

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE ORIENTACIÓN Y
LONGITUD DE FIBRAS MEDIANTE PROCESAMIENTO DIGITAL
DE IMÁGENES EN COMPUESTOS POLIMÉRICOS REFORZADOS
CON FIBRAS CORTAS”

Tesis previa a la obtención del
título de Ingeniero Mecánico.

Autores:

Albarracín Parra Patricio Bernardo

Castillo Agurto Edison Xavier

Director:

Ing. Jorge Fajardo

Cuenca, Agosto 2014

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE ORIENTACIÓN Y
LONGITUD DE FIBRAS MEDIANTE PROCESAMIENTO DIGITAL
DE IMÁGENES EN COMPUESTOS POLIMÉRICOS REFORZADOS
CON FIBRAS CORTAS”

Tesis previa a la obtención del
título de Ingeniero Mecánico.

Autores:

Albarracín Parra Patricio Bernardo

patricio_alba@hotmail.com

Castillo Agurto Edison Xavier

xaviercastillo1986@hotmail.com

Director:

Ing. Jorge Fajardo

jfajardo@ups.edu.ec

Cuenca, Agosto 2014

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a Dios por permitirme compartir este proyecto con mis padres Jorge y Zoila quienes siempre están en los buenos y malos momentos, a mi hermana Ivon y mi hermano Kevin que siempre confiaron en mí. A mi esposa Sandra y a mi hija Camilita quienes me inspiran todos los días.

Patricio

Dedico esta tesis a mis padres, hermanas, abuelitos, tíos y demás familiares, quienes en todo momento me han brindado su apoyo incondicional y su tiempo, para poder alcanzar cada una de mis metas. A mis amigos, que directa e indirectamente me han brindado su confianza y soporte.

Xavier

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme permitido cumplir esta meta. A mi esposa e hija quienes han sido los pilares para la consecución de este proyecto. A mis Padres y hermanos que sin esperar nada a cambio me apoyaron en cada momento. A la Universidad Politécnica Salesiana por contribuir en mi formación profesional. Al Ing. Jorge Fajardo quien se convirtió en un amigo, compartiendo sus conocimientos y guiándonos en la culminación de esta tesis. Y a todos mis amigos, en especial a Xavier con quien logramos concluir este proyecto.

Patricio

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Dios por darme la vida, sabiduría e inteligencia para poder culminar mis estudios universitarios. A mis padres Palermo y Elva, por su apoyo y amor incondicional. A mis tíos Hugo, Romel, Mercy, Nancy, Marlene, Jorge, Galo, Cosme, Romelia, Wilfrido y Mario por todo su apoyo moral, económico y sobre todo por sus consejos y cariño que siempre me han brindado. Al Ing. Jorge Fajardo, por sus enseñanzas impartidas durante esta carrera universitaria, por su paciencia, apoyo y ser nuestra guía en el desarrollo de este trabajo. A mis compañeros y amigos, por brindarme su tiempo y amistad durante este tiempo de estudios universitarios, agradezco especialmente a Patricio con quien formamos un equipo de trabajo para el desarrollo de esta tesis.

Xavier

DECLARATORIA

Nosotros, Albarracín Parra Patricio Bernardo y Castillo Agurto Edison Xavier, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación profesional y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la Normativa Institucional Vigente.



Albarracín Parra Patricio Bernardo



Castillo Agurto Edison Xavier

CERTIFICADO

Que el presente proyecto de tesis “*DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE ORIENTACIÓN Y LONGITUD DE FIBRAS MEDIANTE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES EN COMPUESTOS POLIMÉRICOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS*”, realizado por los estudiantes: *Albarracín Parra Patricio Bernardo* y *Castillo Agurto Edison Xavier*, fue dirigido por mi persona.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned above a horizontal line.

Ing. Jorge Fajardo

RESUMEN

La presente tesis permite determinar la distribución de orientación y longitud de fibras mediante procesamiento digital de imágenes en compuestos poliméricos reforzados con fibras cortas GAK (*Guadua Angustifolia Kunth*), basados en una técnica experimental. Se partió de una información con modelos matemáticos que permitieron la obtención de la distribución de orientación de fibras cortas, posteriormente se conoció varios modelos matemáticos relacionados a la determinación de la orientación y longitud de fibras. El proceso experimental realizado para la obtención de las muestras permitieron dar validez a los resultados obtenidos, teniendo en cuenta que se efectuaron cumpliendo los requisitos de lijado y pulido, basados en investigaciones anteriores, que validan el proceso. Posteriormente se obtuvieron imágenes con buen contraste, que muestran la orientación de las fibras en la matriz, utilizando microscopía óptica de luz reflejada. La digitalización del proceso permitió que las imágenes sean procesadas con las mismas operaciones, obteniendo una imagen con fibras de GAK que cumplen con parámetros establecidos. El proceso de digitalización de imágenes se efectuó con las mismas operaciones y parámetros requeridos que muestren solo fibras de GAK que son de interés dentro de la matriz polimérica obteniendo así resultados confiables en cada una de las muestras.

Este trabajo es un aporte en el tema de incorporar nuevas fibras naturales dentro de materiales compuestos poliméricos. Permite contar con datos precisos del estado de orientación de fibras naturales cortas para su posterior aplicación en el cálculo de propiedades y comportamiento mecánico.

Palabras Clave: Ángulo preferente, digitalización de imágenes, fibras cortas, *Guadua Angustifolia Kunth* (GAK), material compuesto, microscopía óptica, polipropileno, tensor de orientación

ABSTRACT

This thesis determines the distribution of fiber orientation and length by digital image processing polymer composites reinforced with short fibers GAK (*Guadua Angustifolia Kunth*), based on an experimental technique. It started from information with mathematical models that allowed obtaining the orientation distribution of short fibers, then various mathematical models relating to the determination of the orientation and fiber length was known. The experimental process performed to obtain samples allowed to validate the results, taking into account that were made to fulfill the requirements of grinding and polishing, based on previous research that validates the process. Thereafter images are obtained with good contrast, showing the orientation of fibers in the array, using optical microscopy of reflected light. The digitization process allowed the images to be processed with the same operations, obtaining an image fiber GAK compliant parameters. The process of digital imaging was performed with the same operations and parameters required to show only GAK fibers that are of interest within the polymer matrix obtaining reliable in each of the samples results.

This work is a contribution in the field of introducing new natural fibers in polymer composites. Allows accurate data state natural fiber orientation for subsequent application in the calculation of mechanical properties and behavior.

Keywords: Composite, *Guadua Angustifolia Kunth*, image digitization, light microscopy, polypropylene, preferred angle, short fibers, tensor orientation

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
Lista de Figuras	xi
Lista de Tablas	xviii
1 Estado del arte de las técnicas de procesamiento de imagen para determinar la distribución de orientación y longitud de fibras mediante procesamiento digital en compuestos poliméricos reforzados con fibras cortas	1
1.1 Antecedentes	1
1.1.1 Tensor de orientación	4
1.1.2 Simetría y normalización	5
1.1.3 Estados de orientación planar	5
1.1.4 Intersección con dos planos consecutivos paralelos	15
1.2 Procesamiento de imágenes y equipos empleados	18
1.3 Digitalización de imagen	24
1.3.1 Fundamentos del procesamiento digital de imágenes	24
1.4 Conclusiones parciales	27
2 Desarrollo de probetas para el análisis de la distribución de orientación y longitud de fibras mediante procesamiento digital en compuestos poliméricos reforzados con fibras cortas	29
2.1 Introducción	29
2.2 Obtención de la probeta	30
2.2.1 Corte	30

	ix
2.2.2	Embebido 32
2.2.3	Lijado y pulido 32
2.3	Conclusiones parciales 36
3	Obtención de imágenes 37
3.1	Introducción 37
3.1.1	Microscopio óptico 38
3.1.2	Microscopios Electrónicos 39
3.2	Adquisición de imagen 40
3.2.1	Adquisición de imagen Combinada - Creating stitched images MIA .. 43
3.3	Conclusiones: 63
4	Programación para el procesamiento digital de las imágenes..... 64
4.1	Introducción 64
4.2	Adquisición de Imagen 65
4.2.1	Realces y mejoras 66
4.2.2	Binarización 67
4.2.3	Post-procesamiento 68
4.3	Automatización del proceso 69
4.4	Postprocesamiento de imágenes 76
4.5	Conclusiones 81
5	Introducción..... 83
5.1	Análisis de Resultados 83
5.1.1	Análisis de Distribución de orientación de Fibras cortas de GAK 84
5.1.2	Análisis de Longitud 96
5.1.3	Análisis de Orientación 99
5.1.4	Análisis de Ángulo Preferente 101

	x
5.2 Conclusiones	105
5.3 Recomendaciones	105
Referencias bibliográficas	107
Anexo A – Esquema del microscopio OLYMPUS BX51M	110

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura - 1.1 Sistema de Coordenadas y definición de los ángulos θ , ϕ y el vector P [1].	2
Figura - 1.2 Estado de Orientación Planar.	7
Figura - 1.3 Ejemplo de una imagen tomada mediante micrografía (aumento de 80x, en un espesor de lámina 20 μm) [2].	8
Figura - 1.4 Sección transversal de una fibra con un ángulo de inclinación θ , medido desde el eje 3. Las secciones transversales presentadas a partir del centro de la fibra contienen menos de la mitad de una elipse. La altura de la fibra proyectada paralela al eje 3, está determinada por F_n [3].	9
Figura - 1.5 Fibra embebida en una matriz para ilustrar los parámetros requeridos para determinar la orientación de la fibra: (a) vista en perspectiva, (b) definición de parámetros en el plano [4].	10
Figura - 1.6 La fibra A está orientada con un ángulo $(\phi + \pi)$, y la fibra B tiene un ángulo de orientación de (ϕ) [4].	10
Figura - 1.7 Fig. 1.7: Imagen elíptica de una fibra en la sección plana [5].	11
Figura - 1.8 Dos posibles secciones transversales de fibra en el segundo plano y definición del ángulo positivo θ [5].	13
Figura - 1.9 Ejemplos de diferentes estados del tensor de orientación [6].	14
Figura - 1.10 Relación entre el estado de orientación y los parámetros de orientación [7].	16
Figura - 1.11 Determinación de orientación de la fibra por dos planos consecutivos paralelos [8].	18
Figura - 1.12 Método de secciones pulidas [9].	19
Figura - 1.13 Microscopía electrónica de barrido de (a) superficie superior de la réplica de una hoja de papel común y (b) corresponde a la superficie del papel.	

Magnificación X60, 20 kV, escala 500 μm [10].	20
Figura - 1.14 Resultados del análisis de difracción. Superficie de papel anisotrópico: (a) lado superior y (b) lado inferior. (c) Superficie de papel cuasi isotrópico [10].	21
Figura - 1.15 Ejemplo de una micrografía combinada [11].	22
Figura - 1.16 Imagen Digital de fibras (Olympus PMG3) [12].	22
Figura - 1.17 Muestra un ejemplo de micrografía óptica del material compuesto C/AlSi7Ba [13].	24
Figura - 1.18 Principales tareas en análisis de imágenes microscópicas [14].	25
Figura - 2.1 Proceso para la obtención de probetas. Fuente: Autores.	31
Figura - 2.2 Corte de la probeta. Fuente: Autores	32
Figura - 2.3 (a) Cortadora MEGA-M250 Manual Abrasive Saw suministrada por PACE TECHNOLOGIES [15]. (b) Disco de corte MAXCUT-A Blade suministrado por PACE TECHNOLOGIES. Fuente: Autores	33
Figura - 2.4 Embebido de las probetas. Fuente: Autores	33
Figura - 2.5 Pulidora semiautomática PACE TECHNOLOGIC NANO 1000T / FEMTO 1100 Polishing Head [16].	33
Figura - 2.6 Detalle de espesores de pulido y su denominación. Fuente: Autores.	34
Figura - 2.7 (a) Pulido manual paño ATLANTIS Fuente: Autores. (b) Alúmina de 0,3 μm High Viscosity [15].	34
Figura - 3.1 Microscopio óptico BX51M campo claro y campo oscuro, provisto por Olympus.	37
Figura - 3.2 Esquema de un microscopio óptico de luz reflejada [17].	38
Figura - 3.3 Esquema microscopio electrónico de barrido SEM [18].	39
Figura - 3.4 Esquema microscopio TEM [19].	40
Figura - 3.5 Esquema de Adquisición de Imagen. Fuente: Autores.	42
Figura - 3.6 Captura de imagen de material compuesto con polipropileno como matriz reforzado con fibras GAK. (a) Área de enfoque reducida, microscopio OLYMPUS BX51M, 5X. (b) Área de enfoque aumentada mediante herramienta Manual MIA (6x5), microscopio OLYMPUS BX51M, 5X, software Stream Essentials Versión 1.6. Fuente: Autores.	43
Figura - 3.7 Pasos para activar botón acquisition. Fuente: Autores	43

Figura - 3.8 Pasos para activar la herramienta Microscope control. Fuente: Autores	44
Figura - 3.9 Pasos para activar botón en vivo y ajuste de tiempo de exposición. Fuente: Autores	44
Figura - 3.10 Selección de lugar de inicio para la adquisición de la imagen competa. Fuente: Autores	45
Figura - 3.11 Pasos para finalizar modo en vivo. Fuente: Autores	45
Figura - 3.12 Pasos para activar la ventana Process Manager. Fuente: Autores	46
Figura - 3.13 Proceso Creating stitched images MIA, con microscópio OLYMPUS BX51M, 5X y software Stream Essentials® Versión 1.6. Fuente: Autores	47
Figura - 3.14 Ejemplo de adquisición imagen EFI [20].	48
Figura - 3.15 Pasos para activar la ventana Process Manager. Fuente: Autores	48
Figura - 3.16 Pasos para seleccionar la opción Process Manager. Fuente: Autores	49
Figura - 3.17 Modo en vivo para control visual. Fuente: Autores	49
Figura - 3.18 Ajuste del tiempo de exposición. Fuente: Autores	50
Figura - 3.19 Ejemplo de ventana de adquisición de imagen EFI, microscopio OLYM- PUS BX51M, 5X, software Stream Essentials® Versión 1.6. Fuente: Autores	50
Figura - 3.20 Ejemplo de adquisición de imágenes para indicar el efecto de la utilización de la herramienta EFI. (a) Sin EFI y (b) con EFI. Fuente: Autores	51
Figura - 3.21 Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 30% de concentración fibras GAK, en la zona 1, en los tres espesores descritos anteriormente. Fuente: Autores	52
Figura - 3.22 Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 30% de concentración fibras GAK, en la zona 2, en los tres espesores descritos anteriormente. Fuente: Autores	53
Figura - 3.23 Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 30% de concentración fibras GAK, en la zona 3, en los tres espesores descritos anteriormente. Fuente: Autores	54
Figura - 3.24 Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 40% de concentración fibras GAK, en la zona 1, en los tres	

espesores descritos anteriormente. Fuente: Autores	55
Figura - 3.25 Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 40% de concentración fibras GAK, en la zona 2, en los tres espesores descritos anteriormente. Fuente: Autores	56
Figura - 3.26 Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 40% de concentración fibras GAK, en la zona 3, en los tres espesores descritos anteriormente. Fuente: Autores	57
Figura - 3.27 Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 30% de concentración fibras GAK, procesadas en el software Stream Essentials® Versión 1.6, en la zona 1, en los tres espesores descritos anteriormente. Fuente: Autores	58
Figura - 3.28 Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 30% de concentración fibras GAK, procesadas en el software Stream Essentials® Versión 1.6, en la zona 2, en los tres espesores descritos anteriormente. Fuente: Autores	59
Figura - 3.29 Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 30% de concentración fibras GAK, procesadas en el software Stream Essentials® Versión 1.6, en la zona 3, en los tres espesores descritos anteriormente. Fuente: Autores	60
Figura - 3.30 Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 40% de concentración fibras GAK, procesadas en el software Stream Essentials Versión® 1.6, en la zona 1, en los tres espesores descritos anteriormente. Fuente: Autores	61
Figura - 3.31 Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 40% de concentración fibras GAK, procesadas en el software Stream Essentials® Versión 1.6, en la zona 2, en los tres espesores descritos anteriormente. Fuente: Autores	62
Figura - 3.32 Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 40% de concentración fibras GAK, procesadas en el software Stream Essentials® Versión 1.6, en la zona 3, en los tres espesores descritos anteriormente. Fuente: Autores	63
Figura - 4.1 Esquema de procesamiento de imagen. Fuente: Autores.	64
Figura - 4.2 Adquisición de imagen. Fuente: Autores.	65

Figura - 4.3	Realce y mejora de la imagen (Gryscale). Fuente: Autores.	66
Figura - 4.4	Realce y mejora de la imagen (Rank). Fuente: Autores.	67
Figura - 4.5	Realce y mejora (Size, Order). Fuente: Autores.	68
Figura - 4.6	Proceso de binarizacion. Fuente: Autores.	69
Figura - 4.7	Parametros para la binarización. Fuente: Autores.	69
Figura - 4.8	Imagen a) Original. b) Binarizada. Fuente: Autores.	70
Figura - 4.9	Proceso de medicion y conteo de resultados. Fuente: Autores.	70
Figura - 4.10	Rango de filtrado. Fuente: Autores.	71
Figura - 4.11	Imágen. a) Imagen previa, b) Imágen proceso conteo y medición. Fuente: Autores.	72
Figura - 4.12	Conteo y medicion de Resultados. Fuente: Autores.	72
Figura - 4.13	Imagen a ser procesada. Fuente: Autores.	73
Figura - 4.14	Imagen a ser procesada. Fuente: Autores.	74
Figura - 4.15	Creación de un macro. Fuente: Autores.	74
Figura - 4.16	Creación de un macro (Grayscale). Fuente: Autores.	75
Figura - 4.17	Creación de un macro (Rank). Fuente: Autores.	75
Figura - 4.18	Creación de un macro (Binary). Fuente: Autores.	76
Figura - 4.19	Creación de un macro (Segmentación). Fuente: Autores.	77
Figura - 4.20	Creación de un macro Exportación de resultados. Fuente: Autores.	77
Figura - 4.21	Ventana Macro Manager. Fuente: Autores.	78
Figura - 4.22	Ventana de Comandos (número de datos). Fuente: Autores.	80
Figura - 4.23	Ventana de Comandos (valores de la matriz). Fuente: Autores.	81
Figura - 4.24	Grafica de elipse obtenida. Fuente: Autores.	81
Figura - 5.1	Probeta A-30% GAK. Fuente: Autores	83
Figura - 5.2	Probetas con el 30% de concentración de fibras GAK, a) Probeta_A_30%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Niveles de espesor en z (mm), b) Probeta_B_30%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Niveles de espesor en z (mm), c) Probeta_A_30%, parámetros de orientación S vs. Niveles de espesor en z (mm), d) Probeta_B_30%, parámetros de orientación S vs. Niveles de espesor en z (mm). Fuente: Autores	85

Figura - 5.3	Probetas con el 30% de concentración de fibras GAK, a) Probeta_A_30%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Zonas en las que fue dividida la probeta, b) Probeta_B_30%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Zonas en las que fue dividida la probeta, c) Probeta_A_30%, parámetros de orientación S vs. Zonas en las que fue dividida la probeta, d) Probeta_B_30%, parámetros de orientación S vs. Zonas en las que fue dividida la probeta. Fuente: Autores	87
Figura - 5.4	Ángulo preferente (α) vs. Espesores de z (mm). a) Probeta_A_30%, b) Probeta_B_30%. Fuente: Autores	88
Figura - 5.5	Ángulo preferente (α) vs. Zonas en las que fue dividida la probeta. a) Probeta_A_30%, b) Probeta_B_30%. Fuente: Autores	90
Figura - 5.6	Probetas con el 40% de concentración de fibras GAK, a) Probeta_A_40%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Niveles de espesor en z (mm), b) Probeta_B_40%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Niveles de espesor en z (mm), c) Probeta_A_40%, parámetros de orientación S vs. Niveles de espesor en z (mm), d) Probeta_B_40%, parámetros de orientación S vs. Niveles de espesor en z (mm). Fuente: Autores	91
Figura - 5.7	Probetas con el 40% de concentración de fibras GAK, a) Probeta_A_40%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Zonas en las que fue dividida la probeta, b) Probeta_B_40%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Zonas en las que fue dividida la probeta, c) Probeta_A_40%, parámetros de orientación S vs. Zonas en las que fue dividida la probeta, d) Probeta_B_40%, parámetros de orientación S vs. Zonas en las que fue dividida la probeta. Fuente: Autores	93
Figura - 5.8	Ángulo preferente (α) vs. Espesores de z (mm). a) Probeta_A_40%, b) Probeta_B_40%. Fuente: Autores.	94
Figura - 5.9	Ángulo preferente (α) vs. Zonas en las que fue dividida la probeta. a) Probeta_A_40%, b) Probeta_B_40%. Fuente: Autores	95
Figura - 5.10	Distribución inicial de fibras GAK, previo al proceso de moldeo por inyección. Fuente: Autores	96
Figura - 5.11	a) Distribución de longitud probeta_A_30%. b) Resultados probeta_A_30%. c) Distribución de longitud probeta_B_30%. d) Resultados Probeta_B_30%. Fuente: Autores	97

Figura - 5.12 a) Distribución de longitud probeta_A_40%. b) Resultados probeta_A_40%. c) Distribución de longitud probeta_B_40%. d) Resultados Probeta_B_40%. Fuente: Autores	98
Figura - 5.13 Histogramas que representan la orientación de las fibras vs. número de fibras, a) Probeta_A_30% nivel de espesor 1, b) Probeta_B_30% nivel de espesor 1, c) Probeta_A_30% nivel de espesor 0, d) Probeta_B_30% nivel de espesor 0, e) Probeta_A_30% nivel de espesor -1, f) Probeta_B_30% nivel de espesor -1. Fuente: Autores	99
Figura - 5.14 Histogramas que representan la orientación de las fibras vs. número de fibras, a) Probeta_A_40% nivel de espesor 1, b) Probeta_B_40% nivel de espesor 1, c) Probeta_A_40% nivel de espesor 0, d) Probeta_B_40% nivel de espesor 0, e) Probeta_A_40% nivel de espesor -1, f) Probeta_B_40% nivel de espesor -1. Fuente: Autores	100
Figura - 5.15 Elipses de Orientación_ Probeta_A_30%, espesores 1, 0 y -1. Fuente: Autores.	101
Figura - 5.16 Elipses de Orientación_ Probeta_B_30% espesores 1, 0 y -1. Fuente: Autores.	102
Figura - 5.17 Elipses de Orientación_ Probeta_A_40% espesores 1, 0 y -1. Fuente: Autores.	103
Figura - 5.18 Elipses de Orientación_ Probeta_B_40% espesores 1, 0 y -1. Fuente: Autores.	104

LISTA DE TABLAS

	<u>Pág.</u>
Tabla 2.1 Parámetros empleados para el proceso de lijado de probetas. Fuente: Autores	35
Tabla 2.2 Parámetros empleados para el proceso de pulido de probetas. Fuente: Autores	35
Tabla 5.1 Valores del tensor de orientación (a_{11}), en diferentes zonas y niveles a lo largo del espesor de las probetas A_30% y B_30%. Fuente: Autores. . .	84
Tabla 5.2 Valores del ángulo preferente (α), en diferentes zonas y espesores en z (mm) de la probeta A_30% y B_30%. Fuente: Autores.	88
Tabla 5.3 Valores del tensor de orientación (a_{11}), en diferentes zonas y niveles a lo largo del espesor de las probetas A_40% y B_40%. Fuente: Autores ..	89
Tabla 5.4 Valores del ángulo preferente (α), en diferentes zonas y espesores en z (mm) de la probeta A_40% y B_40%. Fuente: Autores.	94
Tabla 5.5 Porcentajes de concentración de fibras GAK con respecto a la distribución inicial. Fuente: Autores.	96
Tabla 5.6 Porcentajes de concentración de fibras GAK con respecto a la distribución inicial. Fuente: Autores.	97

1 ESTADO DEL ARTE DE LAS TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE IMAGEN PARA DETERMINAR LA DISTRIBUCIÓN DE ORIENTACIÓN Y LONGITUD DE FIBRAS MEDIANTE PROCESAMIENTO DIGITAL EN COMPUESTOS POLIMÉRICOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS

1.1 Antecedentes

El presente capítulo, aborda una revisión de la literatura existente y relacionada con el fundamento de la técnica para la determinación de la distribución de orientación y longitud de fibras mediante el procesamiento digital de imágenes, en compuestos poliméricos reforzados con fibras cortas.

Se ha procedido a revisar 50 artículos a partir de 1987 hasta 2012. Enfocándose en los fundamentos matemáticos del proceso que permite determinar la distribución de orientación y longitud de fibras en compuestos poliméricos reforzados con fibras cortas.

Advani y Tucker [1], en el año 1987 proponen el método del tensor de orientación. Trabajaron con fibras cortas de vidrio reforzando polipropileno. Asumen que las fibras son cilindros rígidos que tienen dimensiones uniformes tales como el diámetro y longitud, también consideran que la concentración de fibras es uniforme, es decir que el número de fibras cortas por unidad de volumen es constante; aunque la distribución y orientación de las fibras no precisamente sea uniforme, sino de manera aleatoria. La orientación de cada una de las fibras la definen por los ángulos (θ, ϕ) , lo que se indica detalladamente en la figura 1.1.

Para estimar la orientación en un punto aleatorio en el espacio utilizan la función de probabilidad, $\psi(\theta, \phi)$. Esta función define probabilidad de encontrar una fibra entre

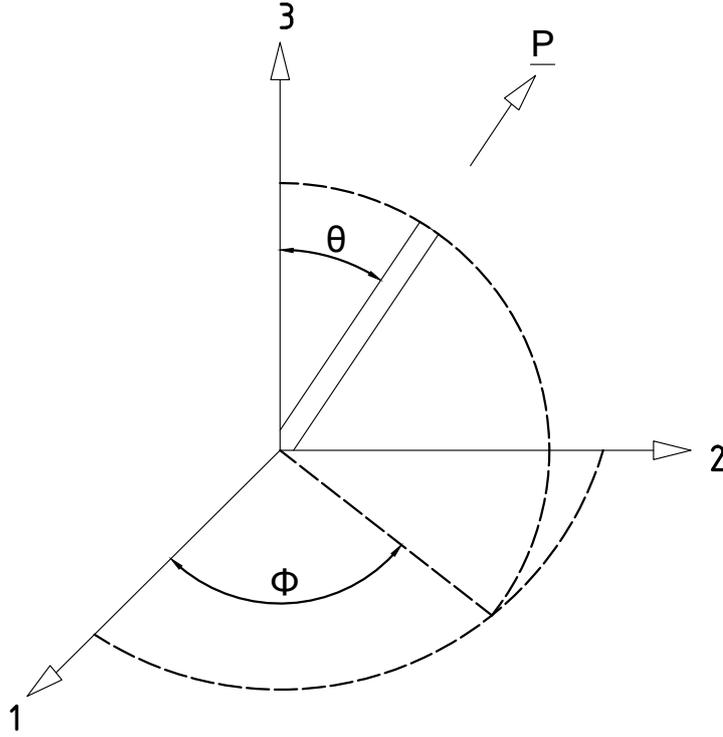


Figura 1.1: Sistema de Coordenadas y definición de los ángulos θ , ϕ y el vector \mathbf{P} [1].

los ángulos θ_1 y $(\theta_1 + \delta\theta)$, y ϕ_1 y $(\phi_1 + \delta\phi)$, está dada por:

$$P(\theta_1 \leq \theta \leq \theta_1 + \delta\theta, \phi_1 \leq \phi \leq \phi_1 + \delta\phi) = \psi(\theta_1, \phi_1) \sin \theta_1 \delta\theta \delta\phi \quad (1.1)$$

Donde, \mathbf{P} es el vector unitario, θ y ϕ son los ángulos que indican la orientación de la fibra y $\psi(\theta, \phi)$ es la función de probabilidad.

Para representar la orientación de las fibras, es necesario asociarla al vector unitario \mathbf{P} , por lo tanto la ecuación de distribución de probabilidad quedaría descrita de la siguiente manera: $\psi(\mathbf{P})$, la representación cartesiana del vector \mathbf{P} se encuentra ligada con los ángulos θ y ϕ , como se mostró en la figura 1.1.

$$p_1 = \sin \theta \cos \phi \quad (1.2a)$$

$$p_2 = \sin \theta \sin \phi \quad (1.2b)$$

$$p_3 = \cos \theta \quad (1.2c)$$

A partir de la notación indicial, se tiene para índices repetidos:

$$p_i p_i = 1 \quad (1.3)$$

Donde, $p_i p_i$ es el producto punto (\cdot) de dos vectores paralelos. Con la siguiente integral se puede determinar todas las direcciones posibles del vector unitario \mathbf{P} :

$$\oint d\mathbf{p} = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \sin \theta d\theta d\phi \quad (1.4)$$

La función de probabilidad ψ , debe satisfacer algunas condiciones físicas, las mismas que se enumeran a continuación con sus respectivas representaciones matemáticas:

1. Una fibra orientada en cualquier ángulo (θ, ϕ) , no se distingue de otra fibra que estuviese orientada en los ángulos $(\pi - \theta, \phi + \pi)$, debido a estas condiciones la función de distribución ψ es una función periódica.

$$\psi(\theta, \phi) = \psi(\pi - \theta, \phi + \pi) \quad (1.5a)$$

Lo que es igual a:

$$\psi(\mathbf{p}) = \psi(-\mathbf{p}) \quad (1.5b)$$

2. Cada una de las fibras que constituyen el material polimérico compuesto tiene una orientación respectiva por lo tanto la función de probabilidad ψ debe ser normalizada, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \sin \theta d\theta d\phi = \oint \psi(\mathbf{p}) d\mathbf{p} = 1 \quad (1.6)$$

3. La función de orientación ψ , se debe describir con los cambios en el tiempo debido a que las fibras cortas cambian su orientación conjuntamente con el movimiento del fluido, por lo tanto ψ debe ser considerada como una cantidad por convección, la

condición de continuidad queda descrita de la siguiente manera:

$$\frac{D\psi}{Dt} = -\frac{\infty}{\infty\theta}(\theta\psi) - \frac{1}{\sin\theta} \frac{\infty}{\infty\phi} \quad (1.7a)$$

O también podría denotarse así la condición de continuidad:

$$\frac{D\psi}{Dt} = -\frac{\infty}{\infty\mathbf{p}}(\psi\dot{\mathbf{p}}) \quad (1.7b)$$

En donde $(-\frac{\infty}{\infty\theta})$ denota el operador gradiente de la superficie de la esfera unidad. Este modelo matemático es muy útil para predecir y simular el flujo de fibras. No es el objetivo de presente estudio.

1.1.1 Tensor de orientación

Considerando en la función de distribución, ecuación (1.5b), las integrales de orden impar son cero, por lo tanto los tensores de interés para el análisis son los tensores de orden par. Los tensores de orientación de segundo y cuarto orden se describen de la siguiente manera:

$$a_{ij} = \oint p_i p_j \psi(\mathbf{p}) dp \quad (1.8a)$$

$$a_{ijkl} = \oint p_i p_j p_k p_l \psi(\mathbf{p}) dp \quad (1.8b)$$

En caso de requerir una notación compacta se puede recurrir a los siguientes elementos, todo lo que se encuentra dentro de la integral se puede escribir dentro de paréntesis angulares $\langle \rangle$, también para indicar el orden del tensor se va a utilizar una letra negrita con un subíndice que indica el orden respectivo, por ejemplo:

$$a_{ij} = \mathbf{a}_2 = \langle pp \rangle \quad (1.9a)$$

$$a_{ijkl} = \mathbf{a}_4 = \langle pppp \rangle \quad (1.9b)$$

Se pueden encontrar tensores de orden superior, pero Advani y Tucker se limitaron a trabajar con los tensores de segundo y cuarto orden, puesto que indican que con estos

tensores tienen la información suficiente para poder determinar la orientación de fibras.

1.1.2 Simetría y normalización

A partir de la definición los tensores a_{ij} y a_{ijkl} , sus componentes se pueden transformar de un sistema de coordenadas a otro, para ello se considera las mismas reglas del tensor de transformación, quedando de la siguiente manera:

$$a_{ij} = a_{ji} \quad (1.10a)$$

$$a_{ijkl} = a_{jikl} = a_{kijl} = a_{likj} = a_{klij}, \text{ etc.} \quad (1.10b)$$

A partir de la condición de normalización, [Ecuación (1.6)], demuestra lo siguiente:

$$a_{ij} = 1 \quad (1.11)$$

Los tensores de orden superior proporcionan mayor información que los tensores de menor orden, por lo tanto se tiene:

$$a_{ijkl} = a_{ji} \quad (1.12a)$$

$$a_{ijklmn} = a_{jikl} \quad (1.12b)$$

1.1.3 Estados de orientación planar

Como su nombre lo indica, este estado se refiere a las fibras que se encuentra en un solo plano, figura 1.2, la mayoría de los materiales compuestos se aproximan al estado de orientación planar. Al tomar el plano 1–2 como plano de orientación, la nueva función de distribución planar sería:

$$\psi(\theta, \phi) = \delta\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)\psi_\theta(\phi) \quad (1.13)$$

Dónde: δ , es la función Delta Dirac, ψ_ϕ , se denomina función de distribución

planar, la misma que también satisface una condición de normalización, tal como se muestra:

$$\int_0^{2\pi} \psi_\phi(\phi) d\phi = 1 \quad (1.14)$$

A partir de esta ecuación se pueden definir los tensores de orientación planar: Para tensores de segundo orden:

$$a_{ij} = \int_0^{2\pi} \psi_\theta(\phi) p_i p_j d\phi \quad (1.15a)$$

Para tensores de cuarto orden:

$$a_{ijkl} = \int_0^{2\pi} \psi_\phi(\phi) p_i p_j p_k p_l d\phi \quad (1.15b)$$

Los tensores en tres dimensiones de las ecuaciones descritas anteriormente son similares a los de las ecuaciones (8a) y (8b), donde cualquier componente que tiene un subíndice impar es igual a cero.

Melkush [2] en el año 1999 conjuntamente con Lehner y Geymayer son los primeros en utilizar asistencia de procesador de imágenes. Realizan una investigación acerca de la orientación de fibras cortas que actúan como refuerzos de materiales poliméricos compuestos a partir de una matriz polimérica. Para cuantificar el estado de orientación de las fibras en el material polimérico compuesto, utilizan un sistema de imágenes asistido por computador, debido a que el estado de orientación de las fibras está determinado por una gran cantidad de fibras que tienen que ser cuantificadas de manera estadística, de ahí la necesidad de realizar un análisis asistido por computador. Para medir el contorno de las fibras que se encuentran en las secciones de las muestras de material, realizaron un pulido de la muestra muy cuidadoso con la final de tener un excelente contraste en la adquisición de la imagen que brinde la información necesaria para el estudio. La figura 1.3 muestra el gran número de fibras que se deben analizar en una muestra. Realizar los cálculos sin asistencia de un computador sería muy tedioso y demorado, por lo tanto Melkush, Lehner y Geymayer realizan este aporte en la investigación.

Vélez García et al [4], en el año 2012 continúan con la investigación a partir

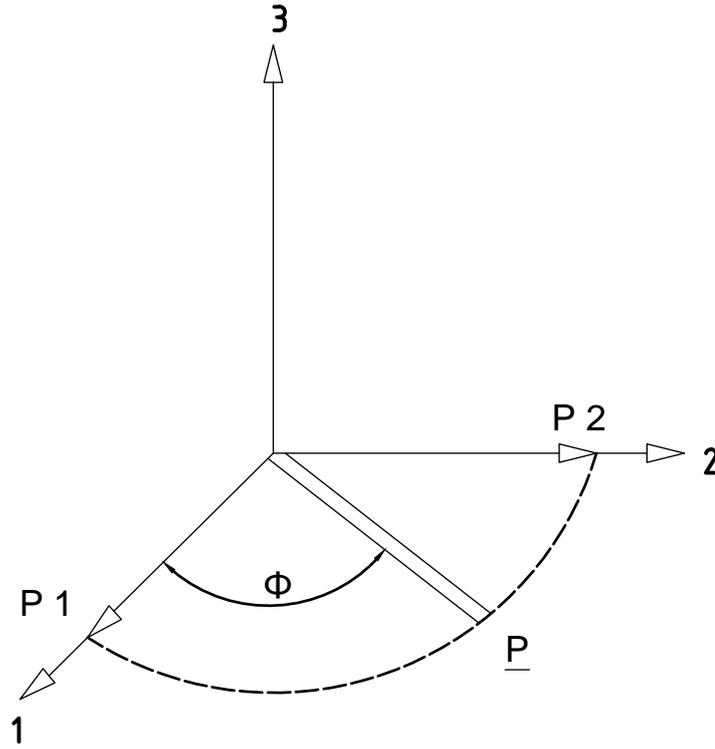


Figura 1.2: Estado de Orientación Planar.

de la información obtenida por Advani y Tucker [1], los mismos que en su investigación determinaron que la orientación de un conjunto de fibras cortas en un material polimérico compuesto puede ser obtenida mediante tensores de orientación, figura 1.1. Los tensores de orientación descritos por la ecuación 1.3, pueden ser representados literalmente por la siguiente nomenclatura $\langle \mathbf{A} \rangle$, es la más utilizada para la representación de orientación en compuestos termoplásticos.

$$A = A_{ij} = \langle p_i p_j \rangle \quad (1.16)$$

El tensor de orientación de segundo orden, representa una orientación promedio de un conjunto de fibras cortas a partir de la información obtenida de cada fibra. Mediante la media ponderada obtuvieron los componentes del tensor de orientación de segundo orden (\mathbf{A}) por unidad de volumen de material en el área de la muestra, tal como se indica en la siguiente ecuación.

$$A_{ij} = \frac{\sum_n (p_i p_j)_n L_n F_n}{\sum_n L_n F_n} \quad (1.17)$$

Donde, n representa la n ésima fibra corta sobre la muestra, L_n indica la longitud

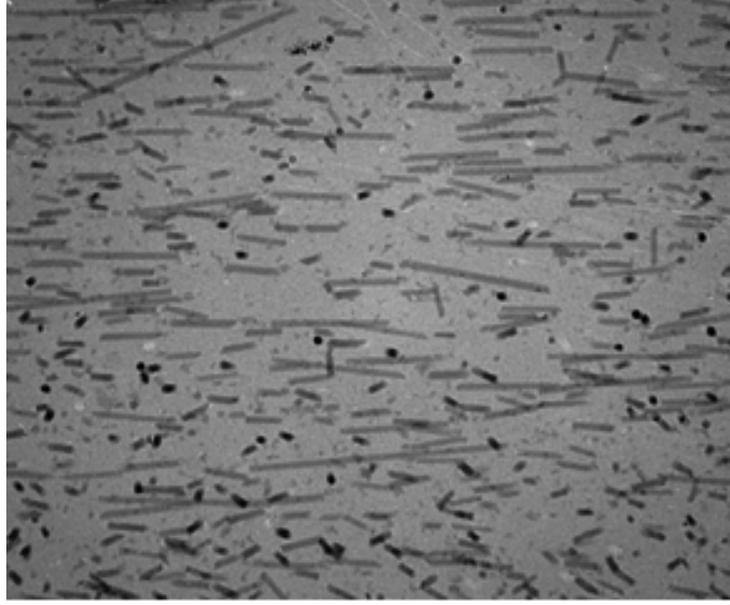


Figura 1.3: Ejemplo de una imagen tomada mediante micrografía (aumento de 80x, en un espesor de lámina $20 \mu\text{m}$) [2].

de la fibra y F_n es la función de ponderación que relaciona la orientación por unidad de área con la orientación por unidad de volumen.

La función de ponderación F_n , fue definida por Konicek [21]:

$$F_n = \frac{1}{L_n \cos(\theta_f)_n + d_n \sin(\theta_f)_n} \quad (1.18a)$$

Donde, d_n representa el diámetro de la n -ésima fibra.

La función de ponderación, ecuación 1.18a, es aplicable para elipses completas o fraccionadas de cualquier dimensión. Sin embargo, Bay y Tucker [3], en el año 1992 definieron un modelo alternativo en el cual se puede seleccionar únicamente las superiores a media elipse, figura 1.4. Por lo tanto para que se cumpla esta condición es necesario suprimir el término $(d_n \sin(\theta_f)_n)$ de la ecuación 1.18a, y se convierte en ecuación de un solo término antes de que quede fuera del ángulo $\frac{\pi}{2}$, para evitar esto es necesario que F_n quede por encima de un ángulo de corte (θ_c) , como se indica en las ecuaciones 18b y 18c:

$$F_n = \frac{1}{L_n \cos(\theta_f)_n} \quad \theta_c \leq \cos^{-1} \left(\frac{d}{L} \right) \quad (1.18b)$$

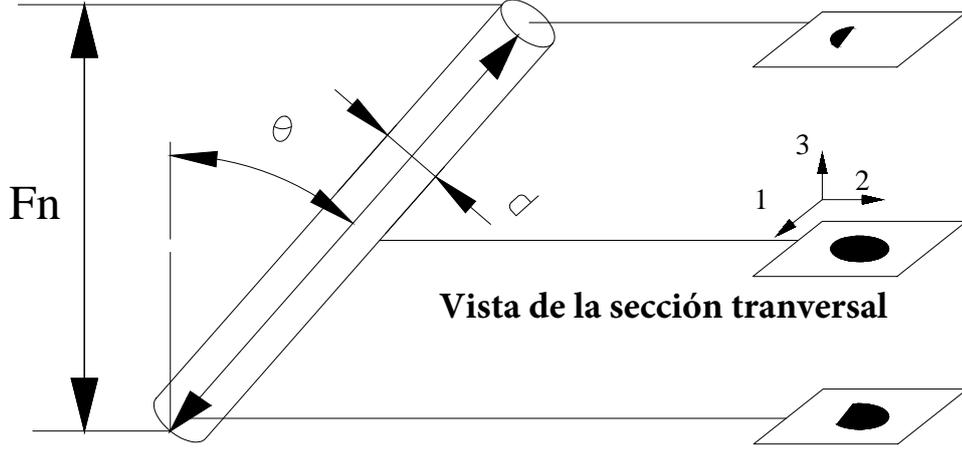


Figura 1.4: Sección transversal de una fibra con un ángulo de inclinación θ , medido desde el eje 3. Las secciones transversales presentadas a partir del centro de la fibra contienen menos de la mitad de una elipse. La altura de la fibra proyectada paralela al eje 3, está determinada por F_n [3].

$$F_n = \frac{1}{d_n} \quad \theta_c > \cos^{-1} \left(\frac{d}{L} \right) \quad (1.18c)$$

Donde, d y L representan el promedio de diámetro y longitud de las fibras respectivamente.

Lee, Youn, Chung y Kang [5] en el año 2002 complementan el trabajo y proponen que F_n como la altura proyectada de la fibra sobre el eje normal del plano, en el mismo que el diámetro de la fibra puede ser sustituido por la altura de la fibra. Como se indica en la ecuación 1.18d:

$$F_n = \frac{1}{\cos(\theta_f)_n} = \frac{M}{m} \quad (1.18d)$$

Donde, M y m indican la longitud mayor y menor de los ejes de la elipse que representa la fibra respectivamente. La figura 1.5 muestra la designación de ángulos y ejes de una elipse de una fibra corta embebida en una matriz polimérica. La orientación de la fibra es determinada por los centros de masa (\bar{x}_1, \bar{x}_2) de la elipse, dicha orientación se calcula con los ejes de la elipse, (m) menor, (M) mayor y el ángulo sobre el plano (ϕ) definido con respecto al eje (x_1) y (M) [4]; por lo tanto el ángulo fuera del plano (θ) [4], está dado por la ecuación (1.19):

$$\theta = \cos^{-1} \frac{M}{m} \quad (1.19)$$

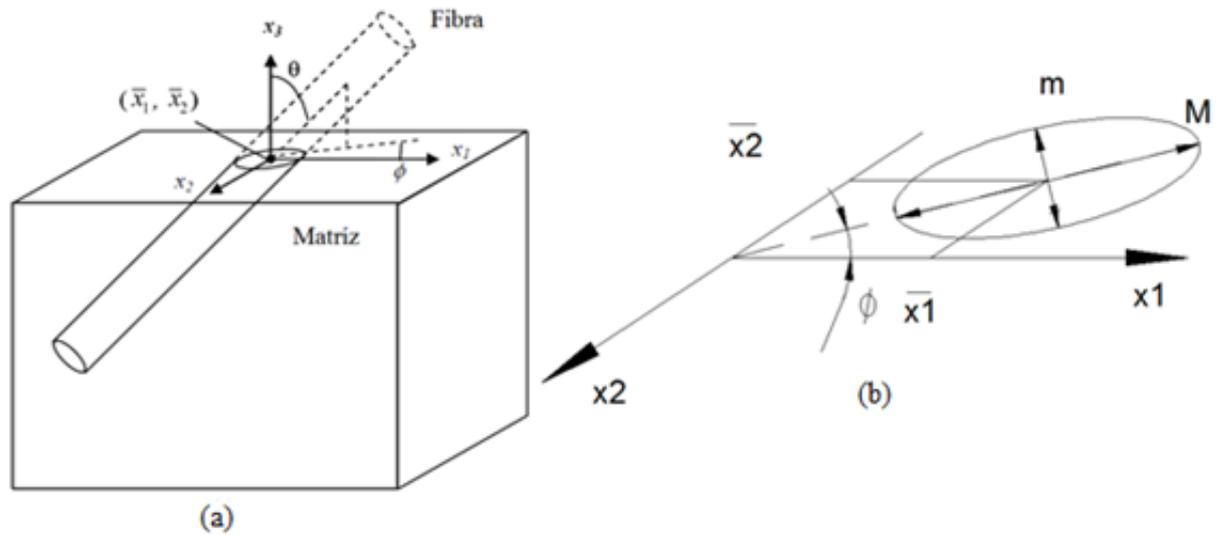


Figura 1.5: Fibra embebida en una matriz para ilustrar los parámetros requeridos para determinar la orientación de la fibra: (a) vista en perspectiva, (b) definición de parámetros en el plano [4].

En la figura 1.6 se puede apreciar la ambigüedad en el ángulo de inclinación de las fibras debido a que la fibra puede estar orientada en el ángulo (ϕ) o en el ángulo $(\phi + \pi)$. En la figura 1.6 se ve que la fibra A y la fibra B tienen diferentes inclinaciones, pero se puede observar la misma elipse de la sección transversal en el plano de la muestra.

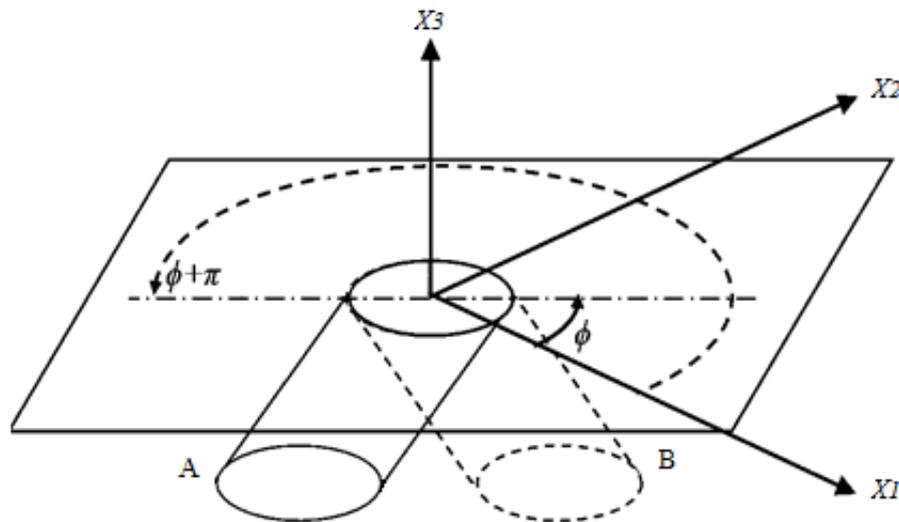


Figura 1.6: La fibra A está orientada con un ángulo $(\phi + \pi)$, y la fibra B tiene un ángulo de orientación de (ϕ) [4].

Yong Hoon Lee et al [5], en el año 2002 para determinar los componentes del vector unitario (\mathbf{p}) de cada una de las fibras, al igual que Advani y Tucker [1] asumen que las fibras son cilindros, circulares, rectos, rígidos, de manera que al seccionar la fibra se observa una elipse en la superficie pulida del plano de sección del compuesto. Hay que

tener en cuenta que si el plano 1-2 es el plano definido por el plano seccionado el eje 3 es el eje normal al plano antes mencionado. Cuando se conocen las cuatro coordenadas de la imagen elíptica de una fibra, en la sección, es decir se conoce el punto de inicio y el punto final de los ejes mayor y menor de la elipse, es fácil determinar la posición de la fibra. En la figura 1.7 se ilustra la ubicación de los ejes de la sección elíptica de una fibra, suponiendo que los puntos (x_3, y_3) y (x_4, y_4) son los pares de coordenadas de los extremos del eje menor, entonces se puede calcular la longitud del eje menor con la ecuación (1.20):

$$m = \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2} \quad (1.20)$$

La longitud del eje menor también determina el diámetro de la fibra.

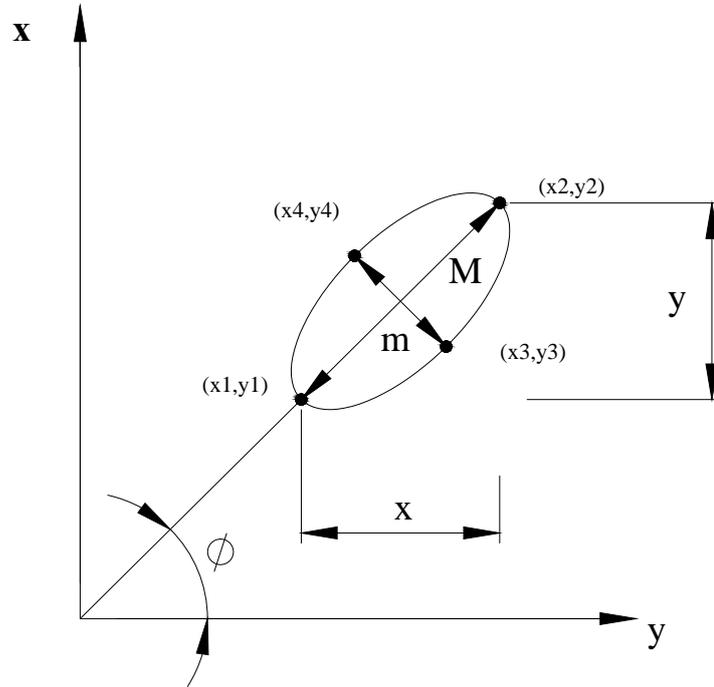


Figura 1.7: Fig. 1.7: Imagen elíptica de una fibra en la sección plana [5].

En las ecuaciones 1.21a hasta la 1.21f, se muestran los parámetros y funciones trigonométricas para la representación del estado de orientación de una fibra corta [5].

$$(a_{11})_n = \sin^2 \theta \cos^2 \phi = Y^2 \left(\frac{1}{M^2} - \frac{m^2}{M^2} \right) \quad (1.21a)$$

$$(a_{12})_n = (a_{21})_n = \sin^2 \theta \cos \phi \sin \phi = XY \left(\frac{1}{M^2} - \frac{m^2}{M^2} \right) \quad (1.21b)$$

$$(a_{13})_n = (a_{31})_n = \sin \theta \cos \theta \cos \phi = Y \sqrt{\frac{1}{M^2} - \frac{m^2}{M^2}} \quad (1.21c)$$

$$(a_{22})_n = \sin^2 \theta \sin^2 \phi = X^2 \sqrt{\frac{1}{M^2} - \frac{m^2}{M^2}} \quad (1.21d)$$

$$(a_{23})_n = (a_{32})_n = \sin \theta \cos \theta \sin \phi = X \sqrt{\frac{1}{M^2} - \frac{m^2}{M^2}} \quad (1.21e)$$

$$(a_{33})_n = \cos^2 \theta = \frac{m^2}{M^2} \quad (1.21f)$$

De manera similar que el eje menor, las coordenadas (x_1, y_1) y (x_2, y_2) representan el par de coordenadas de los extremos del eje mayor de la superficie elíptica de la fibra, los parámetros X, Y quedan de la siguiente manera:

$$X = x_2 - x_1 \quad (1.22)$$

$$Y = y_2 - y_1 \quad (1.23)$$

La longitud del eje mayor (M) queda representada de la siguiente manera:

$$M = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1.24)$$

Sustituyendo con las ecuaciones 22 y 23 se tiene:

$$M = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (1.25)$$

A partir de la definición geométrica de la figura 1.7, la función relevante de θ y ϕ , quedan así:

$$\sin \phi = \frac{X}{M} \quad (1.26a)$$

$$\cos \phi = \frac{Y}{M} \quad (1.26b)$$

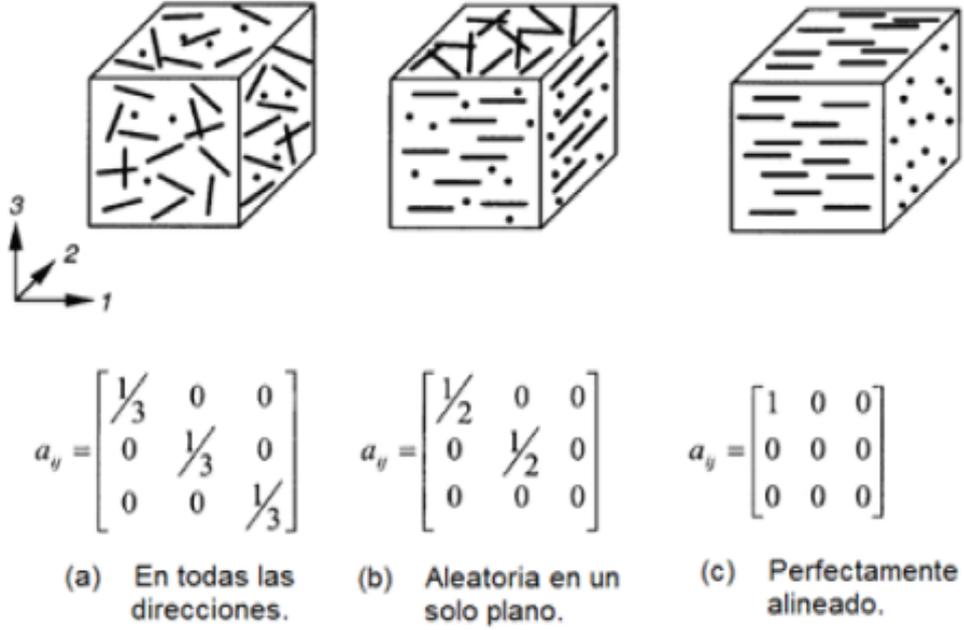


Figura 1.9: Ejemplos de diferentes estados del tensor de orientación [6].

el tensor de orientación, tal como lo indica Chung y Kwon, en el año 2002 [6]. En la figura 1.9, se presentan 3 posibles interpretaciones de orientación de las fibras, en la figura 1.9 (a) muestra el estado de orientación isotrópica, con una distribución de orientación en todas las direcciones; en la figura 1.9 (b) corresponde a un estado de orientación de las fibras de manera aleatoria planar y en la figura 1.9 (c) presenta un estado de orientación perfecto en la dirección de x_1 .

Yasuda, Kyuto y Mori [7] en el año 2013 a partir de la investigación realizada por Advani y Tucker [1], calculan el tensor de orientación en la muestra para obtener el ángulo de orientación de las fibras cortas. Las componentes del tensor de orientación de segundo orden a_2 se pueden determinar con la siguiente ecuación:

$$a_{11} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n \quad (1.27a)$$

$$a_{11} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n \quad (1.27b)$$

Donde, N es el número total de fibras cortas que se va a determinar la orientación y θ_n indica el ángulo de orientación de cada fibra. El ángulo preferencial de las fibras α ,

está dado por:

$$\tan 2\alpha = \frac{2a_{12}}{a_{11} - a_{22}} \quad (1.28)$$

Yasuda Kyuto y Mori en el año 2013 [7], realizan un estudio experimental en el cual determinan la orientación y distribución de las fibras que se encuentran como refuerzo de un material polimérico denominado polibuteno, a partir de la investigación realizada por Advani y Tucker [1], para determinar algunas de las componentes del tensor de orientación utilizan las siguientes expresiones de normalización y simetría respectivamente:

$$a_{11} + a_{22} = 1 \quad (1.29a)$$

$$a_{12} = a_{21} \quad (1.29b)$$

Los dos valores propios (eigenvalues) del tensor de orientación de segundo orden a_2 corresponden a las longitudes de los ejes mayor y menor de la elipse de orientación, respectivamente. La dirección del eje mayor de la elipse muestra la dirección preferencial de orientación. Los valores propios (eigenvalues) entre el siguiente rango (0,5 – 1) son denominados “parámetro de orientación” \mathbf{S} , el cual indica los grados de orientación de las fibras. Cuando los valores de \mathbf{S} son igual a 1 (unidad), esto indica que existe una perfecta alineación del estado de orientación de las fibras cortas, pero cuando \mathbf{S} es igual a 0,5 esto corresponde a un estado de orientación aleatorio, es decir las fibras se encuentran orientadas en todas las direcciones. En la figura 1.10 se indica la relación que existe entre el estado de orientación de las fibras y el ángulo de orientación de las elipses.

1.1.4 Intersección con dos planos consecutivos paralelos

Zak, Haberer, Park, Benhabib [11] en el año 1999, presentaron un nuevo método que elimina la ambigüedad del ángulo de inclinación de las fibras, método diferente al planteado por Advani y Tucker, el que aplican la determinación tridimensional mediante la medición de elipses en dos planos consecutivos. En un sistema denominado RLCM por las siglas de su nombre en inglés (Rapid layered Composites manufacturing process), que significa un Proceso rápido de fabricación de materiales compuestos en capas, el que consiste en una tecnología de fabricación por capas utilizando una matriz altamente viscosa con el que



Figura 1.10: Relación entre el estado de orientación y los parámetros de orientación [7].

construyen el prototipo por capas. Al inicio se vierte la resina sobre la superficie de la capa a construir y seguidamente se coloca el material de refuerzo, en este caso se coloca las fibras cortas. Con el objetivo de evitar todo el problema que supone la medición de elipses en una sección transversal, aplican “la determinación tridimensional mediante la medición de elipses en dos planos consecutivos...”. En este método el problema radica en la determinación de la elipse que corresponde con la fibra que se está analizando desde el primer plano [8].

Esta nueva técnica experimental descrita por Zak et ali [11], para la determinación de la longitud y orientación de las fibras, a través de la intersección con dos planos consecutivos paralelos, permite obtener la longitud de las fibras mediante la ecuación (1.30):

$$I = \left(\frac{P_{Z_1}}{1 - \frac{N^{II}}{N^I}} - Rd \right) \quad (1.30)$$

Donde N^I y N^{II} corresponde a la sección de planos I y II , Z_T representa la distancia entre secciones, tal como se indica en la figura 1.9, P es la probabilidad de

encontrar fibras orientadas, los términos, Q y R se determinan con las siguientes expresiones.

$$P = \int_1^2 p(\phi) d\phi \quad (1.31a)$$

$$Q = \int_1^2 p(\phi) \cos(\phi) d\phi \quad (1.31b)$$

$$R = \int_1^2 p(\phi) \sin(\phi) d\phi \quad (1.31c)$$

En la figura 1.11 se indica una fibra seccionada por dos planos paralelos consecutivos, cuando una fibra es cortada por dos planos paralelos consecutivos, la ubicación de sus secciones cortadas se representa por las coordenadas $(\Delta x, \Delta y)$ con respecto al sistema de coordenadas fijo, este cambio está en función de la orientación de la fibra, es decir en función de los ángulos (ϕ, θ) , ψ_t representa el ángulo de rotación con respecto a Z, que alinea las dos secciones, supone que el ángulo ψ_t es mínimo y que los planos de sección son paralelos [11].

La determinación de la orientación de las fibras se puede realizar desde el cálculo de una sección como parte integral del proceso. Una de las principales desventajas que presenta este método experimental es que antes y después de examinar una superficie pulida debe eliminarse dicha sección con objeto de obtener una nueva sección pulida consecutiva y paralela. Otra de las desventajas es que las fibras se encuentran orientadas de manera aleatoria lo que supone una elevada variabilidad en la orientación de las mismas en un material polimérico compuesto reforzado con fibras cortas. También hay un inconveniente con la limitada longitud de las fibras cortas, lo que implica que dichas fibras no van a estar en contacto con los planos consecutivos y paralelos pulidos para el análisis y cálculo de intersecciones. Talbot, Lee, Jeulin, Hanton y Hobbs [9] en el año 2000, presentan dos alternativas interesantes para el análisis de imágenes. Es un método para realizar las mediciones de diámetro y longitud de las fibras cortas preparadas manualmente y el análisis subsiguiente de las imágenes tomadas mediante microscopía electrónica de barrido; presentan dos alternativas de medición. El primer método que se indica en la figura 1.12 es una medición a través de una sección de la muestra o un plano, por lo general se realiza

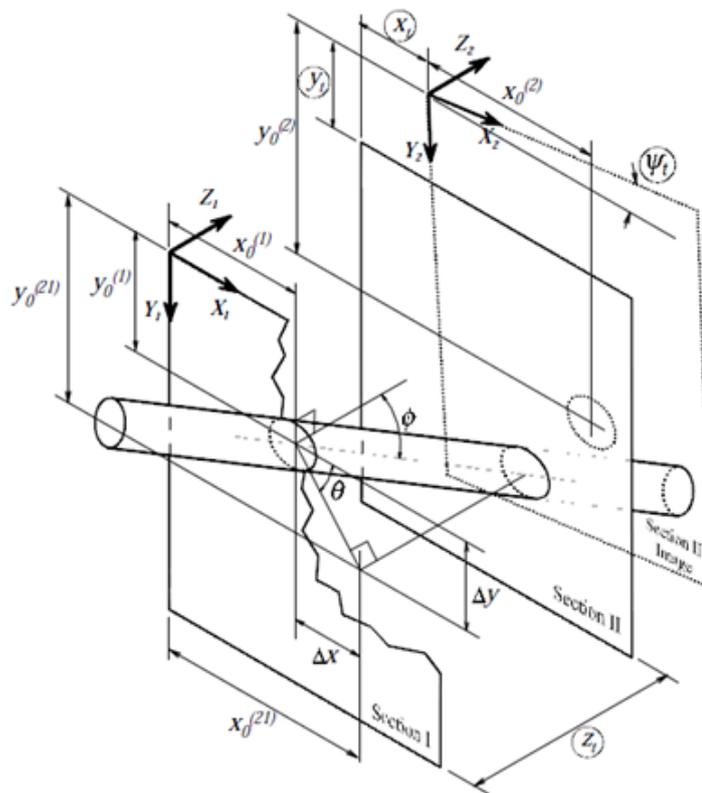


Figura 1.11: Determinación de orientación de la fibra por dos planos consecutivos paralelos [8].

una medición de 500 fibras aproximadamente. El segundo método consiste en la medición de las fibras sobre una superficie plana, en el que sobre su superficie se depositan las fibras para posteriormente realizar la medición.

En la figura 1.12, se muestra un ejemplo de la distribución del ángulo de orientación de las fibras, en la cual se observa que no hay garantía de que la distribución del ángulo de orientación de todas las fibras es la misma para cada clase de diámetro. “Esto genera un sesgo que se puede corregir mediante la ponderación de cada objeto por el inverso del coseno del ángulo de orientación. Este coseno se deriva simplemente calculando el área de cada objeto dividido por su diámetro” [9].

1.2 Procesamiento de imágenes y equipos empleados

P. T. Fiadeiro, M. J. T. Pareira [10] en el año 2002, realizan la medición de orientación anisotrópica de las fibras y desalineación de ángulo por Difracción Laser. Este método se basa en el análisis de los patrones de difracción laser producido por réplicas transparentes de los tejidos de las fibras en la superficie. Utilizando un haz de luz láser en un plano paralelo para iluminar una réplica de superficie transparente, se puede crear un patrón de

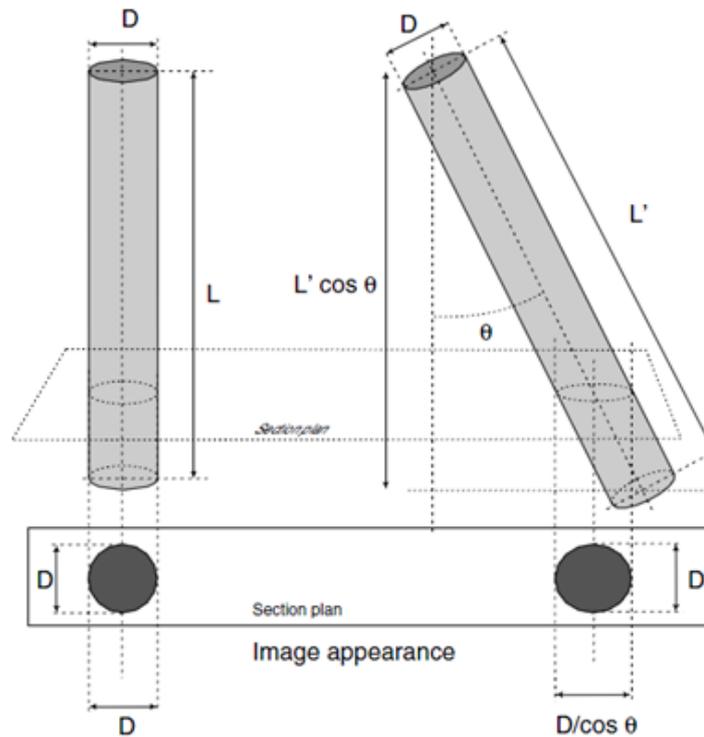


Figura 1.12: Método de secciones pulidas [9].

difracción de Fraunhofer centrado la luz difractada en la superficie de la réplica utilizando un lente.

El patrón de difracción obtenido, el mismo que es la transformada de Fourier en dos dimensiones de la réplica de la superficie, es de forma elíptica con un radio elíptico específico, orientación y los ejes $\frac{a}{b}$ que representan el eje mayor (a) y el eje menor (b) de la elipse.

Este concepto es denominado el modelo de poro equivalente, donde un contorno elíptico se ajusta a la característica estructurada. Son necesarios solamente dos parámetros para representar la distribución de las fibras, las mismas que corresponden al radio de elipticidad del contorno de la elipse a lo que se le denomina fibra anisotrópica y la dirección del eje mayor que se denomina ángulo de orientación de la fibra.

Para conseguir una réplica de alta calidad de la superficie del tejido de las fibras puede utilizarse una lámina de plástico poliestireno de 0,25 mm de espesor (ref. 12-4763-00, Plastic Films Co., Schiller Park, IL, USA). La réplica negativa de la superficie puede ser obtenida con una presión de la película contra la superficie del tejido de las fibras aplicando una presión de 300 a 350 kPa a 115°C durante 20 minutos. Los controles y evaluaciones de las réplicas obtenidas se pueden realizar con una observación microscópica, tales como microscopía óptica o microscopía electrónica de barrido que garantizan una

penetración de 5,0 a 10 μm dependiendo del espesor de las fibras.

En la figura 1.13, se muestra superficie de las réplicas de una hoja de papel común utilizado para impresión (a) y la correspondiente superficie del papel (b) observados mediante la microscopía electrónica de barrido. La imagen de la réplica es como un espejo de la superficie del papel, por lo que es muy difícil distinguir entre la superficie del papel y la réplica, aunque la réplica corresponde al negativo de la impresión de la superficie del papel.

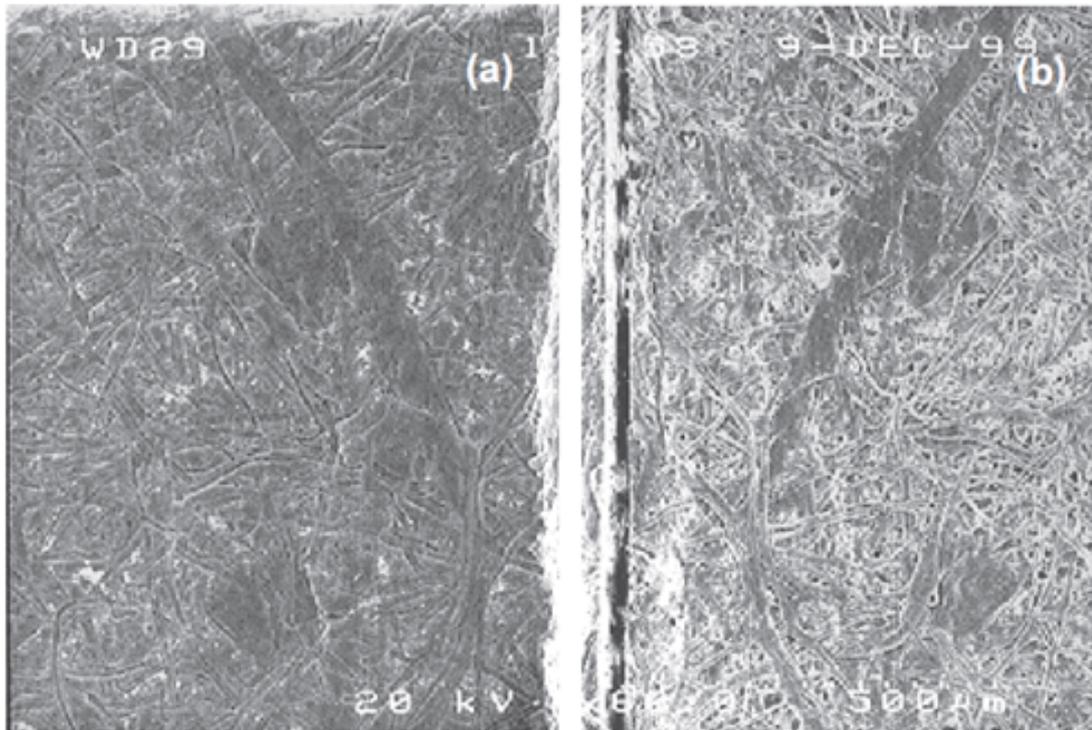


Figura 1.13: Microscopía electrónica de barrido de (a) superficie superior de la réplica de una hoja de papel común y (b) corresponde a la superficie del papel. Magnificación X60, 20 kV, escala 500 μm [10].

En la figura 1.14, el mejor contorno encontrado se superpone al patrón con la finalidad de obtener una mejor visualización. Para muestras de papel anisotrópico, los cálculos del radio de elipticidad (anisotropía), tiene un valor de 1,55 a 0,0°. En conclusión el análisis por Difracción Laser de réplicas transparentes permite medir el ángulo de anisotropía y orientación de las fibras en superficies específicas, los patrones de difracción obtenidos con el método propuesto revelan una forma elíptica, en la que la relación entre la longitud del eje mayor y menor corresponde a la fibra de anisotropía, y el ángulo entre el eje mayor de la elipse y el eje de la máquina corresponde al ángulo de orientación de la fibra.

G. Zak, M. Haberer, C. B. Park y B. Benhabib [11] en el año 2000, proponen

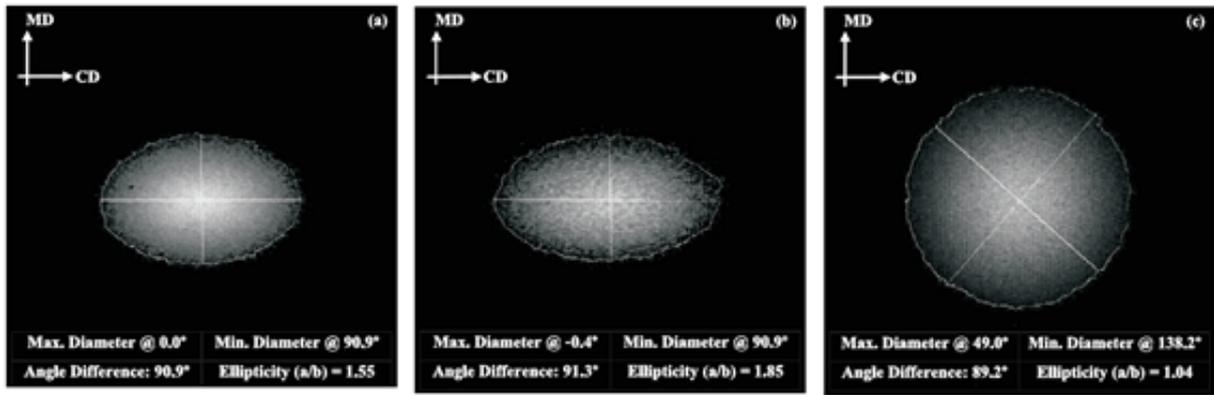


Figura 1.14: Resultados del análisis de difracción. Superficie de papel anisotrópico: (a) lado superior y (b) lado inferior. (c) Superficie de papel cuasi isotrópico [10].

un método para determinar la longitud media de las fibras en materiales poliméricos reforzados con fibras cortas. La técnica calcula la longitud de la fibra mediante la relación existente entre el número de fibras cortas que se interrelacionan con dos planos consecutivos, paralelos estrechamente espaciados y el número de fibras atravesado por un único plano de sección. Debido al tiempo que se debe emplear en la medición de la orientación de las fibras, solamente realizar la medición en varias capas en cuatro muestras. Para lo cual examinaron las secciones a través de un microscopio (Olympus Vanox) bajo una luz reflejada amarilla filtrada, las imágenes se adquirieron con una cámara de video CCD (Sony XC-77) la misma que transmite su señal a un capturador de fotogramas (Scion LG3) con una resolución de 640×480 píxeles, con 256 niveles de grises por cada píxel; cada imagen capturada es sobre un área de $0,5 \times 0,4 \text{ mm}^2$, que se interpreta en una resolución espacial de $0,83 \mu\text{m}$ por píxel. Como se presenta en la figura 1.15.

Arecón Osuna [22] en el año 2002, también emplea la microscopía óptica para observar la estructura cristalina del polipropileno homopolímero isotáctico, empleando un microscopio óptico de transmisión de la marca Nikon, el mismo que cuenta con un sistema de luz polarizada. Observaron el tamaño medio esferulítico alcanzado por las muestras que fueron fundidas en condiciones similares respecto a la temperatura y al tiempo. Además utilizaron un microscopio óptico de reflexión de la marca Jenalux modelo 100 para medir la longitud de las grietas generadas en los ensayos de mecánica de la fractura Elástico-Lineal LEFM y en los ensayos de integral J [22]. Patcharaphum y Opaskornkul [12] en el año 2008, para realizar una caracterización de un material polimérico compuesto por Polipropileno como matriz y con fibras de vidrio como refuerzo es necesario la utilización de un Microscopio de Luz Polarizada de la marca Olympus del modelo específico descrito PMG3, asistido por computadora para el análisis respectivo de las imágenes bajo el soporte del software denominado Image-Pro Plus, como se indica en la figura 1.16.

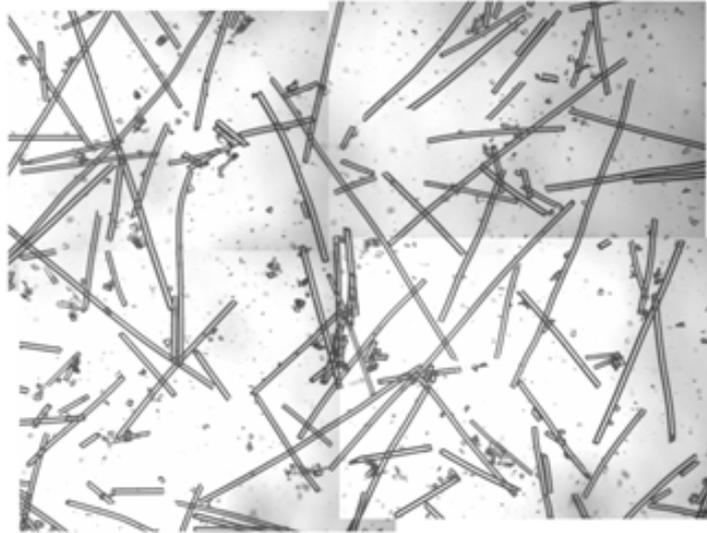


Figura 1.15: Ejemplo de una micrografía combinada [11].



Figura 1.16: Imagen Digital de fibras (Olympus PMG3) [12].

Martin Heggli [13] en el año 2005 aplica en su investigación un Microtomógrafo de rayos X. Tomografía computarizada (CT) es un método muy avanzado para determinar la estructura tridimensional (3-D) de los objetos. El principio básico de funcionamiento de este método se basa en la medición de datos transmitidos por rayos X de los objetos medidos en diferentes ángulos que permite reconstruir una imagen en sección transversal del objeto basado en los métodos matemáticos de reconstrucción. La información micro estructural tridimensional (3-D) puede ser recuperada mediante la aplicación de un procedimiento de corte por secciones y luego reagrupándolos para reconstruir los cortes independientes.

Los fundamentos matemáticos de CT fueron expuestos ya a principios del siglo XX por Radon [23], pero fue necesaria la llegada de las computadoras rápidas en la década de 1970 para aplicar la técnica expuesta por Radon, la aplicación la realizaron al inventarse el primer escáner de tomografía de rayos X [24]. Para aplicaciones en tejidos no vivos se utiliza un modelo de micrografía denominado (μ CT), también conocido como Microscopía Tomográfica de rayos X (XTM), sus aplicaciones son muy extensas entre las que se destacan las ciencias biomédicas, ciencias de los materiales, la geofísica, la arqueología, las aplicaciones industriales, entre otras. Las muestras del material compuesto por Aluminio y carbono se midieron utilizando un SLS un haz de energía monocromático de 10keV. Esto corresponde a una longitud de onda de los rayos X de aproximadamente 1,2Å, con un campo de visión de 1,4 mm y se midieron más de 1001 proyecciones en un ángulo de 180°. Las tomografías individuales bidimensionales, es decir en 2D fueron reconstruidas mediante un procedimiento de retroproyección filtrada. Las medidas del resultado efectivo del volumen efectivo del elemento fueron de $0,7 \times 0,7 \times 0,7 \mu\text{m}$. Por otra parte las muestras de material compuesto por polímero y fibras de vidrio híbridas se midieron en EMPA en un tomógrafo de laboratorio, el mismo que está compuesto por la fuente de rayos X equipada en un micro tubo de enfoque Feinfocus FXE 200.5 con un tamaño de punto aproximadamente de $10 \mu\text{m}$ una energía de aceleración de 90 keV. Utilizaron un filtro con un filtro de latón Hamamatsu C7942CA-02 y un tamaño de píxel de $100 \mu\text{m}$. Registraron un total de 600 proyecciones con un tamaño de fotograma de 1024×1024 y 8 bits con 256 niveles de gris por píxel. La puesta en marcha resultó en un tamaño de voxel de $2,5 \mu\text{m}$. El materiales analizados fueron Polietileno de baja densidad compuesto con fibra de vidrio (LDPE/Pglass hybrid) y C/AlSi7Ba [13].

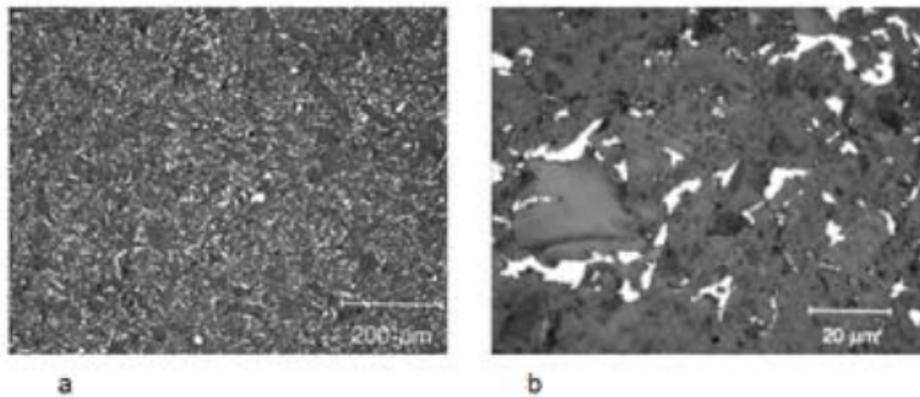


Figura 1.17: Muestra un ejemplo de micrografía óptica del material compuesto C/AlSi7Ba [13].

1.3 Digitalización de imagen

1.3.1 Fundamentos del procesamiento digital de imágenes

Al tratar de imágenes se considera en el cual la intensidad de luz y color varían de un punto a otro. A las imágenes compuestas únicamente por blanco y negro se las denomina monocromas y se pueden representar como una función continua $f(x, y)$ donde (x, y) son sus coordenadas y el valor de f es proporcional a la intensidad luminosa denominado nivel de gris en puntos específicos. Digitalización de imagen se denomina a la discretización de la función $f(x, y)$ en las coordenadas y en intensidad, para que pueda ser procesada en una computadora. La imagen está compuesta por una matriz $M \times M$ puntos, donde el número de columnas por el número de filas determina la resolución de la imagen, cada uno de los puntos de la matriz tiene su respectivo nivel de gris $f(x, y)$, los cuales son divididos para una serie de intervalos (K-intervalos), de manera que cada uno de los puntos representa el nivel de gris asignado a cada intervalo. Los modernos procesos para el procesamiento digital de imágenes están en la capacidad de discriminar 256 niveles de gris [14].

Para realizar un conteo de los objetos presentes en una imagen es necesario realizar un proceso previo a la imagen original, con el fin de que el software reconozca de manera eficaz los elementos a contar. Para ello se debe seguir el siguiente proceso, tal como se indica en el diagrama de flujo representado en la figura 1.18.

Adquisición de imagen: Se denomina al método que permite convertir una imagen en una representación procesable por un computador, la misma que puede ser adquirida por una cámara de imagen o video, microscopio, escáner, etc. Los resultados están en función del método empleado para la adquisición de imagen, el proceso digital y el método de codificación de la imagen.

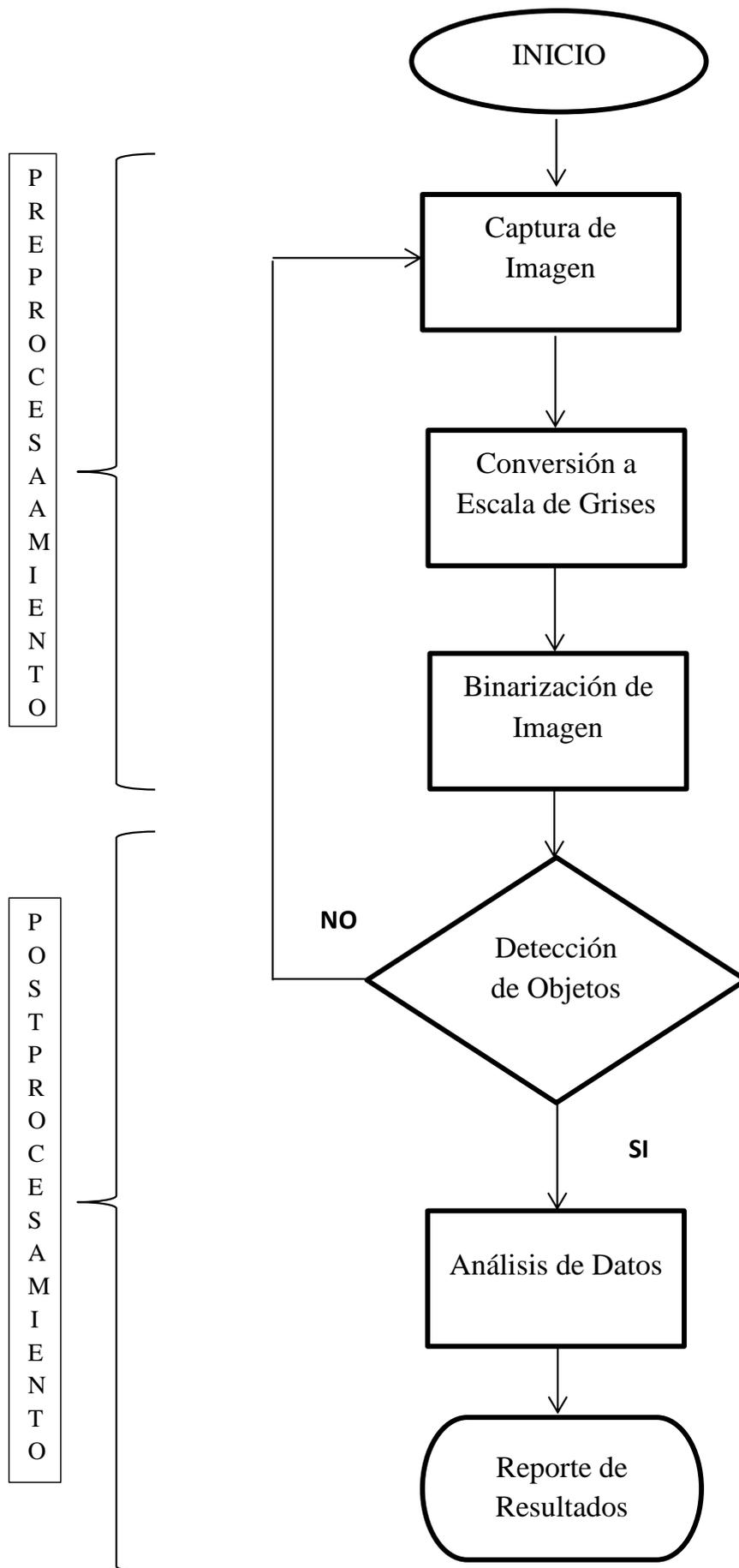


Figura 1.18: Principales tareas en análisis de imágenes microscópicas [14].

Mejora de la imagen: En este paso se utilizan las técnicas para mejorar la apariencia visual de las imágenes, se realizan una serie de operaciones a partir de una imagen gris y el resultado es otra imagen gris.

Extracción de características y datos: Es la detección y localización de entidades geométricas simples y complejas. Desde entidades simples como líneas y puntos hasta geometrías complejas como curvas y cuádricas.

Un aspecto muy importa que hay que tener en cuenta es el formato con el cual se van a guardar las imágenes, la importancia radica en almacenar la mayor cantidad de información de la imagen en el menor espacio posible. A continuación se describen algunos tipos de formatos que nos permiten almacenar la información.

Formato TIFF (Tagged Image File Format): [8] Este formato de archivos permite el almacenamiento e intercambio de informaciones en formato raster que provienen de cámaras de video, escáneres o programas de edición de imágenes. Las ventajas principales son:

- Su estructura tiene una gran variedad de aplicaciones.
- Es independiente del sistema operativo y plataformas gráficas del computador.
- Es ajustable a las características de un monitor, impresora y escáner.

La desventaja de este tipo de formato radica en que el usuario puede indicar nuevos atributos o tags en una imagen, lo que provoca una interpretación errónea al momento de la lectura de la imagen y además requiere un gran esfuerzo computacional para la decodificación de los datos.

Formato PNG: Este formato que permite almacenar información sin pérdidas de calidad. También permite dos modos de compresión de la imagen, el primero denominado estándar y el segundo se denomina modo de compresión progresivo utilizado para el reconocimiento de la imagen en los primeros instantes de la descarga de internet, es una buena opción cuando son imágenes grandes o se usan conexiones lentas. La principal desventaja de este formato es no permite crear pequeñas animaciones como el formato GIF [8].

Formato GIF: Permite almacenar información comprimida sin pérdidas de calidad. Este tipo de formato soporta los fondos transparentes que permite una buena integración de la imagen con el fondo actual de la página Web. La desventaja del formato GIF es que solamente admite un máximo de 256 colores en la misma imagen [8].

Formato JPG (Joint Photographic Expert Group): Permite visualizar hasta 16,7 millones de colores. Este formato es conveniente para las fotografías en color. La desventaja de este formato es que comprime las imágenes teniendo como consecuencia pérdidas de información, debido a que la tasa de compresión es de 50:1, la misma que es una tasa de compresión muy elevada, otra desventaja es que no permite crear animaciones ni un color transparente [8].

Formato PCX (PC Paintbrush): El formato permite comprimir los datos de la imagen con un algoritmo denominado RLE, algoritmo que permite reducir el tamaño del archivo cuando la imagen sea un dibujo, debido a que serán muchos los píxeles consecutivos del mismo color, lo cual no se puede realizar en otro tipo de imágenes porque es improbable que varios píxeles consecutivos tengan exactamente el mismo color [8].

Formato .VSI: Este formato permite almacenar imágenes de alta resolución de muestras completas para ser analizadas, independiente del tiempo y el espacio. Por lo tanto permite adquirir y procesar formatos de imagen sin comprimir [25].

Arroyo apoya la Muestra Virtual Image formato (VSI), que permite gigante, imágenes de alta resolución de muestras completas para ser almacenados y analizados, independiente del espacio y el tiempo. La gestión de memoria única corriente no pasa por las limitaciones del sistema operativo, lo que le permite manejar incluso la más grande de imágenes. Como resultado, las imágenes pueden ser adquiridas y manipulen de formatos sin comprimir

1.4 Conclusiones parciales

El modelo matemático del tensor de orientación, es uno de los modelos básicos para la determinación de la distribución de orientación de fibras cortas en materiales compuestos reforzados con fibras cortas. Advani y Tucker en el año 1987 proponen este modelo, con algunas suposiciones, entre ellas era que las fibras eran cilindros rígidos de dimensiones uniformes y la concentración de fibras era uniforme, aunque precisamente no lo era, sino de manera aleatoria. Siendo los ángulos (θ, ϕ) , los que determinan la orientación de cada una de las fibras. Otros de los modelos matemáticos empleados es el método de elipses, en el que se analiza las longitudes de sus ejes para determinar las dimensiones y orientación de las fibras. El eje menor de la elipse determina el diámetro de la fibra y el eje mayor indica la orientación de la fibra, es decir la dirección preferente de la fibra determinada por el ángulo α . A partir de la información presentada por el método de elipses se crea

una matriz en la cual sus componentes representan valores fundamentales para determinar el estado de orientación de las fibras. Entre ellos el valor de la componente a_{11} define al tensor de orientación. El eigenvalue del tensor de orientación es el que determina el estado de orientación de las fibras, el mismo que oscila entre los valores de 0,5 a 1 denominados “parámetros de orientación (S)”. Cuando los valores de S son iguales a 1 quiere decir que existe una perfecta alineación de las fibras, y cuando los valores de S son iguales a 0,5 indica que el estado de orientación de las fibras es aleatorio.

2 DESARROLLO DE PROBETAS PARA EL ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE ORIENTACIÓN Y LONGITUD DE FIBRAS MEDIANTE PROCESAMIENTO DIGITAL EN COMPUESTOS POLIMÉRICOS REFORZADOS CON FIBRAS CORTAS

2.1 Introducción

En este capítulo se describe el desarrollo de probetas para el análisis de la distribución de orientación y longitud de fibras cortas de “Guadua Angustifolia Kunth” (GAK) mediante procesamiento digital de imágenes. Se revisó bibliografía sobre preparación de probetas en las cuales no se encontró información de probetas reforzadas con fibras naturales. Existen investigaciones de preparación de probetas con fibras artificiales, que han servido como guía para el desarrollo de probetas de material polimérico reforzado con fibras cortas de GAK. Se ha enfocado esta investigación teniendo en cuenta que este material polimérico compuesto es aplicable en la industria. Las matrices poliméricas reforzadas con fibras cortas son la prioridad de los ingenieros en la innovación de nuevos materiales aplicables en la ingeniería. Las propiedades de estos materiales dependen de la orientación de las fibras cortas por lo cual se debe obtener resultados acertados. La ventaja de utilizar fibras cortas es que el moldeo se lo puede realizar de varias maneras lo que implica menos equipo, por tanto ahorro de dinero. La preparación de la muestra es primordial para la determinación de orientación y distribución de fibras en materiales poliméricos reforzados con fibras cortas de GAK, en consecuencia se deberá realizarla con los parámetros que esta requiera [2].

2.2 Obtención de la probeta

El proceso de desarrollo de probetas para el análisis consistió en tres pasos: corte, embebido, lijado y pulido. Se realizó el proceso en un compuesto polimérico reforzado con fibras cortas de GAK, siendo la matriz Polipropileno. Las muestras tenían 30% y 40% de concentración de fibras cortas de GAK.

La figura 2.1 presenta un flujograma que indica el proceso para la obtención de probetas que fueron utilizadas para el análisis de la distribución de orientación y longitud de fibras mediante procesamiento digital en compuestos poliméricos reforzados con fibras cortas.

2.2.1 Corte

Se cortaron tres muestras de una probeta rectangular de 100mm de longitud x 10mm de ancho y 4mm de espesor. Los cortes se realizaron en tres partes de la probeta; parte inicial, central, final. Las muestras fueron cortadas de 15mm de longitud, las zonas de corte fueron marcadas para tener referencias de corte como se muestra en la figura 2.2.

Una cortadora de disco MEGA-M250 (Manual Abrasive Saw) suministrada por PACE TECHNOLOGIES [15], representada por la figura 2.3 (a), fue utilizada para el corte de las muestras y posteriormente de las probetas embebidas en resina poliéster. Se colocaron las probetas en un sistema de sujeción rápido, verificando que la muestra se encuentre perpendicular a la mesa, para ello se utilizó una escuadra para comprobar el perfecto alineamiento de las prensas de sujeción rápida con las guías de la mesa de corte, obteniendo así un corte recto. El corte se realizó lentamente con abundante refrigerante. Un disco de corte Abrasivo MAXCUT-A Blade suministrado por PACE TECHNOLOGIES, fue utilizado para realizar el corte de las muestras y de las probetas. El mismo que es para cortar materiales compuestos por resinas poliméricas y elastómeros. Tal como se indica en la figura 2.3 (b).

Fluido para corte abrasivo: El fluido de corte ideal para el corte abrasivo es el que elimina las virutas de corte y degrada el material abrasivo de cuchillas. Debe tener un punto de inflamación relativamente alto debido a las chispas producidas durante el corte abrasivo.

Se procesaron cuatro muestras, dos con 30% de fibra GAK y dos con 40% de fibra de GAK, resultando un total de 12 probetas.

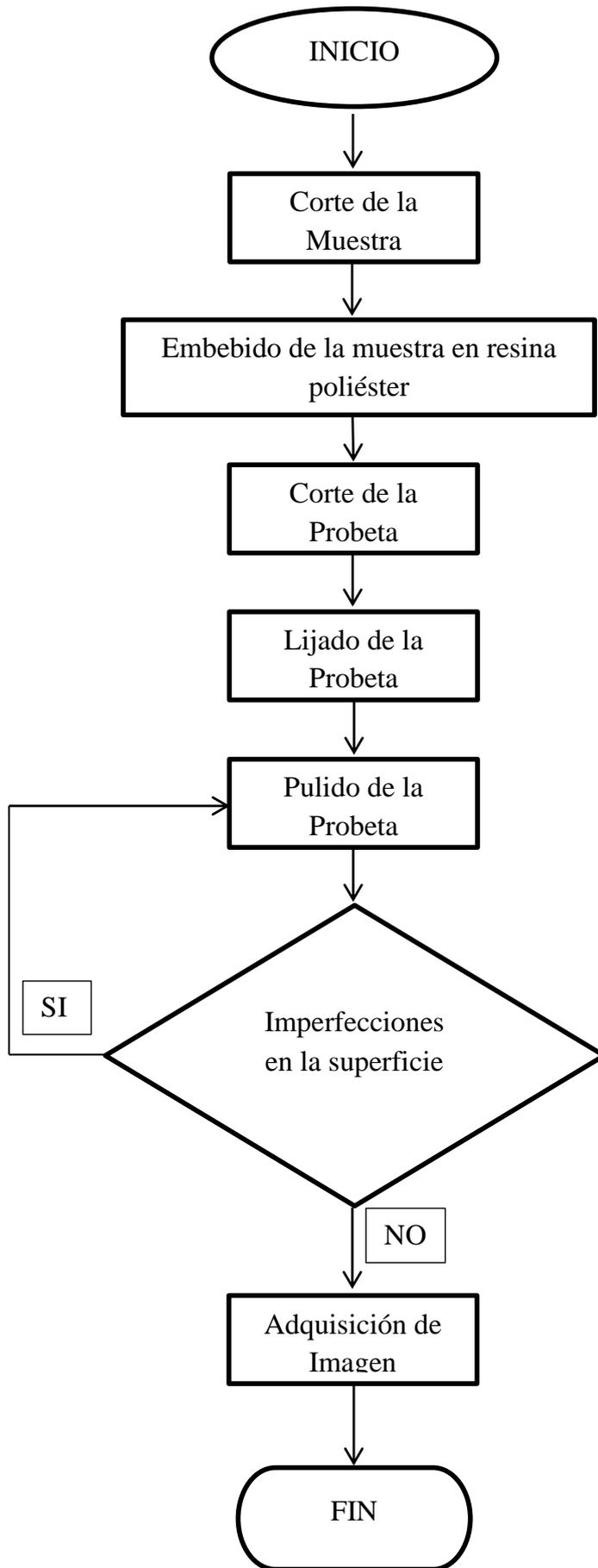


Figura 2.1: Proceso para la obtención de probetas. **Fuente:** Autores.

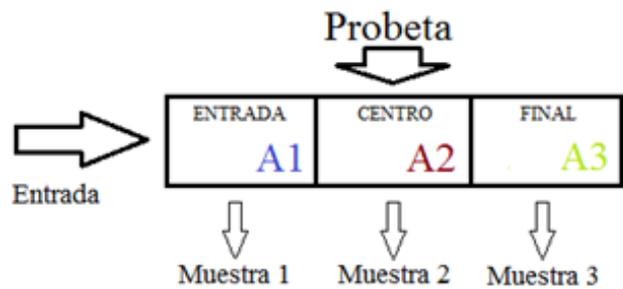
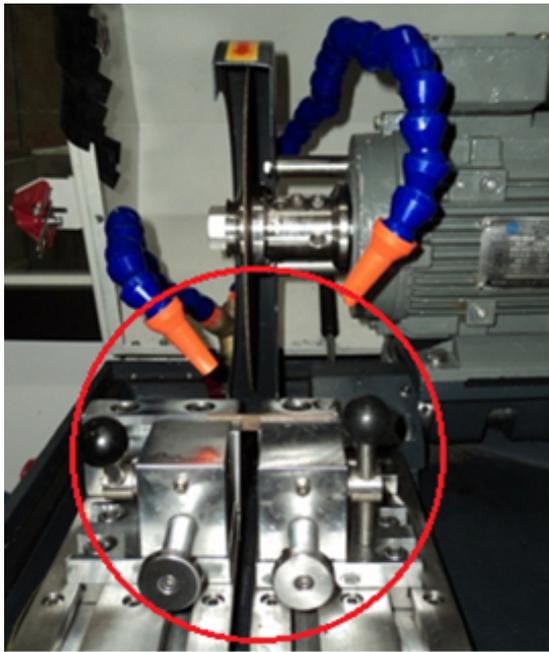


Figura 2.2: Corte de la probeta. **Fuente:** Autores

2.2.2 Embebido

Se embebieron las probetas utilizando un utillaje conformado por dos piezas como se muestra en la figura 2.4. Se colocó la probeta paralela a la cara del utillaje (parte 2), centrándola y fijándola con silicón líquido. Luego se colocó el molde para el embebido de la muestra (parte 1). Una vez realizado estos pasos se vertió la resina poliéster lentamente sobre el molde de embebido evitando la creación de burbujas hasta una altura de 40mm. El tiempo de curado fue de 4 horas. Una vez solidificada la resina se desmoldearon las probetas evitando roturas especialmente en los filos. Posteriormente se cortó el excedente de resina, dejando una medida final de la probeta de $25\text{mm} \pm 0,5$.

2.2.3 Lijado y pulido

Una máquina semiautomática NANO 1000T/FEMTO 110 Polishing Head, provista por PACE TECHNOLOGIES [16], fue utilizada para el lijado y pulido de las probetas. La figura 2.5 muestra el detalle del equipo utilizado. Se realizó el lijado y pulido a tres espesores diferentes: 1mm, 2mm y 3mm, a los cuales se les designó un valor en (z) de 1, 0 y -1 respectivamente, tal como se indica en la figura 2.6, dando como resultado un total de 36 muestras lijadas y pulidas. Se utilizaron diferentes granulometrías de lijas [26] y abundante agua, y el proceso seguido, se describe en la tabla 2.1.

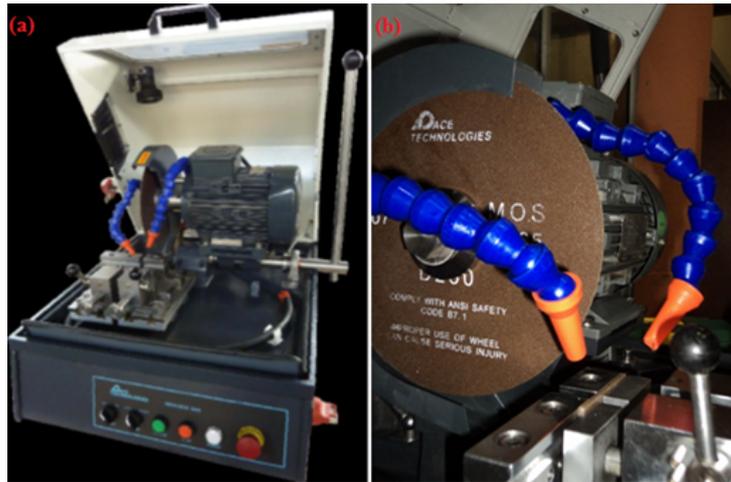


Figura 2.3: (a) Cortadora MEGA-M250 Manual Abrasive Saw suministrada por PACE TECHNOLOGIES [15]. (b) Disco de corte MAXCUT-A Blade suministrado por PACE TECHNOLOGIES. **Fuente:** Autores



Figura 2.4: Embebido de las probetas. **Fuente:** Autores



Figura 2.5: Pulidora semiautomática PACE TECHNOLOGIC NANO 1000T / FEMTO 1100 Polishing Head [16].

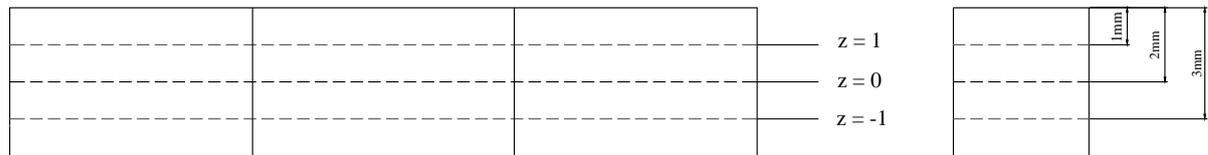


Figura 2.6: Detalle de espesores de pulido y su denominación. **Fuente:**Autores.

2.2.3.1 Pulido

Los paños ATLANTIS Polishing Cloth, suministrados por PACE TECHNOLOGIES, se emplearon para el pulido de las probetas, se eligió este tipo de paño debido a que tiene una capa de espuma elástica en la capa anterior al paño lo cual le permite ajustarse mejor a la superficie de la probeta y no deformar las fibras de GAK [16]. Alúmina 0.3 μm High Viscosity, provista por PACE TECHNOLOGIES también fue empleada para este proceso, dado que es un abrasivo para pulidos finales compuesto de alúmina y sílice coloidal. La alúmina seleccionada debe corresponder al tipo de paño empleado para el pulido y de acuerdo a las propiedades físicas y químicas del material que se va a procesar. En la figura 2.7 (a) se muestra el paño y (b) la alúmina utilizada en el proceso. La alúmina se suministró en el centro del paño en pequeñas cantidades, formando una capa muy fina entre las superficies del paño y las probetas. Para el pulido final se aplicó la presión necesaria para evitar que en la superficie de la probeta se presenten imperfecciones. En la tabla 2.2 se muestran los parámetros de pulido.



Figura 2.7: (a) Pulido manual paño ATLANTIS Fuente: Autores. (b) Alúmina de 0,3 μm High Viscosity [15].

La alúmina se colocó en centro del paño en pequeñas cantidades formando una capa entre el paño y las probetas aplicando presión necesaria para el pulido final.

Tabla 2.1: Parámetros empleados para el proceso de lijado de probetas. **Fuente:** Autores

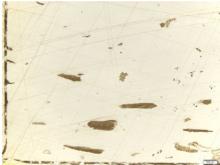
Fase:	Lija (# grano):	Tiempo (min):	Velocidad (Rpm):	Observaciones:	Imagen:
Desbaste	400	20	560	Se realizó hasta llegar a la altura requerida dejando marcas profundas.	
Lijado	600	10	1200	Menos profundidad de marcas.	
Lijado	800	10	1200	Visualmente se observa pocas marcas.	
Lijado	1200	20	1200	Casi no se observan marcas.	

Tabla 2.2: Parámetros empleados para el proceso de pulido de probetas. **Fuente:** Autores

Fase:	Paño:	Tiempo (min.)	Velocidad (Rpm)	Observaciones:	Imagen:
Pulido	Atlantis	90	1200	Eliminación de marcas	

2.3 Conclusiones parciales

La obtención de probetas de buena calidad se debe a un buen desarrollo de todos los pasos de preparación de las mismas. Iniciando desde el corte, evitando el calentamiento de la probeta, logrando que las fibras permanezcan en su lugar. Así como un embebido correcto, sobre todo su planicidad, facilitando el pulido, de manera que la superficie de interés se asiente paralela sobre los dispositivos de lijado y pulido. Obteniendo buenos resultados en el pulido final, logrando un proceso continuo, puesto que se realizó treinta y seis probetas a diferentes profundidades. Todos estos pasos se realizaron correctamente lo que garantiza una probeta correctamente desarrollada. Para poder seleccionar el tipo de paño para el pulido de las probetas se realizó un proceso de prueba error hasta determinar el paño que presentó los mejores resultados, de igual manera se realizó con las lijas de diferente granulometría, puesto que el tema de investigación es en parte experimental.

3 OBTENCIÓN DE IMÁGENES

3.1 Introducción

En este capítulo se describen los pasos para la obtención de una imagen de alta calidad, utilizando el método de microscopía óptica. Un microscopio BX51M provisto por Olympus con las siguientes características: campo claro y campo oscuro, luz reflejada, Cabeza trinocular y de alta resolución, 5X, 10X, 20X, 50X y 100X objetivos, con cámara digital Olympus DP 72, utilizado para visualizar y las superficies de las muestras pulidas y obtener sus respectivas imágenes. El software Stream Essentials® provisto por Olympus fue utilizado para el procesamiento de las imágenes. Como se muestra en la figura 3.1.

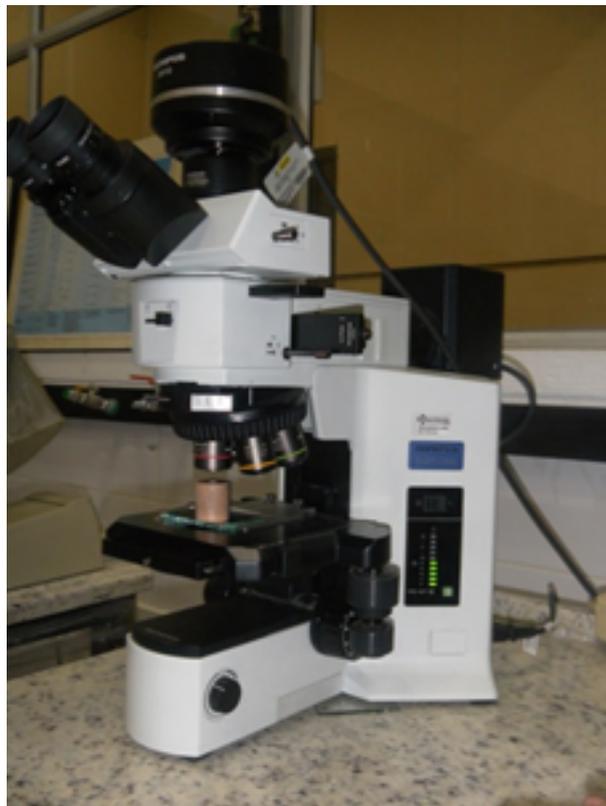


Figura 3.1: Microscopio óptico BX51M campo claro y campo oscuro, provisto por Olympus.

Los equipos normalmente empleados son los microscopios ópticos y los electrónicos.

El microscopio óptico puede ser de luz transmitida y de luz reflejada. El de luz transmitida se usa en materiales donde se puede realizar cortes finos que dejan pasar la luz visible, en el caso de materiales opacos se usa el de luz reflejada. El desarrollo de nuevos microscopios ópticos y electrónicos ha sido de gran ayuda para la creación de nuevos materiales compuestos reforzados con fibras cortas.

3.1.1 Microscopio óptico

Es el equipo óptico más empleado, su función principal es mostrar una imagen en un plano de sección 2D, con este tipo de microscopio se puede conseguir 2000 aumentos, en la figura 3.2, se presenta un esquema de un microscopio de luz reflejada. El microscopio óptico de reflexión utiliza una fuente luminosa que se dirige hacia un reflector de vidrio inclinado, que dirige el haz de luz hacia la probeta, al momento de chocar una fracción de luz incidente es reflejada por la probeta, a su vez el haz vuelve a pasar por el objetivo, donde se proyecta una imagen ampliada de la zona iluminada, la luz continua hacia el vidrio plano, y se amplifica una vez más al pasar por los lente ubicados en la parte superior denominado ocular [27].

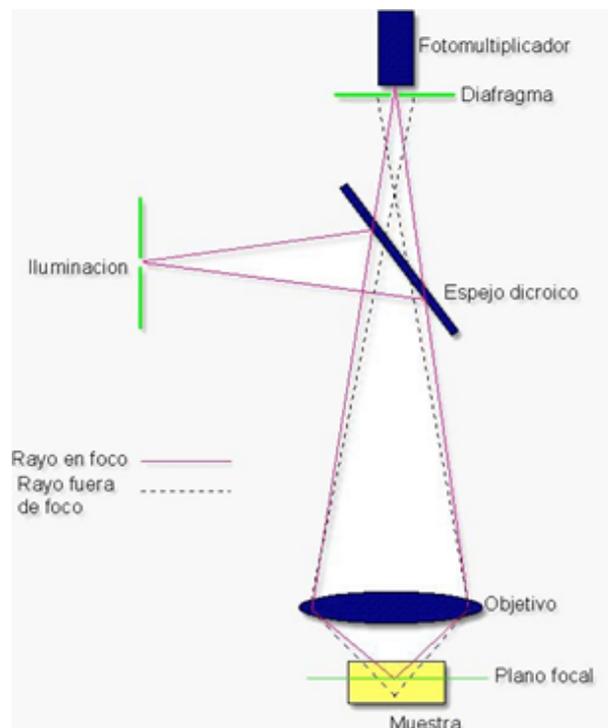


Figura 3.2: Esquema de un microscopio óptico de luz reflejada [17].

3.1.2 Microscopios Electrónicos

Los microscopios ópticos fueron evolucionando desde el siglo XVII, en el año 1931 surge una nueva era de microscopios, con una resolución 1000 veces mayor que el microscopio óptico, surgiendo inicialmente el microscopio electrónico de transmisión (TEM), posteriormente se construye el microscopio electrónico de barrido (SEM). Esta técnica se ha convertido en una fuente de información, no solo por la alta resolución, puesto que permite el análisis de técnicas asociadas a un microscopio electrónico, sino que también permiten dar información de morfología, topográfica química, cristalina, eléctrica y magnética de los materiales [17].

El futuro de esta técnica es muy prometedor debido a su desarrollo tecnológico en la última década del siglo XX, alcanzando un poder de resolución de hasta 0.1nm en un TEM y 1.5 nm en un SEM, éste último con la posibilidad de trabajar a presión controlada, útil en la observación de muestras húmedas [28].

El SEM proporciona información morfológica y características de la superficie, mientras que con el TEM podemos estudiar la estructura interna y detalles estructurales de los materiales. La utilización del microscopio electrónico de barrido (SEM) es la técnica más empleada en el análisis de superficies, el SEM acompañada por el análisis de rayos X, es considerado un sistema de acercamiento relativo rápido, barato, y básicamente no es destructivo al analizar sustancias.

En un SEM como mencionamos utiliza electrones, que son transmitidos por un cátodo de tungsteno, el mismo que está constituido por un filamento de un diámetro de 100 micrómetros, que está unido a un metal los mismos que son ajustados a un soporte de material cerámico, al cual atraviesan, alcanzando conexiones eléctricas, en el proceso el filamento aumenta la temperatura por el paso de una corriente eléctrica a través de él, la temperatura es 2426 °C. En la figura 3.3 se indica el esquema de un microscopio SEM [18].

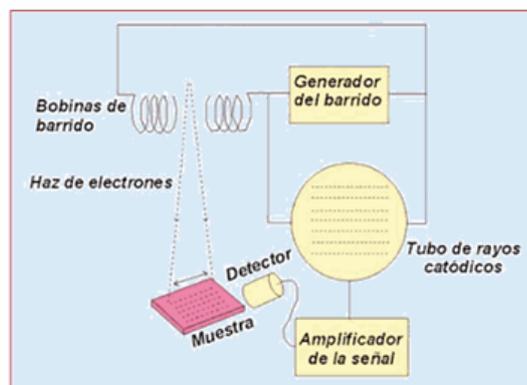


Figura 3.3: Esquema microscopio electrónico de barrido SEM [18].

En la microscopía TEM, utiliza un haz electrónico que es encaminado y focalizado por lentes electromagnéticas. Este paso se crea dentro de una columna en condiciones de alto vacío, de manera que los electrones acelerados avanzan en dirección recta salvo que interactúen con los átomos presentes en la muestra. El impacto de los electrones con los átomos de la muestra provoca que estos modifiquen su velocidad, los electrones que se impactan con la muestra se proyectan sobre una pantalla fluorescente que es una placa fotográfica, formando imágenes reales. Al momento de formarse las imágenes, las zonas que más desvían a los electrones se mostraran más oscuras que las que desvían menos a los electrones. En la figura 3.4 se presenta el esquema de un microscopio TEM [29].

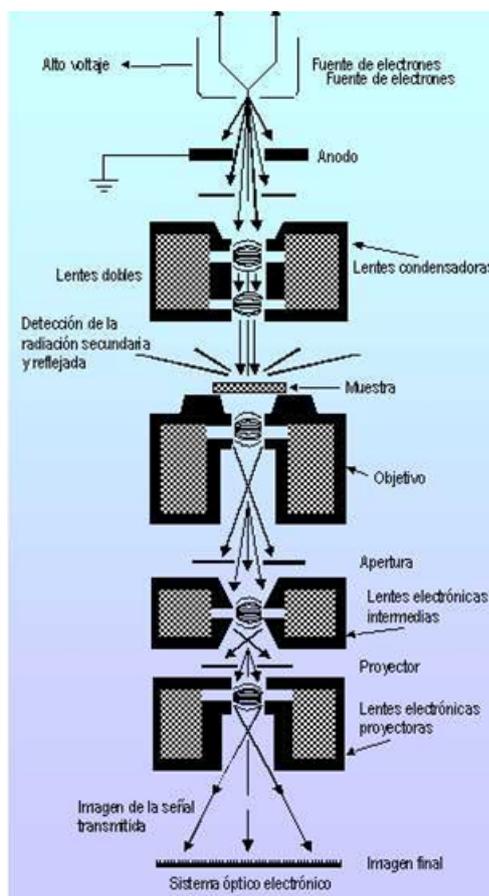
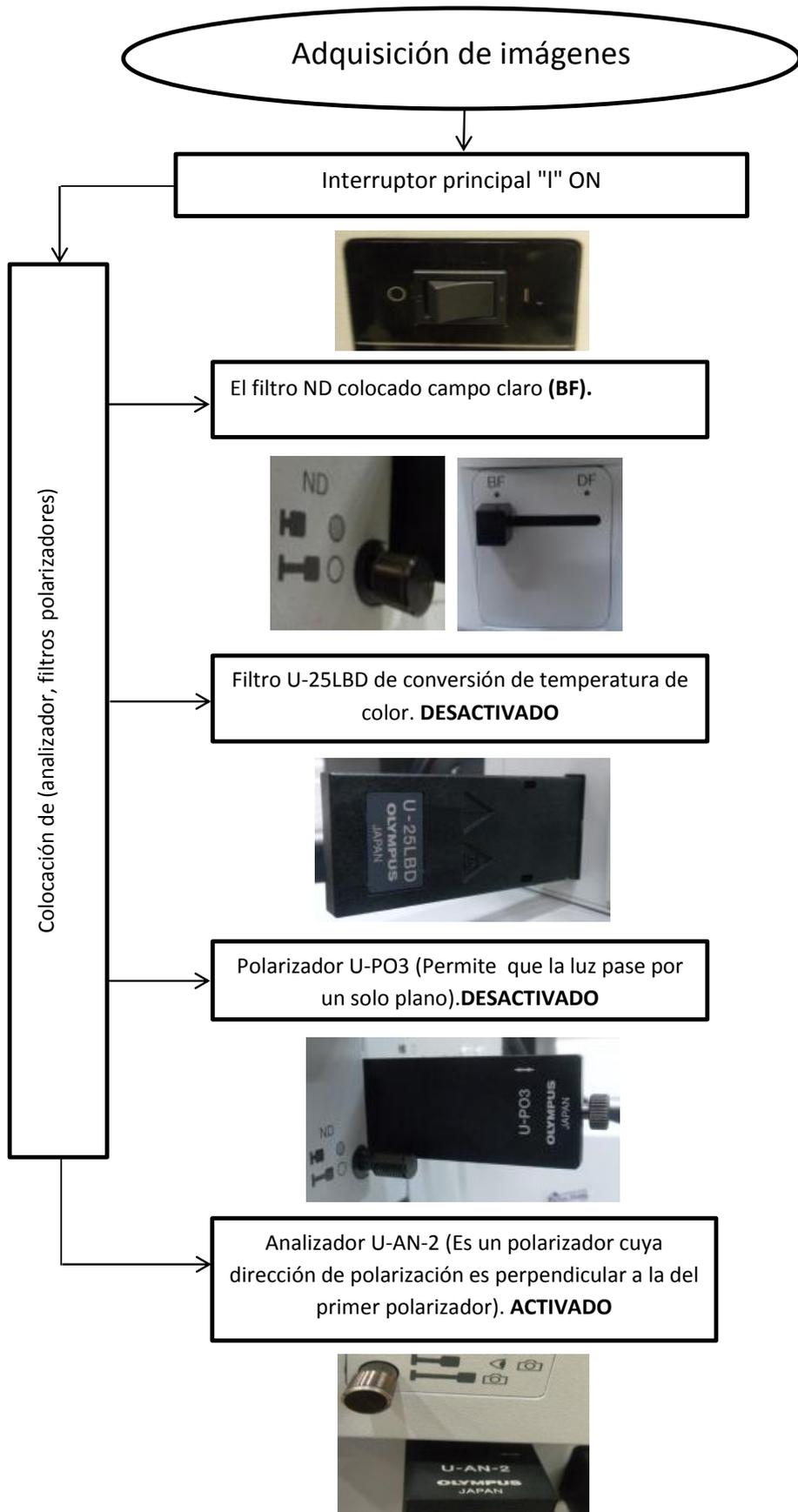


Figura 3.4: Esquema microscopio TEM [19].

3.2 Adquisición de imagen

La adquisición de imágenes se realizó con la ayuda de una cámara digital Olympus DP 72, OLYMPUS Stream Essential® software, que está incorporada a un microscopio OLYMPUS BX51M. En la figura 3.5 se presenta el flujograma empleado para la adquisición de imágenes [20].



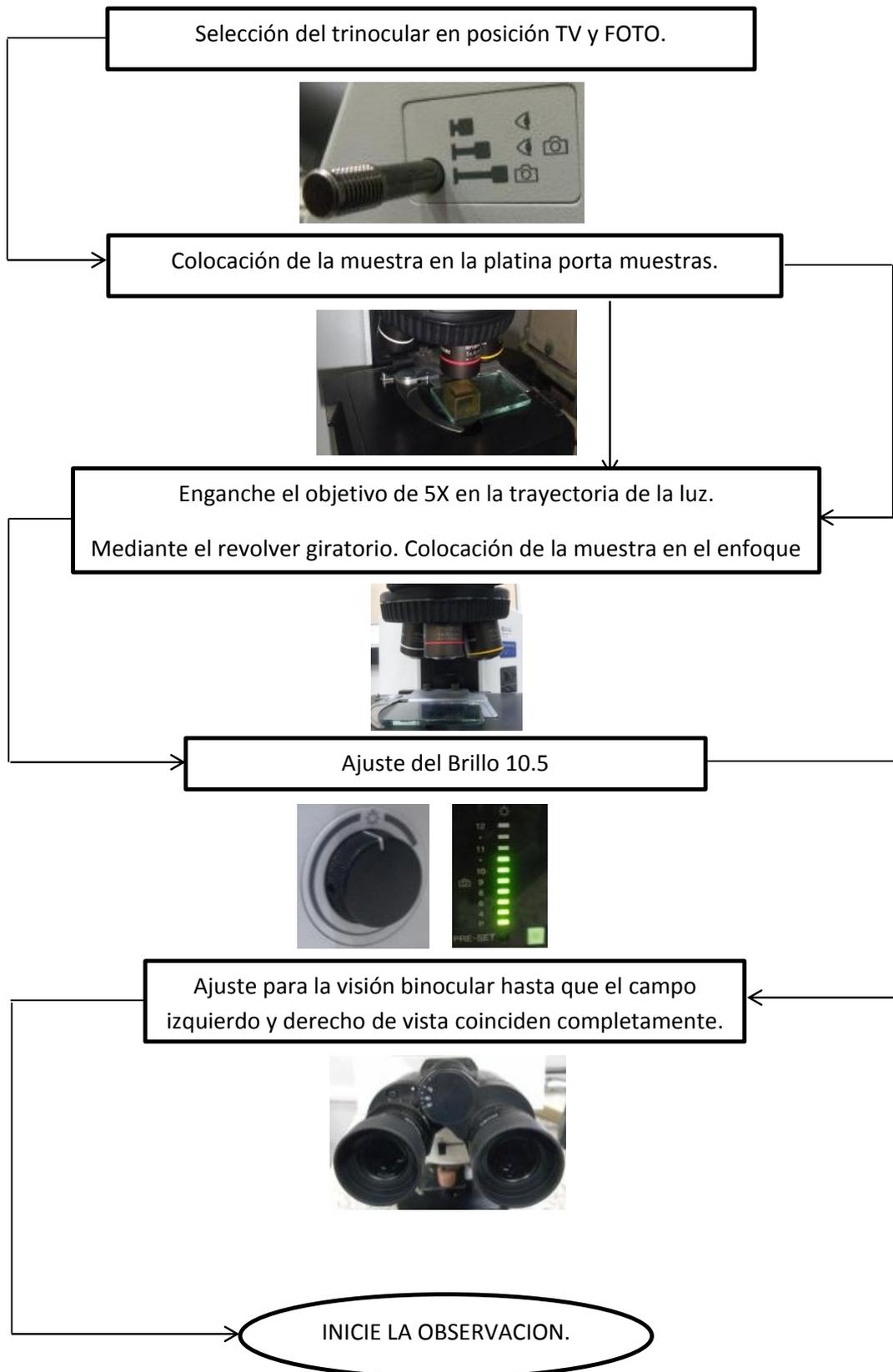


Figura 3.5: Esquema de Adquisición de Imagen. **Fuente:** Autores.

3.2.1 Adquisición de imagen Combinada - Creating stitched images MIA

En la figura 3.6 (b), se presenta una imagen que fue adquirida con la herramienta Manual MIA (creación de una imagen combinada) del software Stream Essentials® Versión 1.6. La imagen adquirida representa toda la superficie de la muestra, figura 3.6 (b), debido a que el lente muestra un área de enfoque de 35 mm x 26 mm, que representa una fracción de la superficie total de la muestra, como se muestra en la figura 3.6 (a). Para la adquisición de un área de muestra grande se utiliza este proceso de adquisición de MIA, con la finalidad de adquirir varias imágenes individuales de posiciones adyacentes en la muestra, para posteriormente combinarlas en una imagen completa combinada [20].

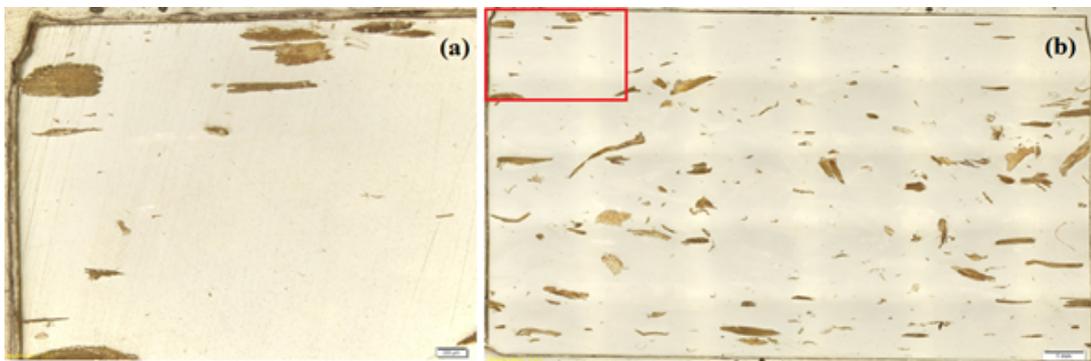


Figura 3.6: Captura de imagen de material compuesto con polipropileno como matriz reforzado con fibras GAK. (a) Área de enfoque reducida, microscopio OLYMPUS BX51M, 5X. (b) Área de enfoque aumentada mediante herramienta Manual MIA (6x5), microscopio OLYMPUS BX51M, 5X, software Stream Essentials Versión 1.6. **Fuente:** Autores.

Procedimiento para la adquisición de una imagen combinada sin platina motorizada en X-Y. (Manual MIA) [20].

1. Activar el comando Acquisition (Adquisición), mediante View ¿ Layout ¿ Acquisition. Ver figura 3.7.

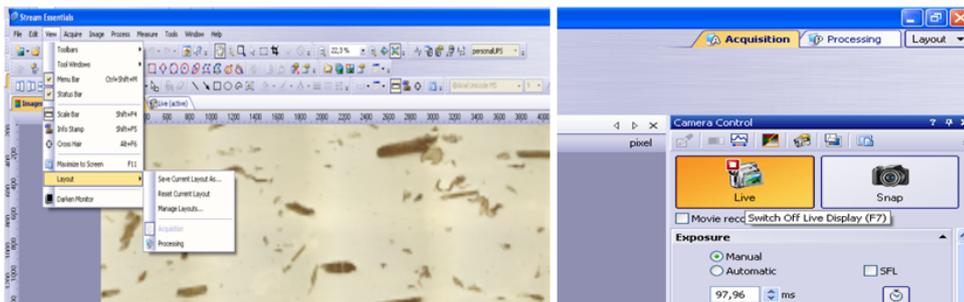


Figura 3.7: Pasos para activar botón acquisition. **Fuente:** Autores

2. En la barra de herramientas (microscope control), hacer click en el botón para la adquisición de la imagen completa. Como se muestra en la figura 3.8.

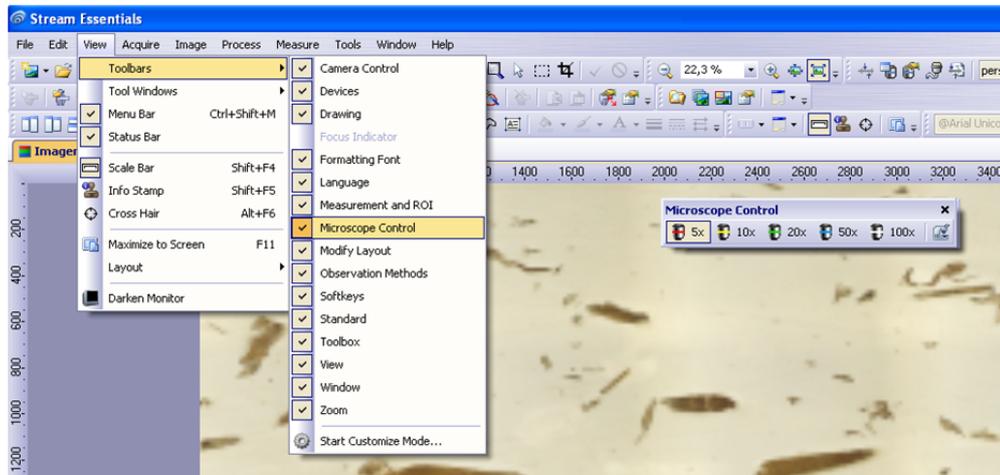


Figura 3.8: Pasos para activar la herramienta Microscope control. **Fuente:** Autores

3. Activar el modo en vivo y seleccionar los ajustes óptimos para adquirir la imagen, como el tiempo de exposición, en la ventana de herramienta de control de cámara. El tiempo de exposición ajustado fue de 141.6 ms. Ver figura 3.9.

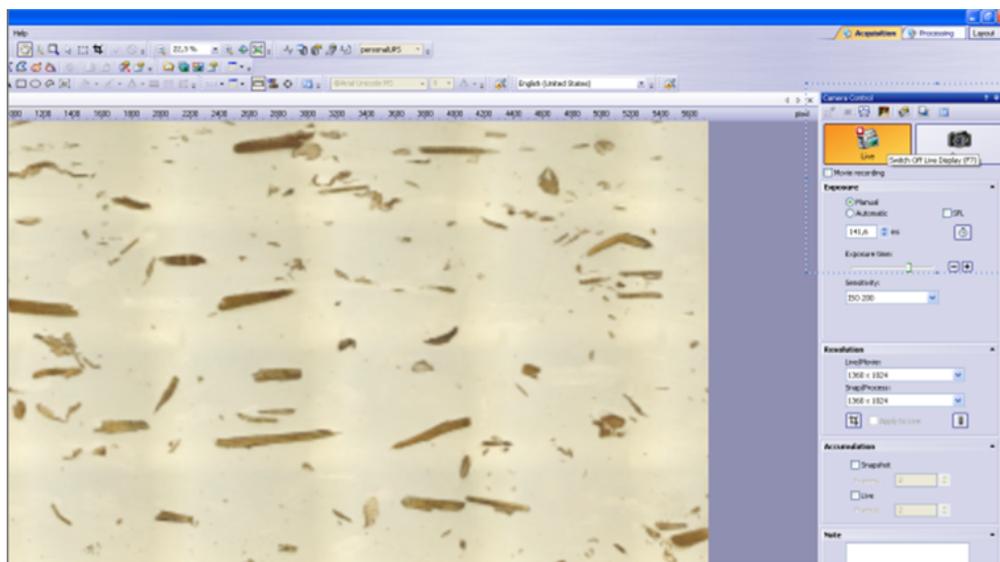


Figura 3.9: Pasos para activar botón en vivo y ajuste de tiempo de exposición. **Fuente:** Autores

4. Colocar la posición de la muestra en la que se desea iniciar la adquisición de la imagen completa. Para la adquisición de la imagen completa se inició de la esquina superior izquierda, con la finalidad de hacer un barrido total de la muestra en la figura 3.10.

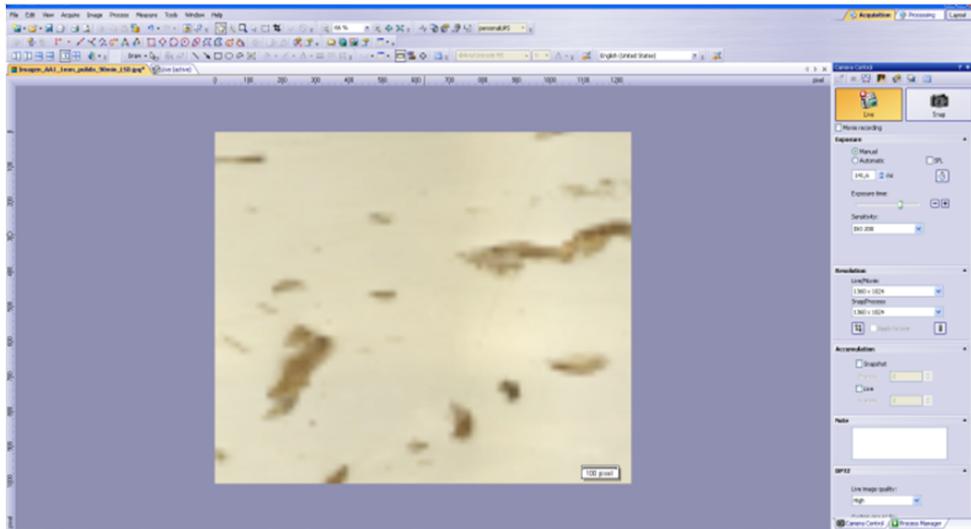


Figura 3.10: Selección de lugar de inicio para la adquisición de la imagen completa. **Fuente:** Autores

5. Finalizar el modo en vivo. Figura 3.11.



Figura 3.11: Pasos para finalizar modo en vivo. **Fuente:** Autores

6. Activar la ventana de herramientas Process Manager. Como se indica en la figura 3.12.



7. Seleccionar la opción Manual Processes

8. Hacer click en el botón Manual MIA. Este botón aparece automáticamente en la ventana de herramientas, También se utilizó las imágenes con gran profundidad de foco para la imagen completa, para ello se adquirió cada una de las imágenes

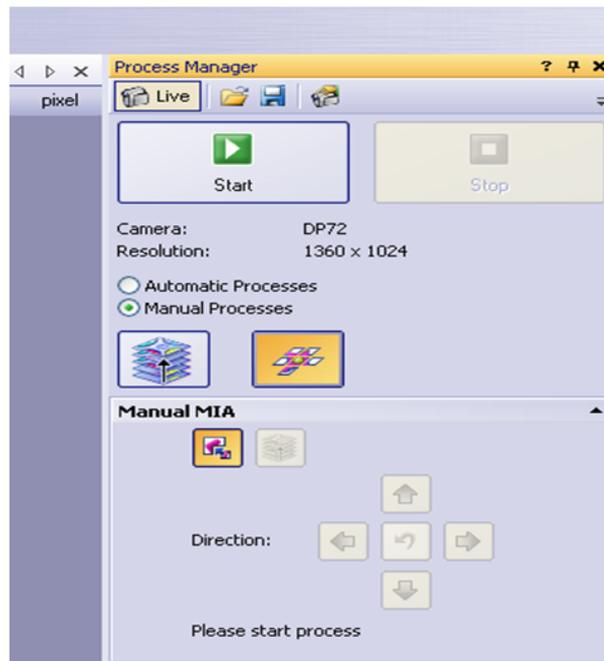


Figura 3.12: Pasos para activar la ventana Process Manager. **Fuente:** Autores

individuales haciendo click en el botón Instant EFI, que se encuentra en el grupo

Manual MIA .

9. Hacer click en el botón Auto Align (Auto alineacion) . Esta herramienta busca imágenes con la misma estructura en imágenes individuales adyacentes, de manera que la imagen completa se arma con las áreas de la misma imagen superpuesta.

10. Hacer click en el botón start .

11. Pulsar sobre uno de los botones de flecha para ajustar la parte de la imagen actual en la siguiente imagen . El sistema adquiere una imagen en la posición actual de la muestra. En la imagen de la izquierda (1) es la imagen adquirida y la imagen de la derecha (2) es la imagen en vivo de la muestra, como se muestra en la figura 3.13. Las dos imágenes se superponen, dado que la imagen en vivo de la muestra es transparente, se ven dos veces la misma imagen en el área de superposición de forma simultanea

12. Mover la imagen en vivo lentamente hasta que coincida con puntos específicos de la estructura de la imagen adquirida, la superposición no necesariamente debe ser exacta puesto que el software se encarga de esa función.

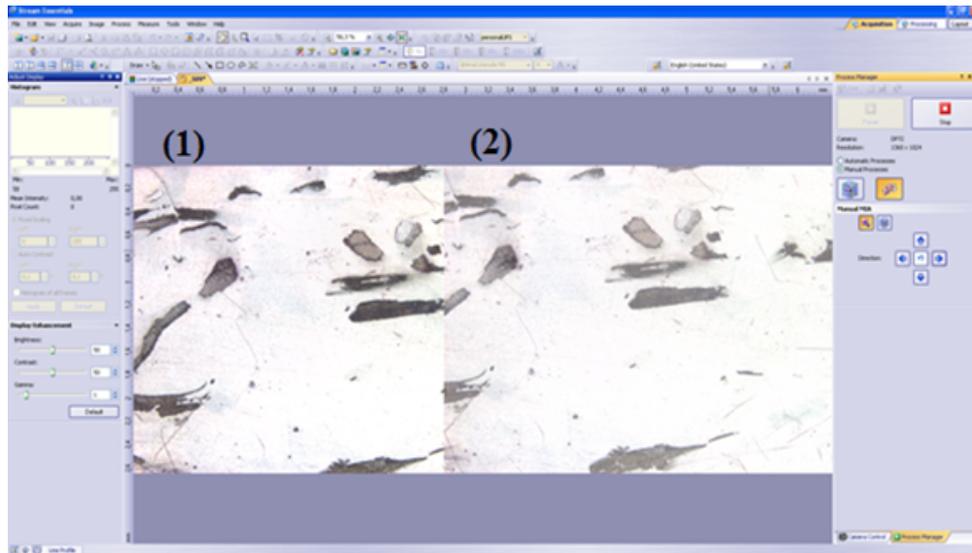


Figura 3.13: Proceso Creating stitched images MIA, con microscópio OLYMPUS BX51M, 5X y software Stream Essentials® Versión 1.6. **Fuente:** Autores

13. Para continuar se comprueba que las imágenes se hayan combinado correctamente de lo contrario puede deshacerse el último paso utilizando el botón . Posteriormente se puede mover el escenario de nuevo y adquirir las siguientes imágenes.
14. Finalmente hacer click en el botón stop , cuando desee o cuando la adquisición de la imagen completa ha finalizado. La imagen completa se guarda automáticamente en un formato de archivo .VSI.

Adquisición de una imagen mediante EFI (Imagen de foco extendido).

EFI es la abreviatura (Extended Focus Image) utiliza una serie de diferentes centros de imagen separadas para calcular una imagen resultante que se centra en todas sus partes en microscopios que tienen profundidad limitada de foco. Como se muestra en la figura 3.14.

Pasos para la adquisición de una imagen utilizando EFI.

1. Abrir la ventana de herramientas, Process Manager, siguiendo estos pasos, View > Tool Windows > Process Manager. Ver figura 3.15.
2. Seleccionar la opción Process Manager. Como se muestra en la figura 3.16.
3. Hacer click en el botón Instant EFI. , este botón aparece automáticamente en la ventana de herramientas.

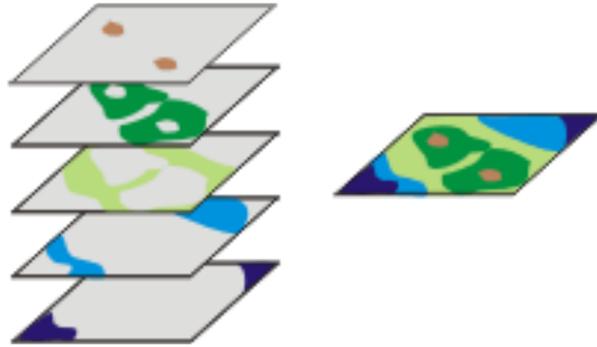


Figura 3.14: Ejemplo de adquisición imagen EFI [20].

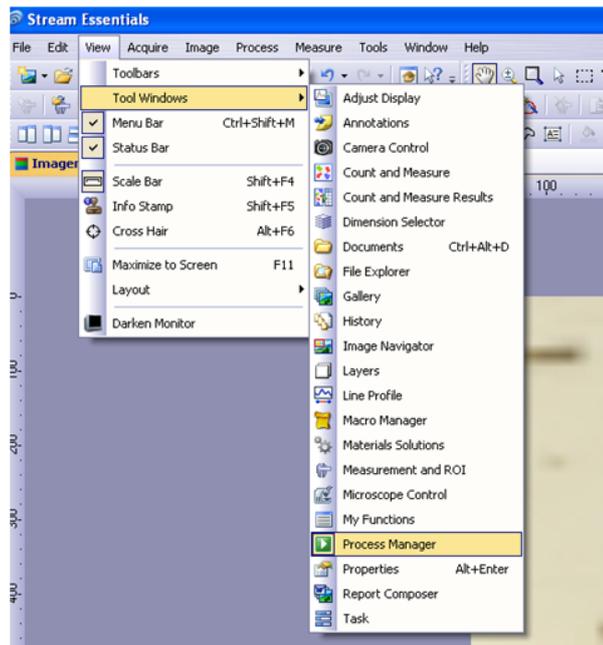


Figura 3.15: Pasos para activar la ventana Process Manager. **Fuente:** Autores

4. Abrir el comando Camera Control, siguiendo estos pasos, View > Tool Windows > Camera Control.

5. Hacer click en el botón .

6. Mover el foco del microscopio en el eje z, ya sea en el punto más bajo o en el punto más alto de la imagen. Utilizar el modo en vivo para un control visual. Como se indica en la figura 3.17.

7. Ajustar el tiempo de exposición 141.6 ms, el mismo que este es constante en la adquisición de la imagen.

8. Hacer click en el botón start  que se encuentra en la ventana de herramientas

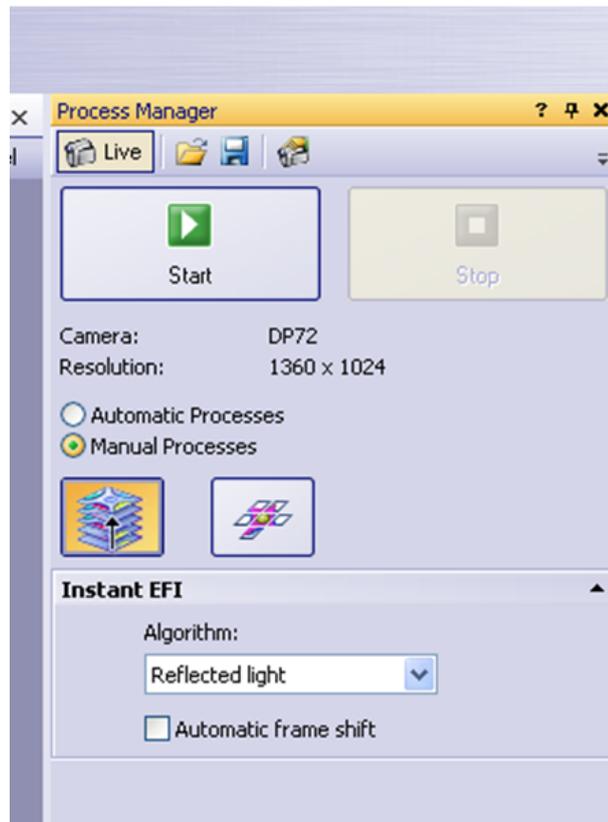


Figura 3.16: Pasos para seleccionar la opción Process Manager. **Fuente:** Autores

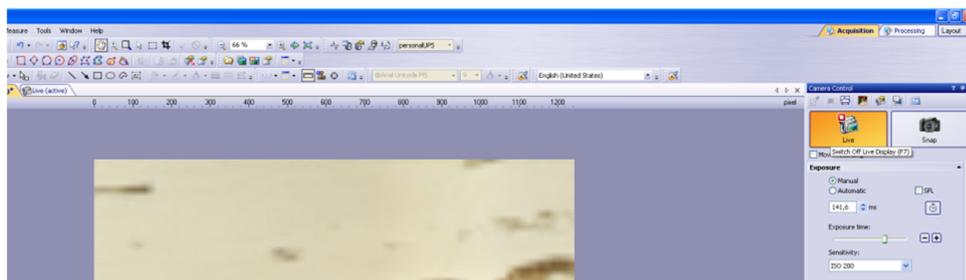


Figura 3.17: Modo en vivo para control visual. **Fuente:** Autores

Process Manager. La pantalla se divide en tres imágenes, en la parte inferior derecha se observa la imagen en vivo (3), en la parte inferior derecha se observa el mapa de nitidez (2) y en la parte superior se observa el resultado de la imagen compuesta (1), como se muestra en la figura 3.19.

9. Utilizar el desplazamiento micrométrico del eje z del microscopio para mover el escenario a través de la gama de altura de la superficie de la muestra. El software adquiere imágenes en los diferentes planos focales, con valores altos de nitidez en todas las imágenes. El mapa de nitidez indica en que área de la imagen se está reproduciendo en la imagen EFI, cuanto más brillante sea un pixel en el mapa de nitidez mayor será la nitidez en la imagen de EFI.



Figura 3.18: Ajuste del tiempo de exposición. **Fuente:** Autores

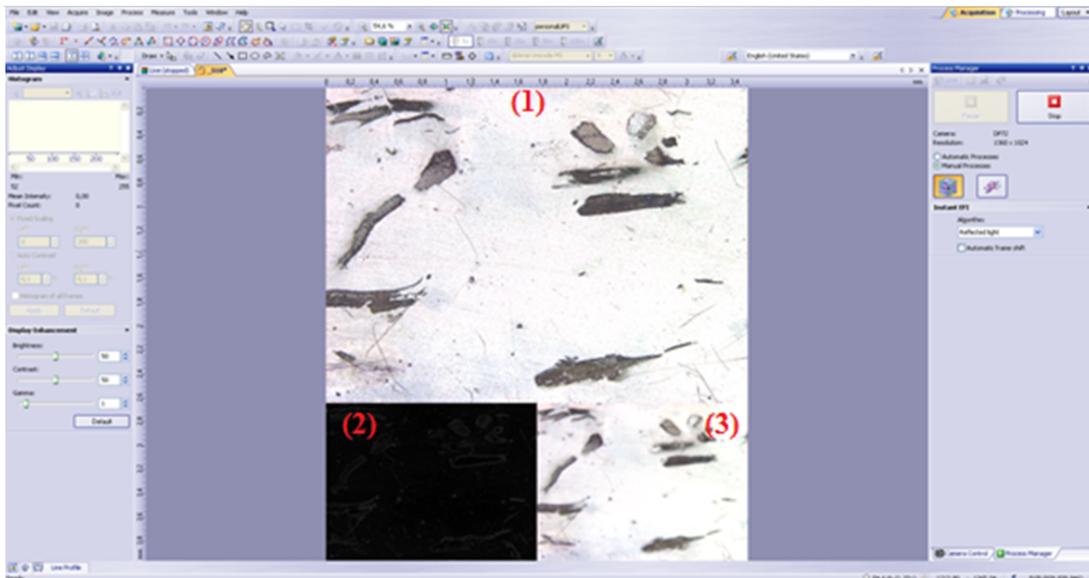


Figura 3.19: Ejemplo de ventana de adquisición de imagen EFI, microscopio OLYMPUS BX51M, 5X, software Stream Essentials® Versión 1.6. **Fuente:** Autores

10. Hacer click en el botón Stop  ubicado en la ventana de herramientas Process Manager. El resultado es una imagen estándar la misma que se guarda en formato .VSI.

En la figura 3.20 se presenta dos ejemplos de imágenes (a) imagen adquirida sin EFI y (b) Imagen adquirida utilizando la herramienta EFI.

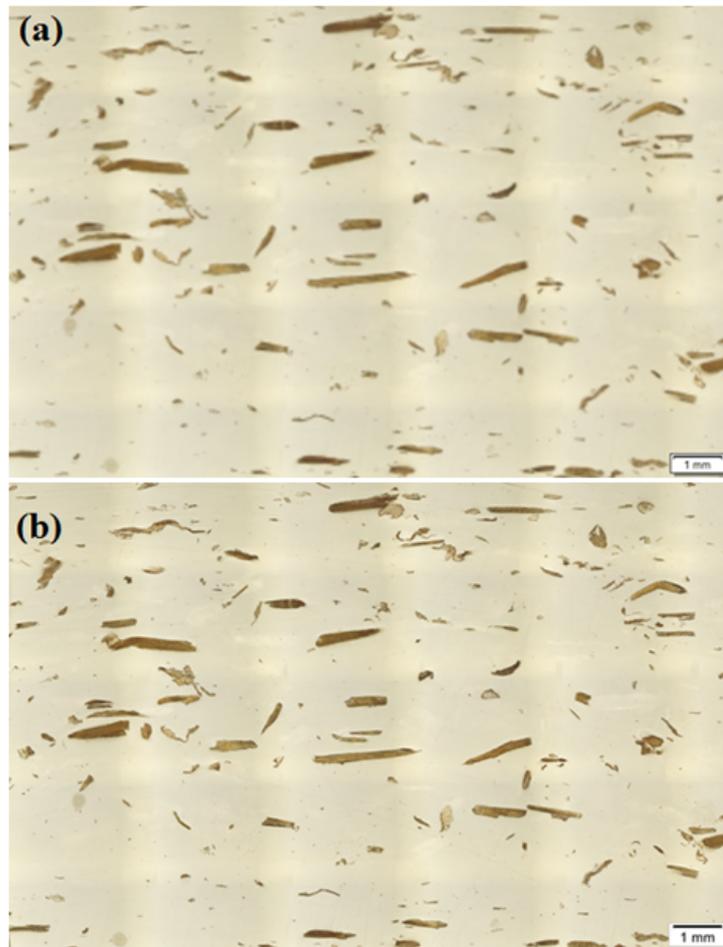


Figura 3.20: Ejemplo de adquisición de imágenes para indicar el efecto de la utilización de la herramienta EFI. (a) Sin EFI y (b) con EFI. **Fuente:** Autores

Se presentan imágenes en las figuras 3.21 hasta la figura 3.26 de las muestras procesadas, con los diferentes porcentajes de concentración de fibra de GAK. Se encuentran clasificadas de acuerdo a la zona de la probeta en que fue procesada y a las diferentes profundidades en las que se adquirieron las imágenes.

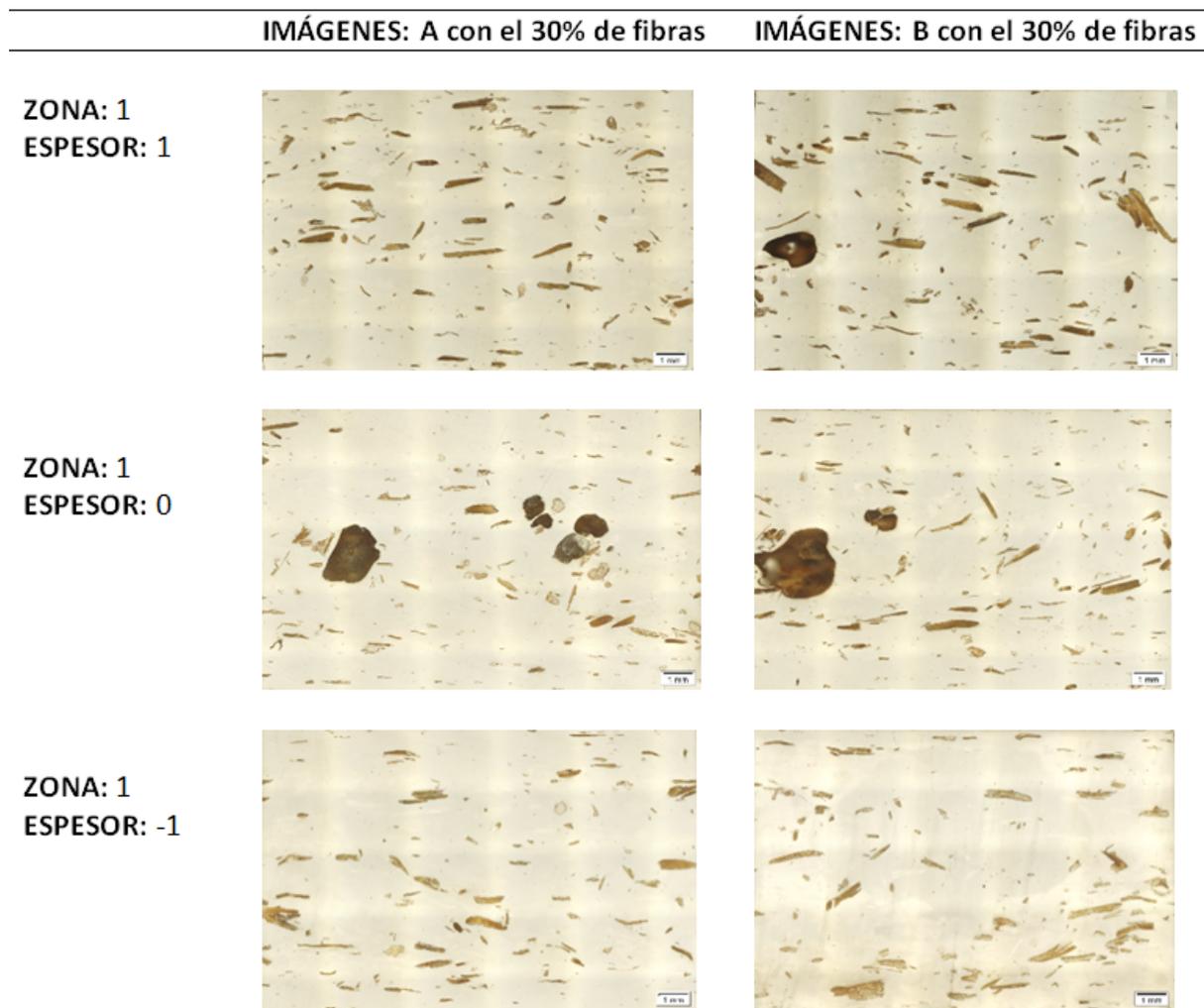


Figura 3.21: Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 30% de concentración fibras GAK, en la zona 1, en los tres espesores descritos anteriormente.
Fuente: Autores

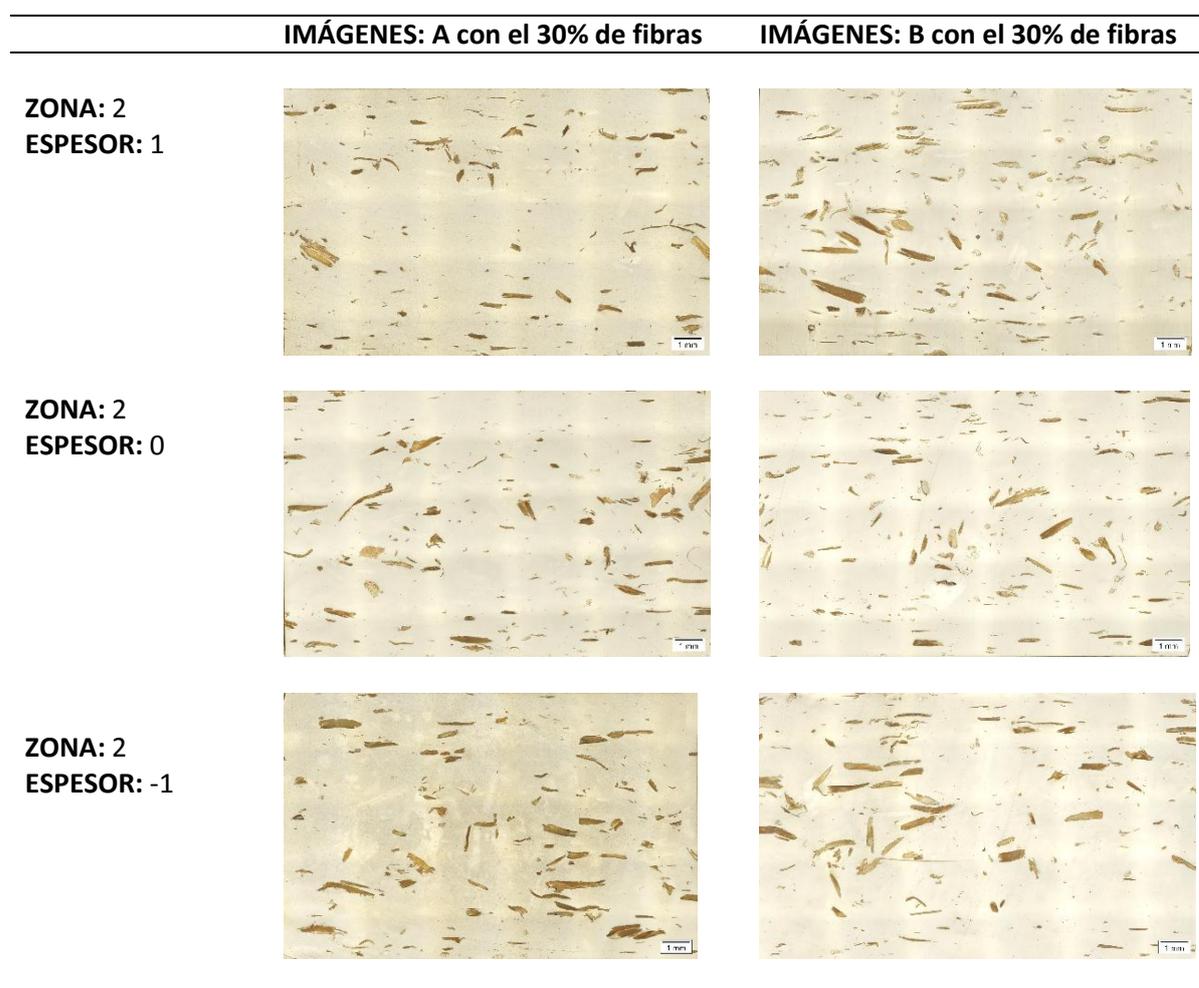


Figura 3.22: Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 30% de concentración fibras GAK, en la zona 2, en los tres espesores descritos anteriormente.
Fuente: Autores

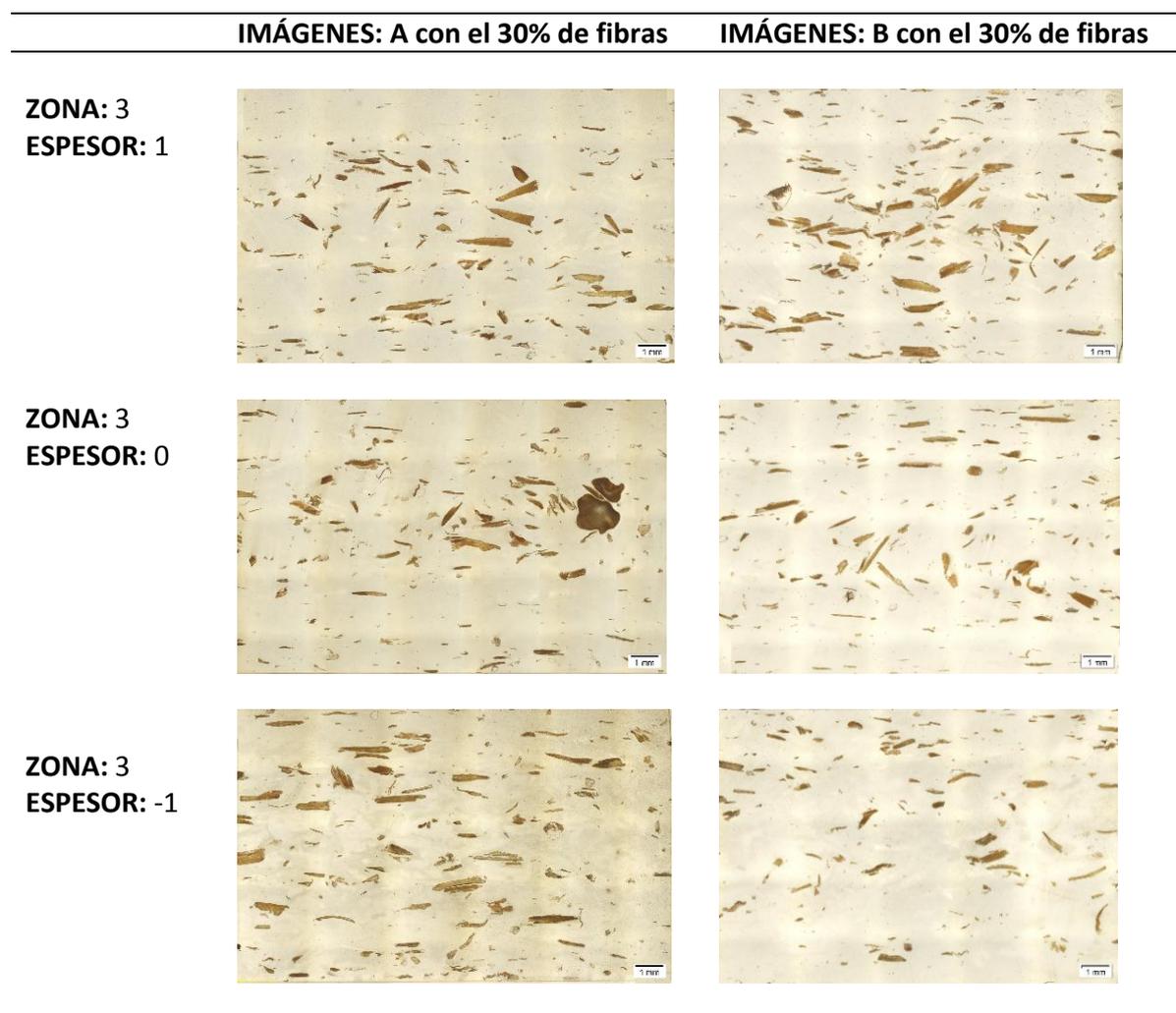


Figura 3.23: Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 30% de concentración fibras GAK, en la zona 3, en los tres espesores descritos anteriormente.
Fuente: Autores

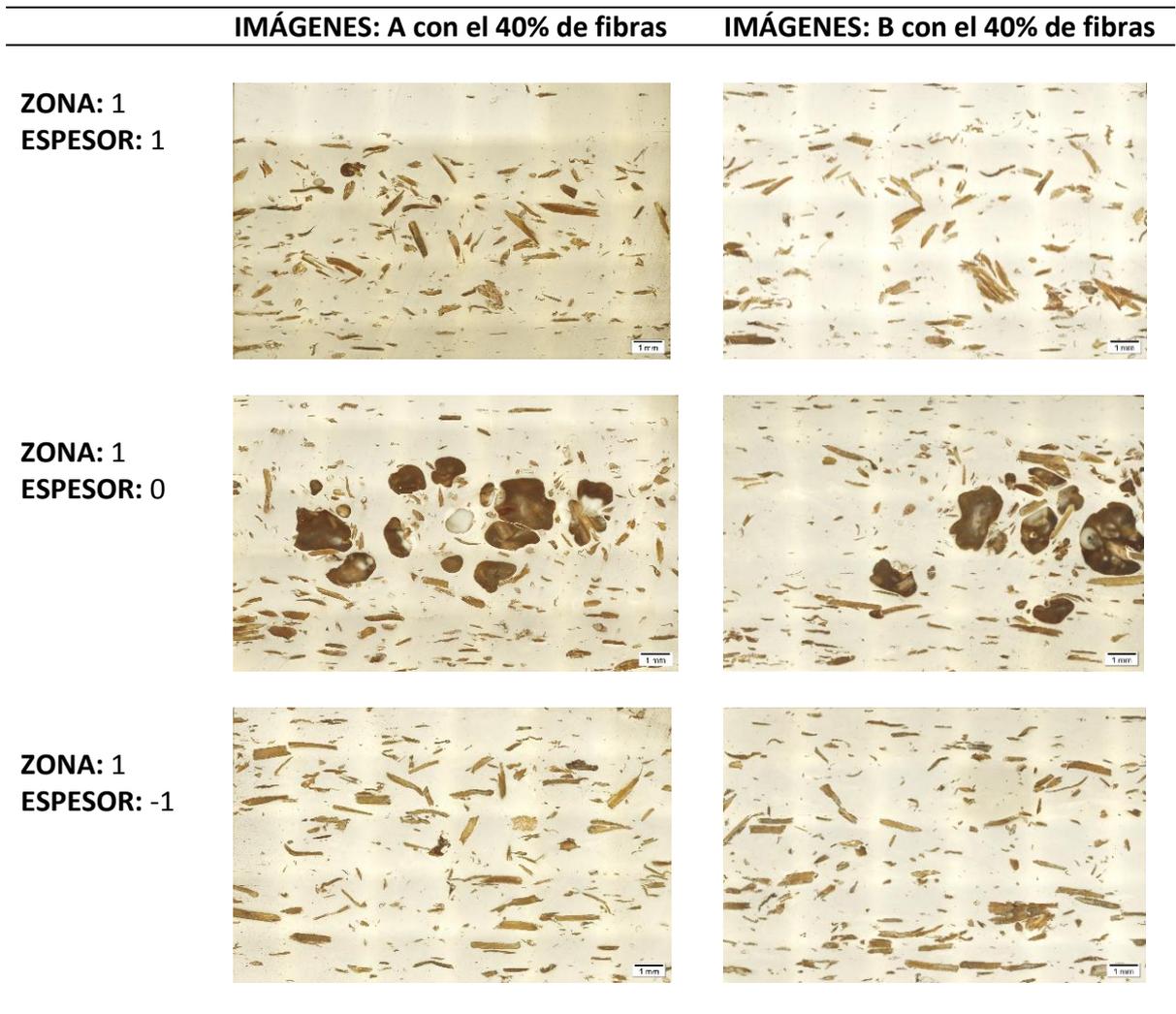


Figura 3.24: Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 40% de concentración fibras GAK, en la zona 1, en los tres espesores descritos anteriormente.
Fuente: Autores

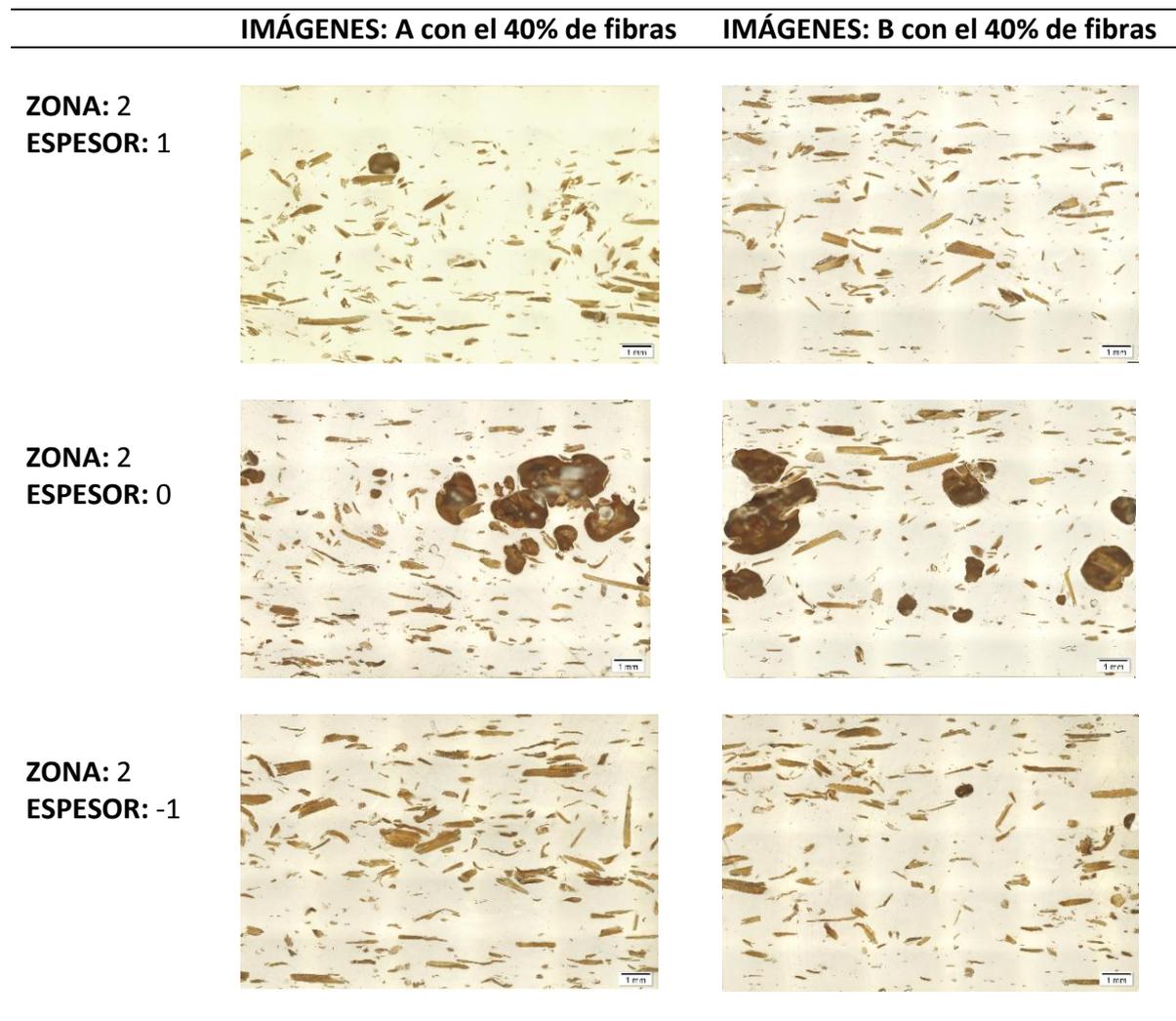


Figura 3.25: Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 40% de concentración fibras GAK, en la zona 2, en los tres espesores descritos anteriormente.
Fuente: Autores

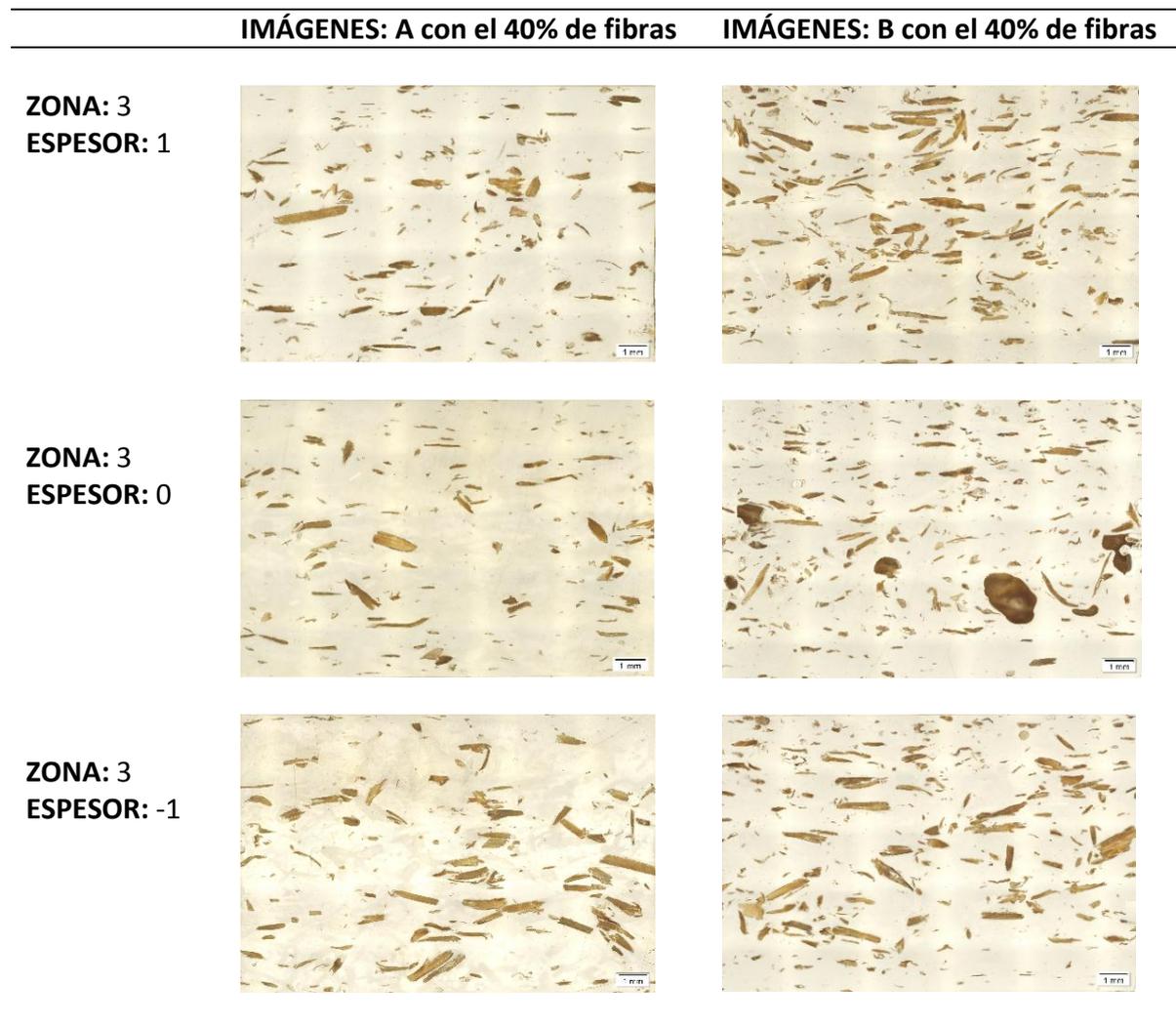


Figura 3.26: Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 40% de concentración fibras GAK, en la zona 3, en los tres espesores descritos anteriormente.
Fuente: Autores

En las figuras 3.27 hasta la figura 3.32 se presentan las imágenes procesadas en el software Stream Essentials® Versión 1.6. Clasificados con el mismo criterio que las figuras 3.21 hasta la figura 3.26.

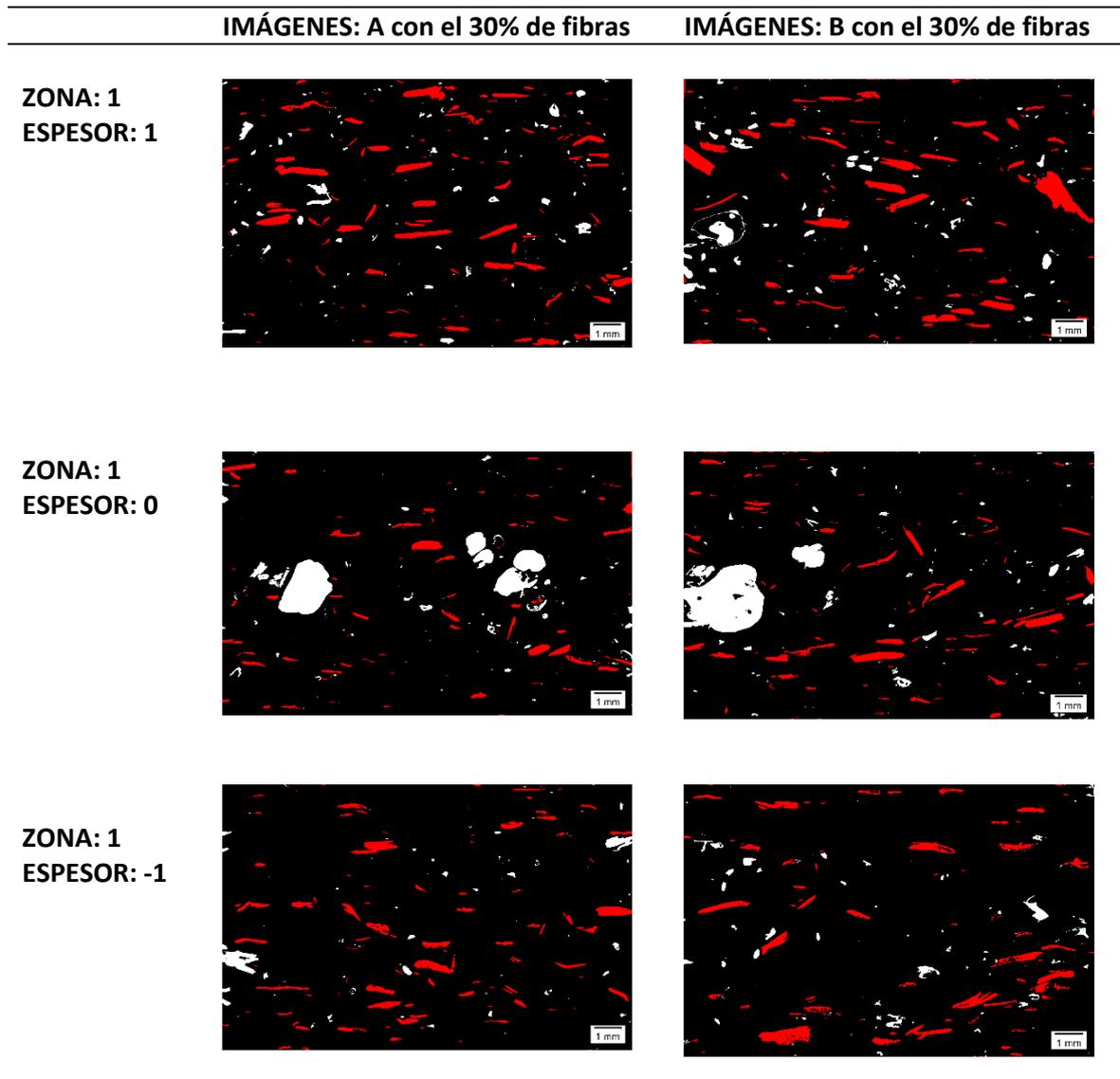


Figura 3.27: Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 30% de concentración fibras GAK, procesadas en el software Stream Essentials® Versión 1.6, en la zona 1, en los tres espesores descritos anteriormente. **Fuente:** Autores

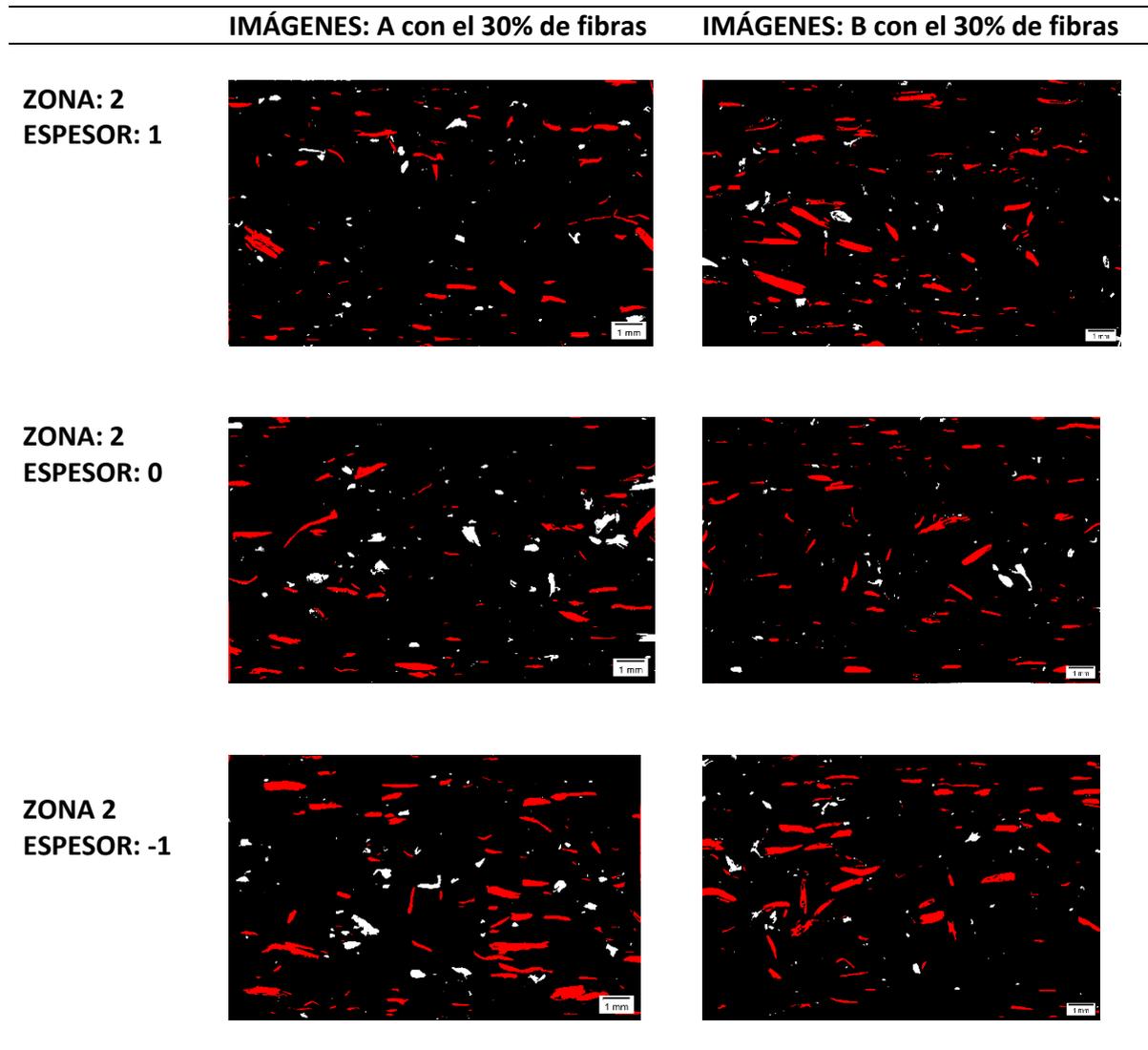


Figura 3.28: Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 30% de concentración fibras GAK, procesadas en el software Stream Essentials® Versión 1.6, en la zona 2, en los tres espesores descritos anteriormente. **Fuente:** Autores

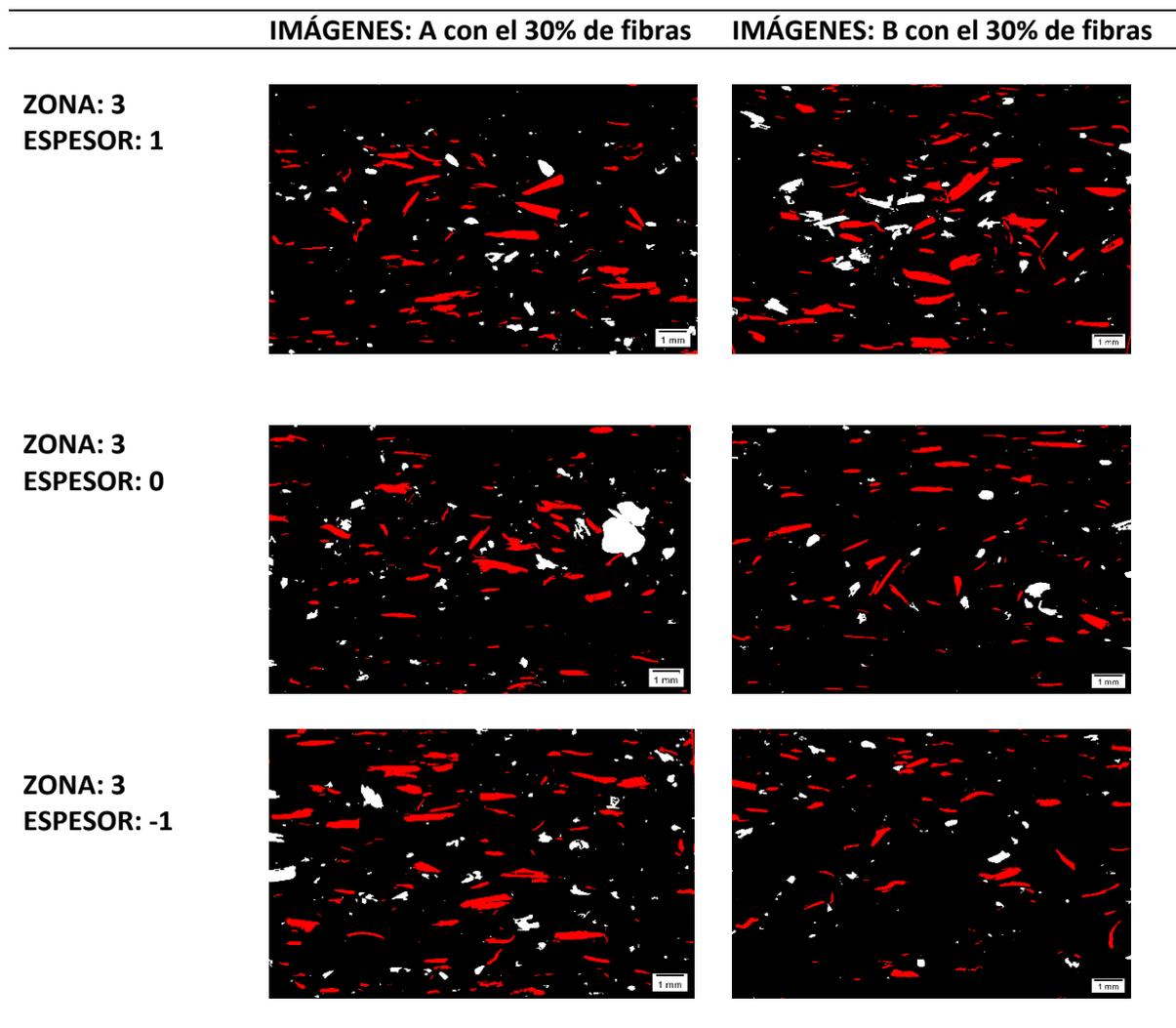


Figura 3.29: Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 30% de concentración fibras GAK, procesadas en el software Stream Essentials® Versión 1.6, en la zona 3, en los tres espesores descritos anteriormente. **Fuente:** Autores

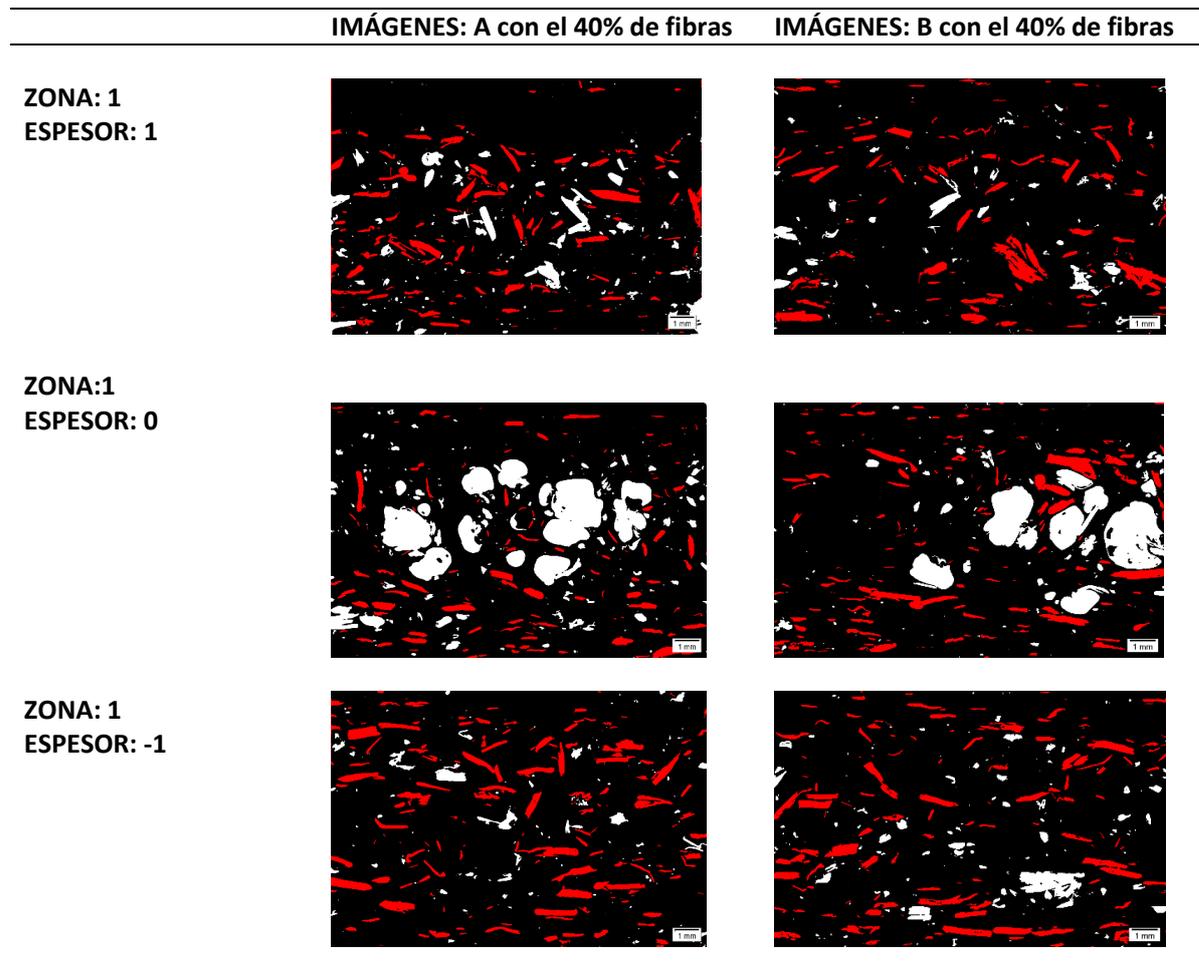


Figura 3.30: Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 40% de concentración fibras GAK, procesadas en el software Stream Essentials Versión® 1.6, en la zona 1, en los tres espesores descritos anteriormente. **Fuente:** Autores

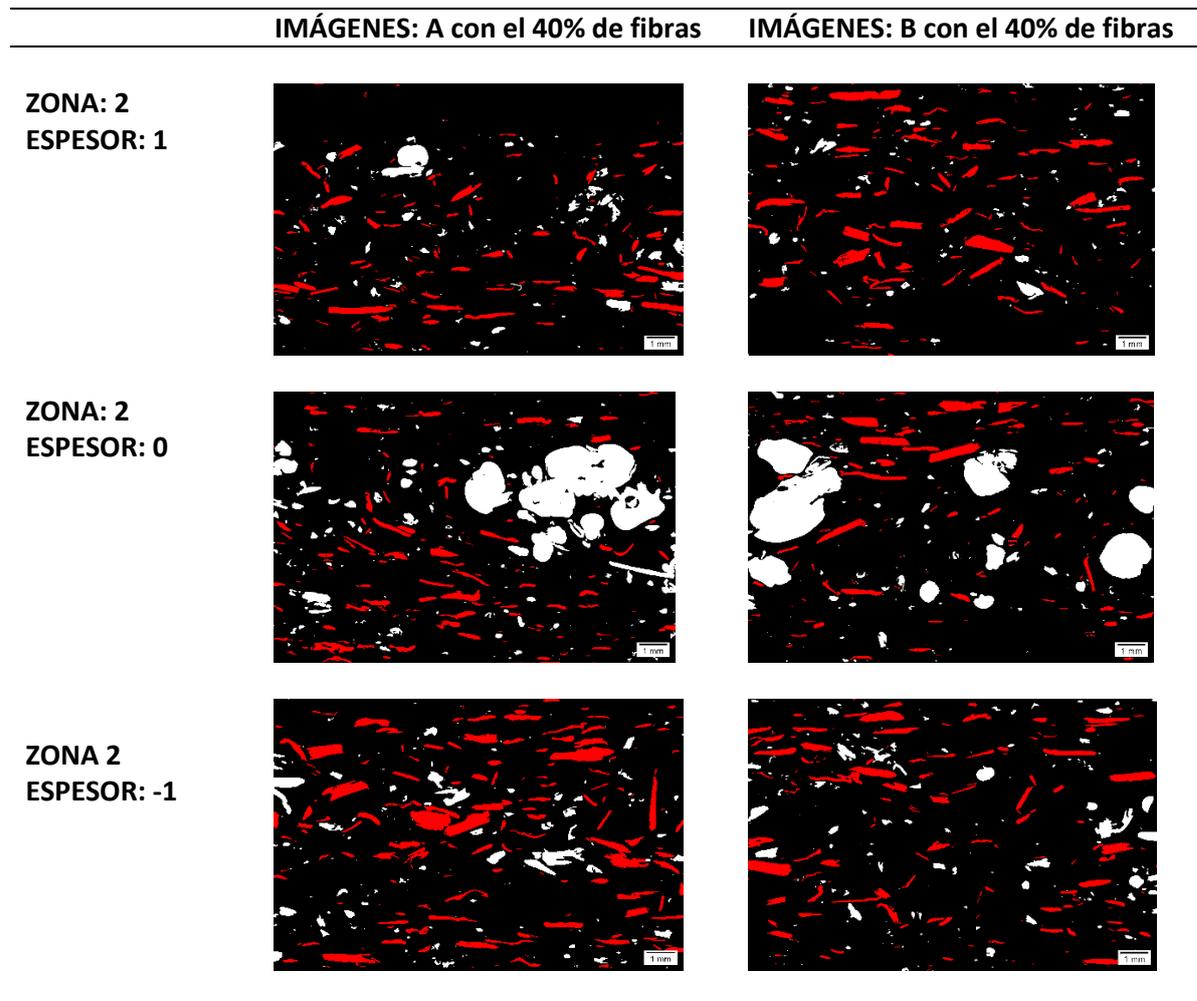


Figura 3.31: Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 40% de concentración fibras GAK, procesadas en el software Stream Essentials® Versión 1.6, en la zona 2, en los tres espesores descritos anteriormente. **Fuente:** Autores

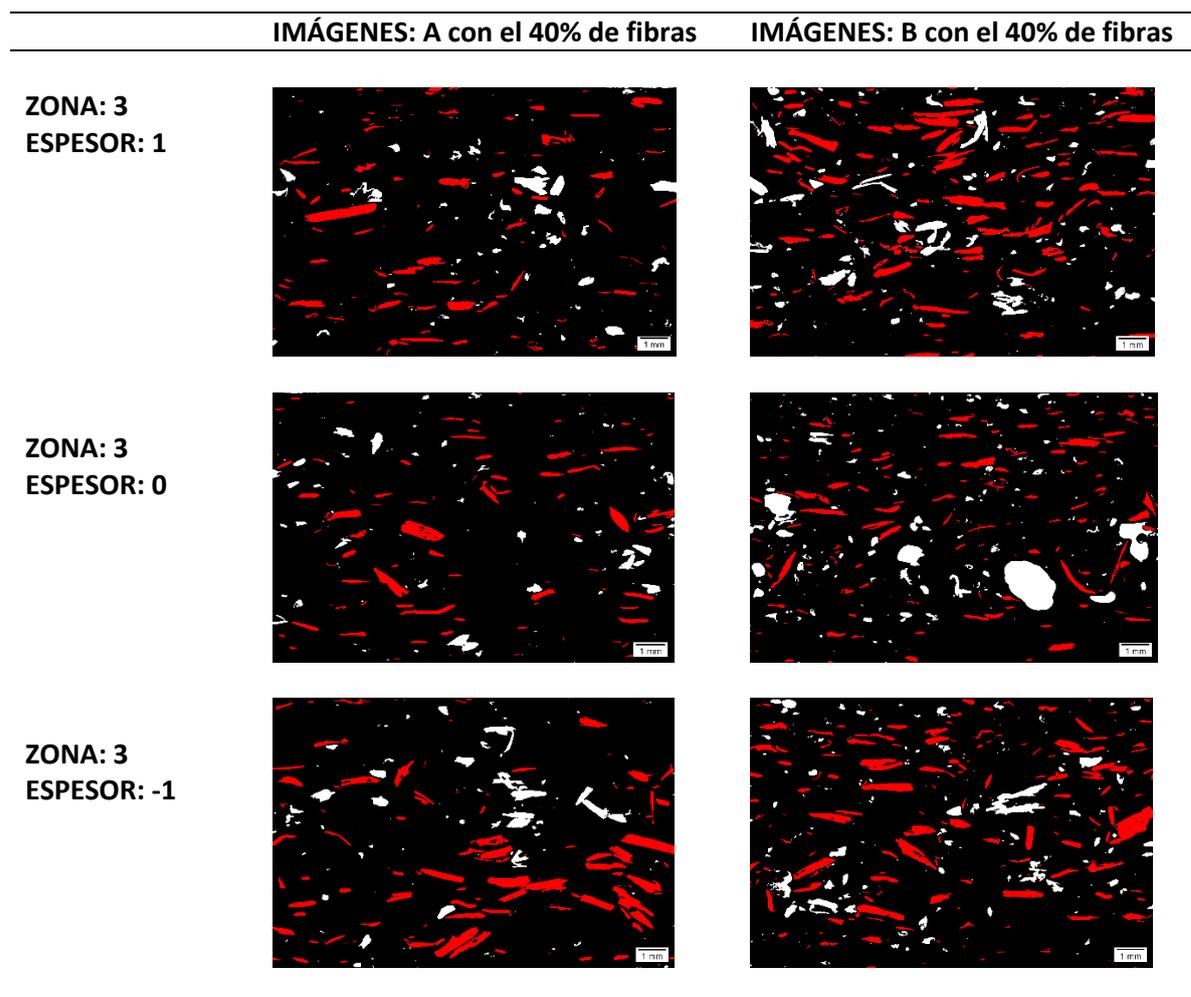


Figura 3.32: Imágenes de probetas A (columna de la izquierda) y B (columna de la derecha) con 40% de concentración fibras GAK, procesadas en el software Stream Essentials® Versión 1.6, en la zona 3, en los tres espesores descritos anteriormente. **Fuente:** Autores

3.3 Conclusiones:

La obtención de imágenes de alta calidad se logró usando correctamente los filtros del microscopio. Una buena imagen se logra con una probeta pulida correctamente facilitando los pasos para la obtención de la imagen. Comandos como Manual MIA y EFI son de gran utilidad permitiendo obtener una imagen amplia y con el mayor de los detalles posibles. Conociendo los parámetros de obtención establecidos en una imagen las siguientes se obtienen de manera ágil. El uso del software Stream es importante en el mejoramiento de detalles de la imagen. Un aspecto importante siempre en una imagen es la barra de escala, nos sirve para una medición proporcional. Con la obtención de una buena imagen se puede desarrollar un procesamiento de imágenes correcto que permiten resultados eficaces.

4 PROGRAMACIÓN PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE LAS IMÁGENES

4.1 Introducción

Se describe el proceso seguido para la de terminación de fibras naturales cortas de GAK. El proceso se realizó mediante el software Stream Essentials®. Un macro fue creado para automatizar el proceso de tratamiento de imagen, la figura 4.1 muestra el esquema del proceso.

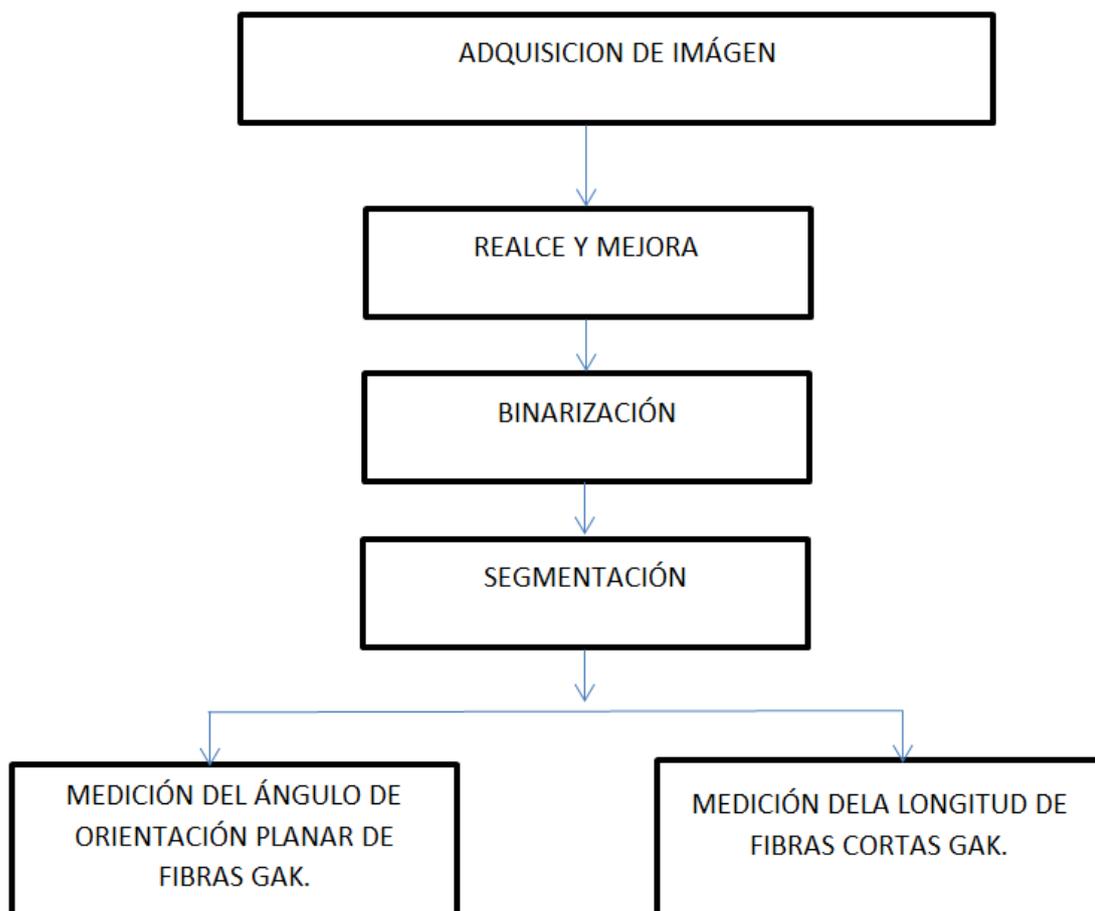


Figura 4.1: Esquema de procesamiento de imagen. **Fuente:** Autores.

4.2 Adquisición de Imagen

Un requisito previo para la obtención de imágenes con similares características, es el proceso de calibración de blancos, el mismo que usa un balance de blancos. Esto permite a los colores de la imagen que sean ajustados de tal manera que el área blanca de la imagen mostrada en el monitor se visualizará como color blanco. Este proceso se logra en microscopia de luz reflejada, se recomienda un papel – filtro neutral ND de laboratorio. Los pasos a seguir se muestran a continuación:

1. Acceder al comando View > Tool Windows > Camera Control

2. Cambiar al modo en vivo. Pulsando el botón .

3. Seleccionar el botón .

4. Mover el botón  en una área de color blanco, de inmediato la imagen se adaptara y tomara la imagen como color blanco

5. Finalmente se seleccionar  para terminar el ajuste.

Establecidos los parámetros de calidad de la imagen se procedió con su captura, la figura 4.2 muestra la imagen con; objetivo 5x, intensidad de brillo 10.5, tiempo de exposición 141.6ms.

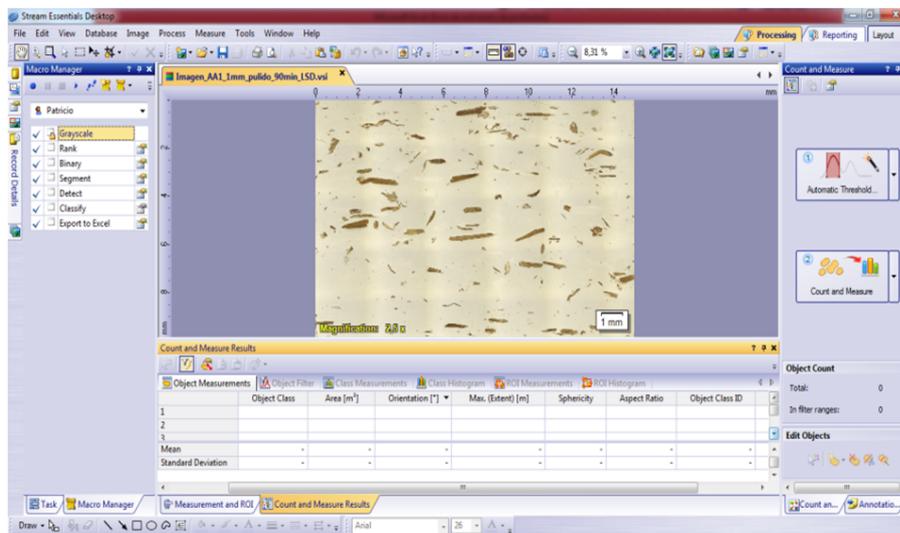


Figura 4.2: Adquisición de imagen. Fuente: Autores.

4.2.1 Realces y mejoras

Este proceso consintió en el desarrollo de técnicas para mejorar la calidad de las imágenes y facilitar su procesamiento.

Conversión a escala de grises:

Con el comando **Grayscale** se convirtió la imagen a color en una imagen con grises, es decir que un pixel obtiene un valor entre 0 y 256 tonos de gris, siendo esta una imagen de 8bits. El Software Stream Essential® realiza la conversión automáticamente, el proceso consiste en acceder a Image > Mode> Grayscale que se encuentra en la barra de menú, como se muestra en la figura 4.3

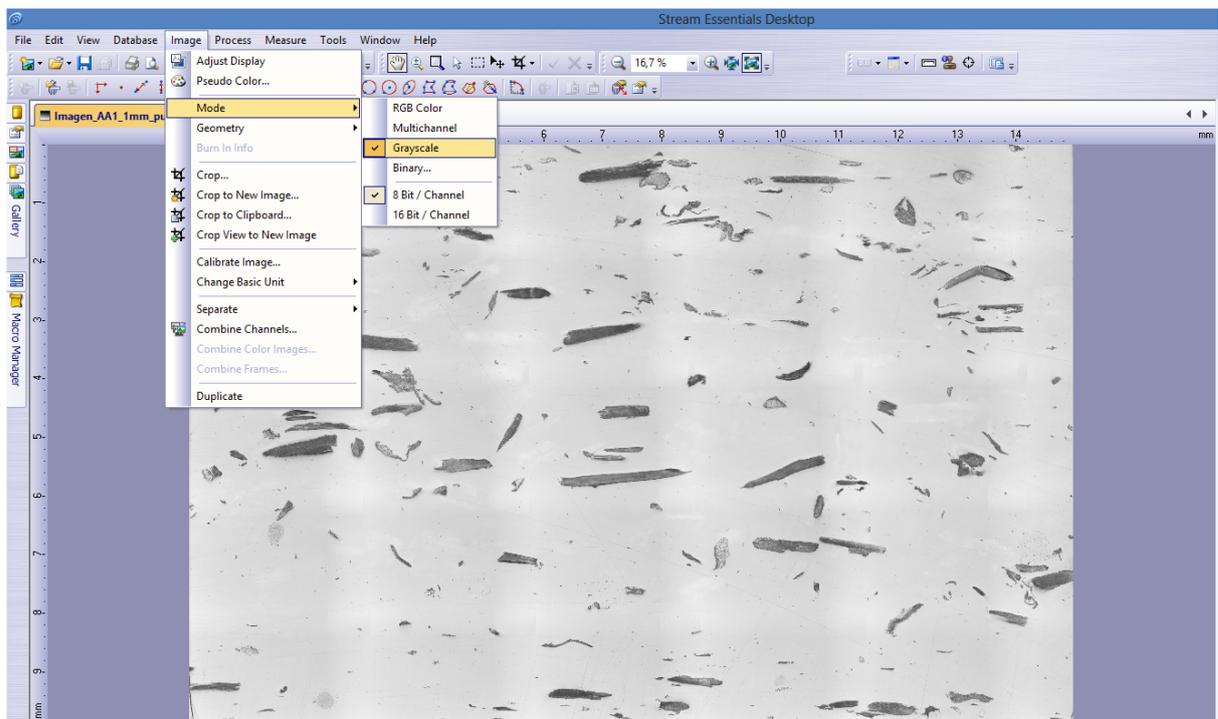


Figura 4.3: Realce y mejora de la imagen (Gryscale). **Fuente:** Autores.

Filtrado de imagen

Con el comando “Rank” se mejoró la calidad de la imagen en escala de grises. Permitió a la imagen eliminar pequeñas marcas que no son de interés dando un suavizado a las fibras. Este proceso consistió en acceder a Process> Smoothing filters> Rank, como se muestra en la figura 4.4.

Los parámetros establecidos en el comando Rank fueron los siguientes:

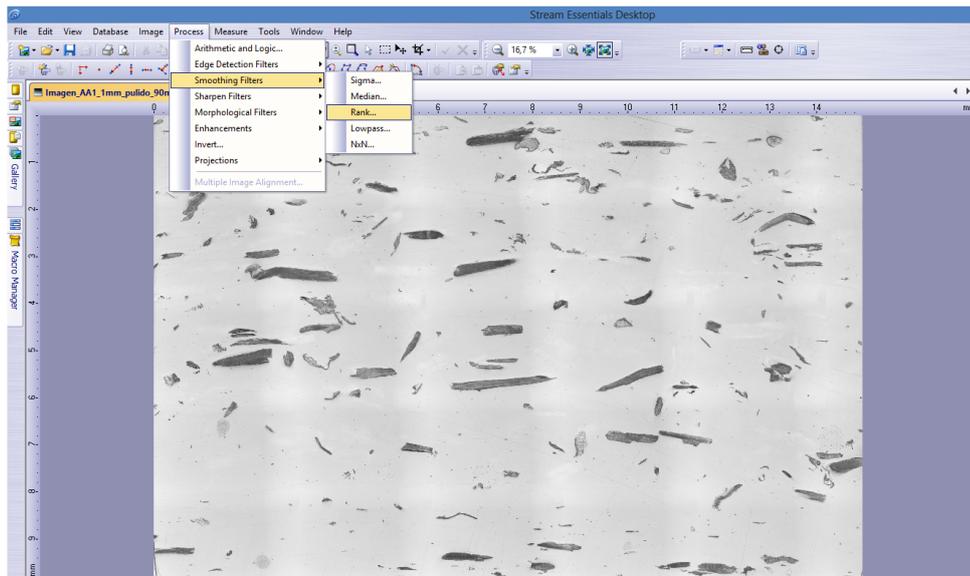


Figura 4.4: Realce y mejora de la imagen (Rank). **Fuente:** Autores.

Size: 11

Es el valor del diámetro de la zona adyacente en unidades de píxeles en el campo encontrado. En nuestro caso este tamaño nos permitió que los bordes de las fibras sean regulares.

Order: 50

Eliminó todas las partículas y marcas de la imagen. Este valor permitió observar solo fibras de interés. A mayor valor se eliminarían fibras que son de interés, a menor orden quedarían partículas que no son de importancia. Estos valores fueron tomados realizando pruebas, dando como resultado una imagen que permitió observar solo fibras como se muestra en la figura 4.5.

4.2.2 Binarización

Este proceso consiste en dar al píxel de la imagen un valor 0 (negro) 1 (blanco). Este proceso permitió diferenciar entre las fibras y la matriz. Se configuró como valor 1 (blanco) a las fibras, y valor 0 (negro) al polipropileno. Es muy importante disponer de gran contraste entre fibras y matriz. Para realizar este proceso se debe acceder a Image > Mode > Binary, como se muestra en la figura 4.6.

En el comando Binary se proporcionó los siguientes parámetros: Vista previa de fases > Fases de umbrales para canal gris > (mín 62) (máx 189) como se muestra en la figura 4.7.

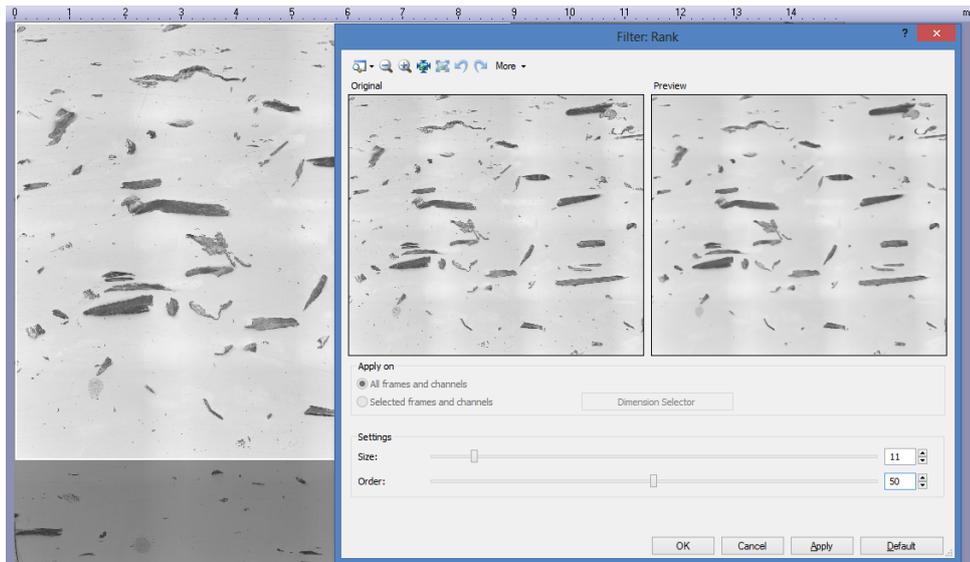


Figura 4.5: Realce y mejora (Size, Order). **Fuente:** Autores.

La imagen binarizada se muestra en la figura 4.8.

4.2.3 Post-procesamiento

Este proceso fue el encargado de tomar solo las fibras de interés, para lo cual se realizó un filtrado previo. Los resultados de medición tanto en orientación y longitud se lograron accediendo View > Tool Windows> Count and Measure Results, se desplegará una ventana como se muestra en la figura 4.9.

El rango de filtrado se realizó seleccionando el objeto de medición, relación de aspecto de los filtros según las mediciones experimentales para fibras de $\varnothing 0,2$ mm y longitud entre 1 y 4 mm. Los valores configurados fueron (min 2,5), (máx. 80) como se muestra en la figura 4.10.

Extracción de características: En el comando conteo y medición de resultados, se utilizó Automatic Threshold (umbrales automáticos) el mismo que selecciona solo las fibras que cumplen con los valores establecidos por la relación de aspecto, como se muestra en la figura 4.11.

El conteo se hace de todas las fibras. Los resultados son solo de las fibras que cumplen con los valores seteados. Se presentan los resultados en la ventana medición de objetos como se muestra en la figura 4.12.

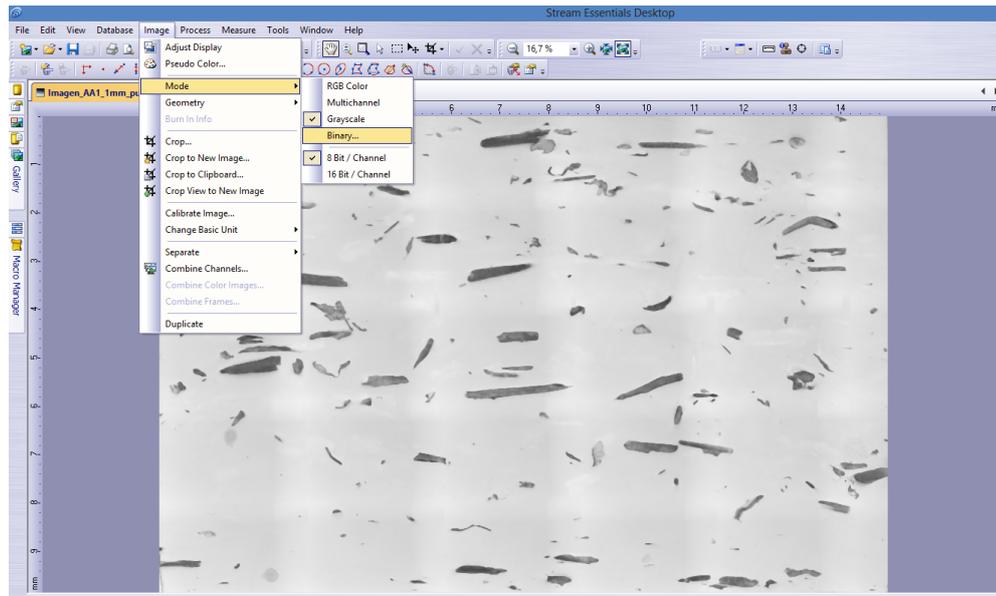


Figura 4.6: Proceso de binarización. **Fuente:** Autores.

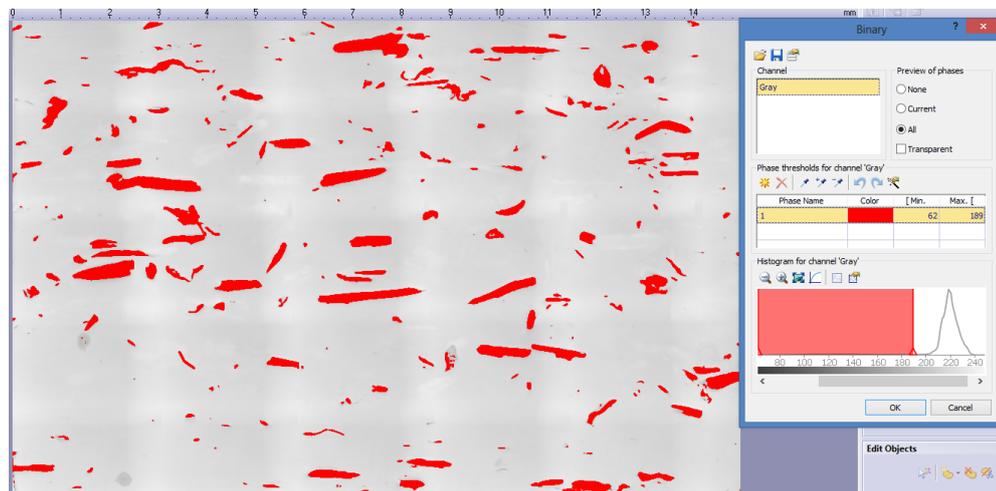


Figura 4.7: Parametros para la binarización. **Fuente:** Autores.

4.3 Automatización del proceso

Se configuró un macro que ejecute de forma automática todas las operaciones con los valores seteados para garantizar repetividad de los resultados y ahorro de tiempo en el procesamiento. La creación del macro contiene los siguientes pasos:

1. Abrir la imagen a ser procesada File > Open, Imagen a ser procesada. Figura 4.13
2. Abrir el comando Macro manager mediante la barra de menú > View > Tool Windows. Como se muestra en la figura 4.14.



Figura 4.8: Imagen a) Original. b) Binarizada. **Fuente:** Autores.

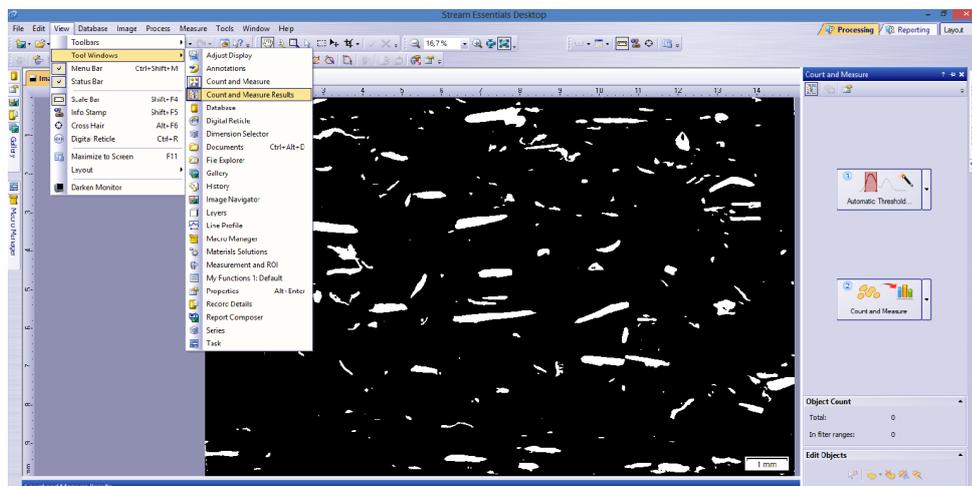


Figura 4.9: Proceso de medición y conteo de resultados. **Fuente:** Autores.

Aparece una ventana con el nombre Macro Manager. Pulsar Create Macro > New Macro > Name: < Nombre del archivo >. Figura 4.15. A continuación cualquier acción que efectuemos se guarda en el macro.

3. El proceso de tratamiento, Grayscale (Escala de grises). Como mencionamos anteriormente su utilidad en Realces y Mejoras. En la ventana de Macro Manager se despliega una barra en la parte inferior con el nombre Grayscale figura 4.16.
4. El proceso consiste en realizar un suavizado, este paso se logra mediante el filtro Rank, Process > Smoothing filters > Rank. El macro guarda un nuevo proceso como se muestra en la figura 4.17.
5. El proceso de binarización el cual es guardado en la barra de Macro Manager, Image > Mode > Binary, Figura 4.18
6. Es el de segmentación, mediante la ventana Count and Threshold > Automatic

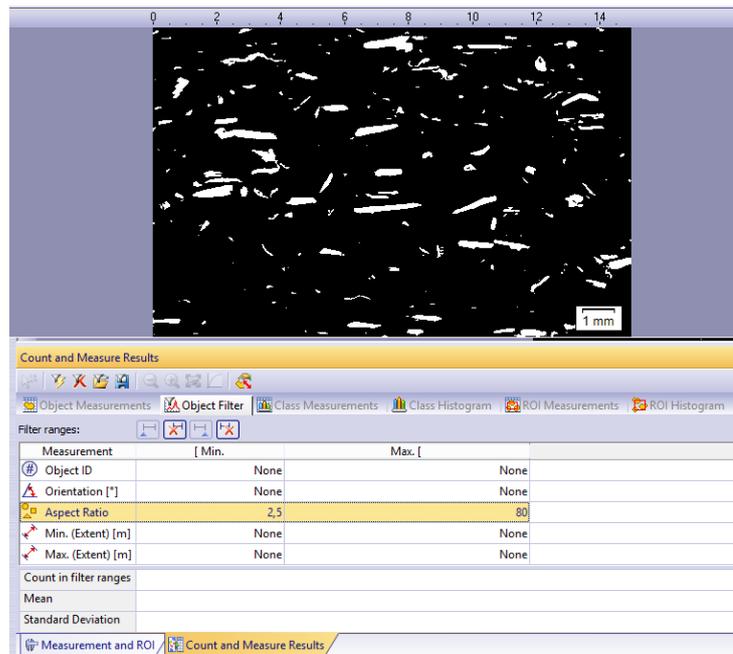


Figura 4.10: Rango de filtrado. **Fuente:** Autores.

threshold la imagen detecta y clasifica las zonas de interés de nuestra imagen, como se mencionó anteriormente y con los parámetros establecidos, obteniendo así en la ventana de macro manager las barras de segmentación, detección y clasificación como se muestra en la figura 4.19. Los resultados de medición tanto en orientación y longitud de fibras aparecen en la ventana Objetos de medición, en la parte derecha inferior aparece el número total de fibras así como el número de fibras filtradas.

7. Se trata de exportación de datos, el macro permite la exportación de datos a formato xls, en la ventana de conteo y medición de resultados aparece un comando export to Excel, finalmente los resultados aparecen en una hoja de cálculo de Excel. Figura 4.20.

La ventana de herramientas creación macros permite grabar, editar, administrar y ejecutar macros. Existen varios botones en la parte superior de la ventana que permiten realizar diferentes acciones. Figura 4.21

Iniciar y terminar una grabación de macros



 Llamado recording macro sirve para continuar con la grabación del macro, si este fue terminado a pausado.

 Denominado Interrupt Macro Recording ofrece la opción de interrumpir la grabación del macro.

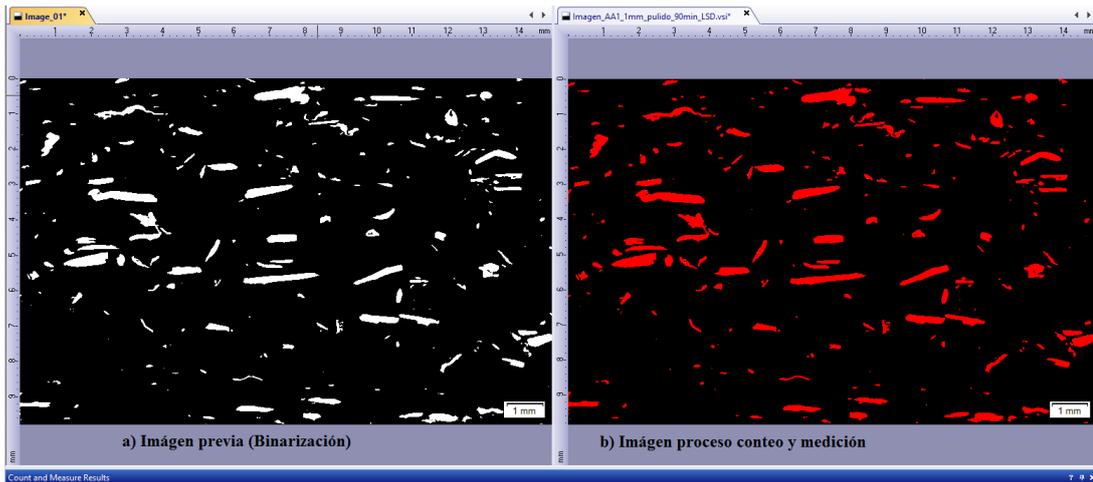


Figura 4.11: Imágen. a) Imágen previa, b) Imágen proceso conteo y medición. **Fuente:** Autores.

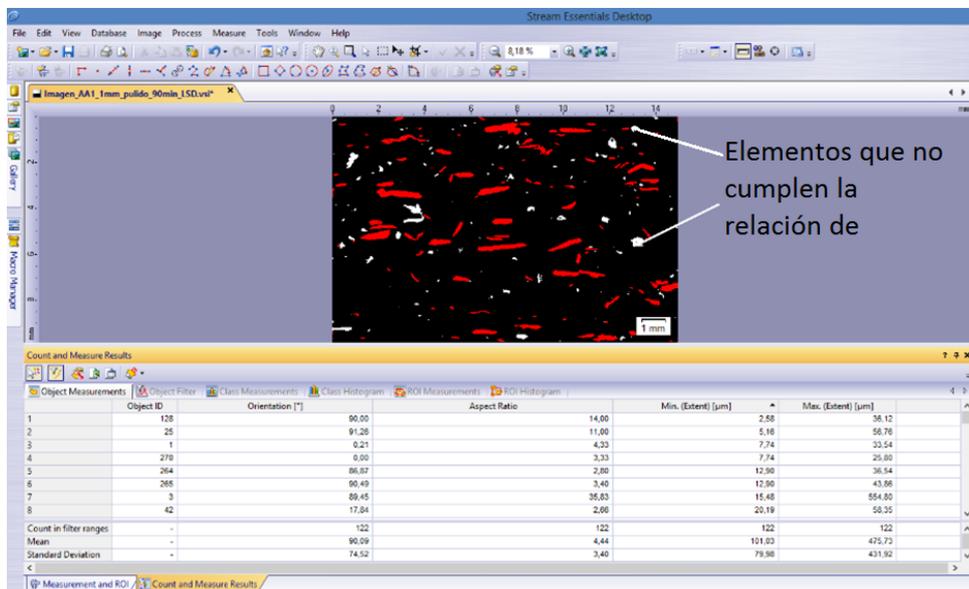


Figura 4.12: Conteo y medición de Resultados. **Fuente:** Autores.



Designado Stop Macro Playing / Recording permite cancelar o finalizar la grabacion de macros.

Ejecucion de un macro



Sirve para la ejecución del macro en su totalidad.



Ofrece la ejecución del macro paso a paso. Nos ayuda para probar el macro.

Gestion de macros



Crea un nuevo macro.

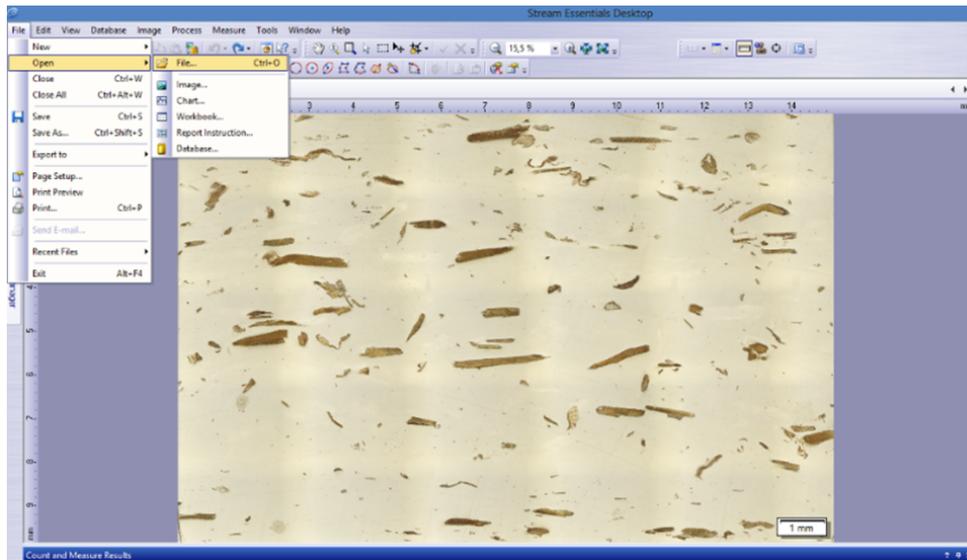


Figura 4.13: Imagen a ser procesada. **Fuente:** Autores.



Es un comando que nos permite administrar los macros.



Permite la eliminacion de el macro actual.

Activar el modo por lotes para macros.



Permite la aplicaci3n de un macro para varias im3genes, sirve para el an3lisis de varias im3genes sin necesidad de cargarlas individualmente. En im3genes de gran tama1o y con muchas operaciones de tratamiento digital, se pueden ejecutar varias sin necesidad de estar presentes para ejecutar el macro.

Lista de funciones del macro

1	2	3	4
<input checked="" type="checkbox"/>			
<input checked="" type="checkbox"/>			
<input checked="" type="checkbox"/>			

1. Contiene informaci3n sobre el estado de la funci3n. Pudiendo ser los siguiente.



La funci3n est3 activa.



La funci3n est3 inactiva.



Indica que la funci3n es antigua y no se ejecutara.



El software no reconoce esta funci3n, y por lo tanto no puede llevarse a cabo.

2. Modo de ejecuci3n, contiene informaci3n sobre la funci3n.

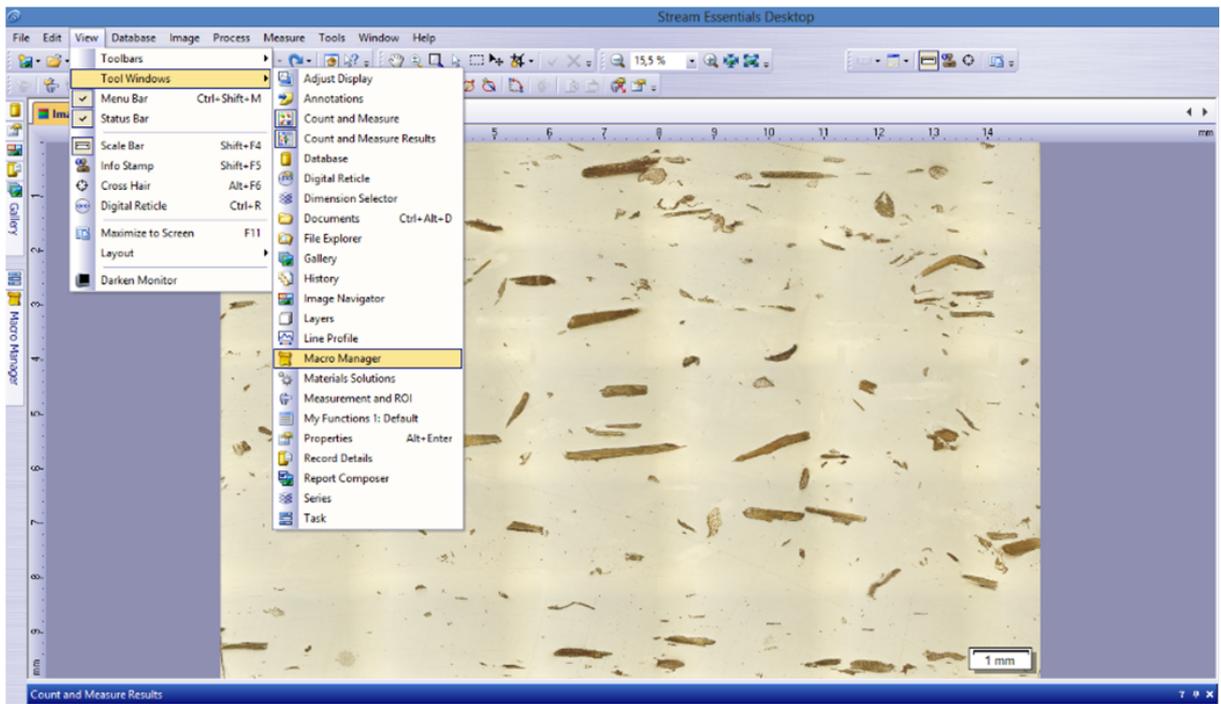


Figura 4.14: Imagen a ser procesada. **Fuente:** Autores.

-  Usado para abrir un cuadro de dialogo para registrar una función.
-  Aparece cuando el macro esta en ejecución, en el cual no se puede realizar cambios tambien llamado modo silencioso.
-  Llamado modo iterativo al momento de ejecutar el macro este permite modificar parámetros.
-  Modo de ejecución forzado a silencioso no necesita parámetros es grabado automáticamente por el software.

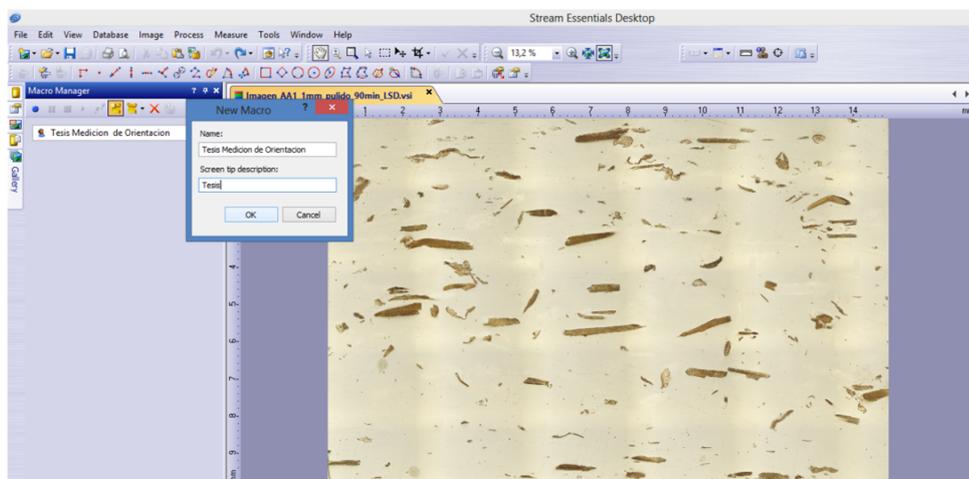


Figura 4.15: Creación de un macro. **Fuente:** Autores.

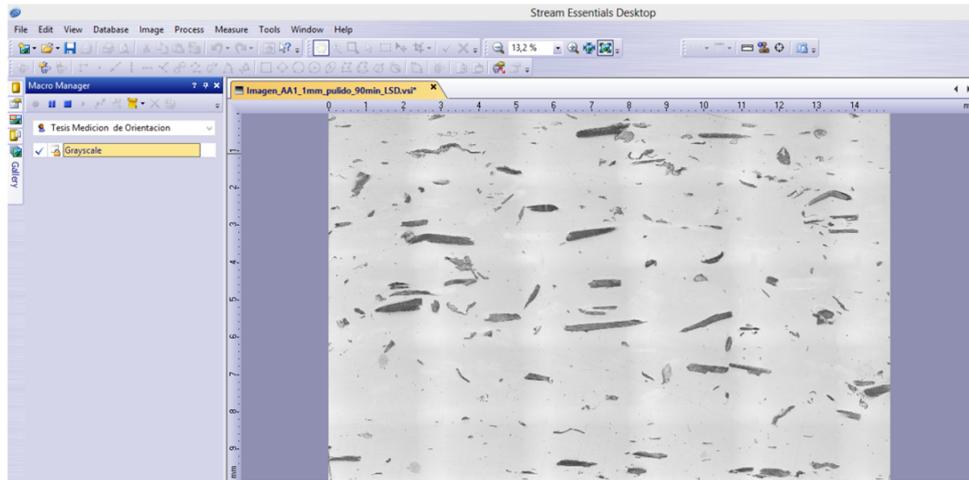


Figura 4.16: Creación de un macro (Grayscale). **Fuente:** Autores.

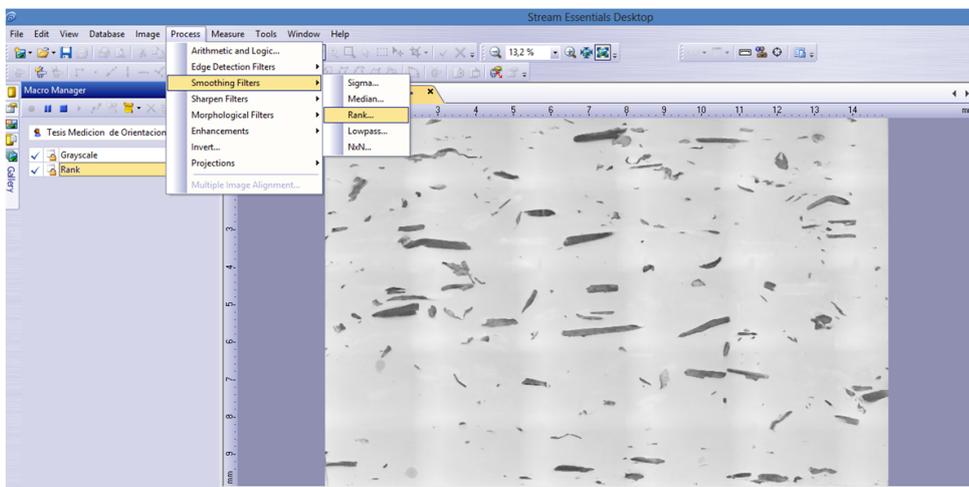


Figura 4.17: Creación de un macro (Rank). **Fuente:** Autores.

3. Muestra el listado de funciones asignadas en el macro ordenadas, al momento de la creación del macro se agregara automáticamente, desde la parte superior a la parte inferior, se puede cambiar el orden una vez finalizado el macro, o ser eliminados.

4. Parámetros de función:



Muestra los parámetros de la función que están vinculados.



Indica que los parámetros son fijos del macro.



Permite cambiar la configuración utilizada por la función cuando se ejecuta el macro.



No se puede establecer un parámetro en la función siendo este vacío.

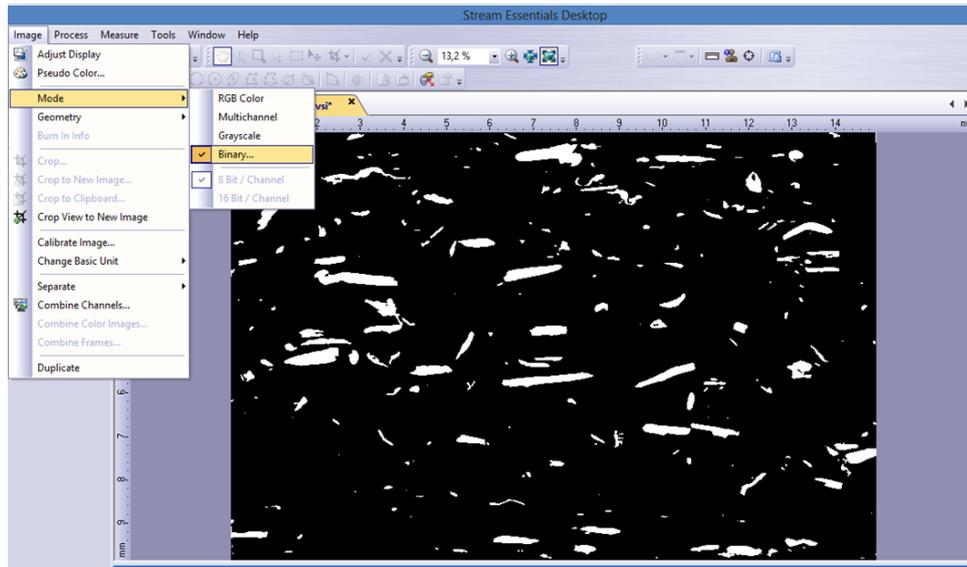


Figura 4.18: Creación de un macro (Binary). Fuente: Autores.

4.4 Postprocesamiento de imágenes

Con los valores obtenidos en la medición de orientación y longitud de fibras GAK se procedió a crear un programa en Matlab® Versión 7.14 R2012a que permite la obtención del valor tensor de orientación planar a_{11} y el ángulo preferente de orientación α . A partir de las siguientes ecuaciones.

$$a_{11} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n \quad (4.1a)$$

$$a_{11} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n \quad (4.1b)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{2a_{12}}{a_{11} - a_{22}} \quad (4.2)$$

$$a_{11} + a_{22} = 1 \quad (4.3a)$$

$$a_{12} = a_{21} \quad (4.3b)$$

La programación se efectuó en un script de Matlab® Versión 7.14 R2012a en el

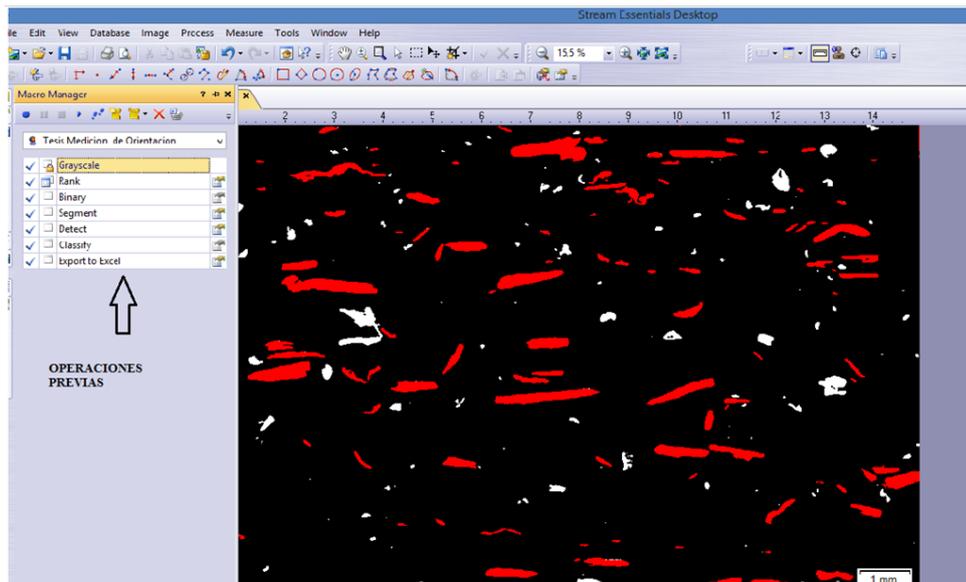


Figura 4.19: Creación de un macro (Segmentación). Fuente: Autores.

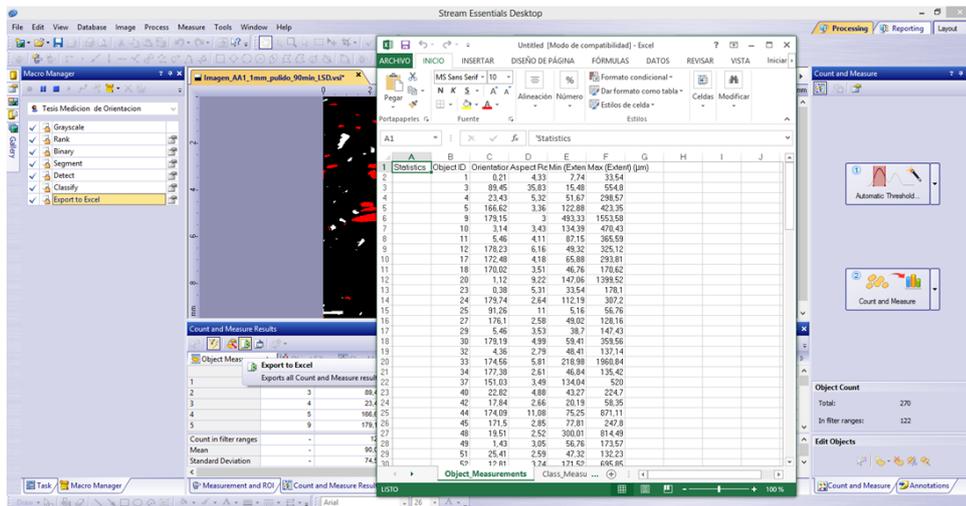


Figura 4.20: Creación de un macro Exportación de resultados. Fuente: Autores.

que nos permitió la creación de comandos, siendo estos ejecutados cuando se introducen los valores de orientación adquiridos. La generación de este archivo fue creado con la extensión .m para poder reconocerlo nuevamente con matlab.

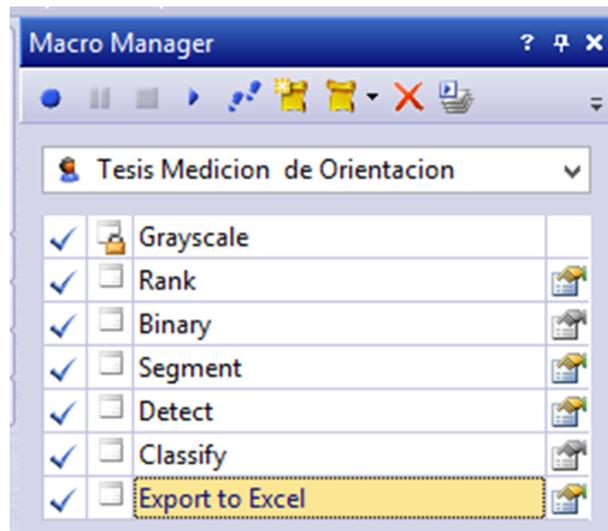


Figura 4.21: Ventana Macro Manager. **Fuente:** Autores.

A continuación se muestra el programa, describiendo cada una de los comandos utilizados.

```

1 %% TENSOR DE ORIENTACION PLANAR DE FIBRAS CON a11 y a12 (PROGRAMADO)
2 clear all % LIMPIA TODAS LAS VARIABLES.
3 clc % BORRA LAS VARIABLES DE MATLAB.
4 theta=[0 0 0];
5
6 %VECTOR DE ANGULOS REALES A1-2
7 phi=xlsread('A1_1mm40%','Object_Measurements','K2:K150') % EXTRAE ...
    LA INFORMACION DE EXCEL MEDIANTE LOS PARAMETROS MOSTRADOS.
8
9 syms n; % DEFINE UNA EXPRESION SIMBOLICA. SIENDO n EL NOMERO TOTAL ...
    DE DATOS ADQUIRIDO
10 n=length(phi)
11
12 sumi=0; % CONDICION INICIAL PARA EL CALCULO.
13 sumj=0; % CONDICION INICIAL PARA EL CALCULO.
14 for i=1:n; %CREACION DE UN BUCLE PARA REALIZAR LAS ...
    OPERACIONES
15     pi=cosd(phi(i))^2; % COMO SON LAS ECUACIONES PARA ...
        DETERMINAR A11 CON SUMI.
16     sumli=(pi);
17     sumi=sumi+sumli;
18 end
19 a11=(1/n)*(sumi)
20 a22=1-a11

```

```

21 for j=1:n; % CREACION DE UN BUCLE PARA REALIZAR LA OPERACION DE CALCULO
22     pj=cosd(phi(j))*sind(phi(j));% DE A12 DEBE TERMINAR CON END ...
        PARA FINALIZAR LA OPERACION.
23     sum1j=(pj);
24     sumj=sumj+sum1j;
25 end
26 a12=(1/n)*(sumj)
27 a21=a12
28 pref=(atand((2*a12)/(a11-a22)))/2 % CALCULA EL ANGULO PREFERENTE DE ...
        ORIENTACION DE LAS FIBRAS.
29 A=[a11 a12 0;a21 a22 0; 0 0 0] % CREA LA MATRIZ.
30 [V,E] = eig(A) % OBTIENE LOS VALORES Y VECTORES DE LA MATRIZ
31 E = eig(A) % OBTIENE LOS VALORES DE LA MATRIZ
32 VizOrient(A); % LLAMA AL PROGRAMA VIZORIENT PARA GRAFICAR EL ...
        ESTADO DE ORIENTACION.

```

El programa VizOrientation se muestra a continuación [30].

```

1 function VizOrient(A)
2
3     N = 20;
4     [U D V] = svd(A);
5
6     %-----
7     % generate the ellipsoid at (0,0,0)
8     %-----
9     a = D(1,1);
10    b = D(2,2);
11    c = D(3,3);
12
13    [X,Y,Z] = ellipsoid(0,0,0,a,b,c,N);
14
15    %-----
16    % rotate and the ellipsoid
17    %-----
18
19    XX = zeros(N+1,N+1);
20    YY = zeros(N+1,N+1);
21    ZZ = zeros(N+1,N+1);
22
23    for k = 1:length(X),
24        for j = 1:length(X),

```

```

25     point = [X(k,j) Y(k,j) Z(k,j)]';
26     P = V * point;
27     XX(k,j) = P(1);
28     YY(k,j) = P(2);
29     ZZ(k,j) = P(3);
30     end
31 end

```

La ventana de comandos muestra los resultados de la programación siendo estos, $n >$ número total de datos procesados. Como se muestra en la figura 4.22.

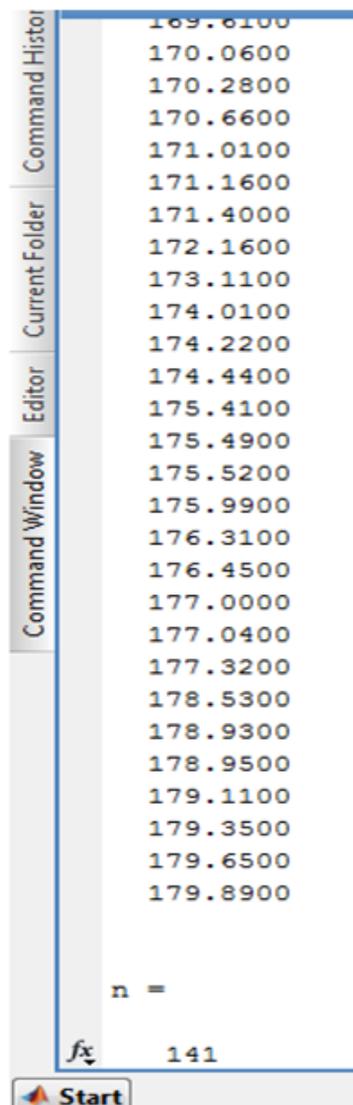


Figura 4.22: Ventana de Comandos (número de datos). **Fuente:** Autores.

De la misma manera se mostraran los valores de la matriz, como el ángulo preferente de las fibras, figura 4.23.

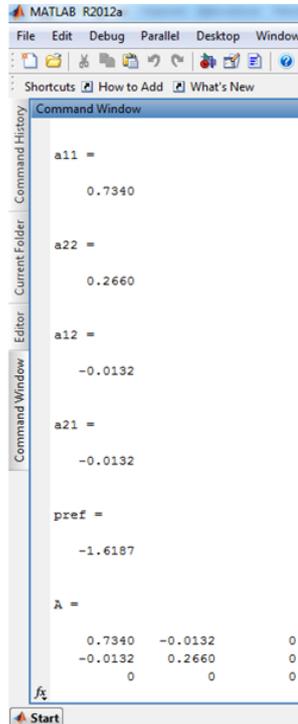


Figura 4.23: Ventana de Comandos (valores de la matriz). **Fuente:** Autores.

La elipse de orientación se logró gracias a VizOrientation.m dando graficas como la que se muestra en la figura 4.24.

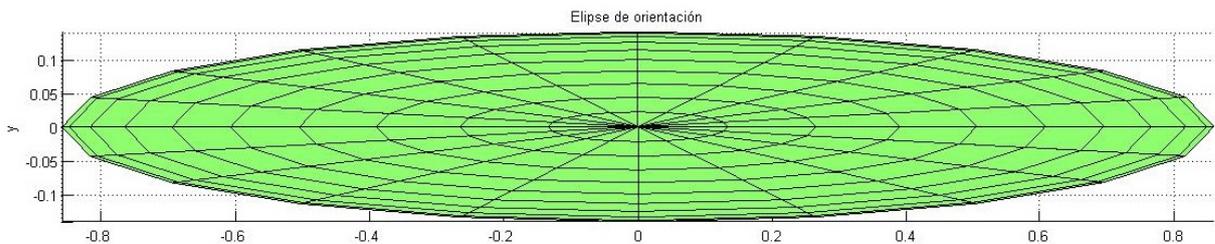


Figura 4.24: Grafica de elipse obtenida. **Fuente:** Autores.

4.5 Conclusiones

Con el manejo correcto del software Stream Essential®), se facilitó el procesamiento de imágenes. Se tuvo que realizar varias pruebas con los comandos que permitieron un mejor resultado, haciendo énfasis en lograr el mayor resalte de la fibra, en consecuencia se obtuvieron los mejores resultados con el filtro Rank. Una herramienta fundamental fue macro manager quien facilito el proceso, permitió el ahorro de tiempo dando como

resultado los mismos parámetros para todas las imágenes. Una vez obtenido los datos de orientación se logró el objetivo de obtener el valor de tensor de orientación A_1 , el elemento a_{11} planar, como también el ángulo preferente de la fibra usando una herramienta de programación Matlab® Versión 7.14 R2012a.

5 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se analizaron los resultados obtenidos a partir del procesamiento digital de imágenes, tales como tensor de orientación (a_{11}), ángulo preferente (α), parámetro de orientación (S) y longitudes de fibras de GAK. Se desarrollaron graficas e histogramas que permitieron el análisis del comportamiento de las fibras cortas GAK a lo largo de la probeta y en sus diferentes niveles de espesores.

5.1 Análisis de Resultados

Los resultados obtenidos muestran la distribución de orientación y longitud de fibras GAK, reforzando una matriz de polipropileno. Se ha realizado el análisis de treinta y seis muestras obtenidas a partir de cuatro probetas. Teniendo en cuenta que dieciocho muestras son con 30% de GAK y dieciocho con 40% de GAK.

En la figura 5.1 se muestra una probeta con sus tres zonas y los niveles a lo largo del espesor tales como 1, 0 y -1, que representan los valores de 1 mm, 2 mm y 3 mm respectivamente, tomados en cuenta desde la parte superior de la probeta.

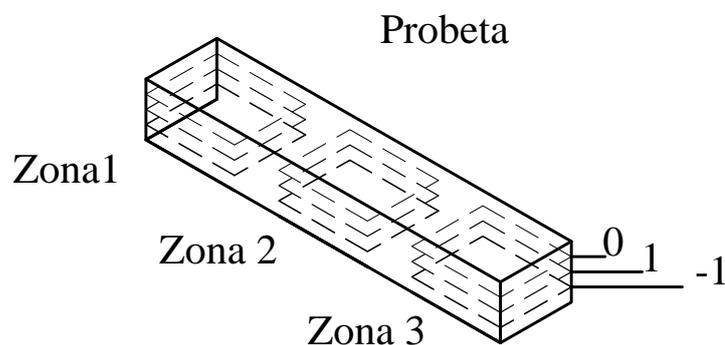


Figura 5.1: Probeta A-30% GAK. **Fuente:** Autores

5.1.1 Análisis de Distribución de orientación de Fibras cortas de GAK

5.1.1.1 Probetas con el 30% de concentración de fibras GAK en una matriz de polipropileno

Análisis de Tensor de Orientación (a_{11})

En la tabla 5.1 se muestran los valores del tensor de orientación planar (a_{11}) de las fibras cortas de GAK de las probetas A_30% y B_30%, utilizadas como refuerzo en una matriz polimérica de polipropileno, en la zona 1, zona 2 y zona 3 con sus respectivos espesores.

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3	
	A_30%	B_30%	A_30%	B_30%	A_30%	B_30%
	(a_{11})					
$z = 1$	0,8232	0,8509	0,839	0,8759	0,8649	0,8347
$z = 0$	0,8237	0,8711	0,8624	0,8367	0,8854	0,8558
$z = -1$	0,8705	0,9178	0,8678	0,8534	0,8065	0,8899

Tabla 5.1: Valores del tensor de orientación (a_{11}), en diferentes zonas y niveles a lo largo del espesor de las probetas A_30% y B_30%. **Fuente:** Autores.

En la figura 5.2 se presentan cuatro gráficas de probetas con el 30% de concentración de fibras GAK, muestran los valores de a_{11} y los parámetros de orientación S en los diferentes niveles de espesor (1, 0 y -1) en las tres zonas de la probeta. En la figura 5.2 (a), se puede apreciar los valores del tensor de orientación planar (a_{11}) son superiores a 0,80, lo cual indica que las fibras tienen una distribución de orientación paralela al flujo de la matriz de polipropileno. En la zona 1, se observó un incremento en la alineación de las fibras GAK del 0,06% en los espesores referenciales de 1 a 0 y un incremento del 5,75% en los niveles de espesores de 1 hasta -1, mostrando una capa con mayor orientación de fibras. En la zona 2, se visualiza el incremento de a_{11} de 2,79% de 1 a 0, y un incremento del 3,43% entre los niveles de espesores de 1 hasta -1. En la zona 3, se presenta un incremento de a_{11} del 2,37% entre los espesores de 1 a 0 y una disminución en el valor del tensor de orientación del 6,75% entre los niveles de espesores de 1 a -1, la alineación de las fibras decae hasta un valor de a_{11} igual a 0,8065. La dispersión en el nivel de espesor -1 es de 0,064, en el nivel 0 es de 0,0617 y en el nivel 1 es de 0,0417, lo cual indica que las fibras se encuentran alineadas, debido a que la dispersión analizada oscila en mínimas proporciones. En la figura 5.2 (b), se observó que en la zona 1 hay un incremento en la alineación de las fibras del 2,37%, desde el espesor de referencia de 1 a 0 y un incremento del 7,86% en la región de 1 hasta -1, presentando un nivel máximo en la alineación de las fibras de 0,9178.

En la zona 2 se observó una disminución de a_{11} en un 4,48% desde el espesor referencial 1 hasta 0 y de igual forma un decremento en la alineación de las fibras del 2,57% en los niveles de espesores de 1 hasta -1. En la zona 3, se presentó un incremento en la alineación de las fibras del 2,53% en los niveles 1 a 0 y un incremento del 6,61% desde el nivel de espesor 1 hasta -1, en este punto se encuentra el valor máximo de orientación planar que es igual a 0,8899. La dispersión en el nivel de espesor -1 es de 0,0644, en el nivel 0 es de 0,0344 y en el nivel 1 es de 0,0412. En las figuras 5.2 (c), (d), se presentan gráficas en la que se realizó el análisis de los parámetros de orientación S (eigenvalue) con respecto a los niveles de espesores, teniendo como resultado valores similares a los analizados en las gráficas (a), (b) respectivamente.

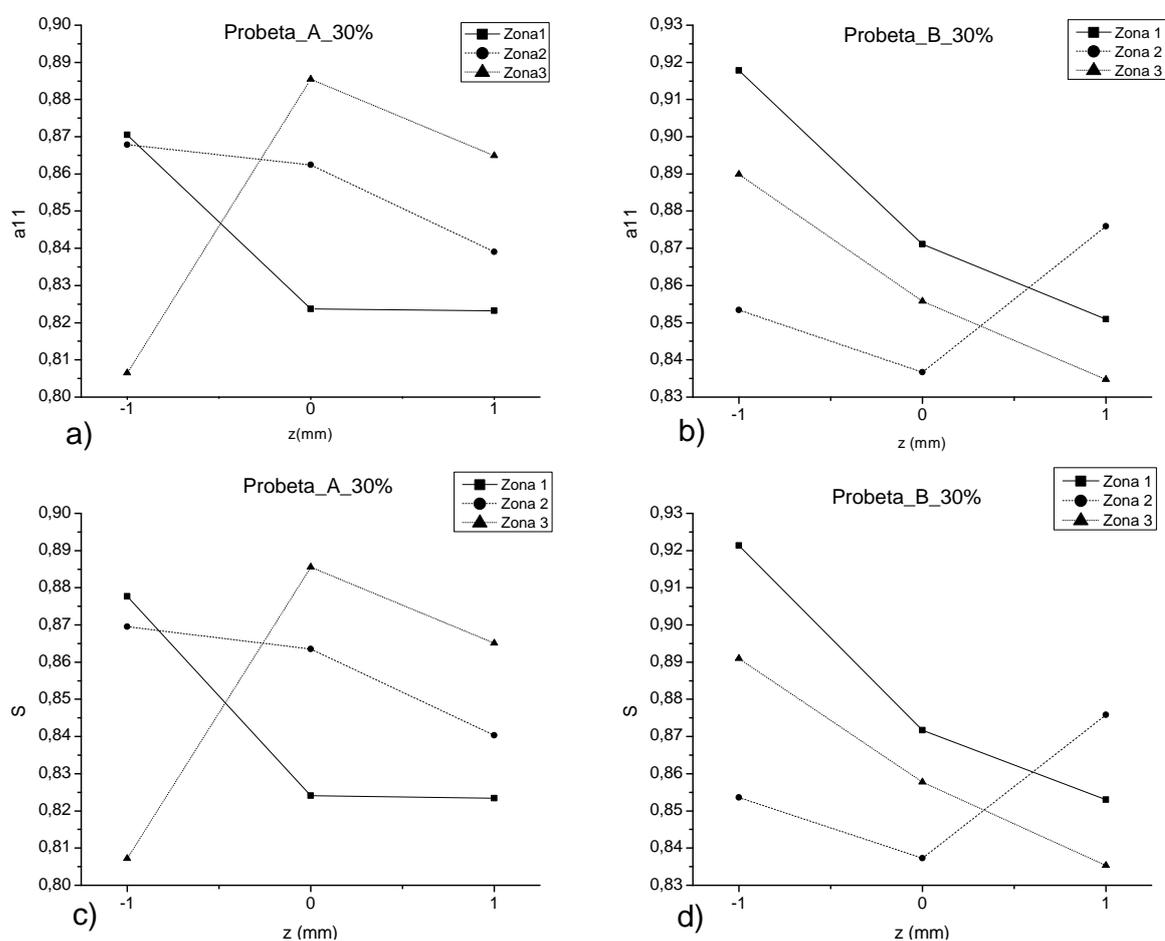


Figura 5.2: Probetas con el 30% de concentración de fibras GAK, a) Probeta_A_30%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Niveles de espesor en z (mm), b) Probeta_B_30%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Niveles de espesor en z (mm), c) Probeta_A_30%, parámetros de orientación S vs. Niveles de espesor en z (mm), d) Probeta_B_30%, parámetros de orientación S vs. Niveles de espesor en z (mm). **Fuente:** Autores

En la figura 5.3 se presentan cuatro gráficas, que muestran el comportamiento de las fibras GAK a lo largo del eje longitudinal de la probeta, es decir a lo largo del eje x, con los valores de a_{11} y parámetros de orientación S en las tres zonas que fue dividida

la probeta. En la figura 5.3 (a) se puede apreciar los valores del tensor de orientación planar (a_{11}) son superiores a 0,80, lo cual indica que las fibras tienen una distribución de orientación paralela al flujo de la matriz de polipropileno. En el nivel de espesor 1, se observó un incremento en la alineación de las fibras GAK del 1,92% desde la zona 1 hasta la zona 2 y un incremento del 5,07% desde la zona 1 a la 3. En el nivel de espesor 0, se visualiza el incremento de a_{11} de 4,70% desde la zona 1 hasta la zona 2, y un incremento del 7,49% desde la zona 1 hasta la zona 3, punto en el que se presenta un valor máximo igual a 0,8854. En el nivel de espesor -1, se presenta un decremento en la alineación de las fibras en un 0,31% entre las zonas 1 y la zona 2 y una disminución del 7,35%, desde la zona 1 hasta la zona 3, la alineación de las fibras decae hasta un valor mínimo igual a 0,8065. La dispersión en la zona 1 es de 0,0473, en la zona 2 es de 0,0288 y en la zona 3 es de 0,0789, lo cual indica que las fibras se encuentran alineadas, debido a que la dispersión analizada oscila en mínimas proporciones. En la figura 5.3 (b), en el nivel de espesor 1, se observó un incremento en la alineación de las fibras del 2,94% desde la zona 1 hasta la zona 2 y una disminución del 1,90% desde la zona 1 hasta la zona 3, dando el valor mínimo en la alineación de las fibras de 0,8347, en el nivel de espesor 0, se aprecia una reducción del 3,95% desde la zona 1 hasta la zona 2 y una disminución del 1,76%, desde la zona 1 hasta la zona 3. En el nivel de espesor -1, presentó una reducción en la alineación de las fibras del 7,02% desde la zona 1 hasta la zona 2 y una reducción del 3,04% desde la zona 1 hasta la zona 3. La dispersión en la zona 1 es de 0,0669, en la zona 2 es de 0,0392 y en la zona 3 es de 0,0552, lo cual indica que las fibras se encuentran alineadas, debido a que la dispersión analizada oscila en mínimas proporciones. En las figuras 5.3 (c), (d), se presentan gráficas en la que se realizó el análisis de los parámetros de orientación S (eigenvalue) con respecto a los niveles de espesores, teniendo como resultado valores similares a los analizados en las gráficas (a) y (b) respectivamente.

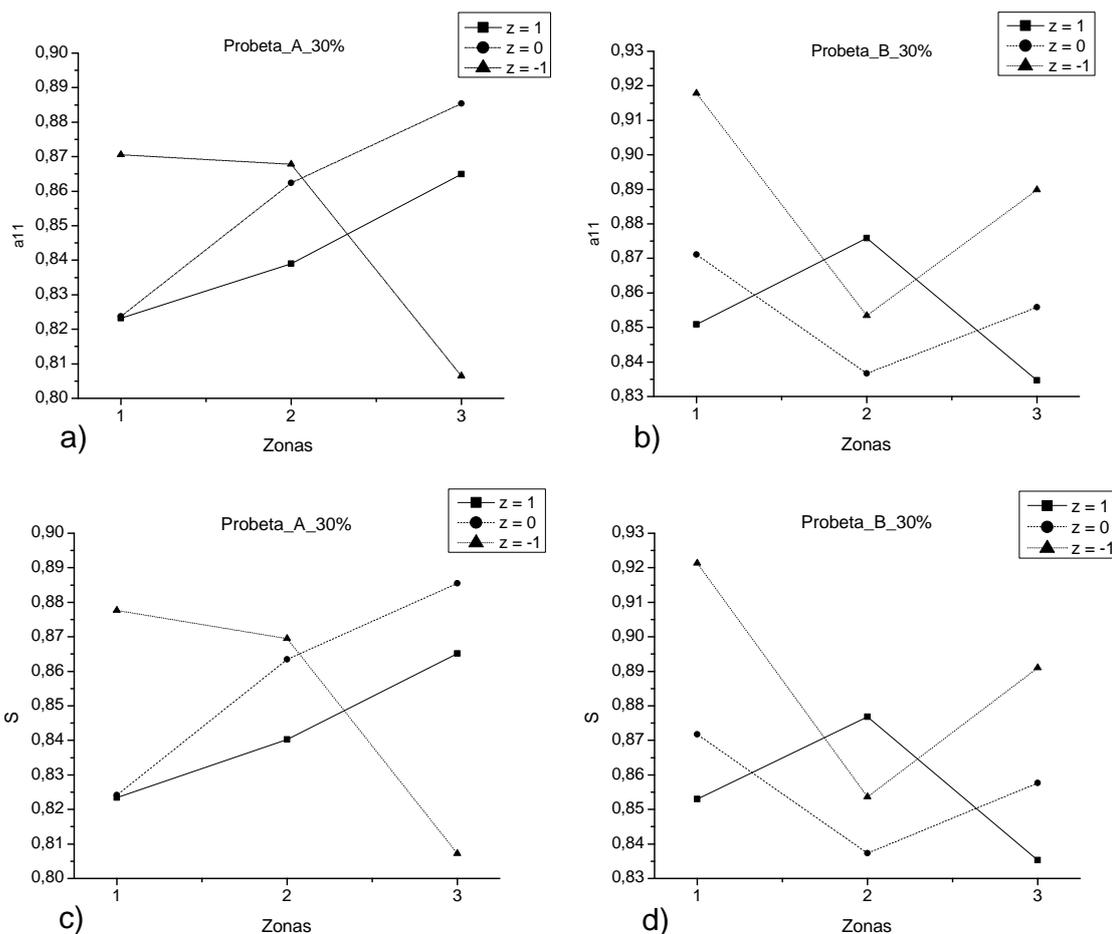


Figura 5.3: Probetas con el 30% de concentración de fibras GAK, a) Probeta_A_30%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Zonas en las que fue dividida la probeta, b) Probeta_B_30%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Zonas en las que fue dividida la probeta, c) Probeta_A_30%, parámetros de orientación S vs. Zonas en las que fue dividida la probeta, d) Probeta_B_30%, parámetros de orientación S vs. Zonas en las que fue dividida la probeta. **Fuente:** Autores

Análisis del Ángulo Preferente (α)

En la tabla 5.2 se muestran los valores del ángulo preferente de las fibras cortas de GAK de la probeta A_30% y B_30%, utilizadas como refuerzo en una matriz polimérica de polipropileno, en la zona 1, zona 2 y zona 3 con sus respectivos espesores.

En la figura 5.4 se presentan dos gráficas de probetas con el 30% de concentración de fibras GAK que muestran los valores del ángulo preferente (α) con respecto a los niveles de espesores (1, 0 y -1), denominados valores en z . En la figura 5.4 (a), en la zona 1, se observa una variación de $4,266^\circ$ entre los niveles de espesor 1 al -1, en donde el valor máximo es de $-1,117^\circ$ con z igual a 1 y un valor mínimo de α de $-5,383^\circ$ con z igual a -1. En la zona 2, se observa una variación de $5,01^\circ$ entre los niveles de espesores 1 a -1, en donde el valor máximo de α es de $2,2638^\circ$ para z igual a 0 y el valor mínimo es $-2,7474^\circ$ para z igual a -1. En la zona 3 se visualiza una variación de $2,67^\circ$ entre los niveles de espesores 1

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3	
	A_30% (α)	B_30% (α)	A_30% (α)	B_30% (α)	A_30% (α)	B_30% (α)
$z = 1$	-1,117	-3,137	-25,978	-19,565	0,7655	-17,529
$z = 0$	-1,327	1,649	22,638	17,094	-0,5548	29,069
$z = -1$	-5,383	37,027	-27,474	-0,7821	-19,006	21,195

Tabla 5.2: Valores del ángulo preferente (α), en diferentes zonas y espesores en z (mm) de la probeta A_30% y B_30%. **Fuente:** Autores.

a -1, donde el valor máximo es de $0,7655^{\circ}$ para z igual a 1 y el valor mínimo es de $-1,9006^{\circ}$ para z igual a -1. En la figura 5.4 (b), en la zona 1, se presenta una variación de $6,84^{\circ}$ entre los niveles de espesor 1 hasta -1, en donde el valor máximo de α es de $3,7027^{\circ}$ que corresponde a z igual a -1 y el valor mínimo de α igual a $-3,137^{\circ}$ correspondiente al nivel de espesor 1. En la zona 2 se observa una variación de $3,67^{\circ}$, teniendo el valor máximo de $1,7094^{\circ}$ para z igual a 0 y el valor mínimo de $-1,9565^{\circ}$ correspondiente a z igual a 1. En la zona 3, se observa una variación de $4,66^{\circ}$ entre los niveles de espesores 1 hasta -1, teniendo un valor máximo de $2,9069^{\circ}$ para z igual a 0, y un valor mínimo de $-1,7529^{\circ}$ para un valor de z igual a 1.

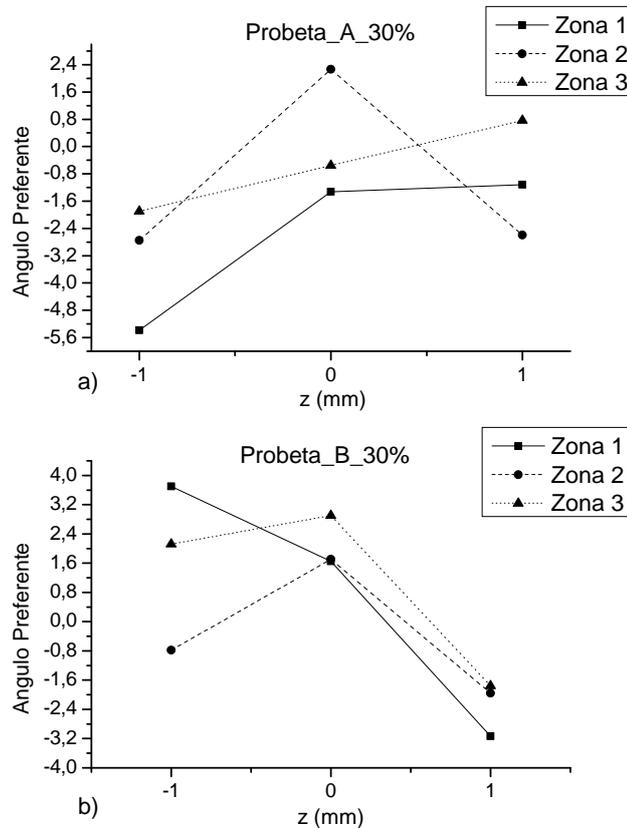


Figura 5.4: Ángulo preferente (α) vs. Espesores de z (mm). a) Probeta_A_30%, b) Probeta_B_30%. **Fuente:** Autores

En la figura 5.5 se presentan dos gráficas que representan los valores del ángulo preferente (α) con respecto a las zonas en las que fue dividida la probeta. En estas gráficas se realizó un análisis del ángulo preferente de las fibras en toda la longitud de la probeta. En la figura 5.5 (a), en el nivel de espesor 1, se observó una variación de $3,36^{\circ}$ entre la zona 1 y la zona 3 en el que el valor máximo es de $0,7655^{\circ}$ en la zona 3 y un valor mínimo de $-2,5978^{\circ}$ en la zona 2. En el nivel de espesor 0, se observó una variación de $3,59^{\circ}$ entre la zona 1 y la zona 3, en donde el valor máximo es de $2,2638^{\circ}$ que corresponde a la zona 2 y el valor mínimo es de $-1,327^{\circ}$ en la zona 1. En el nivel de espesor -1, se visualizó una variación de $7,5025^{\circ}$, entre la zona 1 y la zona 3, donde el valor máximo es de $2,1195^{\circ}$ en la zona 3 y el valor mínimo es de $-5,383^{\circ}$ correspondiente a la zona 1. En la figura 5.4 (b), en el nivel de espesor 1, se presentó una variación de $1,38^{\circ}$ entre la zona 1 y la zona 3, en donde el valor máximo es de $-1,7529^{\circ}$ que corresponde a la zona 3 y un valor mínimo de $-3,137^{\circ}$ en la zona 1. En el nivel de espesor 0, se observó una variación de $1,26^{\circ}$ entre la zona 1 y la zona 3, teniendo el valor máximo igual a $2,9069^{\circ}$ en la zona 3 y el valor mínimo de $1,649^{\circ}$ que corresponde a la zona 1. Para el nivel de espesor -1, se analizó una variación de $4,48^{\circ}$ entre las zonas 1 y 3, teniendo un valor máximo de $3,7027^{\circ}$ en la zona 1, y un valor mínimo de $-0,7821^{\circ}$ correspondiente a la zona 2.

5.1.1.2 Probetas con el 40% de concentración de fibras GAK en una matriz de polipropileno

Análisis de Tensor de Orientación (a_{11})

En la tabla 5.3 se muestran los valores del tensor de orientación planar (a_{11}) de las fibras cortas de GAK de las probetas A_40% y B_40%, utilizadas como refuerzo en una matriz polimérica de polipropileno, en la zona 1, zona 2 y zona 3 con sus respectivos espesores.

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3	
	A_40%	B_40%	A_40%	B_40%	A_40%	B_40%
	(a_{11})	(a_{11})	(a_{11})	(a_{11})	(a_{11})	(a_{11})
$z = 1$	0,7340	0,7803	0,7820	0,8213	0,8649	0,8429
$z = 0$	0,7911	0,8595	0,8743	0,8421	0,8846	0,8763
$z = -1$	0,8214	0,8309	0,8268	0,8381	0,8531	0,8181

Tabla 5.3: Valores del tensor de orientación (a_{11}), en diferentes zonas y niveles a lo largo del espesor de las probetas A_40% y B_40%. **Fuente:** Autores

En la figura 5.6 se presentan cuatro gráficas de probetas con el 30% de concentración de fibras GAK, muestran los valores de a_{11} y los parámetros de orientación S en

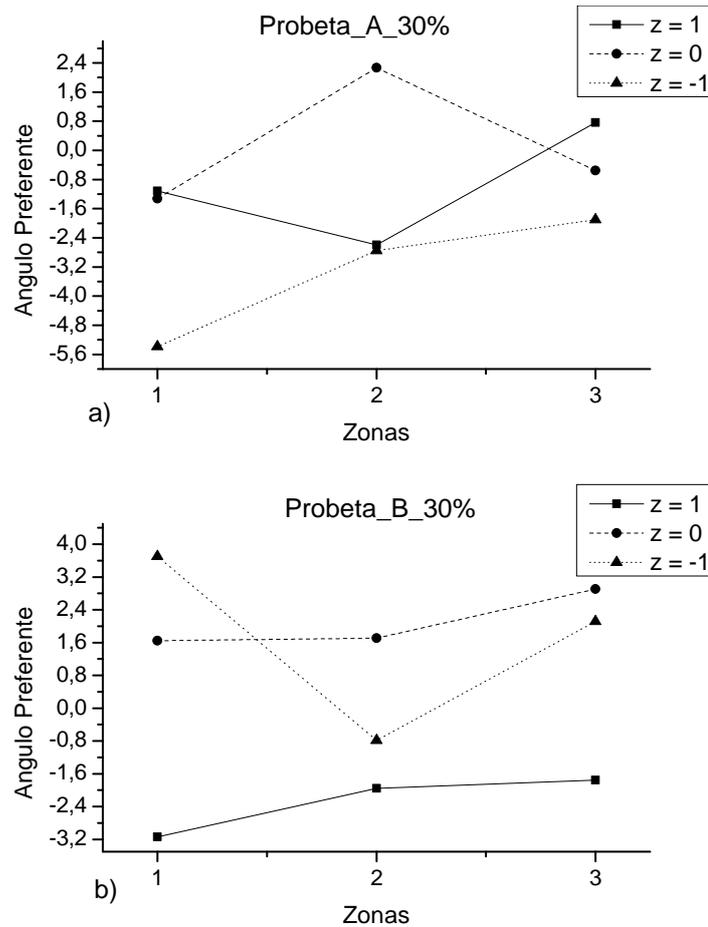


Figura 5.5: Ángulo preferente (α) vs. Zonas en las que fue dividida la probeta. a) Probeta_A_30%, b) Probeta_B_30%. **Fuente:** Autores

los diferentes niveles de espesor (1, 0 y -1) en las tres zonas de la probeta. En la figura 5.6 (a), se puede apreciar los valores del tensor de orientación planar (a_{11}) son superiores a 0,73, lo cual indica que las fibras tienen una distribución de orientación paralela al flujo de la matriz de polipropileno. En la zona 1, se observó un incremento en la alineación de las fibras GAK del 7,78% en los espesores referenciales de 1 a 0 y un incremento del 11,91% en los niveles de espesores de 1 hasta -1. En la zona 2, se visualiza el incremento de a_{11} de 11,80% de 1 a 0, y un incremento del 3,73% entre los niveles de espesores de 1 hasta -1. En la zona 3, se presenta un incremento de a_{11} del 2,28% entre los espesores de 1 a 0 y una disminución en el valor del tensor de orientación del 1,36%, mostrando una capa con mayor orientación de fibras. La alineación de las fibras decae hasta un valor de a_{11} igual a 0,7340 en la zona 1 y en el nivel de espesor 1. La dispersión en el nivel de espesor -1 es de 0,0317, en el nivel 0 es de 0,0935 y en el nivel 1 es de 0,1309, lo cual indica que las fibras se encuentran alineadas, debido a que la dispersión analizada oscila en mínimas proporciones. En la figura 5.6 (b), se observó que en la zona 1 hay un incremento en la alineación de

las fibras del 10,15%, desde el espesor de referencia de 1 a 0 y un incremento del 6,48% en la región de 1 hasta -1. En la zona 2 se observó un incremento de a_{11} en un 2,53% desde el espesor referencial 1 hasta 0 y de igual forma un incremento en la alineación de las fibras del 2,05% en los niveles de espesores de 1 hasta -1. En la zona 3, se presentó un incremento en la alineación de las fibras del 3,96% en los niveles 1 a 0, en este punto se encuentra el valor máximo de orientación planar que es igual a 0,8854 y un decremento del 2,94% desde el nivel de espesor 1 hasta -1. La dispersión en el nivel de espesor -1 es de 0,0222, en el nivel 0 es de 0,0342 y en el nivel 1 es de 0,0626. En las figuras 5.6 (c), (d), se presentan gráficas en la que se realizó el análisis de los parámetros de orientación S (eigenvalue) con respecto a los niveles de espesores, teniendo como resultado valores similares a los analizados en las gráficas (a), (b) respectivamente.

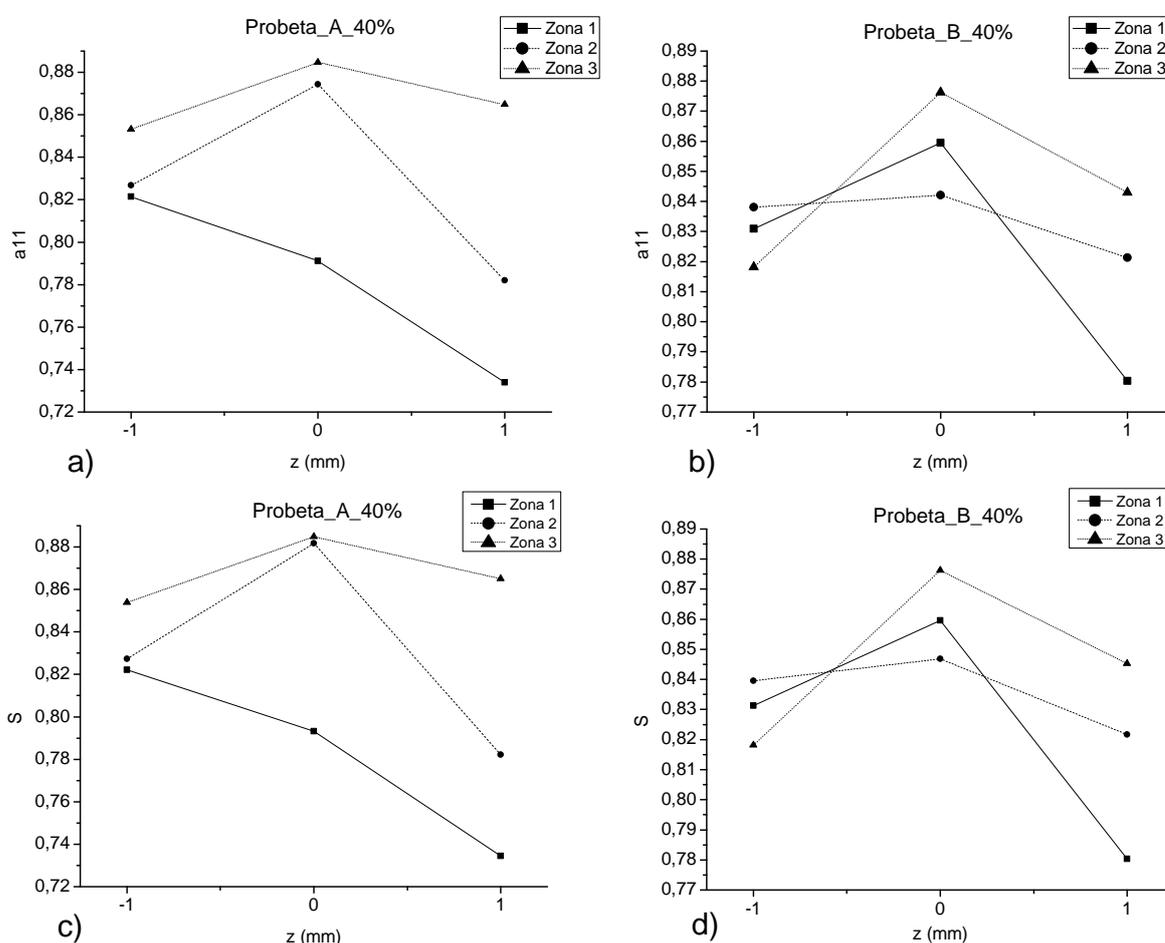


Figura 5.6: Probetas con el 40% de concentración de fibras GAK, a) Probeta_A_40%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Niveles de espesor en z (mm), b) Probeta_B_40%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Niveles de espesor en z (mm), c) Probeta_A_40%, parámetros de orientación S vs. Niveles de espesor en z (mm), d) Probeta_B_40%, parámetros de orientación S vs. Niveles de espesor en z (mm). **Fuente:** Autores

En la figura 5.7 se presentan cuatro gráficas, que muestran el comportamiento de las fibras GAK a lo largo del eje longitudinal de la probeta, es decir a lo largo del eje

x, con los valores de a_{11} y parámetros de orientación S en las tres zonas que fue dividida la probeta. En la figura 5.7 (a) se puede apreciar los valores del tensor de orientación planar (a_{11}) son superiores a 0,73, lo cual indica que las fibras tienen una distribución de orientación paralela al flujo de la matriz de polipropileno. En el nivel de espesor 1, se observó un incremento en la alineación de las fibras GAK del 6,54% desde la zona 1 hasta la zona 2 y un incremento del 17,83% desde la zona 1 a la 3. En el nivel de espesor 0, se visualiza el incremento de a_{11} de 10,52% desde la zona 1 hasta la zona 2, y un incremento del 11,82% desde la zona 1 hasta la zona 3, punto en el que se presenta un valor máximo igual a 0,8846. En el nivel de espesor -1, se presenta un incremento mínimo en la alineación de las fibras del 0,66% entre las zonas 1 y la zona 2 y un incremento del 3,86%, desde la zona 1 hasta la zona 3, la alineación de las fibras decae hasta un valor mínimo de 0,7340 en el nivel de orientación 1, perteneciente a la zona 1. La dispersión en la zona 1 es de 0,0874, en la zona 2 es de 0,0923 y en la zona 3 es de 0,0315, lo cual indica que las fibras se encuentran alineadas, debido a que la dispersión analizada oscila en mínimas proporciones. En la figura 5.7 (b), en el nivel de espesor 1, se observó un incremento en la alineación de las fibras del 6,54% desde la zona 1 hasta la zona 2 y un incremento del 17,83% desde la zona 1 hasta la zona 3, dando el valor mínimo en la alineación de las fibras de 0,7803, en el nivel de espesor 0, se aprecia una reducción del 10,52% desde la zona 1 hasta la zona 2 y un incremento del 11,82%, desde la zona 1 hasta la zona 3. En el nivel de espesor -1, presentó un incremento en la alineación de las fibras del 0,66% desde la zona 1 hasta la zona 2 y una reducción del 3,86% desde la zona 1 hasta la zona 3. La dispersión en la zona 1 es de 0,0792, en la zona 2 es de 0,0208 y en la zona 3 es de 0,0582, lo cual indica que las fibras se encuentran alineadas, debido a que la dispersión analizada oscila en mínimas proporciones. En las figuras 5.7 (c), (d), se presentan gráficas en la que se realizó el análisis de los parámetros de orientación S (eigenvalue) con respecto a los niveles de espesores, teniendo como resultado valores similares a los analizados en las gráficas (a) y (b) respectivamente.

Análisis del Ángulo Preferente (α)

En la tabla 5.4 se muestran los valores del ángulo preferente de las fibras cortas de GAK de la probeta A_40% y B_40%, utilizadas como refuerzo en una matriz polimérica de polipropileno, en la zona 1, zona 2 y zona 3 con sus respectivos espesores.

En la figura 5.8 se presentan dos gráficas de probetas con el 40% de concentración de fibras GAK que muestran los valores del ángulo preferente (α) con respecto a los niveles de espesores (1, 0 y -1), denominados valores en z. En la figura 5.8 (a), en la zona 1, se

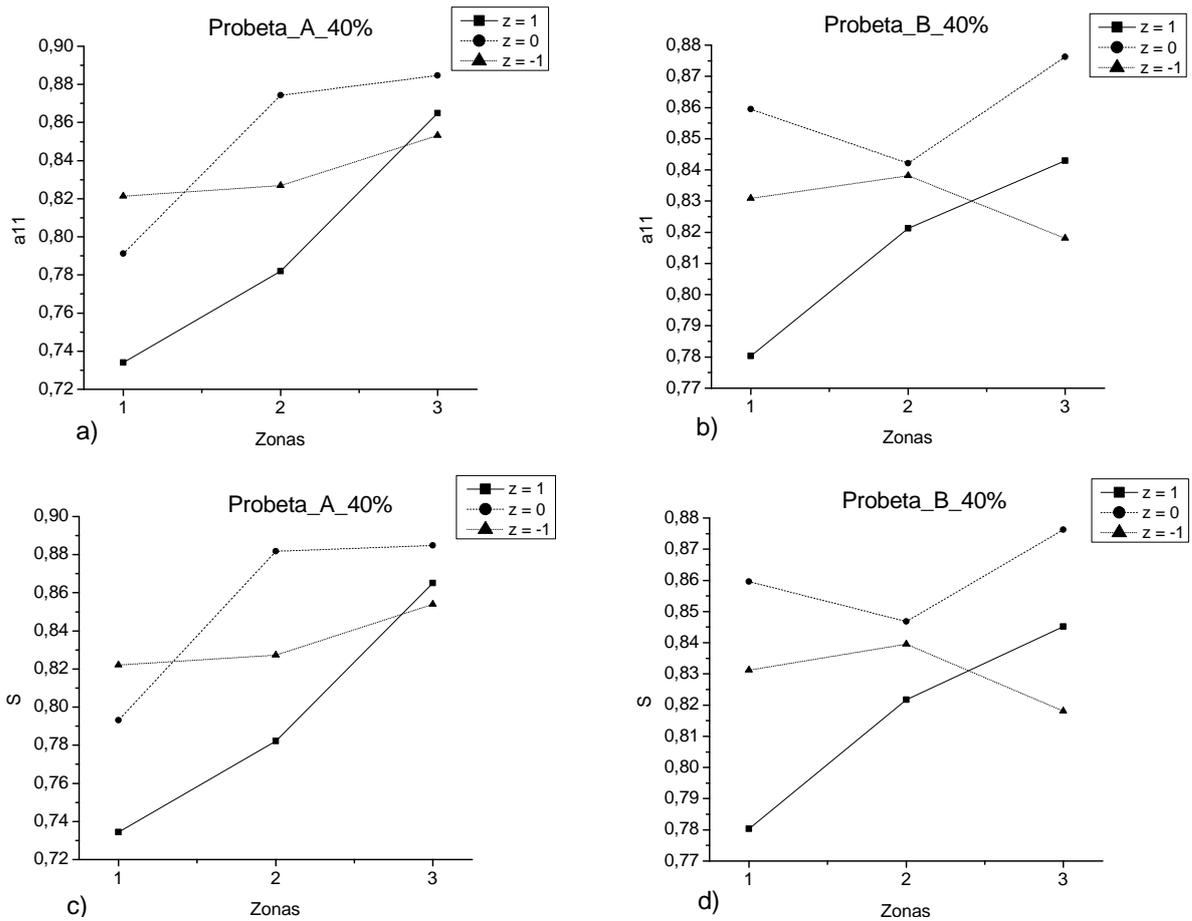


Figura 5.7: Probetas con el 40% de concentración de fibras GAK, a) Probeta_A_40%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Zonas en las que fue dividida la probeta, b) Probeta_B_40%, tensor de orientación planar a_{11} vs. Zonas en las que fue dividida la probeta, c) Probeta_A_40%, parámetros de orientación S vs. Zonas en las que fue dividida la probeta, d) Probeta_B_40%, parámetros de orientación S vs. Zonas en las que fue dividida la probeta. **Fuente:** Autores

observa una variación de $5,4145^0$ entre los niveles de espesor 1 al -1, en donde el valor máximo es de $1,9760^0$ con z igual a -1 y un valor mínimo de α de $-3,4385^0$ con z igual a 0. En la zona 2, se observa una variación de $7,0675^0$ entre los niveles de espesores 1 a -1, en donde el valor máximo de α es de $1,4630^0$ para z igual a -1 y el valor mínimo es $-5,6045^0$ para z igual a 0. En la zona 3 se visualiza una variación de $3,1993^0$ entre los niveles de espesores 1 a -1, donde el valor máximo es de $1,1839^0$ para z igual a 0 y el valor mínimo es de $-2,0161^0$ para z igual a -1. En la figura 5.8 (b), en la zona 1, se presenta una variación de $0,8855^0$ entre los niveles de espesor 1 hasta -1, en donde el valor máximo de α es de $-0,3102^0$ que corresponde a z igual a 1 y el valor mínimo de α es de $-1,1957^0$ en el nivel de espesor -1. En la zona 2 se observa una variación de $6,0635^0$, teniendo el valor máximo de $4,7327^0$ para z igual a 0 y el valor mínimo de $-1,3308^0$ correspondiente a z igual a 1. En la zona 3, se observa una variación de $3,0365^0$ entre los niveles de espesores 1 hasta -1, teniendo un valor máximo de $3,2590^0$ para z igual a 1, y un valor mínimo de $0,2227^0$ para

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3	
	A_40% (α)	B_40% (α)	A_40% (α)	B_40% (α)	A_40% (α)	B_40% (α)
$z = 1$	-16,187	-0,3102	0,7432	-13,308	0,7655	32,590
$z = 0$	-34,385	-0,5773	-56,045	47,327	11,839	0,2966
$z = -1$	19,760	-11,957	14,630	25,839	-20,161	0,2227

Tabla 5.4: Valores del ángulo preferente (α), en diferentes zonas y espesores en z (mm) de la probeta A_40% y B_40%. **Fuente:** Autores.

un valor de z igual a -1.

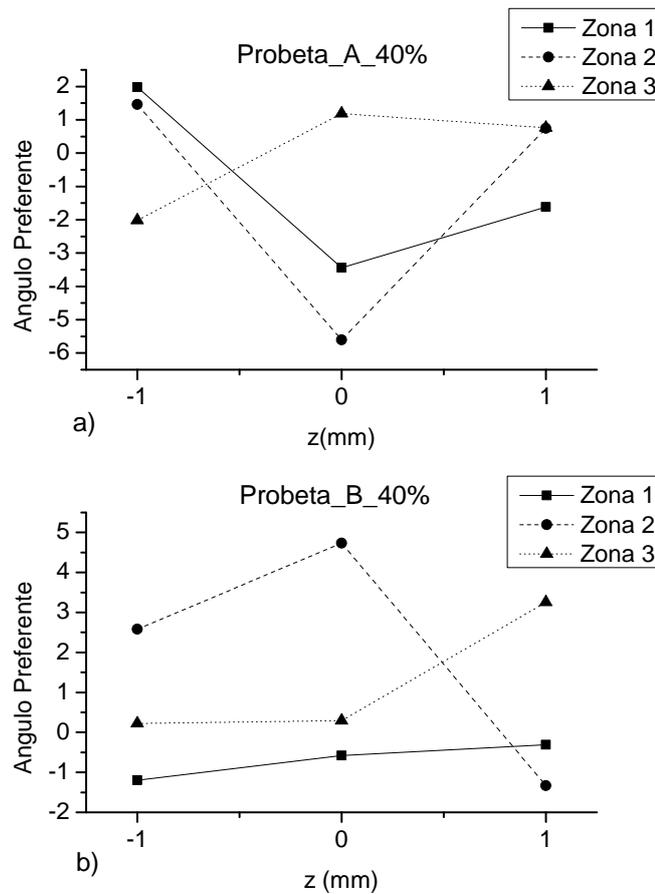


Figura 5.8: Ángulo preferente (α) vs. Espesores de z (mm). a) Probeta_A_40%, b) Probeta_B_40%. **Fuente:** Autores.

En la figura 5.9 se presentan dos gráficas que representan los valores del ángulo preferente (α) con respecto a las zonas en las que fue dividida la probeta. En estas gráficas se realizó un análisis del ángulo preferente de las fibras en toda la longitud de la probeta. En la figura 5.9 (a), en el nivel de espesor 1, se observa una variación de $2,3842^\circ$ entre la zona 1 y la zona 3 en el que el valor máximo es de $0,7655^\circ$ en la zona 3 y un valor mínimo de $-1,6187^\circ$ en la zona 1. En el nivel de espesor 0, se observa una variación de $6,7884^\circ$

entre la zona 1 y la zona 3, en donde el valor máximo es de $1,1839^{\circ}$ que corresponde a la zona 3 y el valor mínimo es de $-5,6045^{\circ}$ en la zona 2. En el nivel de espesor -1 , se visualiza una variación de $3,9921^{\circ}$, entre la zona 1 y la zona 3, donde el valor máximo es de $1,9760^{\circ}$ en la zona 1 y el valor mínimo es de $-2,0161^{\circ}$ correspondiente a la zona 3. En la figura 5.4 (b), en el nivel de espesor 1 , se presenta una variación de $4,5898^{\circ}$ entre la zona 1 y la zona 3, en donde el valor máximo es de $3,2590^{\circ}$ que corresponde a la zona 3 y el valor mínimo es de $-1,3308^{\circ}$ en la zona 2. En el nivel de espesor 0 , se observa una variación de $5,31^{\circ}$ entre la zona 1 y la zona 3, teniendo el valor máximo igual a $4,7327^{\circ}$ en la zona 2 y el valor mínimo de $-0,5773^{\circ}$ que corresponde a la zona 1. Para el nivel de espesor -1 , se analiza una variación de $3,7796^{\circ}$ entre las zonas 1 y 3, teniendo un valor máximo de $2,5839^{\circ}$ en la zona 2, y un valor mínimo de $-1,1957^{\circ}$ correspondiente a la zona 1.

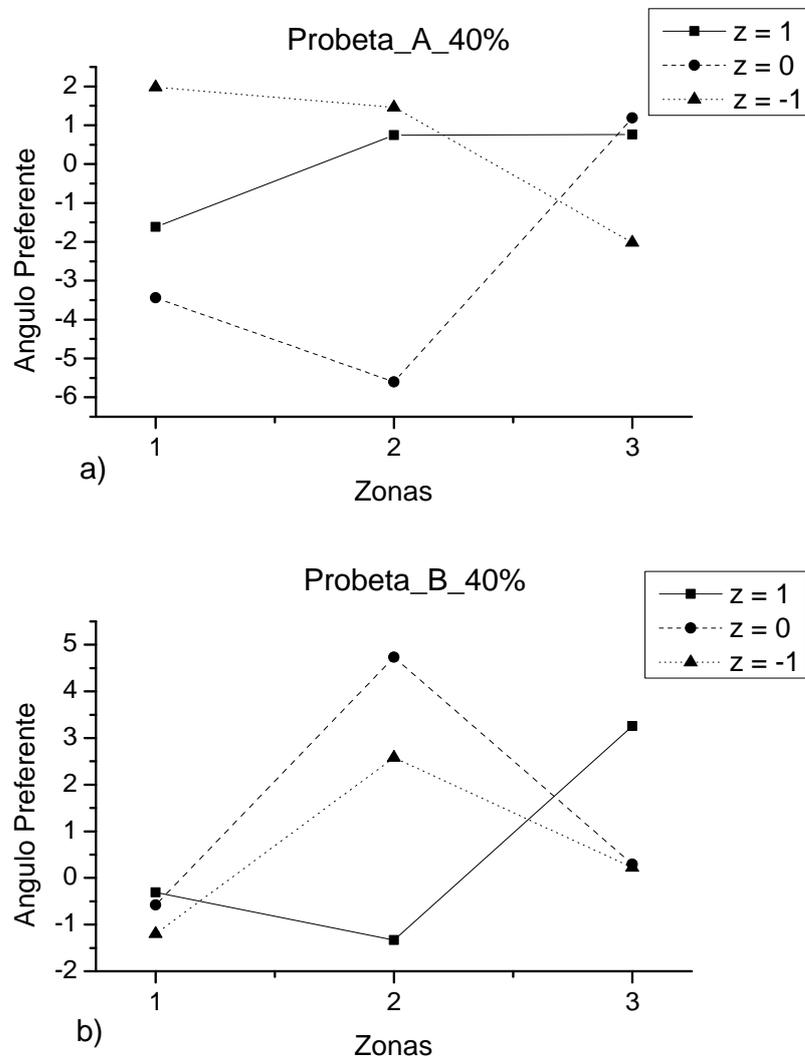


Figura 5.9: Ángulo preferente (α) vs. Zonas en las que fue dividida la probeta. a) Probeta_A_40%, b) Probeta_B_40%. **Fuente:** Autores

5.1.2 Análisis de Longitud

Las fibras originales fueron de malla # 60. Se partió de una distribución de fibras con una longitud media $x_c = 0.77$, un ancho de dispersión $w = 0.644$ y una desviación estándar de 0.322 , como se observa en la figura 5.10.

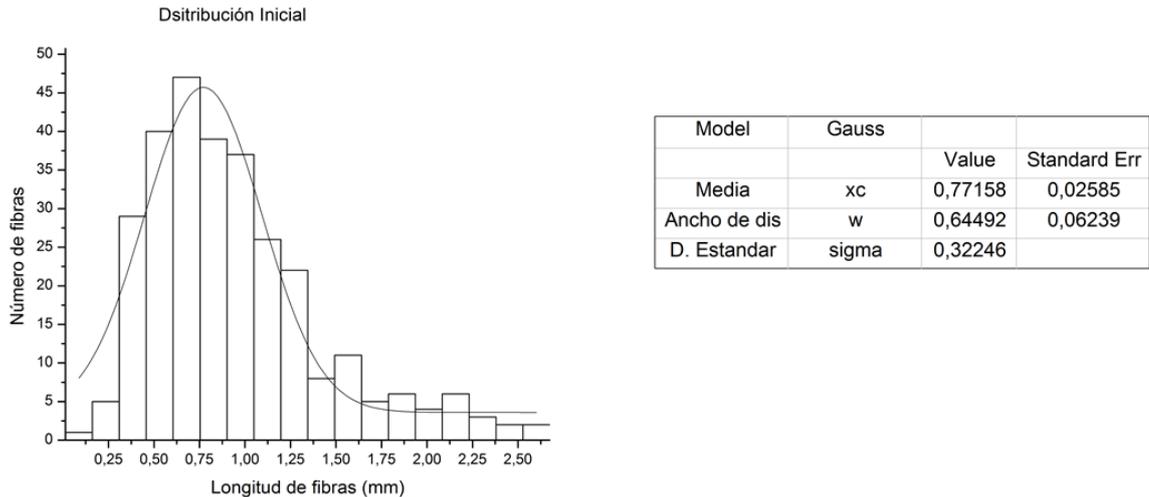


Figura 5.10: Distribución inicial de fibras GAK, previo al proceso de moldeo por inyección.
Fuente: Autores

Luego del procesamiento, se obtuvieron los siguientes resultados. Se evidencia que las fibras sufren procesos de fracturas durante su procesamiento. En la tabla 5.5 se muestran los valores porcentuales con respecto a la distribución inicial de las probetas A.30%GAK y B.30%GAK.

<i>Probeta A_30%GAK.</i>		<i>Probeta B_30%GAK.</i>	
$x_c = 0.28$	36%	$x_c = 0.32$	41%
$w = 0.31$	48%	$w = 0.35$	54.50%
D.E= 0.15	47%	D.E= 0.17	52%

Tabla 5.5: Porcentajes de concentración de fibras GAK con respecto a la distribución inicial.
Fuente: Autores.

En la tabla 5.6, se muestran los valores porcentuales con respecto a la distribución inicial de las probetas A.40%GAK y B.40%GAK.

<i>Probeta_A_40%GAK.</i>		<i>Probeta_B_40%GAK.</i>	
$x_c = 0.329$	43%	$x_c = 0.31$	40%
$w = 0.37$	57%	$w = 0.31$	48%
D.E= 0.18	56%	D.E = 0.157	49%

Tabla 5.6: Porcentajes de concentración de fibras GAK con respecto a la distribución inicial. **Fuente:** Autores.

En la figura 5.11 se muestran las distribuciones de longitud de las probetas A_30% GAK y B_30% GAK.

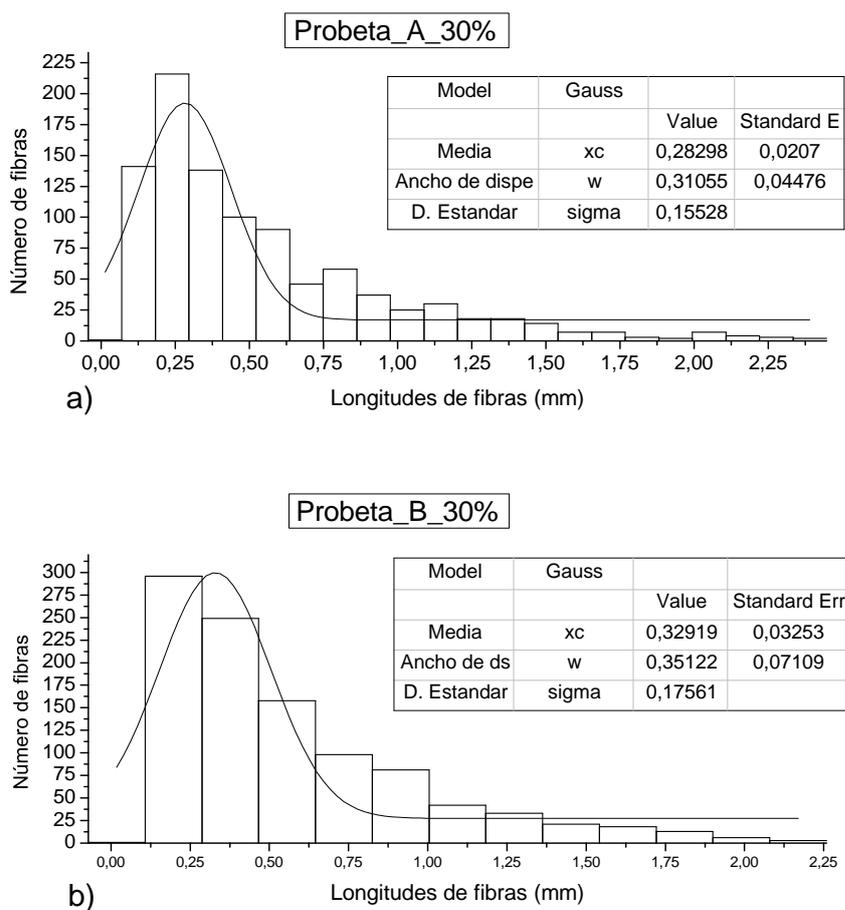


Figura 5.11: a) Distribución de longitud probeta_A_30%. b) Resultados probeta_A_30%. c) Distribución de longitud probeta_B_30%. d) Resultados Probeta_B_30%. **Fuente:** Autores

En la figura 5.12, se muestran las distribuciones de longitud de las probetas A_40% GAK y B_40% GAK.

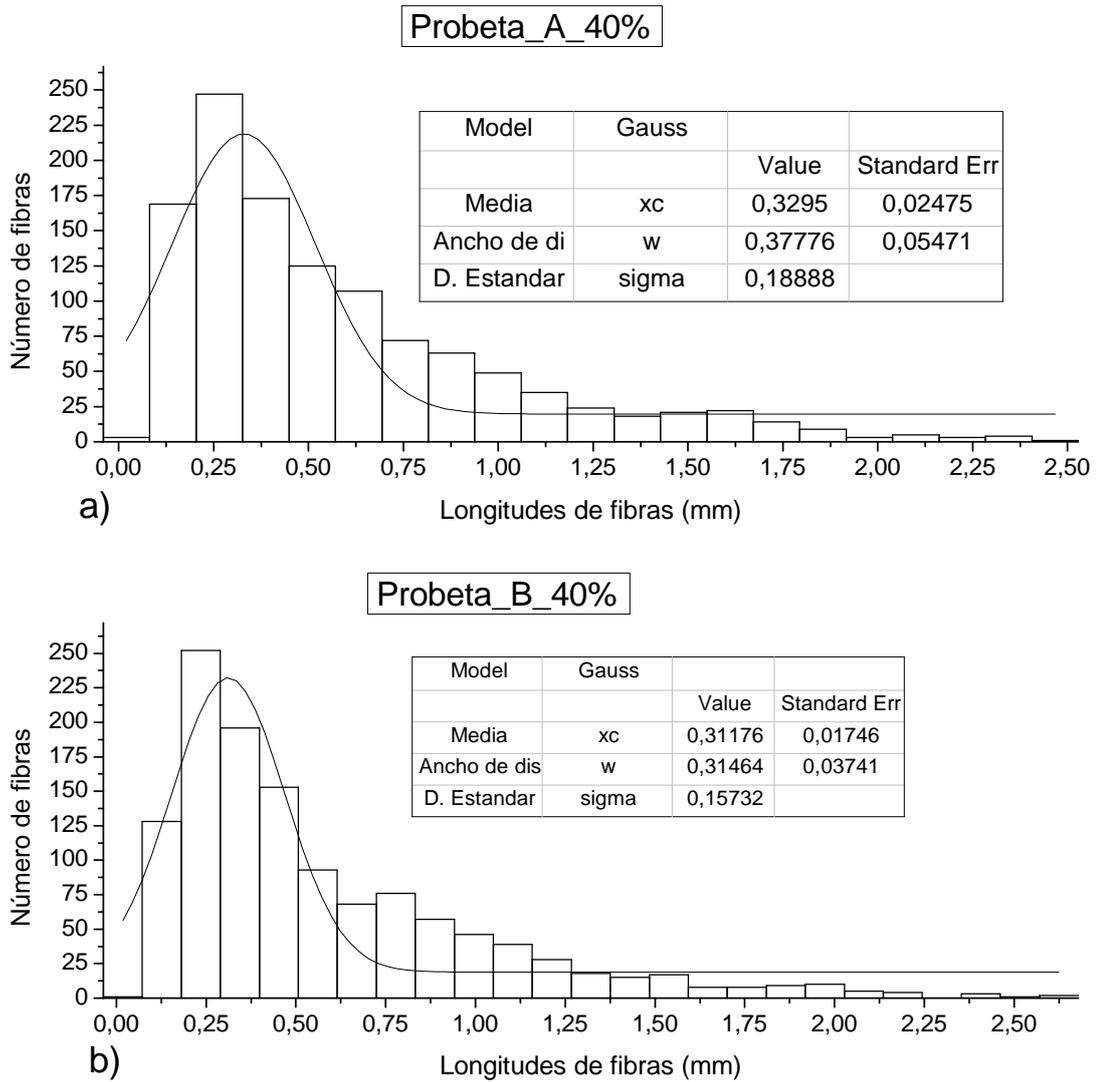


Figura 5.12: a) Distribución de longitud probeta_A_40%. b) Resultados probeta_A_40%. c) Distribución de longitud probeta_B_40%. d) Resultados Probeta_B_40%. **Fuente:** Autores

5.1.3 Análisis de Orientación

La mayor concentración de ángulo de orientación se encontró entre -16° a 16° . El ajuste de curvas mediante el método de Gauss, mostró la preferencia en la orientación de las fibras entre los ángulos -5° y 10° en las probetas A.30% y B.30%, como se muestra en la figura 5.13, lo que coincide parcialmente con el análisis del ángulo preferente que reportó un rango entre -3.28° y 2.06° .

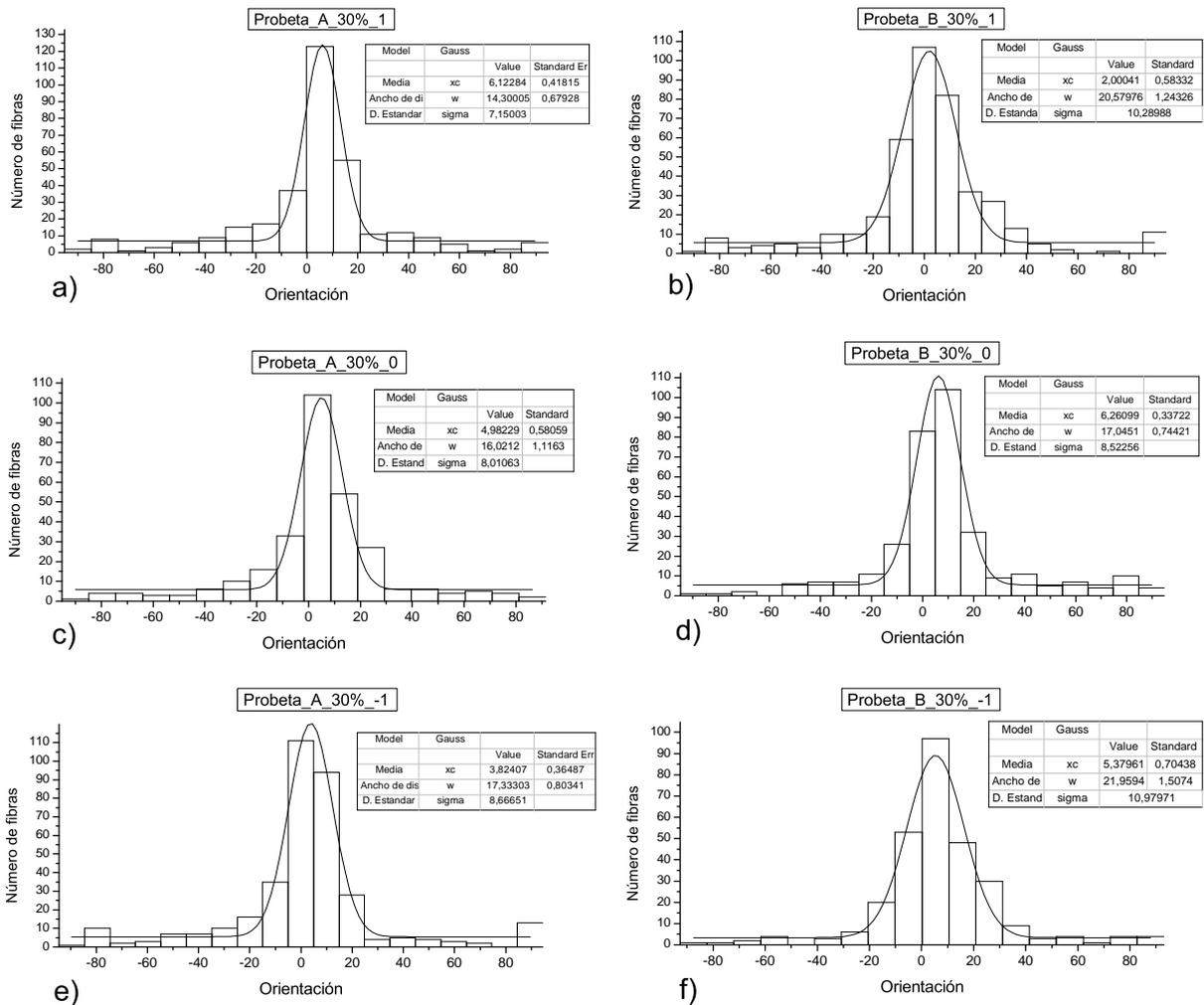


Figura 5.13: Histogramas que representan la orientación de las fibras vs. número de fibras, a) Probeta_A_30% nivel de espesor 1, b) Probeta_B_30% nivel de espesor 1, c) Probeta_A_30% nivel de espesor 0, d) Probeta_B_30% nivel de espesor 0, e) Probeta_A_30% nivel de espesor -1, f) Probeta_B_30% nivel de espesor -1. **Fuente:** Autores

En la figura 5.14, se muestran las distribuciones de Orientación de las fibras GAK. El ajuste de curvas mediante el método de Gauss, mostró la preferencia de orientación entre los ángulos -10° y 15° en las probetas A.40% y B.40%, lo que concuerda con el análisis del ángulo preferente que reportó un rango entre -3.09° y 1.03° .

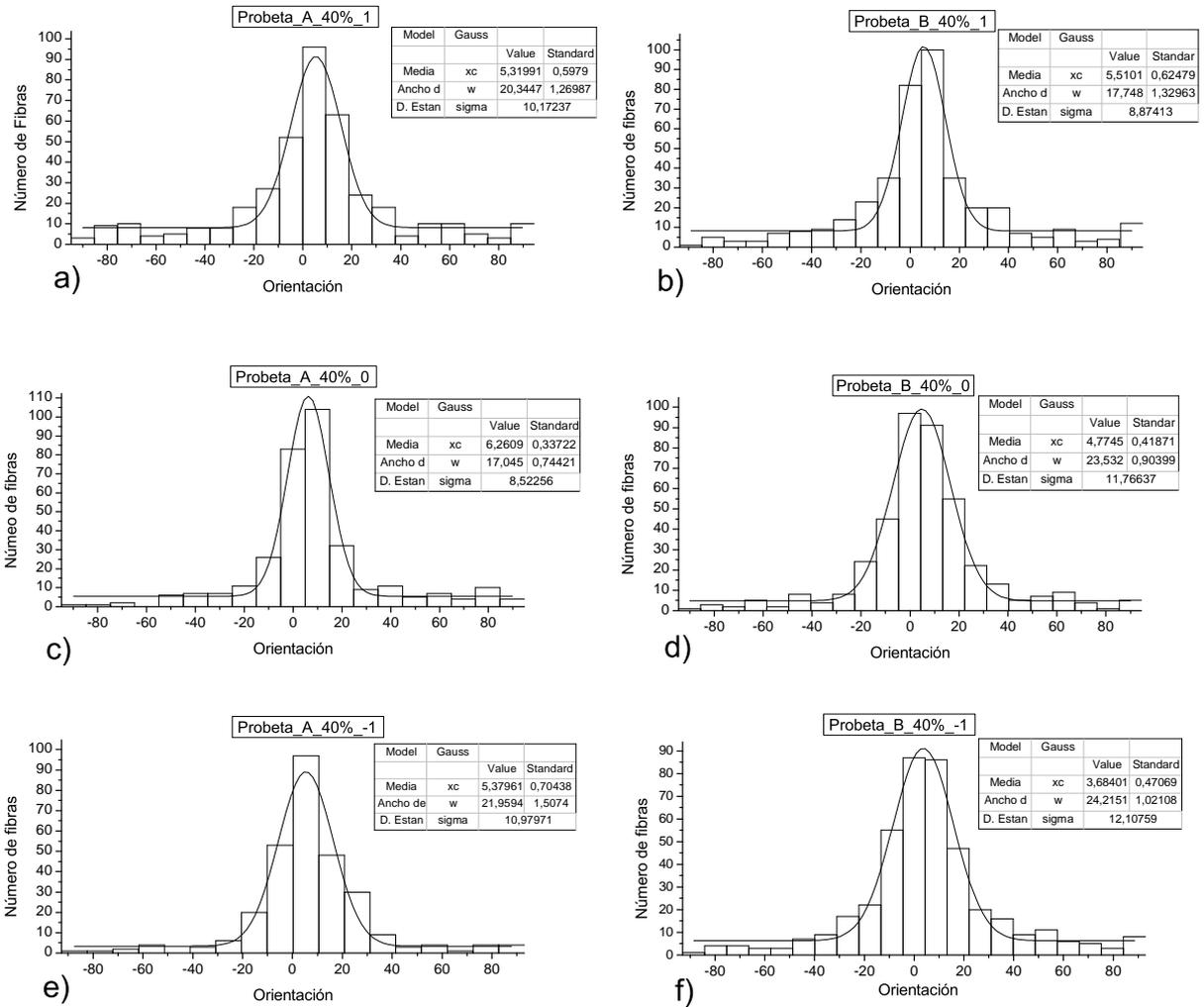


Figura 5.14: Histogramas que representan la orientación de las fibras vs. número de fibras, a) Probeta_A_40% nivel de espesor 1, b) Probeta_B_40% nivel de espesor 1, c) Probeta_A_40% nivel de espesor 0, d) Probeta_B_40% nivel de espesor 0, e) Probeta_A_40% nivel de espesor -1, f) Probeta_B_40% nivel de espesor -1. **Fuente:** Autores

5.1.4 Análisis de Ángulo Preferente

En la figura 5.15, se muestran las elipses generadas mediante la aplicación del modelo matemático descrito en el capítulo 1, en el cual se representan los valores del ángulo preferente. En la Probeta_A_30%, se observan las diferentes elipses formadas con una variación del ángulo preferente de -3.2822° a 0.0224° , indicando que posee una dirección preferencial en sentido del flujo en todas las zonas y espesores.

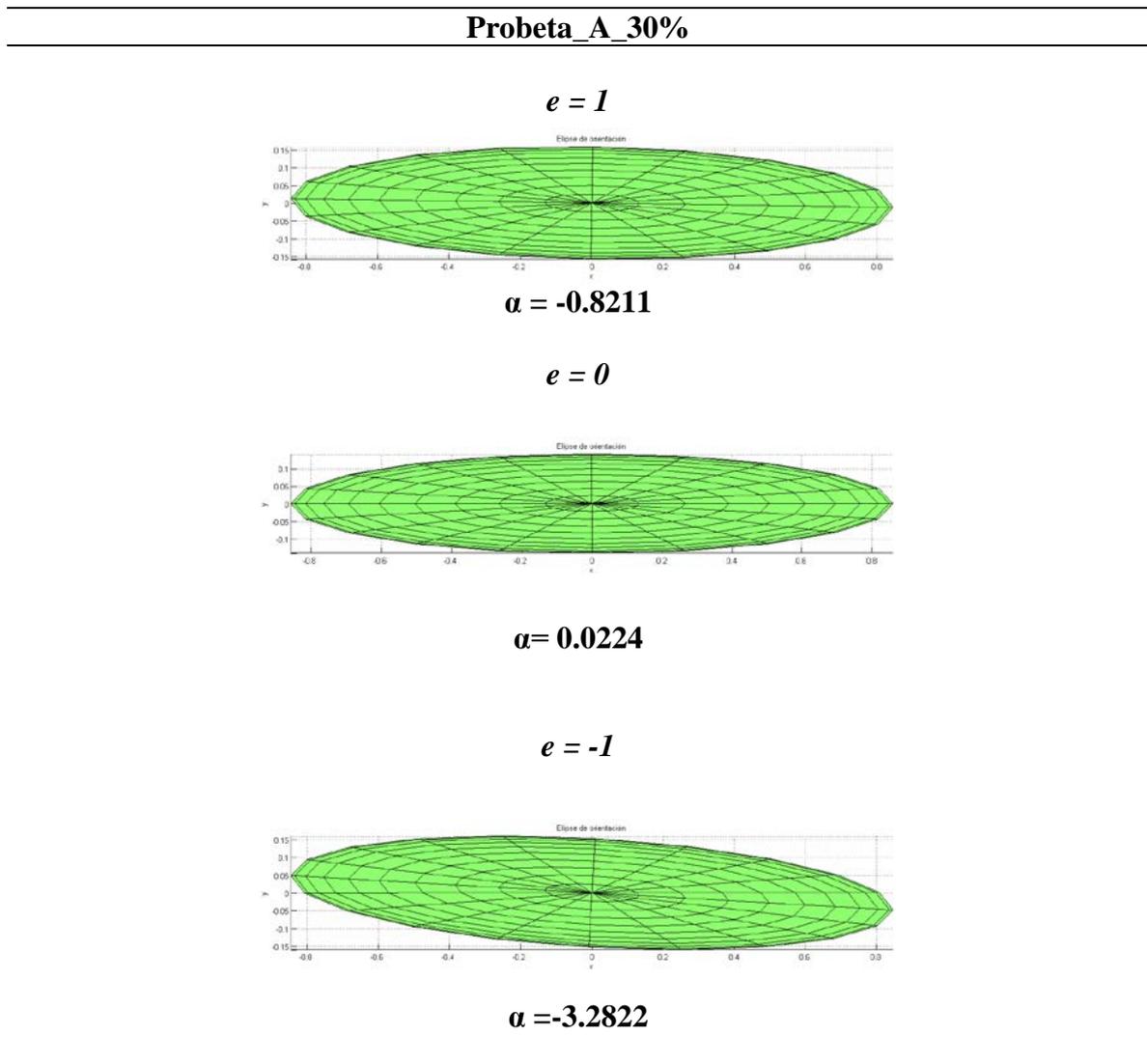


Figura 5.15: Elipses de Orientación. Probeta_A_30%, espesores 1, 0 y -1. **Fuente:** Autores.

En la figura 5.16, se muestran las elipses generadas, con los valores del ángulo preferente de la probeta_B.30%, se observó que la orientación de las fibras GAK es en sentido del flujo, los valores de la probeta oscilan entre los ángulos -2.25° a 2.06° . La disposición muestra que las fibras tienden a alinearse con respecto al eje.

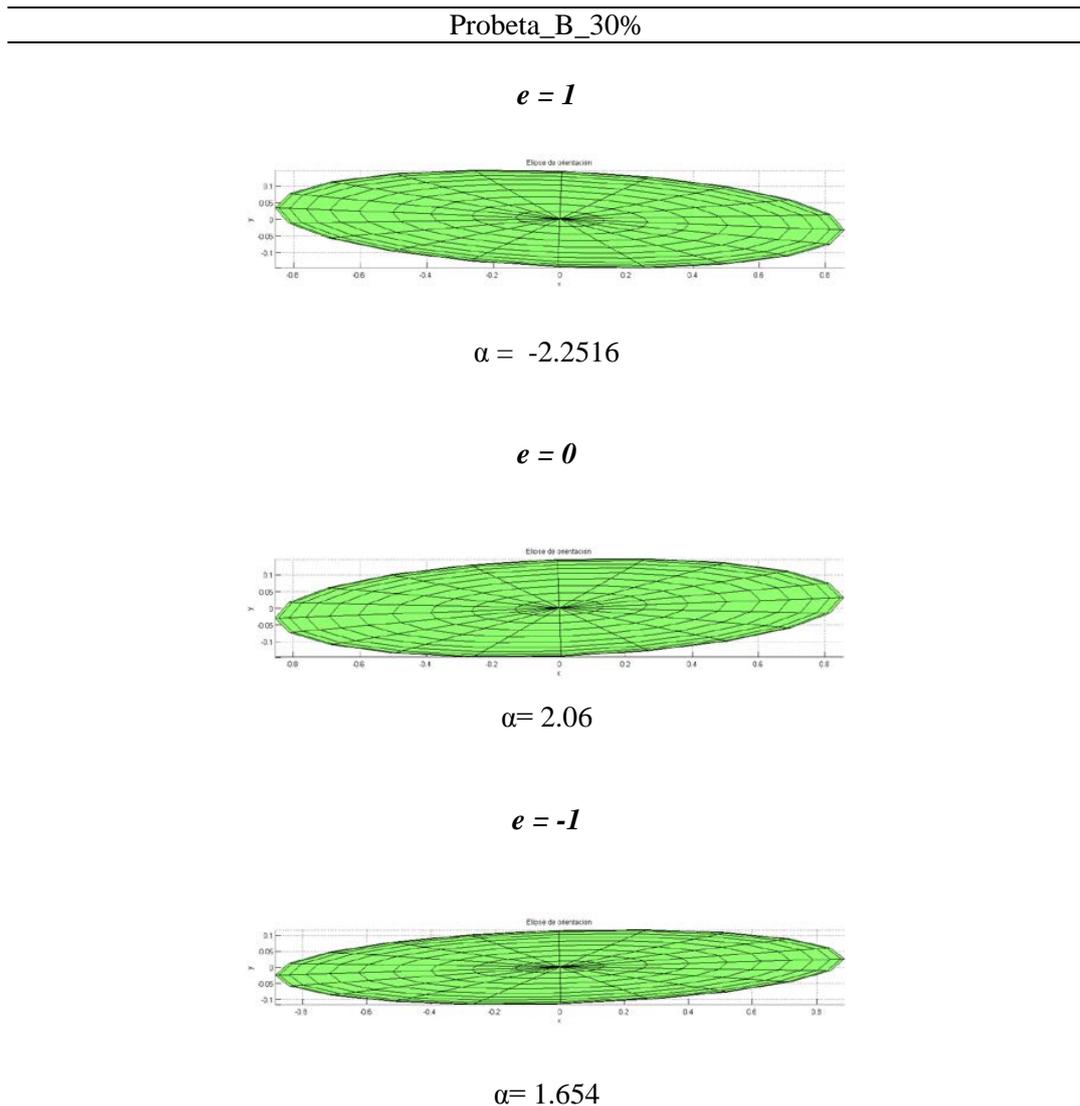
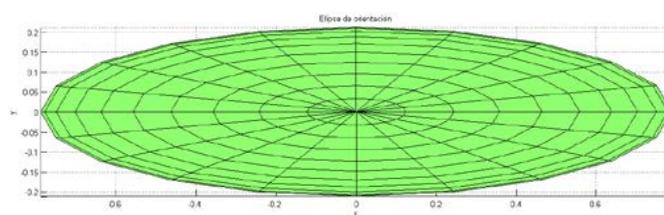


Figura 5.16: Elipses de Orientación_ Probeta_B.30% espesores 1, 0 y -1. **Fuente:** Autores.

En la figura 5.17, se muestra las elipses formadas por el ángulo preferente de las fibras GAK. El ángulo preferente de esta probeta se encuentra entre los valores -3.09° y 0.60° , los mismos que muestran una alineación de las fibras con respecto al flujo.

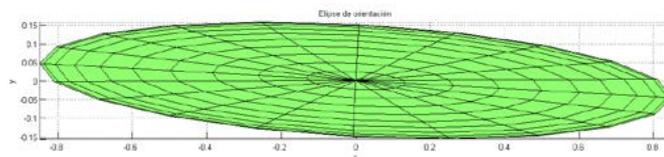
Probeta_A_40%

$$e = 1$$



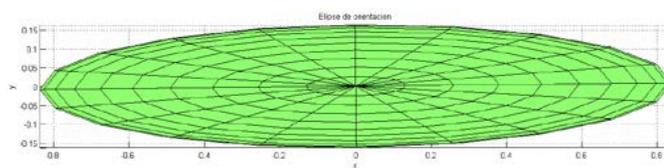
$$\alpha = 0.053$$

$$e = 0$$



$$\alpha = -3.0918$$

$$e = -1$$



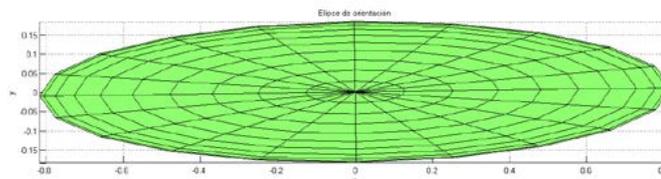
$$\alpha = 0.6034$$

Figura 5.17: Elipses de Orientación_ Probeta_A_40% espesores 1, 0 y -1. **Fuente:** Autores.

En la figura 5.18, se presentan las elipses de la probeta_B_40%, que indican alineación de las fibras, Los valores del ángulo preferente varían entre 0.53° a 1.03° , indicando que las fibras poseen un ángulo preferente en sentido del flujo.

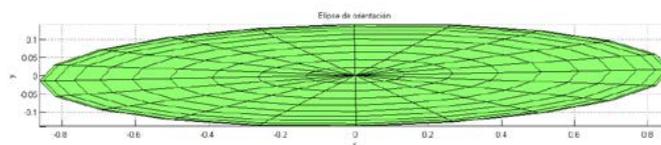
Probeta_B_40%

$e = 1$



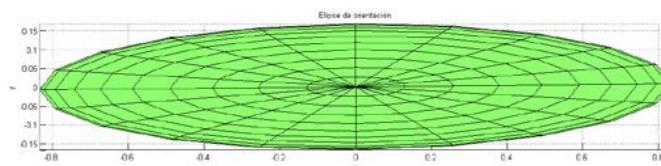
$\alpha = 0.7612$

$e = 0$



$\alpha = 1.03$

$e = -1$



$\alpha = 0,5349$

Figura 5.18: Elipses de Orientación_ Probeta_B_40% espesores 1, 0 y -1. **Fuente:** Autores.

5.2 Conclusiones

Los modelos matemáticos que se utilizaron para el desarrollo de este trabajo de investigación, fue el modelo del tensor de orientación planar, el método de elipses y el parámetro de orientación (eigenvalue). Para la obtención de las probetas finales, previamente se realizaron varios tipos de probetas, variando las dimensiones de las muestras, el tipo de material, equipos y moldes para el embebido de las mismas, debido a que el trabajo de investigación fue experimental, puesto que la información existente en su mayoría hace referencia a materiales poliméricos compuestos con fibras artificiales, siendo escasa la información referente al desarrollo de probetas de materiales poliméricos compuestos con fibras cortas naturales.

Se observó que en general las fibras cortas de GAK están orientadas en la dirección principal del flujo de material. La técnica de manufactura por inyección mostró una variación del estado de orientación en las probetas con el 30% de concentración de fibras GAK entre 0,8065 y 0,8890 lo que representa un 9,37%. En las probetas con el 40% de concentración de fibras la variación del estado de orientación estuvo entre 0,7340 y 0,8846 representando un 17,02%. Los ángulos preferentes para las probetas con el 30% de concentración de fibras GAK son menores en el nivel de espesores 0 y son mayores en el nivel de espesores -1, lo cual indica que en el centro de las probetas las fibras se encuentran mejor alineadas con respecto a eje x.

Los ángulos preferentes para las probetas con el 40% de concentración de fibras GAK son menores en el nivel de espesores 1 y son mayores en el nivel de espesores 1, lo cual indica que en los bordes de las probetas las fibras se encuentran mejor alineadas con respecto a eje x.

Las probetas con el 30% de refuerzo mostraron un efecto de incremento de la dispersión de orientación de $17,83^{\circ}$, y en las probetas con el 40% mostraron un incremento de la dispersión de orientación de $20,095^{\circ}$.

5.3 Recomendaciones

Luego de los procesos de inyección y extrusión las fibras sufren rotura y alcanzan longitudes entre 0.25 y 1.5mm por lo que no se recomienda para ésta técnica longitudes mayores.

Las probetas analizadas del material polimérico compuesto de matriz de polipropileno, se reforzaron con fibras cortas GAK sin tratamiento previo, únicamente un tamizado

para obtener fibras de longitudes similares, para análisis posteriores se recomienda utilizar fibras cortas GAK mediante otros procesos de extracción que garanticen mayor uniformidad de tamaños.

Para realizar el proceso de corte de las muestras, es necesario seleccionar el disco de corte correcto, dependiendo del tipo de material a cortar, la sujeción debe ser realizada con total cuidado para evitar que los elementos a cortar se desplacen durante el proceso, la sujeción debe ser perpendicular al disco de corte, con eso se garantiza un corte correcto de las muestras. La refrigeración durante este proceso es indispensable, porque debido al calor generado por la abrasión del disco, se altera la estructura interna del material de las muestras.

Antes de realizar el embebido de las muestras, se debe tener en cuenta que no existan residuos de resina poliéster e impurezas en el interior del molde, para evitar problemas al momento de extraer la probeta del molde. Durante el proceso de lijado de las probetas, es necesario un correcto pegado de las lijas, evitando la formación de cámaras de aire entre el plato de montaje y la lija, esto provoca deformaciones en la superficie de la probeta, que finalmente afecta en el contraste al momento de la captura de la imagen.

Al realizar el pulido de las probetas, se debe observar constantemente la superficie pulida en el microscopio, con la finalidad de constatar que no existan impurezas en la superficie del paño de pulido, que pueden ocasionar deformaciones en dicha superficie, otra causa que provoca deformaciones en la superficie de pulido, es que las fibras naturales GAK pueden desprenderse de la matriz y adherirse al paño dejando marcas en la probeta. En la adquisición de las imágenes, es necesario que la posición de los filtros y ajuste de brillo sea la misma, para adquirir todas las imágenes bajo las mismas condiciones de proceso, con la finalidad de realizar una configuración de macro que permita un procesamiento de imágenes en iguales condiciones para todas las imágenes adquiridas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

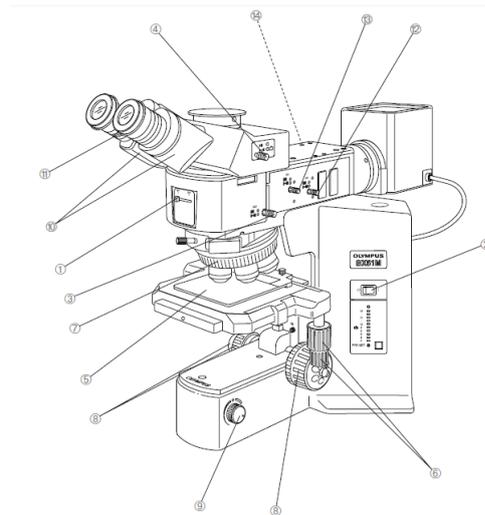
- [1] ADVANI, S. G.; III, C. L. T. The use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fiber composites. *Journal of Rheology (1978-present)*, The Society of Rheology, v. 31, n. 8, p. 751–784, 1987.
- [2] MELKUSCH E.A. LEHNER, W. G. B. Fibre orientation in short fibre reinforced thermoplastics i. contrast enhancement for image analysis. *Elsevier journal homepage: www.elsevier.com/locate/compscitech*, v. 1998, p. 3, May.
- [3] BAY, R. S.; TUCKER, C. L. Stereological measurement and error estimates for three-dimensional fiber orientation. *Polymer Engineering & Science*, Wiley Online Library, v. 32, n. 4, p. 240–253, 1992.
- [4] VÉLEZ-GARCÍA, G. M. *Experimental Evaluation and Simulations of Fiber Orientation in Injection Molding of Polymers Containing Short Glass Fibers*. Tesis (Doutorado) — Virginia Polytechnic Institute and State University, 2012.
- [5] KANG, Y. H. L. . S. W. L. . J. R. Y. K. C. . T. J. Characterization of fiber orientation in short fiber reinforced composites with an image processing technique. *Mat Res Innovat*, p. 65–72, July 2002.
- [6] CHUNG, D. H.; KWON, T. H. Fiber orientation in the processing of polymer composites. *Korea-Australia Rheology Journal*, v. 14, n. 04, p. 175–188, June 2002.
- [7] YASUDA, K.; KYUTO, T.; MORI, N. An experimental study of flow-induced fiber orientation and concentration distributions in a concentrated suspension flow through a slit channel containing a cylinder. *Rheologica acta*, Springer, v. 43, n. 2, p. 137–145, 2004.
- [8] BOU, S. F. *Aplicación del análisis de imágenes a la determinación de la orientación de fibra larga de vidrio en diferentes condiciones de proceso*. Disertación (Mestrado) — UNIVERSIDAD POLITECNICA VALENCIA, 2006.
- [9] TALBOT T. LEE, D. J. D. H. . L. W. H. H. Image analysis of insulation mineral fibres. *CSIRO, Mathematical and Information Sciences, Locked Bag 17, North Ryde, NSW 2113, Australia*, v. 3, p. 251 – 268, July 2000.
- [10] FIADEIRO, P. et al. The surface measurement of fibre orientation anisotropy and misalignment angle by laser diffraction. *Journal of pulp and paper science*, Pulp and Paper Technical Association of Canada, v. 28, n. 10, p. 341–346, 2002.
- [11] ZAK M. HABERER, C. B. P. B. B. G. Estimation of average fibre length in short-fibre composites by a two - section. *Composites Science and Technology*, v. 60, p. 23, 2000.

- [12] PATCHARAPHUN, S.; OPASKORNKUL, G. Characterization of fiber length distribution in short and long glass fiber reinforced polypropylene during injection molding process. *Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University; Thailand*, v. 5, p. 392 – 397, 2008. Corresponding author, e-mail: fengsjpc@ku.ac.th.
- [13] HEGGLI, M. Complex multiphase materials: Microstructure characterization and finite element property predictions. *Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.*, 2005.
- [14] NISTAL, A. S. A. M. Proceso digital de imágenes microscópicas. *Universidad de Oviedo Servicio de Proceso de Imágenes*, p. 117 – 133.
- [15] TECHNOLOGIES, P. *MEGA-M250 Instruction Manual*. Tucson USA.
- [16] TECHNOLOGIES, P. *FEMTO 1000 Polishing Head*. Tucson USA.
- [17] ALATORRE, D. J. A. A. Contribuciones de la física en la historia de la microscopía. *Revista Digital Universitaria.*, v. 6, n. 7, p. 11, 2005.
- [18] MINGUEZ, J. P. Estudio nanométrico de biocompatibilidad y adhesividad celular a biomateriales utilizados en cirugía ortopédica. *Universidades Santiago de Compostela Galicia. España*, 2008.
- [19] Universidad Politécnica de Valencia. La deformación plástica. www.upv.es/materiales/fcm/fcm04/ptrb4_2_.html.
- [20] OLYMPUS. *MANUAL OLYMPUS STREAM Imaging Software*. Münster-Germany, 2008.
- [21] TS., K. *A method to Determine Three Dimensional Fiber Orientation in Fiber Reinforced Polymers*. [S.l.: s.n.], 1987.
- [22] OSUNA, D. A. *Efectos de la Incorporación de Polietilentereftalato sobre la Estructura y Propiedades Mecánicas de Materiales Compuestos Polipropileno - Vidrio*. Tesis (Doutorado) — UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA Departament de Ciències de los Materials e Ingeniería Metalúrgica Terrasa - Catalunya - España, 2002.
- [23] HANADA, T.; WATANABE, J. An error estimation of the reconstruction algorithm in computed tomography. *University of Electro Communications*, v. 891, p. 205–217, 1995.
- [24] RADIOLOGY, T. B. I. EM1 patents on computed tomography: History of legal actions. *Journal of Radiology*, p. 315 – 317, 1994.
- [25] OLYMPUS. *Redefining Materials Science (Materials Imaging Software Start, Basic, Essentials, Motion) Steam Family*. Germany, 2010.
- [26] FANDELI. *Catálogo General de Productos*. México, 2013.
- [27] MUR, F. J. G. et al. *Metalografía*. [S.l.]: Univ. Politèc. de Catalunya, 2005.
- [28] J., D. G. A. A. *MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO Y TÉCNICAS ANALÍTICAS A SOCOIADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ELECTROCATALIZADORES Y SUPERFICIES DE ELECTRODOS*. Buenos Aires - Argentina: [s.n.], 2003.

- [29] FERNÁNDEZ, J. D. S. *Estabilidad coloidal de nanoestructuras liposómicas*. [S.l.]: Univ Santiago de Compostela, 2007.
- [30] MOSHTAGH, N. *Vizualizing Orientation Tensors with Matlab/Octave*. May 2009. Disponible en: <http://sachinashanbhag.blogspot.com/2010_05_01_archive.html>.
- [31] OLYMPUS. *OLYMPUS Instructions BX51M System Metallurgical Microspe*. Miami - USA, 2008.

ANEXO A – ESQUEMA DEL MICROSCOPIO OLYMPUS BX51M

La adquisición de imágenes se realizó con la ayuda de una cámara digital olympus DP 72 , OLYMPUS Stream software, que está incorporada a un microscopio OLYMPUS BX51M campo claro y campo oscuro, microscopio de luz reflejada/ Cabeza trinocular y de alta resolución, 5X, 10X, 20X, 50X y 100X objetivos. A continuación se presenta el flujograma empleado para la adquisición de la imagen [31].



1. Palanca Selectora
2. Interruptor principal
3. Perilla de filtro ND
4. Perilla de selección de la trayectoria de luz
5. Placa de platina
6. Mando del eje X-Y
7. Perilla de ajuste de brillo
8. Escala de ajuste de la distancia
9. Anillo de ajuste de dioptrías
10. Diafragma de apertura (AS)
11. Diafragma de campo (FS)
12. Inserción del filtro desde la izquierda