección para tener un compuesto isótropo
2. Los laminados 0° - 90° están formados por capas alternas en direcciones perpendiculares entre sí, dando lugar a un compuesto ortótropo
3. Los laminados cuasi-isótropos se crean alternando capas en direcciones de $0, +45^{\circ}$ y 90 , dando lugar a un compuesto con un comportamiento similar en cualquier dirección.

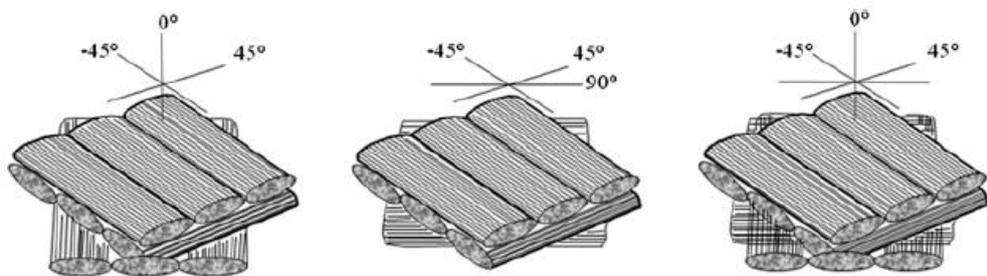


Figura 2.6: Ejemplo de orientación en laminados cuasi-isótropos [PARK, 2014]

2.1.4.3. Tejidos

Son refuerzos multidireccionales que se producen cosiendo o trenzando fibras continuas. Deben tener suficiente estabilidad y flexibilidad para ser manipuladas a la hora de introducirse en moldes. Por el carácter continuo de las fibras, su relación resistencia/peso, es mucho más elevada que en el caso de las fibras cortadas.

Al igual que sucede con los laminados mediante refuerzos unidireccionales, los tejidos tendrán un comportamiento más isótropo por la disposición en múltiples direcciones. Estas se diseñan con un sistema de dos o más hilos entrelazados de modo que aseguran una distribución de carga óptima.

2.1.4.4. *Preimpregnados*

Consiste en fibras o tejidos cubiertos de una capa de resina, de modo que la matriz y el refuerzo vienen dispuestos en el mismo material. Este tipo de refuerzo requiere mantenerse refrigerado durante el almacenaje y elevar su temperatura durante la aplicación, para retardar y acelerar su curado, respectivamente.

Con ello se consiguen materiales con alto contenido de refuerzo y gran uniformidad de la resina en todo el volumen.

2.1.5. Matriz

Son resinas que funcionan como un aglutinante que mantiene la orientación de las fibras ante deformaciones, las protege del medio y el desgaste físico y reparte las cargas a través de las fibras.

2.1.5.1. *Termoestables*

Este tipo de resina está formada por enlaces intermoleculares que solidifican, formando una estructura 3D. Sus propiedades son función de las moléculas de partida y la longitud y densidad de los enlaces.

Es el tipo de resina más usada debido a su buena estabilidad ante la temperatura y el medio, y sus buenas propiedades mecánicas, aunque son frágiles. Además, se pueden laminar y procesar con facilidad, sin necesidad de aplicar calor o presión.

Precisa de un curado, que puede ser mediante reacción química al mezclarse con un catalizador, aplicando temperatura o por irradiación de ondas infrarrojas o luz ultravioleta.

Tras el curado pueden quedar tensiones residuales que deben ser eliminadas con un proceso de postcurado.

El carácter termoestable, hace que sea imposible reciclar los compuestos con métodos corrientes

Se suelen emplear resinas epoxy o de poliéster, siendo más frecuente el primer tipo, por tener mayor tenacidad

2.1.5.2. *Termoplásticas*

Su característica principal es que son reutilizables fundiendo el material, ya que normalmente no hay cambios químicos durante el curado.

Tienen gran resistencia al impacto, tenacidad y no resultan dañinas para el medio ambiente.

Para la fabricación, es necesario aplicar temperatura y presión, por ello la resina se funde y se aplica mediante procesos como el moldeo por inyección o compresión, la extrusión o el “conformado por vacío”. Con estos procesos, también se pueden adherir a otros materiales termoplásticos

Las más comunes en la fabricación de compuestos, son de ABS, poliamida, polietileno (PE) o polipropileno (PP)

2.2. Procesos de fabricación

Existen numerosos procesos de fabricación para los compuestos de fibra de carbono, que dan lugar a diferentes características del producto obtenido. Dada la complejidad y coste de la producción con estos compuestos, es importante conocer los requerimientos del material o la pieza final, con el fin de obtener un proceso más eficiente. Factores como el rendimiento del producto, su geometría, tamaño, acabado superficial o la tasa de producción, son claves a la hora de seleccionar el proceso de fabricación

Podemos agrupar estos procesos en dos grandes grupos:

2.2.1. Procesos de molde abierto:

El concepto básico sobre estos procesos consiste en un molde cóncavo o convexo sobre el cual se aplican capas de refuerzo y resina. Tras un tiempo de curado (posibilidad de aplicar presión y temperatura), se separa del molde.

La aplicación de estos procesos se caracteriza por un bajo coste e inversión inicial, posibilidad de realizar piezas de diversos tamaños y formas, ideal para series pequeñas y medianas.

2.2.1.1. *Moldeo por contacto manual:*

Es el método más sencillo y que precisa menor inversión y equipamiento. Por contra, solo es recomendado para pequeñas series, piezas poco complejas y es necesario más mano de obra. Puesto que se utiliza un único molde, sólo una cara queda reproducida con la forma de la pieza.

Sobre un molde con la forma de la pieza deseada, se coloca el refuerzo y después se vierte o rocía la resina. Con la ayuda de un rodillo u otras herramientas, se aplica presión sobre el refuerzo para homogeneizar la resina, eliminar burbujas de aire y ayudar a que adopte la forma del molde. Dependiendo del tipo de resina utilizada, es preciso aplicar temperatura para su curación

Es necesaria la aplicación previa de una cera o agente de desmoldeo sobre el molde, además se puede utilizar una resina superficial denominada “gel coat”, aplicada entre la cera y el refuerzo, que aporta un buen acabado

superficial, protege de los agentes externos y la corrosión y evita que las fibras queden expuestas.

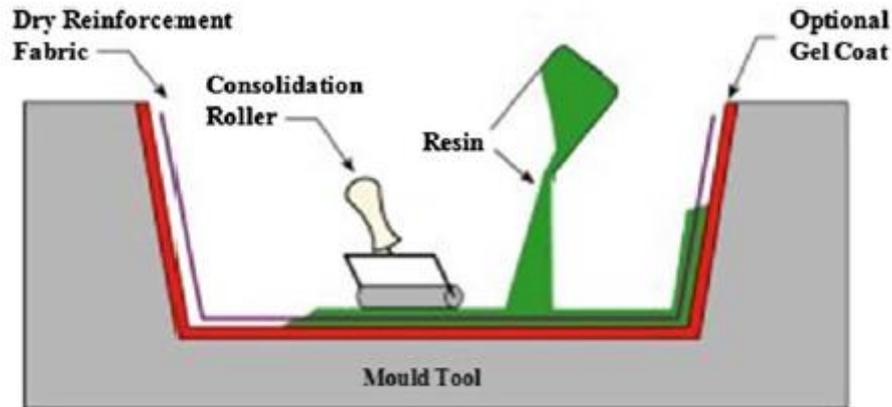


Figura 2.7. Proceso de moldeo por contacto manual.
[<http://www.nexusprojectes.com>, 2017]

2.2.1.2. Moldeo por proyección

Sobre el molde y mediante una pistola, se aplica simultáneamente fibra cortada y la resina. Después, se adapta el material al molde. Es posible realizar refuerzos tipo “sandwich” intercalando capas de madera o espuma entre proyecciones.

Sus ventajas son el coste bajo del equipamiento y del filamento frente al de los tejidos, además de una mayor tasa de producción que con el método de contacto manual. Por contra, las piezas obtenidas tienen poca resistencia mecánica debido a las fibras cortadas y se necesita mayor cualificación en la mano de obra para unos buenos resultados.

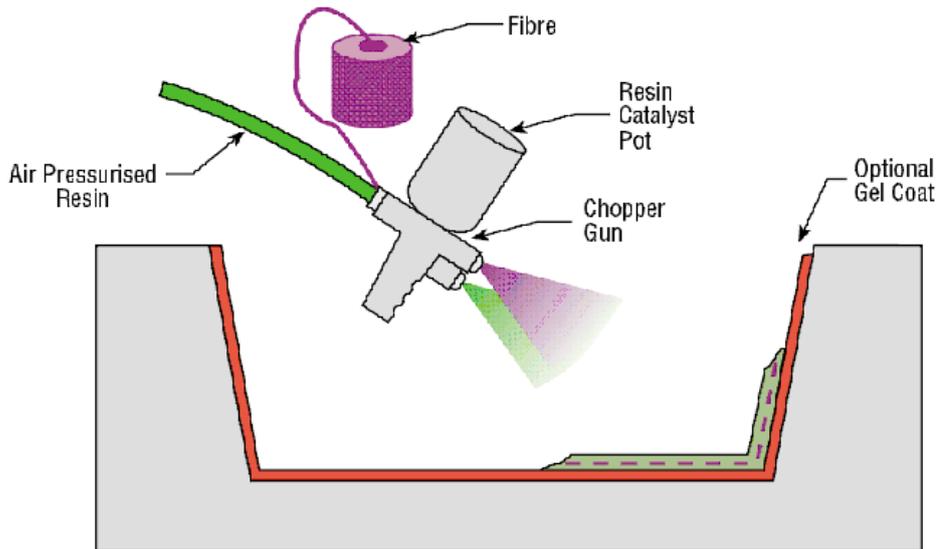


Figura 2.8: Método por proyección
[<http://www.nexusprojectes.com>, 2017]

2.2.1.3. Método por enrollamiento de filamento

Este método se emplea en la construcción de elementos huecos de revolución, como tuberías, ejes de transmisión o tanques.

Sobre un eje giratorio con la forma interna de la pieza, se enrolla el filamento previamente impregnado de resina catalizada. Es necesario controlar la tensión en el filamento y su orientación respecto del eje, pues las propiedades mecánicas de la pieza dependen en buena parte de estos parámetros.

Las piezas obtenidas en este método destacan por tener excelentes propiedades mecánicas y una amplia variedad de tamaño. Por contra, es un proceso que necesita ser automatizado para una óptima calidad y el empleo de equipamiento especial, por tanto, la inversión es elevada.

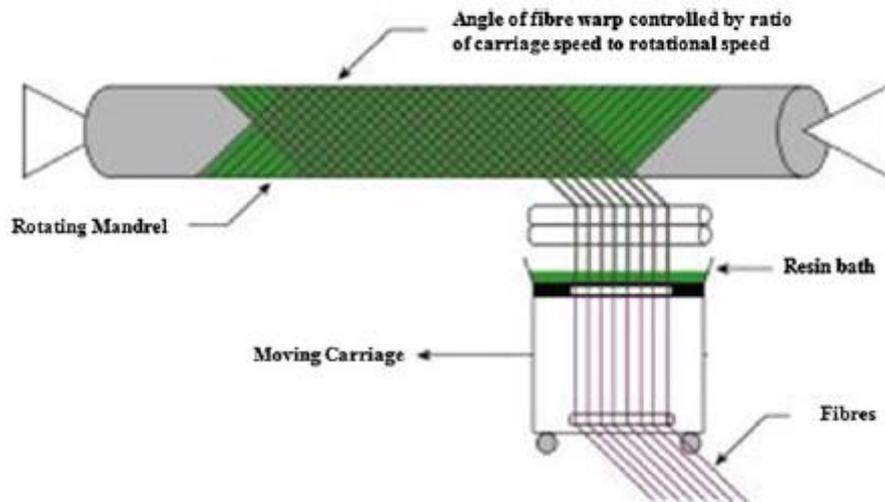


Figura 2.9: Método por enrollamiento. [<http://www.nexusprojectes.com>, 2017]

2.2.1.4. Moldeo al vacío

El fundamento de esta técnica es similar a la de contacto manual, con la diferencia de que la presión contra el molde y refuerzo se crea por vacío.

Se colocan las capas de desmoldeante, gel coat, refuerzo y matriz, del mismo modo que en el primer método, pero por encima, se coloca una bolsa plástica de forma que sella el molde y queda presurizado.

Con una bomba de vacío u otro sistema, se extrae el aire hasta conseguir atmosferas cercanas a 0 Bar y la bolsa se contrae contra el molde, de forma que el material se adapta a toda la superficie del molde.

Con este método, conseguimos varias ventajas respecto al método manual; Eliminamos burbujas de aire que puedan quedar entre laminados, evitamos modificar la orientación de las fibras, conseguimos una distribución uniforme de resina que da lugar a buenas propiedades mecánicas y el acabado superficial es bueno por ambas caras.

Por el contrario, presenta desventajas como una tasa de producción inferior por los tiempos de preparación, los costes de los materiales empleados y la importancia de las habilidades de los operarios para conseguir un buen acabado y unos porcentajes de resina y refuerzo adecuados.

Existe la posibilidad de introducir la resina después de crear el vacío, aprovechando esta circunstancia, De esta forma podemos controlar el flujo de resina hasta cubrir la superficie, pero necesitamos más elementos para esta función

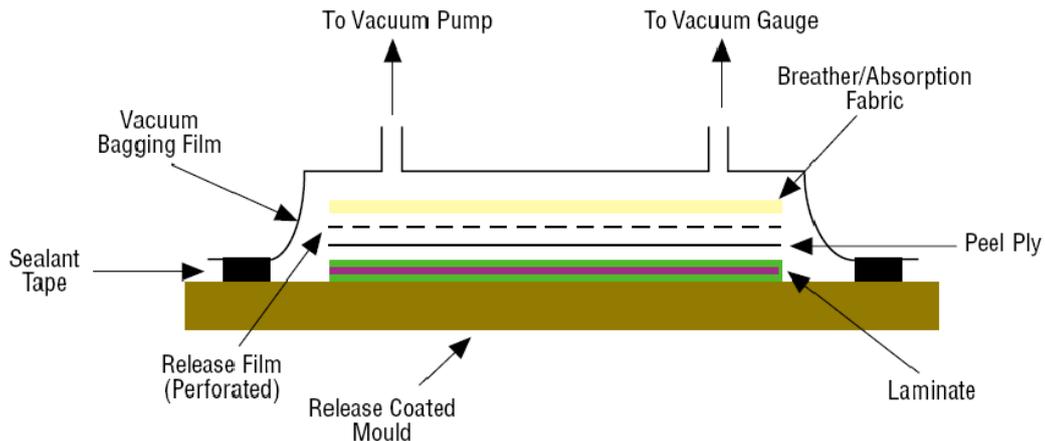


Figura 2.10. Moldeo al vacío. [<http://www.nexusprojectes.com>, 2017]

2.2.1.5. Moldeo con autoclave

En este método se trabaja con autoclave, una cámara presurizada en la que se puede regular la presión, el vacío y la temperatura.

Es habitual trabajar con preimpregnados, que se colocan sobre el molde y por vacío, el refuerzo se adapta a la superficie del molde, al igual que en el método anterior, Así se eliminan burbujas e impurezas que pueda haber. Después, se aplica presión y temperatura para lograr el curado de la resina y una completa homogeneidad.

Es un sistema bastante caro y comparado con el moldeo por vacío, no parece tener demasiadas ventajas añadidas, sin embargo, se aplica en la industria aeronáutica y espacial, para lograr piezas de la mayor calidad y optimas características mecánicas, sin importar su complejidad.

El mayor control que se realiza en el autoclave sobre el proceso y las condiciones, permite lograr unas piezas de características y apariencia homogénea y evitar problemas con el curado de la resina. Por contra, no es un proceso para realizar series grandes, ya que los tiempos de preparación y curado son elevados.

2.2.1.6. Moldeo por centrifugación

Método válido para crear piezas de revolución. Sobre un molde que gira se introducen fibras cortadas y resina, y por efecto de la fuerza centrífuga la mezcla se adhiere a las paredes del molde.

Las piezas obtenidas, no tienen buenas propiedades mecánicas por la orientación arbitraria de las fibras, pero su diámetro y espesor se ajustan a las medidas deseadas.

2.2.2. Procesos de molde cerrado:

Las piezas se realizan mediante presión, bien por inyección o compresión, en un molde formado por 2 o más piezas. De esta forma podemos crear piezas con mayor resistencia, de formas más complicadas o con mejor precisión dimensional. Los costes son mayores porque requiere la intervención de prensas o máquinas de inyección.

2.2.2.1. *RTM*

Se coloca el refuerzo entre las partes que forma el molde, se cierra y se inyecta a presión la resina catalizada. Para evitar burbujas, es posible extraer el aire por vacío en la parte inferior de los moldes y de paso se consigue aumentar la velocidad con la que la resina se propaga por las cavidades. Se suele contar con sistemas de calentamiento para acelerar el curado de la resina

En este método, hay que cuidar algunos aspectos, como la viscosidad de la resina para que fluya adecuadamente sin desplazar las capas de refuerzo y la colocación de estas.

Se consiguen tiempos de procesado cortos, empleando presiones bajas y moldes más ligeros, por lo que los costes también se reducen. Las piezas resultantes cuentan con buen acabado superficial y unas tolerancias dimensionales ajustadas

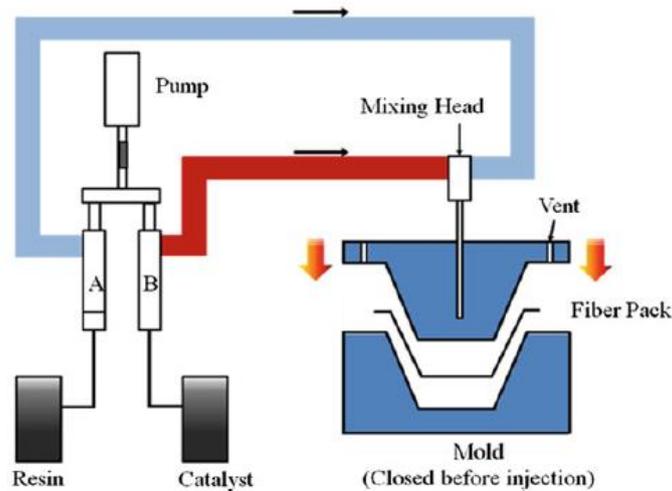


Figura 2.11: Proceso RTM (Park, 2014)

2.2.2.2. Moldeo por compresión

Sobre el molde se coloca el refuerzo y la resina, se aplica presión con el contramolde mediante una prensa hidráulica, manteniéndose hasta que cura la resina. La velocidad con la que se aplica la presión es variable para evitar descolocar los refuerzos y asegurar la distribución de la resina.

Los moldes pueden ser metálicos o de otros materiales poliméricos, dependiendo de las presiones y los tamaños de las piezas moldeadas.

En este método, se puede aplicar temperatura sobre el molde para reducir los tiempos de curado y aumentar la productividad.

No requiere una inversión elevada ni los costes de producción son demasiados altos, se pueden obtener piezas con buen acabado superficial por ambas caras y una resistencia aceptable. Por el contrario, existen limitaciones en las formas a reproducir y se crea mucho material de rebaba.

2.2.2.3. *Moldeo por compresión de SMC*

El SMC (Sheet Moulding Compound) es un producto formado una resina termoestable, un refuerzo de fibra, rellenos inertes, catalizadores, pigmentos y estabilizadores, agentes de liberación y espesantes. El resultado son laminas similares a los preimpregnados, aunque la orientación de las fibras suele ser aleatoria.

Las láminas se cortan y pesan para adecuarlas en el molde a su forma y volumen final. Después se colocan y reparten por el molde.

Se cierra el molde y se aplican presiones superiores a 140 bares y una temperatura que ronda los 200° que facilita un curado rápido.

La pieza resultante sale prácticamente acabada y cortada, apenas necesita más operaciones por su buen acabado superficial.

Es un método muy empleado en la industria del automóvil, para realizar cubiertas o carcasas de puertas, portones, interiores, etc...

Se pueden conseguir piezas de mucha complejidad, con tasas de producción muy elevadas. Sin embargo, implica grandes costes en maquinaria y las piezas obtenidas no son adecuadas cuando se necesiten buenas propiedades mecánicas.

2.2.2.4. *Moldeo por inyección*

Es el método más utilizado para producir piezas de fibras cortas, aunque en el caso de la fibra de carbono, su uso es anecdótico.

Se emplea una máquina de moldeo por inyección, en la que se vierte por una tolva, la resina y las fibras cortadas. Mediante un tornillo sin fin, ambos componentes se van mezclando a la vez que se van fundiendo por la presencia de unos calentadores (si se necesitara fundir la resina). La mezcla llega a la boquilla y por acción del tornillo, entra a presión en el molde hasta rellenar todas las cavidades.

Dependiendo de si la resina empleada es termoplástica o termoestable, se enfría el molde o se mantiene a una determinada temperatura para su solidificación, respectivamente.

Es un proceso habitualmente automatizado, en el que se debe controlar la presión y la velocidad de inyección para optimizar los resultados. Se consiguen excelentes tasas de producción, pero las piezas no tienen buena resistencia mecánica.

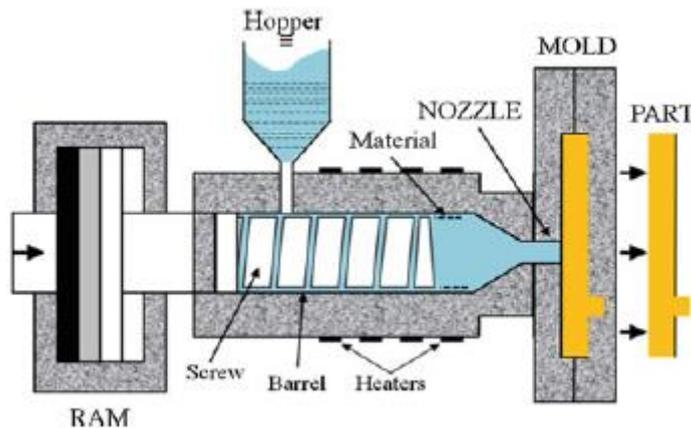


Figura 2.12. Moldeo por inyección (Park, 2014)

2.2.2.5. Pultrusión

Es un proceso para la fabricación de perfiles. La técnica consiste en estirar las fibras a través de un sistema de laminado continuo hasta un molde donde se le da la forma deseada.

Las fibras están en forma continua, tanto en forma de hilos como de telas. Se estiran y avanzan a la vez que se van impregnando de la resina y demás aditivos necesarios.

Tras salir del impregnador, las fibras se ordenan y posicionan, pasan por un preformador, que elimina el exceso de resina y va dando forma a la masa que siguen en movimiento hasta la matriz, donde se aplica calor para conformar el perfil. Controlar la temperatura es fundamental para lograr unas propiedades uniformes.

Finalmente, el perfil se enfría y se corta a medida.

Los costes son bajos cuando la producción alcanza grandes volúmenes, aunque la inversión en maquinaria y matrices es elevada.

Se pueden obtener perfiles simples o complejos con diversas características mecánicas, al poder modificar el tipo y el porcentaje de refuerzo, así como las propiedades de la matriz.

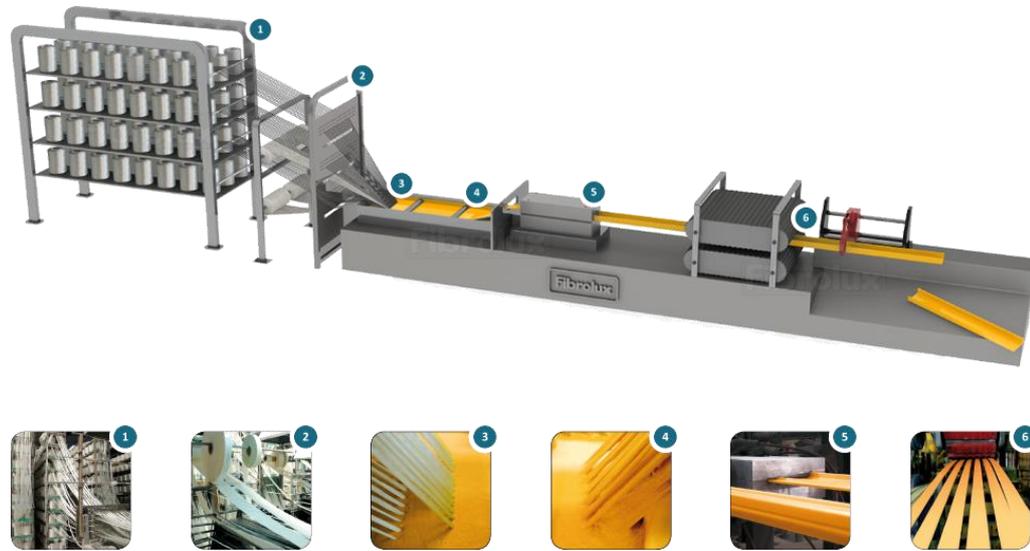


Figura 2.13. Moldeo por pultrusión [www.fibrolux.com/es/, 2017]

2.3. Defectos y su determinación

2.3.1. Tipos de defectos

Podemos distinguir entre defectos de fabricación y defectos en servicio:

2.3.1.1. *Defectos de fabricación:*

- Delaminación
- **Capas no uniformes de resina:** Es frecuente cuando se emplean métodos manuales o la resina cura antes de propagarse homogéneamente por toda la superficie de la pieza.
- **Adhesión insuficiente entre capas de refuerzo:** Falta de resina o escasa presión en el curado
- **Poros, burbujas de aire, inclusiones de partículas o cuerpos extraños**
- **Fibras cortadas o mal posicionadas:** En los procesos de fabricación en los que se aplica presión, las capas de refuerzo pueden moverse o incluso dañarse por el movimiento de los moldes, por lo que la pieza final puede no tener las características deseadas.
- **Volumen del contenido en fibra reducido**
- **Insuficiente solidificación de la resina:** Falta de curado en la matriz por temperatura inadecuada o proporción de catalizador escasa.
- **Materiales defectuosos:** Refuerzos como los preimpregnados, tienen una temprana caducidad y requieren conservarse bajo refrigeración. Las resinas y catalizadores, también tiene una vida útil limitada y no pueden estar bajo condiciones de mucha temperatura o humedad. Estos factores afectan a la calidad y propiedades de los materiales.
- **Desgaste o hendiduras producidas por herramientas o utillajes**
- **Degradación de la resina por excesivo calentamiento durante el curado**

2.3.1.2. *Defectos en servicio*

- Delaminación
- Grietas en la matriz



*Figura 2.14. Grietas en el cuadro de una bicicleta.
[www.ilovebicycling.com, 2016]*

- Fractura de la fibra
- Filtración de agua
- Daños por mecanizado: Velocidades, parámetros y herramientas no adecuadas, poco conocimiento de las características del material.
- Daños por impacto
- Daños por fatiga: Aunque tiene una excelente resistencia a fatiga, los ciclos repetidos de carga afectan al material produciendo fisuras y delaminaciones que pueden propagarse y acabar fracturando totalmente la pieza.
- Erosión o abrasión: Un desgaste en las capas puede afectar a la resistencia y desencadenar una delaminación o astillamiento de la pieza
- Degradación por exposición al medio ambiente o rayos UV
- Ataque químico: Las fibras tienen buena resistencia a los químicos, sin embargo, las resinas son más vulnerables. Es recomendable emplear resinas específicas o aplicar un coating o protector si la pieza está expuesta a ambientes nocivos o en contacto con sustancias que puedan dañarla.

2.3.2. Delaminación:

Dedicamos un apartado al defecto sobre el que trabajamos en este proyecto.

Se da en materiales compuestos laminados, donde las capas se separan a lo largo del plano que las separa, al someter al material a esfuerzos. Conlleva una reducción de la rigidez y la resistencia, que puede terminar en una rotura total. Las delaminaciones pueden darse por la presencia de grietas internas, burbujas de aire que se forman durante el proceso de fabricación (por lo que las capas no están completamente adheridas) o impactos de baja energía. Someter el material a ciclos de carga repetida, puede producir que las delaminaciones crezcan y se produzcan fallos catastróficos.

La importancia que pueden tener las delaminaciones en un material va a depender de las dimensiones de estas, la concentración de delaminaciones en un lugar determinado, ubicación en la pieza (espesor, cercanía a bordes o puntos de concentración de tensiones, discontinuidades geométricas) y el estado de cargas.

Las tensiones de tracción no suelen ser problemáticas, pero con cargas de compresión o cizalla, los elementos desprendidos o las láminas adyacentes, pueden pandearse y redistribuir las tensiones de modo que se dispara la probabilidad de fallar.

En el caso de este trabajo, vamos a caracterizar la delaminación en placas de fibra de carbono taladradas. El taladrado, puede producir delaminación, ya que podemos considerarlo como una carga de compresión sobre el material, que supera a la fuerza existente entre las capas.

Las delaminaciones se producen principalmente en el exterior por la entrada y salida de la broca, aunque también existen de tipo interno.

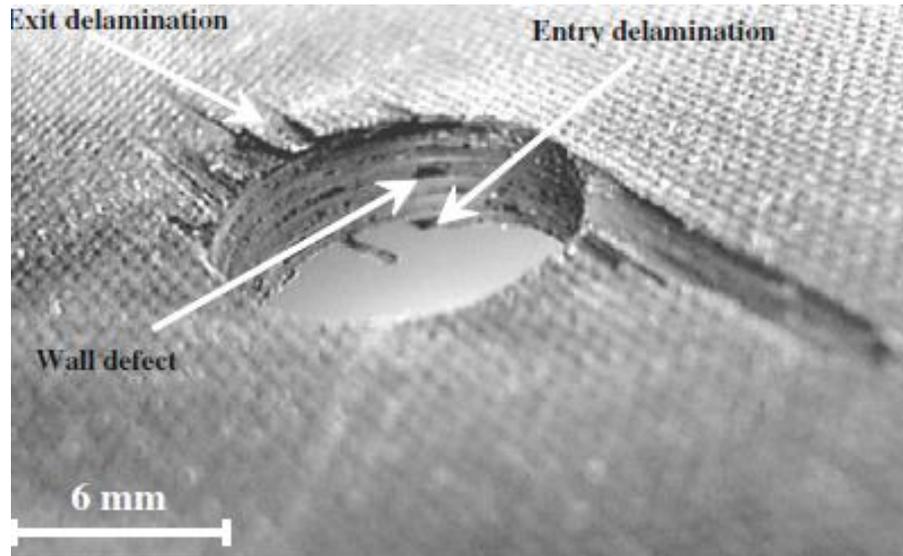


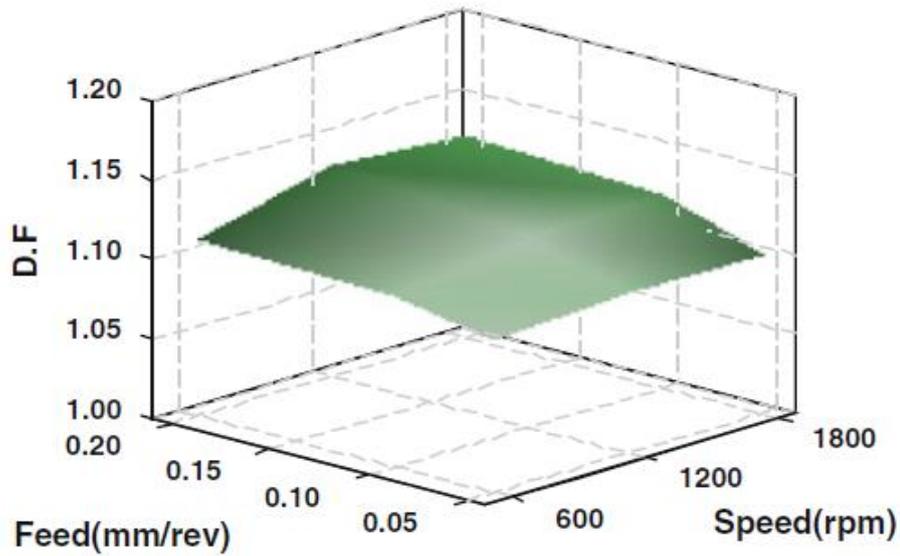
Figura 2.15: Defectos por taladrado en un compuesto de fibra de carbono.
[Krishnaraj, 2013]

En este caso concreto, los parámetros más influyentes en la delaminación son la velocidad de avance y de giro de la herramienta, dado que aumenta la sección transversal de corte. Este incremento, aumenta la resistencia al corte y del mismo modo, la fuerza de empuje.

Las velocidades de avance bajas reducen la delaminación, pero tienen como efecto adverso la fricción y el calentamiento de la zona. Esto es un problema en materiales compuestos, ya que aproximadamente el 50% del calor generado, lo absorbe la herramienta. Además, el calentamiento puede deteriorar la resina.

Este aumento de la temperatura, junto con el carácter abrasivo del material, contribuye a acelerar el desgaste de la herramienta, lo que empeora la rugosidad de los agujeros.

Dado que la fuerza de empuje es proporcional a la superficie de contacto con la herramienta, se puede reducir el factor de delaminación realizando previamente taladros-guía de menor diámetro del agujero deseado.



*Figura 2.16: Influencia de la velocidad de giro y avance en el factor de delaminación.
[Krishnaraj, 2013]*

Valores grandes del ángulo de la punta de la herramienta influyen negativamente en la calidad del taladro. Cuando la punta de la herramienta está cerca de atravesar la última capa de refuerzo, se crea una carga de flexión en el refuerzo y un par de reacción a ambos lados del agujero; Cuanto mayor es el ángulo de punta, mayor es ese esfuerzo y mayor el par de reacción, que puede generar una fisura.

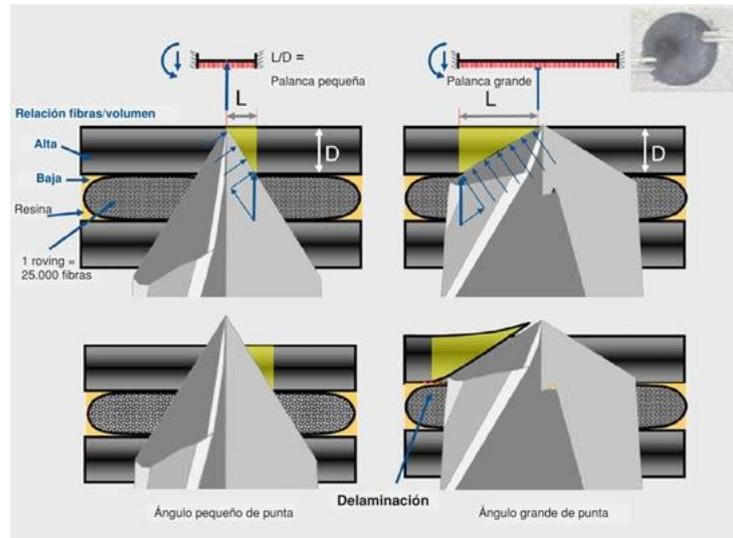


Figura 2.17: Influencia del ángulo de punta en la formación de delaminación
 [www.interempresas.net, 2012]

2.3.2.1. Tipos de delaminación

Se consideran dos tipos de daño, *peel-up* y *push-out*.

- Peel – up:** Se origina por la fuerza de empuje de tracción que la superficie de la herramienta crea al girar. Las láminas en lugar de cortarse en su posición giran en espiral y se despegan de las capas adyacentes, mientras que deslizan y ascienden por los labios de la herramienta hasta que se cortan. La fuerza que genera la delaminación es función de la geometría de la herramienta y la fricción entre la herramienta y la pieza.
 A medida que la herramienta desciende, se reduce el riesgo de fallo. En la superficie del taladro, se denota un corte basto y presencia de astillas.
 Una mayor adhesión de las capas y una velocidad de avance más lenta reduce el riesgo de fallo.
- Push – out:** Es consecuencia de la fuerza de empuje de compresión que la herramienta ejerce contra la pieza. Las láminas que están por debajo del taladro tienden a separarse rompiendo el enlace interlaminar en la zona adyacente al agujero.
 La resistencia a la deformación disminuye a medida que el grosor por mecanizar es más pequeño, por lo que el daño es más probable en esas zonas. Esto se puede atenuar colocando una placa de base en

la zona inferior o aumentando la resistencia de la resina, además reducir la velocidad de avance.

Es difícil detectar estos defectos a simple vista, se requieren métodos más avanzados, además la existencia de delaminaciones interlaminares reduce la resistencia de la pieza y aumenta el riesgo de fractura, por lo que, dependiendo de las exigencias de la pieza, puede llevar a desecharla.

En general, este tipo de daño es más dañino que el *peel-up*.

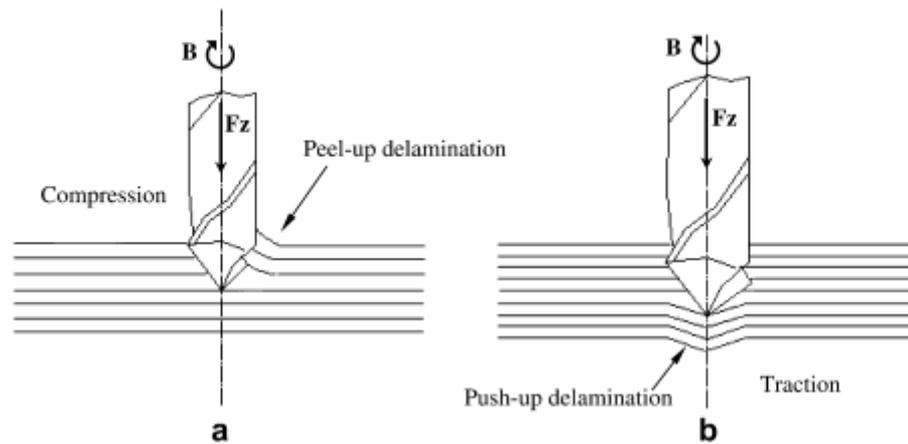


Figura 2.18: Delaminación a la entrada y salida en CFRP (Davim, 2007)

La influencia de las condiciones del mecanizado es clave en la aparición de delaminación, en especial, la fuerza de empuje. Por ello, se han propuesto modelos que determinan una teórica fuerza crítica de empuje en base a características del material o el espesor.

El más aplicado, es el propuesto por Hocheng-Dharan.

$$F_{crit} = \pi \sqrt{\frac{8G_{ic}E_1h^3}{3(1-\nu_{12}^2)}}$$

Donde h es el espesor de la pieza, E_1 el módulo elástico y G_{ic} la resistencia interlaminares a la fractura. [Hocheng, 1990]

A partir de la ecuación anterior, Hocheng y Tsao trataron de predecir la ubicación de la delaminación, determinando un valor de h correspondiente a la fuerza de empuje crítica.

Dado el carácter anisotrópico del material, determinaron que la forma típica de la delaminación es elíptica. [Hocheng, 2005]

$$h_{anisotropico} = \sqrt{\frac{4(1 - \nu_{12}\nu_{21}) E_{11}}{3G_{ic}\pi} \frac{1}{E_{22} 4E_c}}$$

Siendo E_{11} y E_{22} los módulos de Young en la dirección paralela y transversal, y E_c es el resultado de una expresión relativa al módulo de Young y el coeficiente de Poisson en diferentes direcciones

Won y Dharan determinaron que, realizando agujeros piloto con una herramienta de menor diámetro, había una gran reducción en la fuerza de empuje. Realizando la operación en dos etapas, la aparición de delaminación puede reducirse significativamente. [Dharan, 2000]

Actualmente en la industria aeronáutica, se emplean programas de mecanizado CAD/CAM capaces de variar la velocidad de corte y avance en función de la profundidad, logrando reducir las fuerzas de empuje en los niveles más críticos y consiguiendo un proceso más eficiente.

2.3.2.2. *Factor de delaminación*

La delaminación se puede cuantificar mediante un factor, habitualmente conocido como el cociente entre el diámetro máximo “ D_{max} ” de la zona delaminada y el diámetro nominal “ D_{nom} ” del agujero

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}}$$

Este factor es fácil de aplicar, pero sólo es fiable cuando la delaminación sigue un patrón regular, algo habitual en compuestos reforzados con fibra de vidrio (GFRP), pero no en los CFRP, ya que suelen presentar formas irregulares como grietas y roturas a la entrada y salida de la herramienta.

En este caso, el factor convencional no es apropiado dado que el tamaño de la grieta no es una representación fiable de la magnitud del daño.

Por tanto, es más preciso calcular un factor bidimensional, que tenga en cuenta el área delaminada.

Se denomina *factor de delaminación ajustado*, donde la primera parte es la contribución del tamaño de la grieta (el factor convencional) y la segunda la contribución del área dañada.

$$F_{da} = \alpha \frac{D_{max}}{D_{nom}} + \beta \frac{A_{max}}{A_{nom}}$$

Los factores α y β representan porcentajes, siendo $\beta = \frac{A_d}{A_{max} - A_{nom}}$, donde A_d se considera el área dañada, A_{max} el área relativa al diámetro máximo ($\pi \frac{D_{max}^2}{4}$) y A_{nom} el área relativa al diámetro nominal ($\pi \frac{D_{nom}^2}{4}$).

Por último $\alpha = 1 - \beta$

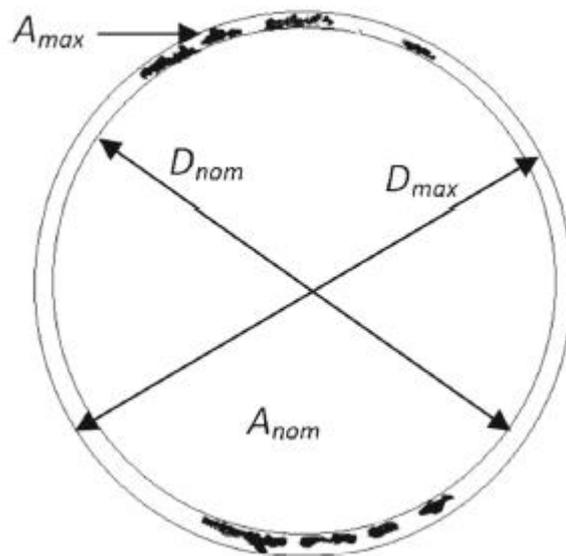


Figura 2.19. Representación de las diferentes variables en el cálculo del factor de delaminación (Al-Wandi, 2017)

2.3.3. Determinación de defectos

En este apartado, veremos los métodos más frecuentes para realizar inspecciones en elementos de fibra de carbono. Vamos a centrarnos en los ensayos no destructivos (END), que tienen mayor aplicación y son más adecuados en piezas en servicio.

2.3.3.1. *Inspección visual*

Es el método principal para realizar inspecciones, ya que la mayoría de los defectos en servicio, son visibles al ojo humano.

Según la FAA (Federal Aviation Administration) la inspección visual se define como el proceso de usar el ojo, sólo o junto a varias ayudas, como el mecanismo de detección del cual se puede hacer juicio sobre la condición de una unidad a ser inspeccionada.

Es una buena práctica para hacer una pre-inspección de la pieza en busca de objetos extraños, zonas deformadas, golpeadas, degradadas o quemadas, grietas superficiales o astillas.

Las zonas para inspeccionar deben ser limpiadas cuidadosamente sin quitar la indicación de daño ni dañar cualquier tratamiento de superficie.

Localizado el daño, se emplean linternas, lupas o espejos para evaluar con mayor precisión el área afectada

La inspección visual no permite encontrar defectos internos, que precisan otras técnicas para su inspección

2.3.3.2. *Líquidos penetrantes*

Sobre la superficie, se rocía un tinte que, por acción capilar, penetra en las grietas y poros. Tras un tiempo, se limpia la superficie y se aplica un revelador, que extrae los restos de penetrante y muestra la presencia de defectos. Para poder ver con claridad los defectos, la inspección se realiza bajo luz blanca o ultravioleta, dependiendo del tipo de revelador empleado (fluorescente o coloreado).

Válido para detectar poros o grietas superficiales. Se emplea como un complemento para la inspección visual o para determinar si es necesario una inspección más exhaustiva.

Ventajas, es un método sencillo y muy barato que no requiere apenas formación para los usuarios. Es portable, normalmente en formato de aerosol. Por el contrario, es un método cualitativo, que no permite detectar defectos internos como delaminaciones o grietas internas. Los defectos pueden camuflarse al quedar cubiertos por otros contaminantes y que no pueda entrar el penetrante, además, la pieza requiere una limpieza tras acabar la inspección.

2.3.3.3. *Tap testing*

Técnica simple que consiste en golpear la zona con un pequeño martillo o una moneda y determinar por el sonido producido (10-20 MHz) [13] la presencia de una discontinuidad.

En un área homogénea y sin defectos, el sonido debe ser nítido y claro.

Si existe un defecto, la energía del impacto se atenúa y el sonido es más apagado.

Este método no es preciso ni fiable, porque depende de la percepción del examinador, pero existen dispositivos automáticos, que permiten mostrar y registrar en tiempo real la medición, identificar los defectos y establecer su tamaño y posición.

En lugar de un martillo, tenemos un solenoide que golpea repetidas veces sobre un mismo punto. En la punta se encuentra un transductor, que registra la señal de fuerza en función del tiempo de impacto.

La duración no depende del valor de la fuerza, pero sí de la rigidez del área examinada. El sistema está calibrado sobre un área en buen estado y ante cualquier anomalía, revela la presencia de un defecto

El sistema es portable. Esta prueba es fiable en piezas de poco espesor, pero no para determinar el grado y la profundidad del daño.

Necesita realizarse en un ambiente silencioso y revela defectos internos como delaminaciones o zonas despegadas.

Es conveniente conocer la estructura interna de la pieza para una correcta interpretación de los resultados



Figura 2.20: Sistema electrónico “tap”. [<http://www.jrtech.co.uk/>, 2015]

2.3.3.4. Radiografía

Es un modo de inspección no destructivo y sin contacto, que permite obtener vistas internas del compuesto. Se emplea radiación electromagnética de onda corta (rayos X o rayos *gamma*).

Gracias a la permeabilidad del compuesto, los rayos pasan a través de la pieza y la radiación no absorbida, se registra en una película sensible o un fotosensor, mostrando los resultados en una pantalla fluorescente o en un monitor gracias a unos detectores de radiación, respectivamente.

Se pueden observar cambios de opacidad, que sugieren posibles defectos internos como delaminaciones en las esquinas, huecos y porosidades entre capas, restos de humedad, inclusiones, grietas translaminares, etc...

En general, cualquier defecto que esté paralelo al haz de rayos, puede detectarse. No así en el caso de las delaminaciones que se sitúan de forma perpendicular al haz, aunque existen métodos de tomografía computarizada o laminografía digital, que permiten la captura de diferentes planos de la pieza examinada, pudiendo procesar imágenes en 3D y analizarlas numéricamente.

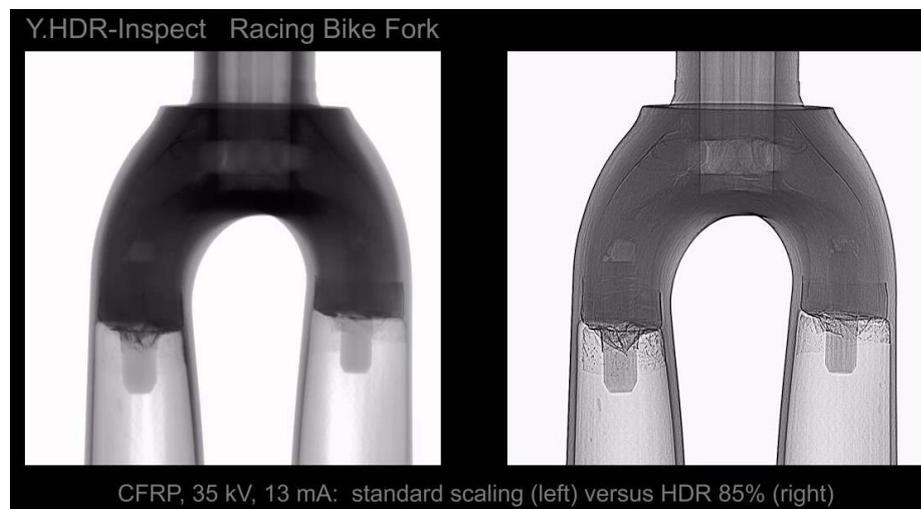


Figura 2.21. Fisuras vistas a través de una radiografía. [www.yxlon.com, 2014]

Para partes muy gruesas, es conveniente usar rayos *gamma*, ya que su longitud de onda es más corta, mientras que los rayos X, tienen más versatilidad en espesores inferiores. En piezas de grosor inferior a 5mm, se puede emplear radiografía de bajo voltaje

Requiere utilizar protecciones de plomo por parte de los operarios para evitar los efectos adversos de la exposición a los rayos. Por seguridad, no es un método recomendable cuando se examinan piezas ya montadas, por ejemplo, en aeronaves, ya que la exposición puede afectar a otros elementos.

2.3.3.5. *Ultrasonidos*

Sistema de inspección muy extendido, no destructivo y de contacto. Mediante una sonda y en dirección perpendicular a la superficie, se hace pasar a través de la zona a examinar una onda de sonido de muy alta frecuencia, generada por un transductor, que transforma pulsos eléctricos en vibraciones mecánicas para generar ondas ultrasónicas (entre 1 y 50 MHz).

Ante una discontinuidad o defecto, la onda rebota y su energía es recogida por el transductor, que vuelve a transformarla en un pulso eléctrico, cuya frecuencia se visualiza en la pantalla de un osciloscopio.

Los resultados, se examinan y comparan con otras áreas sin defectos o con patrones conocidos, Cualquier cambio en la amplitud de la señal o el tiempo estimado de regreso de la onda, indican la presencia de defectos. Además, la sonda puede determinar por la velocidad de la onda y el tiempo de ida y vuelta, en que altura se encuentra el defecto.

Es un método bastante preciso que permite detectar porosidades, huecos, delaminaciones, inclusiones, etc..., válido para espesores inferiores a 50mm. Los resultados son instantáneos y permiten realizar la inspección por una sola cara. La sonda es portable y se pueden realizar trabajos in situ. Además de localizar defectos, también es válido para medir espesores.

Por el contrario, es un equipamiento que requiere gran experiencia, habilidad y conocimientos por parte del inspector para realizar escaneos precisos y determinar los defectos.

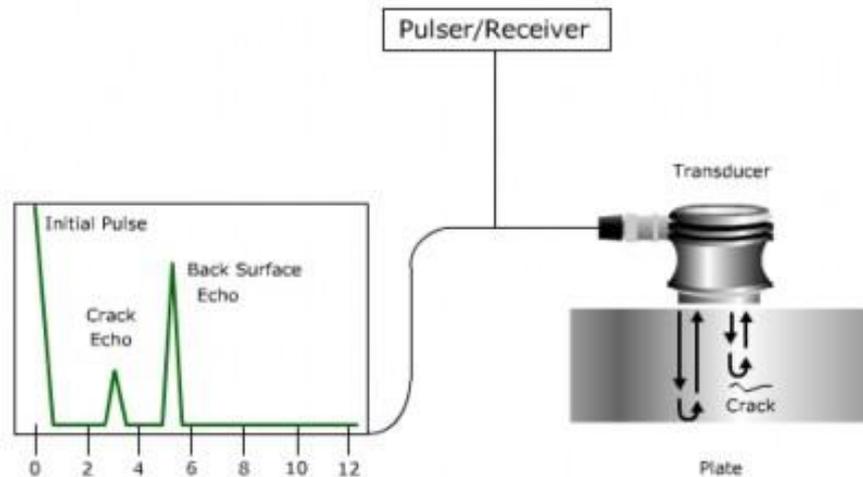


Figura 2.22 Esquema del funcionamiento del método de ultrasonidos.
 [https://enclave.cev.es, 2016]

Existe otro método sin contacto, denominado de transmisión, que emplea dos transductores a cada lado del área a examinar. Se utiliza cuando la geometría de la pieza no asegura el buen contacto y orientación del transductor.

2.3.3.6. Termografía

La inspección térmica, consiste en analizar el flujo térmico que se crea al paso del calor a través del área que deseamos inspeccionar. El flujo de calor se registra mediante cámaras de infrarrojos y se analiza a través de un software. El flujo influye directamente sobre la temperatura de la superficie que se analiza, por lo que, al atravesar el material, la presencia de una falta de homogeneidad en el material influye negativamente en la conducción del calor y esto se refleja en el registro.

Existen dos métodos de ensayo, pasivo y activo; En el método *pasivo*, el flujo de calor tiene su origen en las cargas térmicas o mecánicas de la pieza que se examina durante o después de un ciclo operativo.

En el método *activo*, la fuente de calor es externa y se aplica un flujo uniforme para detectar los defectos.

Dentro de los métodos activos, se pueden distinguir estos cuatro: *Termografía por pulsos*, *calentamiento escalonado*, *termografía de bloqueo* y *vibrotermografía*

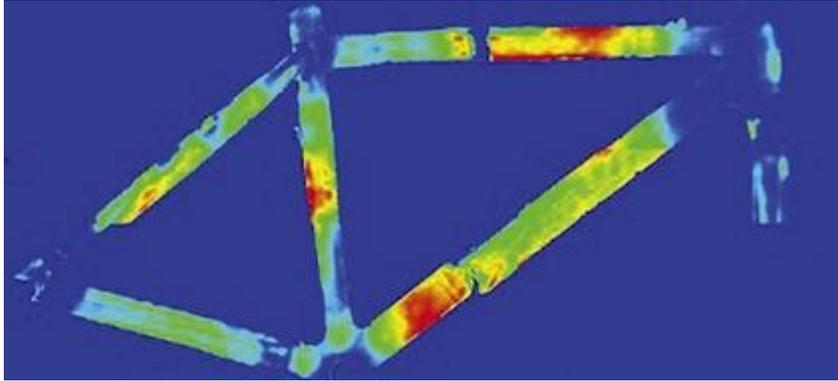


Figura 2.23. Termografía en el cuadro de una bicicleta. [<https://www.vision-systems.com>, 2011]

Se pueden identificar defectos como grietas, daños por impacto, restos de humedad o zonas con baja cantidad de resina

Es un tipo de inspección rápida, no destructiva, no precisa contacto, se puede emplear en diferentes orientaciones y no solo permite detectar la presencia de defectos, sino también su tamaño, usando técnicas termográficas activas.

Sin embargo, sólo es válida para piezas de pequeño espesor o detectar defectos poco profundos, por lo que se suele emplear para complementar otras técnicas. Las pérdidas por convección y la complejidad de la interpretación de las imágenes por las reflexiones superficiales, también limitan el uso de este tipo de inspecciones.

2.3.3.7. Corrientes inducidas

También conocido como el método de “Corrientes de Eddy”. Se inducen corrientes eléctricas y/o campos magnéticos en la pieza a inspeccionar y se analiza su comportamiento.

La presencia de un defecto crea una respuesta diferente del ruido habitual y permite identificar y caracterizar defectos superficiales e internos de hasta 0.08mm.

El carácter conductor de la fibra de carbono permite emplear este método.

Podemos determinar fibras cortadas, daños por impacto

Este ensayo, también permite conocer la orientación de las fibras y su espaciado

El método está limitado por el espesor de la pieza, no detecta defectos paralelos a la dirección del escaneo

2.3.3.8. Shearografía

La shearografía, es una técnica no destructiva, de medición de tensión mediante un sistema de óptico láser, que realiza una comparación interferométrica en una pieza en un estado de estrés y de reposo. Mientras que el láser ilumina la zona, una cámara graba la luz reflejada en ella. El software, procesa las capturas a tiempo real para analizar las variaciones de las microdeformaciones, lo que, a su vez revela defectos o discontinuidades el material.

El equipo cuenta con un sistema de iluminación láser, un interferómetro, el software y un excitador.

La deformación se induce por el excitador, que normalmente utiliza una pequeña variación térmica o de presión para inducir la carga (con una diferencia de 1°C a 4°C puede ser suficiente)

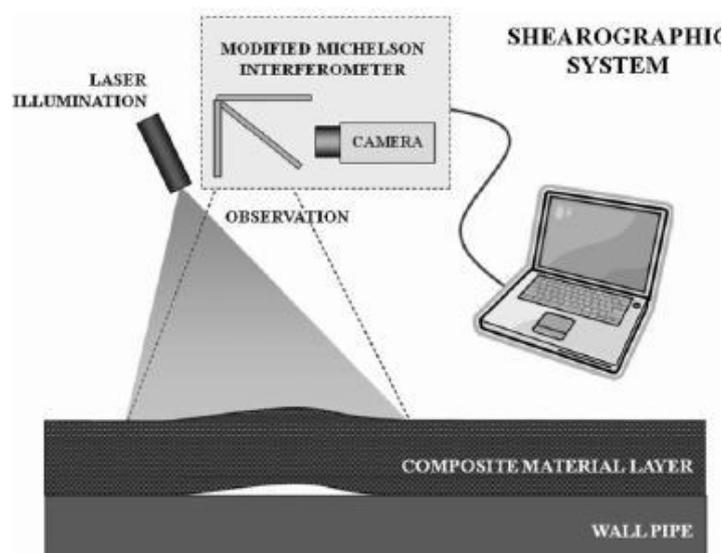


Figura 2.24. Esquema del funcionamiento de la técnica de shearografía. [www.scielo.br, 2017]

Es un método sin contacto, portable y que permite el análisis de geometrías complejas y de gran tamaño (hasta 1m² por minuto), por lo que es muy

empleada en la industria aeroespacial, automovilística o eólica. Las mediciones se realizan rápidamente, obteniendo resultados en tiempo real

Permite revelar defectos como delaminaciones o zonas despegadas.

3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

3.1. Equipo de medición

El equipo de medida que emplearemos en este proyecto es un sistema de medición tridimensional óptico, más conocido como proyector de perfiles o comparador óptico y para realizar su calibración usaremos un juego de bloques patrón longitudinales.

3.1.1. Medidora tridimensional óptica

Se trata de un medidor de dimensiones y formas por amplificación óptica, que permite la realización de medidas directas o con desplazamiento, sobre una pantalla de proyección.

Estos sistemas, comenzaron a desarrollarse a principios del siglo XX para examinar el perfil de roscas.

Aunque sus principios de funcionamiento se mantuvieron, posteriormente evolucionaron con motivo de la Segunda Guerra Mundial y el crecimiento de la industria del automóvil, mejorando su manejo, fiabilidad y exactitud en las inspecciones, siendo un elemento casi indispensable en la industria. Además, su aplicación se extendió a todo tipo de piezas susceptibles de ser examinadas. El auge de la automatización y la informática a finales de siglo, contribuyeron aún más a optimizar estos sistemas.

- Ventajas

- Se pueden visualizar y comprobar distintas dimensiones o características en la misma superficie de la pieza

- Posibilidad de usar plantillas para realizar verificaciones rápidas y fiables.

- Al no haber contacto con la pieza, la vida útil de estos sistemas es mucho mayor que la de otros instrumentos como el calibre o micrómetro, que presentan mayor desgaste.

- Ausencia de errores por presión y deformación como puede ocurrir en los instrumentos de medición por contacto.

- Mediante la automatización y el control por software, podemos realizar las inspecciones con mayor eficiencia y ayudarnos de sus múltiples funciones para conseguir mejores resultados.

- Independientemente de la posición de la pieza, podemos fijar un origen de coordenadas en cualquier punto y orientación de esta.

- Desventajas.

- No están pensados para ser portables, requieren estar en un sitio fijo debido a su elevado peso y volumen. También se necesita que la iluminación del entorno sea reducida.

- El calor que irradian las fuentes de luz, puede provocar alteraciones en las dimensiones de la pieza. Además, habitualmente estas lámparas son halógenas, que disipan mayor calor, su duración es reducida y requiere una sustitución más frecuente. Podemos reducir este efecto con lámparas led.

- Elevado coste del equipo y requiere mayor especialización por parte del usuario para manejar de forma eficaz el software.

En nuestro caso particular, contamos con un sistema de eje vertical, que se caracteriza porque la fuente de luz incide verticalmente sobre el elemento a medir, siendo los ejes X e Y para el posicionamiento del elemento, mientras que el Z es para enfoque.



Figura 3.1 Sistema de medición tridimensional DELTEC.

3.1.1.1. Componentes

El sistema consta de cuatro elementos principales: Mesa soporte, fuente de luz, grupo óptico y pantalla de visualización.

La mesa soporte tiene por objeto situar sobre el plano focal las zonas del elemento que queramos inspeccionar. Por ello, podemos desplazarla en dos direcciones (ejes X e Y).

Es de cristal, por lo que no podemos colocar objetos demasiado pesados, e incorpora en la parte inferior un sistema de iluminación diascópica (luz transmitida), que permite iluminar y proyectar las siluetas de las zonas inferiores de la pieza. Además, cuenta con unas pinzas en los extremos que nos permite fijar los elementos si fuera necesario.

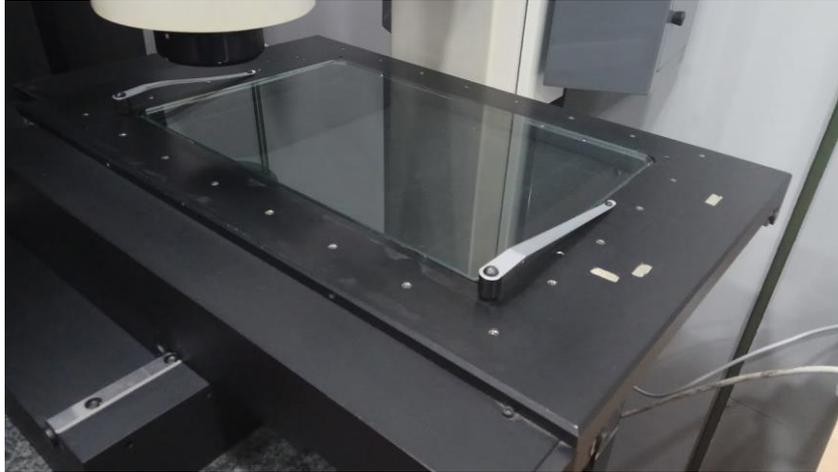


Figura 3.2. Mesa/soporte del sistema.

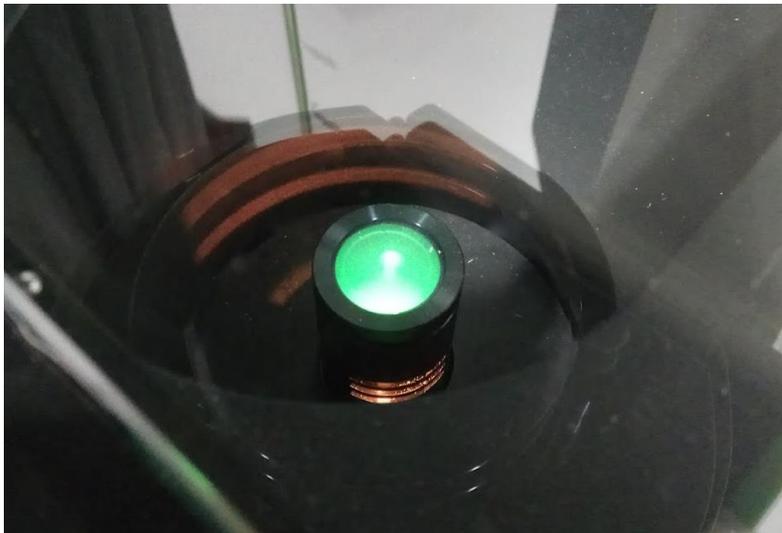


Figura 3.3. Fuente de luz diascópica.

Por encima de la mesa se sitúa el sistema óptico, que amplifica la imagen de forma fiable y cuenta con un *grupo de colimación* que transforma el haz de luz original en uno de rayos paralelos de intensidad prácticamente uniforme y de diámetro capaz de cubrir el área de trabajo donde se sitúa el objeto y el *sistema de amplificación y transmisión* de la imagen con distintas lentes para aumentar y enviar la imagen obtenida. Las ampliaciones pueden oscilar entre 5 y 200 aumentos.

El grupo se desplaza en la dirección del eje Z y mediante enfoque sobre distintas superficies, es capaz de determinar la altura existente entre ellas.



Figura 3.4. Fuente de luz episcópica.

Un sistema de iluminación episcópica (luz reflejada) rodea al grupo óptico con el objeto de iluminar la superficie de la pieza y reflejarla en la pantalla. La calidad de la imagen reflejada depende en buena medida del acabado superficial de la pieza.

Todo ello es controlado por una consola en la que podemos actuar sobre los desplazamientos o la intensidad y orientación (sólo en el caso de la iluminación episcópica) de cada iluminación. El resto de las funciones o ajustes, se realizan mediante el PC en el software de la máquina.



Figura 3.5. Mandos de ajuste y control.

Por último, hay instaladas dos pantallas TFT en las que se pueden visualizar la imagen transmitida por el sistema y la interfaz de control del software, respectivamente. Hay que tener en cuenta que el diámetro de la pantalla de visualización limita el área de la pieza que podemos observar en cada aumento, por lo que en ocasiones no podemos ver la totalidad de una zona en concreto. Una pantalla de mayor tamaño y resolución puede aumentar el potencial del sistema.

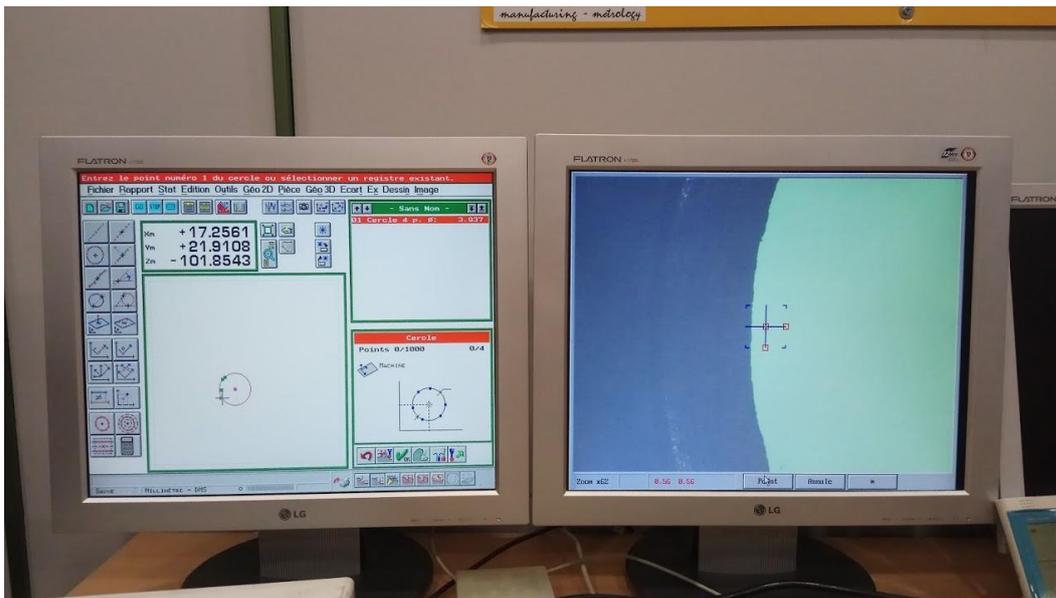


Figura 3.6. Pantallas de visualización y control.

No sólo podemos emplear este sistema para realizar mediciones dimensionales. Gracias a los aumentos del grupo óptico, también nos permite inspeccionar piezas para determinar rugosidades, grietas, poros, rebabas, etc..., así como hacer comparaciones mediante plantillas, para un rápido control sin necesidad de tomar medidas.

3.1.1.2. Características

(Según la ficha técnica):

- Marca: Delta Technologies
- Modelo: Deltec Vision 300
- Tipo: Eje vertical
- Iluminación: Diascópica, episcópica y axial. La primera una bombilla de 6V y 5W y las dos últimas, lámparas halógenas de 24V y 150W
- Resolución: 0.5 μm
- Campo de medición:
 - 300mm en eje X
 - 200mm en eje Y
 - 200mm en eje Z
- Incertidumbre en cada eje: X/Y: $\pm(4\mu\text{m} + L/250)$, Z: $\pm 5\mu\text{m}$
- Aumentos de la lente: x40, x62, x97, x152, x239
- Máxima carga admisible: 30kg
- Software: Deltec Vision V140
- Código interno: METRO-003

3.1.2. Bloques patrón longitudinales

Para realizar la calibración emplearemos un juego de 47 bloques patrón longitudinales. (BPL)

- Fabricante: Fervi
- Material: Acero
- Tolerancias según DIN 861
- Grado: 1
- Medidas nominales: 1,005 - 1,01÷1,2 - 1,3÷1,9 - 1 ÷ 9 - 10 ÷ 100 mm
- Código Interno: METRO-010



Figura 3.7. Bloques patrón empleados en el trabajo.

Los bloques se almacenan en su maletín cubiertos de una fina capa de vaselina para evitar la corrosión del acero.

3.2. Calibración del equipo de medida

La calibración que se va a realizar será de los ejes X e Y, ya que para caracterizar la delaminación con el equipo de medida que empleamos, no vamos a poder determinar delaminación interlaminar, solo la superficial. Como el espesor de las placas de fibra de carbono que tenemos es conocido y la altura no va a influir en nuestros resultados, no se considera realizar una calibración del eje vertical (eje Z).

Cómo hemos comentado anteriormente, usaremos los BPL para realizar una calibración en escala longitudinal, situados de tal forma que cubran el campo de medición de cada eje de nuestra medidora. Como la longitud del BPL más grande es inferior a la de ambos campos de medición, colocaremos varios BPL de forma continuada hasta cubrir la longitud deseada.

La calibración se realizará según el [procedimiento DI-001 para la calibración de proyectores de perfiles](#) del Centro Español de Metrología

Puesto que vamos a usar BPL, la iluminación que regularemos será la diascópica

3.2.1. Operaciones previas

- **Control de las condiciones ambientales:** La sala debe estar acondicionada y contar con un sensor de temperatura. La temperatura debe ser de $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Si la temperatura se aleja de la de referencia (20 °C), hay que aplicar una corrección
- **Limpieza y manejo de los BPL:** Los bloques deben ser manejados con guantes, en nuestro caso desechables de vinilo para evitar ensuciarlos. Para eliminar la película de vaselina o cualquier impureza, los limpiaremos exhaustivamente y con precaución usando papel absorbente y una mezcla de alcohol y éter al 50%
- **Estabilizar los equipos de medida:** Los BPL ya limpios, se sitúan cerca de la medidora, a ser posible sobre una base metálica durante al menos 3 horas, para eliminar la diferencia de temperaturas entre la medidora y los bloques
- **Mantener apagada la fuente de luz durante la manipulación:** Debido a la iluminación halógena, el calor que irradia puede aumentar la temperatura de los bloques y con ello afectar a la medición. Por tanto, las mediciones hay que realizarlas rápidamente

3.2.2. Procedimiento de la calibración

Sobre la mesa soporte colocamos los BPL adhesiónados hasta cubrir la medida deseada y los rotamos sobre el eje perpendicular de la mesa hasta que sus caras queden completamente enrasadas con la línea reticular de la pantalla de visualización. Para un adecuado alineamiento, se debe tener el enfoque y zoom correctamente ajustado.

Facilitamos el enrase, colocando un bloque ajustado al borde del cristal, como se muestra en la figura 3.8. Después se desplaza la mesa en la dirección perpendicular al eje a calibrar y en ambos sentidos, mientras comprobamos en la pantalla de visualización la inclinación de la arista respecto a la retícula. Ajustamos el bloque hasta que la retícula y la arista sean prácticamente paralelas.

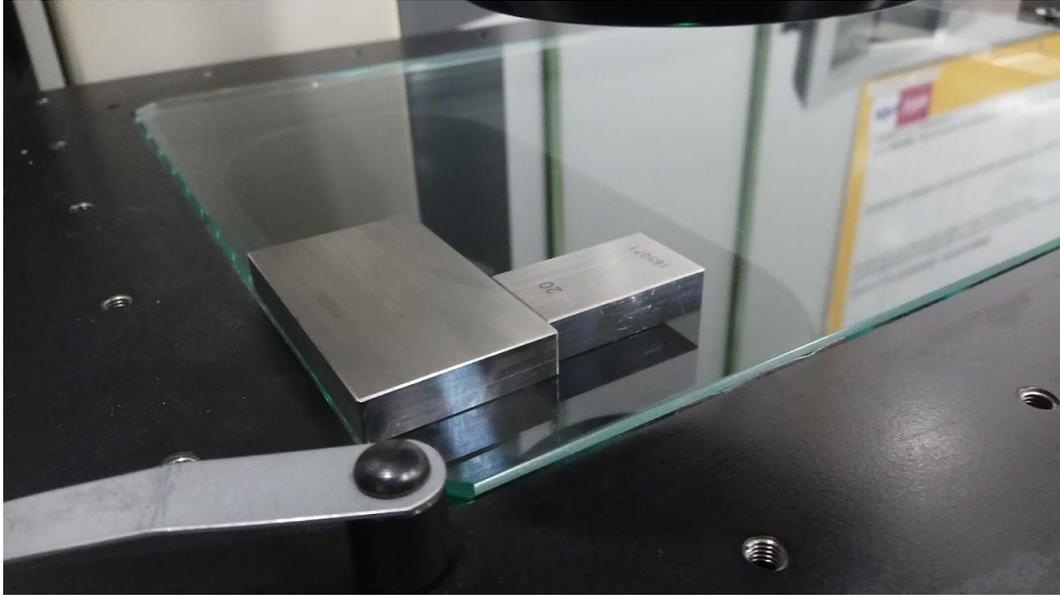


Figura 3.8. Enrase de los bloques

El primer bloque se enrasa de tal forma que una de sus caras coincida con el primer milímetro del campo de medida, haciendo el “cero” ahí.

Desplazamos la mesa en el eje que estemos calibrando hasta enrasar en la cara opuesta del bloque y anotamos la medida. Después realizamos otra medición en sentido opuesto, tomando como origen la cara anterior. Para eliminar las pequeñas holguras existentes en los husillos al cambiar de dirección, conviene superar la cara opuesta en la primera medición y luego hacer “cero” en la cara de inicio de la medición al cambiar el sentido. Este proceso lo realizaremos 10 veces (5 en cada sentido) para cada campo de medición.

En cada medición, anotamos también la temperatura del entorno de los bloques y la fuente de luz.

Para determinar la medición, emplearemos la función de “distancia” en el software Deltec. Mediante el joystick, seleccionamos un punto en una arista del bloque y después, en la arista opuesta, tomamos dos puntos. De esta forma, el software calcula la distancia en la perpendicular del primer punto a la recta formada por los otros dos puntos.

Al obtener un punto, este se ilumina con una “cruceta” para ver su posición, así podemos confirmar o descartar ese punto.

Para tomar los puntos, lo hacemos con el modo automático, pero debemos ajustar la iluminación, el enfoque y el aumento, para una lectura más precisa.

En esta toma de medidas, hemos empleado el aumento de 40x y en cada punto de calibración se activaba la opción “autofocus” para ajustar el enfoque del grupo óptico automáticamente y así tener una referencia más precisa de las aristas.

La iluminación se ajustó en torno a un 80%, con valores más bajos los puntos que se obtenían eran dispersos y poco fiables. Para valores cercanos al máximo, la reflexión de la luz en las caras rectificadas reducía el contraste y teníamos un efecto contrario al buscado, además de que, al emplear más potencia, la bombilla disiparía más calor y elevaría con más velocidad la temperatura del patrón.

En cada medición, se ha procurado escoger puntos diferentes para no obtener siempre resultados similares.

3.2.3. Toma y tratamiento de los datos

Según el procedimiento del CEM y para calibración de ejes de medida longitudinales, denominamos:

- l_{ji} a la medida i -ésima en el punto de calibración j -ésimo, para el eje X o Y que estamos calibrando. En nuestro caso, será la lectura en la pantalla de comandos.
- n el número de repeticiones en cada punto de calibración
- $l_{pj_{20}}$ a la dimensión nominal indicada en el certificado del patrón a 20°C para el punto j
- α_p el coeficiente de dilatación lineal para el material de nuestro patrón. En nuestro caso, acero ($11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

Calcularemos la media de cada punto de calibración (\bar{l}_j) y la dimensión del BPL o su composición en cada punto, para el valor medio de la temperatura de calibración $l_{pj_t} = l_{pj_{20}} + [1 + \alpha_t(t - 20)]$, siendo t el valor medio de la temperatura inicial y final.

El valor D_{l_j} es la diferencia entre la medida del bloque con la corrección de temperatura y la media, para cada punto de calibración.

También calcularemos la desviación típica de repetibilidad (s_j^2)

Posteriormente realizaremos el cálculo de incertidumbres.

Para ello calcularemos una serie de contribuciones, con el fin de obtener una incertidumbre máxima en todo el campo de medida.

- *Repetitibilidad:*

$$u_{1,2} = \frac{s_j}{n}$$

- *Resolución del equipo:* Teniendo en cuenta la resolución longitudinal e del equipo y considerando el máximo error posible cometido debido a la resolución es $\frac{e}{2}$.

$$u_{1,2} = \frac{e}{\sqrt{6}}$$

- *Patrones:* Correspondiente al $u_{certificado}$ indicado en el certificado de calibración de los bloques.

$$u_2 = \frac{u_{certificado}}{k}$$

Como tenemos varios puntos de calibración en los que hemos empleado composición de bloques, en este caso aplicamos la siguiente ecuación.

$$u_2 = \sqrt{\sum \left(\frac{u_{certificado\ i}}{k_i} \right)^2}$$

- Por desconocimiento del *coeficiente de dilatación*, dentro

de una variación de temperatura Δt °C ($\Delta t = t - 20$)

$$u_3 = l_{pj20} \Delta t \left(\frac{\delta a_p}{\sqrt{3}} \right)$$

Donde δa_p es 1×10^{-6} °C⁻¹

- Incertidumbre en longitud, debida a la *variación de la temperatura del patrón*, en el inicio y final de cada punto de calibración:

$$u_4 = l_{pj20} \alpha t \left(\frac{\delta t}{2\sqrt{3}} \right)$$

Siendo $\delta t = t_f - t_i$

- Incertidumbre en longitud, debida a la incertidumbre en el conocimiento de t , por causa de la *incertidumbre de medida del termómetro utilizado*.

$$u_5 = l_{pj20} \alpha t \left(\frac{U_t}{k} \right)$$

El valor de U_t lo obtenemos del certificado de calibración del termómetro

La **incertidumbre combinada**, la podemos expresar como:

$$u_c(y)_j = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$$

Mientras que la **incertidumbre expandida**, tiene esta forma:

$$U_j = k * u_c(y)_j$$

$$= k * \sqrt{\left(\frac{s_j^2}{n} + \frac{e^2}{6} + \left(\frac{u_{\text{certificado}}}{k} \right)^2 + \left(l_{pj_{20}} \Delta t \left(\frac{\delta a_p}{\sqrt{3}} \right) \right)^2 + \left(l_{pj_{20}} \alpha t \left(\frac{\delta t}{2\sqrt{3}} \right) \right)^2 + \left(l_{pj_{20}} \alpha t \left(\frac{U_t}{k} \right) \right)^2 \right)}$$

La incertidumbre combinada “u” caracteriza la calidad de las medidas con el fin de establecer un intervalo (y-u, y+u) en el interior del cual pueda esperarse encontrar, con alta probabilidad, los infinitos valores que razonablemente pueden ser atribuidos al mensurando.

La probabilidad de que el valor verdadero del mensurando esté dentro de dicho intervalo es baja ya que, en el supuesto de que la función de distribución del mensurando “y” sea una función normal, estamos hablando de un 68,3%.

Para aumentar la probabilidad hasta valores más útiles de cara a la toma de decisiones, se multiplica la incertidumbre combinada por la constante “k” denominada factor de cobertura, para obtener la incertidumbre expandida.

En nuestro caso, es previsible obtener una distribución normal, ya que cumple el *criterio de normalidad*, por el cual tenemos tres o más contribuciones a la incertidumbre combinada que siguen una distribución normal y que cumplen los requisitos del Teorema Central del Límite.

Nuestras contribuciones que siguen una distribución normal son la repetibilidad, la debida a los patrones utilizados y la debida a la incertidumbre de medida del termómetro.

Además, hemos realizado 10 repeticiones en cada punto de calibración con el fin de cumplir el *criterio de fiabilidad*.

Por todo ello, emplearemos un factor de cobertura K=2, que nos proporciona un nivel de confianza del 95%.

3.2.4. Calibración

- **Datos iniciales:**

Las incertidumbres de los BPL las hemos obtenido del certificado de calibración de éstos.

BPL empleados (mm)	INCERTIDUMBRE EXPANDIDA BPL (μm)
20	0,1
30	0,19
40	0,19
60	0,1
70	0,15
80	0,3
90	0,38
100	0,28

Tabla 3.1. Incertidumbre BPL

La incertidumbre del termómetro con código “E1/136”, tiene el valor de $U_t=0,2$ °C, registrado en el certificado de calibración de éste.

En la ficha técnica de la medidora tridimensional, encontramos el valor de la resolución “e” = $0,5$ μm . En caso de no haber podido encontrar ese dato, habríamos usado el valor 1 μm , frecuentemente empleado.

- Calibración del eje X

Eje X										
Campo de medida = 300mm										
Temperatura inicial (°C) t_i	20,60	20,50	20,40	20,60	20,40	20,50	20,70	20,80	20,80	20,70
Longitud Nominal (mm)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
Composición BPL (mm)	30	60	90	30+90	60+90	100+80	100+80+30	100+80+60	100+80+60+30	90+80+70+60
Resultados (mm) l_{ij}	30,001	60,009	90,024	120,011	150,013	180,025	210,045	240,032	270,017	300,019
	30,000	60,007	90,021	120,010	150,011	180,025	210,044	240,029	270,019	300,020
	30,004	60,007	90,017	120,013	150,013	180,028	210,037	240,031	270,022	300,015
	29,999	60,007	90,018	120,010	150,012	180,024	210,039	240,029	270,022	300,014
	30,001	60,006	90,019	120,013	150,013	180,026	210,039	240,031	270,019	300,019
	30,003	60,005	90,020	120,008	150,013	180,029	210,038	240,028	270,021	300,014
	30,002	60,004	90,018	120,012	150,012	180,026	210,040	240,031	270,024	300,019
	30,005	60,006	90,015	120,006	150,011	180,026	210,037	240,029	270,021	300,021
	30,004	60,005	90,015	120,010	150,012	180,022	210,038	240,031	270,023	300,018
	30,005	60,004	90,016	120,008	150,012	180,026	210,038	240,028	270,020	300,014
Valor medio (mm) \bar{l}_j	30,002	60,006	90,018	120,010	150,012	180,026	210,040	240,030	270,021	300,017
Desviación típica (μm) s_j^2	2,119	1,563	2,830	2,283	0,789	1,947	2,799	1,449	2,098	2,751
Temperatura final (°C) t_f	20,50	20,40	20,70	20,40	20,50	20,80	20,70	20,60	20,80	20,60
Temperatura media (°C) t	20,55	20,45	20,55	20,50	20,45	20,65	20,70	20,70	20,80	20,65

Tabla 3.2. Calibración eje X

Eje X			
Valor certificado Patrón $l_{pj_{20}}$ (mm)	Media \bar{l}_j (mm)	Valor corregido patrón l_{pj_t} (mm)	CORRECCIÓN Dl_j (μm)
30	30,002	30,00019	2,210250
60	60,006	60,00031	5,689500
90	90,018	90,00057	17,730750
120	120,010	120,00069	9,410000
150	150,012	150,00078	11,423750
180	180,026	180,00135	24,354500
210	210,040	210,00169	37,809500
240	240,030	240,00193	27,968000
270	270,021	270,00248	18,316000
300	300,017	300,00224	15,057500

Tabla 3.3. Calibración eje x

Eje X										
Punto de calibración	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
$u_{certificado}$ (μm)	0,190	0,100	0,380	0,425	0,393	0,410	0,452	0,422	0,463	0,517
s_j (μm)	2,119	1,563	2,830	2,283	0,789	1,947	2,799	1,449	2,098	2,751
e (μm)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
l_{pj20} (mm)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
Δt (°C)	0,55	0,45	0,55	0,5	0,45	0,65	0,7	0,7	0,8	0,65
$\Delta\alpha_p$ (°C ⁻¹)	1×10^{-6}									
α_p (°C ⁻¹)	$11,5 \times 10^{-6}$									
δt (°C)	-0,10	-0,10	0,30	-0,20	0,10	0,30	0,00	-0,20	0,00	-0,10
U_t (°C)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
CONTRIBUCIONES										
$\frac{s_j^2}{n}$	0,44889	0,24444	0,80111	0,52111	0,06222	0,37889	0,78333	0,21000	0,44000	0,75667
$\frac{e^2}{6}$	0,04167	0,04167	0,04167	0,04167	0,04167	0,04167	0,04167	0,04167	0,04167	0,04167
$\left(\frac{u_{certificado}}{k}\right)^2$	0,00903	0,00250	0,03610	0,04513	0,03860	0,04210	0,05113	0,04460	0,05363	0,06673
$\left(l_{pj20} \Delta t \left(\frac{\delta \alpha_p}{\sqrt{3}}\right)\right)^2$	9,075E-11	2,430E-10	8,167E-10	1,200E-09	1,519E-09	4,563E-09	7,203E-09	9,408E-09	1,555E-08	1,267E-08
$\left(l_{pj20} \alpha t \left(\frac{\delta t}{2\sqrt{3}}\right)\right)^2$	9,919E-11	3,968E-10	8,034E-09	6,348E-09	2,480E-09	3,214E-08	0,000E+00	2,539E-08	0,000E+00	9,919E-09
$\left(l_{pj20} \alpha t \left(\frac{U_t}{k}\right)\right)^2$	2,860E-09	1,144E-08	2,574E-08	4,575E-08	7,149E-08	1,029E-07	1,401E-07	1,830E-07	2,316E-07	2,860E-07

INCERTIDUMBRE										
u_c	0,70681	0,53723	0,93748	0,77968	0,37748	0,68019	0,93602	0,54430	0,73164	0,93009
U_j	1,41362	1,07445	1,87497	1,55936	0,75495	1,36038	1,87203	1,08861	1,46327	1,86017

Tabla 3.4. Resultados de la calibración del eje x

- Calibración del eje y

Eje Y										
Campo de medida = 200mm										
Temperatura inicial (°C) t_i	20,9	21	20,8	20,7	20,7	20,6	20,5	20,6	20,5	20,4
Longitud Nominal (mm)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Composición BPL (mm)	20	40	60	80	100	100+20	100+40	100+60	100+60+20	100+60+40
Resultados (mm) I_j	20,003	40,001	60,005	80,005	100,004	120,006	140,004	160,002	180,015	200,028
	20,000	40,002	60,004	80,005	100,001	120,005	140,000	160,001	180,010	200,026
	20,001	39,998	60,003	80,006	99,997	120,005	140,005	160,005	180,012	200,027
	20,000	39,998	60,009	80,000	100,002	120,006	140,017	160,004	180,013	200,025
	20,000	40,003	60,006	80,004	100,002	120,019	140,004	160,007	180,012	200,026
	20,001	40,001	60,005	80,003	99,999	120,006	140,006	160,001	180,016	200,024
	20,001	40,000	60,006	80,004	99,999	120,005	140,005	160,002	180,014	200,025
	20,002	40,006	60,004	80,002	99,996	120,007	140,004	160,003	180,015	200,024
	20,000	40,005	60,010	80,003	99,999	120,006	140,003	160,004	180,015	200,027
	19,998	39,999	60,006	80,004	99,999	120,004	140,005	160,003	180,012	200,025
Valor medio (mm) \bar{I}_j	20,001	40,001	60,006	80,004	100,000	120,007	140,005	160,003	180,013	200,026
Desviación típica (μm) s_j^2	1,350	2,751	2,201	1,713	2,440	4,332	4,423	1,874	1,897	1,337
Temperatura final (°C) t_f	20,8	20,8	20,8	20,6	20,5	20,6	20,6	20,5	20,4	20,5
Temperatura media (°C) t	20,85	20,9	20,8	20,65	20,6	20,6	20,55	20,55	20,45	20,45

Tabla 3.5. Calibración eje Y

Eje Y			
Valor certificado Patrón $l_{pj_{20}}$ (mm)	Media \bar{l}_j (mm)	Valor corregido patrón l_{pj_t} (mm)	CORRECCIÓN D_{l_j} (μm)
20	20,0006	20,00020	0,40450
40	40,0013	40,00041	0,88600
60	60,0058	60,00055	5,24800
80	80,0036	80,00060	3,00200
100	99,9998	100,00069	-0,89000
120	120,0069	120,00083	6,07200
140	140,0053	140,00089	4,41450
160	160,0032	160,00101	2,18800
180	180,0134	180,00093	12,46850
200	200,0257	200,00104	24,66500

Tabla 3.6. Calibración eje Y

Eje Y										
Punto de calibración	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$u_{certificado}$ (µm)	0,190	0,100	0,100	0,300	0,280	0,297	0,338	0,297	0,314	0,353
s_j (µm)	1,350	2,751	2,201	1,713	2,440	4,332	4,423	1,874	1,897	1,337
e (µm)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
l_{pj20} (mm)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Δt (°C)	0,85	0,9	0,8	0,65	0,6	0,6	0,55	0,55	0,45	0,45
$\Delta\alpha_p$ (°C ⁻¹)	1×10^{-6}									
α_p (°C ⁻¹)	11.5×10^{-6}									
δt (°C)	-0,1	-0,2	0	-0,1	-0,2	0	0,1	-0,1	-0,1	0,1
U_t (°C)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
CONTRIBUCIONES										
$\frac{s_j^2}{n}$	0,18222	0,75667	0,48444	0,29333	0,59556	1,87667	1,95667	0,35111	0,36000	0,17889
$\frac{e^2}{6}$	0,04167	0,04167	0,04167	0,04167	0,04167	0,04167	0,04167	0,04167	0,04167	0,04167
$\left(\frac{u_{certificado}}{k}\right)^2$	0,00903	0,00250	0,00250	0,02250	0,01960	0,02210	0,02863	0,02210	0,02460	0,03113
$\left(l_{pj20} \Delta t \left(\frac{\delta a_p}{\sqrt{3}}\right)\right)^2$	9,633E-11	4,320E-10	7,680E-10	9,013E-10	1,200E-09	1,728E-09	1,976E-09	2,581E-09	2,187E-09	2,700E-09
$\left(l_{pj20} \alpha t \left(\frac{\delta t}{2\sqrt{3}}\right)\right)^2$	4,408E-11	7,053E-10	0,000E+00	7,053E-10	4,408E-09	0,000E+00	2,160E-09	2,821E-09	3,571E-09	4,408E-09
$\left(l_{pj20} \alpha t \left(\frac{U_t}{k}\right)\right)^2$	1,271E-09	5,084E-09	1,144E-08	2,033E-08	3,177E-08	4,575E-08	6,228E-08	8,134E-08	1,029E-07	1,271E-07

INCERTIDUMBRE										
u_c	0,48261	0,89489	0,72706	0,59791	0,81045	1,39299	1,42371	0,64411	0,65289	0,50168
U_j	0,96522	1,78979	1,45411	1,19583	1,62089	2,78599	2,84743	1,28822	1,30578	1,00336

Tabla 3.7 Resultados de la calibración del eje Y

Finalmente tomamos como válida una incertidumbre de calibración ampliada, con el fin de simplificar la aplicación de las correcciones. De esta forma tenemos una incertidumbre global referida a la máxima desviación en cada campo de medida, en valor absoluto.

$$U = U_{j \max} + |D_{j \max}|$$

	Eje X	Eje Y
$D_{j \max}$ (μm)	37,80950	24,66500
$U_{j \max}$ (μm)	1,87497	2,84743

Tabla 3.8. Resultados finales de la calibración

Los valores obtenidos han sido:

$$U \text{ (en el eje X)} = 40 \text{ } (\mu\text{m}) \text{ (para K=2)}$$

$$U \text{ (en el eje y)} = 28 \text{ } (\mu\text{m}) \text{ (para K=2)}$$

NOTA: Esta calibración se realizó empleando el mismo aumento (40x) y método de detección automático que en los procesos posteriores.

3.3. Procedimiento y análisis de datos

3.3.1. Material

Para realizar la toma de datos, haremos uso de una placa de fibra de carbono empleada anteriormente en el Trabajo Fin de Grado: *Análisis del taladrado de fibra de carbono: Fuerzas de corte y delaminación*, de Javier Pastor.

Esta placa tiene un espesor de 4 mm y está compuesta por un tejido continuo y una resina de tipo epoxi. La alineación de las capas es de 45° entre sí. En las superficies posterior e inferior de la placa, encontramos un acabado superficial diferente debido al proceso de curación. Esto es importante mencionarlo como veremos más adelante.

En la placa se realizaron 90 taladros de 6mm de diámetro, repartidos en 9 filas y 10 columnas, habiendo empleado diferentes herramientas y condiciones de corte en cada fila.

Durante las mediciones, la placa se manejaba con cuidado para evitar mayores daños en las zonas delaminadas y astilladas que pudieran causar errores en el trabajo. Así mismo, se guardaba en una bolsa de plástico para aislarla del polvo y humedad.

3.3.2. Software Deltec Vision V140

Las características de este programa nos permiten medir de forma aproximada los diámetros de los agujeros de la placa. Mediante la opción de medición “Circunferencia”, nos habilita el control del cursor para tomar puntos de los agujeros.

Este paso se complicaba debido a algunas dificultades;

En primer lugar, existen diferentes modos para localizar puntos que, a efectos prácticos, se dividen en manual y automático.

Con el modo manual podemos dar un punto desplazando el cursor hasta donde nosotros queramos, lo que implica un cierto error por parte del usuario del programa.

Con los modos automáticos, el software determina un punto (o varios) por diferencia de contrastes entre dos superficies dentro de un área que podemos

ajustar y seleccionar, pero debido a las irregularidades de la superficie, los límites del agujero no quedan claros, habiendo diversos contrastes, por lo que el software tenía problemas para determinar puntos.

Además, la presencia en capas inferiores de zonas astilladas y fibras sin cortar que quedan dentro del área del agujero dificultaba la detección de puntos fiables.

A pesar de ser una placa uniforme, las irregularidades en el contorno de los agujeros obligaban a ajustar frecuentemente el enfoque de la lente durante la medición de un solo agujero para mejorar la toma de puntos.

Este enfoque se puede ajustar automáticamente mediante la opción “Autofocus”, pero en nuestro análisis no ha funcionado como cabría esperar, posiblemente provocado por las irregularidades en la superficie y, las astillas y fibras presentes en capas inferiores, por lo que se ha empleado con más frecuencia el enfoque manual.

Otro problema ha sido ajustar la iluminación para conseguir las mejores capturas de puntos por parte del sistema. No siempre se han empleado los mismos valores, pues en agujeros con mayor delaminación, el haz de la iluminación episcópica reflejaba con más intensidad en la lente y había poco contraste entre la placa y el agujero, iluminado por la parte inferior por la luz diascópica. Al no haber un fuerte contraste entre las diferentes áreas, el sistema detectaba puntos erróneos y poco ajustados.

En el caso de la iluminación diascópica sucedía algo similar, el haz reflejaba en las paredes con mucha rugosidad y era necesario reducir la intensidad para tener mejores capturas de puntos.

En general, para agujeros con un nivel medio-bajo de delaminación, se ha empleado una intensidad entre el 80/90% para el haz de luz episcópica y un 60/65% en el caso de la iluminación diascópica.

En agujeros con mayor daño, reducíamos la iluminación a valores de 70/80% y 50/60 %, respectivamente.

Después de estudiar las características de cada “Modo de Detección” y hacer diversas pruebas, se determinó usar el modo “Multipuntos”.

Este modo permite ajustar la geometría de una “mira” o ventana para detectar automáticamente una serie de puntos dentro del recinto que queda dentro de la mira, que deben pertenecer al contorno de la figura geométrica que estamos analizando.

El número de puntos que se obtienen por selección depende del parámetro “densidad de puntos” y del tamaño de la selección que ajustamos, así que, en cada selección, el número de puntos que obtendremos será variable.

Tras realizar las selecciones, el sistema calcula el diámetro mediante el método de mínimos cuadrados y nos muestra el valor del diámetro y el error, como la distancia del punto más alejado al diámetro calculado.

Otra característica de este modo de detección es que permite seleccionar la dirección de detección. Este parámetro se cambiaba en cada selección para conseguir puntos fiables ya que, si la dirección de detección iba desde el interior al exterior del agujero, los puntos que se solían dar eran referentes a rebabas, fibras no cortadas o astillas, dando lugar a diámetros erróneos en algunos casos inferiores al diámetro nominal.

En la figura 3.9 se muestra una captura del momento en el que se realiza una detección, indicando los puntos obtenidos, la dirección de detección y el tamaño de la selección

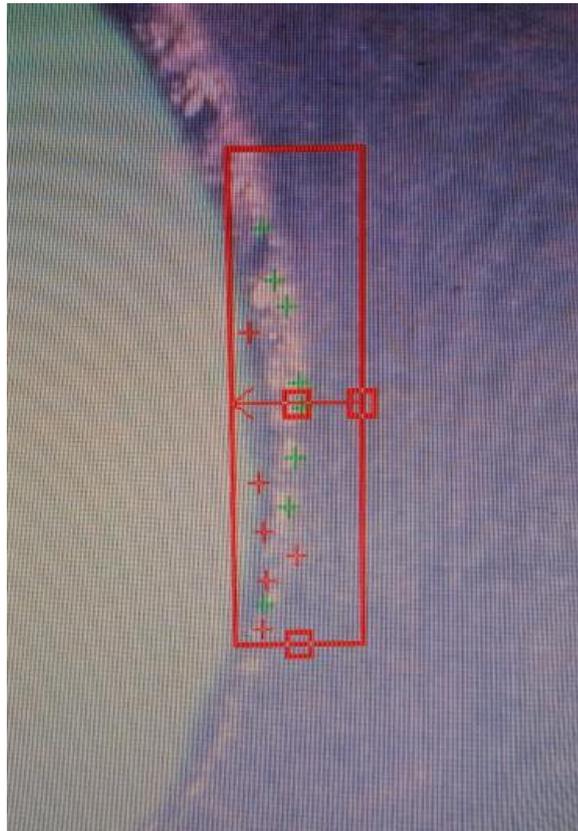


Figura 3.9. Ventana en modo de detección.

Se realizaban entre cuatro y seis selecciones por agujero, dependiendo del daño que hubiera. En un agujero con un daño ligero, pocas astillas y donde la circunferencia quedase bien definida, con realizar cuatro selecciones con un tamaño de selección más grande, era suficiente.

Sin embargo, en agujeros con mayores daños, había que reducir el tamaño de selección para conseguir puntos de las zonas más definidas y hacer más selecciones.

Esto ocurría porque el sistema detectaba puntos muy dispersos en zonas de mayor daño, al haber mucha variedad de contrastes y poca uniformidad en la superficie.

Se determinaron valores muy bajos, dado que un aumento de la densidad aparentemente acarrearía un menor filtrado en las condiciones de la captura y con ello, puntos más alejados o dispersos de los buscados.

Al elegir un área de selección grande, también aumentaban las probabilidades de que el sistema detectara puntos alejados del contorno que acarrearían un mayor error en la medición.

A pesar de ello, era más rentable realizar de nuevo las selecciones, reducir el área y/o realizar una o dos selecciones más, antes que emplear otros métodos que detectaban punto a punto, dado que el tiempo empleado en la medición se elevaba demasiado.

Hay que añadir que las mediciones se hicieron con el menor aumento de la lente de 40x, para tener una percepción más amplia de los agujeros y su periferia.

3.3.3. Software ImageJ

Al comenzar este proyecto, la idea era usar como herramienta principal, únicamente el comparador óptico junto con el software Deltec, pero a medida que se avanzaba sobre el trabajo y se analizaban las posibilidades de ese sistema, se denotaban carencias que podían complicar y limitar los siguientes pasos, para finalmente obtener unos resultados y conclusiones poco sólidos.

El software Deltec V140 solo es capaz de calcular dimensiones de longitud como el lado de un polígono o el diámetro de un círculo, por tanto, en nuestro caso particular, sólo podríamos calcular los diámetros máximos de los agujeros en la placa.

A la hora de calcular el factor de delaminación, esta característica implica que solo podríamos emplear el factor que relaciona diámetros ($F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}}$)

No sería adecuado emplear ese factor en este trabajo, ya que los agujeros de la placa no presentan patrones regulares y es frecuente encontrarse agujeros con diámetros máximos similares, pero zonas visiblemente más dañadas en su perímetro, con un mayor nivel de delaminación.

Era más adecuado realizar los cálculos sobre el factor de delaminación ajustado ($F_{da} = \alpha \frac{D_{max}}{D_{nom}} + \beta \frac{A_{max}}{A_{nom}}$) que tiene en cuenta en los términos α y β , la contribución del área dañada respecto a la relación de diámetros.

Llegados a este punto, se necesitaba encontrar un sistema que permitiera determinar esa área. Tras analizar las imágenes tomadas de los agujeros mediante el comparador óptico, se podía observar que las zonas dañadas, al iluminarse con haz de luz episcópica, se distinguían del resto de la capa superficial de la placa.

Las zonas con fibras que no se cortan de forma limpia y son arrancadas, se muestran con un tono más oscuro y brillante. Estas fibras pertenecen a capas interlaminares, ya que solo pueden verse cuando las capas superiores se han arrancado.

Por otro lado, las fibras sin cortar pero que, por la acción de la fuerza de empuje vertical, se han separado de las capas adyacentes, presentan un contraste más claro que la superficie sin daños. Además, se puede observar, especialmente en las capas que más se han separado, el contorno de la zona delaminada.

Estas zonas se denominaron de “Tipo I” y “Tipo II”, respectivamente.

En la siguiente imagen, se muestran las dos zonas que hemos distinguido anteriormente, determinadas en un agujero de los analizados.



Figura 3.10. Distinción de las zonas o áreas mencionadas.

Hay que destacar que estas conclusiones sobre el contraste de las zonas dañadas se han dado para la placa de fibra de carbono que hemos empleado en el proyecto. En otra placa con diferente composición, orientación de fibras o relación fibra/matriz, no se puede asegurar que se comporte del mismo modo al iluminarse. Habría que analizar placas de diferentes características para llegar a alguna conclusión.

Tras haber determinado cómo se podrían distinguir las áreas delaminadas, era necesario encontrar un software que permitiera cuantificar el valor del área en esas zonas.

Este fue el denominado *ImageJ*, un software de análisis y procesamiento de imagen digital de descarga gratuita que cuenta con una interfaz sencilla y numerosas funcionalidades y complementos.

3.3.4. Procedimiento de análisis

En este apartado se comentan y explican detalladamente los pasos a seguir durante el análisis de delaminación con el proceso que hemos seguido.

3.3.4.1. Medición de los diámetros

El primer paso fue determinar los diámetros de los agujeros, mediante el uso de la medidora tridimensional y el software *Deltec Vision*. Identificamos los agujeros por un número y una letra, que hacían referencia respectivamente,

a la fila y la columna en la que estuvieran situados. Por ejemplo, 9F, 3D, 1A, etc...

Con las condiciones y parámetros ya mencionados antes, se hicieron y guardaron dos mediciones por cada uno de los noventa agujeros, para después tomar el valor medio del diámetro. Del mismo modo tomamos los valores del error, por si podían ser útiles a lo largo del estudio.

3.3.4.2. *Capturas y acondicionamiento de las imágenes*

La siguiente operación, era realizar capturas de imagen transmitidas por la medidora, de los agujeros y su periferia. En este punto, hubo otro problema debido al aumento de la lente y la resolución de la pantalla.

El menor de los aumentos de **40x** unido a la resolución de la pantalla de visualización que aparentemente no permitía modificarse, hacía que los agujeros de 6mm, quedaran prácticamente enrasados en la vertical de la visualización de la pantalla, por lo que, de una captura, no era posible obtener una imagen de tamaño suficiente para poder analizar todas las posibles áreas delaminadas de la superficie.

Por tanto, se optó por realizar dos o cuatro capturas (según fuera necesario) centradas en una posición más alejada del centro, de tal forma que se pudieran apreciar todas las zonas dañadas, para después solapar las distintas imágenes y así tener una única imagen con la que trabajar y tener una visión global del agujero y la periferia.

Esta labor se hizo usando el software de edición de imagen *Adobe Photoshop 2014*, que permite superponer las capturas y ajustarlas con precisión para que estén alineadas del mismo modo que si se hubiera tomado una única imagen de mayor tamaño.

Cada captura tiene una resolución aproximada de 756x550 pixels, siendo el ancho el lado más grande, suficiente para los agujeros con menos daños donde solo es necesario tomar dos capturas en la dirección horizontal.

En los más dañados o que presentaran áreas delaminadas de más extensión, para cubrir toda la superficie se hacían cuatro capturas, orientadas por encima y debajo del centro del agujero y, de izquierda a derecha.

Las capturas se recortaron ajustadas de tal forma que no se apreciaran cambios bruscos en la luminosidad ni las líneas de los bordes de cada

captura, que pudieran dar lugar a errores durante la fase de análisis con *ImageJ*, además de que así se lograba un mejor aspecto.

Por otro lado, cuando se comenzó con el análisis de imagen del apartado siguiente, se percibió que las astillas o fibras que quedaron orientadas hacia el interior del agujero daría lugar a resultados falseados al ocupar un espacio en el que no debería haber nada, por lo que mediríamos más área dañada de la que realmente hay.

Como ya se conocía el funcionamiento de *ImageJ* y cómo se haría el tratamiento de la imagen, empleando *Adobe Photoshop 2014* nuevamente, se dibujó un círculo inscrito de diámetro 6mm (diámetro nominal del agujero) y de color azul para que creara un contraste con el resto de la imagen y así, al hacer el análisis posterior, fuese mucho mas sencillo filtrar las zonas no deseadas y poder analizar solamente el área que queda a partir del agujero nominal hacia el exterior.

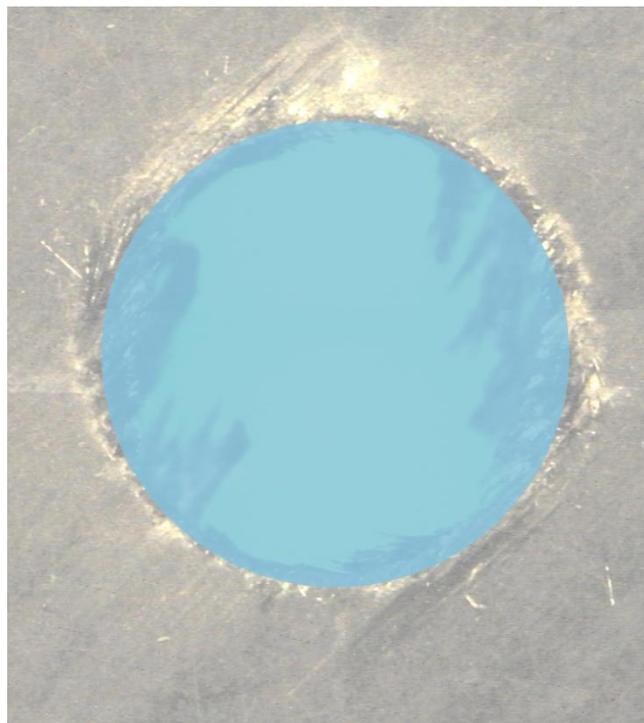


Figura 3.11. Modificación realizada en “Photoshop”.

3.3.4.3. *Análisis de imagen y medición de áreas*

El último paso es analizar las capturas que hemos transformado anteriormente.

Cada archivo de imagen asociado a cada agujero es abierto con *ImageJ* y transformado a 8 bits por requerimientos del sistema.

Para que el sistema tenga una medida de referencia a la hora de calcular las áreas, se fija una escala mediante la función “Set scale” donde se relaciona una distancia en píxeles con una distancia conocida en la unidad de medida deseada.

Gracias a que en la ventana de visualización del software Deltec se indicaba las dimensiones de la zona proyectada, fue sencillo relacionar los píxeles con una distancia en mm.

En este caso particular, la relación usada fue de **756 pixels \approx 8.31 mm** ya que 756 pixels era el ancho de las capturas de origen.

Una vez hechos los ajustes, se seguían los siguientes pasos:

- 1- Abrir la imagen a analizar, guardada en formato .PNG
- 2- Seleccionar el comando *Analyze \rightarrow Tools \rightarrow ROI Manager*.
Se abre una ventana donde podremos gestionar las selecciones que se hacen más tarde.
- 3- Seleccionar el comando *Image \rightarrow Adjust \rightarrow Color threshold* (Color umbral).
Esta opción permite segmentar y destacar en la imagen aquellas zonas que tengan unas propiedades o características específicas.

La ventana presenta tres histogramas pertenecientes a las componentes de color, saturación y brillo. Cada uno de ellos tiene dos barras deslizantes para poder ajustar los intervalos deseados, a la vez que previsualizamos en la imagen original como se destacan las zonas que corresponden a dichos valores.

También podemos cambiar el color de la previsualización, el método de umbralización y el espacio de color, pero son opciones que se han mantenido en valores por defecto.

- 4- Ajustar los intervalos. Para este análisis, la componente de color no se modificaba y la de saturación se ajustaba en un intervalo que dejaba fuera de la selección el área de color azul relativa al diámetro nominal. Ajustando el brillo se conseguía previsualizar sin problemas las zonas dañadas.

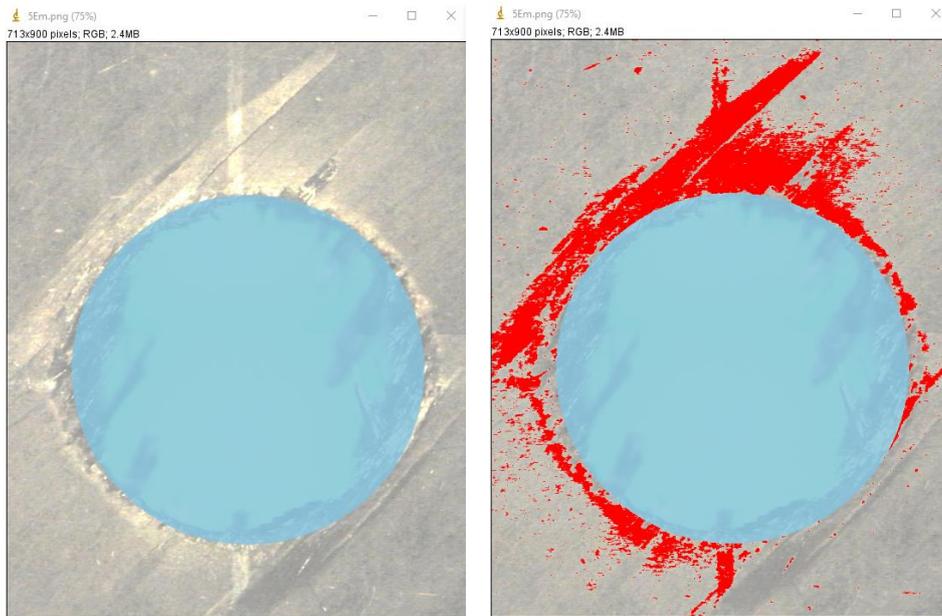


Figura 3.12 y 3.13. Tratamiento de la imagen. Antes y después de usar la función “Color Threshold”

Para las zonas claras se escogían intervalos aproximados de nivel de brillo entre 215 y 255 y entre 0 y 175 para las más oscuras. El material sin delaminar se encontraba fuera de esos valores, en rangos entre 175 y 215 aproximadamente.

- 5- Seleccionar las zonas marcadas presionando el botón *Select*, en la zona inferior de la ventana. Si se quiere omitir alguna zona o seleccionar otras específicas, es posible hacerlo manualmente con la herramienta del menú principal denominada *Wand* (conocida coloquialmente como *varita mágica*)
- 6- Volver a la ventana ROI Manager y manteniendo activadas las selecciones, pulsar el botón *Add* para registrar las zonas.
- 7- En la misma ventana, seleccionar los registros deseados y pulsar el botón *Measure*. Se abrirá una nueva ventana en la que aparecerán los valores de superficie de cada selección, en las unidades en las que se fijó previamente la escala.
Además del área podemos visualizar valores numéricos de otras dimensiones o propiedades, pero que no son útiles para el propósito del trabajo.

Los datos obtenidos podemos copiarlos o guardarlos en una hoja de cálculo para trabajar con ellos fuera del programa.

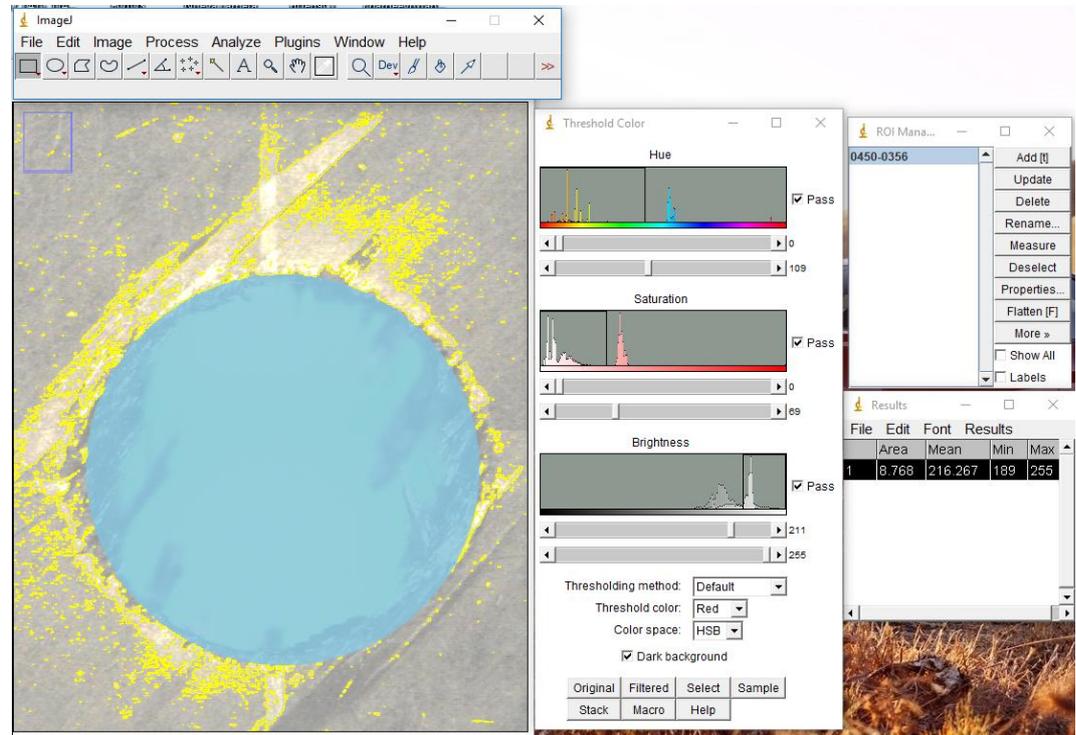


Figura 3.14. Interfaz general del programa durante un análisis de imagen.

3.3.4.4. Corrección del factor de delaminación

Como se ha comentado anteriormente la ecuación de partida, empleada para calcular el factor de delaminación es $(F_{da} = \alpha \frac{D_{max}}{D_{nom}} + \beta \frac{A_{max}}{A_{nom}})$, siendo D_{nom} el diámetro nominal del agujero que en nuestro caso es de 6mm para todos los agujeros.

β es un porcentaje obtenido de esta ecuación $(\frac{A_d}{A_{max}-A_{nom}})$, donde A_d es el área que presenta daños y A_{max} y A_{nom} el área relativa al diámetro máximo y nominal respectivamente. α es otro porcentaje equivalente a $1 - \beta$

Pero tras realizar las mediciones y calcular los factores de delaminación de cada agujero, se encontró un problema con el factor β . Al ser un porcentaje, su valor máximo debería ser 1, pero la forma de esta ecuación parece estar creada para casos donde la delaminación, tenga una propagación similar a

lo largo del perímetro del agujero (independientemente de que su patrón sea o no regular) para que el área dañada sea como máximo, igual a la diferencia de áreas máxima y nominal.

En el caso de este trabajo, los agujeros con menor daño si tienen esa característica anteriormente citada, pero en otros con un daño medio-alto, existen áreas delaminadas en algunas zonas, cuya superficie puede ser muy superior a la diferencia de áreas referidas a los diámetros.

En la siguiente imagen se muestra una comparación entre las diferentes áreas.

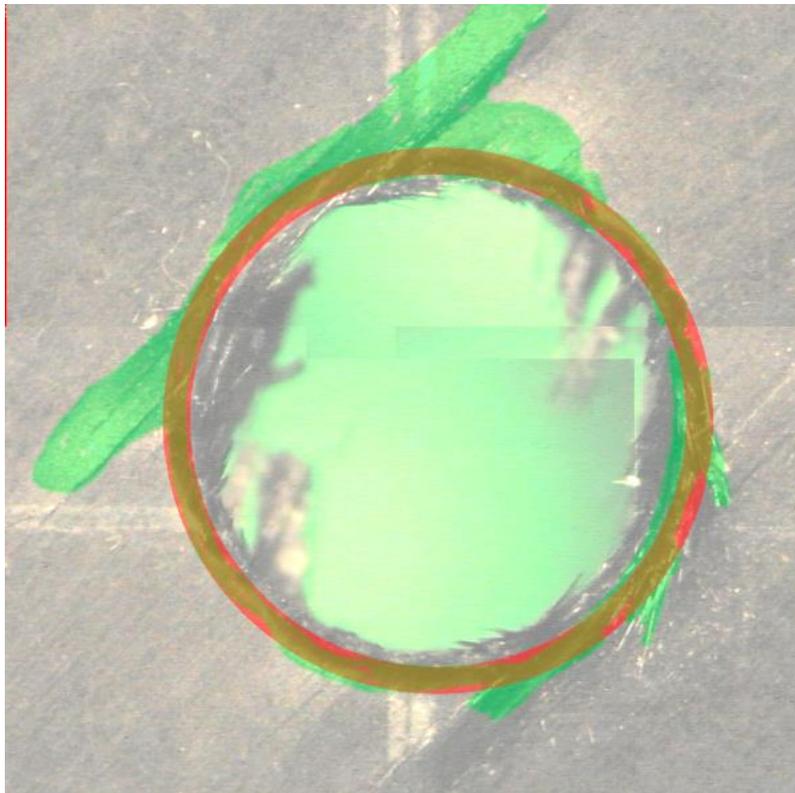


Figura 3.15. Comparación geométrica aproximada de las áreas estudiadas.

La zona roja sería la referida al término $A_{max} - A_{nom}$ y la zona verde (solapada con la roja) la asociada al área dañada (A_d)

Estimando el valor de β con estas áreas, se deduce que el valor obtenido será superior a 1 y por tanto, esta ecuación no sería válida.

Es pertinente mencionar que, a la hora de calcular los diámetros máximos de los círculos, no se han tomado puntos en partes como los extremos superior e izquierdo de la zona verde de la imagen anterior. Para mantener la

coherencia con la ecuación empleada, se tomaron puntos que formaran arcos aproximadamente concéntricos al diámetro nominal y tuvieran radios de curvatura similares.

Ante la problemática por el cálculo del factor β , se estudió otra forma de emplear la misma ecuación o una variante, adaptada a las necesidades del trabajo. La idea principal era conseguir una mayor influencia del área delaminada respecto a los diámetros, para evitar obtener valores similares del factor de delaminación cuando existen agujeros con un diverso nivel de daño en la periferia, de modo que se hicieron los siguientes cambios y ajustes:

- A_d : Ahora se emplea este término para denominar al área dañada, sin tener en cuenta el área del diámetro nominal.

- A_{max} : Representará la suma del área del diámetro nominal más el área dañada $\rightarrow A_d + A_{nom}$

- β : Para evitar el problema con los porcentajes y aumentar la influencia del área, β ahora será la relación entre A_d y A_{nom} .

De esta forma, el primer y segundo término de la ecuación relacionaran diámetro y área máxima causada por la delaminación con el diámetro y área nominal, respectivamente.

Reorganizando la ecuación y sus términos, quedaría de la siguiente forma:

$$F_{da} = \alpha \frac{D_{max}}{D_{nom}} + \beta \frac{A_{max}}{A_{nom}} =$$

$$\left(1 - \frac{A_d}{A_{nom}}\right) \frac{D_{max}}{D_{nom}} + \left(\frac{A_d}{A_{nom}}\right) \frac{A_{max}}{A_{nom}}$$

La nueva ecuación mantiene la coherencia con la de partida, pero incrementa la contribución al factor de las áreas más delaminadas.

4. RESULTADOS

4.1. Características geométricas

En primer lugar y para explicar mejor las siguientes actuaciones, es recomendable comentar cómo se hicieron los taladros en el Trabajo Fin de Grado de Javier Pastor.

Se han distinguido entre las filas 1-3, 4-6 y 7-9. En el TFG en el cual se mecanizó anteriormente esta placa, cada uno de esos conjuntos de filas, se taladró con brocas diferentes y condiciones de corte apropiadas a cada una de ellas.

En las primeras filas de cada conjunto se mecanizaron con una velocidad de avance nominal recomendada según las condiciones de corte de la broca empleada. En las segundas filas con una velocidad un 50% superior y en las terceras, un 50% inferior.

En la siguiente imagen se indica la trayectoria que siguió cada broca durante el mecanizado.

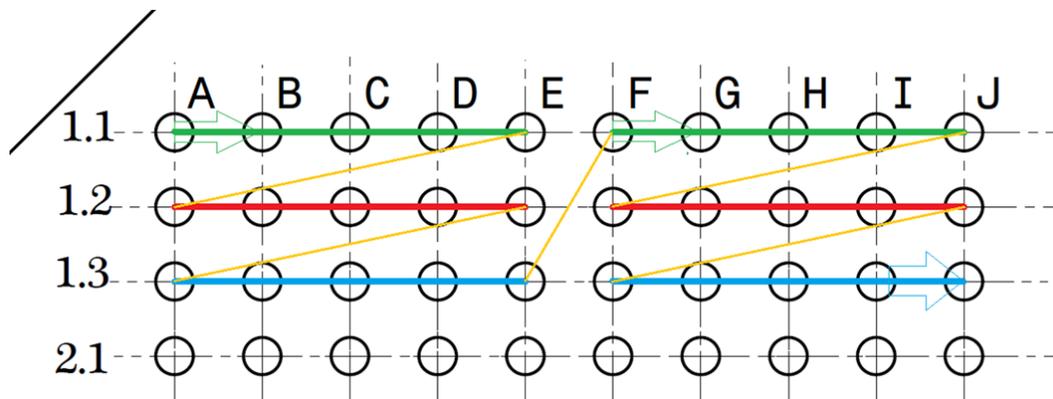


Figura 4.1. Secuencia de taladrado de la placa (Pastor, 2016)

Además, se puede ver como las filas de taladros no se completaron en una única pasada, sino en dos divididas entre las columnas A-E y F-J.

Todas estas indicaciones son importantes para analizar y comprender los resultados obtenidos posteriormente.

4.1.1. Análisis de la superficie

En todas las capturas tomadas, se puede observar cómo las grietas se empiezan a propagar en una dirección de $+45^\circ$ y $+225^\circ$ tangente a la circunferencia del agujero al estar orientadas las fibras en esas direcciones. En los agujeros más dañados también se pueden ver pequeñas grietas en el contorno, que siguen la misma dirección, pero no son tangentes.



Figura 4.2. Captura de imagen de un agujero donde se aprecian las grietas tangenciales.

A medida que las condiciones de corte empeoran y el calentamiento de la herramienta aumenta, la propagación de las grietas es mayor.

Sólo los primeros agujeros de las filas 1, 4 y 7 muestran un corte limpio y sin apenas astillas.

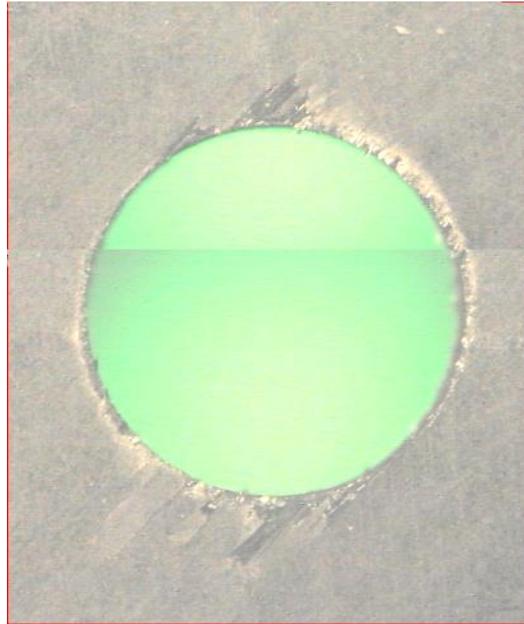


Figura 4.3. Captura de imagen del agujero 7A

Como parte de las siguientes fases realizadas, se calculó con “Imagej” el área perteneciente a las zonas delaminadas, siguiendo las pautas ya descritas.

A_d (mm ²)		Columnas				
		A	B	C	D	E
Filas	1	1,369	1,724	3,731	4,708	3,537
	2	5,293	5,849	5,121	6,661	5,125
	3	4,725	7,055	4,842	6,587	5,299
	4	1,802	3,186	3,415	4,928	4,940
	5	9,598	10,369	9,758	9,444	10,393
	6	10,117	11,226	7,349	8,267	10,239
	7	3,443	3,383	4,322	6,241	5,831
	8	8,808	7,963	8,788	6,716	5,661
	9	7,187	9,165	7,121	7,662	9,689

A_d (mm ²)		Columnas				
		F	G	H	I	J
Filas	1	5,254	6,281	5,512	4,245	7,710
	2	9,118	10,020	9,375	8,249	10,184
	3	8,162	10,296	10,207	12,117	11,443
	4	10,441	12,996	13,295	14,659	13,669
	5	11,660	12,932	13,788	13,150	15,154
	6	13,579	14,295	16,408	17,146	18,628
	7	10,850	11,749	16,815	17,289	16,923
	8	11,568	12,785	11,814	16,203	17,233
	9	14,162	12,261	15,127	18,235	18,589

Tabla 4.1. Valores A_d

Para tener una mejor percepción de los datos, se dan los valores medios más significativos.

A_d (mm ²)		Valor medio en cada fila	Valor medio para cada broca	
Filas	Broca A	1	4,477	6,065
		2	7,455	
		3	7,609	
	Broca B	4	7,691	10,834
		5	11,027	
		6	12,403	
	Broca C	7	8,546	10,270
		8	10,188	
		9	10,975	

Tabla 4.2. Valores medio A_d

Realizando esta comparación de valores medios, se puede determinar que broca produce menos daños y con que condiciones de corte. En este caso particular la superficie dañada por la broca "A" es casi la mitad del que produce las brocas "B" y "C".

Revisando las capturas de imagen de los agujeros, de un primer vistazo se aprecia cómo al comparar entre los primeros hechos con la broca "A" a los siguientes con las "B" y "C", el acabado se vuelve más tosco, con geometrías más irregulares y más presencia de astillas.

También se puede hacer una comparación sencilla de cómo puede afectar la velocidad de avance a la geometría y la superficie dañada, calculando la media de A_d según la velocidad de avance empleada.

En este caso se distingue entre los grupos de columnas “A-E” y “F-J”, ya que además de la velocidad de avance, la temperatura y el desgaste de la herramienta también condicionan los valores obtenidos.

Valor medio A_d (mm ²) (Columnas A-E)		
V_{nom}	V_{nom} (+50%)	V_{nom} (-50%)
3,537	7,963	7,662

Tabla 4.3. Valores medio A_d por columnas (A-E)

En este caso se aprecia como existen diferencias superiores al 200% entre el valor nominal y los valores modificados

Valor medio A_d (mm ²) (Columnas F-J)		
V_{nom}	V_{nom} (+50%)	V_{nom} (-50%)
13,295	12.787	15.127

Tabla 4.4. Valores medio A_d por columnas (F-J)

Sin embargo, aquí se ve como los valores son muy similares, sin diferencias significativas entre ellos.

En el primer caso, la diferencia es más significativa porque predomina el factor de la velocidad de avance frente al desgaste, pero en el siguiente los términos se igualan, por lo que podemos deducir que el parámetro más crítico es el desgaste de la herramienta. Para evitar un desgaste prematuro, es vital contar con refrigeración durante el mecanizado.

Con las muestras analizadas no se puede encontrar una relación directa entre la geometría del daño y los datos obtenidos, pero sí hacer una cuantificación de los tipos de daño.

4.1.2. Cuantificación de los tipos de delaminación

Durante la fase de análisis de imagen, se podían distinguir dos tipos de delaminación evidentes en la superficie de la placa; Cuando las fibras no son cortadas de forma limpia y acaban siendo arrancadas creando una superficie irregular y, por otro lado, cuando ciertas zonas se despegan de las capas adyacentes.

Aprovechando el empleo de *ImageJ* se decidió cuantificar la influencia de cada tipo de delaminación, las denominadas de “Tipo I” y de “Tipo II”, respectivamente, midiendo la superficie dañada de cada una de ellas.

Tomando las imágenes de los agujeros, se sigue el mismo procedimiento de análisis que en el caso anterior, ajustando los intervalos de brillo para seleccionar cada área de forma independiente y registrando los datos.

Del mismo modo que en el apartado anterior y para tener unos resultados más representativos y adecuados a este trabajo, se agruparon los datos en seis series que combinan las tres velocidades de avance empleadas con los dos grupos de columnas (A-E y F-J), tomando un único valor medio del área dañada por cada tipo.

Las series quedaron referenciadas de este modo:

	Columnas	
Filas	A-E	F-J
1, 4, 7 (V_{nom})	S1	S4
2, 5, 8 ($V_{nom} +50\%$)	S2	S5
3, 6, 9 ($V_{nom} -50\%$)	S3	S6

Tabla 4.5. Referencia de series

Obteniendo estos resultados:

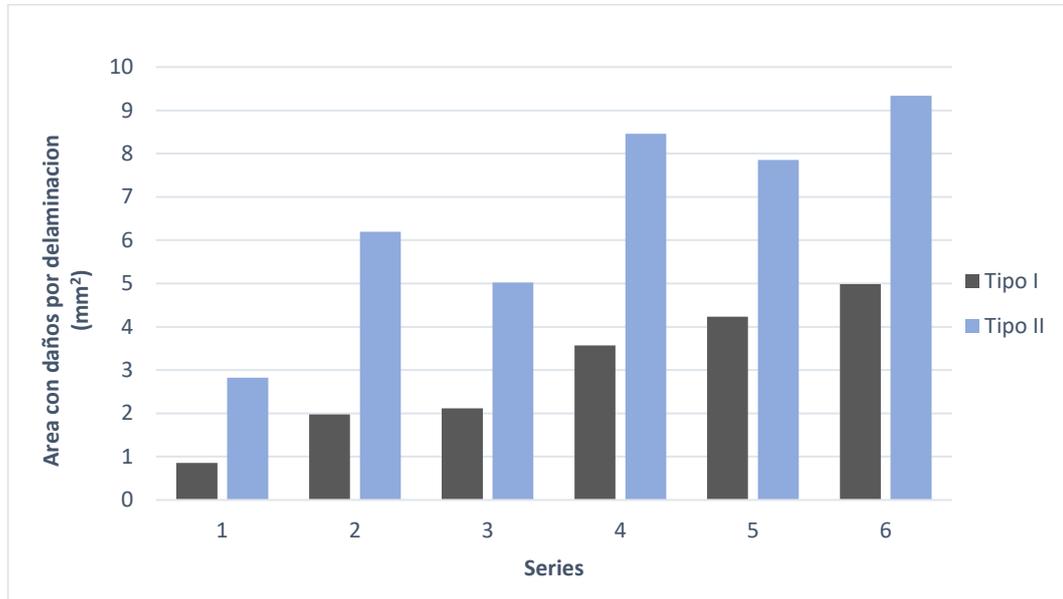


Figura 4.4. Área delaminada según diferentes condiciones y tipos de delaminación

De estos resultados se puede deducir que la influencia de la delaminación de Tipo II es mucho mayor que la de Tipo I.

En las tres primeras series la diferencia entre ambos tipos es mucho mayor que en las tres últimas, con una relación cercana a 1:2 para la situación en la que más calentamiento y desgaste de la herramienta habría.

Aplicado a la industria, al conocer la influencia de cada tipo de delaminación por separado, se puede valorar el empleo de una pieza determinada dependiendo de la aplicación, el montaje o el tipo de esfuerzos que deba soportar.

4.2. Factor de delaminación original

Aquí se mostrarán los resultados obtenidos tras el análisis de delaminación mediante los diversos sistemas mencionados anteriormente.

En las siguientes tablas, se muestran los valores del factor de delaminación obtenidos mediante el uso de la fórmula tradicional $F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}}$, siendo el valor D_{max} el hallado mediante la medición con el proyector de perfiles.

		Columnas					
		F_d	A	B	C	D	E
filas	1		1,012	1,013	1,016	1,011	1,009
	2		1,021	1,023	1,025	1,015	1,019
	3		1,029	1,045	1,054	1,065	1,043
	4		1,004	1,022	1,019	1,019	1,051
	5		1,029	1,024	1,036	1,042	1,049
	6		1,096	1,113	1,078	1,067	1,040
	7		1,025	1,049	1,047	1,062	1,054
	8		1,100	1,086	1,088	1,072	1,089
	9		1,097	1,099	1,093	1,104	1,081

		Columnas					
		F_d	F	G	H	I	J
filas	1		1,049	1,039	1,040	1,060	1,046
	2		1,055	1,047	1,063	1,080	1,081
	3		1,082	1,096	1,089	1,081	1,082
	4		1,028	1,054	1,095	1,098	1,104
	5		1,090	1,104	1,127	1,090	1,089
	6		1,058	1,130	1,127	1,143	1,134
	7		1,077	1,121	1,128	1,116	1,134
	8		1,119	1,133	1,126	1,118	1,138
	9		1,117	1,162	1,146	1,159	1,154

Tabla 4.6. Valores del factor F_d

Para tener una mejor percepción de los resultados, se han calculado el porcentaje de variación del factor de delaminación respecto al ideal (que sería igual a 1) de la siguiente forma:

$$\% \Delta F_d = \frac{F_{dij} - 1}{100}$$

		Columnas	
		A-E	F-J
		$\% \Delta F_d$	
filas	1	1,150	4,558
	2	2,100	6,342
	3	4,492	8,225
	4	1,900	9,508
	5	3,592	9,042
	6	7,767	12,983
	7	4,900	12,050
	8	8,792	12,583
	9	9,675	15,358

Tabla 4.7. Porcentaje de variación del factor F_d

Se ha distinguido entre el grupo de columnas de A E y F a J, puesto que en el ciclo de taladrado no se completaban las filas en la primera pasada.

De esta forma se aprecia cómo los 5 primeros taladros de cada fila tienen una menor desviación en el factor que los 5 posteriores. Como era de esperar, el calentamiento y desgaste de la herramienta provoca un mayor índice de delaminación.

Los valores obtenidos siguen la tendencia esperada que podemos encontrar en otros estudios sobre mecanizado y delaminación, velocidades de avance altas, aumentan la delaminación y las velocidades bajas, tienden a reducir la delaminación, pero en este caso particular no se empleó refrigeración, incrementándose la temperatura de la broca y la periferia que acabó por degradar la resina, provocando el efecto adverso al teórico, con mayor delaminación.

4.3. Factor de delaminación corregido

Estos son los valores obtenidos al aplicar el factor corregido en el que se ha tenido en cuenta el área dañada

		Columnas					
		F_{da}	A	B	C	D	E
filas	1	1,013	1,016	1,031	1,037	1,024	
	2	1,025	1,061	1,053	1,067	1,049	
	3	1,052	1,096	1,074	1,104	1,070	
	4	1,007	1,032	1,031	1,046	1,073	
	5	1,186	1,150	1,143	1,140	1,166	
	6	1,239	1,251	1,111	1,133	1,156	
	7	1,027	1,050	1,049	1,097	1,085	
	8	1,166	1,141	1,157	1,111	1,111	
	9	1,137	1,172	1,133	1,150	1,171	

		Columnas					
		F_{da}	F	G	H	I	J
filas	1	1,075	1,080	1,071	1,074	1,108	
	2	1,141	1,156	1,152	1,142	1,182	
	3	1,142	1,194	1,187	1,230	1,213	
	4	1,210	1,263	1,272	1,388	1,288	
	5	1,223	1,266	1,303	1,265	1,329	
	6	1,261	1,320	1,390	1,424	1,480	
	7	1,195	1,243	1,306	1,369	1,412	
	8	1,238	1,277	1,248	1,379	1,426	
	9	1,309	1,280	1,354	1,473	1,485	

Tabla 4.8. Valores del factor F_{da}

Calculamos el porcentaje de variación del factor de delaminación respecto al ideal:

		Columnas	
		A-E	F-J
filas	$\% \Delta F_d$		
	1	2,354	7,472
	2	5,303	15,242
	3	7,403	19,358
	4	3,186	27,165
	5	15,002	26,560
	6	15,645	39,036
	7	4,964	30,593
	8	14,091	27,747
9	14,960	35,417	

Tabla 4.9. Porcentaje de variación del factor F_{da}

Del mismo modo que en la comparación anterior, entre los diferentes conjuntos de columnas hay una gran diferencia de porcentaje, aunque en este caso, esa diferencia aumenta en mayor grado.

Para los agujeros que se hicieron en las filas 1, 4 y 7, la variación es muy baja. Estas situaciones se dieron a velocidad nominal y cuando se había comenzado el ciclo de taladrado y la broca tenía poca temperatura.

Sin embargo, se ve como en las columnas F a J, la variación respecto a las columnas homologas crece de forma mucho más brusca al compararlo con los resultados empleando el factor inicial.

El grupo de F a J tenía un daño a primera vista mucho mayor que el de A E.

Debajo se muestran las imágenes tomadas de dos pares de taladros consecutivos, realizados con la misma herramienta y los mismos parámetros de corte, pero del “E” al “F” se aprecia sin cuantificar el daño, como el segundo está mucho más dañado, con más astillas y se denota una delaminación a 45° muy propagada.

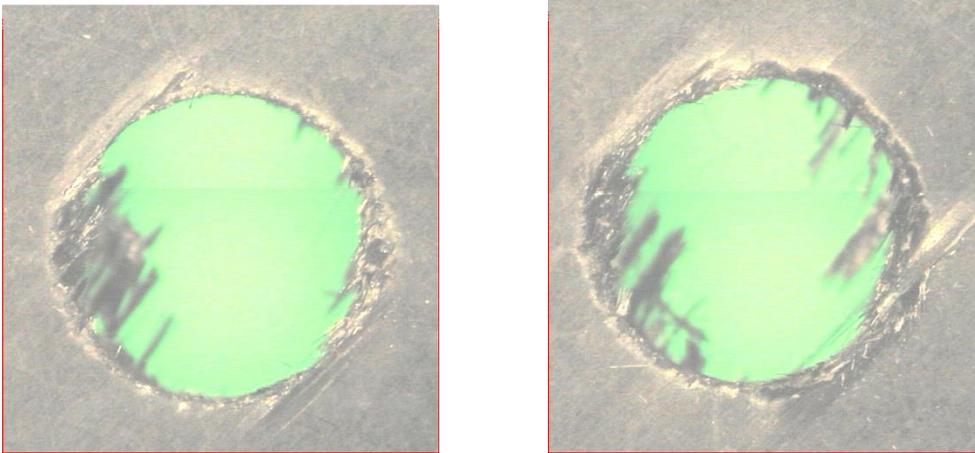


Figura 4.10 y 4.11. Agujero 1E y 1F. Comparación del daño

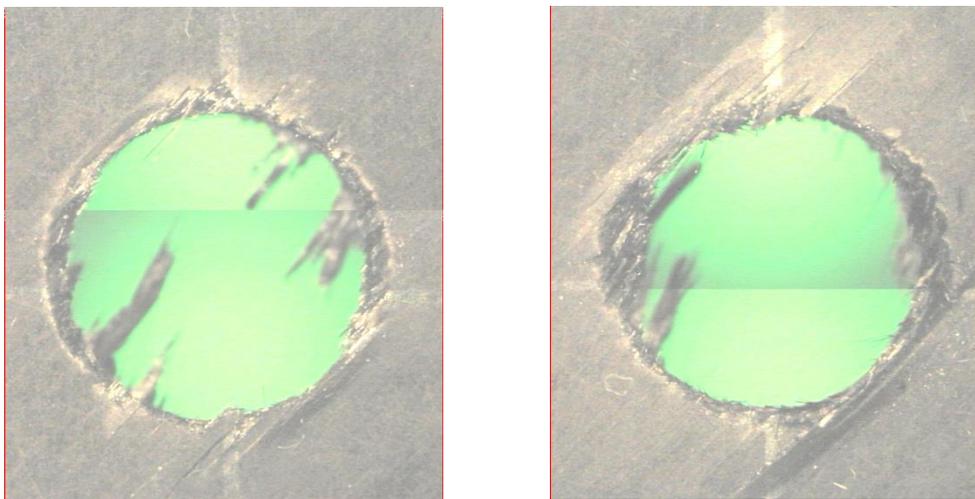


Figura 4.12 y 4.13. Agujero 7E y 7F. Comparación del daño

También se puede confirmar que la variación es superior en las filas que se hicieron con menos velocidad de avance respecto a las de mayor avance, como ocurría aplicando el factor inicial.

Mediante las siguientes gráficas, podremos comparar visualmente las diferencias de los valores obtenidos del factor de delaminación aplicando cada fórmula.

Las filas que tienen la denominación “Fila (número)” están referidas al factor F_d . Las denominadas “Fila (numero)A” al factor F_{da} .

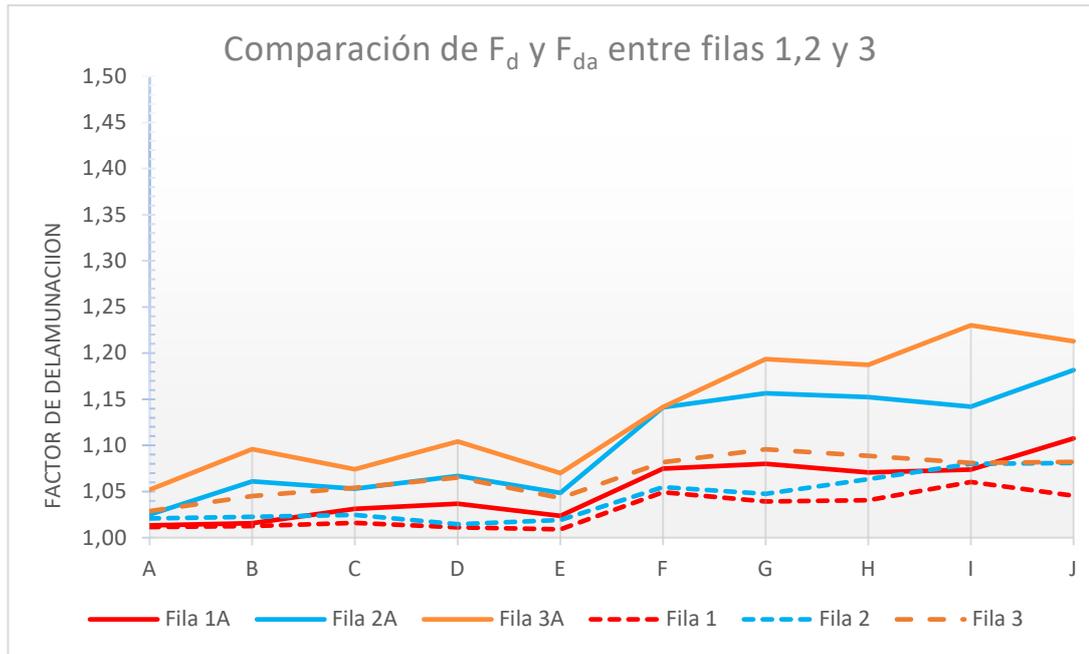


Figura 4.14. Gráfica de los diferentes valores de F_d y F_{da} según filas

En este primer conjunto, hemos tenido los menores valores del factor de delaminación. Parece que se realizaron usando una broca más idónea para el taladrado de la fibra de carbono.

Dado que no existe mucho daño, en la comparación con las tres filas la tendencia de las líneas graficadas es muy similar, estando algo por encima los valores de F_{da} . Comparando las líneas de F_d y F_{da} van casi paralelas.

Sin embargo, a partir de la columna E, la pendiente aumenta para las seis líneas, notablemente más en las de F_{da} y especialmente para las filas 2A y 3A. Las condiciones de corte no adecuadas y el desgaste de la broca a partir de la columna E, propician ese cambio de tendencia.

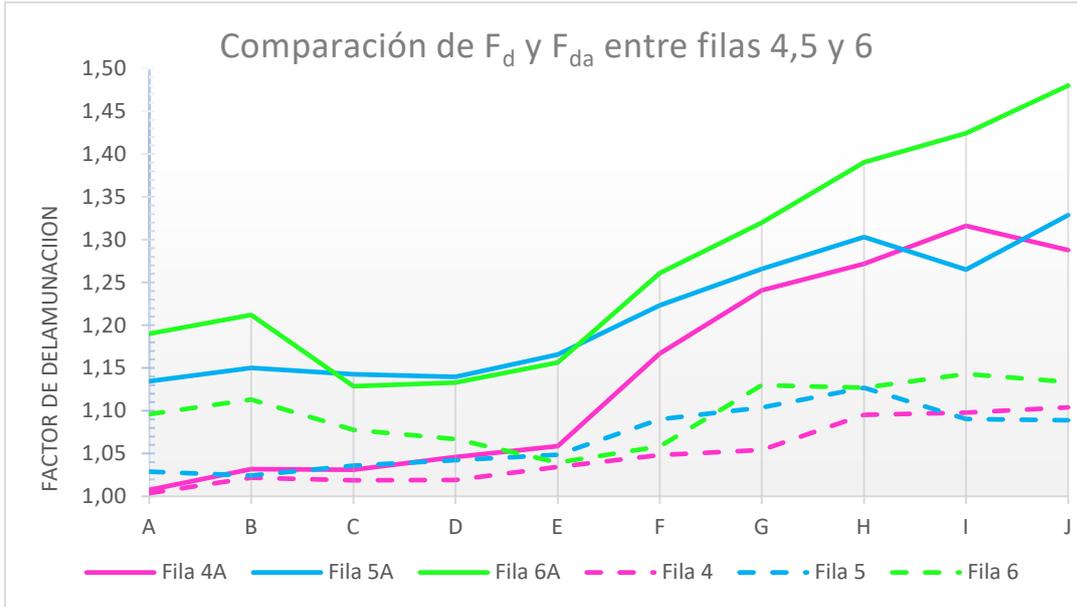


Figura 4.15. Gráfica de los diferentes valores de F_d y F_{da} según filas

En esta nueva gráfica la fila 6 tiene algunos valores fuera de lo normal. Se revisaron los puntos anómalos pero los resultados fueron los mismos. Dado que el taladrado no fue realizado en este trabajo, desconocemos que pudo ocurrir para que se obtuvieran estos resultados o si es algo meramente casual.

Se puede confirmar que la columna E es un punto de inflexión donde las líneas que representan cada fila aumentan la pendiente. En las filas relativas a F_{da} este incremento es aun mayor. Además, la diferencia de valores entre las líneas que representan F_d y F_{da} es aún mayor que en el caso anterior.

Esto es debido al incremento del factor de delaminación al realizar el taladrado con una broca menos adecuada, donde la influencia del área dañada aumenta las diferencias.

También se puede observar como para la fila 4, que se taladró a velocidad de avance nominal, los valores de F_d y F_{da} son bajos y muy parejos entre si hasta la llegada a la columna E.

Esto es indicativo de que emplear las velocidades correctas y sobre todo, controlar la temperatura, reduce la generación de astillas y áreas delaminadas.

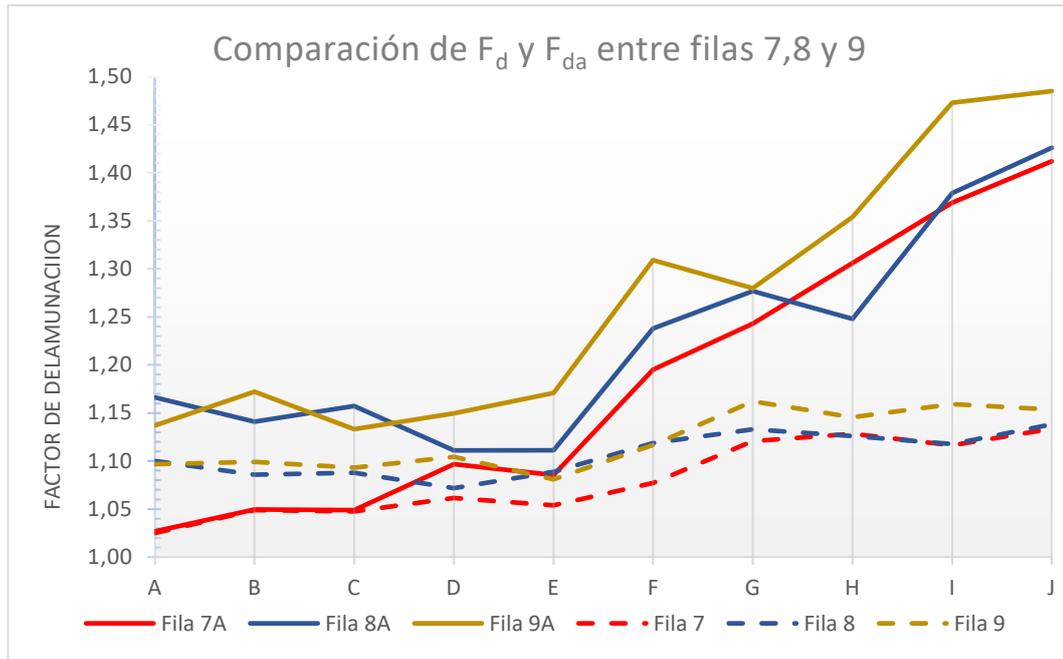


Figura 4.16. Gráfica de los diferentes valores de F_d y F_{da} según filas

Para la última grafica los resultados son similares a los anteriores. Se encuentran particularidades en las filas 8 y 9 para F_d , siendo la progresión muy similar e incluso solapándose en algún punto.

4.4. Valoración del dato del error

En la medición con el comparador óptico Deltec, los datos devueltos eran el diámetro del agujero medido y el error, definido como la distancia entre la circunferencia (formada por ajuste con el método de mínimos cuadrados) y el punto más alejado de los que forman la circunferencia.

Dado que la geometría de los agujeros en los casos donde más daño hay, presenta formas muy irregulares, es interesante comprobar si entre ese error y los factores de delaminación, existe alguna relación que pueda ser útil.

En las siguientes tablas se muestran los valores del error obtenido en la medición de los agujeros.

		Columnas				
		Error	A	B	C	D
filas	1	0,268	0,312	0,291	0,405	0,429
	2	0,587	0,439	0,337	0,538	0,422
	3	0,801	0,659	0,808	0,611	0,685
	4	0,201	0,430	0,562	0,507	0,432
	5	0,789	1,523	0,605	0,421	0,556
	6	0,889	0,548	0,864	0,785	0,716
	7	0,212	0,338	0,509	0,353	0,535
	8	0,334	0,392	0,260	0,305	0,672
	9	0,879	0,850	0,924	0,512	0,497

		Columnas				
		Error	F	G	H	I
filas	1	0,659	0,776	0,723	0,793	0,678
	2	0,720	0,662	0,733	0,533	0,674
	3	0,866	0,899	0,679	0,812	0,976
	4	0,818	0,621	0,712	0,628	1,145
	5	0,725	0,624	0,660	0,481	0,834
	6	1,151	0,873	0,610	0,946	1,261
	7	0,853	0,698	0,604	0,553	0,566
	8	0,442	0,463	0,495	0,680	0,194
	9	0,862	0,481	0,792	0,868	0,776

Tabla 4.10. Valores del error medido

Representando gráficamente los resultados:

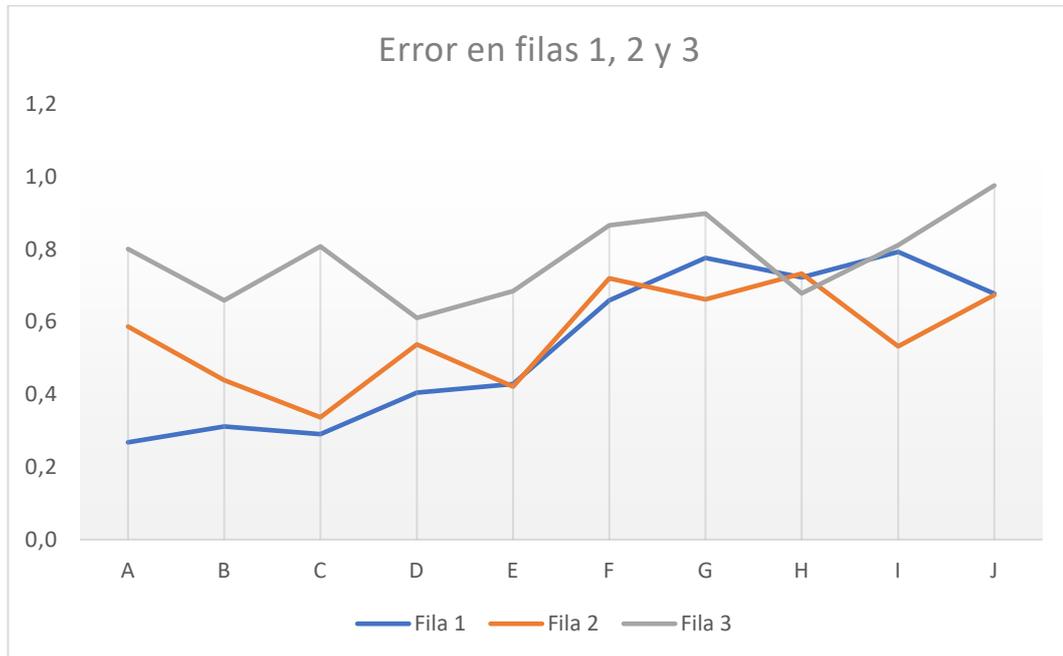


Figura 4.17. Gráfica de los diferentes valores del error según filas 1, 2 y 3

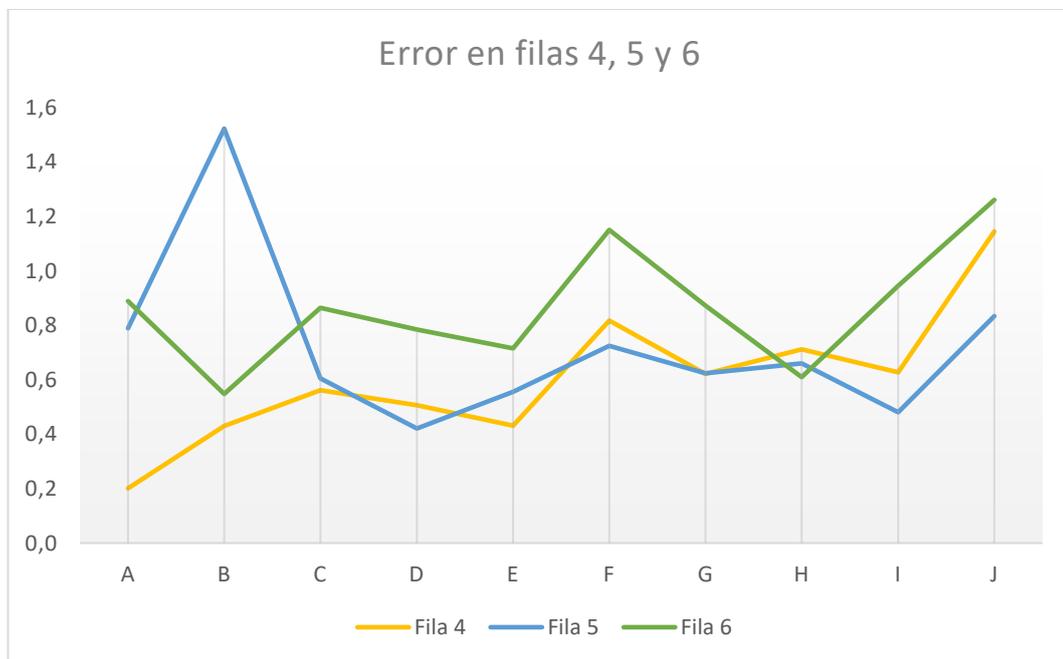


Figura 4.18. Gráfica de los diferentes valores del error según filas 4, 5 y 6

Vemos que los resultados son totalmente dispares, no siguen ninguna tendencia aproximada ni guardan una proporcionalidad.

Solamente las filas 1 y 4 siguen una tendencia creciente y con un cambio de pendiente a partir del punto E, al igual que ocurría en las gráficas del factor de delaminación.

Se podría asociar al haber realizado los taladros a velocidad de avance nominal o a que haya menos formación de áreas delaminadas, pero, en cualquier caso, no son resultados concluyentes por no cumplirse para el resto de las filas examinadas.

En cualquier caso, de haber obtenido resultados coherentes, los valores del error solo podían tener carácter cualitativo, para indicar la existencia de mayor o menor grado de delaminación.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo tenía como objetivo analizar y determinar la delaminación en fibra de carbono, usando como herramienta la medidora tridimensional disponible en la EII.

El sistema es fiable y preciso, pero estaba limitado por la incapacidad de poder analizar capas no superficiales de las muestras tratadas. Por ello, el trabajo se orientó al estudio superficial.

Tras probar diferentes procedimientos de análisis y observando que aplicando el factor de delaminación habitual los valores no se proporcionaban con el nivel de daño evidente, se añadió el software “ImageJ” como herramienta para calcular el área delaminada.

Además, se ha propuesto un nuevo factor de delaminación corregido.

-Los valores de incertidumbre recogidos de la calibración del equipo de medición han sido perfectamente compatibles con el nivel de precisión que se ha requerido en este estudio. No se puede definir que grado de exactitud tiene el equipo ya que no existe ninguna norma que regule o clasifique según las desviaciones encontradas.

-La fiabilidad de los datos recogidos empleando la medidora tridimensional no solo depende de la precisión de esta. El estudio previo del manual “Deltec” y probar numerosas configuraciones en el software, variando parámetros de iluminación, enfoque o detección de puntos ha sido imprescindible para lograr resultados coherentes.

-El área delaminada aumenta notablemente cuando las condiciones de corte no son favorables, dependiendo este incremento en mayor medida del sobrecalentamiento generado que de las velocidades de corte y avance. Cabe destacar que determinar el origen de la delaminación no era uno de los objetivos de este trabajo .

-Para agujeros con un bajo nivel de daño, el factor de delaminación inicial guarda una proporción con la delaminación aparente. Sin embargo, cuando el contorno del diámetro se vuelve más irregular y la propagación de los daños es mayor, este factor no es capaz de cuantificar correctamente la delaminación existente.

Se podían encontrar F_d similares, pero haciendo un examen visual la magnitud del daño aparente era muy diferente.

-La inclusión de “ImageJ” fue un avance a la hora de determinar de una forma más eficaz la delaminación. Los valores del área delaminada calculados con este software, dan una buena cuantificación del daño existente. Analizando la geometría de las zonas dañadas en los agujeros, se ha podido determinar una influencia más real de la delaminación, especialmente en los casos en los que el daño es más severo.

Los valores de A_d variaban desde la unidad hasta cerca de 19mm^2 en los casos más extremos. Teniendo en cuenta que el área del agujero nominal es de $28,27\text{mm}^2$, tal variación es lo suficientemente relevante como para tener en cuenta esa variable en los cálculos de delaminación.

-El factor de delaminación corregido, elimina en buena medida la dispersión y aleatoriedad en los resultados de los casos en los que había más daño y establece un rango de valores más amplio, que discrimina mejor entre los agujeros según su daño por delaminación. Cómo se ha visto en las gráficas comparativas, el factor original sigue una progresión mas lineal, independientemente del daño que pueda haber.

- No ha sido posible establecer una relación entre el dato del error obtenido al calcular los diámetros con la medidora tridimensional y el factor de delaminación. Las irregularidades en el contorno de cada agujero no van ligadas al nivel de daño ni guardan una proporcionalidad con su respectivo factor de delaminación.

5.1.1. Líneas futuras, mejoras y aplicaciones

De cara a una posible continuación de este estudio, propondría utilizar placas de fibra de carbono de diferentes características, para comprobar que diferencias pueden resultar al trabajar con compuestos variando espesores, orientaciones de fibra, tipos de refuerzo o matriz, etc....

Uno de los grandes problemas que se han dado durante la realización de este trabajo ha sido la toma y extracción de datos de la medidora tridimensional por las reducidas capacidades del software y la CPU.

Idealmente, se podría mejorar el procedimiento de análisis, simplificando e integrando las dos herramientas empleadas en un mismo equipo, con mayor rendimiento que el empleado en este trabajo.

La precisión del sistema de detección y movimiento de la medidora junto a la óptica, unido al software de análisis de imagen, podría reducir en gran medida los tiempos y pasos que se han dado en la fase experimental, con el consiguiente aumento de la eficiencia en el proceso.

Incluso usando únicamente “ImageJ” junto a un equipo óptico adecuado, se podrían obtener resultados válidos, aunque en este caso habría que usar un patrón como referencia.

Cuenta con la ventaja de ser un software gratuito, siendo un aspecto atractivo en vista de reducir los costes ante una posible aplicación industrial y además, facilita el acceso en un ámbito educativo y académico, pudiendo servir de herramienta en trabajos como este gracias a su polivalencia.

6. BIBLIOGRAFÍA

Referencias bibliográficas:

- [Centro Español de Metrología, 1999], *Procedimiento DI-001 para la Calibración de Proyectores de Perfiles*. Madrid; CEM
- [Chawla, K. K. ,2012]. *Composite materials: Science and engineering* (3rd ed). New York: Springer
- [Krishnaraj, 2013] Krishnaraj, V., Zitoune, R., & Davim, J. P. , (2013). *Drilling of Polymer-Matrix Composites*. Berlin: Springer
- [Krueger, 2010] Krueger, A. , (2010). *Carbon Materials and Nanotechnology*. Weinheim; WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- [Park, 2014] Park, S.-J. , (2014). *Carbon fibers*. New York: Springer.
- Tamin, M. N. , (2012). *Damage and fracture of composite materials and structures*. Berlin: Springer

Artículos y trabajos consultados:

- [Al-wandi, 2017] Al-wandi, S., Ding, S., & Mo, J. (2017). An approach to evaluate delamination factor when drilling carbon fiber-reinforced plastics using different drill geometries: Experiment and finite element study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(9-12), 4043-4061.
- Bhatt, P., & Goe, A. (2017). Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use. *Material Science Research India*, 14(1), 52-57.
- Castejón, D. (2016). Manual de procesado de ImageJ. *Universidad Complutense de Madrid*, 40.
- [Davim, 2007] Davim, J., Rubio, J., & Abrao, A. (2007). A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination

factor after drilling composite laminates. *Composites Science and Technology*, 67(9), 1939-1945

- Deltec Vision (1998). Document de formation Deltec Vision. Deltec Vision, 68.
- [Dharan, 2000] Dharan, CHK., Won, MS. (2000) Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates. *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, 39, 415-426
- FAA. (s. f.). Visual Inspection for Aircraft. *Federal Aviation Administration*. 236.
- Feíto, N., López-Puente, J., Santiuste, C., & Miguélez, M. H. (2014). Numerical prediction of delamination in CFRP drilling. *Composite Structures*, 108, 677-683.
- [Hocheng, 2005] Hocheng, H., & Tsao, C. C. (2005). The path towards delamination-free drilling of composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 167(2-3), 251-264.
- [Hocheng, 1990] Hocheng, H., Dharan, C. K. H. (1990) Delamination during drilling in composite laminates. *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 112, pp. 236–239. ISSN 0022-1817.
- Marques, A. T., Durão, L. M., Magalhães, A. G., Silva, J. F., & Tavares, J. M. R. S. (2009). Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: Evaluation of a special step drill. *Composites Science and Technology*, 69(14), 2376-2382.
- Martinez, X., Oller, S., & Barbero, E. (2011). Caracterización de la delaminación en materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie/paralelo. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 27(3), 189-199.
- Meola, C., & Toscano, C. (2012). NonDestructive Evaluation of Carbon Fiber Reinforced Polymers with Ultrasonics and Infrared Thermography: An Overview on Historical Steps and Patents. *Recent Patents on Materials Science*, 5, 48-67.

- Mouritz, A. P., Pingkarawat, K., Blanloeuil, P., & Zhao, H. (s. f.). NDE of manufacturing defects in automotive carbon fiber composites. *RMIT University*, 29.
- [Pastor, 2016] Pastor, J. (2016). Análisis del taladrado de fibra de carbono: Fuerzas de corte y delaminación. *Universidad de Valladolid*, 121.
- Sanchez, D. (s. f.). Análisis del software ImageJ para el análisis científico de imágenes. *Universidad Politécnica de Madrid*, 197.
- Sheth, V., Mehta, A., & Gharal, A. (s. f.). Experimental Investigation and Optimization of Milling Parameters in the Machining of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Material using PCD Tool. 2(4), 7.
- Troost, P. (s. f.). Practical Applications “New” NDT Techniques on Composite Material in the Aerospace Industry. 38.

Referencias web (Última consulta: 05/03/2019)

- Retos para el mecanizado mecánico de materiales compuestos de fibras destinados a la construcción ligera. (s. f.). <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/81259-Retos-mecanizado-mecanico-materiales-compuestos-fibras-destinados-construccion-ligera.html>
- Métodos de fabricación (s.f.). <http://nexusprojectes.com/tecnologia-2>
- Chapter 7: Advanced Composite Materials (s.f.). http://www.sweethaven02.com/Aviation/MaintHandbook/ama_Ch07.pdf