



# Detección mediante visión computacional del grado de orientación de fibra en material compuesto

J.-A. Almazán-Lázaro<sup>1</sup>, J. Liébana-Cruz<sup>1</sup>, E. López-Alba<sup>1</sup>, G.-L. Gómez-González<sup>1</sup>, F.A. Díaz-Garrido<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera. Universidad de Jaén.

[jalmazan@ujaen.es](mailto:jalmazan@ujaen.es), [jlc00048@red.ujaen.es](mailto:jlc00048@red.ujaen.es), [elalba@ujaen.es](mailto:elalba@ujaen.es), [glgomez@ujaen.es](mailto:glgomez@ujaen.es), [fdiaz@ujaen.es](mailto:fdiaz@ujaen.es)

---

*En la actualidad, el conocimiento preciso de las propiedades mecánicas de los materiales permite que estos sean utilizados de manera más eficiente, con la consecuente reducción de recursos durante su fabricación y del peso final de los componentes. En materiales compuestos reforzados con fibra larga, la capacidad para predecir y corregir desviaciones en la alineación de la fibra durante las etapas de fabricación del material resulta especialmente conveniente en el contexto de la industria 4.0.*

*En este trabajo se muestran los avances en la monitorización y detección de la orientación de la fibra en compuestos termoplásticos y termoestables reforzados con fibra larga. Se describe una metodología que permite analizar la distribución de la orientación de la fibra en una región extensa del material. El empleo de visión artificial y algoritmos de procesado de imágenes permiten monitorizar el grado de orientación de la fibra de un determinado tejido, en las distintas etapas del proceso de fabricación. De forma previa a la fabricación, pueden detectarse regiones con orientaciones inadecuadas, con el objetivo de corregirlas. Tras la fabricación, la metodología permite estimar las propiedades mecánicas finales que tendrá un laminado con una determinada distribución de orientaciones.*

*Los resultados han mostrado una elevada capacidad de detección en los materiales analizados. Ha permitido señalar aquellas hebras o fibras con desalineaciones superiores a un cierto umbral y evaluar los resultados de forma estadística, permitiendo comparar el grado de orientación de distintos materiales. Su potencial aplicación en la industria permitirá reducir la subjetividad de las operaciones manuales con el consecuente aumento del rendimiento de los materiales fabricados.*

---

## 1. Introducción

En los últimos años, el estudio de los materiales compuestos reforzados con fibra larga ha cobrado una relevancia creciente, dada su capacidad para cumplir con las demandas actuales de la ingeniería. Sus excelentes propiedades mecánicas permiten reducir el peso estructural sin comprometer la resistencia, lo que a su vez implica un uso más racional de los recursos [1].

Los materiales compuestos termoplásticos y termoestables reforzados con fibra larga combinan una matriz polimérica con fibras que actúan como refuerzo estructural, creando una interacción sinérgica que potencia sus propiedades finales. La matriz proporciona cohesión al material, mantiene los refuerzos en la orientación deseada y los protege de agentes externos mientras que el refuerzo aporta propiedades mecánicas, utilizando materiales ligeros con buena estabilidad térmica y mecánica, además de facilidad en su procesamiento. Este tipo de combinación permite aprovechar las ventajas únicas de ambos componentes: la matriz funciona como un agente de unión y transmisor de tensiones hacia los refuerzos, siendo flexible y con capacidad de moldeado, mientras que las fibras absorben las tensiones, incrementando la rigidez y la resistencia del material [2]. El resultado son materiales ligeros, resistentes y con gran versatilidad, adecuados para numerosas aplicaciones.

Desde su aparición, se ha investigado el comportamiento y los modos de fallo de los materiales compuestos para optimizar sus propiedades. Sin embargo, la predicción del fallo resulta compleja debido a la anisotropía que presentan [3]. Existen otros factores como el contenido en fibra, el tipo de fibra empleada, el método de fabricación y la adherencia entre matriz-fibra, que afectan a las propiedades mecánicas del material [4]. Durante el proceso de fabricación aparecen multitud de defectos e imperfecciones que reducen las propiedades mecánicas finales [5], [6], tales como los atrapamientos de aire sobre los que se han publicado numerosos estudios [7], [8], [9], [10]. El efecto de las desalineaciones de fibra es otro de los defectos más comunes en materiales compuestos [11]. La orientación de las fibras desempeña un papel fundamental en las propiedades mecánicas finales del material. Esto se debe a que la progresión del daño depende de la orientación de las fibras, siendo especialmente relevante cuando estas están alineadas de forma paralela a la dirección de la carga [12]. Por otro lado, la desalineación de fibras puede reducir la resistencia y aumentar la probabilidad de fallos localizados [13]. Durante las etapas de diseño, se fija la orientación de cada una de las capas que conforman el material, que determina las propiedades mecánicas de cada una de ellas y del conjunto. Sin embargo, durante el proceso de fabricación ocurren desalineaciones sobre la orientación de diseño, lo que reduce las propiedades mecánicas locales en la zona desalineada. Tal hecho implica que en las etapas de diseño debe tenerse en cuenta tal factor, en forma de factor de seguridad, ya que, en la mayoría de los casos, la orientación final no es controlada. Conocer y controlar la orientación de la fibra antes y después del proceso de fabricación permitiría determinar sus propiedades mecánicas locales. En consecuencia, se tendrá un conocimiento más preciso del comportamiento mecánico del componente, permitiendo reducir los factores de seguridad durante el diseño.

Por esta razón, analizar la homogeneidad en la distribución y orientación de las fibras resulta fundamental para predecir las características mecánicas del material. Una evaluación precisa durante el proceso de fabricación puede ayudar a identificar desalineaciones, la densidad del material de refuerzo, así como la presencia de vacíos o imperfecciones que puedan influir en las propiedades finales. Estas detecciones en la etapa de fabricación permiten corregir posibles desviaciones en la alineación de las fibras, lo que supone un avance en la industria digital o industria 4.0 del material compuesto.

De forma tradicional, se han realizado inspecciones manuales durante el proceso de fabricación para rectificar la orientación de las fibras, pero este método es ineficiente e impreciso. Existen numerosos métodos para realizar inspecciones in situ sobre el material fabricado, como mediciones de corrientes de Foucault [14], rayos X con tomografía computarizada [15], termografía [16] y polarización mediante transmisión [17], aunque entre los más estudiados hasta el momento se encuentran aquellos que aplican vibraciones ultrasónicas para detectar los defectos [18]. Sin embargo, estas técnicas son aplicables cuando el material ya está fabricado y no en etapas anteriores al mismo, por lo que no se puede corregir la orientación antes del curado.

Es por ello, que el objetivo de este trabajo es ofrecer una solución análoga aplicando metodologías de visión artificial para procesar imágenes tomadas por una cámara, usada a modo de sensor, antes, durante, y tras el proceso de fabricación. El uso de este tipo de herramientas permite monitorizar la orientación de la fibra de determinados tejidos de una forma sencilla, sin contacto con el material, con alta precisión y velocidad, y bajo coste. Se pueden identificar las desalineaciones en las fibras antes de que el material sea impregnado y curado, lo que permite una corrección de los defectos y una mejora del rendimiento mecánico del material.

Por su parte, la visión por computación o visión artificial ha experimentado un notable avance en la última década. Estos han sido impulsados por el desarrollo computacional y sensores ópticos, permitiendo el uso de algoritmos avanzados capaces de detectar patrones, formas, colores, texturas, siendo capaces de extraer características de manera automática [19]. Esta herramienta ofrece una gran flexibilidad y versatilidad, permitiendo la automatización de procesos mediante cuatro facetas, el reconocimiento, la medición, la clasificación y la detección [20] en múltiples sectores industriales [21], [22].

Actualmente, se han desarrollado estudios en los que otros investigadores han tratado de medir con detección de objetos mediante visión computacional el ángulo de las fibras en tejidos, lo que manifiesta el interés de la industria por este tipo de técnicas. Concretamente, Döbrich y Brauner [23] analizan el ángulo en materiales con fibra de carbono utilizando una cámara RGB para realizar posteriormente simulaciones mecánicas de la orientación final. Entre los trabajos realizados, algoritmos utilizados en el procesamiento de imágenes como la transformada de Fourier [24] y la detección de bordes han sido desarrolladas. Recientemente técnicas más avanzadas, como la Transformada de Hough para obtener las líneas en la imagen segmentada, están siendo ampliamente utilizadas [25], [26]. La detección de la orientación de dirección de fibra unida a algoritmos genéticos, también han sido utilizados para anticipar las propiedades mecánicas de materiales compuestos [27].

El objetivo de este trabajo se basa en la propuesta de una metodología que permita conocer la alineación de las fibras textiles naturales empleadas como refuerzo en materiales compuestos. Se abordan los retos de detectar fibras no homogéneas, con presencia de nudos, imperfecciones e inclusiones que dificultan la detección. Se propone por tanto un método para detectar segmentos de las fibras en tejidos naturales mediante segmentación por umbral adaptativo y la transformada de Hough.

## 2. Métodos y materiales

Existen diversas configuraciones para las fibras que componen el refuerzo; sin embargo, resulta particularmente relevante aplicar un método de detección de la orientación de las fibras en los materiales de refuerzo que presentan fibras alineadas, ya que el objetivo es lograr un alto grado de homogeneidad en el refuerzo. El objetivo de este estudio es analizar materiales textiles con fibras continuas bidireccionales, aunque la aplicación del método se puede extrapolar a diferentes tipos de configuraciones con fibras orientadas.

La geometría de las fibras en los tejidos es el resultado de la combinación de hilos dispuestos en dos direcciones, trama y urdimbre. A su vez, la organización de estos hilos en patrones específicos determina el tipo de tejido. Para este trabajo, se ha seleccionado la configuración bidireccional simple, según se muestra en la Figura 1a, que muestra la orientación idealizada de fibra. En la Figura 1a se aprecia la distribución teórica de las fibras en un tejido bidireccional [0/90]. En la Figura 1b se muestra el material real utilizado en la aplicación del método propuesto, un material de matriz termoplástica de polipropileno, y reforzado por un tejido equilibrado [0/90] de tipo entrelazado o *woven*. Se observan desalineaciones locales, cambios de color, de espesor de hebra y separación entre las mismas. Se utiliza PP (polipropileno) transparente reforzado con yute prensado en caliente, dadas sus propiedades de reciclabilidad y recuperación tanto de la matriz como de la fibra, destacando además el hecho de ser la fibra de origen natural renovable, lo que se manifiesta por su uso en diversos trabajos [28], [29].

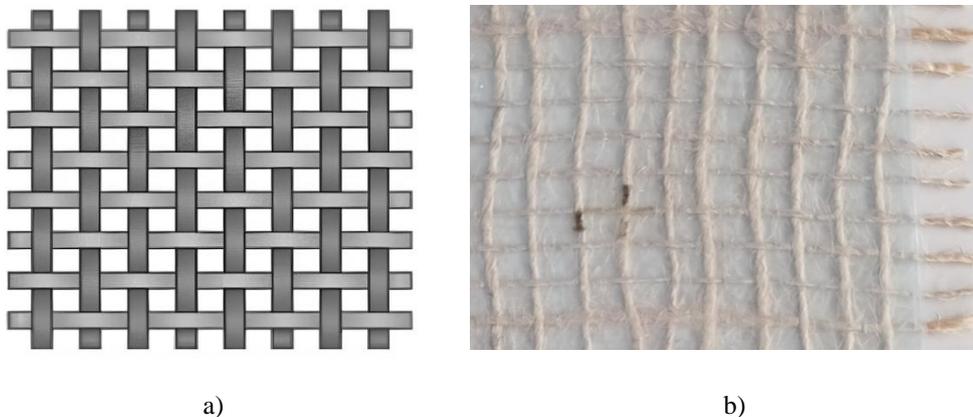


Figura 1: Modelo de patrón refuerzo con fibra continua bidireccional (a), y tejido real con termoplástico reforzado con fibra larga de yute (b).

Este material presenta varios retos, ya que al ser un material natural su estructura es heterogénea, conteniendo impurezas y defectos que pueden dar lugar a ruido en las imágenes y dificultar el análisis, tal como muestra la Figura 1. También presenta una textura irregular, lo que dificulta la segmentación en imágenes de alta calidad, a su vez, esta textura irregular supone una reflectancia variable, reduciendo el contraste en las imágenes y dificultando la segmentación. Debido a las diferencias entre fibras y a su sensibilidad frente a la humedad, el color del yute puede variar lo que debe tenerse en cuenta en el momento de diseñar los algoritmos de procesamiento.

La metodología propuesta se basa en el procesado y segmentación de imágenes para detectar desviaciones en la alineación de las fibras mediante la transformada de Hough. La implementación ha sido desarrollada en Matlab, utilizando el conjunto de funciones integradas en el paquete *Image Processing Toolbox*.

El proceso seguido para la toma, análisis y postprocesado de las imágenes es mostrado en la Figura 2. Inicialmente, para la toma de imágenes del tejido se ha utilizado una cámara USB RGB de bajo coste Trust Trino HD Webcam de 1280 x 720 píxeles, ubicada a una distancia de 50 cm y perpendicular al plano del tejido, situado éste sobre un fondo de polipropileno blanco. Se realiza una división de la imagen en distintas regiones o segmentos más pequeños, de manera que puedan analizarse y detectarse desalineaciones locales en el tejido. Las siguientes operaciones han sido agrupadas en Preprocesado de imagen, Detección de líneas, y Postprocesado, según se describe a continuación.

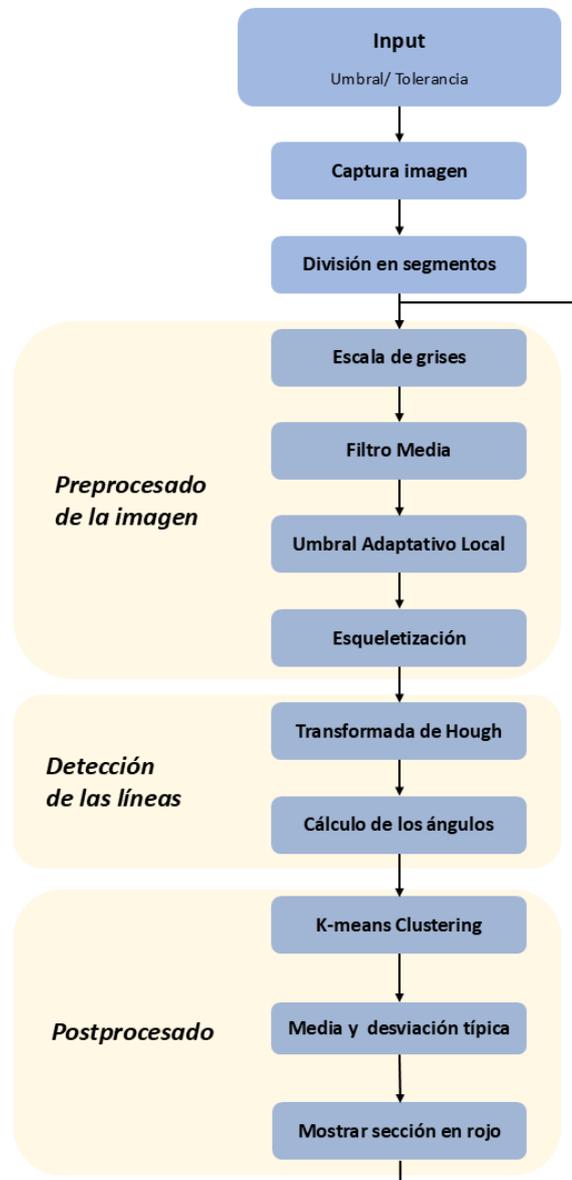


Figura 2: Diagrama de flujo del método propuesto.

### 2.1. Preprocesado

Las imágenes adquiridas requieren de tratamientos previos antes de ser procesadas por las funciones de detección, eliminando información irrelevante, fibras desestructuradas o fuera de las hebras y ruido.

Se comienza por la conversión a escala de grises de la imagen. Dado que ésta es tomada por un sensor RGB, el procesamiento simultáneo de los tres canales puede resultar computacionalmente costoso e irrelevante para el tipo de tejido utilizado. Aunque existen diferentes métodos para convertir una imagen a color RGB en una imagen de intensidad en escala de grises; la forma más común es ponderar los canales de la forma mostrada en la ecuación 1, donde  $I_{gris}$  es la intensidad de la imagen en escala de grises,  $R$ ,  $G$ ,  $B$  son los valores de intensidad de los canales rojo, verde y azul, respectivamente, y los coeficientes  $C_R$ ,  $C_G$  y  $C_B$  pueden ser seleccionados para dar mayor o menor importancia a cada uno de los canales. Los valores más usuales en la conversión son  $C_R = 0.299$ ,  $C_G = 0.587$  y  $C_B = 0.114$ . El resultado se muestra en la Figura 3a, con un fuerte contraste entre las hebras de fibra y el fondo.

$$I_{\text{gris}} = R \cdot C_R * + R \cdot C_G + R \cdot C_B \quad (1)$$

Posteriormente, con el objetivo de homogeneizar los valores de intensidad y eliminar con ello ciertos defectos de la imagen, como fibras fuera de hebras o cambios locales de intensidad, se aplica el filtro de la media. Al tratarse de un filtro no lineal, mantiene los aspectos más relevantes de las hebras y sus posiciones, evitando desenfocar los bordes. El tamaño de la matriz (*kernel*) deberá ajustarse en función de las características del tejido como su tipo, grosor o proximidad entre hebras. El resultado se muestra en la Figura 3b, donde se puede observar en el detalle la menor definición de los detalles de la imagen, como las fibras fuera de la hebra principal.

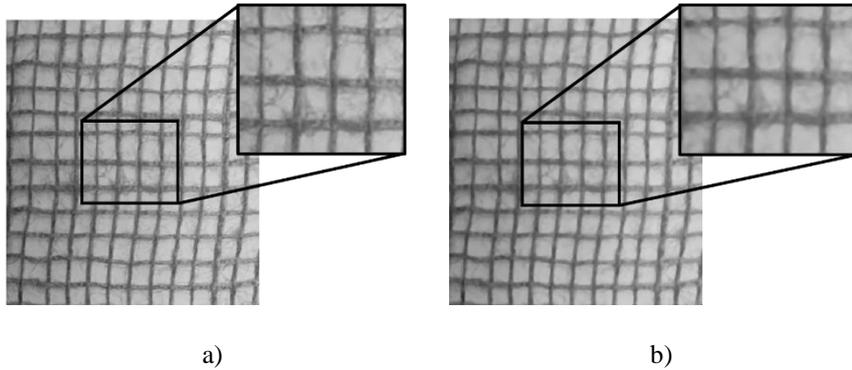


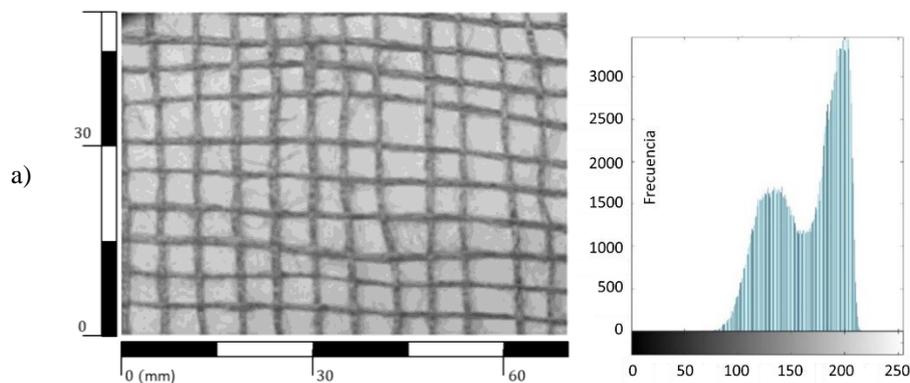
Figura 3: Imagen original (a) y resultado de aplicar el filtro de la media (b).

A continuación, se convierte la imagen en blanco y negro, proceso conocido como binarización o segmentación de la imagen en varias regiones diferenciadas. Dado que se parte de una imagen en escala de grises, con un amplio rango de valores, debe establecerse un valor o umbral, a partir del cual un determinado píxel ( $x,y$ ) es considerado blanco o negro, según describe la ecuación 2, donde  $I(x,y)$  representa cada píxel de la imagen en escala de grises,  $B(x,y)$  los píxeles de la imagen en blanco y negro, y  $T$  es el umbral.

$$B(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{si } I(x,y) \geq T \\ 0 & \text{si } I(x,y) < T \end{cases} \quad (2)$$

Para establecer el valor umbral de manera automática en función de las características de la imagen existen diversos métodos, como el de Otsu, el de brillo promedio o el adaptativo local.

El método de Otsu calcula el umbral óptimo para binarizar la imagen, se usa cuando se tiene un alto contraste entre regiones de la imagen. Dado que las fibras se han dispuesto sobre fondo blanco, el contraste en este caso es elevado, por lo que este método resulta apropiado. Esto se manifiesta al representar el histograma, dado que si este representa una distribución bimodal significa que la imagen es adecuada para ser segmentada mediante este método, indicando que existen dos grupos con brillos diferentes, el fondo y las fibras del material. En la Figura 4 se han representado dos imágenes de dos regiones diferentes de un laminado. En la Figura 4a se muestra una imagen con intensidades uniformes entre la zona de la fibra en oscuro y el fondo más claro, por lo que su histograma muestra claramente una distribución bimodal, y el umbral será definido entre los dos máximos. En la Figura 4b se muestra una imagen similar, pero tomada en condiciones de luz no uniformes, por lo que aparece una zona oscurecida a la izquierda. Como resultado, presenta una menor diferencia de intensidad entre el fondo y las fibras, y podría dificultar la segmentación de la imagen. Esta dificultad remarca la importancia de disponer de condiciones ideales de luz.



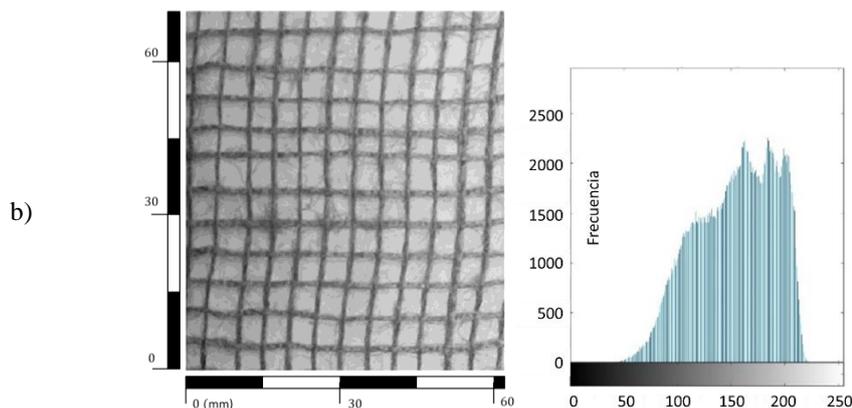


Figura 4: Imagen con alto contraste e histograma bimodal (a), e imagen con condiciones de luz insuficientes e histograma de mayor complejidad (b).

Como segundo método, el cálculo de umbral basado en el brillo promedio se realiza calculando el promedio de intensidad de todos los píxeles de la imagen según la ecuación 3, donde  $T_{prom}$  es el valor medio de intensidad,  $I(x,y)$  es cada uno de los píxeles de la imagen. El método, siendo rápido y sencillo, resulta aplicable cuando el contraste entre regiones es elevado, aunque no tiene en cuenta la variabilidad local.

$$T_{prom} = \frac{1}{N} \sum I(x,y) \quad (3)$$

El tercer método analizado, el de umbral adaptativo local, divide la imagen en pequeñas regiones y calcula un umbral diferente para cada una en función de la intensidad de los píxeles de la zona. Posteriormente se genera la matriz binaria de la imagen empleando los umbrales de cada región. Es especialmente útil para imágenes con iluminación no uniforme, como es el caso de la imagen mostrada en la Figura 4b.

El resultado de la aplicación de los tres métodos es mostrado en la Figura 5. Se ha utilizado la imagen de la Figura 4b, como caso más complejo de analizar. En la Figura 5a se muestra la imagen original, y en la Figura 5b, 5c y 5d se muestran los tres métodos, Otsu, promedio y local adaptativo, respectivamente. Dada la no uniformidad de luz de la imagen elegida, se observa que el mejor resultado ha sido obtenido por el método de umbral adaptativo, que ha sido capaz de detectar y definir correctamente cada una de las cuadrículas enmarcadas por la fibra.

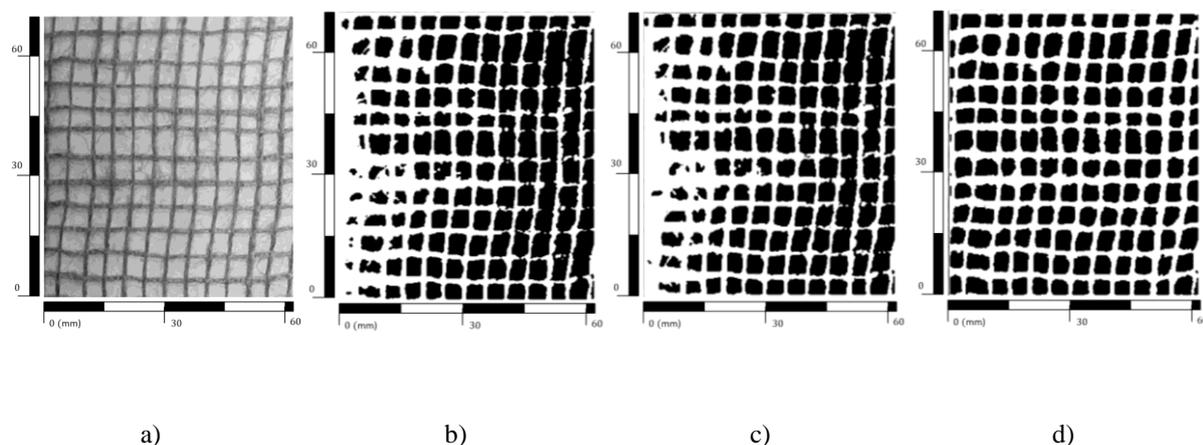


Figura 5: Comparación de resultados de umbralización por los tres métodos. Imagen original (a), método Otsu (b), método de promedio (c) y método adaptativo local (d).

## 2.2. Esqueletización

Una vez segmentada la imagen, la esqueletización es un proceso de morfología que permite reducir una imagen binaria a su estructura esencial, manteniendo la tipología de la imagen inicial. Desde el punto de vista de las fibras, el resultado será la línea media que define cada una de las hebras del material. De esta forma se reduce el efecto del ruido y las imperfecciones del material, con el objetivo de facilitar la detección de líneas. La imagen original y el resultado comparativo de la esqueletización es mostrado en la Figura 6a y Figura 6b.

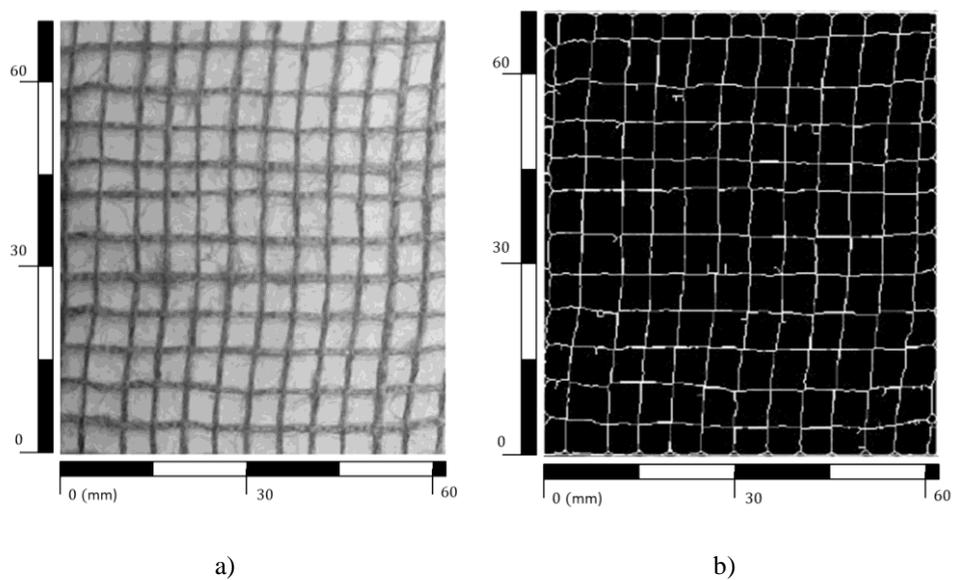


Figura 6: Imagen original (a), e imagen esqueletizada (b).

### 2.3. Detección de las líneas. Transformada de Hough

A partir de la imagen esqueletizada, en la que las formas o líneas solamente se representan como píxeles, se puede obtener la representación paramétrica de las mismas mediante la aplicación de la transformada de Hough. En el caso de la detección de líneas rectas, el algoritmo busca expresar cada una de las líneas encontradas de la forma expresada por la ecuación 4. donde  $\rho$  es la distancia desde el origen hasta la línea y  $\theta$  es el ángulo entre el eje X y la normal a la línea que pasa por el origen, según se muestra en la Figura 7.

$$\rho = x * \cos(\theta) + y * \text{sen}(\theta) \quad (4)$$

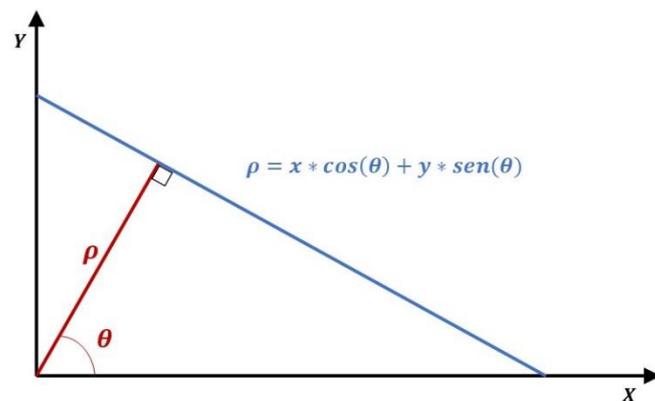


Figura 7: Sistema de referencia para la expresión paramétrica de las líneas rectas.

Tras la búsqueda de todas las posibles rectas que pasan por todos los puntos se analiza el número de puntos que podrían corresponder a una línea recta. Aplicando un umbral adecuado se pueden filtrar tales picos para obtener las rectas que con mayor probabilidad lo sean realmente. Posteriormente se unifican las posibles rectas más pequeñas que podrían formar parte de la misma recta, descartando aquellas que resulten ser muy pequeñas. El resultado sobre la imagen original (Figura 8a) es mostrado en la Figura 8b.

En la imagen se aprecia un elevado grado de correspondencia entre la imagen original y las líneas detectadas como hebras (en verde) horizontales. Esto ocurre porque en la imagen original, las hebras horizontales son aproximadamente horizontales en toda su longitud. No ocurre así con las hebras verticales, donde se observan claras desviaciones en la imagen original. Al presentar diferentes inclinaciones en las distintas regiones de la imagen, se obtienen rectas poco precisas y que no representan fielmente la realidad. Ello ocurre cuando las distintas rectas detectadas por la transformada de Hough se unen para dar una única recta. Las rectas podrán posteriormente clasificarse en horizontales y verticales, pudiendo diferenciar desalineaciones en ambas direcciones.

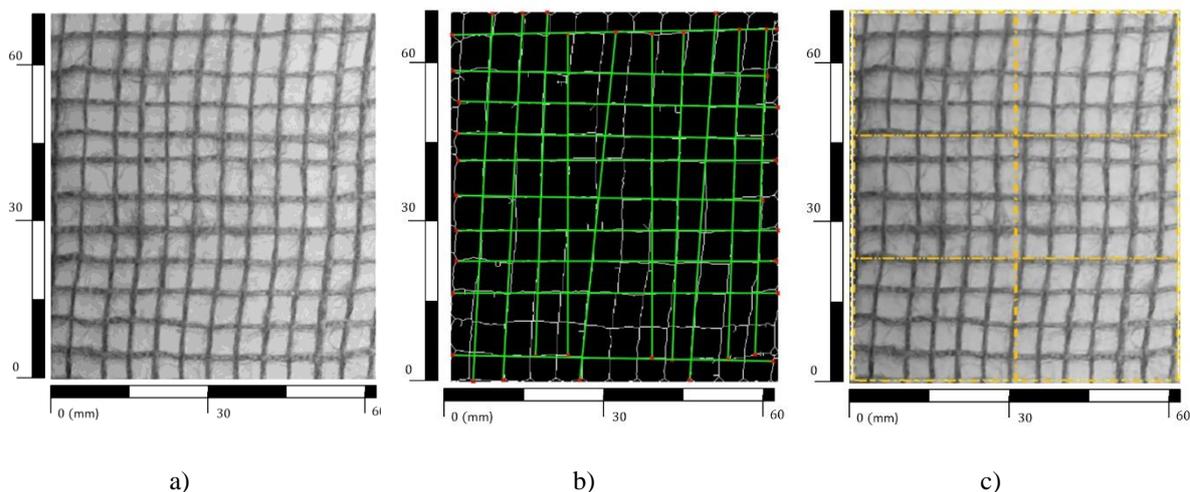


Figura 8: Imagen original (a), resultado de aplicar la transformada de Hough (b), e imagen dividida en subregiones (c).

Para optimizar este resultado se ha optado por dividir la imagen en subregiones (Figura 8c) de manera que las rectas obtenidas tengan un carácter local, representando de forma más precisa las diferentes desalineaciones de una misma hebra en diferentes partes del tejido.

#### 2.4. Postprocesado de los datos

Dada la gran cantidad de información que se genera sobre cada imagen, resulta complejo interpretar los resultados y decidir si un determinado tejido es o no válido. Para simplificar el análisis, se genera, para cada imagen un histograma que representa el número de fibras desalineadas un cierto valor, de manera que típicamente aparecen distribuciones normales, tal como otros autores han determinado [31]. De esta forma, una distribución estrecha significará que el tejido en su conjunto está alineado en una determinada dirección, mientras que una distribución ancha indicará que hay gran cantidad de hebras desalineadas. En el caso del material analizado, con fibra en dos direcciones ortogonales, el histograma contendrá información sobre las hebras horizontales y verticales en forma de distribución bimodal (Figura 9), alrededor de  $0^\circ$  (hebras horizontales) y  $90^\circ$  (hebras verticales).

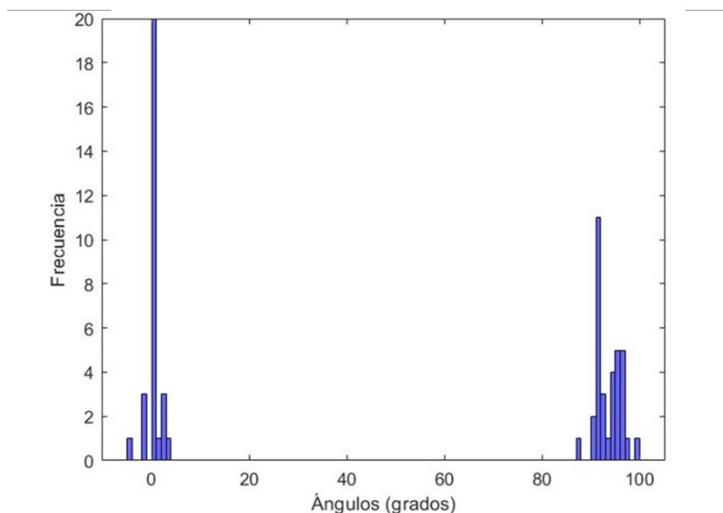


Figura 9: Representación de todos los ángulos detectados

Se observa en la Figura 9 que las hebras horizontales muestran una gran cantidad de fibras orientadas a  $0^\circ$ , mientras que, en el caso de las hebras verticales, la distribución es más ancha, indicador de una mayor variación en los ángulos sobre el valor de  $90^\circ$ , como se manifestó anteriormente. Por la propia integridad de las hebras entrelazadas, las hebras individuales raramente se desalinean de manera independiente, y como consecuencia las desalineaciones aparecen normalmente concentradas en determinadas regiones, tal como se puede percibir en la Figura 8c. En estas condiciones, se aplica un algoritmo de aprendizaje automático para agrupar los resultados del grado de desalineación, como el *K-means Clustering*. Este método agrupa los ángulos similares en *clusters*, lo que ayuda a identificar de manera automática patrones dominantes en la imagen. Se evita así analizar los ángulos individualmente. Conocidos los grupos, se calcula su valor medio y desviación típica, que valorará numéricamente

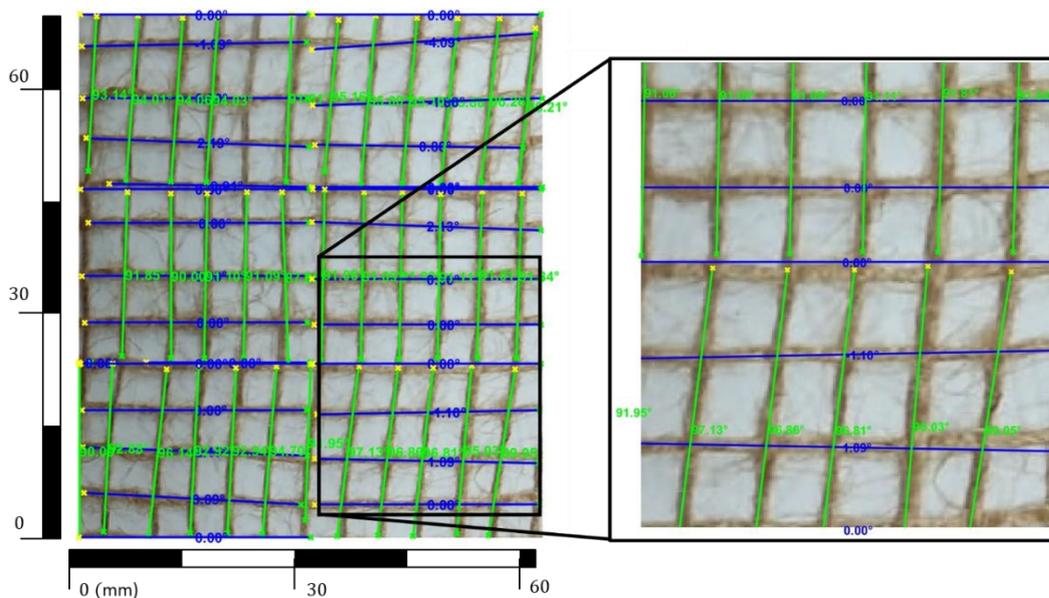
el grado de desalineación en un determinado material. El valor medio de todas las orientaciones será utilizado como orientación de referencia del tejido, evitando así que rotaciones en la cámara puedan generar resultados incorrectos. En el caso de tejidos biaxiales, se calcularán los valores anteriores para cada uno de los ejes.

Por último, además de superponer la imagen original con las hebras detectadas y sus correspondientes ángulos, se señalarán en rojo aquellas que tengan una desalineación excesiva. Así se podrán identificar rápidamente regiones desalineadas, y consecuentemente podrán ser corregidas durante el proceso de fabricación. El nivel de desalineación máxima admisible será especificado como entrada del método propuesto, y dependerá del tipo de material, nivel de exigencia mecánica del componente, sector de utilización, etc.

### 3. Resultados y Discusión

Aunque parte de los resultados ya han sido expuestos durante el desarrollo de la metodología, se mostrarán en este punto aquellos más relevantes sobre varias imágenes tomadas del material utilizado.

En la Figura 10 se muestran los resultados de orientaciones de trama y urdimbre, en verde y azul, respectivamente. Dada la gran cantidad de datos mostrados, la imagen ampliada permite ver de forma más clara la orientación de cada una de las hebras detectadas. Para las fibras horizontales se obtiene una media de la orientación de  $0.15^\circ$  y una desviación típica de  $1.31^\circ$ . Para las verticales, en cambio, la media se encuentra en  $93.44^\circ$  y la desviación típica en  $2.53^\circ$ , por lo que existe mayor dispersión en las verticales, que se traduce en una mayor desalineación. Además, la diferencia de medias permite afirmar que trama y urdimbre no se cruzan de forma perpendicular, sino que existe un giro relativo sobre la perpendicularidad de  $3.29^\circ$ , tal como se aprecia en la parte inferior de la ampliación de la Figura 10. Este efecto resulta inevitable durante el drapeado de un tejido plano sobre una superficie curva o irregular, situaciones en las cuales el método propuesto permitiría controlar tales desviaciones.



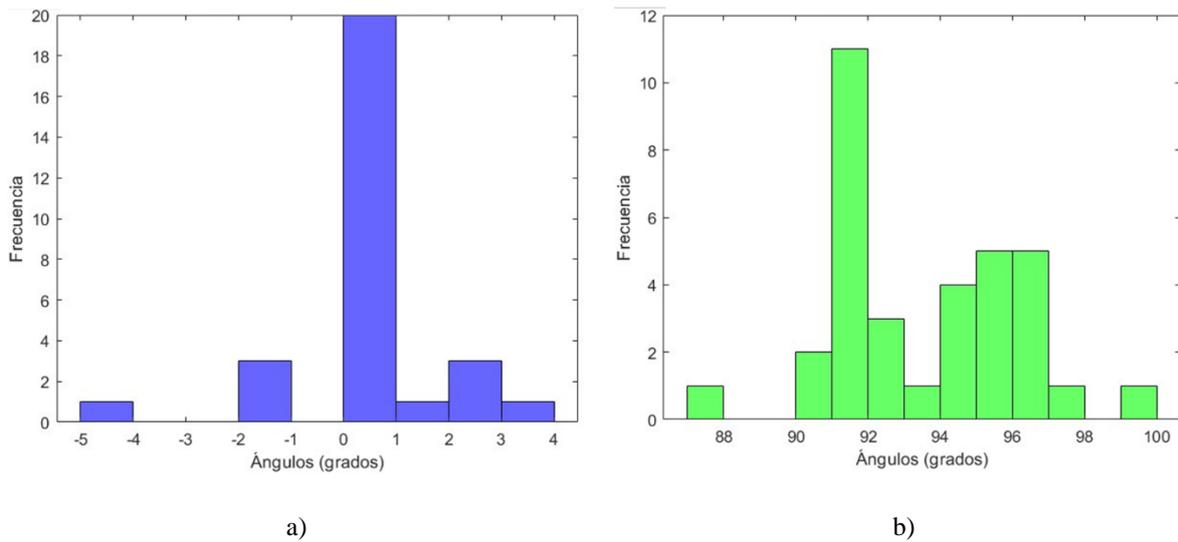


Figura 11: Histogramas de los ángulos detectados para cada orientación

Cuando se aplica sobre una imagen de mayor tamaño (Figura 12), los resultados permiten evaluar de forma más evidente el laminado a través de sus histogramas, representados en la Figura 13a y figura 13b, para las hebras horizontales y verticales, respectivamente. En este caso se trabaja con un mayor número de segmentos y los histogramas se asemejan de forma más evidente a distribuciones normales. Las fibras horizontales en este caso se encuentran mucho más desalineadas, por lo que la dispersión es mucho mayor. Se ha obtenido una desviación típica de  $4.64^\circ$  para una media que se encuentra en  $1.05^\circ$ . Por otro lado, las fibras verticales presentan una mayor alineación, con una desviación típica de  $0.80^\circ$  y una media de  $89.53^\circ$ .

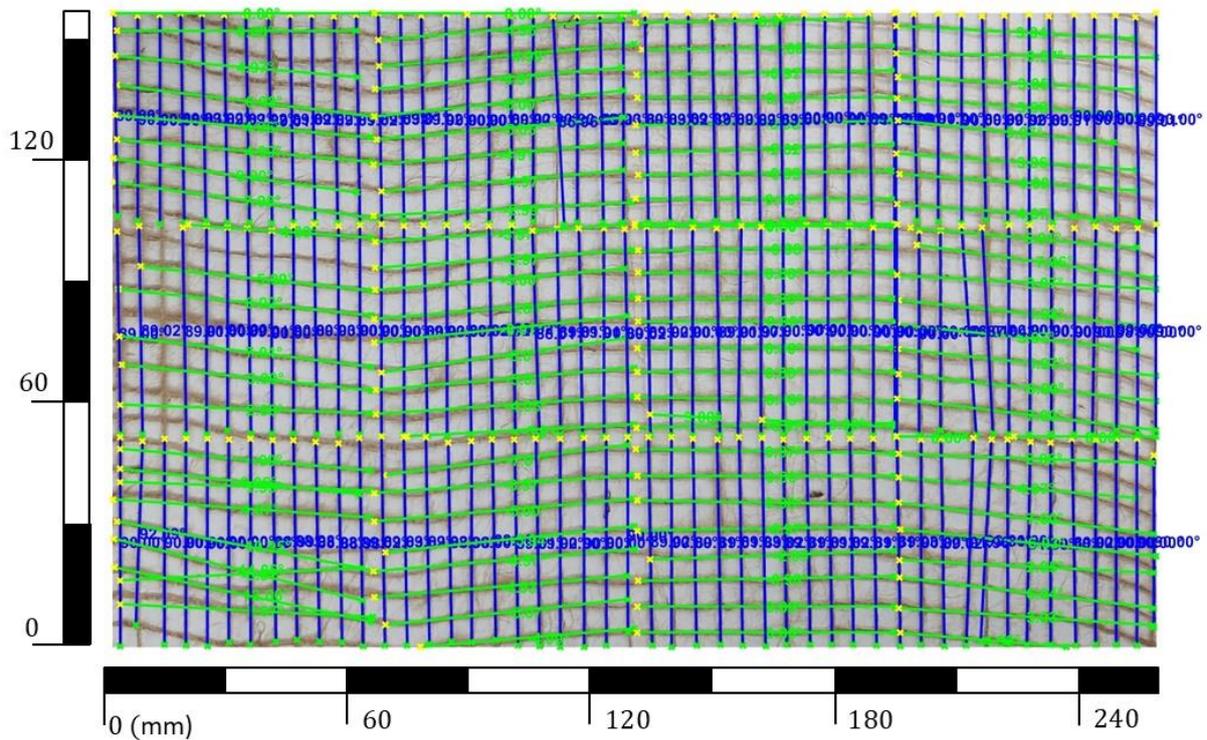


Figura 12: Aplicación del método sobre un laminado de mayor tamaño.

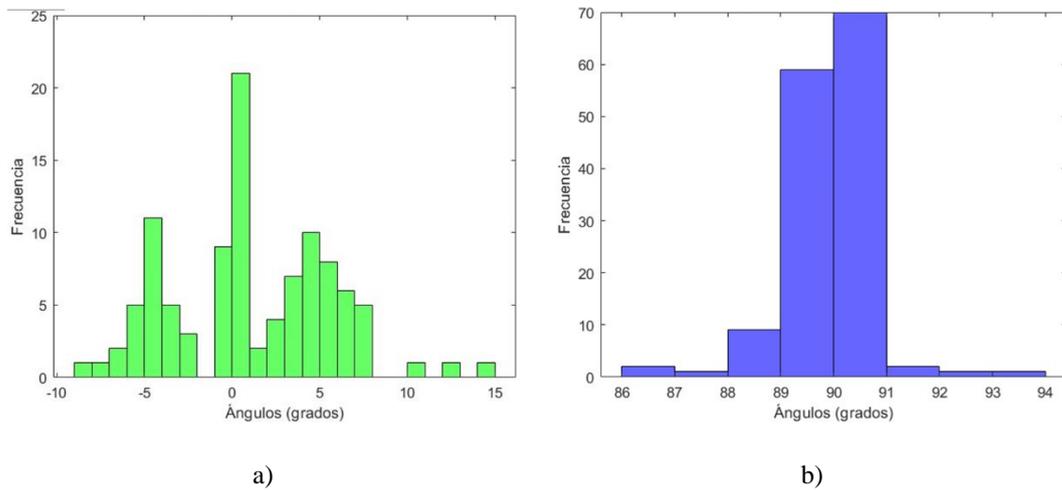


Figura 13: Histogramas de los ángulos detectados para hebras horizontales (a) y verticales (b).

Al aplicar en la imagen de la Figura 12 un umbral de  $\pm 3^\circ$ , se pueden detectar de forma directa aquellas regiones con mayor desalineación como aquellas que superen tal límite. El resultado es mostrado en la Figura 14, donde puede apreciarse la división de la imagen en 12 regiones rectangulares para poder detectar variaciones de orientación a lo largo de la longitud de las hebras. Se pueden observar en rojo los valores que se encuentran fuera del rango admisible definido de  $\pm 3^\circ$ . Dada la elevada concentración de resultados numéricos, en la Figura 15 se muestra una ampliación de la zona remarcada en línea discontinua, donde se pueden observar los valores de orientación individuales de cada hebra.

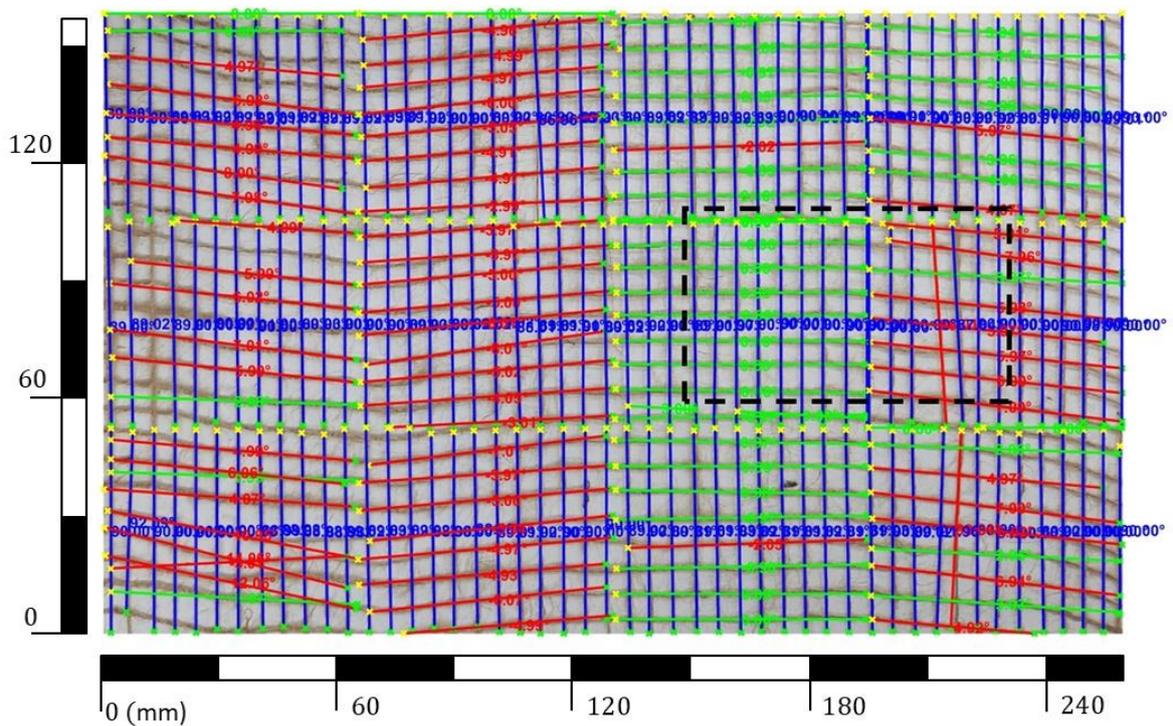


Figura 14: Resultado de aplicar un umbral de  $\pm 3^\circ$ .

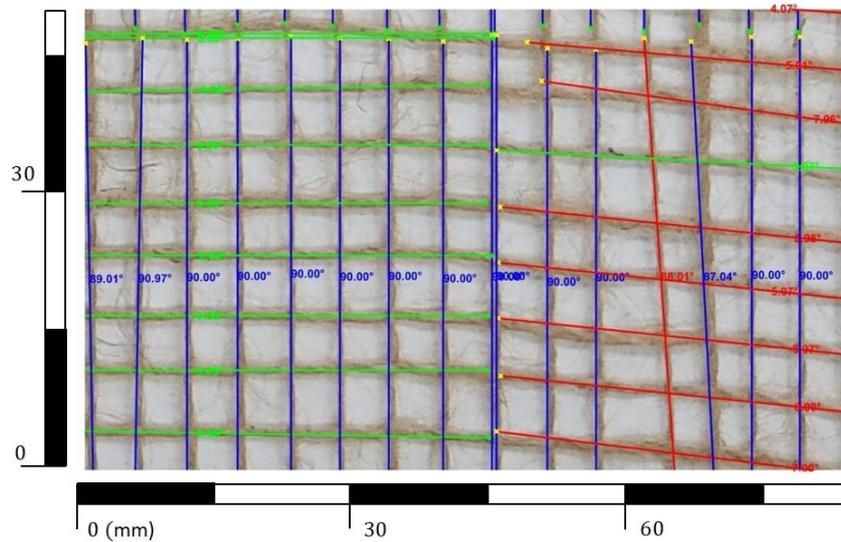


Figura 15: Detalle de la región señalada en la Figura 14.

Por otro lado, se observa cómo la representación de las líneas detectadas se corresponde fielmente con las hebras, aunque existen zonas con pequeñas desviaciones. Estas diferencias se pueden reducir disminuyendo el tamaño de las secciones en las que se divide la imagen, aunque se incurre en un aumento del coste computacional. Es por ello que es necesario un equilibrio entre la precisión de los valores y el rendimiento del cálculo del sistema.

Por último, la aplicación del método a una imagen con iluminación no controlada, de menor contraste, y con un mayor número de imperfecciones e irregularidades deriva en que ciertas hebras no son correctamente reconocidas (Figura 16). Se observa en este caso un tejido  $\pm 45^\circ$ . El detalle ampliado permite observar los ángulos de cada una de las hebras.

Se puede concluir así destacando que el método muestra un gran potencial para ser aplicado en una amplia variedad de tejidos y orientaciones. Sin embargo, resulta crucial controlar las condiciones de iluminación y fondo, para garantizar la versatilidad del método.

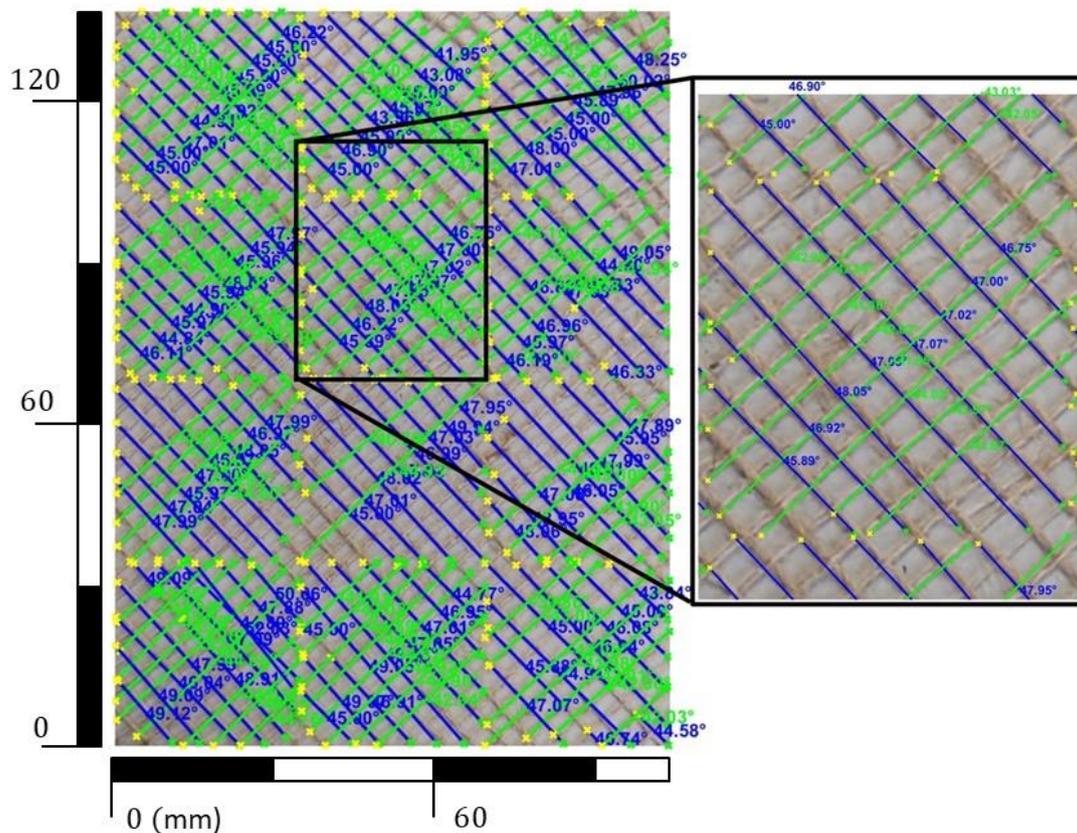


Figura 16: Resultado para una imagen con menor contraste e iluminación, a  $45^\circ$ , y detalle ampliado.

## 4. Conclusiones

Mediante la aplicación del método de análisis propuesto con visión artificial se ha logrado con éxito la detección de regiones de tejidos en las que las fibras o hebras del material de refuerzo presentan desalineaciones. Los resultados permiten evaluar un tejido antes, durante o tras su fabricación, de manera que podrían conocerse y controlarse antes de obtener el componente final. El método ha sido validado con imágenes tomadas tanto en entornos controlados como no controlados de iluminación y fondo, y utilizando materiales que mostraron falta de homogeneidad de color, de fondo y de orientación, mostrando estabilidad y precisión.

Para la aplicación óptima del método, se hace necesario un control de parámetros como la iluminación, el color del fondo y la calidad de la cámara para evitar posibles problemas de ruido y distorsión y lograr una mayor automatización del proceso, reduciendo el efecto del entorno en el momento de tomar la imagen.

Por último, durante su potencial aplicación industrial, este sistema permitiría no solo inspeccionar las hebras y fibras del material de refuerzo para detectar desalineaciones, sino que, estos resultados podrían relacionarse con las propiedades mecánicas del material final. Para ello, el método puede incorporar también mecanismos de detección de la densidad del material de refuerzo. La aplicación de este método en el proceso de fabricación ayudará a disminuir el impacto de la subjetividad del trabajador, reduciendo la dispersión en los resultados y mejorando las propiedades del material final. De esta forma se puede llegar a minimizar el material de refuerzo, suponiendo una reducción de peso, mejorando las propiedades mecánicas y el uso de coeficientes de seguridad más bajos al tener resultados más homogéneos.

## 5. Referencias

- [1] S. H. Kamarudin *et al.*, “A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 17, 2022, doi: 10.3390/polym14173698.
- [2] D. Hull, *Materiales compuestos*. Liverpool, 2010.
- [3] R. A. Balart Gimeno, L. J. Quiles Carrillo, N. Montañés Muñoz, T. Boronat Vitoria, and O. Á. Fenollar Gimeno, “Anisotropía en materiales. Efecto del ángulo de orientación de la fibra en las propiedades elásticas de una lámina de material compuesto,” 2019, Accessed: Feb. 12, 2025. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/122056>
- [4] E. M. Safwat, A. G. A. Khater, A. G. Abd-Elsatar, and G. A. Khater, “Glass fiber-reinforced composites in dentistry,” *Bull Natl Res Cent*, vol. 45, no. 1, p. 190, 2021, doi: 10.1186/s42269-021-00650-7.
- [5] R. A. Smith, “Composite Defects and their detection,” *Materials Science and Engineering*, vol. III, p. 14, 2011, [Online]. Available: <http://www.desware.net/sample-chapters/d07/E6-36-04-03.pdf>
- [6] F. Gommer, A. Endruweit, and A. C. Long, “Quantification of micro-scale variability in fibre bundles,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 87, pp. 131–137, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.04.019>.
- [7] J.-A. Almazán-Lázaro, E. López-Alba, and F.-A. Díaz-Garrido, “Improving Composite Tensile Properties during Resin Infusion Based on a Computer Vision Flow-Control Approach,” *Materials*, vol. 11, no. 12, p. 2469, 2018, doi: 10.3390/ma11122469.
- [8] J.-A. L.-A. E. D.-G. F.-A. Almazán-Lázaro, “Optimización De Propiedades Mecánicas Mediante El Control De La Velocidad De Impregnación En Procesos De Infusión,” in *XIV Congreso Nacional de Materiales Compuestos*, Sevilla: AEMAC, 2022.
- [9] J.-A. Almazán-Lázaro, E. López-Alba, and F.-A. Díaz-Garrido, “The mechanical effect of monitoring and controlling the impregnation in the resin infusion process,” *Composite Polymers. Status: In production*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.26507>.
- [10] J.-A. Almazán-Lázaro, E. López-Alba, and F.-A. Díaz-Garrido, “Applied computer vision for composite material manufacturing by optimizing the impregnation velocity: An experimental approach,” *J Manuf Process*, vol. 74, pp. 52–62, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.063>.
- [11] S. C. Barwick and T. D. Papathanasiou, “Identification of fiber misalignment in continuous fiber composites,” *Polym Compos*, vol. 24, no. 3, pp. 475–486, 2003, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.10046>.
- [12] C. Ríos-Soberanis, M. Pacheco-Cardín, J. Carlos Canto-Pinto, and E. Pérez-Pacheco, “Efecto de la densidad de fibras en las propiedades mecánicas de materiales compuestos reforzados,”

- Multidisciplinas de la Ingeniería*, vol. 10, no. 16, 2022, [Online]. Available: <http://www.multidisciplinasdelaingenieria.com><http://www.multidisciplinasdelaingenieria.com>FIM E-UANL
- [13] S. Zhang, J. A. W. van Dommelen, and L. E. Govaert, “Micromechanical Modeling of Anisotropy and Strain Rate Dependence of Short-Fiber-Reinforced Thermoplastics,” *Fibers*, vol. 9, no. 7, 2021, doi: 10.3390/fib9070044.
- [14] R. Lange and G. Mook, “Structural analysis of CFRP using eddy current methods,” *NDT & E International*, vol. 27, no. 5, pp. 241–248, 1994, doi: [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(94\)90128-7](https://doi.org/10.1016/0963-8695(94)90128-7).
- [15] T. Baranowski *et al.*, “Local fiber orientation from X-ray region-of-interest computed tomography of large fiber reinforced composite components,” *Compos Sci Technol*, vol. 183, p. 107786, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107786>.
- [16] Hai Zhang *et al.*, “Infrared Thermography and X-Ray Tomography for Non-Destructive Evaluation of Micro-defects in CFRP,” in *1st QIRT Asia Conference on Quantitative Infrared Thermography*, Mahabalipuram, India, 2015.
- [17] L. Chiominto, G. D’Emilia, and E. Natale, “Using Light Polarization to Identify Fiber Orientation in Carbon Fiber Components: Metrological Analysis,” *Sensors*, vol. 24, no. 17, 2024, doi: 10.3390/s24175685.
- [18] J. Jodhani, A. Handa, A. Gautam, Ashwni, and R. Rana, “Ultrasonic non-destructive evaluation of composites: A review,” *Mater Today Proc*, vol. 78, pp. 627–632, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.055>.
- [19] M. Wu, C. Li, and Z. Yao, “Deep Active Learning for Computer Vision Tasks: Methodologies, Applications, and Challenges,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 16, 2022, doi: 10.3390/app12168103.
- [20] L. Zhang *et al.*, “The development of machine vision and its applications in different industries: A review,” *Mechanical Engineering Advances*, vol. 2, no. 2, p. 1746, Nov. 2024, doi: 10.59400/mea.v2i2.1746.
- [21] V. Gorodokin, S. Zhankaziev, E. Shepeleva, K. Magdin, and S. Evtyukov, “Optimization of adaptive traffic light control modes based on machine vision,” *Transportation Research Procedia*, vol. 57, pp. 241–249, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.047>.
- [22] G. Roggi, A. Niccolai, F. Grimaccia, and M. Lovera, “A Computer Vision Line-Tracking Algorithm for Automatic UAV Photovoltaic Plants Monitoring Applications,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 4, 2020, doi: 10.3390/en13040838.
- [23] O. Döbrich and C. Brauner, “Machine vision system for digital twin modeling of composite structures,” *Front Mater*, vol. 10, 2023, doi: 10.3389/fmats.2023.1154655.
- [24] B. Pourdeyhimi, R. Dent, and H. Davis, “Measuring Fiber Orientation in Nonwovens Part III: Fourier Transform,” *Textile Research Journal*, vol. 67, no. 2, pp. 143–151, 1997, doi: 10.1177/004051759706700211.
- [25] J. Hou, T. Wang, J. Xu, and M. Cao, “Yarn Angle Detection of Glass Fiber Plain Weave Fabric Based on Machine Vision,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 7, 2024, doi: 10.3390/app14072937.
- [26] F. Ding, B. Wang, Q. Zhang, and A. Wang, “Research on a Vehicle Recognition Method Based on Radar and Camera Information Fusion,” *Technologies (Basel)*, vol. 10, no. 4, 2022, doi: 10.3390/technologies10040097.
- [27] V. Phunpeng, K. Saensuriwong, T. Kerdphol, and P. Uangpairoj, “The Flexural Strength Prediction of Carbon Fiber/Epoxy Composite Using Artificial Neural Network Approach,” *Materials*, vol. 16, no. 15, 2023, doi: 10.3390/ma16155301.
- [28] P. B. Sanvezzo and M. C. Branciforti, “Recycling of industrial waste based on jute fiber-polypropylene: Manufacture of sustainable fiber-reinforced polymer composites and their characterization before and after accelerated aging,” *Ind Crops Prod*, vol. 168, p. 113568, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113568>.
- [29] J. Shen, X. Li, and X. Yan, “Mechanical and Acoustic Properties of Jute Fiber-Reinforced Polypropylene Composites,” *ACS Omega*, vol. 6, no. 46, pp. 31154–31160, Nov. 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c04605.

- [30] W. Xiaoxiao, N. S. Beng, R. Wirza bt O. K. Rahmat, and P. Suhaiza binti Sulaiman, “A Review of Machine Vision Pose Measurement,” May 31, 2023. doi: 10.20944/preprints202305.2164.v1.
- [31] R. R. Jose, R. Elia, M. A. Firpo, D. L. Kaplan, and R. A. Peattie, “Seamless, axially aligned, fiber tubes, meshes, microbundles and gradient biomaterial constructs,” *J Mater Sci Mater Med*, vol. 23, no. 11, pp. 2679–2695, 2012, doi: 10.1007/s10856-012-4739-7.