

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y DE MATERIALES



TESIS DOCTORAL

**Aplicación del análisis de imágenes
a la determinación de la orientación
de fibra larga de vidrio en diferentes
condiciones de proceso.**

Autor:

Santiago Ferrándiz Bou

Dirigida por:

Dr. Juan López Martínez

2006

A Cris y Marta por ser como son

AGRADECIMIENTOS

A todos los compañeros del departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales por el apoyo y comprensión durante la elaboración del presente trabajo.

Al Dr. Juan López por su apoyo, dirección y sobre todo amistad.

A Miguel, Chechu, Miki, Teo, Miguel Angel, David, Raul, JuanMa, Rafa y Javi, que sin su colaboración no se hubiera podido completar el trabajo.

A la empresa Plásticos Erúm, S.L. por su colaboración en la obtención del material.

Resumen	
Introducción	1
1.- Antecedentes	9
1.1 De la fibra larga de vidrio	9
1.2 Del tratamiento de imágenes	11
1.3 Del estado del arte	18
2.- Objetivos	49
2.1 – Planificación de la investigación	50
3.- Experimental	53
3.1 Maquinaria	53
3.2 Molde	53
3.3 Material	55
3.4 Diseño de experimentos	56
3.5 Diseño mediante matrices ortogonales	57
4.- Desarrollo e implementación del procedimiento	63
4.1 Introducción	63
4.2 Desarrollo del procedimiento operatorio	68
4.3 Implementación de la macro de algoritmos	93
4.4 Análisis de resultados y cálculo de errores	95
4.5 Conclusiones parciales	110
4.6 Referencias	112
5.- Aplicación del sistema propuesto a muestras transformadas por inyección	117
5.1 Introducción	117
5.2 Procedimiento operatorio	120
5.3 Análisis de resultados parciales	131
5.4 Análisis de resultados globales	196
5.5 Conclusiones parciales	206
5.6 Referencias	207
6.- Aplicación del sistema propuesto a muestras transformadas por compresión	211
6.1 Introducción	211
6.2 Procedimiento operatorio	214
6.3 Resultados y discusión	216
6.4 Determinación de errores	223
6.5 Conclusiones parciales	224
6.6 Referencias	225
7.- Aplicación del sistema propuesto a muestras transformadas por RTM	229
7.1 Introducción	229
7.2 Procedimiento operatorio	232
7.3 Resultados y discusión	234
7.4 Conclusiones parciales	243
7.5 Referencias	244
8.- Conclusiones	247

RESUMEN

El uso de materiales reforzados con fibra larga de vidrio ha evolucionado de manera creciente en los últimos años. Este hecho ha provocado que se necesite conocer el comportamiento de determinadas características mecánicas del mismo y que por lo tanto se busque una evaluación del comportamiento del mismo.

El análisis de imágenes se muestra como una metodología válida y eficaz en la determinación de la orientación de fibras. Mediante una secuenciación optimizada de algoritmos se consigue identificar, aislar y medir la orientación de las fibras de refuerzo en materiales compuestos. Acompañado de una metodología simple de preparación de muestras, podemos establecer un sistema de análisis efectivo.

Esta metodología se ha aplicado en diversos procesos de transformación en los que habitualmente están implicados los refuerzos de fibra de vidrio en composites. Fundamentalmente se analiza el proceso de inyección, aunque no se olvidan procesos de compresión y rtm. Posteriormente se realiza el análisis del error en el que se incurre en la implementación del sistema.

SUMMARY

The use of materials reinforced with long glass fiber is flood in the last years. This fact has caused that it is needed to know the behaviour certain mechanical characteristics he himself and who therefore an evaluation of the behaviour of he himself looks for. The analysis of images is like a valid and effective methodology in the determination of the fiber direction. By means of an optimized secuention of algorithms one is able to identify, to isolate and to measure the direction of fibers of reinforcement in compound materials. Accompanied by a simple methodology of preparation of samples, we can establish a system of effective analysis. This methodology has been applied in diverse processes of transformation in which habitually the fiber glass reinforcements are implied in composites. Fundamentally the injection process is analyzed, although processes compression and rtm do not forget. Later the analysis of the error is made which it is incurred the implementation of the system.

RESUM

L'ús de materials reforçats amb fibra llarga de vidre ha tingut una evolució creixent en els últims anys. Este fet ha provocat que es necessite conèixer el comportament de determinades característiques mecàniques dels mateixos i que per tant es busque una avaluació del comportament d'aquestos.

L'anàlisi d'imatges es mostra com una metodologia vàlida i eficaç en la determinació de l'orientació de fibres. Per mitjà d'una seqüenciació optimitzada d'algoritmes s'aconsegueix identificar, aïllar i mesurar l'orientació de les fibres de reforç en materials compostos. Acompanyat d'una metodologia simple de preparació de mostres, podem establir un sistema d'anàlisi efectiva.

Esta metodologia s'ha aplicat en diversos processos de transformació en què habitualment estan implicats els reforços de fibra de vidre en composites. Fonamentalment s'analitza el procés d'injecció, encara que no s'obliden processos de compressió i rtm. Posteriorment es realitza l'anàlisi de l'error en què s'incorre en la implementació del sistema.

INTRODUCCIÓN

Introducción

1.- Justificación

En materiales compuestos la distribución de la orientación de la fibra es una de las variables más determinante en las propiedades mecánicas de este tipo de compuestos. Sistemas con la misma composición pueden variar sus propiedades si en el proceso de transformación la orientación resultante de la fibra no es equivalente.

Sin embargo este dato es en ocasiones obviado, debido principalmente a la dificultad de obtener la distribución de esta fibra. Se puede recurrir a diferentes técnicas para obtener la distribución de estas fibras. Mediante rayos X podemos obtener la medición de alguno de estos ángulos, si la matriz es amorfa y la fibra cristalina; así mismo la difracción de Fraunhofer es utilizada en matrices transparentes. Pero la preparación de las muestras, que difiere según el tipo de compuesto, y su posterior análisis de imagen es el método que más esfuerzos de investigación acapara debido a la relativa sencillez de los equipos utilizados.

La descripción cuantitativa de la orientación de las fibras se puede encontrar en los trabajos de Advani, Tucker y Thomason. Como trabajo de determinación más simple de la orientación esta el trabajo de Yasuda.

En resumen, aunque ya se proponen métodos para la medición de la orientación, continúan apareciendo nuevas aplicaciones que perfeccionan las mediciones. En nuestro caso diseñando un procedimiento operativo capaz de realizar gran número de análisis y aplicable al estudio de los materiales termoplásticos reforzados con fibras largas de vidrio.

La Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA), está ubicada dentro de una zona donde el sector industrial dedicado a la transformación y fabricación de productos plásticos tiene un gran peso. A causa de las necesidades de la industria cercana, nuestro grupo de investigación "Grupo de Investigación de Procesado y Caracterización de Materiales Plásticos" cuenta entre sus líneas de investigación una línea referente a la transformación de materiales plásticos y compuestos, orientada a la transformación en las propiedades finales, preferentemente analizando el comportamiento mecánico¹². Dentro de los diferentes materiales compuestos aquellos en los que más se está trabajando dentro de nuestro grupo son los materiales con matriz termoplástica. Estos materiales presentan la ventaja de la rápida transformación, así como la fabricación de piezas de geometría complejas mediante inyección. Por el contrario sus propiedades son más dependientes de las variables de proceso y en una misma pieza podemos encontrar diferentes distribuciones de la fibra debido al diferente flujo de la matriz termoplástica. Por ello debemos disponer de una herramienta de análisis rápido y eficaz que permita el examen de una pieza y con diferentes condiciones de proceso, que en técnicas de inyección son muy variadas (presiones, temperaturas, materiales, moldes, velocidades de inyección, etc.).

2.- OBJETIVOS

Para dar una solución al problema presentado, nuestra hipótesis plantea la posibilidad de alcanzar datos objetivos y repetitivos de la distribución de orientación de fibras largas mediante el empleo de análisis bidimensional de imágenes. En nuestro caso se ha diseñado un procedimiento operativo capaz de realizar gran número de análisis y aplicable al estudio de los materiales termoplásticos reforzados con fibras largas de vidrio.

Con este fin nuestro trabajo se ha estructurado en las siguientes etapas:

- Obtención de datos. Para ello se han realizado diversas pruebas de captación de imágenes tridimensionales y bidimensionales. La captación de imágenes tridimensionales necesita de unos tratamientos posteriores extremadamente complejos³. La captación de imágenes bidimensionales nos ofrece la posibilidad de determinar las orientaciones de las fibras en la capa de trabajo y a su vez supone un método más sencillo de realizar la captura de las mismas imágenes, aportando datos parecidos.
- Diseño de una macro de algoritmos que permitan el tratamiento de las imágenes de una manera automatizada, sin apenas intervención del usuario y que además no genere un error de cálculo elevado.
- Estudio y determinación del error obtenido en el proceso de captura y determinación de las frecuencias de orientación y de la función de orientación de las fibras.
- Aplicación y estudio del proceso de análisis sobre diversas muestras de materiales transformados mediante inyección. Posteriormente se realiza el estudio de la orientación de fibras y determinadas propiedades del material.
- Estudio y aplicación del proceso de análisis diseñado sobre diversas muestras de materiales transformados mediante moldeo por compresión con fibras orientadas al azar y fibras totalmente orientadas.
- Aplicación del proceso de análisis sobre diversas muestras de otros materiales transformados con objeto de conocer el comportamiento del diseño de la macro con otro tipo de fibra de vidrio.

3.- EXPERIMENTAL

En la parte de diseño de la macro de algoritmos y software de tratamiento de imágenes se ha utilizado el software ImageJ. Este software cuenta con la ventaja que es freeware y trabaja bajo licencia GPL. Otra de las ventajas encontradas en el mismo es la posibilidad de programar, estudiar y retocar cualquier tipo de plugin que se aplique en el proceso, dado que está íntegramente programado en Java.

Design Expert™ que es el programa que nos permitirá trabajar con tecnologías de diseño de experimentos y sus posteriores interpretaciones estadísticas de los resultados.

Las muestras han sido inyectadas mediante una inyectora Mateu&Sole modelo Meteor 270/75. El molde empleado para la transformación es de una configuración dinámica de cuatro figuras dos de ellas del tipo mostrado en la figura. Trabajamos sobre una probeta de ensayos charpy.

También se ha utilizado una prensa de platos calientes de la marca Robima, S.A. (Valencia, España) y una mufla de la casa Heron modelo 12/200. El material óptico que se ha utilizado ha sido una Lupa Olympus modelo SZ-CTV en la que se han utilizado las lentes de 4 y 5x aumentos. Esta lupa incorpora un sistema de adaptador de cámara fotográfica. La cámara utilizada para las capturas de las imágenes de las muestras es una Olympus Canmedia C-3030 zoom.

Otras imágenes se han capturado mediante el uso de una lupa Olympus BH- MTV con lente de 10x aumentos, dotada con un sistema de captura de imágenes mediante una cámara Sony CCD-iris modelo SSC-C370 P. A través de la cámara se transmitían las imágenes a una placa capturadota que nos permitía guardar las imágenes.

El material que se ha empleado para realizar las comprobaciones del procedimiento operatorio ha sido un PP reforzado con 50% de fibra larga de vidrio, marca Celstran™ PP –GF50-04 0403P10/10, de la casa Ticona©. Según la información que obra en nuestro poder este material esta térmicamente estabilizado y además químicamente enganchado a la fase matriz de polipropileno. Los pellets son cilíndricos y de una media de 10 mm de longitud.

4.- RESULTADOS

Aunque existen varios sistemas que pueden permitir la medida de la distribución de la orientación de fibras, en nuestro caso nos basaremos inicialmente en la sistemática de medición desarrollada por Yasuda, la cual nos permite simplificar algunas de las mediciones que deberían efectuarse.

Tras realizar un estudio preliminar de los distintos tipos de programas de tratamientos de imágenes existentes se opto por realizar la elección de aquel que mejor podía adaptarse a nuestras necesidades. La primera premisa que se tuvo en cuenta a la hora de realizar la elección fue la capacidad de adaptación a nuestros objetivos que podía aportar el programa. La segunda premisa fue la capacidad de programación que se encontraba en el programa. Programas como Image Tools permitían la generación de plugins, pero de una manera bastante complicada. Otros como Image Lab, se pueden definir como programas propietarios cerrados, lo mismo que sucede como Image Pro Plus o el IPTK, que además de ser propietarios, necesitan ser adquiridos por un determinado precio. Por nuestra parte nos llamo la atención la versatilidad y gran desarrollo que ofrecía el ImageJ, que además de tener licencia GPL, estaba programado en Java y permitía la sencilla incorporación de tantos elementos programables como fueran necesarios.

Una vez trabajamos con el programa se hacia necesario alcanzar dos objetivos mas dentro del aparatado de tratamientos de imagen. El primer objetivo era establecer cuales eran los algoritmos necesarios aplicables, tanto a nivel solitario, como a nivel de combinación de otros que nos permitiera determinar los objetivos de medición de ángulos. Esto se consiguió con una secuencia de algoritmos automatizados y reprogramados en una macro y que nos permitiera la repetibilidad de los resultados de

medición. Un segundo aspecto que se abordó con esta metodología fue la determinación del error que estaba cometiendo en cada medición, dependiendo de cada una de las combinaciones posibles de fibras. Los errores obtenidos en las mediciones se pueden considerar como admisibles y dentro de los rangos comparables con los obtenidos por Vahlund.

El siguiente paso una vez determinada la metodología, fue aplicarla a la medición y cálculo de orientaciones de fibras obtenidas bajo distintos procesos de transformación. El primer proceso ensayado fue la comprobación de fibras en el proceso de RTM. En este caso no supone una problemática grave, puesto que la orientación no influye en las características del producto final obtenido. Lo significativo es que las fibras las orientamos tal y como nos interesa y al final del proceso, las mismas quedarán de la manera predeterminada.

Un caso aparte lo supone la fibra orientada aleatoriamente y al que también se aplicó la metodología.

El siguiente proceso que se aplicó la metodología fue en el procesado por compresión. En este caso se ha confeccionado una comparativa entre funciones de distribución de fibras emplazadas aleatoriamente y emplazadas con orientaciones predeterminadas.

Finalmente se ha abordado el proceso de transformación por inyección en el que las variables de proceso más influyen en la orientación de las fibras. Para iniciar el estudio se delimitaron las variables de procesado que más nos van a influir en la orientación. Todas estas variables se trataron con herramientas de diseño de experimentos y además con paquetes de apoyo estadístico como Design Expert y Statgraphics. La aplicación estas herramientas nos ha permitido diseñar el tipo y el número de inyectadas que debían realizarse para cada ensayo y además nos ha permitido confeccionar una metodología de trabajo sobre la probetas de inyección y su posterior preparación para el estudio de orientaciones.

Una vez tomadas las imágenes de las fibras en las probetas se ha procedido a aplicar la macro de cálculo y determinar con ello los valores de la función de distribución de la orientación de las fibras. Determinado este aspecto nos ha permitido realizar ciertas comparaciones entre probetas y determinadas características mecánicas.

5.- APORTACIONES PROPIAS

Esta investigación nos ha permitido analizar una serie de algoritmos aplicados en el campo del tratamiento de imágenes. Se ha podido comprobar que tipología de algoritmos no eran aplicables y compatibles con los objetivos del estudio y también cuales eran aquellos que nos podían facilitar la detección y posterior cálculos de orientaciones.

Por ello se ha podido determinar que combinación de algoritmos eran aplicables en el tratamiento de las imágenes y se ha generado un ensamblaje de los mismos con objeto de automatizar los análisis.

Ello nos ha permitido trabajar y generar una metodología de tratamiento de muestras que nos permitiera poder aplicar con éxito los análisis de imágenes desarrollados anteriormente.

Establecer una cierta correlación entre la orientación de fibras largas y ciertas propiedades mecánicas dependiendo del procesos de transformación que se este realizando.

6.- DIFUSION DE RESULTADOS

¹ S. Ferrándiz; J. Seguí; M.J. Reig; J.A. García. “ The effect of processing variables on environmental stress cracking resistance in LDPE injected parts”. New Developments in Polymer Analysis, degradation, and stabilization. (ISBN 1594545111). Nova Science Publishers Inc. New York 3, (2005) 33-44

² Reig, M., Segui, V.J., Ferrándiz, S., Zamanillo,J. “An Evaluation Of Processability By Injection Molding Of Abs/Pc Blends Obtained From Recycled Materials”. Journal of polymer eginieering. En prensa. 2006

³ J. Risent, M. Reig, R. Navarro, J. López, S. Ferrándiz. “3D reconstruction of surfaces in the human body”. Journal of advanced manufacturing, En prensa. 2006

7.- CONGRESOS

S.Ferrándiz; R. Navarro; MJ. Reig; J.López “ Análisis and interpretation of the fiber orientation in composite materials by means image processing tools”. COMAT 2005. International Conference on Science and technology of composite materials (ISBN 987-544-162-7)- Universidad Nacional de Mar del Plata. 2005

S.Ferrandiz, J.López, R.Navarro, MJ Reig. “ Aplicación del Image Tools e ImageJ al analisis de orientación de fibras largas en materiales compuestos”. Materiales compuestos 2005. UPV. (ISBN 84-9705-821-6)

ANTECEDENTES

1.- Antecedentes

1.1- De la fibra larga de vidrio

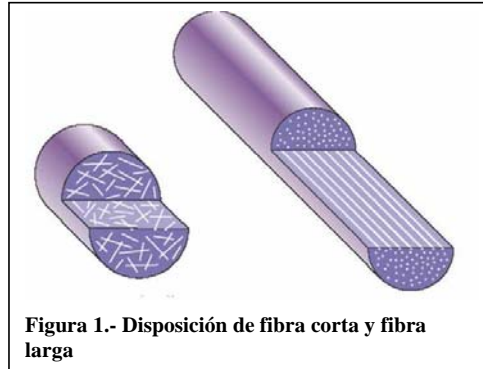
Es notable el incremento del uso de materiales compuestos en la fabricación de elementos estructurales. Así, los materiales tradicionales como el aluminio, acero o madera van cediendo aplicaciones a materiales compuestos avanzados. Los materiales compuestos de matriz polimérica presentan unas excelentes relaciones de rigidez frente a peso o bien de resistencia frente a peso.

En los últimos años se ha ido incrementando el uso de polipropileno reforzado con fibra de vidrio en aplicaciones estructurales y en ingeniería aplicada, por ejemplo en automoción¹. Este tipo de termoplásticos de matriz polimérica combinan la facilidad de transformación con ciertas ventajas como sus características mecánicas o una vida prácticamente ilimitada. Su potencial reside en el elevado volumen de procesado combinado con excelentes características finales, así como sus bajos costes de procesado.

Por todo lo expuesto se pueden encontrar en el mercado distintos rangos de composites basados en el tipo de fibra que se mezcla con el polipropileno o bien en el porcentaje de la misma que la compone. Podemos citar por lo tanto una serie de categorías que se pueden encontrar hoy día en el mercado:

- PP combinado con fibras inorgánicas aplicadas al campo de la inyección
- PP reforzado con fibras cortas de vidrio, con una media de longitud de fibra de más de 1 mm.
- PP reforzado con fibra larga de vidrio, con una media de longitud de fibra entre 1 y 25 mm.
- PP reforzado con fibra, más conocido como random, en el que las fibras se encuentran entre longitudes de 10 y 50 mm.
- PP con fibra de vidrio continua, también denominada pre-peg.

Las diferencias estructurales entre los distintos tipos de refuerzo, fundamentalmente entre refuerzos de fibra corta frente al refuerzo con fibra larga, pueden observarse en la figura 1. Para una disposición de fibra corta puede observarse una disposición de orientación de fibras más aleatoria, producida evidentemente por la menor longitud de las fibras. Por el contrario al emplear fibras largas, no sucede lo mismo que en el caso anterior.



Otra de las características diferenciadoras que podemos establecer en la fibra larga² radica en el tipo de proceso de fabricación³⁻⁴. Existen varios tipos de tecnologías que se aplican en la fabricación de los termoplásticos reforzados con fibra larga de vidrio (TRFLV). Estos procesos son: la pultrusión fundida, el DRIFT, pultrusión en polvo, sistema StaMax®, Twintex® y el compounding en línea.

En el proceso de pultrusión fundida (melt pultrusión) abarca prácticamente la totalidad de la producción actual de TRFLV, incluyendo a suministradores como Ticona®, Ge® LNP®, RTP®, MTI®, Borealis® o Atochem®. Se aplica una nueva tecnología de impregnación continua de la fibra seguido de la realización del corte de la misma a la longitud deseada. Esto permite obtener longitudes de fibra de entre 7 mm. y 20 mm. Quizás una de las mejores propiedades que pueden obtenerse es una excelente resistencia al impacto, tal y como han expresado diversos autores⁴.

En la tecnología DRIFT®³ se diferencia del método anterior en el precalentamiento previo de la fibra de vidrio antes de entrar en contacto con la resina. Este precalentamiento de la fibra provoca que se elimine la humedad en la fibra. Se puede utilizar este sistema en cualquier tecnología que permite incrementar el rendimiento de fabricación y además mejorar las características del material. Shulman ha licenciado esta tecnología para la producción de TRFFLV en el sector de automoción.

La pultrusión de polvo es utilizada por empresas como Baycomp® y Flexiline®. Este sistema consiste en utilizar un lecho fluidificado de resina en polvo, el cual permite impregnar el hilo de fibra. El filamento es cortado posteriormente en pellets o tejido en hojas. Estas estructuras u hojas se suelen utilizar para la fabricación de estructuras ortopédicas o insertos para calzado deportivo.

La tecnología denominada como StaMax™ es una marca registrada por un consorcio de las empresas Owens Corning® y DSM®. Esta tecnología es similar a la “melt pultrusión” exceptuando en la parte en la que la fibra de vidrio está recubierta inicialmente con un polímero de bajo peso molecular. Esta fibra se denomina como Performax®. Este sistema fue desarrollado por OC para materiales reforzados con fibra larga de vidrio. El Performax® es recubierto posteriormente con resina de polipropileno. Con este proceso se alcanzan velocidades de producción más elevadas que con el proceso de pultrusión por fundido (melt pultrusión).

Otra tecnología de impregnación es la conocida como Twintex³, desarrollada por Vetrotex, que consiste en un proceso en el cual se extruyen las fibras de polipropileno y la fibra de vidrio en una bobina continua. Posteriormente se realiza un calentamiento para acoplar la resina y la fibra de vidrio. A continuación se realiza el corte. Las empresas GE-LNP y Vetrotex han realizado una coalición de mercado según la cual LNP fabrica los pellets realizados según la tecnología Twintex pero aplicado al campo de la transformación por inyección. Estos pellets pueden ser posteriormente mezclados con material virgen (PP) hasta alcanzar la combinación de refuerzo necesaria o requerida por el cliente. Vetrotex se encarga de realizar el suministro de pellets para el moldeo por compresión. Este material permite su fácil combinación con otros como es el caso de la empresa Plastic Omnium para la fabricación de componentes de automoción.

El concepto de moldeo por compresión de materiales reforzados con fibra de vidrio (in-line compounding) fue desarrollado por Polymer Composites a mediados de los años ochenta, conjuntamente con Kannegiesser, que actuaba como suministrador de equipos. La tecnología utiliza un extrusor para derretir los pellets preformados de MRFLV, que entonces se colocan en un molde de compresión. Los pellets de MRFLV son más largos que los pellets tradicionales usados en el moldeo de inyección, (25 mm. contra 12.5 mm.).

Durante los últimos años otras compañías han llevado este concepto al nivel siguiente. En vez de usar pellets preparados, han desarrollado la organización de la línea tomando el polímero y la fibra simultáneamente, que después mezcla y se moldean en el mismo paso. Compañías tales como Composite Products Inc., de Lawton, y de Dieffenbacher aplican el sistema para el moldeo por compresión mientras otras compañías como Husky y Krauss-Maffei están haciendo lo mismo para la aplicación en el moldeo por inyección. Comparativamente se aplica más en Europa que en los EEUU. En Europa, hay aproximadamente 30 máquinas que están produciendo actualmente piezas de LFRT usando in-line compounding. Para justificar el alto coste de este tipo de inversión, esta tecnología se puede utilizar solamente en piezas de gran volumen. Los ejemplos de usos actuales son sobre todo automoción, incluyendo los protectores de carrocería de automóviles, de parachoques y de los tableros de instrumentación.

Una de las características que identifican a estos materiales es que el uso de fibras de vidrio largas en los materiales compuestos permite la formación de una estructura en el interior del material. Esta formación puede persistir incluso cuando se quema la pieza moldeada⁵. Este esqueleto es lo que le confiere a este material unas buenas características de resistencia al impacto⁵, absorbiendo la energía y disipándola a lo largo del molde. Además, le confiere un buen comportamiento a temperaturas elevadas y un buen módulo de creep.

1.2- Del tratamiento de imágenes

El procesado de imágenes se puede iniciar con una transformación de color a escala de grises⁵. Esto se ha efectuado así deliberadamente porque los elementos de nuestro interés se pueden distinguir más fácilmente.

Otro aspecto relevante es la resolución espacial. Podemos definirla como el número de píxeles que podemos incluir por unidad de longitud⁵. En el caso de la resolución no

existe un estándar, sino que su valor viene limitado por el mismo sistema. El efecto que se detecta con la disminución de la resolución es la indefinición de contornos de la imagen. Por lo tanto es conveniente digitalizar una imagen por encima de los 75 píxel/cm⁵. Resulta evidente que a mayor resolución se obtendrá una mayor matriz de datos. El tamaño de la imagen no depende de la resolución sino que es una característica del sistema de digitalización que utilizemos.

Otro aspecto fundamental a tener en cuenta es el formato con el que vamos a guardar nuestra información, es decir, el formato de la imagen. Una de las causas por las que no existe un consenso en el almacenaje de la imagen es debido a la gran cantidad de información que existe en cada una. Esto ha motivado que aparezcan gran cantidad de formatos que nos permitirán mantener la máxima información en el menor espacio posible. Aunque hoy día los ordenadores son muy potentes la manipulación gráfica de imágenes continúa acaparando gran cantidad de recursos informáticos.

Se pueden establecer dos categorías de almacenamiento de la información, la llamada compresión con pérdidas y la compresión sin pérdidas.

En la compresión sin pérdidas la información que contiene el archivo se conserva fielmente y se corresponde el mapa de píxeles con los valores de intensidad lumínica iniciales. Este tipo de almacenamiento se conoce como mapa de bits y responde a la extensión habitual de bmp. Evidentemente el tamaño del fichero que guardará esa información puede alcanzar tamaños grandes. Por el contrario cuando se busca un tamaño de fichero que sea inferior al que puede lograrse con el formato bmp se suele aplicar el formato jpeg. En este formato se aplica una compresión con pérdidas. Podemos trabajar también con sistemas de almacenamiento de información que se conocen como sistemas de almacenamiento sin pérdidas. En este formato encontramos tipologías como el formato tiff o el formato png.

El TIFF (*Tagged Image File Format*) es un formato de archivo que permite el almacenamiento e intercambio de informaciones gráficas en formato raster provenientes de escáneres, capturadoras de video, de programas de retoque y edición de fotos. Puede ser utilizado en varias plataformas como PC (IBM), o Macintosh y estaciones de trabajo UNIX. Las principales ventajas del formato TIFF son:

- (1) su estructura es conocida por una amplia variedad de aplicaciones;
- (2) es independiente de la arquitectura del computador, sistemas operativos y plataformas gráficas;
- (3) puede ser ajustado a las características de un scanner, monitor o impresora.

Es uno de los mejores formatos para el almacenamiento e intercambio de datos en formato raster entre ordenadores. La principal desventaja del TIFF es que el usuario puede indicar nuevos atributos (tags) en una imagen, imposibilitando la interpretación correcta de los datos por otro sistema de lectura de imágenes. Además, requiere también un gran esfuerzo computacional para la decodificación de los datos.

El TIFF incluye esquemas de compresión que los usuarios escogen para adaptarse mejor a sus aplicaciones. Con cada nueva versión se incluyen nuevos esquemas de compresión y formas de almacenamiento de datos, por lo tanto no siempre es posible cambiar informaciones.

La estructura de un archivo de formato TIFF está definida por una secuencia de 8 bits (1byte), donde los bytes son numerados de 0 a N. Este archivo puede alcanzar 232 bytes de extensión. El archivo posee una cabecera y uno o más directorios de archivo de imagen (IFD) que contienen los datos de imagen. La cabecera contiene tres entradas: un código que contiene el orden del byte, o sea, MM (arquitectura Motorola) donde los bytes (16-32 bites) son almacenados en orden de mayor a menor significado; o II (arquitectura Intel) donde los bytes son almacenados en orden inverso (de menor a mayor significado). La tercera es un código identificando el archivo como TIFF y un puntero para el directorio del archivo de imagen. El IFD posee una serie de punteros que indican el inicio del archivo, tipo y extensión de los datos.

El algoritmo de compresión LZW que utiliza el popular formato gráfico GIF es propiedad de la empresa Unisys™. Aunque el formato GIF está patentado, esto no impide que sea el formato gráfico más utilizado en Internet para ilustrar las páginas Web.

Existe una polémica en Internet porque la empresa Unisys™ ha expresado su intención de perseguir el uso de imágenes GIF creadas desde programas que no tengan una licencia adecuada para su creación. Dicha licencia debe haber sido comprada previamente a Unisys™ por los desarrolladores de la aplicación que crea o usa este tipo de archivos gráficos.

Es altamente improbable que esta situación llegue a afectar a los diseñadores particulares e incluso a los profesionales y a los responsables de sitios Web empresariales. Sin embargo, este es uno de los motivos para empezar a usar el nuevo formato PNG.

La especificación del formato PNG fue publicada oficialmente en octubre de 1996 por el World Wide Web Consortium. Al igual que el resto de productos de este consorcio internacional, el PNG es una especificación de libre uso que no requiere pagar licencia de ningún tipo en aplicaciones que usen, creen o editen este tipo de imágenes.

El formato PNG permite generar imágenes de mapas de bits con una elevada 'ratio' de compresión de tamaño. Se trata de una compresión sin pérdida de calidad, al igual que el formato GIF, pero con mayor porcentaje de compresión media.

Análogamente al GIF, el PNG soporta los fondos transparentes que permiten una buena integración de la imagen con el fondo actual de la página Web. PNG es superior a GIF porque soporta una profundidad de color de hasta 16,7 millones de colores. GIF admite sólo un máximo de 256 colores distintos en la misma imagen.

PNG posee dos modos de compresión: estándar y progresivo. Este último facilita el reconocimiento de la imagen en los primeros instantes de la descarga de Internet, pues va mostrando líneas de la misma distribuidas por toda la superficie disponible. Se trata de una opción interesante cuando son imágenes muy grandes o se usan conexiones lentas.

La inclusión de información adicional en el archivo PNG permite en teoría que los motores de búsqueda puedan indexar estos archivos gráficos en función de la descripción incluida, en lugar de únicamente por el nombre.

La principal desventaja es que PNG no permite crear pequeñas animaciones como el formato GIF. Existe un formato complementario del W3C llamado MNG que sí soporta animación pero aún no existe un estándar oficial del mismo.

Al igual que el GIF, al ser PNG un formato sin pérdida de calidad, produce archivos excesivamente grandes para la reproducción de fotografías o cuadros comparados con los equivalentes archivos JPG. Estos últimos pueden reducir considerablemente el tamaño de este tipo de imágenes con una disminución casi inapreciable de la calidad.

El formato JPG ha sido desarrollado por JPEG (*Joint Photographic Expert Group*) y puede visualizar hasta 16,7 millones de colores. No se pueden crear animaciones, ni se puede definir un color transparente. La compresión tiene como consecuencia una pérdida de información. Hay una pérdida de calidad dado que la tasa de compresión es bastante elevada (relación 50:1). Con una tasa de compresión inferior, la pérdida de calidad hubiera sido menos aparente.

El JPG es un formato que conviene para las fotografías en color, aunque por el contrario no conviene para las imágenes que contienen tipografía o diagramas geométricos. No puede utilizarse para el perfilado ni para las animaciones.

En el formato PCX (de PC Paintbrush), los datos están comprimidos con un algoritmo llamado RLE. Suponiendo que estamos utilizando 256 colores (un byte por píxel), consiste simplemente en reemplazar las secuencias de N píxeles consecutivos del mismo color por dos bytes, de forma que el primero indique el número N de repeticiones y el segundo indique el color. Para saber si un byte indica simplemente el color de un píxel o el número de repeticiones de una secuencia de píxeles, se utiliza el siguiente criterio: si el byte es inferior o igual a 192, corresponde al color de un único píxel, pero si el byte es superior a 192, poniendo a 0 los 2 bits más significativos indicará el número de píxeles repetidos a continuación, que tendrán el color indicado por el byte siguiente (aunque éste sea superior a 192).

Este algoritmo permite reducir el tamaño del archivo cuando la imagen sea un dibujo, pues serán muchos los píxeles consecutivos del mismo color. Sin embargo cuando haya algún píxel aislado de un color $X > 192$, éste se reemplazará por los bytes 193, X, indicando que se trata de una secuencia de un píxel de color X. Por ese motivo es posible que en algunos casos llegue a aumentar el tamaño del fichero. Esto suele pasar con imágenes escaneadas, pues es improbable que varios píxeles consecutivos tengan exactamente el mismo color.

La siguiente etapa que se va a abordar es la descripción de los programas de análisis de imágenes que se han localizado, según el número de utilidades que incorpora. Entre los programas localizados podemos encontrar:

- ImageJ.- Este programa se encuentra entre los denominados de libre distribución, con licencia de dominio público. Fue creado por Wayne Rasban⁵ del Nacional Institutes of Health (NIH). Está creado en lenguaje java, siendo capaz de funcionar con muy pocos requerimientos de computación.

Una opción interesante del programa es la capacidad de abrir imágenes simples en forma de pilas o secuencias. Estas se pueden procesar todas a la vez. Podemos trabajar

sobre imágenes en color, gris o binarias y además incorpora una serie de plugins muy útiles, entre ellos los análisis de transformada rápida de Fourier (FFT) o filtros Laplacianos. Primordialmente está preparado para el análisis de imágenes celulares mediante el cálculo de partículas, dimensionamiento de las mismas, trabajo sobre coeficientes de filtros matriciales, trabajo sobre operaciones punto a punto entre dos imágenes. El menú de análisis reserva alguna interesante sorpresa en relación con el trazado de perfiles densiométricos o análisis de geles. Podemos clasificarlo finalmente como un programa de propósito general que nos va ayudar en gran medida. Esta herramienta se ha utilizado para el procesado inicial de las imágenes y el cálculo, en caso necesario de la FFT. Uno de los inconvenientes que presenta radica en la imposibilidad de visualizar las medidas de una manera acumulativa en la medida manual de los ángulos.

- Otra herramienta que se ha encontrado es la distribuida por la empresa SCION. Esta herramienta se basa en el programa ImageJ visto anteriormente, pero se presenta al usuario con unos pocos cambios. Al ponerse se marcha se visualizan cinco ventanas, entre ellas las de menú y herramientas, tal como puede observarse en la figura 2.

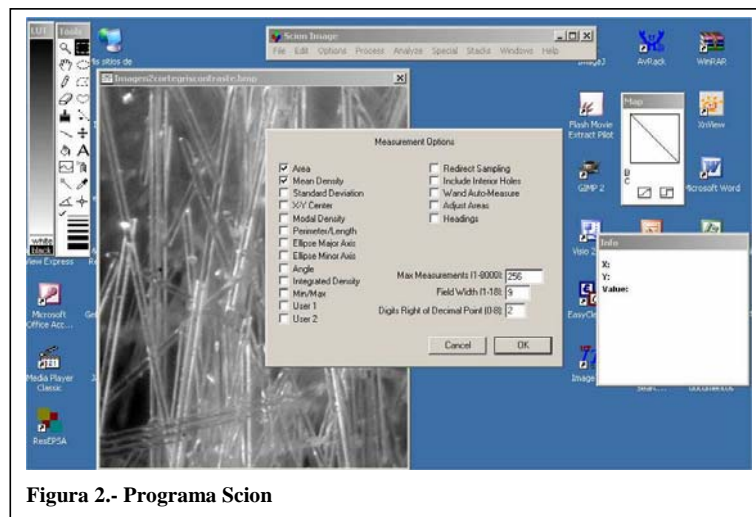


Figura 2.- Programa Scion

El tipo de imágenes con las que puede operar este programa se limita a los formatos bmp y tiff, ambos con una profundidad de 8 bits en escala de grises. Esta forma de trabajo permite un ahorro de tiempo de computación y de memoria. Esto puede limitar bastante el trabajo del programa. Esta herramienta nos permite trabajar sobre la medición de ángulos y además aplicar filtros como la transformada rápida de Fourier. El inconveniente de este programa radica, al igual que su base, en la poca posibilidad de ir almacenando diversos valores de medición de ángulos⁶, salvo que se llegue a programar alguna utilidad que incluya esta opción. Por el contrario, el trabajo sobre plugins es de los más sencillos, ya que trabaja sobre documentos de texto sin formato para ser abierto e interpretado más tarde por la opción process-convolve.

- Otro programa que se ha analizado ha sido Image Lab® de la empresa MCM Desing. Es un programa de tratamiento de imágenes, de propósito general que presenta opciones de confección de mediciones y aplicación de filtros.

Una de las aplicaciones de este programa es la posibilidad de detectar objetos en la imagen y posteriormente aplicar recuentos y calcular áreas. Su aplicación inicial es al campo de la biología.

- Cabe reseñar también el programa de propósito general denominado The GIMP, con licencia GPL, en su versión 2.2.12, que nos será útil para la aplicación de determinados filtros que puedan permitir la mejora de la imagen.

- ImageTool©. Este programa ha sido desarrollado por el Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Texas en San Antonio y ha sido escrito por Don Wilcox, Brent Dove, Doss McDavid, y David Creer, bajo licencia libre.

El programa arranca mostrando una tabla de resultados vacía, estructurada como una hoja de cálculo, en la que se anotan automáticamente todos los resultados de las operaciones que se efectúan sobre la imagen (figura 3).

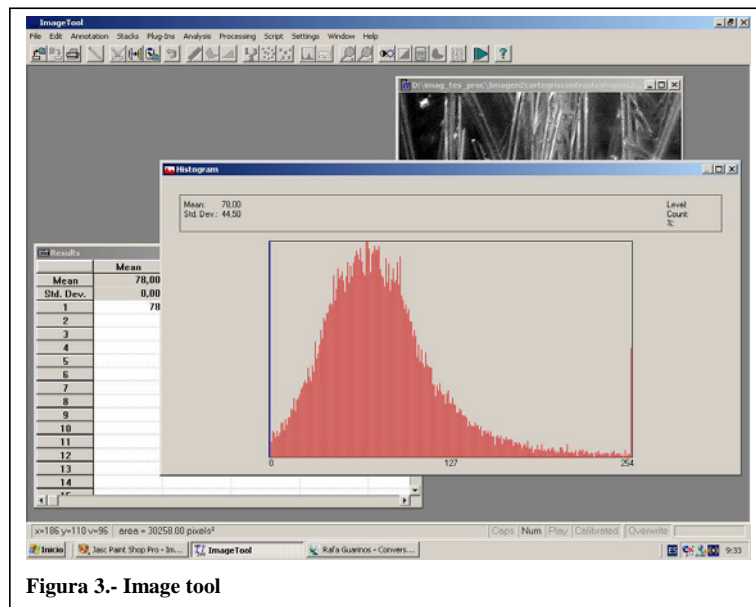


Figura 3.- Image tool

Las herramientas de morfología matemática y los filtros aparecen en la opción de proceso y filtros junto con otras herramientas como la segmentación (thresholding). Se aplican los filtros matriciales de manera sencilla y rápida, pudiéndose definir nuevos filtros según necesidades del usuario. Únicamente deben grabarse los ficheros de texto con la extensión .mas dentro del directorio convolution filters. El conjunto del programa resulta menos completo que ImageJ.

- Image-pro plus®

Este programa solo se ha evaluado a través de una demo bajada de la web de sus creadores y se ha incluido por tener herramientas interesantes, figura 4.

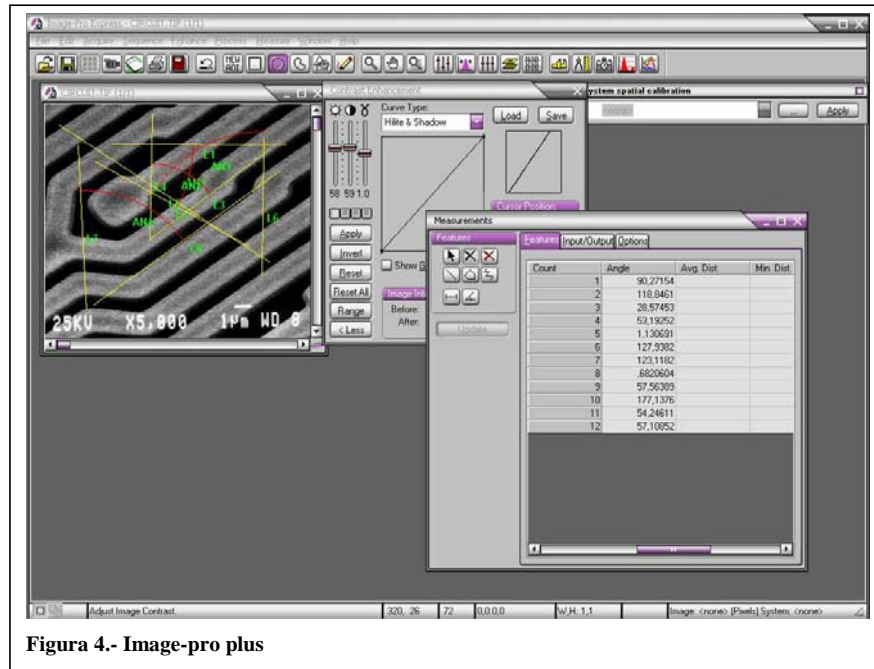


Figura 4.- Image-pro plus

El manejo de imágenes es muy dinámico, ya que distingue automáticamente el tipo de imagen. El programa permite trabajar con regiones de interés, seleccionables mediante el trazado de zona rectangular, circular o irregular. La sencillez de manejo de sus funciones no requiere que el usuario posea una amplia formación en análisis de imágenes.

-The Image processing tool kit

Es un paquete de la empresa Reinder Graphics, Inc., aunque en realidad es un paquete de aplicaciones que pueden y deben funcionar bajo otra aplicación, sea Adobe Photoshop® o el programa Imagetools®.

El juego de parámetros que permite obtener el programa es muy amplio y viene estructurado por categorías, lo que permite realizar la medida de un solo parámetro cada vez u obtenerlas en una sola operación. El manejo de los resultados requiere la utilización de un programa externo como una hoja de cálculo.

1.3- Del Estado del arte

Se ha efectuado una revisión bibliográfica con objeto de encontrar referencias y estado del arte del trabajo que nos ocupa.

La búsqueda ha quedado agrupada por años, en los cuales se han reflejado el número de referencias que han ido apareciendo. Dada la antigüedad de las referencias y la poca cantidad de ellas aparecidas, se han agrupado las mismas en una única columna englobando desde el año 1986 hasta el año 1993. Resaltamos que solo existen en este intervalo 5 publicaciones agrupadas hasta el año 1993, figura 5.

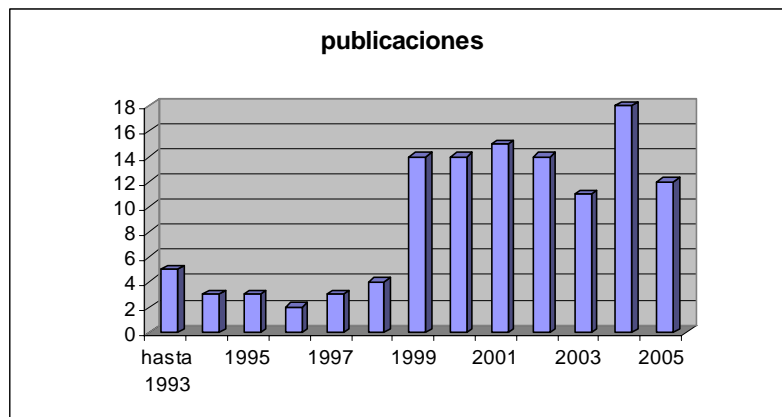


Figura 5.- Evolución de publicaciones

En 1994 y 1995 aparecen tres referencias bibliográficas en cada año, observándose un ligero descenso en el año siguiente, aunque inmediatamente retoma el interés en 1997 y 1998 con tres nuevas publicaciones. Realmente es en este momento cuando se puede observar un fuerte despegue del tema del refuerzo de fibra de vidrio, sobre todo fibra corta. Las publicaciones son abundantes a partir del año 1999, alcanzándose la cifra de 14 publicaciones. Desde este momento puede llamar la atención la poca variación que existe en los años siguientes, que continúa manteniendo las cifras de 13-14 publicaciones. No es hasta el año 2004 que se alcanzan la cifra de 18 publicaciones sobre los temas más diversos sobre el comportamiento del material reforzado con fibra de vidrio y sobre todo el desarrollo de modelos matemáticos que permitan conocer el comportamiento del material en el momento de la transformación.

En la actualidad podemos decir que estamos rondando las mismas cifras que el año anterior, alcanzando unas 15 referencias.

Entre las referencias mas antiguas encontramos un artículo de Morales y White⁷, en el que establecen relaciones entre las tensiones residuales de un polipropileno reforzado y su orientación molecular. Concretamente el trabajo expone las experiencias comparativas en polipropileno reforzado con sepiolita, talco y fibra corta de vidrio.

Hine, Davison, Duckett y Ward⁸ describen en su publicación la caracterización tridimensional de la orientación de fibras en nylon con refuerzo de fibra corta de vidrio. En este estudio se aplica el análisis de imágenes para realizar las mediciones de función de distribución de orientación. Concretamente utilizan el análisis de imágenes para obtener las mediciones de la orientación de fibras y la combinan con modelos de predicción de las propiedades elásticas del material compuesto. Su proceso de trabajo se basa en el análisis de imágenes sobre muestras pulidas de distintas secciones del material. Uno de los mayores problemas que encontraron en la aplicación de esta metodología era que la sección que debía analizarse se presentara casi perpendicular a la superficie que debía pulirse. Dichas secciones eran supuestamente circulares. Estos errores que después afectaban a la digitalización de las imágenes provocaban que se tomaran secciones elípticas en la fase de pulido y posteriormente se le asignara un ángulo de orientación que pudiera ser erróneo. Una de las maneras que tuvieron los autores de minimizar dichos errores fue realizar el corte y pulido de las muestras de manera que las fibras siempre presentaran una forma elíptica en su sección. Las bases teóricas de dicho comportamiento y procedimiento ya eran las teorías de Wilczynski y las de Advani y Tucker. Como datos interesantes establecen una clara anisotropía en el comportamiento de mecánico de la probeta. También resaltan la estructura interior de la probeta en una forma de capa, corazón, capa, de manera que las fibras se encuentran orientadas preferentemente perpendiculares al flujo en el corazón de la probeta y de forma paralela en las capas exteriores de la misma. Así mismo, establecen que la región del corazón o núcleo ocupa un 50% del espesor total de la muestra. También predicen un buen comportamiento del sistema de tratamiento de imágenes para poder efectuar mediciones en la zona de fuente de flujo (fountain flow), dado que es el punto donde se produce un cambio de dirección de la orientación de fibras durante el avance del flujo en el momento de llenado de la muestra. Como conclusión manifiestan que el método de análisis de imágenes se muestra como un método interesante para confeccionar mediciones de orientaciones de fibras.

Por su parte Neves, Isdell y Pouzada⁹ publican su trabajo sobre el efecto de la orientación de fibras en las propiedades de tenacidad en policarbonato reforzado con un 10% de fibra corta de vidrio. En su introducción se apoya en la teoría del tensor de Folgar, Advani y Tucker, que permite establecer el estado de orientación de una fibra simple, quedando en función de dos ángulos y asociando cada fibra a un vector p en dirección de la fibra. Una vez determinada la distribución de orientación de fibras estiman que es sencillo utilizar dicha distribución para estimar la tenacidad. Por tanto se basan en el uso del concepto de orientación media u homogeneidad equivalente. Este concepto utiliza un pequeño volumen de elementos para generar respuestas medias características que pueden ser asociadas a sus propiedades mecánicas generales. La medición de la orientación de fibras se ha efectuado utilizando el mismo método que Hine y Davison, es decir, mediante corte de capas pulidas de secciones de probetas inyectadas. En los resultados de su trabajo expone que inyecciones lentas favorecen la orientación de fibras en las capas exteriores, al igual que sucede con la variación de la temperatura de fundido. No se observan variaciones relevantes asociadas a la velocidad de inyección en las capas exteriores, de forma diferente sucede en las capas interiores o centrales. Se observa una fuerte influencia en la orientación la combinación de temperatura de moldeo y velocidad lenta de inyección. Como conclusión establecen que la variable que más influye en la orientación de las fibras es la velocidad, de una manera más relevante que la temperatura de fundido.

Youssef y Denault¹⁰ realizan su trabajo de cara a la caracterización de la microestructura, propiedades mecánicas y tensiones residuales de polipropileno reforzado con fibra corta de vidrio. Los ensayos realizados han sido enfocados para conocer el comportamiento de la matriz de polipropileno y las variables de proceso de termoconformado. El segundo aspecto tratado ha sido el efecto del proceso y las tensiones residuales a través de la cristalinidad de la matriz polimérica.

Mlekusch¹¹ presenta un trabajo bastante completo, a la vez que interesante. Realiza la determinación de la orientación de fibras, mediante el análisis de secciones pulidas de la muestra. Para ello ha confeccionado un programa específico para poder determinar dicha orientación, a la vez que ha desarrollado un algoritmo de evaluación que tenga en cuenta las consideraciones del usuario.

Para efectuar las primeras mediciones de la sección pulida ha utilizado el software AnalySiSTM. Este software en su momento era gratuito y en estos momentos es puramente comercial. En su desarrollo teórico se basa en el desarrollo de la función de distribución de la orientación de fibra y la teoría de los tensores de orientación, desarrollado en su momento por Advani y Tucker. Para la evaluación de las imágenes realiza la asunción de circularidad de las secciones de las fibras, aunque en el plano donde se va a trabajar, las secciones van a ser elípticas. Establece que la orientación del eje mayor de las elipses en el plano de corte van a coincidir con el ángulo ϕ . El otro ángulo θ , puede ser calculado mediante la relación de los ejes de la elipse y el cálculo posterior del arco coseno. Mediante la obtención de estos dos ángulos podemos efectuar el cálculo de la densidad de función de probabilidad normalizada, dada por la expresión:

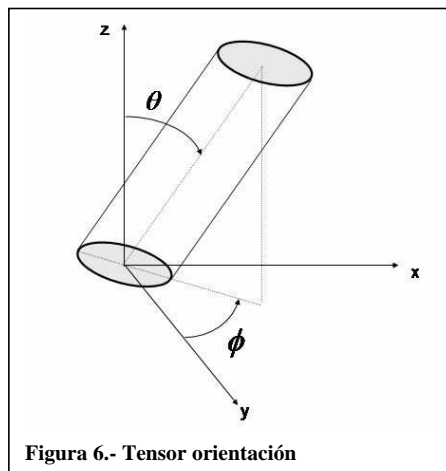
$$\int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} \psi(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi = \int \psi dp = 1$$

El problema que presenta la aplicación del análisis de imágenes a este proceso es fundamentalmente la interacción que existe entre las fibras, de manera que se dificulta la posibilidad de considerar cada fibra como un único objeto. Para realizar esta apreciación emplea el siguiente procedimiento: inicialmente separa cada contorno en segmentos simples. A continuación calcula los parámetros de elipse de cada segmento y posteriormente vuelve a refundir los elementos simples en una única fibra. Finalmente recalcula los valores de la elipse con todas las secciones unidas en una única fibra. Para mejorar el sistema de determinación de contornos utiliza un algoritmo en el que va determinando la curvatura del contorno, punto a punto, determinando si es cóncava o convexa. Esto determinará que el contorno del objeto se rompa en partes más pequeñas si se encuentran puntos de separación en el contorno. Posteriormente aplica un cálculo de regresión.

Por su parte Fred Massicotte¹² ya explica la aplicación del análisis de imágenes con objeto de determinar la orientación de las fibras. Expone la problemática que aparece con las segmentaciones, binarizaciones y las intersecciones entre fibras. Para solucionar estos problemas desarrolla una técnica que denomina como clasificación contextual de la imagen. Mediante esta técnica realiza la separación de las intersecciones de las fibras, incluso las fibras que solo se tocan y poder aplicar a ello un esquema de clasificación que propone. Consigue una metodología de trabajo semiautomática. Esta metodología se basa en una rutina denominada como GOP (Graphical Object Processing) que ha sido desarrollada por la compañía ContexVisiónTM y genera información contextual de la

imagen. Esta información es la tratada de manera sistemática por la técnica descrita. Realmente esta aplicando un algoritmo de esqueletización y otro de expansión.

J. Cintra y C. Tucker III¹³ presentan en 1995 una aproximación matemática a la orientación de fibras provocadas por el flujo inducido. Se basa nuevamente en la expresión del tensor orientación, definido habitualmente como P y función de dos ángulos Θ y Φ . Las simulaciones se realizan mediante tensores de segundo orden que representan el estado de orientación de las fibras. Para definirlo se asume que las fibras son rígidas y axisimétricas. La definición de las funciones cartesianas del tensor orientación, figura 6, de segundo orden quedaría definida como sigue:



$$a_{ij} = \int p_i p_j \psi(p) dp$$

por tanto el tensor a_{ij} es utilizado como variable de estado microestructural que representa la orientación de fibras en cualquier punto. Este resultado es alcanzado al realizar las aproximaciones del momento tensor de cuarto orden. También se aplican estos modelos para comportamientos ortotrópicos, obteniéndose mayores aproximaciones al comportamiento de las fibras del material.

En 1996 Hine, Duckett y Ward¹⁴, continúan con la exposición de su trabajo. Describen una comparativa de estructuras de orientación de fibras y los resultados de propiedades elásticas en muestras de polipropileno reforzado con fibras cortas de vidrio. Las muestras están transformadas mediante moldeo por inyección y aplican un proceso denominado como SCORIM, cuyo significado es orientación controlada mediante tensión de cizalla (shear controlled orientation in injection holding). Dicho proceso está diseñado para producir una orientación preferencial de las fibras mediante la tensión de cizalla controlada.

La metodología de medición de las fibras es el cálculo de las imágenes en las que se han recogido elipses generadas por el corte transversal inclinado de la muestra. La maquinaria empleada es un analizador de imágenes desarrollado por el laboratorio del

grupo de instrumentación de la Universidad de Leeds. Las características mecánicas de las muestra han sido medidas mediante ultrasonidos en medio acuoso.

En 1997 Davison, Clarke y Archenhold¹⁵ presentan aproximaciones en las mediciones de las fibras. En este caso utilizan una alta ampliación de las imágenes con objeto de reducir los errores derivados de la captura de imágenes. La metodología empleada hace referencia a una secuenciación en la captura de las imágenes, de manera que una gran superficie puede ser captada mediante una secuencia de imágenes más pequeñas. En 1999 presentan un segundo trabajo Davison y Clarke¹⁶ en el que determina la longitud de fibras mediante el análisis de imágenes. Presentan un trabajo muy completo sobre el cálculo de las orientaciones de fibras y la problemática de las intersecciones de fibras.

Von Bradsky, Bailey y Cervenka¹⁷ plantean en 1997 una caracterización interesante de composites, estudios estructurales contrastados por varios laboratorios. En un apartado realizan una descripción interesante de la función distribución de fibras. Para la obtención de estas mediciones hacen referencia al análisis de imágenes y establecen la distribución de los ángulos, figura 7, en una visualización tridimensional, según el modelo de Tucker.

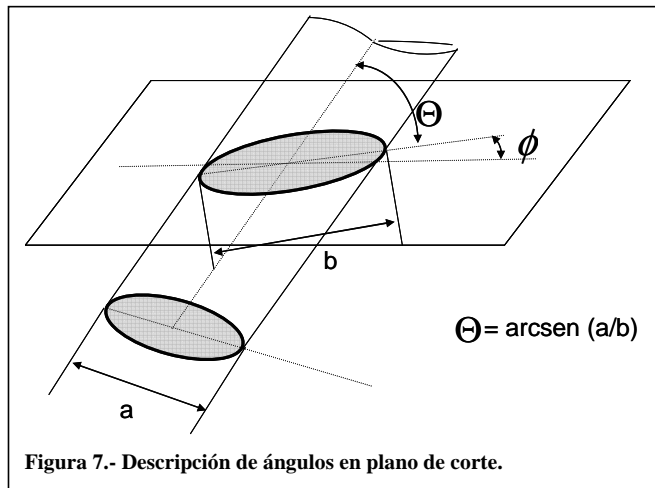


Figura 7.- Descripción de ángulos en plano de corte.

Establecen la formulación de cálculo de acuerdo con la elipse formada en la intersección de la fibra con un plano. Las imágenes se obtienen a través de capturas en un SEM.

En el mismo año, Davé y Chundury¹⁸ presentan un estudio interesante sobre la influencia de parámetros de transformación (moldeo por inyección) del polipropileno reforzado, polipropileno con cargas inertes y sus propiedades finales. Las propiedades analizadas de refuerzos dispares como talco y fibra corta de vidrio, son las tensiones de deformación y rotura, módulos de flexión, impacto, contracción. La parte que se muestra interesante es el planteamiento de un diseño de experimentos bastante completo. Las gráficas de relación de efectos obtenidos son interesantes. En este caso a las muestras no se aplican los análisis de imágenes.

Es en 1999 cuando aparece el mayor número de publicaciones. Entre las más interesantes destaca la aportación de Yang y Chin¹⁹. En este caso el artículo realiza un estudio del comportamiento mecánico del polipropileno reforzado con fibra larga. Realiza una correlación entre el creep y la temperatura, todo ello bajo una carga constante.

Otros autores que realizan un estudio del comportamiento del polipropileno reforzado (sisal composites) son Joseph, Kuruvilla y Thomas²⁰. Realizan un análisis de las relaciones entre mezclas, temperaturas de mezclas y longitud de las fibras y las tensiones obtenidas del composite. Asimismo tabulan los resultados obtenidos respecto a los módulos de elasticidad, deformación y contenidos de fibra expresados en porcentaje.

Durante este año continúan apareciendo aportaciones que intentan dar explicaciones teóricas al comportamiento de las fibras y sirven como principio general de desarrollo de ecuaciones que describan el comportamiento de las fibras. Prueba de ello lo aportan Kyeong-Hee Han y Yong-Taek Im²¹ que trabajan sobre la predicción de orientación de fibras y su simulación. En su trabajo se explican las definiciones iniciales de expresión de los vectores orientación como función de dos ángulos y un módulo p . Para ello se puede definir la función de distribución de orientaciones como tensores de segundo orden y tensores de cuarto orden según las siguientes expresiones:

La expresión del tensor de segundo orden quedaría enunciado por:

$$a_{ij} = \int p_i p_j \psi dA$$

La expresión del tensor de cuarto orden quedaría enunciado por:

$$a_{ijkl} = \int p_i p_j p_k p_l \psi dA$$

Una vez se tenga que aplicar el modelo mas exacto, como el modelo de tensor de cuarto orden, a un cálculo computacional, los autores pretenden optimizar en eficacia y eficiencia trasladando el cálculo del tensor orientación de cuarto orden a segundo orden. Para ello presenta dos aproximaciones de cálculo en forma paramétrica que permita simular el comportamiento de las fibras, aleatoriamente en el espacio, aleatoriamente en el plano y distribuciones uniaxiales.

Paralelamente a estos trabajos se publican en este año otras contribuciones que aportan nuevos métodos de simulación. VerWeyst, Tucker III, Foss y O'Gara²² presentan una metodología que permite predecir modelos de orientación de fibras. Las predicciones resuelven un balance completo de ecuaciones de masa, momentos y energía para un fluido newtoniano. Una función polinómica de segundo grado se utiliza para describir el estado y calcular el estado de la orientación local de la fibra. Para la simulación de la inyección se ha utilizado el modelo de comportamiento de Hele-Saw que permite definir las condiciones de contorno en la simulación. En este caso los experimentos se han automatizado mediante el análisis de imágenes de una sección transversal perfectamente pulida. En este caso las predicciones se comparan en un nervio transversal, donde se

realizan los cálculos en 2 y 3 dimensiones. Expresa los tipos de errores que se han cometido durante la simulación o el procesado de las muestras.

Por su parte González y Chassapis²³ presentan una investigación sobre la relación de la fractura K_c y las condiciones de proceso del polipropileno reforzado con fibra larga de vidrio. Las muestras preparadas son partes rectangulares extraídas de la probeta inyectada. Se consideran dos tipos de probetas según el flujo de llenado. Uno a favor del flujo de llenado de la muestra, y otra tanda de muestras con orientación de fibras perpendicular al flujo de llenado. El trabajo resulta interesante desde el punto de vista de caracterización de la procesabilidad del polipropileno reforzado con fibra larga de vidrio.

En el mismo sentido encontramos las aportaciones de Barbosa y Kenny²⁴. El objetivo de sus estudios es determinar la procesabilidad del polipropileno reforzado con fibra corta de vidrio. Para ello se ha confeccionado un estudio estadístico que relaciona las condiciones de proceso y las características mecánicas del material. Además se incorporan técnicas como el diseño de experimentos. En ese estudio considera dos niveles de interés por cada variable considerada. Las variables de proceso consideradas en su investigación son la velocidad de rotación de husillo, la contrapresión, el perfil de temperatura del husillo de inyección, la presión de compactación, la velocidad de inyección, la situación del punto de cambio y el tiempo de compactación. Las probetas utilizadas están extraídas de otra probeta de mayores dimensiones, la cual permite considerar varias orientaciones de fibra posibles.

Mlekusch²⁵, Lehner y Geymayer presentan un trabajo corto sobre la investigación de la orientación de fibras cortas actuando como refuerzo en distintos termoplásticos. Como característica fundamental presentan una metodología de trabajo sobre la captura de las imágenes. Éstas están tomadas sobre una sección transversal de las probetas, que deben ser pulidas celosamente para poder obtener una buena imagen representativa. Con objeto de mejorar el contraste de las capturas de imágenes ene. Microscopio se recurre a pulidos y vaporizaciones con carbono o bien pulido, grabado con iones de oxígeno y recubierto de platino. Con esta metodología se busca obtener un mejor contraste entre matriz y fibras y con ello poder aplicar el análisis de imágenes.

Venkatesh y Dunand²⁶ presentan un modelo de comportamiento de creep de composites reforzados con fibras largas. Entre sus objetivos están el desarrollo y la validación experimental de un modelo general que permita la predicción del comportamiento del creep primario longitudinal de los composites, destacando la transferencia de cargas y creep. El modelo es evaluado con una mezcla de NiAl-W. El tungsteno presenta un comportamiento similar a las fibras de refuerzo de composites.

Thomason²⁷ nuevamente presenta mas resultados de sus investigaciones. En este caso realiza el estudio del efecto de la resistencia y el diámetro de las fibras en el balance general de las propiedades mecánicas de poliamida reforzada con fibra de vidrio. Establece un estudio entre la relación longitud, diámetro y orientación contra el comportamiento mecánico del material. Cabe resaltar que utiliza determinadas expresiones para el cálculo de la orientación. Para ello define que el ángulo puede ser determinado utilizando un perfil elíptico respecto a la dirección del flujo mediante la expresión

$$\cos(\phi) = \frac{W}{L} = \frac{4A}{\pi L^2}$$

W es el eje menor de la elipse y L es la longitud del eje mayor. A continuación aplica el cálculo del parámetro de Hermans f_p

$$f_p = 2(\langle \cos^2(\phi) \rangle) - 1$$

donde el valor medio de $\cos(\phi)$ se puede aproximar por medio de la expresión

$$\langle \cos^2(\phi) \rangle = \frac{\sum_i [N(\phi_i) \cos^2(\phi_i)]}{\sum_i [N(\phi_i)]}$$

El análisis de imágenes las realiza desde capturas de microscopio sobre una sección de la probeta de trabajo.

En el año 2000 aparecen el mismo número de publicaciones que en el año anterior, unas 14.

Uno de los trabajos que destaca es la aportación de Zak *et al.*²⁸. Trabajan sobre una tecnología de fabricación por capas empleando una matriz altamente viscosa mediante la cual realizan la construcción del prototipo por capas. El sistema es el denominado RLCM, (Rapid layered composites manufacturing process). La matriz es una resina y el refuerzo es fibra corta. Inicialmente se aporta la resina sobre la capa a construir y a continuación se realiza el aporte de la fibra corta. Aplican el concepto de distribución de orientación de fibra expuesto anteriormente. Pero con objeto de evitar el problema que supone la medición de elipses en la sección transversal, aplican la determinación tridimensional mediante la medición de elipses en dos planos consecutivos. El problema lo supone la identificación de la elipse que se corresponde con la fibra que interfecta en el primer plano.

Los mismos autores explican en su publicación²⁹ una nueva técnica experimental para la determinación de la longitud de fibra y además de la orientación de la misma a través de la intersección con dos planos paralelos. Como se ha dicho anteriormente el nuevo método experimental nos permite determinar la longitud de fibra según la siguiente expresión:

$$l = \frac{1}{Q} \left(\frac{P_{z_i}}{1 - \frac{N''}{N'}} - Rd \right)$$

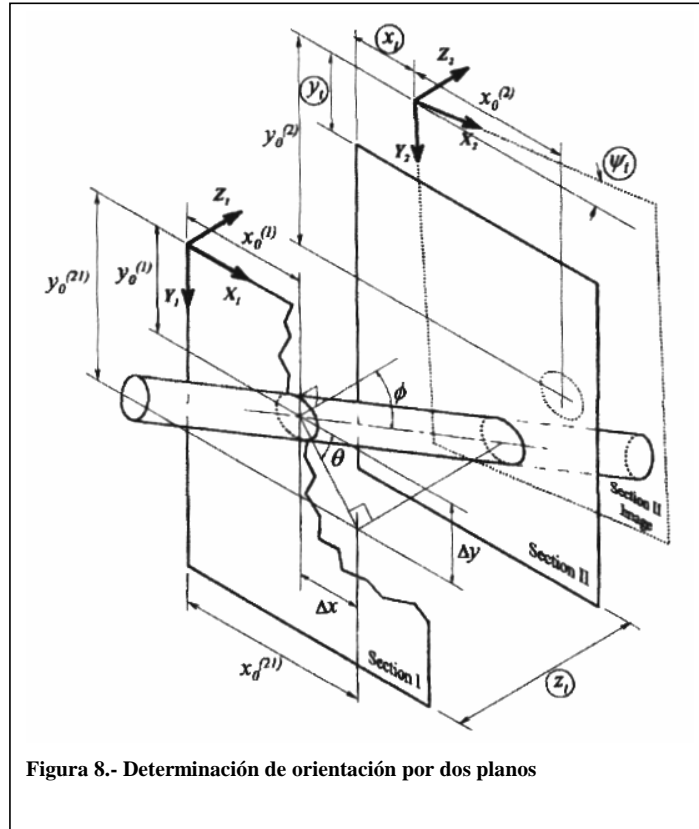


Figura 8.- Determinación de orientación por dos planos

Donde N^I y N^{II} responden a las secciones de planos I y II, figura 8. P es la probabilidad de encontrar fibras orientadas, al igual que los términos Q y R que responden a las definiciones de

$$Q = \int_{\phi_1}^{\phi_2} p(\phi) \cos(\phi) d\phi \quad \text{y} \quad R = \int_{\phi_1}^{\phi_2} p(\phi) \sin(\phi) d\phi$$

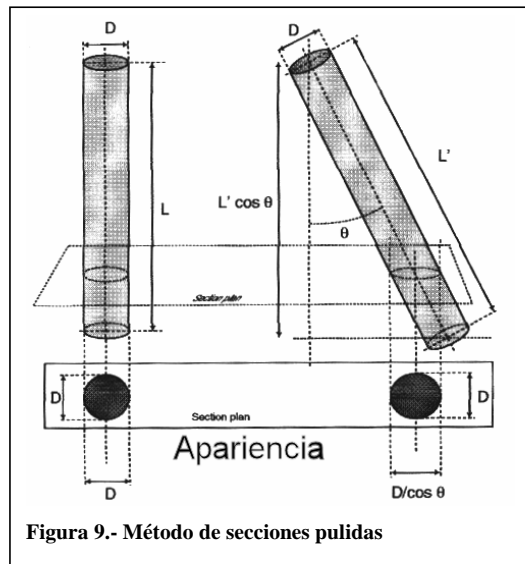
La estimación de la orientación de fibras puede realizarse desde el cálculo de una sección como parte integrada del proceso.

Las desventajas que presenta esta metodología es que antes y después de examinar una sección pulida debe eliminarse dicha sección con objeto de obtener una sección nueva paralela y debe pulirse nuevamente.

La segunda desventaja la supone la elevada variabilidad de la orientación de las fibras cortas en una mezcla de composites. El tercer problema radica en la corta longitud de las fibras, lo que implica que puede que no exista contacto entre la fibra y los dos o tres planos consecutivos preparados para el cálculo de intersecciones.

Sobre análisis de imágenes se presentan dos aportaciones interesantes. La primera es de Talbot, Lee, Jeulin, Hanson y Hobbs³⁰. Presentan un método para realizar las

mediciones de diámetros y longitudes de fibras preparadas manualmente y el posterior análisis de imágenes tomadas mediante microscopía electrónica de barrido. Presentan dos métodos de medición. Un primer método de medición es a través de una sección de la muestra o un plano, figura 9.



Habitualmente se realiza un promedio de mediciones de 500 fibras. El otro método de medición que presentan es el de la cama-plana. En éste se depositan las fibras sobre una superficie en la que posteriormente se realiza la medición. La segunda aportación es por medio de Lopez *et ali*³¹ realizan una aplicación del análisis de imágenes para valorar los resultados de los ensayos de tensiones. La metodología de análisis de imágenes permite la visualización de la topografía de las fracturas y la aplicación de la simulación geoestadística.

Por su parte Pierret *et ali*³². Aplican una metodología de análisis de imágenes a la medición de las longitudes de raíces. Para ello realizan la captura de las imágenes a través de rayos-X o bien por medio de tomografías. Ello permite realizar un seccionado sistemático y un posterior análisis de las imágenes resultantes. Inicialmente sobre las imágenes aplican un algoritmo de esqueletización y a continuación una dilatación teniendo en cuenta la orientación. Este algoritmo de reconstrucción es sensible a la orientación de las fibras y permite la posterior reconstrucción tridimensional de las raíces.

En este año aparecen otras publicaciones que aportan datos sobre la caracterización de los materiales reforzados con fibra. Prueba de ello son las aportaciones de Barbosa y Kenny³³ que describen en este caso las relaciones de procesado del material reforzado con fibra corta y la extrusión de filamentos. El análisis de imágenes se aplica a los resultados de la microscopía electrónica de barrido. En ella se correlaciona la concentración de fibras en cada una de las secciones estudiadas y las características de la orientación de fibra, dependiente de las condiciones de proceso. En su trabajo estudian la distribución de la concentración de fibras por sección, la distribución de

orientación de fibras, los efectos de la presencia de fibras cortas en el comportamiento del flujo y los efectos de la longitud de fibra. Un estudio interesante que nos permite conocer de base cual es el comportamiento del material reforzado. Por su parte Bush, Torres y Maethven³⁴ presentan tres técnicas para la determinación de las características reológicas de los polímeros reforzados con fibra larga de vidrio.

Torres y Bush³⁵ proponen un programa de tratamiento de determinados aspectos de refuerzo de fibra denominado como Zafire. El punto mas interesante es el tratamiento de proceso y simulación que se efectúa cuando se está hablando de termoformar polipropileno reforzado con fibra larga de vidrio, lo cual dificulta el comportamiento durante el proceso. Las imágenes que presenta son de visualización de fibras antes y después del proceso a través de la captura mediante microscopia.

Novotortzeva³⁶ presenta un experimento de caracterización del polipropileno reforzado. En este caso explica el comportamiento del material en exposición permanente al aire y en contacto con anticongelante.

En este año aparecen tres aportaciones en las que se estudia el procesado de fibras en el moldeo por compresión. Nilsson, Ericson y Holmberg³⁷ estudian cómo el flujo axial afecta al comportamiento de las propiedades mecánicas. El estudio se aplica a diferentes grados de concentración de fibra de vidrio, concretamente al 20, 30 y 40% de carga.

Trende, Astrom y Nilsson³⁸, por su parte, realizan un estudio de los cambios dimensionales y las tensiones residuales que aparecen en las muestras transformadas mediante el moldeo por compresión. Para completar el estudio los autores presentan un modelo de cálculo con objeto de predecir el comportamiento del material. Para ello el modelo tiene en cuenta la transferencia de calor del material, cinética de la cristalización, cambios de volumen y tensiones residuales. Finalmente el modelo se completa con la compilación de todas las ecuaciones bajo el modelo de elementos finitos. Las predicciones de la temperatura y cristalinidad del modelo 3D se han comparado con el modelo monodimensional con objeto de verificar la exactitud del modelo.

En la misma línea se encuentra el trabajo de Vahlund, Dweib y Bradaigh³⁹. Aplican en este caso el análisis de imágenes de la fibra, antes y después del moldeo por compresión y realizan la adquisición por medio de rayos X. Mediante las imágenes realizan el estudio de orientación de las fibras y el posterior estudio de la anisotropía del flujo y las propiedades mecánicas obtenidas.

Durante el año 2001 aparecen un número similar de aportaciones que en el año 2000, alrededor de 14.

González y Chassapis⁴⁰ presentan una caracterización interesante de fractura de polipropileno reforzado con 50% de fibra larga de vidrio. El estudio se realiza sobre probetas, extraídas de una placa, en dirección a favor del flujo y en dirección perpendicular al mismo.

Loos *et al*⁴¹ muestra la caracterización morfológica de polipropileno reforzado con fibra de vidrio, caracterizando las fibras y utilizando para ello microscopia optica.

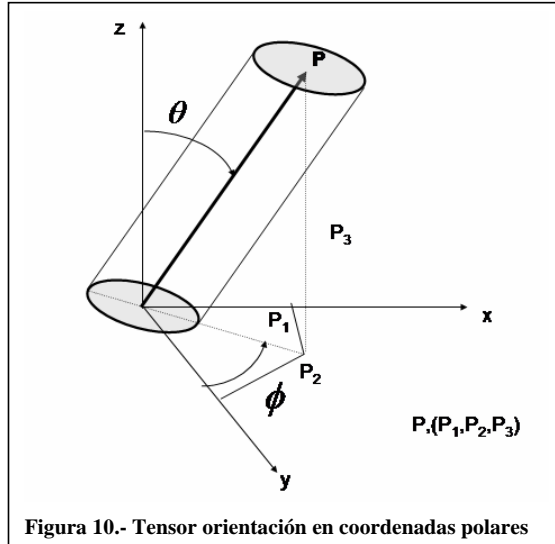
Aparece un nuevo artículo de la línea de investigación de Thomason⁴². Hace referencia a una nueva metodología de medición de resistencia de termoplásticos reforzados. Nos encontramos pues, dentro de la caracterización de materiales compuestos. Para realizar las mediciones se ha diseñado un aparato que permite realizar medidas de longitudes muy cortas. La técnica está basada en una adaptación de un aparato de ensayo micromecánico para medidas de tensión de fibras.

El mismo autor nos presenta su trabajo sobre parámetros micromecánicos derivados de la medición de una poliamida reforzada. Thomanson⁴³ en esta aportación nos describe una nueva metodología que puede permitir la obtención de parámetros micromecánicos, como una tensión de cizalla interfacial (IFSS), el factor de orientación de fibras y tensiones de fibras, mediante la introducción de datos macromecánicos. En el artículo se describen los resultados obtenidos sobre el moldeo por inyección de una poliamida 66 reforzada con fibra de vidrio. El método planteado es la aplicación de la captura de imágenes sobre un plano YZ en lugar del plano XY habitual en las metodologías descritas anteriormente. La captura de la sección pulida coincide con la dirección del flujo de llenado de la probeta. Posteriormente se realiza el cálculo del parámetro f_p o factor orientación de Hermans. En las conclusiones del trabajo se establece que la tensión de cizalla interfacial decrece en la medida que aumenta la concentración de fibra presente en la probeta. Los factores obtenidos de distribución de orientación de fibra coinciden con el calculado por medio de otros medios anteriormente expuestos.

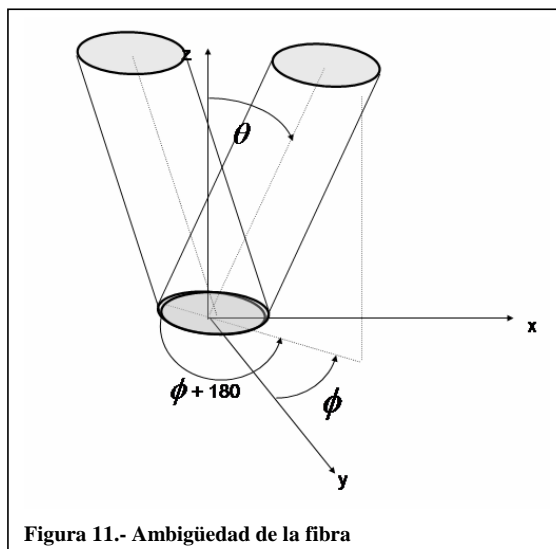
Dentro de la caracterización de materiales compuestos aparece la aportación de Meske y Schnack⁴⁴ en la que nos presentan una forma de medición de tensiones estructurales y residuales de composites fibrosos que pueden ser evaluados mediante la difracción de rayos X sensitiva.

Zak *et al*⁴⁵ repiten metodología en la determinación de la orientación mediante dos secciones. Este método ya se ha explicado anteriormente.

Eberhardt y Clarke⁴⁶ explican en su publicación la aplicación de la microscopia confocal como base para la captación de imágenes de las fibras y poder con ello realizar el cálculo de la función de distribución de la orientación. Explican detalladamente toda la base teórica necesaria para la determinación de la función distribución.



Detallan la determinación de las coordenadas del tensor orientación en función de sus coordenadas polares y expresadas también en función de los ángulos Φ y θ , figura 10. La metodología general es la captación de imágenes de una sección de la muestra. La problemática que se presenta con la metodología tradicional es la denominada ambigüedad de la sección, figura 11



Se determina que la misma elipse detectada de intersección con el plano puede albergar dos posibilidades de orientación de fibra. Este hecho se denomina como ambigüedad de

orientación de fibra. Con el uso de la microscopía confocal se activa un escaneado semitransparente de una sección, la cual no necesita ser destruida y a continuación se realiza la toma de otra sección contigua. Las elipses son detectadas y sus coordenadas emplazadas manualmente. El error mayor que posee dicho método es la determinación manual de los centros de las elipses de las fibras.

En su segundo trabajo, continuación del anterior Eberhardt, Clarke, Vincent, Giroud y Flouret⁴⁷ presentan un trabajo muy completo sobre los posibles errores que pueden aparecer en las técnicas empleadas en el análisis de imágenes. Inicialmente las técnicas de análisis de imágenes aplicadas incluyen transformadas de Hough, cuadrados y técnicas de cálculo de segundos momentos. Los errores encontrados son los errores típicos de cada medición de fibra individual que se combina con el error de grupo de medición. Los errores son reducidos finalmente al incrementar la resolución de las imágenes.

Dentro del apartado de caracterización de materiales reforzados, aparecen las publicaciones de Aurich y Meninng⁴⁸. Estos autores trabajan fundamentalmente en la determinación de la orientación de las fibras en refuerzos de fibras de lino, que han sido inyectadas previamente. Los autores exponen las ecuaciones que gobiernan el flujo inducido y cómo afecta al estado de orientación. El estudio aplica el análisis de imágenes y calcula el tensor orientación en cada una de las posiciones de la probeta y en varios niveles de espesor de la misma probeta con objeto de realizar comparaciones. Como conclusión explica que el comportamiento del tipo de fibra de refuerzo de lino es muy similar al comportamiento de refuerzo de fibra corta de vidrio.

García, Courbebaisse y Jourlin⁴⁹ centran su trabajo en la optimización del modelo de llenado en la inyección. Con objeto de determinar el modelo mejorado aplica un tratamiento de imágenes del tipo esqueleto, y distancia de Haudorff para conseguir distinguir cual es el mejor tipo de llenado de la pieza.

Otro trabajo interesante en este año es el presentado por Vahlund⁵⁰⁻⁵¹ en el que determina una metodología de captación de imágenes, y sobre todo su tratamiento de errores según el número de fibras implicadas en el proceso. Nos indica un método estadístico de tratamiento de error. El proceso al que se aplica toda esta metodología es en el moldeo por compresión de materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio.

En trabajos paralelos encontramos las aportaciones de H.S. Kim y B. Pourdeyhimi⁵² sobre fibras textiles. Aportan un algoritmo para correlacionar las características de tensión-deformación y sus condiciones de proceso. Para determinar las condiciones mecánicas de la fibra realiza el cálculo de orientaciones de fibra y longitudes de las mismas, distribuciones, relación de Poisson y a continuación se predicen las condiciones mecánicas de la fibra.

En el año 2002 se mantiene la misma cadencia de publicaciones. Encontramos la aportación de Jun Seok Lee y Francis Lai⁵³. Presentan un trabajo generalista en el que se realiza un comparación de varios tipos de polipropilenos con distintas longitudes de carga. Trabajan con pellets con fibra de vidrio cortada a 3, 6, 9, 13 mm. de longitud y pellet compuesto a 13 mm. La determinación de la función orientación se determina mediante imágenes de microscopía electrónica de barrido.

Ganguly⁵⁴ presenta un trabajo paralelo de cálculo de distribuciones de refuerzos en matriz metálica mediante análisis de imágenes. Otro trabajo lo presenta Nilsson⁵⁵ que realiza un estudio de los atrapés de aire que surgen en la transformación de materiales reforzados con fibra en el moldeo por compresión. La distribución de estos atrapés y la cantidad de ellos determinan una cierta influencia en las características mecánicas finales. A parte de correlacionar las características de proceso y mecánicas, emplea la denominada fotografía electrónica de puntos (ESP/DSP) que se ha podido utilizar en la medida de la deformación de superficies.

Neves, Pontes y Pouzada⁵⁶ repiten trabajo sobre el efecto de la orientación de fibras cortas de vidrio en matriz, en este caso de polipropileno. Sobre una placa probeta realizan la determinación de la orientación a 25, 50 y 75 mm. de distancia de la entrada del polímero inyectado. Las fibras se han fotografiado mediante microscopía electrónica.

Yasuda, Mori y Nakamura⁵⁷ abordan una aportación interesante al implementar la visualización de la orientación de fibras transparentes cortas mediante una luz polarizada y poder observar con ello la defectología que aparece. La formulación y cálculo de ángulos de fibras nos servirá de base para nuestro trabajo futuro.

Thomason nos presenta dos nuevos trabajos sobre termoplásticos reforzados. En el primero, Thomason⁵⁸ nos presenta una metodología a aplicar sobre termoplásticos reforzados con los que poder realizar una derivación de valores del factor de orientación de fibra, tensión de cizalla interfacial, tensiones de fibra ante fallo desde una simple combinación de valores de tensión-deformación y distribuciones de orientaciones de fibras residuales. La metodología aplicada es menos laboriosa que la metodología micro-mecánica.

El segundo trabajo que nos presenta es muy similar al expuesto anteriormente con poliamida, pero en este caso se aplica a polipropileno. Thomason⁵⁹ en esta aportación nos describe con su nueva metodología, explicada anteriormente, que puede permitir la obtención de parámetros micromecánicos, como una tensión de cizalla interfacial (IFSS), el factor de orientación de fibras y tensiones de fibras, mediante la introducción de datos macromecánicos. En el artículo se describen los resultados obtenidos sobre el moldeo por inyección de un polipropileno reforzado con fibra de vidrio. El método planteado es la aplicación de la captura de imágenes sobre un plano YZ en lugar del plano XY habitual en las metodologías descritas anteriormente. La captura de la sección pulida coincide con la dirección del flujo de llenado de la probeta. Posteriormente se realiza el cálculo del parámetro f_p o factor orientación de Hermans. En la parte experimental indica que ha introducido aditivos en la matriz para mejorar los efectos. Estos aditivos son el HMPP, HPP y MA-PP. En las conclusiones del trabajo se establece que la tensión de cizalla interfacial decrece en la medida que aumenta la concentración de fibra presente en la probeta. Los factores obtenidos de distribución de orientación de fibra coinciden con el calculado mediante otros medios anteriormente expuestos. Se concluye que con la adición del MA-PP sobre el composite incrementa en 6.5 Mpa la tensión de cizalla interfacial. Además se han detectado dependencias de la tensión de cizalla respecto al porcentaje de adición que se realice del MA-PP.

Constable y Kattas³ nos presentan un relato de la evolución del uso de la fibra larga de vidrio y cuales son las diferencias estructurales y mecánicas de la fibra corta frente a la

fibra larga. Se completa el trabajo con la descripción de los distintos sistemas de fabricación existentes.

Segard⁶⁰ por su parte establece un estudio acerca de la influencia de la interfase fibra-matriz con el comportamiento de un polipropileno reforzado con un 40% de fibra corta de vidrio. Para la descripción de comportamiento teórico del material se basa en los modelos de Schapery y en el Zapas-Crissman. El modelo simulado establece la relación existente entre la interfase descrita con la elasticidad, viscoelasticidad y viscoplasticidad.

Un trabajo interesante es el de Watanabe⁶¹. Aunque el estudio está implementado sobre la anisotropía magnética de partículas ferromagnéticas, el concepto de orientación de fibras queda muy bien explicado al igual que el aparato utilizado para efectuar las mediciones de las orientaciones, mediante polos imantados. Como conclusión explica que la función de par de torsión depende de la orientación de las fibras del composite.

Shao Yun Fu⁶² presenta un trabajo sobre correcciones en las medidas de longitud de fibras cortas de vidrio. La base del trabajo se centra en las roturas de fibras que se producen durante la transformación de las mismas durante un proceso de extrusión o un proceso de inyección. Esto significa que existe una variación de la longitud de las mismas y por lo tanto necesitan de una corrección. La técnica utilizada tiene en cuenta la intersección de las fibras con los bordes de las imágenes, figura 12, utilizando para

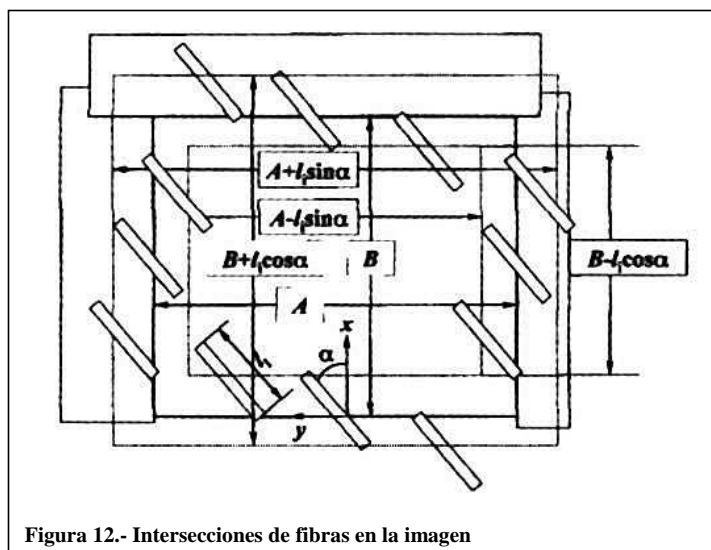


Figura 12.- Intersecciones de fibras en la imagen

ello fotografías obtenidas mediante microscopía. A continuación se realiza el recuento de las mismas mediante software.

Waschitschek⁶³ expone la influencia del tipo de inyección denominado como push-pull en las características mecánicas del material reforzado con fibra. En la aportación se demuestra que la presión de inyección y la longitud de fibra ejercen una influencia

apreciable en la orientación de fibra. También se ha observado una degradación de la fibra durante el proceso.

Desde el punto de vista teórico Chung⁶⁴ presenta una aproximación a la predicción del comportamiento de tensor orientación de cuarto orden, denominado como IBOF. El artículo presenta el modelo matemático y el uso intensivo de tiempo de computación que utiliza. Realiza una comparación entre el modelo IBOF y el modelo EBOF, concluyendo que el modelo IBOF presenta una aproximación del cálculo de la orientación de fibras tan bueno como el EBOF, aplicados a flujos homogéneos. La diferencia radica en el empleo de un menor tiempo de computación por parte del IBOF respecto al EBOF.

En otra posición se encuentra un estudio realizado por Garcia-Rejon y Meddad⁶⁵, el cual versa sobre el proceso de extrusión soplado de poliolefinas reforzadas. Denotan que el parison se estira en menor grado a medida que se incrementa la concentración de fibras de refuerzo. El método utilizado para la medición de la orientación de fibras es el de pirólisis y posterior fotografía en microscopía electrónica de barrido. La orientación de las fibras provoca una reducción de tensiones en el punto de salida de boquilla.

En el año 2003 se han localizado trece referencias sobre los temas tratados. Sobre procesado de refuerzo de fibra encontramos la aportación de Ali, Iannace y Nicolais⁶⁶. Este trabajo presenta la preparación de material reforzado mediante extrusión y calandrado. El material empleado es el policaprolactona (PCL) reforzado con fibra larga de vidrio. Exponen en su trabajo que las propiedades de los termoplásticos reforzados con fibra de vidrio quedan afectadas por la adhesión entre las fibra de vidrio y la matriz que la contiene, la longitud, la fracción de volumen de fibra, la orientación de fibra y la distribución de la misma. Como resultado de su investigación destaca que las propiedades mecánicas de los composites preparados son menores en la impregnación que en el moldeo por compresión.

Norman y Robertson⁶⁷ estudian el efecto de la orientación sobre el endurecimiento en polímeros reforzados con fibra de vidrio. Los ensayos se han realizado sobre refuerzos del 20%, en este caso sobre PMMA. Se han estudiado tres tipos de configuraciones de las fibras, fibra en disposición normal a la entalla, en el mismo plano de entalla pero paralelamente y en el mismo plano de entalla pero normal a la misma. La medición de las orientaciones se ha realizado en secciones inclinadas y pulidos de la probeta y las imágenes se han obtenido mediante microscopía.

Dentro de la caracterización de polímeros reforzados aparece Matsuda⁶⁸, aplica la teoría de homogeneización para estudiar los efectos de la distribución transversal de fibras y el comportamiento elástico-viscoplástico del material reforzado con fibra larga de vidrio procesado por laminación. Como conclusiones establece que utilizando la desviación estándar de la distribución de fibras, así como una distribución radial, se ha dado a conocer el punto simétrico de la celda, de manera que se incrementa la disposición al azar de la distribución de fibras.

Otro trabajo interesante es el presentado por Mendoza⁶⁹ que en este caso trabaja sobre la influencia de las condiciones de proceso sobre la orientación de moléculas de un PP y su distribución espacial sobre la pieza. Las condiciones de proceso que analiza son la temperatura de fundido, la temperatura de molde y la velocidad de inyección, que son

las que considera que pueden afectar a la orientación. La determinación de las orientaciones se ha obtenido mediante dicronismo infrarrojo y medidas mediante WAX (rayos X).

H.S. Kim *et al*⁷⁰ aporta un trabajo aplicado sobre elementos textiles. En su trabajo aplica una metodología de captura de imágenes y obtención de la función de distribución de la orientación de fibras. La función de distribución la han obtenido mediante la aplicación de un procedimiento FFT creado por los autores. A continuación aplican la metodología de simulación con objeto de comparar resultados. Los autores consideran que para aplicaciones textiles los resultados son bastante buenos y que pueden tener una buena aplicación.

Sobre caracterización del polipropileno existe un trabajo de Gao⁷¹ en el que se desarrolla el modelo de degradación térmica que sufre el material cuando se transforma. Otro estudio sobre caracterizaciones de composites reforzados lo presenta Beaulne⁷². Presenta un modelo de ecuación constitutiva que permite describir el estado y las propiedades reológicas del material reforzado. El modelo está basado en la ecuación integral K-BKZ, disponible para polímeros. Tiene en cuenta el cálculo de la función de distribución de orientación de fibra y el tensor orientación, definido por polinomio de cuarto orden, pero utilizando finalmente el de segundo orden, que permite alcanzar un tiempo de computación menor. Todo el modelo queda constituido por un conjunto de cuatro ecuaciones. La primera definida por la denominada como ecuación de fibra, basada en la viscosidad, tensión de cizalla, fracción de volumen de la fibra, el diámetro de la fibra y la longitud de la misma. Dicha expresión quedaría de la siguiente forma

$$\tau_f = \eta \left(\dot{\gamma} \right) \frac{nL^3}{24 \times Ln \left(\frac{2h}{D} \right)} u_{1,2} S_{12} S_{ij}$$

La ecuación que emplea del tensor orientación, quedaría expresado de la forma

$$S_{ij} = \oint p_i p_j \psi(p) dp$$

donde $\psi(p)$ es la probabilidad de encontrar una fibra con la orientación p en el instante de tiempo t .

La ecuación de definición del polímero basado en el modelo K-BKZ quedaría

$$\tau_p = \int \sum_{k=1}^N \frac{G_k}{\lambda_k} \times e^{\left(\frac{t-t'}{\lambda_k} \right)} H(I_{c-1}, II_{c-1}) C_t^{-1}(t') dt'$$

donde τ_p es el tensor de tensión, λ_k y G_k son los tiempos de relajación y módulo de relajación respectivamente, N es el número de modos de relajación, C_t^{-1} es el tensor de esfuerzo Finger, I_{c-1} , II_{c-1} son la primera y segunda invariante y H es la función de memoria de esfuerzo.

Finalmente la expresión de la tensión del compuesto queda definida por

$$\tau_C = \tau_p + \tau_f$$

Concluye en su trabajo que las ecuaciones definidas tienen una buena precisión y que prevén incorporar otro tipo de tensiones y efectos de la viscosidad, además de altas tensiones presentes en la suspensión fibrosa.

Quien nos describe todos los modelos matemáticos de función de distribución de orientación de fibras, tensor orientación es Advani⁷³. Estos modelos son los que se tendrán en cuenta en el momento de realizar determinadas correlaciones y establecer las características del material en estudio.

Como variante en el procesado de refuerzos nos encontramos con los estudios del comportamiento de material reforzado con fibra natural, como lo expresa en su trabajo Weilage⁷⁴. Realiza una comparación de propiedades mecánicas y características de procesado de un polipropileno reforzado con fibra de lana, frente a uno reforzado con fibra de cáñamo. Ambos serían candidatos a sustituir al polipropileno reforzado.

En el año 2004 encontramos diversas aportaciones como la de Kenny et al⁷⁵. El trabajo presenta una aproximación estadística que además permite ser sistemática para poder evaluar y predecir las propiedades de composites reforzados con fibra natural discontinua aleatoria. En el trabajo consigue correlacionar la función de densidad de probabilidad con respecto al módulo de Young. En la comparativa aparecen fibras naturales como el lino y fibra de vidrio.

En el análisis de imágenes y en un campo paralelo como el del papel, aparece la aportación de Enomae, Han y Isogai⁷⁶. El campo de aplicación es el papel, la captura de imágenes se ha realizado mediante microscopía electrónica de barrido, y la metodología de análisis de imágenes ha sido el de la transformada de Fourier, con objeto de obtener los valores de las orientaciones de fibra. La modificación realizada en el proceso ha sido la adición de un coeficiente de amplitud de Fourier en la transformada de Fourier de la imagen capturada. En el aspecto de reconocimiento de partículas mediante análisis de imágenes encontramos la aportación de Shi et al⁷⁷. La captura de imágenes se realiza mediante microscopía de alta resolución y posteriormente mediante un tratamiento de binarización convencional. Ello les permite el reconocimiento de partículas contaminantes en un sustrato.

En el campo de la simulación aparece un trabajo de Kallien⁷⁸ en el que hace una presentación de un programa de simulación tridimensional en el que permite conocer y simular los procesos de llenado de la pieza, enfriamiento, compactación y orientación de fibras.

En trabajos de caracterización encontramos aportaciones como la de Papanicolaou, Zaoutsos y Kontou⁷⁹. Estudia el efecto de la orientación de fibras en la respuesta viscoelástica no lineal. Para ello se basa en la ecuación de viscoelasticidad no lineal de Schapery. La conclusión a la que alcanza el trabajo es que se aprecia un incremento en los valores de los parámetros de la no linealidad cuando de incrementan las tensiones, mientras que esto no sucede cuando decrece la orientación de fibras.

Hassan *et al*⁸⁰ también presentan un artículo en el que se aborda la problemática de la variación de propiedades mecánicas, como la resistencia al impacto, longitud de fibra, tensiones, cuando se rompen las fibras como consecuencia de la transformación. Las conclusiones que se alcanzan en el trabajo nos indican que ocurre una mayor degradación de fibra durante el procesado de los materiales reforzados cuando se incrementa la fracción de volumen de fibra. En el moldeo por inyección se logra una mayor longitud de fibra que en los procesos de pultrusión o extrusión. Las características mecánicas como tensión de rotura, modulo de elasticidad, impacto, son mejores en las fibras largas que en las cortas. Esto es debido al diámetro de fibra considerando las mismas condiciones de concentración.

Hine y Duckett⁸¹ nos describen en su trabajo las estructuras de orientación de fibras presentes en una muestra modelo con nervios. Para ello también recurre al análisis de imágenes para poder realizar la medición. La metodología empleada es la de la sección transversal pulida y capturada mediante microscopía. El refuerzo del material es fibra corta y calcula fracciones de volumen de fibra, ratio de aspecto de fibra y temperatura de transformación. Los materiales utilizados en los ensayos son PBT y nylon.

Vista *et al*⁸² nos presentan un trabajo paralelo sobre fibras alineadas unidireccionales. Exponen la influencia de la microestructura de la fibra unidireccional en las propiedades mecánicas.

Tucker III y Wang⁸³ nos exponen los modelos matemáticos que permiten conocer el comportamiento de la estructura de la orientación de fibras, conocer el modelo estándar de predicción vs medición, progresión hacia un modelo mejorado y cuales son las tendencias de futuro.

Sobre comportamiento a la rotura del material compuesto encontramos la aportación de Szekrenyes⁸⁴. En el trabajo estudia el efecto de laminación que presentan determinados materiales compuestos, así como los efectos de las tensiones y la orientación de las fibras. Por su parte Mieck, Reubmann y Lutzkendorf⁸⁵ estudian la resistencia al impacto de polímeros reforzados con fibra larga natural. Para ello realizan las primeras experiencias sobre polipropileno reforzado con fibras largas de vidrio y determinado cual es la influencia dominante en la absorción de energía de impacto. Posteriormente se ha comparado con la de la fibra natural.

Yang *et al*⁸⁶ exponen los trabajos realizados en la simulación 3D de la orientación de fibras cortas en polímeros inyectados. Se basa en la combinación de volúmenes finitos con el método VOF para solucionar el modelo de flujo durante el llenado. Posteriormente calcula el tensor orientación de segundo orden y modela la orientación tridimensional mediante la ecuación de Folgar-Tucker.

Mandal⁸⁷ presenta un modelo de predicción de orientación de fibras en problemas de flujo inducido. Desarrolla un modelo de elementos finitos que resuelve de manera intensiva las ecuaciones diferenciales parciales hasta encontrar la solución adecuada. El modelo requiere resolver el segundo momento de la función de distribución de orientación.

Como evolución de modelos predictivos encontramos las aportaciones de Zheng y Kenedy⁸⁸. Permiten modelizar la cristalización provocada por el flujo inducido según el

modelo de fene-p. Bartus y Vaidya⁸⁹ muestran un estudio muy completo sobre la energía de impacto de composites reforzados con fibra larga de vidrio. El análisis de imágenes se aplica en el estudio de la estructura de la rotura de las muestras, mediante microscopia electrónica. Finalizando la caracterización de los composites reforzados Larena y Ochoa⁹⁰ examinan la degradación superficial que sufren los polímeros reforzados.

Para analogías con las imágenes encontramos una metodología desarrollada por Dussieux et ali⁹¹. Aunque se aplica inicialmente para metales, se basa en el análisis de imágenes y estudia a través de las mismas las deformaciones plásticas del zirconio. Implementa en base a fotografías en color, algoritmos de segmentación y eliminación de ruidos de fondo. El objetivo es la obtención de unos bordes de grano lo mas nítidos posibles y poder realizar la medición necesaria.

Una de los pilares de nuestro trabajo futuro es la aportación de Yasuda, Kyoto y Mori⁹². Basa su estudio en la determinación de la orientación de fibras mediante la observación directa en una suspensión concentrada. El experimento se basa en hacer pasar el flujo a través de un cilindro y observar la variación de la orientación de fibras.

En el año 2005 aparecen un número similar de publicaciones, destacando en el campo de caracterización las aportaciones de Narva, Lassila, Vallitu⁹³. Aunque el campo de aplicación de la experimentación se centra en la dentadura, el desarrollo del artículo se basa en el cálculo a fatiga de unos elementos compuestos que deben simular el comportamiento en servicio de una dentadura. Se ensaya a flexión y a compresión.

En el modelado de propiedades de fibras cortas, Price et ali⁹⁴ estudian, mediante el desarrollo de una metodología, la predicción de anisotropías elásticas y expansiones térmicas del composite. Durante sus trabajos realizan una caracterización de la orientación de fibras. Dicha caracterización se lleva a cabo capturando imágenes en sección transversal pulida en microscopia de reflexión óptica.

Mas caracterización y procesado nos aportan La Mantia, Morreale y Mohd⁹⁵. En su trabajo nos exponen los efectos de la adición de cargas orgánicas, como madera, lino o maíz, en matriz de polipropileno. Las propiedades de resistencia mejoran pero no sucede lo mismo cuando se añaden a composites reforzados con fibra de vidrio.

Sobre comportamiento de fibras destaca la publicación de Kun y Jian-Zhong⁹⁶. Se plantea la resolución de la ecuación del vector de distribución de orientación de segundo orden. Como verificación del modelo se aplica la resolución de la ecuación de Folker-Plank. Su modelo permite aplicarse de manera general para el caso de vectores de orientación de fibras tridimensionales. Lin, Chai y Olsen⁹⁷ presentan también un modelo de comportamiento de interacciones de fibras tridimensional que se aplica paralelamente en fibras de pulpa de papel. El modelo en el que se basa es la teoría de del cuerpo delgado y su interacción mecánica.

Parthasarathy, Sevegney y Kannan⁹⁸ investigan el efecto de la temperatura en la elasticidad y estructura del polipropileno sintáctico. Se ha determinado la orientación y estructura mediante espectroscopia y microscopia de rayos X.

Qiao y Shan⁹⁹ desarrollan una metodología para el cálculo del comportamiento a torsión de materiales composites reforzados pultrusionados. EL modelo que emplea es la formulación variacional de Ritz.

Continuando con la caracterización de los composites reforzados, nos aparecen varios trabajos interesantes. El primero está desarrollado por Han et al.¹⁰⁰ y presenta correlaciones entre la longitud de fibras, contenido de fibra y características mecánicas. Las imágenes que analiza esta tomadas mediante microscopía electrónica. El siguiente trabajo está aportado por Arzondo, Pérez y Carella¹⁰¹. En él explican la preparación de una mezcla de polipropileno reforzado con fibra plana. A la mezcla se ha procedido a continuación a caracterizar la adhesión de fibras y su degradación térmica, con objeto de evaluar sus posibilidades de proceso.

El modelado de fibra y la determinación de la orientación de la misma es desarrollado por Vincent et al.¹⁰² en su trabajo en polymer. Aplica la captura de imágenes de una sección transversal pulida y caracteriza los resultados de un refuerzo de fibra corta de vidrio.

Thomason¹⁰³ nos explica la influencia de la longitud de fibra y su concentración en las propiedades del polipropileno reforzado con fibra larga de vidrio. En este caso hace referencia a concentraciones del 40 o 50% de contenido de fibra, lo cual acerca el estudio del comportamiento del PP reforzado presente en nuestro estudio. En la misma línea aparece la publicación de Lafranche et al.¹⁰⁴ que expresa la relación entre las propiedades de flexión, microestructura y condiciones de proceso de poliamida reforzada con fibra larga de vidrio.

Polymer Composites nos presenta el estudio realizado por Pochiraju¹⁰⁵ en el que se explica una metodología de diseño que permite establecer cual es la anisotropía dependiente del proceso de transformación, en este caso moldeo por inyección. Para ello aplica una técnica de laminación denominada capas homogenizadas.

Palanikumar et al.¹⁰⁶ nos muestra cual es la relación que existe entre la orientación de fibras y la rugosidad superficial. Presenta un desarrollo y análisis de experimentos que relaciona los resultados de mecanizado y la orientación de fibra en un material composite reforzado con fibra de vidrio.

Fernlund¹⁰⁷ nos presenta una metodología paralela de evaluación de imágenes aplicado a superficies geológicas bidimensionales. La metodología permite obtener datos granulométricos. Kawamura¹⁰⁸ por su parte nos muestra un trabajo sobre la determinación de la distribución de orientación de fibras 3D mediante el uso de imágenes obtenidas por microscopía óptica de reflexión. Mediante el análisis de las elipses obtenidas y su interferencia en los márgenes determina la orientación tridimensional.

Malchev, David, Piquen y Gotsis¹⁰⁹ presentan una caracterización de composite reforzado y cargado. Las fotos están capturadas mediante microscopía electrónica. En el Fraunhofer Institute Linn¹¹⁰ incorpora el modelo de sistema diferencial algebraico. Este modelo permite predecir de una manera más exacta la orientación de fibras.

Un trabajo paralelo al nuestro es el desarrollado por Mather¹¹¹. A través de visión artificial y control de imágenes desarrolla un sistema para la captura de las orientaciones de fibra y su aplicación a sistemas multicapa.

En el año 2006 se han incorporado más publicaciones. Por nuestra parte solo se han incorporado hasta la fecha algunas de las que se encuentran en prensa en el momento del cierre del presente estudio.

Marquez¹¹² presenta un método basado en la transformada discreta de Fourier que permite predecir la función de distribución de orientación de fibras.

Como ejemplo de aplicación de análisis de imágenes encontramos la aportación de Lacaze¹¹³ analizan las imágenes mediante un software que permite realizar simulación del comportamiento a oxidación del recubrimiento metálico.

Referencias.

- ¹ Thomason, J.L. "The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene: 5. Injection moulded long and short fibre PP". *Composites A.*, 33, 1641, 2002
- ² Anonimo. "Long fiber compounds". Folleto comercial de RTP Co., 2001
- ³ Constable, R.C., Kattas, L.N. "Long glass fiber composites: Rapid growth and change". *Antec papers* 2002.
- ⁴ Skourlis, T.P., Mehta, S.R., Chassapis, Manoochchri. "Impact fracture behaviour of injection molded long glass fiber reinforced polypropylene". *Pol. Eng. Sci.*, 38, 1, Jan 1998.
- ⁵ Pertusa Grau, José. "Técnicas de análisis de imagen. Aplicaciones en Biología". Universitat de Valencia, 2003.
- ⁶ Scion Image for Windows Reference Manual. Beta 4.0.2. Scion Co. 2000.
- ⁷ Morales, White. "Residual stresses and molecular orientation in particulate-filled polypropylene. *J. of mat. sci.*, 23. 1988.
- ⁸ Hine, Davison, Duckett, Ward. "Measuring the fibre orientation and modelling the elastic properties of injection-moulded long-glass-fibre-reinforced nylon". *Composites sci. tech.* 53, 125-131, 1995.
- ⁹ Neves, Isdell, Pouzada. "On the effect of the fiber orientation on the flexural stiffness of injection molded short fiber reinforced polycarbonate plates". *Pol. Compos.* Vol 19, 5 oct. 1998.
- ¹⁰ Youssef, Denault. "Thermoformed glass fiber reinforced polypropylene: microstructure, mechanical properties and residual stresses". *Pol. Compos.* Vol. 19. 3. June, 1998
- ¹¹ Mlekusch. "Fibre orientation in short-fibre-reinforced thermoplastics II. Quantitative measurements by image analysis". *Compos. Sci. tech.* 59. 1999
- ¹² Massicotte, F. "Length análisis of randomly oriented glass fibers". Dept. Of Metalurgy and materials engineering. University of Connecticut. 1996.
- ¹³ Cintra, J.;Tucker III, C. "Orthotropic closure approximations for flow-induced fiber orientation". *J. of Rheology*, 39, 6, 1995
- ¹⁴ Hine, Duckett, Ward. "A comparison of short glass fiber reinforced polypropylene plates made by conventional injection holding and using shear controlled injection molding". *Pol. Compos.* Vol 17, 3, 1996.
- ¹⁵ Davison, Clarke, Archenhold. "Large-area, high-resolution image analysis of composite materials", *J. of microscopy*, 185, 1996
- ¹⁶ Davison, Clarke. "Extending the dynamic range of fibre length and fibre aspect ratios by automated image analysis". *Jour. Of microscopy.* Vol 196. 1999.
- ¹⁷ Von Bradsky, Bailey, Cervenka, Zachmann, Allan. "Characterisation of finite length composites: Part IV- Structural studies on injection moulded composites". *Pure & Appl. Chem.* Vol 69. 1997.
- ¹⁸ Davé, Chundury. "Effect of injection holding conditions on the properties of filled and reinforced polypropylene". *Jour. Of Injec. Molding tech.* vol, 1, n° 3, 1997.
- ¹⁹ Shean-Wei Yang, Wei-Kuo Chin. "Mechanical properties of aligned long glass fiber reinforced polypropylene. II: Tensile creep behaviour". *Pol. Compos.* Vol. 20, n 2, 1999.
- ²⁰ P.V. Joseph, Kuruvilla, Sabu Thomas. "Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal-fibre-reinforced polypropylene composites". *Compos. Sci. and tech.*, 59, 1999.
- ²¹ Kyeong-Hee Han y Yong-Taek Im. "Modified hybrid closure approximation for prediction of flow-induced fiber orientation". *Jour. Of rheol.* 43, 3, 1999
- ²² VerWeyst, Tucker III, Foss y O'Gara. "Fiber orientation in 3-D injection molded features: prediction and experiment. *Int. Pol. Processing*, June, 1999.
- ²³ Gonzalez, F, Chassapis. C. "Plane strain fracture toughness performance of injection molded long fiber reinforced thermoplastics: An experimental investigation". *Jour. Of inj. Molding technology*, vol 3, 3, 1999.
- ²⁴ Barbosa, S. Kenny, JM. "Processing of short fiber reinforced polypropylene. II: Statistical study of the effects of processing conditions on the impact strength". *Pol. Engi. Sci.* vol 39, 10. 1999.
- ²⁵ Mlekusch, Lehner, Geymayer. "Fibre orientation in short-fibre-reinforced thermoplastics I. Contrast enhancement for image analysis". *Compos. Sci. tech.* 59, 1999.
- ²⁶ Venkatesh, Dunand. "A model for the longitudinal primary creep of a long-fiber composite". *Acta metallurgica*.47,17, 1999
- ²⁷ Thomason. "The influence of fibre properties of the performance of glass-fibre-reinforced polyamide 6,6.". *Compos. Sci. and Tech.* 59, 1999.
- ²⁸ Zak, Haberes, Park, Benhabib. "Mechanical properties of short-fibre layered composites: prediction and experiment". *Rapid prototyping journal*, vol 6. n° 2, 2000.
- ²⁹ Zak, Heberer, Park, Benhabib. "Estimation of average fibre length in short-fibre composites by two-section method". *Compos. Sci. and tech.* vol 60. 2000.

- ³⁰ Talbot, Lee, Jeulin, Hanson y Hobbs. "Image analysis of insulation mineral fibres". *Journal of microscopy*, vol 200, pt 3, 2000.
- ³¹ López, Riss, Gentier, Flamand, Archambault, Bouvet. "Image análisis for modelling shear behaviour". *Image anal. Stereol.*, 19, 2000.
- ³² Pierret, Moran, McLachlan, Kirby. "Measurement of root length density in impact simples using x-radiography and image analysis". *Image anal. Stereol.* 19, 2000.
- ³³ Barbosa, Kenny. "Processing of short fiber reinforced polypropylene. I. Influence of processing conditions on the morphology of extruded filaments". *Pol. Engi. Sci.* vol. 40, 2000
- ³⁴ Bush, Torres, Methven. " Rheological characterization of discrete long glass fibre (LGF) reinforced thermoplastics". *Compos. Part A.* vol, 31, 12, 2000.
- ³⁵ Torres, Bush. " Sheet extrusion and thermoforming of discrete long glass fibre reinforced polypropylene". *Compos. A. apl. sci. man.* 31, 2000.
- ³⁶ Novotortzeva, Kulachinckaya, Andreeva, Kalugina, Aizinson, Lunin, Tochin, Urman, Kalinina, Gumargalieva, Zaikov. " The ageing of modified glass-reinforced polypropylene in air and in antifreeze". *Pol. Degrad. And stab.*, 69, 2000.
- ³⁷ Nilsson, Ericson, Holmberg. " Flow induced fiber orientation in compression molded glass mat thermoplastic". *Pol. Comp.* vol 21. 2000.
- ³⁸ Trende, Astrom, Nilsson. " Modelling of residual stresses in compression moulded glass-mat reinforced thermoplastics". *Compos. A: apl. Sci. and man.* Vol 31. 2000.
- ³⁹ Dweib, Vahlund, Bradaigh. " Fibre structure and anisotropy of glass reinforced thermoplastics". *Compos. A: apl. Sci. and man.* Vol. 31. 2000.
- ⁴⁰ Gonzalez, Chassapis. "Fracture toughness variations of injection molded long fiber reinforced thermoplastics". *Jour. of reinfor. Plastics and compos.* Vol 20, 10, 2001
- ⁴¹ Loos, Schimanski, Hofman, Peijs, Lemstra. "Morphological investigations of polypropylene single-fibre reinforced polypropylene model composites". *Polymer*, 42, 2001.
- ⁴² Thomason, J.L. Kalinka. "A technique for the measurement of reinforcement fibre tensile strength at sub-milimetre gauge lengths". *Compos. A: apl sci. and manuf.* 32, 2001.
- ⁴³ Thomason, J.L. "Micromechanical parameters from macromechanical measurements on glass reinforced polyamide 6,6 ". *Compos. Sci. tech.* 61. 2001.
- ⁴⁴ Meske, R.; Schnack, E. " A micromechanical model for x-ray stress analysis of fiber reinforced composites". *Jour. Of comp. mat.* Vol 35, n° 11, 2001.
- ⁴⁵ Zak, Park, Benhabib. "Estimation of three dimensional fibre orientation distribution in short fibre composites by a two section method". *Jour. Compos. Mat.*, 35, 4, 2001.
- ⁴⁶ Eberhardt, Clarke. "Fibre orientation measurements in short-glass-fibre composites. Part I: Automated, high-angular-resolution measurement by confocal microscopy". *Compos. Sci. tech.* 61, 2001
- ⁴⁷ Eberhardt, Clarke, Vincent, Giroud, Flouret. "Fibre orientation measurement in short-glass-fibre composites- II: a quantitative error estimate of the 2D image analysis technique." *Compos. Sci. tech.* 61, 2001
- ⁴⁸ Aurich, Menning. "Flow-induced fiber orientation in injection molded flax fiber reinforced polypropylene". *Pol. Compos.*, vol 22, n° 5, 2001.
- ⁴⁹ Garcia, D.; Courbebaisse, Jourlin. " Image analysis dedicated to polymer injection holding". *Image anal stereol.* 20, 2001
- ⁵⁰ Vahlund, Gebart. "Analysis of an image processing method for fiber orientation in polymer composites". *Pol. Compos.* Vol 22, 3, 2001.
- ⁵¹ Vahlund, F. " Fiber orientation, rheological behaviour and simulation of the compression moulding process for composite materials". Ph.D. Thesis. Lulea University. 2001.
- ⁵² H.S. Kim, B. Pourdeyhimi. " Computational modelling of mechanical performance in thermally point bonded nonwovens". *Journal of textile and apparel. Tech. and man.* Vol 1, 4, 2001.
- ⁵³ Jun Seok Lee, Francis Lai. "Investigation for injection molding of long glass fiber reinforced polypropylene ". *Antec.* 2002.
- ⁵⁴ Ganguly, Poole. " Characterization of reinforcement distribution inhomogeneity in metal matrix composites". *Mat. Sci. engi. A.* 332, 2002.
- ⁵⁵ Nilsson, Fernberg, Berglund. " Strain field inhomogeneities and stiffness changes in GMT containing voids". *Composites.part A: apl. Sci. man.* Vol. 33. 2002.
- ⁵⁶ Neves, Pontes, Pouzada. "Fiber content effect on the fiber orientation in the injection molded GF/PP composite plates". *Antec.* 2002.
- ⁵⁷ Yasuda, Mori, Nakamura. "A new visualization technique for short fibers in a slit flow of fiber suspension". *Int. jour. Of engi, sci.* 40. 2002.

- ⁵⁸ Thomason, J.L. "Interfacial strength in thermoplastic composites-at last an industry friendly measurement method?." *Compos. Part a: appl. Sci. and man.* Vol 33, 2002.
- ⁵⁹ Thomason. "Micromechanical parameters from macromechanical measurements on glass reinforced polypropylene". *Compos. Sci. tech.* 62, 2002.
- ⁶⁰ Segard, Benmedakhene, Laksimi, Lai. "Influence of the fibre-matrix interface on the behaviour of polypropylene reinforced by short glass fibres above glass transition temperature". *Compos. Sci. and tech.* 62, 2002.
- ⁶¹ Watanabe. "Evaluation of fiber orientation in ferromagnetic short-fiber reinforced composites by magnetic anisotropy." *Jour. Of comp. mat.* Vol 36. n° 8, 2002.
- ⁶² Shao Yun Fu, Wing Mai, Chui-Yee Ching, Robert Li. "Correction of the measurement of fiber length of short fiber reinforced thermoplastics." *Compos. A. appl. Sci. and man.* ,33, 2002.
- ⁶³ Waschitschek, Kech, Christinasen. "Influence of push-pull injection holding on fibres and matrix of fibre reinforced polypropylene". *Compos. Part a. appl. Sci. man.* 33, 2002.
- ⁶⁴ Du Hwan Cheng, Tai Hun Kwon. "Invariant- based optimal fitting closure approximation for the numerical prediction of flow-induced fiber orientation." *Jour. of rheolog.* 46, 1, 2002.
- ⁶⁵ Garcia-Rejon, Meddad, Turcott, Carmel. "extrusion blow holding of long fiber reinforced polyolefins". *Pol. Engi. And sci.* vol 42, 2, 2002.
- ⁶⁶ Ali, Iannace, Nicolais. "Effects of processing conditions on the impregnation of glass fibre mat in extrusion/calendaring and film operations." *Compos. Sci. and tech.* 63, 2003.
- ⁶⁷ Norman, Robertson. "The effect of fiber orientation on the toughening of short fiber-reinforced polymers". *Jour. Of appl. Pol. Sci.* vol 90, 2003.
- ⁶⁸ Matsuda, Ohmo, Tanaka, SHimizu. "Effects of fiber orientation on elastic-viscoplastics behaviour of long fiber reinforced laminates". *Int. jour. Of mech. Sci.* 45, 2003.
- ⁶⁹ Mendoza, Régnier, Séller, Lebrun. "Spatial distribution of molecular orientation in injection molded iPP; influence of processing conditions." *Polymer*, 44, 2003.
- ⁷⁰ H.S. Kim. "In-plane liquid distribution in nonwoven fabrics: Part 2- simulation". *INJ.* Summer 2003.
- ⁷¹ Gao, Kaneko, Amasaki, Nakada. "A kinetic study of thermal degradation of polypropylene". *Pol.degrad. and stab.* 80, 2003.
- ⁷² Beaulne, Mitsoulis. "Rheological characterization of fiber-filled polymer composites via constitutive modeling". *Jour. Of renfor. Plast. And compos.* Vol 22. n° 17, 2003.
- ⁷³ S. G. Advani, E. M. Sozer. "Process modelling in composites manufacturing". Ed. Marcel Dekker. ISBN 0824708601, 2003
- ⁷⁴ Weilage, Lampke, Utschick, Soergel. "Processing of natural-fibre reinforced polymers and the resulting dynamic-mechanical properties". *Jour. Mat. Processing. Tech.* 139, 2003.
- ⁷⁵ Biagiotti, Fiori, Torre, Lopez-Manchado, Kenny. "Mechanical properties of polypropylene matrix composites reinforced with natural fibers: a statistical approach". *Pol. Comps.* Vol 25, 1, 2004
- ⁷⁶ Enomae, Han, Isogai. "Fiber orientation distribution of paper surface calculated by image analysis". *Proceeding of int. papermaking and environment.* Tiajin, Book 2, 2004.
- ⁷⁷ Shi, Hua, Cheung, Li, Yuan. "Automatic recognition and evaluation of micro-contaminant particles on ultra-smooth optical substrates using image analysis method". *Opt. and lasers in engi.* ,41, 2004.
- ⁷⁸ Kallien. "Optimization of the injection molding process for thermoplasts with 3D simulation". Internal paper, Sigma Engineering GmbH, Aachen. 2004.
- ⁷⁹ Papanicolaou, Zoautos, Kontou. "Fiber orientation dependence of continuous carbon/epoxy composites nonlinear viscoelastic behavior". *Compos. Sci and tech.* 64, 2004.
- ⁸⁰ Hassan, Yahya, Yahaya, Tahir, Hornsby. "Tensile, impact and fiber length properties of injection-molded short and long glass fiber-reinforced polyamide 6,6 composites". *Jour. Of reinf. Plastics and compos.* Vol. 23. 9, 2004.
- ⁸¹ Hine, Duckett. "fiber orientation structures and mechanical properties of injection molded short glass fiber reinforced ribbed plates". *Pol. Compos.* Vol. 25, 3, 2004
- ⁸² Bizet, Breard, Bouquet, Jernot, Moussa. "Serial sections through a continuous fiber-reinforced polymer composite". *Imag. Anal. Stereol.* 23, 2004.
- ⁸³ Tucker III, Wang. "Improved fiber orientation predictions for injection molded composites". NSF/DOE/APC workshop, the future of modelling in composites molding processes. 2004.
- ⁸⁴ Szekrenyes. "Overview on the experimental investigations of the fracture toughness in composite materials. HEJ, 2004
- ⁸⁵ Mieck, Reubmann y Lutzkendorf. "Calculations and experiments for impact strength of natural long-fiber reinforced composites". *Adv. engi. Mat.* Vol. 6, 3, 2004.
- ⁸⁶ Wen-Hsien Yang, David Hsu, Venny Yang, Rong Chang. "Computer simulation of 3D short fiber orientation in injection molding". *Antec* 2004.

-
- ⁸⁷ Mandal, D.K. "Simulation of flow-induced fiber orientation with a new closure model using the finite element method". Ph. D. thesis. Michigan State University, 2004.
- ⁸⁸ Zheng, Kennedy. "A model for post-flow induced crystallization: general equations and predictions". *J. rheol.* 48, 4, 2004.
- ⁸⁹ Bartus, Vaidya. "Performance of long fiber reinforced thermoplastics subjected to transverse intermediate velocity blunt object impact". *Compos. struct.* 2004.
- ⁹⁰ Larena, Jiménez de Ochoa. "Use of different surface analysis techniques for the study of the photo-degradation of a polymeric matrix composite". *Appl. Surf. sci.* 2004.
- ⁹¹ Dossieux, Gouton, Buy, Voltz. "Study of plastic deformation modes in zirconium by color image analysis". *Jour. Of mat. Proc. Tech.* 153-154, 2004.
- ⁹² Yasuda, Kyoto, Mori. "An experimental study of flow-induced fiber orientation and concentration distributions in a concentrated suspension flow through a slit channel containing a cylinder". *Rheol. Acta.* 43, 2004.
- ⁹³ Narva, Lassila, Vallitu. "Flexural fatigue of denture base polymer with fiber-reinforced composite reinforcement". *Compos. Part A. appl. sci. anad man.*, 36, 2005.
- ⁹⁴ Price, Hine, Whiteside, Cunha, Ward. "Modelling the elastic and thermoelastic properties of short fibre composites with anisotropic phases". *Compos. Sci. and tech.* 2005.
- ⁹⁵ La Mantia, Morreale, Mohd. "Processing and mechanical properties of organic filler-polypropylene composites". *Jour. Apl. Pol. Sci.*, vol. 96, 2005.
- ⁹⁶ Kun, Zhong. "Research on the behavior of fiber orientation probability distribution function in the planar flows". *Jour. Of zhejiang sci.* 6A, 4, 2005.
- ⁹⁷ Lin, Chai, Olsen. "Research on the interaction of three contact fiber in the fiber suspensions". *Jour. Of mat. Sci.* 40, 2005.
- ⁹⁸ Parthasarathy, Sevegney, Kannan. "Monitoring elasticity and orientation in syndiotactic polypropylene". *Polymer.* 46, 2005.
- ⁹⁹ Qiao, Shan. "explicit local buckling analysis and design of fiber-reinforced plastic composite structural shapes". *Compos. Struct.* 70, 2005.
- ¹⁰⁰ Han, Liu, Yu. "Preparation and mechanical properties of long glass fiber reinforced PA 6 composites prepared by a novel process". *Macromol. Mat. And engi.* 290, 2005.
- ¹⁰¹ Arzondo, Pérez, Carella. "Injection molding of long sisal fiber-reinforced polypropylene: effects of compatibilizer concentration and viscosity on fiber adhesion and thermal degradation". *Pol. Engi. And sci.* 2005.
- ¹⁰² Vincent, Giroud, Clarke, Eberhardt. "Description and modeling of fiber orientation in injection holding of fiber reinforced thermoplastics". *Pol.* 46, 2005.
- ¹⁰³ Thomason. "The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene. 6. the properties of injection moulded long fibre PP at high fibre content". *Compos. Part a. apl. Sci. and man.* 36, 2005.
- ¹⁰⁴ Lafranche, Krawczak, Ciolczyk, Maugey. "Injection moulding of long glass fiber reinforced polyamide 66: Processing conditions/microstructure/Flexural properties relationship". *Adv. In pol. Tech.*, vol 24, 2, 2005.
- ¹⁰⁵ Pochiraju, Jovanovic. "Modelling material property heterogeneity in fiber reinforced injection molded plastic parts". *Pol. compos.* 2005.
- ¹⁰⁶ Palanikumar, Karunamoorthy, Karthikeyan. "Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fiber-reinforced polymer composites". *Mat & design.* 2005.
- ¹⁰⁷ Fernlund. "3D image analysis size and shape method applied to the evaluation of the los angeles test". *Engi. Geology.* 77, 2005.
- ¹⁰⁸ Kawamura, Ikeda, Morita, Sanomura. "Unambiguous determination of 3D fiber orientation distribution in thermoplastic composites using SAM image of elliptical mark and interface fringe." *Jour. Of compos. Mats.* 39, 2005.
- ¹⁰⁹ Malchev, David, Piquen y Gotsis. "Mechanical properties of short fiber reinforced thermoplastic blends". *Pol.* 46, 2005.
- ¹¹⁰ Linn, J. "The folgar-Tucker model as a differential algebraic system for fiber orientation calculation". *ITWM.* 75, 2005.
- ¹¹¹ Mather, Bodily, Cipra, Seigmund. "An image analysis technique to assist in the determination of orientation distributions of the manufacture of carbon fiber composites". *Master Thesis Purdue University.* 2005.
- ¹¹² Marquez. "Fourier analysis and automated measurement of cell and fiber angular orientation distributions". *Int. jour. Of solid and struct.* In press, 2006.

¹¹³ Lacaze, Lupken, Vialas, Monceau. “ Application of image analysis and image simulation for quantitative characterization of seale spallation during cyclic oxidation of a Pt-aluminade coating. *Intermetallics*, 14, 2006.

OBJETIVOS

Objetivos

Los materiales compuestos reforzados con fibra larga presentan la ventaja de la rápida transformación, así como la fabricación de piezas de geometría complejas mediante inyección. Por el contrario sus propiedades son mas dependientes de las variables de proceso y en una misma pieza podemos encontrar diferentes distribuciones de la fibra debido al diferente flujo de la matriz termoplástica.

Por ello debemos disponer de una herramienta de análisis rápido y eficaz que permita el examen de una pieza y con diferentes condiciones de proceso, que en técnicas de inyección son muy variadas (presiones, temperaturas, materiales, moldes, velocidades de inyección, etc.).

Para dar una solución al problema presentado, nuestra hipótesis plantea la posibilidad de alcanzar datos objetivos y repetitivos de la distribución de orientación de fibras largas mediante el empleo de análisis bidimensional de imágenes. En nuestro caso se ha diseñado un procedimiento operativo capaz de realizar gran número de análisis y aplicable al estudio de los materiales termoplásticos reforzados con fibras largas de vidrio.

Con este fin nuestro trabajo se ha estructurado en las siguientes etapas y por ello objetivos secundarios que hay que alcanzar:

- Obtención de datos. Para ello se han realizado diversas pruebas de captación de imágenes tridimensionales y bidimensionales. La captación de imágenes tridimensionales necesita de unos tratamientos posteriores extremadamente complejos. La captación de imágenes bidimensionales nos ofrece la posibilidad de determinar las orientaciones de las fibras en la capa de trabajo y a su vez supone un método más sencillo de realizar la captura de las mismas imágenes, aportando datos parecidos.
- Diseño de una macro de algoritmos que permitan el tratamiento de las imágenes de una manera automatizada, sin apenas intervención del usuario y que además no genere un error de calculo elevado.
- Estudio y determinación del error obtenido en el proceso de captura y determinación de las frecuencias de orientación y de la función de orientación de las fibras.
- Aplicación y estudio del proceso de análisis sobre diversas muestras de materiales transformados mediante inyección. Posteriormente se realiza el estudio de la orientación de fibras y determinadas propiedades del material.
- Estudio y aplicación del proceso de análisis diseñado sobre diversas muestras de materiales transformados mediante moldeo por compresión con fibras orientadas al azar y fibras totalmente orientadas.
- Aplicación del proceso de análisis sobre diversas muestras de otros materiales transformados con objeto de conocer el comportamiento del diseño de la macro con otro tipo de fibra de vidrio.

2.- Planificación de la investigación.

Con objeto de alcanzar los objetivos anteriormente especificados se han programado las siguientes etapas:

- Obtención de datos. En esta etapa de la investigación se ha realizado un análisis de la mejor tecnología que podía emplearse para el tratamiento de datos. Esto implica un estudio en profundidad de una gran parte de software que se implica en la tecnología elegida. El barrido de elecciones ha incluido demos disponibles en sitios web de proveedores y otro tipo amparado en el denominado software libre o licencia GPL.
- Análisis y mejora de algoritmos detectores. Trabajando sobre el software anteriormente adoptado, se analizarán la mayoría de algoritmos implicados en el procedimiento de tratamiento de datos. Finalmente se adaptarán y optimizarán los algoritmos.
- Cálculo de errores. Adaptados los algoritmos necesarios, se procede a realizar un cálculo exhaustivo del error que se está incurriendo en la implementación de esta metodología de trabajo.
- Desarrollo de metodología de tratamiento de muestras en los diversos procesos de transformación de polímeros. Ello implica el procedimiento de tratamiento de muestras en el proceso más complejo de transformación, como es el de inyección.
- Captura de imágenes. Finalizada la aplicación del procedimiento de tratamiento de muestras se procede a la captura de cada una de las muestras obtenidas. Se trabajará sobre la resolución, iluminación y el número de aumentos necesarios para la captura.
- Aplicación de algoritmos optimizados y tratamiento estadístico de los datos en cada una de los procesos implicados.
- Interpretación de resultados. Esta etapa nos permitirá conocer la validez de los datos que se han obtenido a lo largo de la presente investigación y validar la metodología empleada con la obtención de unos errores mínimos.

CAPITULO 3
EXPERIMENTAL

3.- EXPERIMENTAL

A lo largo de todo el proceso se han utilizado una serie de recursos disponibles, tales como una máquina de inyección, un molde monitorizado de probetas de tracción y de ensayos charpy, lupas, cámaras, prensa de platos calientes y software de tratamiento de imágenes. A continuación se detallan cada uno de los elementos.

3.1.-Maquinaria

Las muestras han sido inyectadas mediante una inyectora Mateu&Sole modelo Meteor 270/75 con las siguientes características principales:

- Diámetro del husillo (relación L/D): 35 mm
- Presión máxima de inyección 173,5 Mpa
- Volumen teórico de inyección: 155 cm³
- Peso máximo de inyección (PS): 140 gr
- Caudal máximo de inyección: 106 cm³/s
- Fuerza de cierre : 750 kN
- Zonas de calefacción en husillo: 4+1



3.2.- Molde

El molde empleado para la transformación es de una configuración dinámica de cuatro figuras dos de ellas del tipo mostrado en la figura. Trabajamos sobre una probeta de tracción y una probeta de ensayos charpy. El molde está compuesto por llaves de cierre que permiten la selección de las figuras a inyectar.

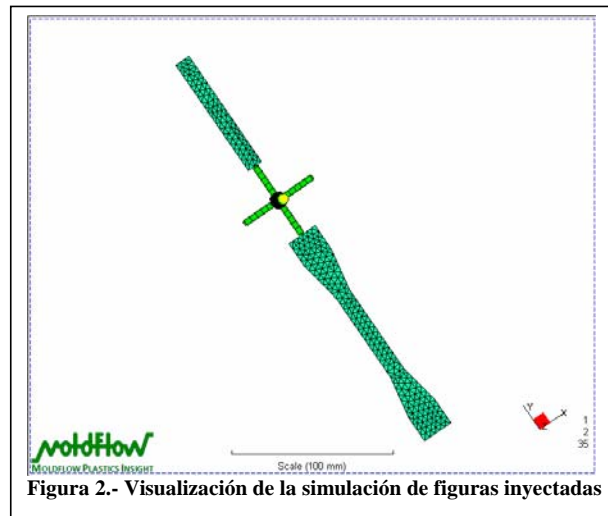


Figura 2.- Visualización de la simulación de figuras inyectadas

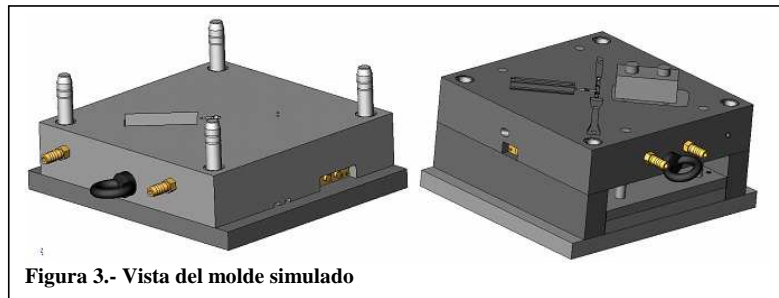


Figura 3.- Vista del molde simulado

EL molde está equipado con un conjunto de sensores de presión y temperatura para la captación de información durante el proceso. Este conjunto de sensores se complementa con un sistema de adquisición de datos para el archivo y visualización de las señales.

Las características de los sensores son las mostradas a continuación:

- 2 transductores de presión y temperatura KISTLER 6190A, para rango 0÷2000 bar y T_{max} de 450°C, localizados en la cara superior de una figura “caja” y en la cara superior de la figura probeta de tracción.
- 1 transductor de presión KISTLER 6157BA para rango 0÷2000 bar, localizado en la base del bebedero.
- 2 Transductores de temperatura KISTLER 6192^a para T_{max} de 450°C, localizados en la cara inferior de una figura denominada “placa de doble espesor”.



Figura 4.- Molde monitorizado de inyección.

También se ha utilizado una prensa de platos calientes de la marca Robima, S.A. (Valencia, España) y una mufla de la casa Heron modelo 12/200.

El material óptico que se ha utilizado ha sido:

Lupa Olympus modelo SZ-CTV en la que se han utilizado las lentes de 4 y 5x aumentos. Esta lupa incorpora un sistema de adaptador de cámara fotográfica. La cámara utilizada para las capturas de las imágenes de las muestras es una Olympus Cammedia C-3030 zoom.

Otras imágenes se han tomado utilizando una lupa Olympus BH- MTV con lente de 10x aumentos, dotada con un sistema de captura de imágenes tipo cámara Sony CCD-iris modelo SSC-C370 P. A través de la cámara se transmitían las imágenes a una placa capturadora que nos permitía guardar las imágenes.

3.3.- Material

El material que se ha empleado para realizar las comprobaciones del procedimiento operatorio ha sido un PP reforzado con 50% de fibra larga de vidrio, marca Celstran™ PP -GF50-04 0403P10/10, de la casa Ticono©. Según la información que obra en nuestro poder este material está térmicamente estabilizado y además químicamente enganchado a la fase matriz de polipropileno. Los pellets son cilíndricos y de una media de 10 mm de longitud.

Las propiedades mecánicas y de transformación que suministra el fabricante es:

Módulo de tracción	11800	MPa	ISO 527-1/-2
Resistencia a la tracción	127	MPa	ISO 527-1/-2
Alargamiento a rotura	1.9	%	ISO 527-1/-2
Resistencia al impacto Charpy (+23°C)	55	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Resistencia al impacto Charpy (-30°C)	54	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Res. impacto Charpy c/entalla (+23°C)	18	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Res. impacto Charpy c/entalla (-30°C)	25	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Energía de perforación (+23°C)	17	J	ISO 6603-2
Energía de perforación (-30°C)	18	J	ISO 6603-2
Temperatura de fusión (10°C/min)	164	°C	ISO 11357-1/-3
Estabilidad al calor (1.80 MPa)	158	°C	ISO 75-1/-2
Estabilidad al calor (8.00 MPa)	138	°C	ISO 75-1/-2
Moldeo por inyección-temperatura de la masa	270	°C	ISO 294
temperatura del molde	70	°C	ISO 10724
velocidad de inyección	80	mm/s	ISO 294
presión de mantenimiento	83	MPa	ISO 294

3.4 Diseño de experimentos.

Con el fin de establecer las funciones de relación existentes entre las variables de proceso y los indicadores de efecto considerados, a través de las distintas variables resultado previstas, es necesario establecer un conjunto de simulaciones estructurada que facilite tanto la labor de obtención de resultados como su coherencia para el análisis de los mismos.

Para ello se establece un diseño de experimentos (DOE) con el que se establezca la identificación de los factores (variables de proceso) que producen cambios en las variables respuesta (variables resultado de proceso).

Para el desarrollo de esta tarea, se pueden considerar una gran variedad de diseños experimentales de entre los que cabe destacar:

- Diseño factorial n^k .

Este diseño de experimentos considera todas las posibles combinaciones de los factores k , con tanto niveles n como se programa. Este tipo de diseño supone, si el número de niveles y factores es elevado, un gran número de experimentos, lo cual ralentiza el proceso y lo encarece notablemente. No obstante, es un diseño adecuado cuando, debido a la falta de conocimiento del comportamiento del sistema, no se conoce a priori qué factores e interacciones entre los mismos tienen una gran significación sobre las variables respuesta. Es muy común, en este caso, el empleo de los diseños 2^k que minimizan el número de experimentos a realizar al considerar tan sólo 2 niveles para los factores.

- Diseños factoriales fraccionarios n^{k-p} .

Como alternativa a los diseños factoriales n^k , y con la finalidad de disminuir el coste y tiempo necesarios para la experimentación (siempre y cuando se tiene

un conocimiento previo del comportamiento del sistema), se consideran este tipo de diseños. En ellos se adopta el criterio de disminuir el número de combinaciones a experimentar, teniendo en consideración que dichas combinaciones no efectuadas están confundidas o superpuestas con las combinaciones estudiadas. Este tipo de simplificación del diseño está comúnmente relacionada con el descarte de aquellas combinaciones de factores que ofrecen información sobre las interacciones de tres o más factores entre sí. Es por ello común la consideración de diseños 2^{k-p} , que minimizan notablemente el número de experimentos con respecto a sus equivalentes 2^k .

○ **Análisis de regresión. Superficies de respuesta.**

Todos los diseños factoriales 2^k y 2^{k-p} adolecen del error de simplificación que implica suponer que las variables de respuesta presentan un comportamiento lineal con respecto a los factores. Ello supone que la respuesta no tiene curvatura y pueden ser representadas por ecuaciones de primer grado, cuando es posible que dicho comportamiento no sea el adecuado. Los DOE de superficies de respuesta asumen en principio que todas las variables son de, al menos, segundo grado y aplica el concepto de ajuste de regresión de segundo grado para la modelización del comportamiento. Este tipo de diseños, que involucrarían un gran número de experimentos si el número de factores y niveles es elevado, se simplifican de acuerdo con numerosos criterios para facilitar la labor de experimentación y la obtención de información sobre las variables respuesta.

A efectos de la metodología propuesta en el presente trabajo, se adopta como técnica DOE la de diseño factorial fraccionado, utilizando para ello las matrices ortogonales (orthogonal arrays) propuestas por las técnicas Taguchi que permiten:

- Reducir a un valor mínimo el conjunto de simulaciones y ensayos a realizar para obtener resultados concluyentes sobre la interrelación entre las variables de proceso y los resultados de proceso considerados.
- Deducir la posible interrelación existente entre dos o más variables de proceso sobre un determinado resultado de proceso, de modo que no queden excluidas del análisis global.

3.5 Diseño mediante matrices ortogonales.

La primera consideración de la aplicación del DOE al proceso de moldeo por inyección consiste en la determinación del número de niveles que se deben tomar para cada una de las variables de proceso (factores), ya que de ello depende la correcta modelización posterior de los resultados de proceso. En este sentido, los modelos más usuales empleados son:

- **Modelos lineales:** basados en 2 niveles (2^{k-p}).
- **Modelos de segundo orden:** basados en 3 niveles (3^{k-p}). Respecto a estos modelos, se han considerado métodos alternativos basados en diseños 2^{k-p} . Uno de estos se basa en un diseño convencional 2^{k-p} seguido de un ensayo central adicional en medio de todos los niveles (Central Composite Design).

Con el fin de determinar el tipo de modelo a emplear, se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- El aumento del número de niveles en las variables de proceso supone un incremento en el número de simulaciones/ensayos a realizar, lo cual se traduce en un mayor tiempo de computación en el proceso de simulación, de extracción de información y de clasificación y tratamiento de la misma.
- El aumento del número de niveles permite una modelización polinómica de los resultados con expresiones de orden más elevado, lo cual permite aproximar con una mayor fiabilidad los resultados de proceso en función de las variables de proceso.

Las experiencias más comunes suelen efectuarse con sólo dos niveles, pues en la práctica hay gran número de factores que influyen en las variables respuesta y es inusual que aparezcan interacciones de orden tres o superiores. Por ello es suficiente considerar los efectos principales e interacciones de orden 2, para obtener conclusiones válidas, aunque ello suponga, como principal limitación, el modelizar el comportamiento sólo con expresiones lineales.

Dado el carácter de la metodología propuesta, se adopta como criterio de modelización el uso de polinomios de 2º orden para obviar el inconveniente del empleo de expresiones lineales, dado que se desconoce el nivel de importancia de los factores sobre las variables respuesta. Ello implica el uso de un diseño a 3 niveles.

Si se dan estas condiciones, bajo la perspectiva de un diseño factorial, el número total de ensayos/simulaciones a realizar sería de $3^5 = 243$.

Para la determinación, bajo estas condiciones, de la tabla de ensayos/simulaciones debe considerarse las siguientes matrices ortogonales:

- L_{27} , correspondiente a 13 variables a 3 niveles (3^{13}). Esta matriz permite el estudio si no se tienen en cuenta todas las interacciones entre las cinco variables de proceso (Tabla 2.1).

Exp.	Columna (Variable de proceso)												
	1 (A)	2 (B)	3	4	5 (C)	6	7	8 (D)	9	10	11 (E)	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	1
6	1	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	2
7	1	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	2
8	1	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Tabla 2.1. Matriz ortogonal L_{27} (3^{13}).

Esta tabla de diseño de experimentos supone el mínimo número de ensayos a realizar con tres niveles, y, con la exclusión de las columnas especificada en la dicha tabla, sólo permite el estudio de la interacción entre la variable de proceso A (columna 1) y las restantes variables, no pudiéndose estudiar las interacciones entre las restantes variables entre si, tal y como se observa en la tabla de interacciones entre columnas

- L_{81} , correspondiente a 40 variables a 3 niveles (3^{40}). En este caso se pueden evaluar las interacciones entre las cinco variables de proceso consideradas (lo cual descarta las columnas 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 15, 16, 17, 18, 20, 23, 24, 26, 28, 30, 32, 36 y 40), quedando libres un total de 15 columnas al margen de las 5 correspondientes a las variables de proceso. Dichas columnas, evidentemente, no se emplean en el presente caso

A priori, no se puede concluir que no existan interacciones entre las variables de proceso implicadas de cara a los posibles resultados de proceso, por lo que se descarta la tabla L_{27} para el presente estudio. Adoptando a tabla L_{81} , pues con ella se consigue considerar todas las interacciones de dos niveles entre los factores y simultáneamente obtener una modelización polinómica de 2º orden para cada uno de los indicadores propuestos.

CAPITULO 4.-
DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL
PROCEDIMIENTO

4.1 - Introducción

Existen diversas técnicas que nos pueden permitir realizar la medición de la orientación de fibras. Alguna de ella, como veremos no se podría calificar de una medida automática, puesto que nos obligaría a realizar dicha medición de una forma individual lo cual transformaría la medición en una tarea bastante tediosa. Otras técnicas ¹ nos pueden ayudar a realizar esta operación de una manera más automática y por lo tanto nos ayudará a obtener la consiguiente función de distribución de fibras.

Wetherhold, Scott ² plantean dos métodos diferentes que pueden permitir la medida de la función de distribución de orientación de fibras y que puede ser comprobado manualmente.

Un método que puede utilizarse es el de difracción mediante la aplicación del difractor de Fraunhofer³ o bien realizando una simulación del difractor utilizando la transformada de Fourier. Este método se desarrolla mediante la aplicación de la transformada de Fourier sobre la imagen, determinando a continuación la función de distribución en el plano de Fourier. La orientación de fibras puede ser obtenida mediante el análisis de intensidad a lo largo de la banda circular central en el plano de Fourier de la imagen. La función de distribución para un ángulo en particular es proporcional a la intensidad en el plano de Fourier en el mismo ángulo rotado $\Pi/2$. Este sistema siendo aplicado al moldeo por compresión⁴.

Otro procedimiento a utilizar es el de la transformada de Hough⁵. Esta es una técnica que permite descubrir formas en una imagen. Se basa en transformar puntos de la imagen en un espacio de parámetros. La idea es encontrar curvas parametrizables como rectas, círculos y polinomiales. En teoría se pueden encontrar formas más complejas pero el costo computacional crece rápidamente. Generalmente se realiza detección de bordes a la imagen, y luego se aplica la transformada a esta. De esta forma son menos los puntos que hay que recorrer y por lo tanto más rápido es el algoritmo. El más usado para realizar la detección de bordes es el Filtro de Canny⁶. La aplicación más simple de la transformada de Hough es para la detección de rectas. Supóngase una imagen binarizada, resultado de la detección de bordes. Para cada punto x,y de la imagen pasan infinitas rectas de la forma: $y = ax+b$. Luego cada punto x,y vota para cada pareja de puntos que satisface $b = y - ax$. El algoritmo tiene que recorrer todos los puntos x,y , y para cada uno votar en el espacio de parámetros a, b o acumulador. Luego la pareja a, b con más votos o el máximo del acumulador da la ecuación de la recta. El problema planteado así tiene el problema que el espacio no es finito, a varía de 0 a infinito. En general se utiliza la siguiente parametrización:

$$\rho = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta$$

Donde ρ es la distancia de la recta al origen y θ el ángulo entre la perpendicular y el eje x . Estos parámetros están acotados, ρ varía entre 0 y la diagonal de la imagen y θ entre 0 y $2*\pi$ ⁷.

Se puede aplicar en la detección de círculos. La ecuación del círculo tiene tres parámetros (dos para el centro del círculo, uno para el radio). Por lo tanto el espacio de

parámetros esta forma es de dimensión tres. Esto dificulta el algoritmo, recorrer un espacio de dimensión dos, y encontrar máximos en espacio de dimensión tres.

Otro método utilizado para realizar la medición de la orientación es el método Gadala-María y Parsi⁸. Este es el método más estándar utilizado para la confección de distribuciones de frecuencias de orientaciones. Utiliza el operador de Sobel para trabajar con la detección de bordes de la imagen.

Para nuestro caso nos basaremos en las experiencias desarrolladas por Yasuda⁹⁻¹⁰ en la que aplica un nuevo sistema de visualización con objeto de realizar la medición de la orientación de fibras en un flujo en suspensión y en un canal de espesor muy pequeño. En su experiencia realiza una subdivisión de la probeta en espacios más pequeños que a su vez contiene elipses más pequeñas. Sobre estas elipses se realiza la medición de los ángulos necesarios para dar respuesta a las ecuaciones

$$a_{11} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n \quad a_{12} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n$$

donde N es el número de fibras de cada región y θ_n es el ángulo de orientación de cada una de las fibras. El ángulo preferido por las fibras esta tomado de la expresión

$$\tan 2\alpha = \frac{2a_{12}}{a_{11} - a_{22}}$$

para poder completar la matriz de posición se han utilizado las relaciones del tipo $a_{11} + a_{22} = 1$ y $a_{12} = a_{21}$.

Mediante estos cálculos podremos establecer una clasificación en la que el orden de orientación obtenido en la estimación del valor de a_{11} será determinante. Por ello para valores cercanos a 0,5 se podrá considerar una distribución aleatoria, definido por el tensor de orientación¹¹⁻¹², mientras que un resultado cercano a 1 nos determinará un tensor que indica una distribución totalmente alineada. Para valores intermedios podremos considerar que la muestra está parcialmente alineada.

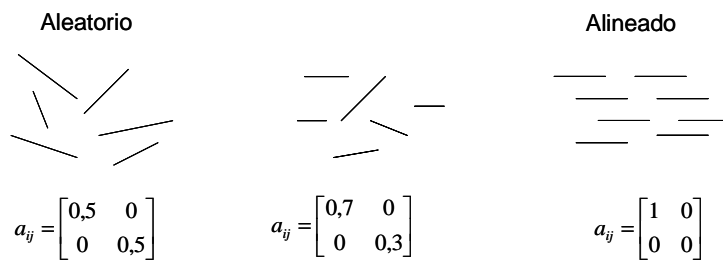


Figura 1.- Definición del tensor de orientación

Las definiciones de cada uno de los valores de la matriz, figura 1, nos permite elaborar una descripción del valor de tensor orientación de segundo orden¹³. Los valores predominantes anteriormente expresados corresponden a los valores de la matriz del a_{11} .

Vistas las expresiones necesarias para la representación del valor del tensor orientación hay que determinar el ángulo de orientación de cada una de las fibras que hayan sido capturadas mediante las imágenes. Para ello habrá que recurrir a la morfología matemática que nos permita trabajar con las imágenes capturadas.

El primer aspecto que debemos enfrentarnos es la localización de los diversos elementos y su posición en la imagen⁵. Junto con los datos de la orientación se podrán determinar otros datos como áreas, perímetros, momentos, centroides, centros de masas, diámetros de Feret, circularidad.

Ocasionalmente el centro de gravedad del objeto en la imagen puede ser calculado mediante las siguientes ecuaciones:

$$C.G._x = \frac{\sum x_i}{area} \quad C.G._y = \frac{\sum y_i}{area}$$

utilizando únicamente los píxeles de los límites del objeto, pero ocasionalmente el resultado puede resultar erróneo según la orientación que tome el objeto a medir. Para eliminar este error la estimación del centro de gravedad puede ser calculado mediante el uso de pares de coordenadas para cada punto del borde del objeto. La expresión final de la estimación quedaría de la siguiente forma:

$$C.G._x = \frac{\sum (x_i + x_{i-1})^2 \cdot (y_i - y_{i-1})}{area}$$

$$C.G._y = \frac{\sum (y_i + y_{i-1})^2 \cdot (x_i - x_{i-1})}{area}$$

y para poder determinar el área se puede utilizar la expresión⁵

$$Area = \frac{\sum (x_i + x_{i-1}) \cdot (y_i - y_{i-1})}{2}$$

Si se considera que los píxeles del objeto tienen un peso unitario, el dentro de masas será aquel punto, x,y, para el cual hay la misma masa arriba, abajo que a los lados¹⁴. En objetos regulares como círculos o cuadrados, el centro de masas coincide con el centro

geométrico y coincide en la intersección de los ejes mayor y menor. La expresión del mismo es

$$C.G._x = \frac{\sum_i valor_i \cdot x_i}{\sum_i valor_i}$$

$$C.G._y = \frac{\sum_i valor_i \cdot y_i}{\sum_i valor_i}$$

Muy cercano a la determinación de la localización del objeto y su centro de masas se halla la idea de cálculo de la orientación. Existen diversos parámetros que pueden ser utilizados en el establecimiento de la orientación. Un ejemplo es el uso de la máxima dimensión del objeto, conocida como el diámetro de Feret o bien, el más usado, la orientación del máximo eje de una elipse inscrita y ajustada a las dimensiones del objeto a escrutar. Para el cálculo según el método de la elipse, juega un papel fundamental la determinación del centro de gravedad y además nos proporciona un método mucho más robusto que el del diámetro de Feret. Esto nos permite menores alteraciones debido a pequeños errores de captura y determinados ruidos que alteren algún que otro píxel de la periferia del objeto.

Mediante el cálculo de momentos espaciales de cuarto orden podemos establecer una apreciación de la orientación de los objetos implicados en el análisis. Las expresiones generales del procedimiento de cálculo son⁵:

$$S_x = \sum x_i ; \quad S_y = \sum y_i$$

$$S_{xx} = \sum x_i^2 ; \quad S_{yy} = \sum y_i^2 ; \quad S_{xy} = \sum x_i \cdot y_i$$

Una vez acumulados los valores en los sumatorios el momento neto respecto a los ejes x e y, y el ángulo pueden ser calculados mediante las expresiones siguientes

$$M_x = S_{xx} - \frac{S_x^2}{Area} ; \quad M_y = S_{yy} - \frac{S_y^2}{Area} ; \quad M_{xy} = S_{xy} - \frac{S_x \cdot S_y}{Area}$$

$$\Theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{M_{xx} - M_{yy} + \sqrt{(M_{xx} - M_{yy})^2 + 4 \cdot M_{xy}^2}}{2 \cdot M_{xy}} \right\}$$

Según la expresión anterior Θ no indicaría el ángulo de orientación entre el eje mayor del objeto de medición y la horizontal.

También nos puede interesar realizar el cálculo de longitud y anchura de los objetos sobre los que debemos realizar alguna medición. Una de las maneras de determinar la longitud es obtener el Feret Máximo¹⁴. Sin embargo cuanto más alargado es el objeto, mas inexacta es la medida de la longitud como Feret máximo, en especial si el objeto se curva sobre si mismo como puede ocurrir por ejemplo con la letra S. Lo mismo se puede decir en cuanto a la anchura y la utilidad del Feret mínimo como estimador. Sin embargo estos argumentos no restan valor a los Feret máximo y mínimo como estimadores de longitud y anchura de los objetos. La forma habitual de determinar estos dos parámetros en un sistema de análisis de imágenes es mediante las coordenadas del primer y último píxel del objeto, entendiendo como primer píxel aquel que se encuentra más a la izquierda (x_i, y_i) y el último píxel aquel que se encuentra más abajo y a la derecha (x_n, y_n). La longitud, por tanto, del eje mayor del objeto puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$long_eje_mayor = \sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2}$$

Y la del eje menor se obtiene como la longitud de la menor línea perpendicular que se puede trazar dentro del objeto.

Cuando se ha determinado el área (expresión expuesta anteriormente) es conveniente expresarla como el diámetro circular equivalente. Es una medida lineal y que además puede ser calculada fácilmente mediante la expresión

$$equ_diam = \sqrt{\frac{4}{\pi} area}$$

Objetos con diferentes formas u orientaciones pueden revelarse al ojo humano con relativa dificultad. El diámetro equivalente ofrece un sistema simple y fácil que permite compara tamaños de objetos.

Otro elemento importante es la determinación del perímetro del objeto a medir. Para el cálculo del perímetro de un objeto los sistemas de análisis de imágenes utilizan los mismos mecanismos que para el cálculo del perímetro como parámetro de campo; se trata de un simple recuento de píxeles que constituyen el borde de los objetos. Hay que tener en cuenta los mismos criterios que se utilizan para el cálculo de la distancia de líneas inclinadas formadas por píxeles contiguos únicamente por uno de sus vértices; en tal caso la distancia a lo largo de la línea es igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del valor del lado del píxel, o lo que es lo mismo

$$dis\ tan\ cia_diagonal = lado \cdot \sqrt{2}$$

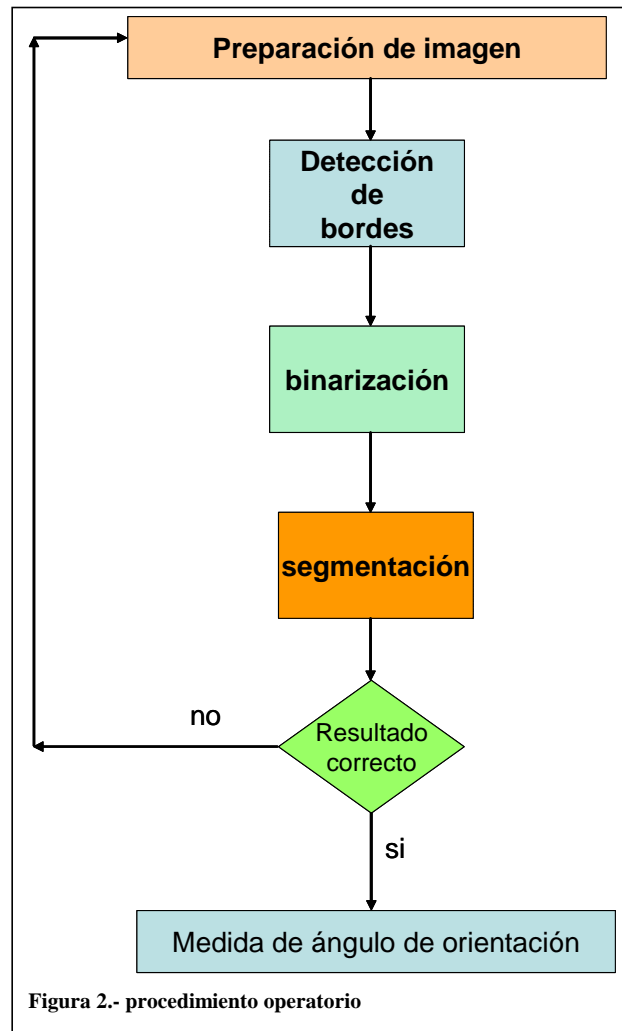
en donde el lado es el factor de conversión de píxel a las unidades naturales escaladas. Para el cálculo se puede utilizar la distancia pitagoriana entre los sucesivos puntos que a su vez pueden ser sumados dando lugar a la expresión

$$Perim = \sum_i \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}$$

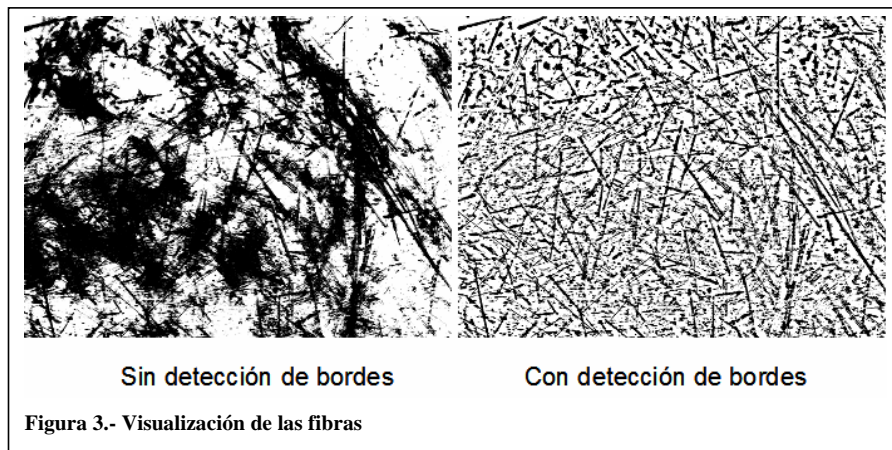
4.2.- Desarrollo del Procedimiento operatorio

Para aplicar toda la morfología expuesta anteriormente hay que trabajar de una manera sistemática hasta poder alcanzar los objetivos que nos hemos marcado. Estos objetivos incluyen la posibilidad de medición de la orientación de fibras de una manera automática o al menos semiautomática, dado el gran número de elementos que nos podemos encontrar en una imagen.

El primer aspecto que nos encontramos en el procedimiento operatorio, figura 2, es la



preparación de la imagen en la que puede destacar la evaluación de la calidad de la misma en cuanto a aspecto, limpieza de los objetos capturados, equilibrio de luces, luminosidad adecuada. Posteriormente se puede hablar de una preparación previa del color que nos puede ser útil en la realización de nuestro trabajo. El siguiente aspecto que se abordará será el tratamiento de la imagen con la aplicación de distintos algoritmos que se describirán a continuación. El primer algoritmo que debe aplicarse es la detección de bordes, con objeto de poder aplicar posteriormente la morfología matemática y los algoritmos necesarios para la medición de ángulos. La importancia de este paso es evidente, figura 3, dado que sin la aplicación de la detección de bordes



sobre la imagen, pueden aparecer una serie de manchas en la imagen que nos impedirán realizar la posterior medición. Si por el contrario se aplica un buen algoritmo, figura 3 b, las fibras quedan aparentemente listas para la posterior aplicación de otros algoritmos de medición.

Existe posibilidad de emplear hasta cuatro algoritmos en la detección inicial de bordes. Estos algoritmos sobre los que se han realizado pruebas comprenden la detección mediante el operador de Sobel, detección mediante transformada de Hough, detección mediante transformada de Fourier o bien la aplicación del operador de Canny.

EL primer filtro aplicado es el operador de Sobel. El operador Sobel es utilizado en procesamiento de imágenes, especialmente en algoritmos de detección de bordes. Técnicamente es un operador diferencial discreto que calcula una aproximación al gradiente de la función de intensidad de una imagen. Para cada punto de la imagen a procesar, el resultado del operador Sobel es tanto el vector gradiente correspondiente como la norma de éste vector.

El operador sobel aplicado sobre una imagen digital en escala de grises, calcula el gradiente de la intensidad de brillo de cada punto (pixel) dando la dirección del mayor incremento posible (de negro a blanco) además calcula el monto de cambio en esa dirección, es decir, devuelve un vector. El resultado muestra que tan abruptamente o suavemente cambia una imagen en cada punto analizado, y a su vez que tanto un punto determinado representa un borde en la imagen y también la orientación a la que tiende

ese borde. En la práctica, el cálculo de la magnitud, que da nociones de un borde, es más sencillo que la interpretación de la dirección.

Matemáticamente, el gradiente de una función de dos variables (para este caso la función de intensidad de la imagen) para cada punto es un vector bidimensional cuyos componentes están dados por las primeras derivadas de las direcciones verticales y horizontales. Para cada punto de la imagen, el gradiente del vector apunta en dirección del incremento máximo posible de intensidad, y la magnitud del gradiente del vector corresponde a la cantidad de cambio de intensidad en esa dirección. Lo anterior implica que el resultado de aplicar el operador sobel sobre región de una imagen con intensidad de brillo constante es un vector cero, y el resultado de aplicarlo en un punto sobre un borde es un vector que apunta cruzando el borde (perpendicular) en sentido de los puntos más oscuros hacia los más claros.

Matemáticamente, el operador utiliza dos núcleos¹⁵ de 3×3 elementos para aplicar convolución a la imagen original para calcular aproximaciones a las derivadas, un núcleo para los cambios horizontales y otro para las verticales. Si definimos A como la imagen original y G_x y G_y son los dos núcleos que representan para cada punto las aproximaciones horizontal y vertical de las derivadas de intensidad, el resultado se calculado como:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * A \quad \text{y} \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * A$$

En cada punto de la imagen, los resultados de las aproximaciones de los gradientes horizontal y vertical pueden ser combinados para obtener la magnitud del gradiente¹⁶, mediante:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

Con esta información, podemos calcular también la dirección del gradiente:

$$\Theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right)$$

donde, por ejemplo, Θ es 0 para bordes verticales con puntos más oscuros al lado izquierdo. El operador sobel representa una primera aproximación imprecisa del gradiente de la imagen y presenta el inconveniente que no puede superar el grado de 3x3 en los núcleos.

A pesar de estos inconvenientes se han realizado pruebas sobre varios ejemplos. Dado que sobre las imágenes de calibración, el operador ha tenido un buen comportamiento, se ha querido realizar una prueba sobre una fotografía más compleja, figura 4a. El resultado de la detección de bordes ha sido bastante oscura, figura 4b, teniendo que realizar manualmente otros ajustes de contraste posterior.



Figura 4.- (a) Imagen original. (b) Operador sobel aplicado

Una vez realizados los ajustes manuales de contraste, se observa que la detección es bastante buena, figura 5a, considerándose suficiente para nuestros propósitos. En una siguiente etapa, que además se explicará más adelante se ha aplicado una binarización con objeto de resaltar los bordes y preparar la imagen para una medición, figura 5b. Globalmente el resultado hasta la binarización se puede considerar aceptable y con posibilidades de uso, pero el gran inconveniente lo supone la necesidad de tener que realizar un ajuste de brillos y contraste, que inicialmente se tendrían que realizar manualmente. Esta introducción manual, rompería nuestro esquema de posible automatización y secuenciación del procedimiento de medida de las fibras.

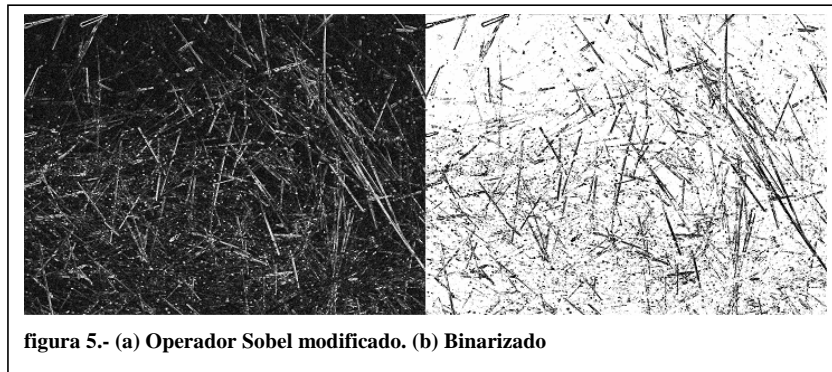


figura 5.- (a) Operador Sobel modificado. (b) Binarizado

Como conclusión podemos establecer que este operador no se adecua a nuestras necesidades globales.

El siguiente operador que se ha probado en el que aplica la transformada de Hough. Esta transformada es una herramienta estándar en el análisis de imágenes, la cual nos permite el reconocimiento de patrones globales en el espacio, reconociendo patrones locales en un espacio transformado de parámetros. Nos puede resultar útil cuando existe una información bastante ruidosa. Inicialmente se basa en la técnica de encontrar curvas tales como rectas, polinomios, círculos que puedan ser localizadas en un espacio

adecuado. Aunque la transformada se puede utilizar para dimensiones mayores, principalmente se aplica en dos dimensiones para encontrar líneas rectas, centros de círculos con centro fijo, parábolas, etc. Inicialmente la aplicación se concentraba en la detección de curvas analíticas y posteriormente se amplió la aplicación de una manera más generalizada para detectar curvas no analíticas. A partir de ese momento se han propuesto varios algoritmos con objeto de mejorar las memorias y capacidades de procesamiento de las imágenes. Para ello Williams⁷ propone la mejora del algoritmo de Hough para la detección de una forma inexacta, denominándola como transformada rápida de Hough.

La ecuación básica para la transformada de Hough fue diseñada para detectar líneas y curvas¹⁷⁻¹⁸. Esto significa que cualquier recta en el espacio de una imagen x, y es representada en el espacio por un solo punto de parámetros ρ, θ ; y cualquier parte de esta línea es transformada en el mismo punto. La expresión que regula esta propiedad viene representada por¹⁹

$$\rho = x_i \cdot \cos(\theta) + y_i \cdot \text{sen}(\theta)$$

El rango de variación ya se ha expresado en páginas anteriores. Se han aplicado mejoras al algoritmo mediante la aplicación de una distribución K para incrementar el rango de $\theta = k \cdot \pi / K$ ($k=0,1,2,K-1$).

Malfiza²⁰ por su parte nos presenta un algoritmo de detección de elipses. Basado en la formulación de la ecuación general de la elipse

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} = 1$$

siendo a la longitud del eje mayor y b la longitud del eje menor. Para realizar la detección realiza el cálculo de los siguientes parámetros

$$x_0 = \frac{(x_1 + x_2)}{2} \text{ para el valor de la coordenada } x \text{ del centro de la elipse}$$

$$y_0 = \frac{(y_1 + y_2)}{2} \text{ para el valor de la coordenada } y \text{ del centro de la elipse}$$

a continuación nos queda calcular el valor del eje mayor definido por un valor a y posteriormente calcular el ángulo que describe dicho eje con la horizontal.

$$a = \frac{\sqrt{[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]}}{2}$$

y finalmente el ángulo α

$$\alpha = a \tan \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right)$$

Conocidos todos estos datos, realizamos una serie de pruebas que puedan indicarnos si el algoritmo aplicado se adapta a nuestras necesidades, figura 6. La imagen de la figura 6a nos muestra como se ha tratado la imagen de color a escala de grises para poder realizar el tratamiento.

Acto seguido se ha aplicado el algoritmo de Hough obteniéndose el resultado para un valor de $r=5$ en el espacio de Hough, figura 6b.

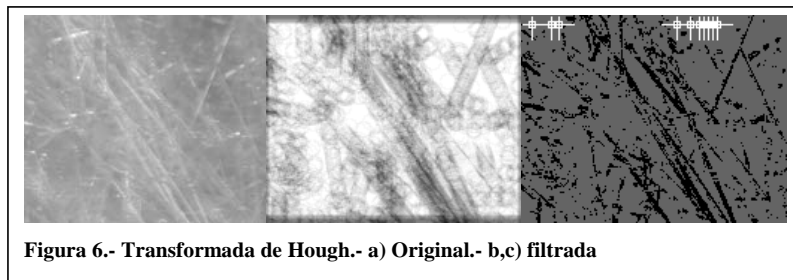


Figura 6.- Transformada de Hough.- a) Original.- b,c) filtrada

El resultado logrado, figura 6c, no se ajusta a las necesidades de análisis de las imágenes debido fundamentalmente nuestra imposibilidad posterior de continuar con el proceso de binarización y análisis. Por estos motivos el presente algoritmo tampoco se ajusta a nuestras necesidades.

El siguiente algoritmo aplicable es el operador de Canny. La detección de bordes suele ser fuente de errores. Este algoritmo combina un operador diferencial con un filtro gaussiano²¹. Variando el parámetro de varianza del filtro que utiliza este algoritmo, podemos tener distintos comportamientos. Cuando disminuimos la varianza aparecen un gran número de aristas, la mayoría de las cuales no aportan mucha información. La localización de las aristas en este caso es muy buena²². Al aumentar la varianza nos quedamos con aquellas aristas que se encuentran en una zona con gran contraste. Sin embargo, la localización en este caso no es exacta y el tiempo de procesamiento aumenta. Este comportamiento sucede también en la mayoría de los filtros de detección de aristas. También el uso de derivadas de la imagen para el cálculo de aristas supone un error adicional por el ruido que se produce en el proceso de captación de la imagen.

El principal algoritmo basado en la segunda derivada es el implementado por Canny. El borde es detectado donde la convolución alcance un máximo. Después de esto es necesario aplicar una umbralización para que el ese máximo no sea debido al ruido²³. Debido a que el operador de Canny es simétrico, la suma de todos los pesos es cero. La mitad de los pesos son positivos y la otra mitad negativos. Podemos separar nuestra suma en dos partes a lo largo de esas líneas, en las cuales se divide la señal en dos lados separados por el borde propuesto. Consideraremos positivo el lado izquierdo y negativo el derecho. El lado positivo es sumado como anteriormente, pero podemos hacer que el lado negativo se convierta en positivo haciendo un reflejo sobre el eje de sus pesos.

Por supuesto, ahora debemos restar la parte negativa total del total positivo para conseguir la respuesta, pero realmente todo lo que hemos hecho es añadir unos pocos signos negativos.

Ahora veamos qué ocurre en uno de los lados. La intensidad de cada píxel es multiplicada por su peso. Imaginemos que estamos creando un histograma de intensidad, donde la cantidad que contribuye cada píxel es igual a su correspondiente peso. El significado de añadir esos números es que nuestro eje x representa la intensidad y no la localización. Si el peso total de un lado es 1, entonces la respuesta es el centro de masa del histograma.

Anteriormente hemos comentado que tenemos que restar la parte negativa de la positiva. Ahora podemos hacer algo mejor que esto, si calculamos la distancia entre el centro de masa negativo y el positivo, tenemos la misma respuesta, excepto que ahora es siempre no negativo. Esto significa que no nos debemos preocupar si nos desplazamos de una región oscura a una región clara o viceversa.

Existe un riesgo con el desenfocado. El desenfocado es una media ponderada de un conjunto de píxel donde los pesos se añaden a uno. Los pesos son a menudo asignados usando una distribución Gaussiana normal, debido a las muy atractivas propiedades de la Gaussiana. De hecho, la distribución Gaussiana (más concretamente su derivada) forma la base del detector de bordes de Canny, siendo elegido todavía por multitud de personas a causa de su velocidad y su facilidad de implementación.

La fórmula de distribución Gaussiana, y sus derivadas son mostradas a continuación:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad G'(x) = \frac{-x}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad G''(x) = \frac{-1}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \left[1 - \frac{x^2}{\sigma^2} \right]$$

Las funciones equivalentes para señales bidimensionales se expresan más fácilmente en coordenadas polares, donde r representa la distancia radial desde el origen. La función es simétrica e independiente del valor del ángulo θ .

$$G(r) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad G'(r) = \frac{-r}{2\pi\sigma^4} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad G''(r) = \frac{-1}{2\pi\sigma^3} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \left[1 - \frac{r^2}{\sigma^2} \right]$$

Si ahora consideramos un borde ideal y realizamos la convolución de esta función con una función Gaussiana aparece un perfil como el mostrado más a la izquierda. A continuación se muestran la primera y la segunda derivada; la presencia del borde está marcada por un pico y por un paso por cero respectivamente.

En conclusión el operador de Canny pretende satisfacer tres criterios básicos. El primero es que presente una buena detección, es decir, reducir la probabilidad de no detectar un punto que se encuentra sobre un borde y además reducir la probabilidad de detectar puntos que están fuera del borde. Otro criterio es la de la buena localización. Los puntos detectados deben estar lo más cerca de punto original. EL tercero y último es el de ausencia de multiplicidad de respuestas.

El algoritmo de Canny fue mejorado por Deriche²⁴. Si Canny basaba su operador de detección de borde en una derivada Gaussiana, Deriche optimiza esta filtrado mediante el soporte de w infinito. Es decir utiliza un filtrado IIR (Respuesta Infinita al Impulso) en lugar de un filtro FIR (Respuesta finita al impulso)²⁵. El operador Deriche esta optimizado para la detección de bordes y esquinas.

En nuestro caso se han realizado varias pruebas con los algoritmos de detección de bordes de Canny-Deriche. Inicialmente se ha aplicado sobre una imagen controlada en la cual se conocen prácticamente todos los datos de longitud y orientación de la misma, figura 7a. A continuación se ha aplicado el operador, manteniendo como variable el valor de alfa. Este valor nos define el grado de detección, figura 7b, c. Para valores igual a 1 nos detecta mayor número de bordes, pero con el peligro de detección de ruido de fondo como contorno.

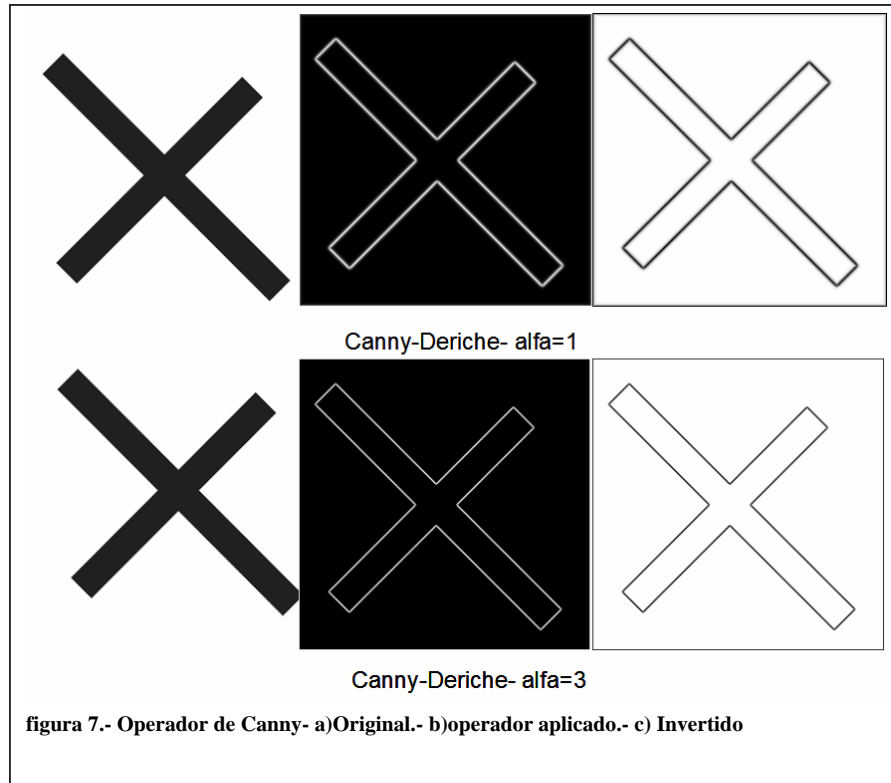


figura 7.- Operador de Canny- a)Original.- b)operador aplicado.- c) Invertido

Para valores más elevados nos permite confeccionar detecciones más selectivas. El resultado obtenido, figura 7b, esta situado sobre fondo negro, lo cual nos obligará a tener que realizar una nueva operación, figura 7c, de inversión de fondo. La detección hasta el momento se puede considerar excelente, pero se observa que el interior de la figura detectada nos queda vacía de color. Cuando necesitemos aplicar un nuevo filtrado del tipo de línea de agua o watershed, se observa que no se aplica correctamente, por lo que la medición y análisis final no es correcto.

Antes de realizar un descarte del presente algoritmo, se ha realizado otra prueba sobre una muestra de fibra procedente de un proceso de inyección, figura 8. La operación de filtrado ha necesitado un ajuste posterior de brillos e intensidades que no se pueden automatizar. El ajuste se ha realizado de una manera manual, figura 8c. Los resultados aplicados a esta muestra, nos demuestran el mismo comportamiento que con las muestras anteriores.



Figura 8.- Operador de Canny aplicado a muestras de inyección

Como conclusión, la aplicación del presente filtro no se ajusta a nuestras necesidades de análisis posterior de la imagen.

El siguiente filtro que ha sido evaluado ha sido el de la transformada rápida de Fourier. Básicamente la Transformada de Fourier se encarga de transformar una señal del dominio del tiempo, al dominio de la frecuencia, de donde se puede realizar su antitransformada y volver al dominio temporal.

Un ejemplo de representación en frecuencia, puede ser el ecualizador de un equipo de música. Las barritas que suben y bajan, indican las diferentes componentes frecuenciales de la señal sonora que estás escuchando. Esto, lo hace ni más ni menos que un integrado que realiza precisamente la transformada de Fourier de la forma más rápida posible (FFT, o Fast Fourier Transform).

La transformada rápida de Fourier es simplemente un algoritmo rápido para la evaluación numérica de integrales de Fourier desarrollado en los laboratorios de IBM, y su importancia radica en la rapidez de cálculo conseguida, pero mucho más en otro tipo de aplicaciones: ecualización y filtrado en equipos de audio/vídeo en tiempo real, comunicaciones, etc.

Evidentemente el uso de la FFT permite obtener rápidamente el espectro de la señal a partir de la señal temporal de entrada²⁶, aunque se podría haber hecho a partir de la integral discreta de Fourier, siendo en este caso necesario mucho más tiempo de cálculo.

La diferencia de velocidad de cálculo entre la tradicional transformada discreta y la FFT aumenta según aumenta el número de muestras a analizar, ya que mientras una aumenta el número de operaciones necesarias para la resolución de forma exponencial, la otra lo hace de forma prácticamente lineal.

La base teórica del algoritmo queda establecida en la transformada discreta de Fourier, que puede expresarse mediante la siguiente formulación

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k \cdot e^{-\frac{2\pi}{n}jk} \quad \text{siendo } j = 0, \dots, n-1 \text{ y } x_0, \dots, x_{n-1} \text{ números complejos}$$

Una primera aproximación al cálculo del DFT requeriría la suma compleja de N multiplicaciones complejas para cada uno de las salidas²⁷. En total, N^2 multiplicaciones complejas y N^2 sumas complejas para realizar un DFT de N puntos.

La idea que permite esta optimización es la descomposición de la transformada a tratar en otras más simples y estas a su vez hasta llegar a transformadas de 2 elementos donde k puede tomar los valores 0 y 1. Una vez resueltas las transformadas más simples hay que agruparlas en otras de nivel superior que deben resolverse de nuevo y así sucesivamente hasta llegar al nivel más alto. Al final de este proceso, los resultados obtenidos deben reordenarse.

Dado que la transformada discreta de Fourier inversa es análoga a la transformada discreta de Fourier, con distinto signo en el exponente y un factor $1/n$, cualquier algoritmo FFT puede ser fácilmente adaptado para el cálculo de la transformada inversa. Por tanto puede establecerse que para la función $f(x)$ ⁵, según Fourier existe una nueva función $F(u)$ que describe cuantas la cantidad de frecuencias que pueden sumarse hasta alcanzar nuevamente el termino de $f(x)$.

En conclusión puede establecerse que

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i u x} dx \quad , \text{ se puede recuperar mediante la formulación}$$

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(u) e^{2\pi i u x} dx$$

Con estas dos expresiones quedan definidas la transformada de Fourier y la inversa de la transformada de Fourier.

Existen antecedentes de la aplicación de la transformada discreta de Fourier en la medida de distribuciones de orientaciones de fibras²⁸. La aproximación matemática de la DFT bidimensional aplicada al análisis de las imágenes quedaría expresada mediante la expresión

$$X(u, v) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M x(m, n) \exp \left\{ -2\pi j \left(\frac{(u-1)(m-1)}{M} + \frac{(v-1)(n-1)}{N} \right) \right\}$$

donde $x(m,n)$ es la amplitud del píxel en las coordenadas (m,n) en una imagen de tamaño $M \times N$. Posteriormente define la frecuencia radial u como

$$u_r = \sqrt{u^2 + v^2}$$

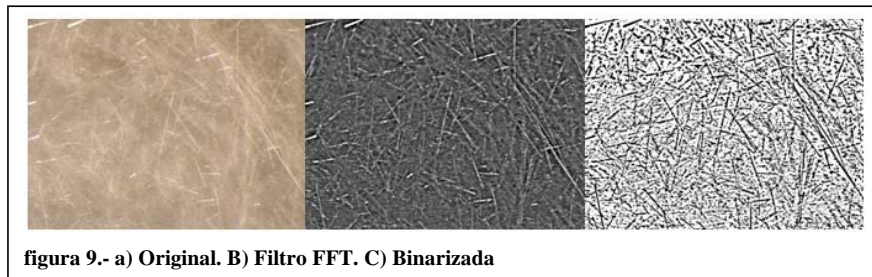
y finalmente para realizar el computo de la orientación de la fibra calcula la coordenada angular respecto a la horizontal como

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{u}{v}\right)$$

Para finalizar el cálculo aplica el criterio de distribución de Von Mises para calcular la función de densidad de probabilidad.

Como expresa Kim²⁹ la aplicación de la FFT es indiscutiblemente eficaz sobre todo cuando existen ruidos de fondo en las imágenes a analizar. En nuestro caso utilizaremos una implementación de un filtro³⁰ que utiliza la transformada rápida de Fourier. Este filtro esta basado en la transformada rápida de Hartley, que representa un equivalente a la transformada rápida de Fourier, permite eliminar ruidos de baja y alta frecuencia, conteniendo un sistema de autoescalado de contraste y saturación que lo hace más eficiente.

Cuando el filtrado actúa sobre la imagen, figura 9a-b, la diferencia principal radica en que no se aplica un vaciado del interior de la figura, tal y como sucede realmente con el resto de detectores de bordes. Esto permite activar sin ningún tipo de problema un tratamiento de cálculo posterior eficiente.



Cuando se ha aplicado el filtro FFT³¹, no es necesaria la modificación posterior de la imagen obtenida mediante filtrados de brillo y contraste, tal y como ha sucedido en procesados anteriores con otros operadores. Cuando se aplica a continuación la operación de binarizado, figura 9c, se puede observar la organización de las fibras en la imagen. Posteriormente podremos activar un filtrado de línea de agua, que posibilitará la medición final.

Vista esta operación final describiremos brevemente como funciona al filtro que hemos aplicado definitivamente y que nos ha permitido continuar con nuestro trabajo. Para aplicar el filtro en cuestión debemos trabajar sobre la imagen transformándola en una imagen de escala de grises. El filtro admite varios formatos de gris, entre los que destacan el de 8 bits, 16 y 32 bits. Una vez realizada esta operación, aplicamos el filtro. Ejecutado el comando nos aparece un cuadro de dialogo en el que nos solicita confirmación para varios datos, figura 10. En el destacan sobre todos los datos de filtrado de estructuras largas.



Figura 10.- Cuadro de dialogo del Filtro FFT

Estas estructuras largas sobre las que se actúa como una corrección de sombras y las correcciones de estructuras pequeñas se actúa como una corrección de suavizado y elevación de brillo de la imagen. Todos los tamaños están especificados mediante un filtrado gaussiano en el espacio de Fourier.

Se pueden suprimir también rayas en dirección vertical u horizontal, suprimiendo componentes de Fourier en los ejes horizontal/vertical.

El uso del parámetro “Autoscale” pone la intensidad más reducida a 0 y la intensidad más alta a 255, preservando todas las intensidades. “Saturar” permite que algunas intensidades entren en parámetros de la saturación, y produce una mejorara del contraste visual. “Saturar” tiene solamente efecto cuando se permite “Autoscale”.

El plugin ha sido comprobado con éxito en la secuencia de trabajo sobre una imagen con ángulos conocidos, figura 11.

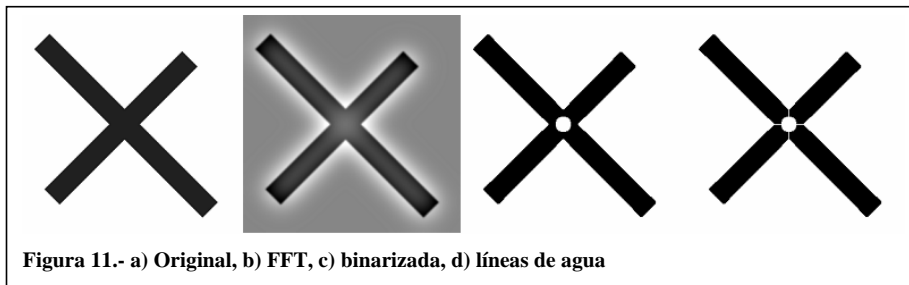


Figura 11.- a) Original, b) FFT, c) binarizada, d) líneas de agua

Aplicada la secuencia sobre la imagen original, figura 11a, el filtro permite una buena detección de bordes, figura 11b. El siguiente paso que se ha aplicado es la binarización para finalmente aplicar una marca de agua, figura 11d, que permite descomponer las líneas para ejecutar la medición de los ángulos de las figuras.

Como conclusión en esta etapa podemos establecer que el plugin que mejor se adapta a nuestras necesidades es el filtro FFT, que será el que se incluirá en nuestra secuencia de trabajo y en nuestra macro de cálculo.

Llegado a este punto debemos aplicar es la umbralización de la imagen. Mediante la umbralización se aplicará una segmentación sobre la imagen de manera que puedan distinguirse los objetos de nuestro interés de los que sería fondo de la imagen. Esta umbralización será de base binaria, de manera que solo se trabaja con valores de negro para los objetos y de blanco para el fondo. La técnica utilizada se basa en un concepto bastante simple. Existe un parámetro Θ denominado como umbral de brillo que es elegido y aplicado a un imagen según $a(m,n)$, y que debe cumplirse el siguiente criterio³²

Si $a[m,n] \geq \Theta$ entonces $a[m,n]=$ objeto= 1
Si no se cumple el criterio anterior entonces $a[m,n]=$ fondo= 0.

La forma más sencilla de segmentar una imagen es en el caso de que los distintos objetos de caractericen por niveles de gris diferentes. Para ello empleamos el histograma que, como ya sabemos, indica el número de puntos de la imagen que poseen un determinado nivel de gris³³. La umbralización a partir de histogramas consiste en elegir el punto de nivel de gris que separa los valores correspondientes al objeto y al fondo. En una imagen³⁴, debido al ruido es mucho más difícil encontrar ese punto.

Hay diversas técnicas para calcular el umbral. El primer método que describiremos, consiste en ajustar una línea al lóbulo principal a partir de dos puntos, y escoger como umbral el punto de corte de esa recta con el eje de abscisas. El umbral se calcula como el punto de corte con el eje de abscisas de una recta ajustada al lóbulo principal del histograma. La recta se traza desde el punto cuyo valor es el 90% del máximo del lóbulo hasta el punto de valor 33% del mismo.

El segundo método se denomina como el de la máxima distancia. El umbral es el punto del histograma más alejado de la cuerda que une el lóbulo principal del histograma y el extremo derecho del mismo. Como procedimiento operativo se puede unir el punto máximo del lóbulo principal con el extremo derecho del histograma. Debe tomarse como umbral el punto del mismo más alejado de esa recta. También puede definirse como el método del triángulo³².

Otro sistema de cálculo es el denominado como entropía³⁵. La entropía es un parámetro estadístico que mide la cantidad de información del histograma. A partir de ese parámetro, podemos obtener el umbral como el punto que maximiza las entropías a ambos lados del punto.

El umbral es el punto j que maximiza:

$$E_j = \sum_{i=0}^j H(i) \cdot \text{Log}(H(i)) \qquad A_j = \sum_{i=0} H(i)$$

En el método del gradiente cero el umbral se calcula como el primer punto, posterior al máximo del lóbulo principal, en el que el gradiente del histograma se hace cero. A partir

del máximo del lóbulo principal, se considera como umbral el primer punto en el cual el gradiente se hace cero. Se puede filtrar previamente el histograma en el caso en que sea muy ruidoso.

EL algoritmo Isodata³⁶, que fue desarrollado por Ridler y Calvard. Este es un ejemplo de algoritmo iterativo. A partir de la primera estimación del umbral, se van recalculando los parámetros y nuevos umbrales sucesivamente.

$$A_j = \sum_{i=0}^j H(i), \quad B_j = \sum_{i=0}^j iH(i), \quad C_j = \sum_{i=0}^j i^2 H(i), \quad \text{para } j=0, \Lambda, n$$

$$t = \frac{B_n}{A_n}, \quad \mu_t = \frac{B_t}{A_t}, \quad v_t = \frac{B_n - B_t}{A_n - A_t}, \quad \text{Iteración } t_i = \frac{\mu_t - v_t}{2}$$

Hay algunos métodos más complejos para el cálculo del umbral cuando trabajamos con imágenes muy ruidosas o con iluminación no uniforme, por ejemplo.

Sin embargo es Mehmet Sezgin³⁶ quien mejor establece una clasificación de la gran mayoría de algoritmos desarrollados que permitan posteriormente realizar una umbralización más efectiva. Según este autor, aunque existan más de cuarenta algoritmos de umbralización, todos ellos se pueden adaptar a una única clasificación en seis categorías.

La primera categoría es la umbralización mediante métodos basados en superficies de histogramas. En esta categoría se tienen en cuenta los picos, valles y curvas que pueden encontrarse en el histograma. Dentro de esta categoría existen desarrollos de algoritmos como el de superficies de Rosenfeld, superficies de Sezan, superficies de Olivio, superficies de Armes o bien superficies de Guo.

En la segunda categoría se encontrarían clasificados los métodos denominados basados en agrupación, donde los niveles de gris de la muestra son agrupados en dos conjuntos, una es el fondo y la otra es el objeto. También puede ser modelada como una mezcla de dos gaussianos. En este grupo encontramos algoritmos como el de Riddler, o agrupamientos de Yanni, grupos de Otsu, Lloyd, Kittler o agrupamiento de Jawahar. Dentro de esta categoría, se puede hacer referencia a determinadas variaciones realizadas sobre el algoritmo de Otsu por Liao³⁷ en él busca incrementar la eficiencia de cálculo, mediante la maximización de la variancia entre clases y con ello mediante iteraciones recursivas obtener el umbral optimizado.

El siguiente grupo de clasificación hace referencia a métodos basados en cálculo de entropía. Este sistema se ha explicado someramente anteriormente. En este grupo encontramos desarrollos de algoritmos como los de Kapur, Yen, Sahoo, Pun_A, Pun_B, Li, Brink, Pal, Shanbag y cálculo de entropía según Cheng.

En este grupo Sahoo³⁸ también ha llegado a desarrollar un nuevo algoritmo denominado como umbralización basada en la entropía bidimensional de Renyi.

El cuarto grupo de clasificación hace referencia a métodos basados en atributos de los objetos, en los que se busca la medida similar entre la escala de grises y la binarización.

En este apartado destacan los algoritmos implantados como atributos Tsai, Hertz, Huang, Pikaz, Leung y Pai.

Otro grupo dentro de la presente clasificación es el formado por el grupo de algoritmos denominados como métodos espaciales, utilizando distribuciones de probabilidad de alto orden y correlación entre píxeles. En este grupo se incorporan los algoritmos de Pal, Abutaleb, Beghdadi y Cheng.

Finalmente y en referencia al sexto grupo, están situados los algoritmos basados en los métodos locales, adaptando el valor de la umbralización en cada píxel a las características locales de la imagen. En este apartado se clasifican los algoritmos de Niblack, Sauvola, White, Bernsen, Palumbo, Yanowitz, Kamel, Oh y Yasuda.

Por nuestra parte se han realizado pruebas de aplicación de diferentes algoritmos. Inicialmente podemos observar el comportamiento del algoritmo de umbralización de Liao³⁷.

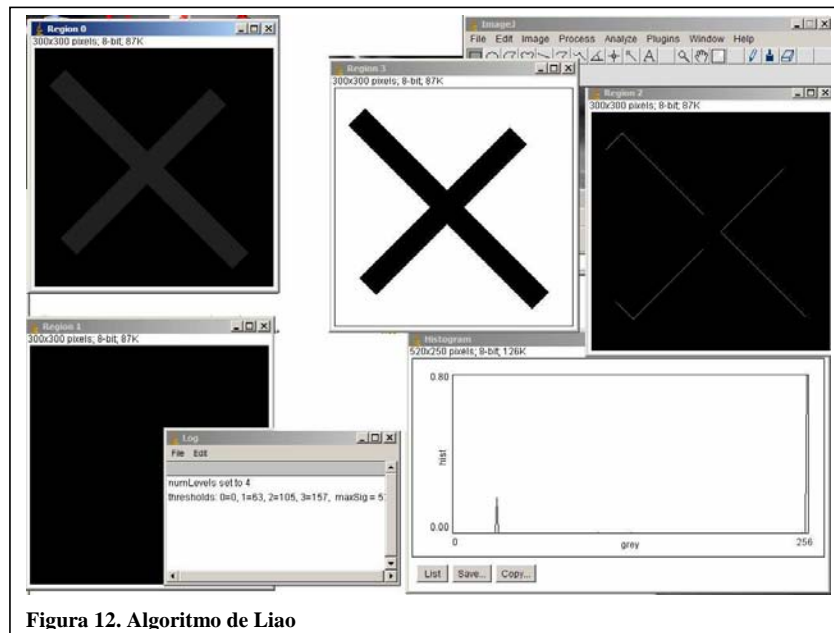


Figura 12. Algoritmo de Liao

El algoritmo se ha aplicado para cuatro regiones, figura 12, observando sobre la región 3 la umbralización deseada. En este caso se aplicó un algoritmo recursivo desarrollado para una umbralización mediante algoritmo de Otsu multinivel y monodimensional. El problema nos surgió a posteriori al querer aplicar un nuevo filtro del tipo de línea de agua. En este caso no funcionó el nuevo algoritmo.

También se realizaron pruebas de funcionamiento con el algoritmo de Otsu en el que se aplicó sobre la misma imagen que en el algoritmo de Liao.

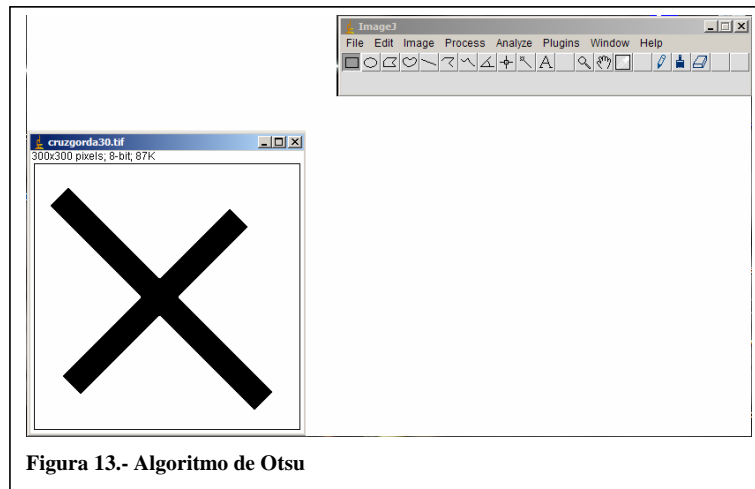


Figura 13.- Algoritmo de Otsu

Podemos observar que el resultado a simple vista, figura 13, ha sido bastante satisfactorio.

El algoritmo aplicado quedaría expresado mediante la siguiente formulación

$$T_{opt} = \arg \max \left\{ \frac{P(T)[1-P(T)][m_f(T) - m_b(T)]^2}{P(T)\sigma_f^2(T) + [1-P(T)]\sigma_b^2(T)} \right\}$$

donde T es la umbralización de la imagen y los subíndices f corresponden al objeto (foreground) y b al fondo (background). La expresión m se corresponde con el valor de la media del objeto y la media del fondo. La expresión σ es la varianza también del objeto y del fondo.

El inconveniente surge posteriormente a querer aplicar un nuevo algoritmo de segmentación, del tipo línea de agua. Frente a este algoritmo no se produce el efecto deseado.

El siguiente algoritmo de umbralización que se ha probado ha sido el de entropía, figura 14.

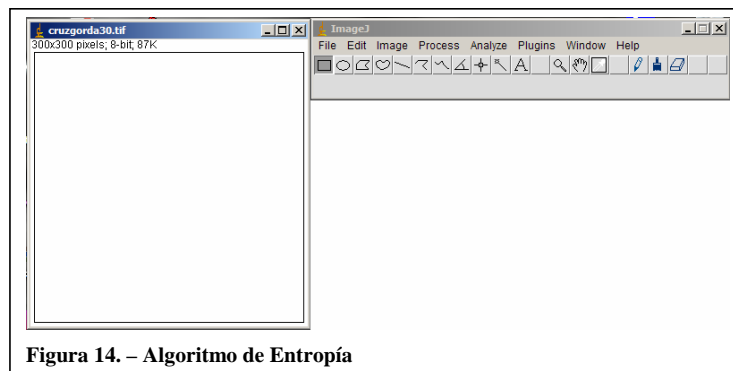


Figura 14. – Algoritmo de Entropía

El desarrollo del algoritmo quedaría expresado mediante la siguiente formulación³⁹ desarrollada por Sahoo,

$$S(t) = \frac{\sum_{(x,y)} \text{sgn}(h(x,y) - h_{N(x,y)}) \Delta(x,y) \text{sgn}(h(x,y) - t)}{C_2}$$

donde $h_{N(x,y)}$ es la media de valores de escala de grises de los píxeles vecinos t es la umbralización. C es un valor de normalización. Aplicado el algoritmo se ha obtenido una imagen en blanco que no se ajusta a nuestras necesidades.

El siguiente algoritmo analizado se define como el de umbralización dinámica⁴⁰. En este algoritmo, figura 15, se observa la media de las imágenes como un resultado de detección de bordes.

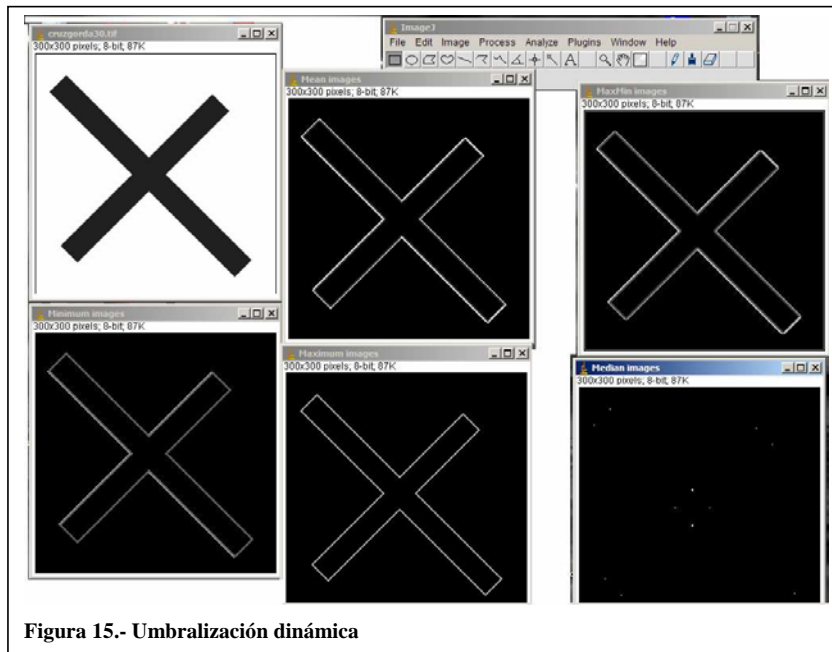


Figura 15.- Umbralización dinámica

Teóricamente el presente algoritmo adaptativo puede tomar como entrada una imagen en escala de grises o en color y obtener una imagen binaria de salida que representara la segmentación de la misma. Para cada píxel en la imagen, se debe calcular un umbral determinado. Si el valor del píxel está por debajo del umbral calculado, este se fija al valor del fondo, si no asume el valor del objeto. Los valores de cada píxel se encuentran por interpolación de los resultados de cada subimagen realizada.

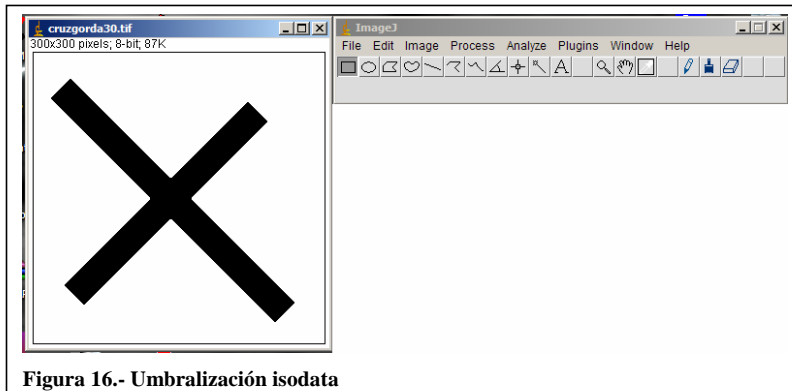
Tal y como lo explica Neira⁴¹ se suele utilizar cuando la iluminación no es uniforme en toda la imagen. Por ello se subdivide la imagen en varias regiones y para cada una de ellas se calcula el umbral. Posteriormente se umbraliza cada región. El valor final de umbral es el resultado de la unión de los umbrales de cada región.

Este algoritmo no se comporta adecuadamente en la siguiente operación de líneas de agua, por que se opta por descartarlo en la aplicación de la presente macro.

El siguiente algoritmo que se ha ensayado es el denominado como algoritmo de umbralización isodata³²⁻⁴¹. Este algoritmo esta basada en una técnica iterativa. El proceso de trabajo es el siguiente: Paso inicial, seleccionar un umbral inicial, por ejemplo un promedio de intensidad. Dividir la imagen en dos grupos R_1 y R_2 utilizando el valor de T . A continuación calcular los valores medios de las regiones μ_1 y μ_2 . El siguiente paso se calcula

$$T = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$$

Finalmente se repiten los pasos anteriores hasta que el valor de T no cambie.



Al igual que con el resto de algoritmos se ha aplicado el mismo sobre un ejemplo concreto, figura 16, observándose aparentemente un buen resultado. Los criterios aplicados han sido los expuestos anteriormente. El problema ha surgido al aplicar posteriormente el algoritmo de línea de agua, que no se ha mostrado efectivo, al no sufrir ninguna variación la imagen.

El último algoritmo aplicado es una variante del algoritmo isodata. En este caso el algoritmo⁴² crea dos regiones determinadas por el objeto de la imagen y por el fondo de la misma. A partir de este momento el sistema funciona de manera muy similar al algoritmo isodata. Se toma un umbral de prueba y se computan los promedios por encima y por debajo de los píxeles vecinos. Se incrementa el umbral y se repite el proceso. El proceso se detiene cuando el incremento del proceso es superior al promedio calculado.

Este algoritmo es el elegido para nuestra macro, ya que se adapta perfectamente al tratamiento posterior conjunto con otros algoritmos.

El siguiente paso en nuestro tratamiento es la aplicación de un algoritmo de segmentación⁴³ conocido como líneas de agua. Esta operación de procesado sobre una imagen binaria, permite separar objetos conectados o adyacentes¹⁴, erosionando la línea de píxeles que forman el límite entre ambos. Esta operación se suele desarrollar en un mapa de distancias euclídeas, que a su vez se basa en la realización de una serie de erosiones consecutivas. Por estos motivos algunos autores han llegado a definir el presente algoritmo como una aproximación a una segmentación fundamentada en regiones⁴³.

Najman⁴⁴⁻⁴⁵ ya establece una somera clasificación de los algoritmos de líneas de agua, mostrando quizás la evolución matemática del algoritmo de una base discreta a una base continua.

Por su parte Couprie⁴⁶⁻⁴⁷ establece que los primeros algoritmos eficientes se basaban en la simulación de inmersión, tal y como desarrollaron Soille⁴⁸ y Meyer⁴⁹ en los años 90. Sin embargo Couprie propone un nuevo algoritmo basado en una transformación topológica que permita preservar algunas propiedades topológicas como por ejemplo la conectividad. Por su parte Bertrand⁵⁰ desarrolla la morfología del algoritmo topológico posibilitando que se pueda recuperar determinada información de la imagen en escala de grises una vez aplicada la segmentación.

Inicialmente Najman y Couprie⁵¹ establecen una primera clasificación de estos algoritmos. El primero es el de Vicent-Soille que trabaja sobre distancias geodesicas entre puntos. Para ello implementa la siguiente expresión recursiva:

$$X_{h_{\min}+1} = \overline{F_{h_{\min}+1}} = \text{MIN}_{h_{\min}}$$

$$X_{h+1} = \text{MIN}_h \cup \text{IZ}_{F_{h+1}}(X_h)$$

donde h_{\min} representa el valor de escala de gris mas bajo de una imagen F, donde $\text{IZ}_{F_{h+1}}(X_h)$ representa la unión de zonas de influencia geodésica y MIN_h representa la unión mínima de imagen F. Realmente esta expresión recursiva no se ha llegado a implementar completamente, dado que introduce un factor corrector no recursivo fuera del algoritmo.

El segundo es el algoritmo de Meyer también definido como algoritmo de distancias topográficas. Comienza desde la escala de gris de la imagen estableciendo diferentes etiquetas expandiendo estas etiquetas lo máximo que sea posible. Este algoritmo provoca que las líneas de agua obtenidas sean las más finas de todos los algoritmos comparados.

El tercero en la clasificación es el basado en coste. Inicialmente define la distancia o “coste” de viaje entre píxeles definiendo una zona de máxima influencia. Se pueden considerar varios costes o distancias como la distancia topográfica o bien el método de coste del camino del máximo arco.

El cuarto algoritmo es el de la línea de agua topológica desarrollada por Couprie⁵² y Bertrand⁵³. El algoritmo introduce una topología unidimensional de la escala de gris de las imágenes. Recoge un núcleo homotópico superior en dos etapas. La primera realiza una construcción de un árbol con el que representar la información contenida en una función numérica de la imagen. La segunda realiza la iteración hasta encontrar la estabilidad de la operación.

Roerdink establece una clasificación bastante más exhaustiva de los distintos algoritmos desarrollados para esta función. Comienza aplicando una definición de algoritmo continuo o de discreto. En el caso discreto inicia la descripción de los algoritmos por inmersión, desarrollado por Vicent y Soille. Continúa con la definición del algoritmo de distancia topográfica, desarrollado por Meyer y que ya ha sido definido anteriormente. Para el caso de algoritmos de línea de agua (watershed) secuenciales realiza la siguiente clasificación. Inicialmente algoritmos por inmersión entre los que destacan el de Vicent-Soille, después se referencia el algoritmo de componentes gráficos, desarrollado por Meijster. En el apartado de distancias topográficas, clasifica los algoritmos ordenados y los algoritmos desordenados. En los algoritmos ordenados destacan los trabajos de Dijkstra y Moore. En el caso de los desordenados destacan los trabajos de Berge. Continúa la clasificación con los algoritmos de mínima detección, desarrollados por Meijster y Moga. Estas expresiones son los denominados como algoritmo “FIFO” y el “UNION-FIND”. La clasificación continúa con el desarrollo de Dijkstra-Moore mediante el algoritmo de camino mas corto, (shortest paths algorithm) y el de estructura de escalada (hill climbing).

En nuestro caso se han aplicado varias pruebas de funcionamiento del algoritmo. EL primero que se ha aplicado es el desarrollado por D. Sage⁵⁴, figura 17, en la que se

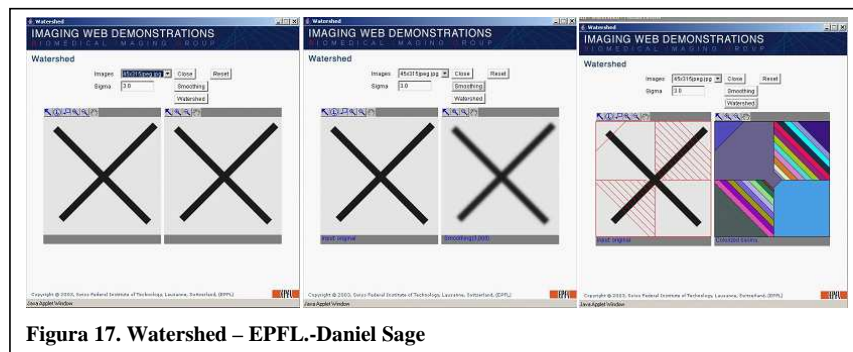


Figura 17. Watershed – EPFL.-Daniel Sage

puede observar que los resultados de la segmentación no han sido los esperados, dado que no afectan a cada una de las aspas de la cruz. Esta prueba se ha realizado mediante la aplicación directa de la imagen sobre un plugin en java en la Web del autor.

El siguiente algoritmo comprobado ha sido el desarrollado por Christopher Mei, en el año 2003, figura 18, en la cual aplica el criterio de algoritmo FIFO, explicado anteriormente. Como podemos observar tras la aplicación del procedimiento general mas la aplicación de la línea de agua no se han producido los resultados esperados, por lo que no se tendrá en cuenta el presente algoritmo.

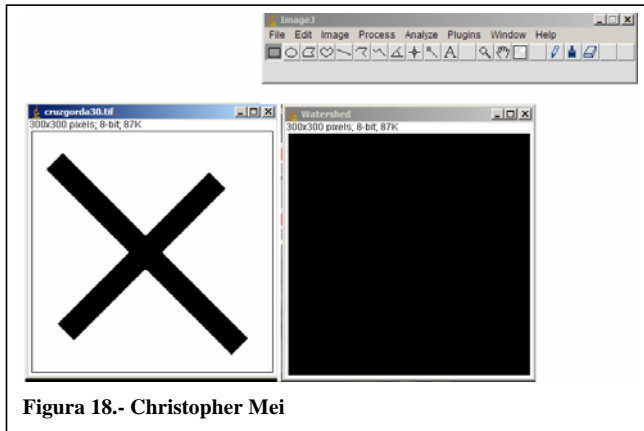


Figura 18.- Christopher Mei

La figura 18 muestra la desaparición total de la imagen, quedando sustituida por una imagen en negro.

El siguiente algoritmo que se ha probado es otro desarrollo de Mei, que adopta el

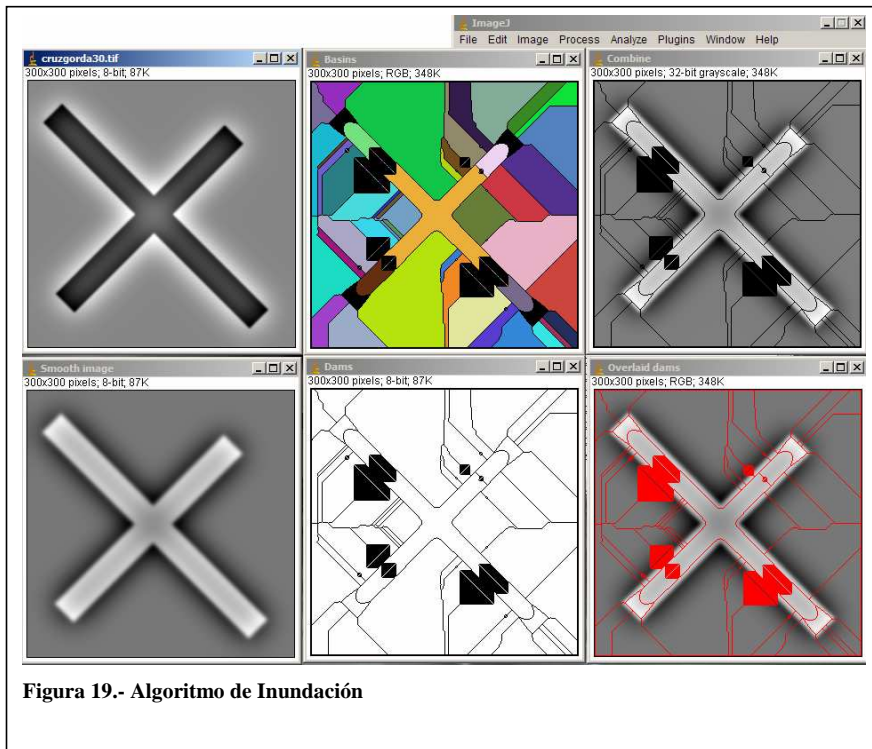
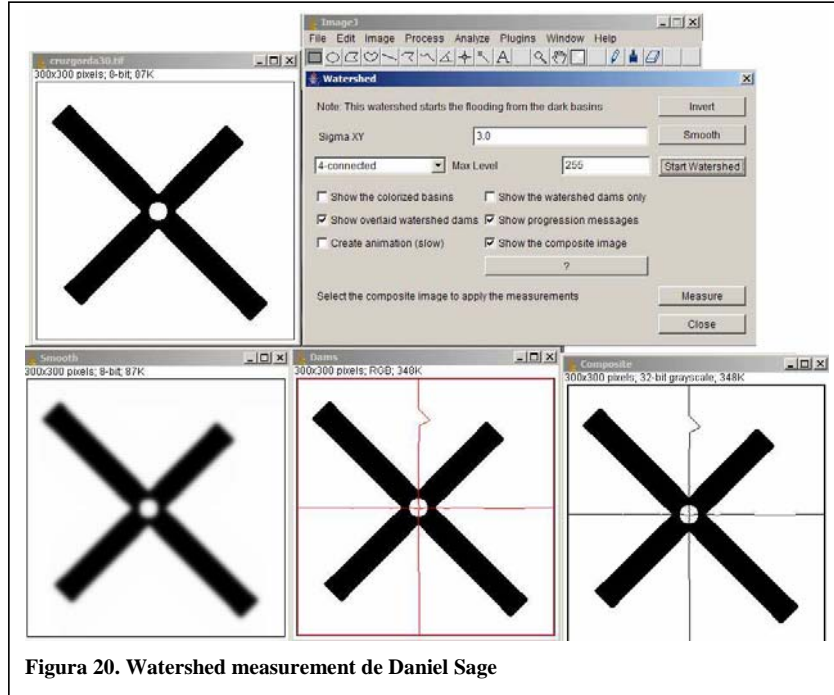


Figura 19.- Algoritmo de Inundación

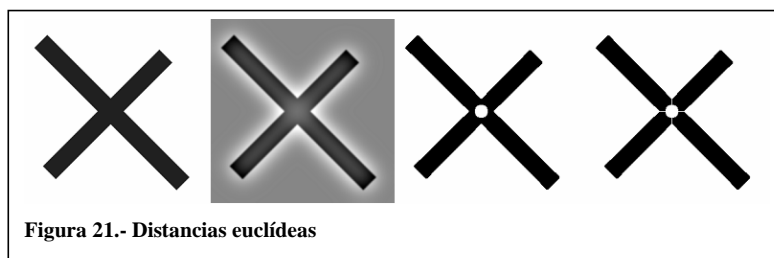
criterio de inmersión en mapa topográfico. Como se observa no responde a las necesidades de separación exigidas.

Otro algoritmo probado es el de “watershed measurement” que como se puede observar en la figura 20 tampoco responde a las expectativas generadas. Se basa también en el



Criterio de inundación desarrollado por Daniel Sage. La aplicación de este algoritmo, figura 20, no produce tampoco los efectos deseados.

Finalmente se aplica el algoritmo de distancias euclídeas, figura 21, en la cual requiere que la imagen este binarizada previamente y quede la imagen en forma de partículas en



blanco y negro. El funcionamiento del algoritmo es calcular el mapa de distancias euclídeas y a continuación encuentra el mapa de últimos puntos erosionados. Alcanzado ese punto aplica una dilatación cada uno de los puntos últimos erosionados tanto como sea posible hasta el límite de la cara de la partícula o bien de la región. Trabaja bastante bien con objetos convexos sin llegar a grandes solapamientos. Como conclusión puede establecerse el presente algoritmo como algoritmo válido para aplicar en nuestra macro.

Como ultima etapa nos queda aplicar la medida de los ángulos de cada uno de los objetos obtenidos en las imágenes segmentadas.

Una posibilidad de cálculo es la aplicación de un algoritmo de cálculos de momentos, por Diámetros de Feret o por Diámetros de elipses.

Veamos el comportamiento de cada uno de los algoritmos implementados. El primero es el de cálculo de momentos. En este caso el algoritmo aplica el orden 4 de manera muy similar a la que se ha explicado anteriormente. La orientación, pues se define como el ángulo del eje correspondiente al mínimo momento de inercia, y se obtiene minimizando dicha función⁵⁵⁻⁵⁶:

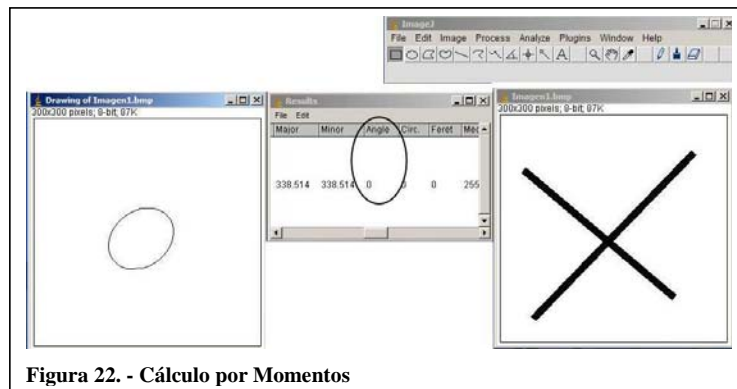
$$I(\theta) = \sum_{x,y \in R} \sum_{x,y \in R} d^2 \min(x, y) = \sum_{x,y \in R} \sum_{x,y \in R} [(y - \bar{y})\cos\theta - (x - \bar{x})\sin\theta]^2$$

siendo d la distancia entre el eje mayor y el extremo de la elipse adaptada. Como resultado de la minimización se obtiene

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2\mu_{1,1}}{\mu_{2,0} - \mu_{0,2}} \right]^{57}$$

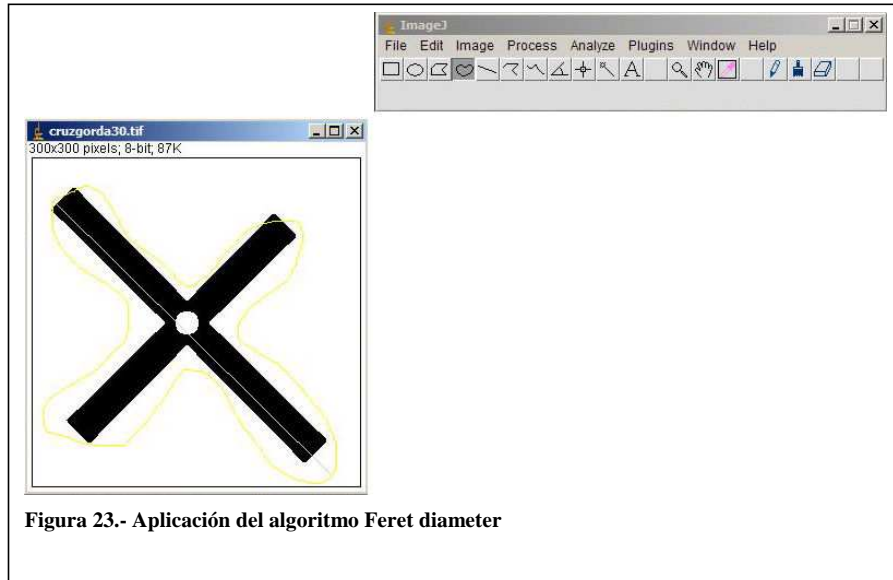
siendo μ el valor de los momentos centrados.

Aplicado dicho sistema sobre nuestro proyecto, podemos ver que sobre la prueba realizada, figura 22, no se aplica correctamente la determinación del ángulo tal y como

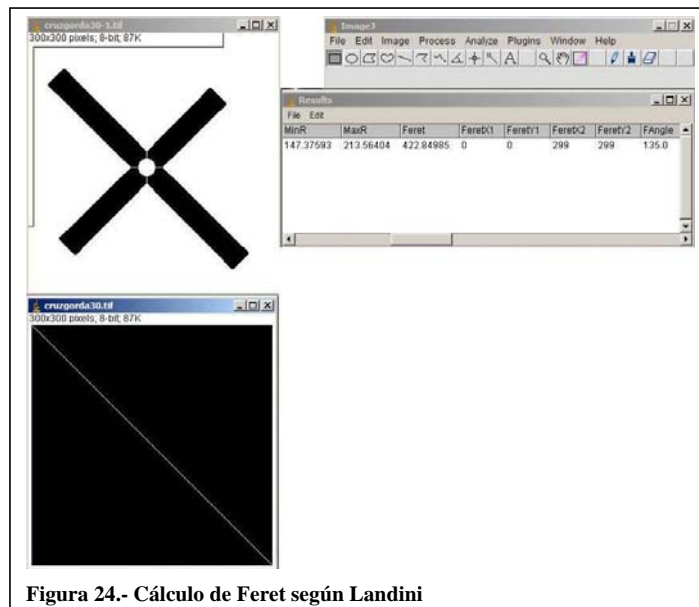


nos interesa que se segmente y como nos interesa que se calculen los ángulos de inclinación de los objetos de la imagen.

Abandonado este procedimiento aplicamos el método de cálculo mediante diámetros de Feret. Teóricamente debe establecerse el diámetro⁵⁸ y posteriormente mirar si se puede medir el ángulo de inclinación entre la diagonal y la línea imaginaria horizontal.



La aplicación del algoritmo no muestra la efectividad deseada, desde el punto de vista que debe realizarse manualmente una selección. El valor obtenido solo afecta a una de las partes, figura 23, de la cruz dibujada y por lo tanto no representa toda la información que necesitaríamos para confeccionar el cálculo del ángulo buscado.



G. Landini⁵⁹ realiza un desarrollo mas completo de la aplicación del cálculo de Feret a cada partícula que se encuentra en la imagen. Calcula cada valor de coordenada Feret en x e y, inicial y final y posteriormente realiza la medición del ángulo, figura 24. Podemos determinar que el valor obtenido de la imagen se ajusta al mismo patrón calculado anteriormente. El valor obtenido no se desglosa en cada una de los ángulos individuales que se necesitan.

Finalmente aplicamos una metodología que se basa en el método de adaptación de elipse al elemento una vez segmentado. Este método tal y como nos explica Alba⁵⁵ se define como la elipse cuyo momento de segundo orden es igual al del objeto. Para expresar esto calcula los momentos de inercia mayor y menor de la elipse según las expresiones

$$I_{\min} = \frac{\pi}{4} ab^3 \quad I_{\max} = \frac{\pi}{4} a^3 b$$

Para un objeto con orientación θ el momento de inercia mayor es

$$I'_{\max}(\theta^*) = \max \left\{ \sum_{x,y \in R} \sum d^2 \min(x, y) \right\} = \sum \sum [(y - \bar{y}) \cos \theta^* - (x - \bar{x}) \sin \theta^*]^2$$

Así el cálculo de los ejes de la elipse adaptada es

$$a = \left(\frac{4}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} \left[\frac{(I'_{\max})^3}{I'_{\min}} \right]^{\frac{1}{8}} \quad b = \left(\frac{4}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} \left[\frac{(I'_{\min})^3}{I'_{\max}} \right]^{\frac{1}{8}}$$

Mediante estas expresiones se pueden determinar las elipses mejor adaptadas al

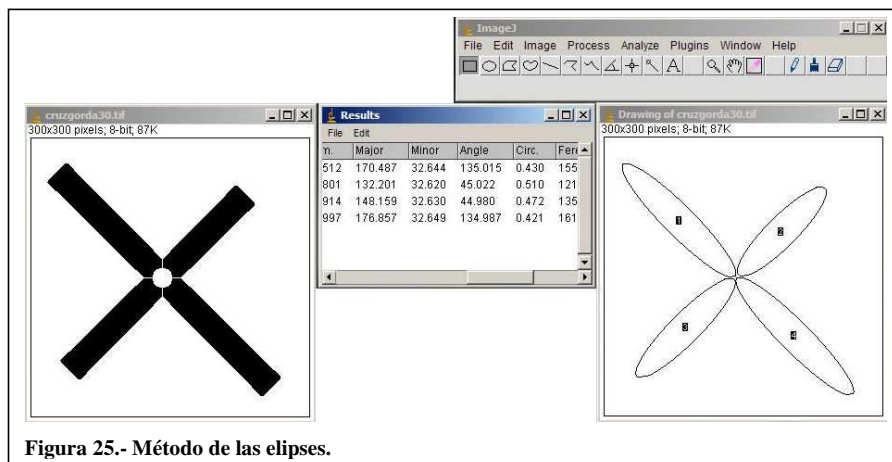


Figura 25.- Método de las elipses.

elemento que anteriormente se ha segmentado mediante las líneas de agua, figura 25. Ello nos permite medir los ángulos de los ejes mayores y listar cada uno de los ángulos que se puedan encontrar en la imagen. La imagen de la cruz, figura 25, esta segmentada en cuatro partes y a continuación se ha aplicado la medición del ángulo de manera automática. Se resumen al lado los resultados de los ángulos medidos así como el orden en el que se ha listado el mismo.

Por lo tanto podemos establecer que el método que mejor se adapta a nuestras necesidades es el expuesto anteriormente, el método de las elipses.

4.3.- Implementación de la macro de algoritmos

Una vez descritos los posibles algoritmos que pueden aplicarse en cada una de las fases del proceso de la imagen, se procede a la elección del orden de aplicación de cada paso que debe componer la macro. Nuestra macro de algoritmo se compone de seis pasos totales que nos van a permitir realizar el cálculo que nos interesa.

Como primer queda enmarcado en la preparación de la imagen. La preparación se realiza pasando la imagen de color a escala de grises y ocho bits. Mediante escala de grises podremos aplicar una serie de algoritmos que nos permitirá aumentar nuestra efectividad en el cálculo.

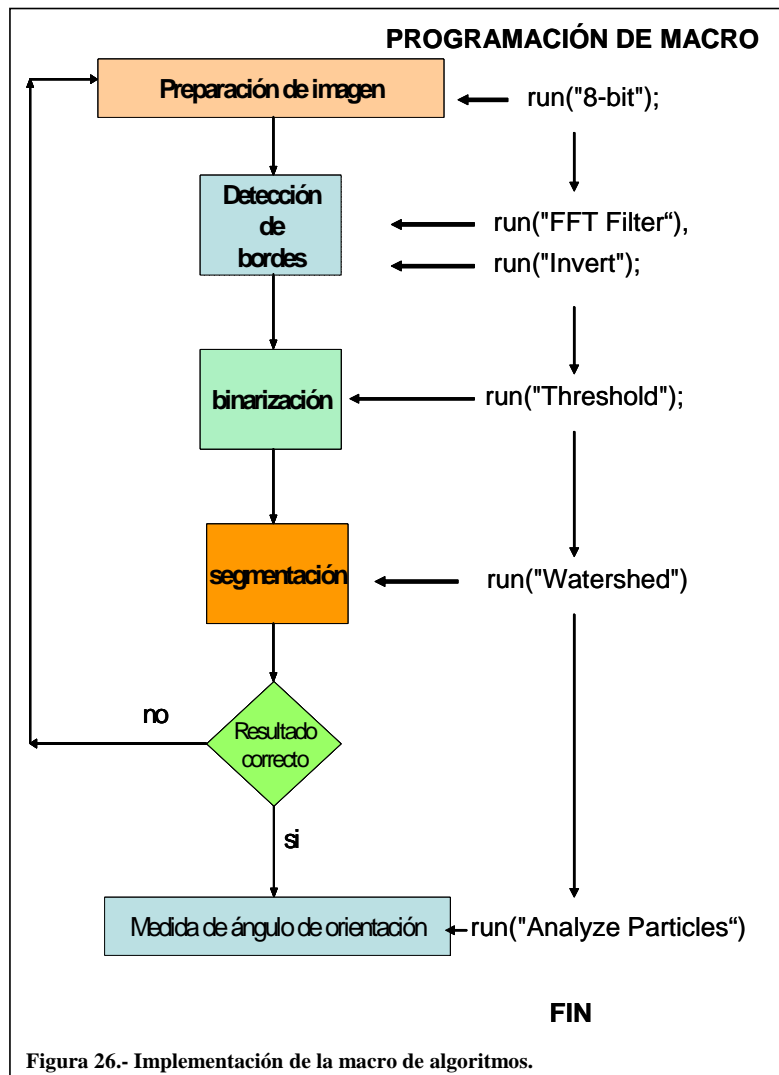
El segundo paso a aplicar es la detección de bordes, que en nuestro caso responde al filtro de transformada rápida de Fourier, que quedaría identificada como “filtro FFT”.

Para el tercer paso se procede a la inversión de los colores entre fondo e imagen. Para ello aplicamos la orden “Invert”, figura 26. Esta orden queda enmarcada dentro de la etapa de detección de bordes.

Como cuarta etapa, y dado que en estos momentos la imagen esta con los bordes detectados, se debe aplicar una binarización que nos elimine los ruidos de fondo y elementos no deseados que nos puedan perjudicar. Para ello aplicamos el algoritmo elegido de umbralización, que anteriormente se ha explicado.

Con la imagen binarizada, se aplica el siguiente paso que será la segmentación mediante líneas de agua. Con este punto la imagen esta preparada para comenzar con la aplicación de elipses para calcular la orientación.

Como último paso procedemos al cálculo de la orientación mediante el algoritmo de “análisis de partículas”. Con esta aplicación podremos proceder a calcular la orientación de las fibras, figura 26.



Por tanto la macro de algoritmos quedará de la siguiente manera:

```
run("8-bit");
```

```
run("FFT Filter", "filter_large=40 filter_small=3 suppress=none tolerance=5 autoscale saturate");
```

```
run("Invert");
```

```
run("Threshold");
```

```
run("Watershed");
```

```
run("Analyze Particles...", "size=0-Infinity circularity=0.00-1.00 show=Ellipses display
exclude clear include summarize record");
```

Esta macro será la que se pueda implementar en el programa ImageJ, según su formato para poderla ejecutar.

4.4 Análisis de resultados y cálculo de errores.

Una vez determinada la macro se debe conocer cual es el comportamiento del sistema en cada una de los casos que se puedan presentar y además debemos conocer cual es el error que podemos cometer en cada caso.

En primer lugar se realizarán las mediciones y cálculos sobre imágenes simples en los que se conoce exactamente.

El primer caso que se aplica es sobre imágenes verticales. Los ángulos presentados son de 90°, figura 27.

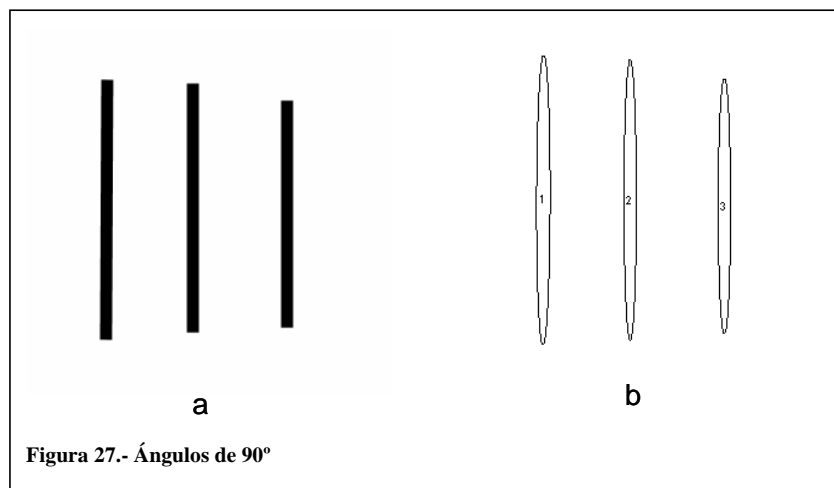


Figura 27.- Ángulos de 90°

Se presentan tres líneas y el resultado son tres elipses, etiquetadas del 1 al 3. Los resultados obtenidos, tabla 1, son:

	Label	Ángulo medido	Ángulo teórico	diferencia	diferencia %
1	3v	89,853	90	0,147	0,16
2	3v	90	90	0	0,00
3	3v	90	90	0	0,00

Tabla 1

Con este resultado podemos considerar que el máximo error cometido es del 0,16 % en una parte de la imagen y en la media consideraremos el error del 0,05 %. En principio se puede considerar como un error permisible.

El siguiente caso comprobado será sobre una imagen con fibras horizontales. Al igual que en el caso anterior los ángulos son ángulos controlados de 0° o 180° , figura 28.

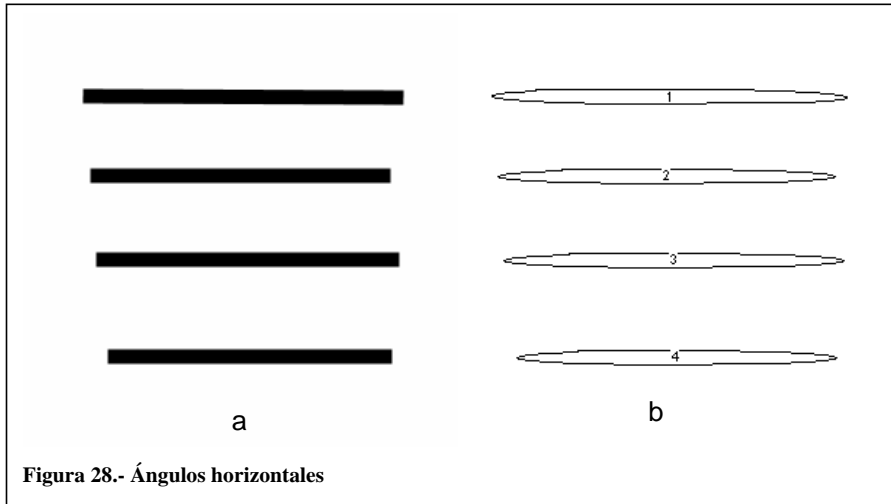


Figura 28.- Ángulos horizontales

Los resultados obtenidos se expresan a continuación:

Label	Ángulo medido	Ángulo teórico	diferencia	diferencia %
1 4h	179,862	180	0,138	0,077
2 4h	0	0	0	0,000
3 4h	0	0	0	0,000
4 4h	0	0	0	0,000

Tabla 2

Como puede observarse, la máxima desviación en una de las zonas de la imagen es del 0,077%, lo que ya supone una desviación algo menor que en el caso anterior. La desviación global es del 0,019% como valor medio de la muestra.

Aplicados los casos horizontal y vertical se procede a evaluar el caso de ángulo oblicuo de 45° , figura 29.

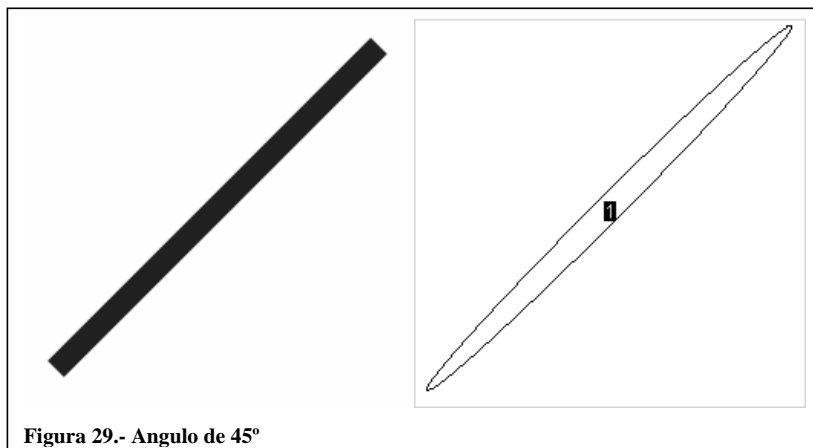


Figura 29.- Angulo de 45°

Para este caso el resultado ha sido excelente, puesto que el ángulo teórico de 45° ha sido medido por la macro exactamente.

	Label	Ángulo medido	Ángulo Teórico	diferencia	diferencia %
1	45justo	45	45	0	0

Tabla 3

Por este motivo la diferencia entre el valor teórico y el valor medido ha sido de 0 con una diferencia relativa del 0%.

Aplicaremos el mismo criterio en este caso para realizar una medición sobre varias líneas inclinadas, figura 30, aunque la diferencia con el caso anterior es que sobre la línea se han efectuado una serie de discontinuidades con objeto de comprobar como se comporta la macro evaluada.

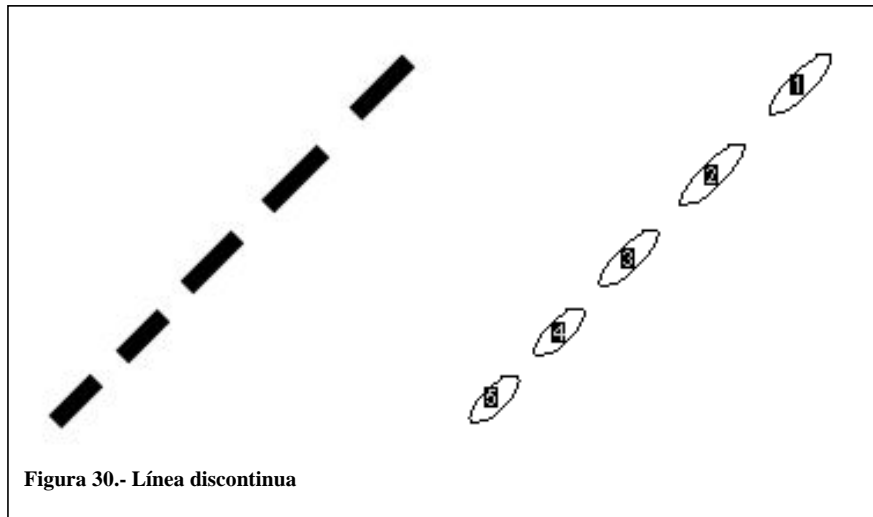


Figura 30.- Línea discontinua

Para este caso los resultados obtenidos son los expresados en la imagen de abajo

	Label	Ángulo medido	Ángulo teórico	diferencia	diferencia %
1	45interotra	44,861	45	0,139	0,3089
2	45interotra	45,001	45	-0,001	-0,0022
3	45interotra	45,001	45	-0,001	-0,0022
4	45interotra	45,001	45	-0,001	-0,0022
5	45interotra	45,001	45	-0,001	-0,0022
				0,027	0,0600

Tabla 4

Podemos observar que en este caso las desviaciones individuales oscilan entre 0,3 % para el valor más elevado y el 0,002 % para el valor más acertado, obteniéndose una desviación media del 0,06 %, lo que nos proporciona un valor bastante aceptable.

Si lo que necesitamos, al tener ya bastantes valores con los que trabajar, podemos comenzar a controlar las desviaciones que se pueden obtener mediante la aplicación del calculo de la matriz de orientación y mas concretamente el valor de a_{11} de dicha matriz de orientación, definida por Yasuda⁹⁻¹⁰.

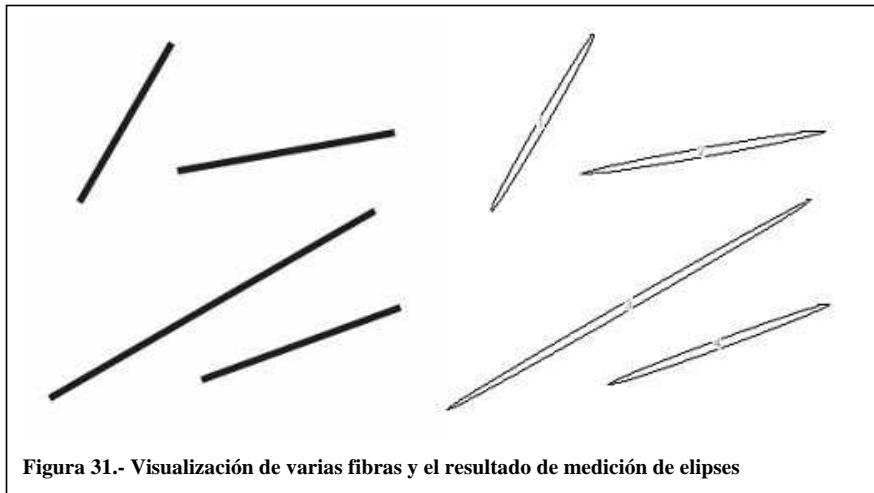
Los valores una vez calculados y promediados quedan expresados de la siguiente manera:

	Label	Ángulo medido	Ángulo teórico	diferencia	diferencia %	a11	a11_teor
1	45interotra	44,861	45	0,139	0,3089	0,5024	0,5
2	45interotra	45,001	45	-0,001	-0,0022	0,5000	0,5
3	45interotra	45,001	45	-0,001	-0,0022	0,5000	0,5
4	45interotra	45,001	45	-0,001	-0,0022	0,5000	0,5
5	45interotra	45,001	45	-0,001	-0,0022	0,5000	0,5
				0,027	0,0600	0,5005	0,5

Tabla 5

Las diferencias que se han alcanzado has sido del orden de 0,005 lo que supone un valor en porcentaje del 0,094% respecto al valor teórico representado.

Complicando un poco más el modelo se realiza una prueba con varias líneas de ángulos conocidos que nos indicará también el comportamiento de la macro para estos casos. Se aplica sobre cuatro fibras orientadas, pero en este modelo todavía no llegan a cruzarse las mismas, figura 31.



En este caso también se ha aplicado un etiquetado de cada una de las fibras sobre las que se ha calculado la elipse asociada. Los resultados obtenidos pueden verse en la siguiente tabla (tabla 6):

	Label	Angulo medido	ángulo teórico	diferencia	diferencia %
1	otrapru	59,862	60	0,138	0,230
2	otrapru	10,018	10	-0,018	-0,180
3	otrapru	29,957	30	0,043	0,143
4	otrapru	20,013	20	-0,013	-0,065
			medias	0,0375	0,032

Tabla 6

Las diferencias entre los ángulos medidos y los ángulos teóricos varían desde 0,138° y -0,013°. Este significa que la media de los valores medido es de 0,0375°, en valores absolutos. Si queremos comparar realmente los resultados debemos fijarnos en los valores relativos, expresados en la columna de diferencia en %. El intervalo de valores oscila entre 0,23 % en valores positivos hasta -0,180% en valores negativos. Estos valores negativos deben interpretarse como que se ha sobrevalorado el ángulo medido respecto al teórico. La media de error obtenido es del 0,023%, lo que representa un valor bastante bueno. Aplicando el criterio de cálculo de Yasuda, obtendríamos también la comparación del valor de a11 de la matriz del tensor orientación. Estos valores quedan representados en la siguiente tabla, (tabla 7):

	Label	Angulo medido	ángulo teórico	diferencia	diferencia %	a11_calculado	a11_teorico	diferencia	diferencia %
1	otrapru	59,862	60	0,138	0,230	0,252	0,250	-0,002	-0,836
2	otrapru	10,018	10	-0,018	-0,180	0,970	0,970	0,000	0,011
3	otrapru	29,957	30	0,043	0,143	0,751	0,750	-0,001	-0,087
4	otrapru	20,013	20	-0,013	-0,065	0,883	0,883	0,000	0,017
			medias	0,0375	0,032	0,714	0,713	-0,001	-0,224

Tabla 7

Para cada uno de los valores medidos y calculado el valor de a11, puede verse que oscila entre 0,252 para el valor de ángulo más desorientado y el valor cercano a 1, expresado en 0,97, para el valor de la fibra mas orientada. Globalmente las diferencias relativas oscilan entre -0,836% para el mas desfavorable y 0,011 para el mas favorable. Calculada la media vemos que nos quedamos en un valor del 0,22 %, lo cual supone un resultado bastante exacto.

Ahora complicaremos la detección de los ángulos con la aplicación de la macro para elementos que se crucen, como sería el caso de grandes cantidades de fibras fotografiadas. Inicialmente se aplicará el cálculo de errores a elementos cruzados mas simples, como sería un aspa, figura 32. El aspa está configurada inicialmente para un ángulo de 45° que se cruza con otra fibra que posee una ángulo de 135°. A continuación aplicaremos la macro programada que nos permitirá realizar la medición de los dos ángulos, así como determinar el valor de los elementos a11 de la matriz del vector orientación.

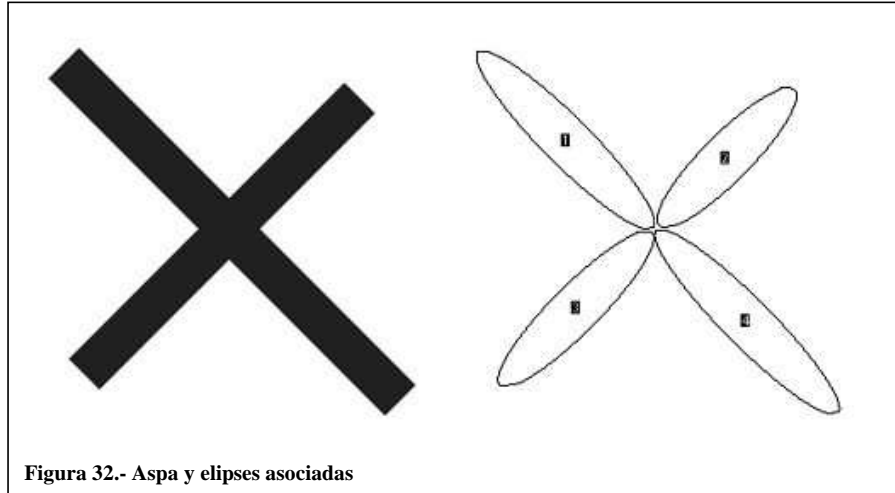


Figura 32.- Aspa y elipses asociadas

Los valores de los cálculos obtenidos oscilan en un intervalo de entre -0,011 % y un valor máximo de 0,044%, tabla 8.

	Label	Ángulo medido	Ángulo teórico	diferencia	diferencia %
1	cruzgorda30	135,015	135	-0,015	-0,011
2	cruzgorda30	45,022	45	-0,022	-0,049
3	cruzgorda30	44,98	45	0,02	0,044
4	cruzgorda30	134,987	135	0,013	0,010
			medias	-0,001	-0,001

Tabla 8

Las medias del valor absoluto y relativo casualmente coinciden en valor, quedando dentro de un error relativo del 0,001 %, lo cual es un valor aceptable para nuestro cálculo. Si aplicamos los mismos criterios de los casos anteriores, los valores obtenidos

	Label	Ángulo medido	Ángulo teórico	diferencia	diferencia %	a11	a11_teorico	diferencia	diferencia %
1	cruzgorda30	135,015	135	-0,015	-0,011	0,5003	0,5	-0,0003	-0,0524
2	cruzgorda30	45,022	45	-0,022	-0,049	0,4996	0,5	0,0004	0,0768
3	cruzgorda30	44,98	45	0,02	0,044	0,5003	0,5	-0,0003	-0,0698
4	cruzgorda30	134,987	135	0,013	0,010	0,4998	0,5	0,0002	0,0454
			medias	-0,001	-0,001	0,5000	0,5	0,0000	0,0000

Tabla 9

quedan expresados en la tabla 9. En este caso se compensan los valores negativos y positivos, proporcionándonos una media de valor 0. En este caso también podemos considerar el valor del error relativo como muy bueno.

A continuación se plantea ya un nuevo caso de cruce de fibras con orientación controlada, pero en este caso existe más de un cruce, figura 33.

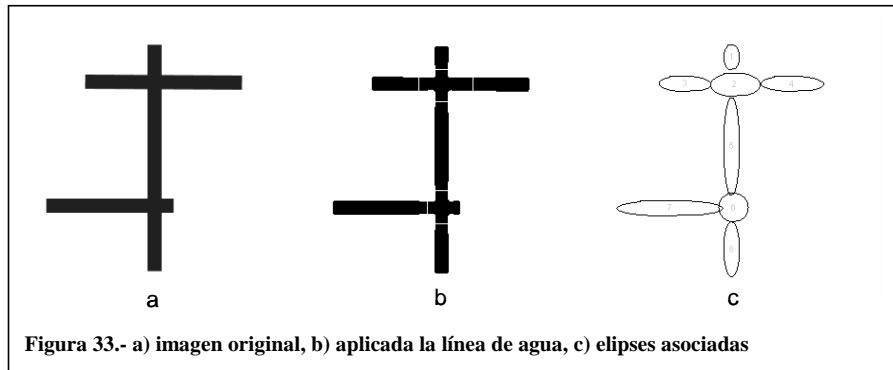


Figura 33.- a) imagen original, b) aplicada la línea de agua, c) elipses asociadas

El cruce que experimentan las fibras, tienen orientaciones conocidas que oscilan entre 0° para dos fibras y de 90° para una fibra. Queda observar cual es el comportamiento de la macro de algoritmos para este caso.

	Label	Ángulo medido	Ángulo teórico	desviación	desviación %
1	Cruz0_90_0	86,863	90	3,137	3,4856
2	Cruz0_90_0	2,902	0	-2,902	-1,6122
3	Cruz0_90_0	179,092	180	0,908	0,5044
4	Cruz0_90_0	179,207	180	0,793	0,4406
5	Cruz0_90_0	90,074	90	-0,074	-0,0822
6	Cruz0_90_0	91,818	90	-1,818	-2,0200
7	Cruz0_90_0	0,113	0	-0,113	-0,0628
8	Cruz0_90_0	90,733	90	-0,733	-0,8144
				-0,100	-0,0201

Tabla 10

En los resultados, tabla 11, se aprecian dos valores con desviaciones bastante elevadas, del 2,02% y del 3,4%. En su conjunto podemos ver que obtenemos una desviación media del 0,02%.

Podemos comprobar el mismo ejemplo de tres fibras cruzadas, pero con otra orientación también conocida, imagen 34.

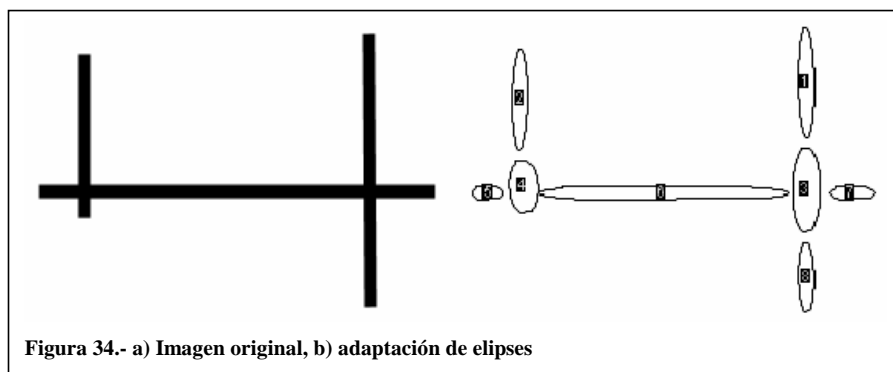


Figura 34.- a) Imagen original, b) adaptación de elipses

Los resultados obtenidos oscilan entre un 3,3 % del valor mayor y mas desviado hasta el valor de 0, que mas se acerca, tabla 11

	Label	Angulo medido	Angulo teórico	diferencia	diferencia %
1	Imagen2cruz0900a8rot90	90,725	90	-0,725	-0,806
2	Imagen2cruz0900a8rot90	89,295	90	0,705	0,783
3	Imagen2cruz0900a8rot90	89,843	90	0,157	0,174
4	Imagen2cruz0900a8rot90	92,977	90	-2,977	-3,308
5	Imagen2cruz0900a8rot90	179,019	180	0,981	0,545
6	Imagen2cruz0900a8rot90	0,015	0	-0,015	-0,008
7	Imagen2cruz0900a8rot90	0	0	0	0,000
8	Imagen2cruz0900a8rot90	90,92	90	-0,92	-1,022
				-0,34925	-0,455

Tabla 11

La media de las desviaciones que encontramos se sitúa en un valor del 0,46%, lo que se puede considerar como un valor aceptable. Aplicamos también el criterio de cálculo del valor de la matriz a11, que nos queda reflejado en la tabla 12

	Label	Angulo medido	Angulo teórico	diferencia	diferencia %	a11_medido	a11 teorico	diferencia	diferencia %
1	Imagen2cruz0900a8rot90	90,725	90	-0,725	-0,806	0,000	3,75E-33	-1,60E-04	-4,267E+30
2	Imagen2cruz0900a8rot90	89,295	90	0,705	0,783	0,000	3,75E-33	-1,51E-04	-4,035E+30
3	Imagen2cruz0900a8rot90	89,843	90	0,157	0,174	0,000	3,75E-33	-7,51E-06	-2,001E+29
4	Imagen2cruz0900a8rot90	92,977	90	-2,977	-3,308	0,003	3,75E-33	-2,70E-03	-7,185E+31
5	Imagen2cruz0900a8rot90	179,019	180	0,981	0,545	1,000	1,00E+00	2,93E-04	2,931E-02
6	Imagen2cruz0900a8rot90	0,015	0	-0,015	-0,008	1,000	1,00E+00	6,85E-08	6,854E-06
7	Imagen2cruz0900a8rot90	0	0	0	0,000	1,000	1,00E+00	0,00E+00	0,000E+00
8	Imagen2cruz0900a8rot90	90,92	90	-0,92	-1,022	0,000	3,75E-33	-2,58E-04	-6,870E+30
				-0,34925	-0,455	0,375	3,75E-01	-3,73E-04	-1,091E+31

Tabla 12

El intervalo de valores obtenido se puede considerar como exacto, dado que las diferencias de valoren porcentaje se pueden considerar despreciables. Los valores de elemento de la matriz a11 teórico y medido coinciden de una manera exacta para este caso. 0,375 para el valor medido frente 0,375 para el valor teórico. Desviación despreciable.

Se han considerado hasta el momento cruces de fibras a 0 grados y 90 grados con dos consideraciones perpendiculares una respecto a la otra.

El siguiente caso que se presenta es la presencia de tres fibras orientadas de manera también entrecruzada pero con ángulos diferentes a 0,90. Se han aplicado ángulos de 45° y de 135°, figura 35. Se calcularan las desviaciones que se encuentran en cada una de las imágenes.

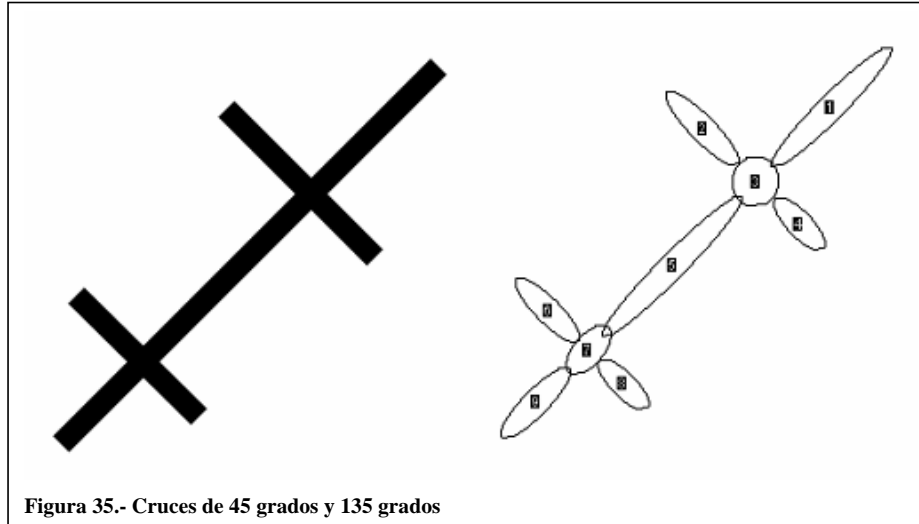


Figura 35.- Cruces de 45 grados y 135 grados

La segmentación aplicada por el algoritmo ha generado un total de 9 elipses asociadas, que representan distintos ángulos por cada elipse. Los resultados obtenidos se representan en la tabla 14.

	Label	Angulo medido	angulo teorico	diferencia	diferencia %
1	Imagen145135135a15	45,112	45	-0,112	-0,249
2	Imagen145135135a15	134,429	135	0,571	0,423
3	Imagen145135135a15	82,719	90	7,281	8,090
4	Imagen145135135a15	133,556	135	1,444	1,070
5	Imagen145135135a15	45,272	45	-0,272	-0,604
6	Imagen145135135a15	134,844	135	0,156	0,116
7	Imagen145135135a15	49,893	45	-4,893	-10,873
8	Imagen145135135a15	134,608	135	0,392	0,290
9	Imagen145135135a15	45,632	45	-0,632	-1,404
				0,4372	-0,349

Tabla 13

El intervalo de resultados obtenidos oscila entre una diferencias del 10 % en el caso más desfavorable y el 0,2% en el caso más favorable. Hay dos desviaciones del 10 y el 8% con diversos signos. La media obtenida de manera global ha quedado en el 0,349 %. Si aplicamos el criterio de la matriz los resultados que se obtienen alcanzan el 3,6 %

	Label	Angulo medido	angulo teorico	diferencia	diferencia %	a11_medido	a11_teorico	diferencia %
1	Imagen145135135a15	45,112	45	-0,112	-0,249	0,4980	0,5	0,3910
2	Imagen145135135a15	134,429	135	0,571	0,423	0,4900	0,5	1,9930
3	Imagen145135135a15	82,719	90	7,281	8,090	0,0161	3,7525E-33	0,0000
4	Imagen145135135a15	133,556	135	1,444	1,070	0,4748	0,5	5,0384
5	Imagen145135135a15	45,272	45	-0,272	-0,604	0,4953	0,5	0,9494
6	Imagen145135135a15	134,844	135	0,156	0,116	0,4973	0,5	0,5445
7	Imagen145135135a15	49,893	45	-4,893	-10,873	0,4150	0,5	16,9969
8	Imagen145135135a15	134,608	135	0,392	0,290	0,4932	0,5	1,3683
9	Imagen145135135a15	45,632	45	-0,632	-1,404	0,4890	0,5	2,2059
				0,4372	-0,349	0,4298	0,4444	3,686

Tabla 14

En la tabla 14, se alcanzan desviaciones del 16%, entre valores de matrices teóricas y las medidas. Si se considera el valor teórico real, es decir, valores de 45, 135, 135 y calculamos el valor de a11 con estos valores teóricos se obtiene un valor comparativo mas real, tabla 15.

	Label	Angulo medido	angulo teorico	diferencia	diferencia %	a11_medido
1	Imagen145135135a15	45,112	45	-0,112	-0,249	0,4980
2	Imagen145135135a15	134,429	135	0,571	0,423	0,4900
3	Imagen145135135a15	82,719	90	7,281	8,090	0,0161
4	Imagen145135135a15	133,556	135	1,444	1,070	0,4748
5	Imagen145135135a15	45,272	45	-0,272	-0,604	0,4953
6	Imagen145135135a15	134,844	135	0,156	0,116	0,4973
7	Imagen145135135a15	49,893	45	-4,893	-10,873	0,4150
8	Imagen145135135a15	134,608	135	0,392	0,290	0,4932
9	Imagen145135135a15	45,632	45	-0,632	-1,404	0,4890
				0,4372	-0,349	0,4298
		45				0,5000
		135				0,5000
		135				0,5000
					media	0,5000
					dif.	14,031

Tabla 15

En esta tabla podemos observar que la media de los valores teóricos es de 0,5, frente al valor de 0,43. Ello nos deriva en un valor de desviación del 14 % respecto al teórico de tres medidas. Los valores mas desfasados corresponden a las elipses etiquetadas como 3 y 7, que se corresponden con los valores de desviación del 8 y el 10%. Estos valores de elipse son identificados como las zonas de intersección entre las fibras, figura 35. En estas intersecciones si la segmentación se desvía un poco provocará un valor de orientación de elipse que puede provocar errores elevados.

Si se realiza la eliminación de estos valores distorsionadores de las medias realizadas los promedios de error que alcanzamos es del 0,051% y aplicado el mismo criterio en el valor de la matriz a11 se queda la desviación en un 1,78%, lo que supone una buena disminución de los valores erróneos.

A continuación se realizará otra determinación de errores con una muestra en este caso ya más compleja y con mayor numero de intersecciones. Se calculan intersecciones entre fibras de 45° y 135° pero con tres intersecciones sobre la imagen, figura 36.

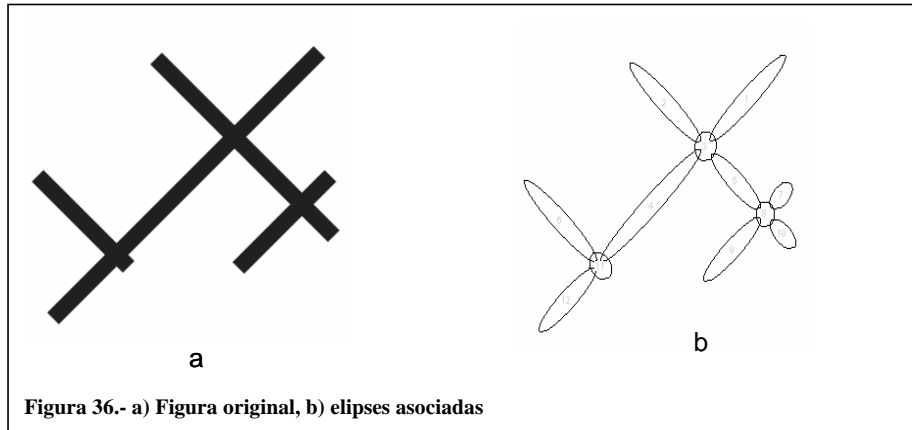


Figura 36.- a) Figura original, b) elipses asociadas

Los resultados obtenidos del análisis de esta imagen se analizan a continuación.

	Label	Angulo medido	angulo teorico	diferencia	diferencia %
1	Imagen14513	134,834	135	0,166	0,123
2	Imagen14513	45,221	45	-0,221	-0,491
3	Imagen14513	96,945	90	-6,945	-7,717
4	Imagen14513	45,194	45	-0,194	-0,431
5	Imagen14513	130,692	135	4,308	3,191
6	Imagen14513	49,542	45	-4,542	-10,093
7	Imagen14513	100,574	90	-10,574	-11,749
8	Imagen14513	132,901	135	2,099	1,555
9	Imagen14513	134,439	135	0,561	0,416
10	Imagen14513	46,211	45	-1,211	-2,691
11	Imagen14513	126,745	135	8,255	6,115
12	Imagen14513	45,494	45	-0,494	-1,098
				-0,733	-1,906

Tabla 16

Las diferencias más elevadas, tabla 16, se encuentran nuevamente en los valores 3, 6, 7 y 11, quedan algo desfasados. Los valores adoptan una desviación media del 1,91%, lo que nos indica una desviación aceptable. Si realizamos el análisis de los valores de la matriz del vector orientación, a11, observamos también resultados interesantes, tabla 17.

Los promedios observados del valor a11 medido alcanzan las cifras de 0,389 incluyendo todos los valores. Si se compara con los valores teóricos, vemos que el valor llega hasta los 0,417. Esto supone una desviación relativa media del 7,64%.

	Label	Angulo medido	angulo teorico	diferencia	diferencia %	a11_medido	a11_teorico	diferencia	diferencia %
1	Imagen14513	134,834	135	0,166	0,123	0,497	0,500	0,003	0,57944607
2	Imagen14513	45,221	45	-0,221	-0,491	0,496	0,500	0,004	0,77142788
3	Imagen14513	96,945	90	-6,945	-7,717	0,015	0,000	-0,015	-3,8963E+32
4	Imagen14513	45,194	45	-0,194	-0,431	0,497	0,500	0,003	0,67718257
5	Imagen14513	130,692	135	4,308	3,191	0,425	0,500	0,075	14,981145
6	Imagen14513	49,542	45	-4,542	-10,093	0,421	0,500	0,079	15,7882323
7	Imagen14513	100,574	90	-10,574	-11,749	0,034	0,000	-0,034	-8,9739E+32
8	Imagen14513	132,901	135	2,099	1,555	0,463	0,500	0,037	7,32033842
9	Imagen14513	134,439	135	0,561	0,416	0,490	0,500	0,010	1,95813426
10	Imagen14513	46,211	45	-1,211	-2,691	0,479	0,500	0,021	4,22592863
11	Imagen14513	126,745	135	8,255	6,115	0,358	0,500	0,142	28,4182686
12	Imagen14513	45,494	45	-0,494	-1,098	0,491	0,500	0,009	1,72429984
				-0,733	-1,906	0,389	0,417		7,644
	valores teoricos		45		0,5 med_modif	0,473			
	valores teoricos		45		0,5				
	valores teoricos		135		0,5				
	valores teoricos		135		0,5				
	media				0,5	22,232	5,336		

Tabla 17

Si lo comparamos respecto a los valores teóricos reales introducidos, se observa que llegamos a un error del 22%. Si por el contrario se realiza un filtrado de los elementos distorsionantes vemos que los errores se quedan en valores del 5,33 %, lo que puede ser un resultado bastante bueno.

Como ultima prueba realizaremos un ensayo sobre una imagen en la que puedan aparecer varias fibras más de distintas longitudes y en la que puedan aparecer distintas orientaciones, figura 37.

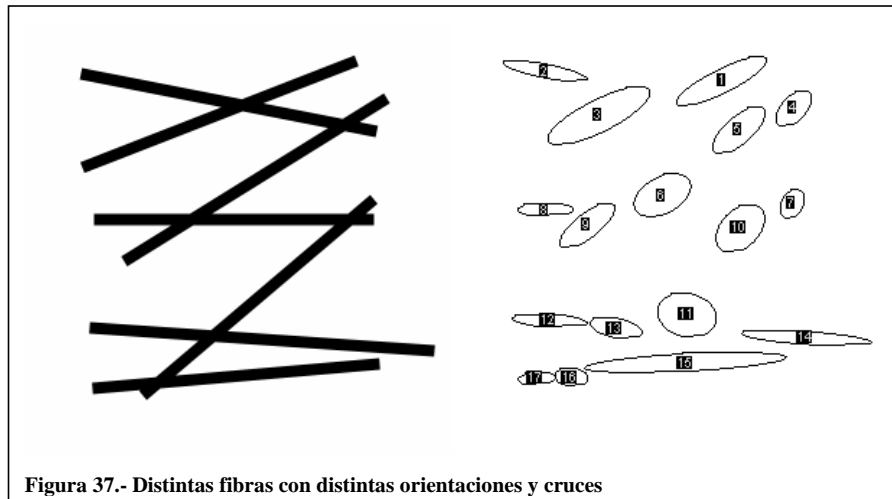


Figura 37.- Distintas fibras con distintas orientaciones y cruces

Los valores teóricos que se han programado para esta fibras son de orientaciones colocadas en cuadrantes 1 y 4º, oscilando entre 0 grados y 40,4 grados. En este caso para complicar más el problema se han aplicado ángulos con un decimal con objeto de ver cual es el comportamiento de la programación.

Los resultados obtenidos se analizan a continuación en la siguiente tabla (19)

	Label	Angulo medido	a11_medida	
1	orpru	26,534	0,800	
2	orpru	168,915	0,963	
3	orpru	26,652	0,799	
4	orpru	46,963	0,466	
5	orpru	41,266	0,565	
6	orpru	28,449	0,773	
7	orpru	60,34	0,245	
8	orpru	0,28	1,000	
9	orpru	37,781	0,625	
10	orpru	45,165	0,497	
11	orpru	167,479	0,953	
12	orpru	176,376	0,996	
13	orpru	167,368	0,952	
14	orpru	176,054	0,995	
15	orpru	2,995	0,997	
16	orpru	175,389	0,994	
17	orpru	4,763	0,993	
		promedio	0,801	

Tabla 18

Al igual que con ejemplos anteriores se han aplicado los cálculos de los valores del elemento a11 de la matriz del vector orientación y al final se ha obtenido el valor promedio de todos los valores a11. EL resultado medido nos muestra una imagen con unas fibras altamente orientadas, valores de 0,8 (dentro del intervalo 0,5-1). Este valor será el valor comparativo con el cálculo teórico de las fibras, tabla 20.

Label	Angulo medido	a11_medida	teoricos		
orpru	26,534	0,800		21,3	0,868
orpru	168,915	0,963		-11	0,964
orpru	26,652	0,799		0	1,000
orpru	46,963	0,466		31,8	0,722
orpru	41,266	0,565		4,9	0,993
orpru	28,449	0,773		-3,8	0,996
orpru	60,34	0,245		40,4	0,580
orpru	0,28	1,000			
orpru	37,781	0,625		media	0,875
orpru	45,165	0,497			
orpru	167,479	0,953		diferencia %	8,439
orpru	176,376	0,996			
orpru	167,368	0,952			
orpru	176,054	0,995			
orpru	2,995	0,997			
orpru	175,389	0,994			
orpru	4,763	0,993			
		promedio	0,801		

Tabla 19

Puede observarse que el promedio teórico del valor del elemento a11 de la matriz es de 0,875, frente al 0,801 del valor medido. Esto nos da una diferencia del 8,4 % que consideraremos como desviación u error de medida, el cual se puede considerar como aceptable.

Frente a estos resultados solo nos queda comprobar estadísticamente si las dos series de datos, tanto teóricos como medidos, se podían comparar. Para ello aplicamos las pruebas de hipótesis de medias⁶⁰. Inicialmente se procede a una comparación de muestras, como se muestra a continuación

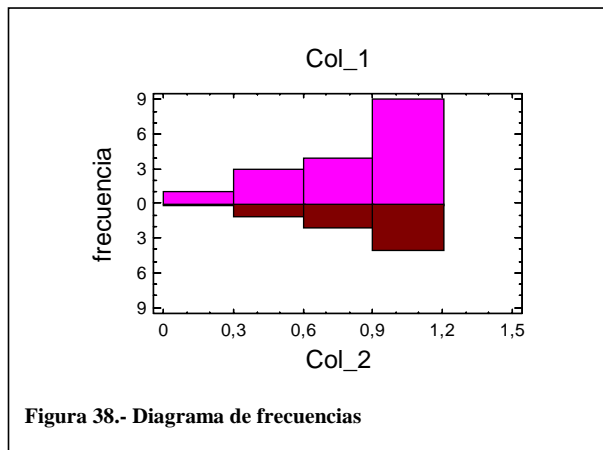
Resumen del Procedimiento

Muestra 1: Col_1.- Muestra medida

Muestra 2: Col_2.- Muestra teórica

Muestra 1: 17 valores 0,245 hasta 1,0

Muestra 2: 7 valores 0,58 hasta 1,0



El programa Statgraphics® calcula varios estadísticos y gráficos para cada muestra, y ejecuta varias pruebas para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos muestras.

El resumen de resultados estadísticos obtenidos es el siguiente

Resumen Estadístico		
	Col_1	Col_2
Frecuencia	17	7
Media	0,800765	0,874714
Varianza	0,0563236	0,0270989
Desviación típica	0,237326	0,164617
Mínimo	0,245	0,58
Máximo	1,0	1,0
Rango	0,755	0,42
Asimetría tipi.	-1,78351	-1,30181
Curtosis típicada	0,0864443	0,107268

Figura 39.- Resultados de la comparación de muestras

Tanto de la muestra col_1 (datos medidos) como de la muestra col_2 (datos teóricos), se pueden observar valores de medias de 0,8 hasta 0,87. A continuación aplicamos las pruebas de hipótesis estadística para una comparación de medias muestrales, obteniendo los siguientes resultados:

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 0,8 y 0,875
Desviaciones Típicas de la Muestra = 0,237 y 0,164
Tamaños de la Muestra = 17 y 7

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -0,075 +/- 0,204443
[-0,279443;0,129443]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
Alternativa: no igual
Estadístico t calculado = -0,760801
p-Valor = 0,454854
No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

El StatAdvisor

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 <> 0,0$

Dada una muestra de 17 observaciones con una media de 0,8 y una desviación típica de 0,237 y una segunda muestra de 7 observaciones con una media de 0,875 y una desviación típica de 0,164, el estadístico t calculado es igual a -0,760801. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, **la hipótesis nula no puede rechazarse** para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -0,279443 y 0,129443.

Si no se asumen las variancias iguales, el resultado obtenido es similar.

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 0,8 y 0,87
Desviaciones Típicas de la Muestra = 0,23 y 0,16
Tamaños de la Muestra = 17 y 7

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -0,07 +/- 0,174267 [-0,244267;0,104267]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
Alternativa: no igual
Estadístico t calculado = -0,850822
p-Valor = 0,407295
No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

El StatAdvisor

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$

Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 17 observaciones con una media de 0,8 y una desviación típica de 0,23 y una segunda muestra de 7 observaciones con una media de 0,87 y una desviación típica de 0,16, el estadístico t calculado es igual a -0,850822. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -0,244267 y 0,104267.

NOTA: en la aplicación de este test, no se han asumido desviaciones típicas iguales para las dos muestras.

Por tanto se asume que las dos muestras pueden compararse y puede asumirse el porcentaje de error calculado.

4.5- Conclusiones parciales

Como conclusiones y resumiendo los valores de ensayos del procedimiento empleado, observamos que existe un pequeño incremento del error, figura 40, a medida que hemos incrementado la complejidad de las imágenes de las fibras.

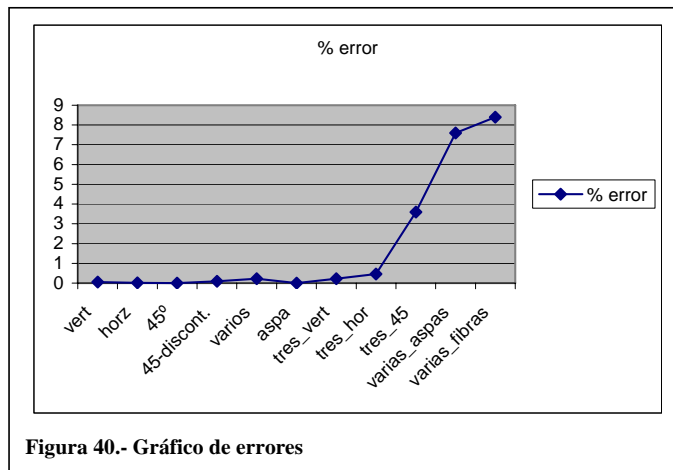


Figura 40.- Gráfico de errores

Mientras se trabajaba con imágenes con las fibras perfectamente definidas, los errores se han mostrado hasta cierto punto despreciables. Cuando han empezado a computarse cruces de fibras es cuando el sistema se ha mostrado un poco más inestable, sobre todo cuando ha tenido que realizarse el cálculo del valor del operador a11 de la matriz del vector orientación. A medida de que han incrementado los cruces se han alcanzado

desviaciones del 8%, lo que puede considerarse un error asumible en la aplicación de los algoritmos incluidos en la macro.

Por lo tanto se considera factible el uso de la macro de algoritmos programada para el cálculo de diversas orientaciones de fibras que se desarrollaran en capítulos posteriores y sobre diversos procesos de transformación de plásticos reforzados con fibra larga de vidrio.

2.5.- Referencias:

- ¹ Vahlund, "fibre orientation, rheological behaviour and simulation of the compression moulding process for composite material". Ph.D. Thesis. 2001.
- ² Wetherhold, Scout. "Prediction of thermoplastic properties in short-fiber composites using image analysis techniques". *Comp. Sci. Tech.* 37. 1990
- ³ McGee, McCulloch, "Characterization of orientation in short fiber composites", *J. Appl. phys.* 55, 1984
- ⁴ Loving, Tucker III, "Automated measurements of fiber orientation in short-fiber composites". Antec, 1985
- ⁵ Russ, J.C. "The image processing handbook". Ed. CRC, Boca Raton, 2002
- ⁶ Kumar, Murthy. "Hough transform for region extraction in color images", 2001
- ⁷ Williams, Victor. "Detección de curvas generales utilizando la transformada rápida de Hough". *Investig. Pensam. Crit.*, 2, 2004.
- ⁸ Gadala-Maria, Parsi. "Measurement of fiber orientation in short fiber-composites using digital imaging processing". *Pol. Comp.* 14. 2. 1993
- ⁹ Yasuda K, Mori N., Nakamura K., "A new visualization technique for short fibers in a slip flow of fibers suspensions". *Int. Jour. Of Engi. Sci.* 40. 2002.
- ¹⁰ Yasuda K, Kyoto 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". *Reol. Acta.* 43, 2004.
- ¹¹ Vahlund, Gebart. "Analysis of and image processing method for fiber orientation in polymer composites". *Pol. Compos.*, 22, 3, 2001
- ¹² Advani, Tucker III. "The use of tensors to describe and predict fibre orientation in short fibre composites",. *Jour. Of Reol.* 31, 1987.
- ¹³ Advani, Sozer. *Process modeling in composites manufacturing.* Marcel Decker ed. 2003.
- ¹⁴ Pertusa, J. *Técnicas de análisis de imagen. Aplicaciones a la biología.* Universitat de Valencia, 2003.
- ¹⁵ Martín, Marcos, *Técnicas Clásicas de segmentación de imagen, Curso de Imagen,* 2004
- ¹⁶ Molina, R. *Introducción al procesamiento y análisis de imágenes digitales. Curso de introducción a la robótica.* U. Granada, 1998
- ¹⁷ Sharif Kumar Naik, C.A. Murthy. Hough transform for region extraction in color images. Proc of 4th conf. on computer vision. Kolkata, India. 2004.
- ¹⁸ Yang, GZ., Gillies DF. The Hough transform. Department of Computing. Computer Vision. Imperial College. UK. 2004.
- ¹⁹ Yang, GZ., Gillies DF. The Hough transform for higher orders. Department of Computing. Computer Vision. Imperial College. UK. 2004
- ²⁰ Malfiza Garcia, Transformada de Hough. *Vision artificial.* Instituto de Computação. Universidad Federal Fluminense do Brasil. 2005
- ²¹ Soler Chica, D. "Extracción De Características Puntuales A Partir De Secuencias De Videos". Tesina final de carrera. ETSI Informática. Universidad de Málaga, 2003.
- ²² Charless Fowlkes, "Affinity Functions for Image Segmentation". *Image Segmentation Graph tutorial.* Universidad de Berkeley. 2004
- ²³ Varas Marinez, Raul. "Extracción de contornos rectos". Universidad Politécnica de Madrid. 2000
- ²⁴ Deriche, R. "Fast algorithms for low-level vision". *IEEE trans. On pattern analysis and machine int.* vol 12, 1990
- ²⁵ Azpiroz, Median, Lerallut. "Segmentación de imágenes". UAM- UTC. 2000.
- ²⁶ Gerardo de la Fraga, Luis. "La Transformada Discreta de Fourier y la Transformada Rápida de Fourier". 2001.
- ²⁷ Ortiz de Solórzano, C., Arrate Muñoz. *Transformada de Fourier. Tratamiento digital de la señal.* Capitulo 6. Tecnum. Universidad de Navarra. 1999
- ²⁸ Pablo Marquez, J. "Fourier analysis and automated measurement of cell and fiber angular orientation distributions". *Int. Jour. Of solids and estruct.* (in press). 2006
- ²⁹ Kim, Han Seong, " Relationship between fiber orientation distribution function and mechanical anisotropy of thermally point-bonded nonwovens". *Fiber and Polymers*, 5, 3, 2004
- ³⁰ Joachim Walter, "FFT filter plugin", NIH, University of Muenchen. 2003.
- ³¹ Toshiharu Enomae, Yoo-Hee Han, Akira Isogai. "Fiber orientation distribution of paper surface calculated by image análisis". *Paper sci. laboratory,* 2004.
- ³² Young I.T., Gerbrands JJ, Van Vliet LJ. "Image processing fundamentals" Dept. Image Science and technology. Delft University of Technology, Netherlands, 2006

- ³³ Andreas E. Savakis. "Adaptative document image thresholding using foreground and backround clustering". Proceedings of int. Conf. On Image Processing ICIP, 1998.
- ³⁴ Yan Solihin, GC. Leedham, "The multi-stage approach to grey-scale image thresholding for specific applications". Citeseer, 2001.
- ³⁵ J.C.Antoranz, J. Castillo, N. Malpica, C. Santa Marta. "El ordenador en el laboratorio: medir con imágenes". Dep. física, matemática y fluidos, Cap. Segmentación. UNED, 2001
- ³⁶ Mehmet Sezgin, Bülent Sankur, "Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation", Jour. Electronic Imaging, 13, 1, 2004
- ³⁷ Ping_sung Liao, T.S. Chen, P.C. Cheng. "A fast algorithm for multilevel thresholding". Jour. Of Information sci. and engine., 17, 2001
- ³⁸ Prasanna Sahoo, G. Arora. "A thresholding method base on two-dimensional Renyi's entropy". Pattern recognition, 37, 2004.
- ³⁹ Andrew K. Wong, P.K. Sahoo. "A gray-level threshold selection method based on maximum entropy principle". IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, 19, July, 1989.
- ⁴⁰ L.Garcia-Perez, M.C. Garcia Alegre, J. Marchant. "Dynamic Threshold selection for image segmentation of natural structures based upon a performance criterion". 3ECPA-3 European Conf. On Precision Agriculture, Montpellier. June, 2001.
- ⁴¹ Neira, J. "Umbralización". Capitulo 1. Visión por Computador. Ingeniería Informática, Univ. Zaragoza, 2006.
- ⁴² Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://rsb.info.nih.gov/ij/>, 1997-2006
- ⁴³ Roerdink J.B.T.M., Meijster, Arnold. "The watershed transform: definitions, algorithms and parallelization strategies", Fundamenta informaticae, 41, 2001.
- ⁴⁴ Najman L, Schmitt, Michel. "Watershed of a continuous function". Signal processing, 38, 1994
- ⁴⁵ Najman L, Schmitt, Michel. "Geodesia saliency of watershed contours and hierarchical segmentation". IEEE transact. On pattern analysis and machine intelligence, 18, 1996
- ⁴⁶ Couprie, M. Najman, Bertrand. "Quasi-linear algorithms for the topological watershed", Computer vision and image understanding, 2005
- ⁴⁷ Najman, Couprie, Bertrand. "Watersheds, extension maps, and the emergence paradigm". Discrete Applied Mathematics, Volume 147, Issues 2-3, 2005.
- ⁴⁸ L. Vincent, P. Soille, "Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, No. 6, 1991.
- ⁴⁹ S. Beucher, F. Meyer, "The morphological approach to segmentation: the watershed transformation", Mathematical Morphology in Image Processing, Chap. 12, Dougherty Ed., Marcel Dekker, 1993.
- ⁵⁰ Bertrand, G. "On topological watersheds", Journal of Mathematical Imaging and Vision, 875, 2004
- ⁵¹ Najman, Couprie, "Watershed algorithms and contrast preservation". DGCI'03, Lecture Note in Computer Sciences, Springer Verlag, Vol. 2886, 2003.
- ⁵² Couprie, M., Bertrand, G.: "Topological grayscale watershed transform.", SPIE Vision Geometry V Proceedings. Volume 3168. 1997
- ⁵³ Bertrand, G. "Some properties of topological greyscale watersheds". In procs. SPIE Vision Geometry XII, volume 5300, 2004
- ⁵⁴ Sage, Daniel. "Watershed methods". Biomedical Imaging Group ,Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, EPFL, CH-1015 Lausanne, Switzerland, 2006.
- ⁵⁵ Alba Castro, J.L. "Descriptores de formas", Universidad de Vigo, 2003
- ⁵⁶ Neira Parra, J. "Imágenes binarias". Ingeniería Informática ,Universidad de Zaragoza, 2004
- ⁵⁷ Sabyasachi Dey, Bhattacharya, Kundu, Achara. "A simple architecture for computing moments and orientation of an image". Fundamenta Informaticae, 52. 2002.
- ⁵⁸ Mohammed S. Laghari, Memon, Khuwaja. "Knowledge based wear particle analysis". Transactions on engineering, computing and technology, v3, 2004.
- ⁵⁹ Landini, G. "Morphological Operators for ImageJ". bham.ac.uk. 2006.
- ⁶⁰ Montgomery. "Diseño y análisis de experimentos". Ed. Limusa wiley, 2ª edición, 2005

CAPÍTULO 5.

**APLICACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO A
MUESTRAS TRANSFORMADAS POR INYECCIÓN**

5.1.- Introducción

Los polímeros reforzados presentan excelentes propiedades en relación con sus niveles de resistencia mecánica, resistencia térmica y comportamiento en servicio. Sin embargo en la actualidad los productos que se pueden encontrar en el mercado alcanzan grandes proporciones de refuerzo, como es el caso del polipropileno y poliamida reforzadas entre el 40 y el 50% de fibra de vidrio. Esto supone de facto un incremento de la concentración de fibras que va a afectar a la orientabilidad de las mismas. Se supone que a altas concentraciones existe una mayor interacción de las fibras entre si, a la vez que interferencias y por lo tanto este aspecto afecta a la orientación. Este aspecto es importante debido a la interacción de la orientación con determinadas propiedades mecánicas¹.

Un histograma puede ser utilizado para describir la distribución de la orientación de fibras en una muestra. Además es posible evaluar mediante un índice el resumen de la distribución de orientación, que describe la dirección mayoritaria de la distribución de orientación. Éste parámetro se denomina como Índice de Hermans². Este parámetro se puede aplicar en el caso de estimar una orientación espacial axisimétrica.

La expresión matemática de este parámetro quedaría definida según el criterio de Thomason³, como sigue

$$f_p = 2\langle \cos^2(\phi) \rangle - 1$$

Por otra parte el criterio empleado por Advani²⁻⁴ en la expresión del Índice de Hermans es como sigue

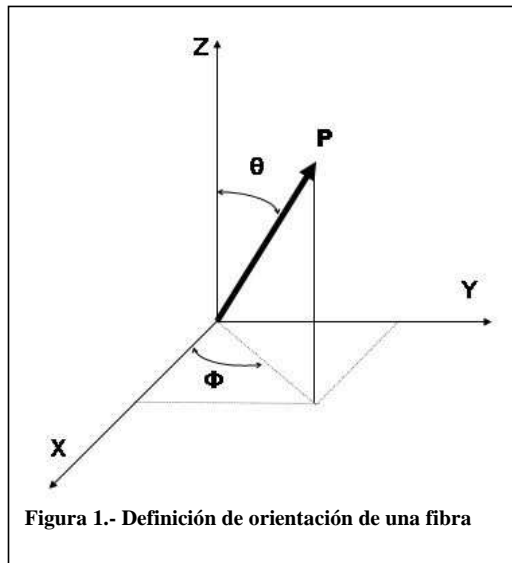
$$f_p = \frac{3\langle \cos^2(\phi) \rangle - 1}{2}$$

Los rangos que expresa el índice oscila entra un valor de 1 a un valor de -1. Según esta expresión se establece que la relación ente el parámetro y la orientación queda definida de la siguiente manera

Fibras alineadas a lo largo del flujo	$f_p = 1$
Distribución al azar	$f_p = 0$
Alineación transversal al flujo	$f_p = -1$

En la parte experimental se procederá a confeccionar una evaluación de la orientación aplicando dicho Índice.

Si se analiza la descripción de la orientación de una fibra simple, diversos autores establecen su referencia con respecto a dos ángulos. Estos ángulos suelen definirse como Φ y θ , figura 1.



Las ecuaciones que describen la orientación de fibra quedarían definidas en función de cada una de las coordenadas del vector P, figura 1.

$$p_1 = \text{sen } \theta \cos \phi$$

$$p_2 = \text{sen } \theta \text{sen } \phi$$

$$p_3 = \cos \theta$$

donde los valores de **P**, 1,2 y 3 se definen como componentes cartesianas. Los intervalos en los que pueden oscilar los valores de los ángulos son:

$$0 \leq \theta \leq \pi$$

$$0 \leq \phi \leq 2\pi$$

En algunas ocasiones las fibras son largas y delgadas lo que las obliga a definirse en un plano. A este caso se le suele denominar como orientación bidimensional u orientación planar.

Otra manera de describir el estado de orientación de las fibras es a través de la función de distribución de orientación (FOD)⁵. Una combinación de la descripción de la función de distribución de orientación y la naturaleza concisa de los parámetros de orientación es la descripción del tensor orientación.

Un enunciado del mismo puede alcanzarse por medio de la definición del tensor orientación de segundo orden

$$a_{ij} \equiv \langle p_i p_j \rangle$$

Lafranche⁶ lo expresa de la siguiente manera

$$a_{ij} = \int p_i p_j \psi(p, t) \partial p$$

Los componentes de este tensor de orientación para un grupo de n fibras pueden calcularse como sigue, según Eberhardt⁷

$$a_{ij} = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n p_i^k p_j^k \right) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

y cada uno de los seis componentes de cada fibra definida se expresaría como sigue:

$$\begin{aligned} a_{11}^k &= \text{sen}^2 \theta^k \cos^2 \phi^k \\ a_{22}^k &= \cos^2 \theta^k \cos^2 \phi^k \\ a_{33}^k &= \cos^2 \theta^k \\ a_{12}^k &= a_{21}^k = \text{sen}^2 \theta^k \cos \phi^2 \text{sen} \phi^k \\ a_{13}^k &= a_{31}^k = \text{sen} \theta^k \cos \theta^k \cos \phi^k \\ a_{23}^k &= a_{32}^k = \text{sen} \theta^k \cos \theta^k \text{sen} \phi^k \end{aligned}$$

Este tensor de segundo orden caracteriza el estado de orientación con respecto a la dirección del flujo, como dirección de referencia, de manera que

- $a_{11} < 0,35$ se considera perpendicular a la dirección de flujo
- $a_{11} > 0,7$ se considera orientación paralela al flujo
- $0,5 < a_{11} < 0,6$ se considera una orientación aleatoria

Para la determinación de una orientación en un plano y aplicando las propiedades conmutativas antes expuestas encontramos que el tensor orientación a_{ij} se compone de cuatro términos. Cuando el término a_{11} es igual a 1 todas las fibras están alineadas a lo largo de un eje. Cuando los elementos a_{11} y a_{22} son iguales a 0,5 se considera que esta alineadas de forma aleatoria.

Advani y Toker⁸ también han definido el tensor de orientación de cuarto orden de la siguiente manera

$$a_{ijkl} = \langle p_i p_j p_k p_l \rangle$$

o bien

$$a_{ijkl} = \int p_i p_j p_k p_l \psi dA$$

donde ψ se define como la función de densidad de probabilidad de orientación y S representa la esfera unidad.

Nuestro cálculo de orientación de fibras se realizará mediante la aplicación de las formulaciones descritas por Yasuda⁹⁻¹⁰ para un flujo concentrado con fibras en suspensión y que además son fibras transparentes. Inicialmente clasifica el tipo de suspensión con el que podemos encontrarnos según

$nL^3 < 1$	Suspensión diluida
$1 < nL^3 < \frac{L}{D}$	Suspensión semidiluida
$\frac{L}{D} < nL^3$	Suspensión concentrada

donde D es el diámetro de las fibras, L es la longitud y n es la densidad de fibras. Los valores del tensor orientación de segundo orden se calculan mediante la expresión

$$a_{11} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n \text{ y el valor del término } a_{12} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{sen} \theta_n \cos \theta_n$$

en el resto de los términos se aplica que $a_{11} + a_{22} = 1$ y $a_{12} = a_{21}$.

El ángulo preferido por las fibras puede calcularse mediante la aplicación de la expresión

$$\tan 2\alpha = \frac{2a_{12}}{a_{11} - a_{22}}$$

Estas expresiones se calcularan para cada una de las muestras estudiadas.

5.2.- Procedimiento operatorio

Como se ha expuesto anteriormente para realizar una evaluación de la orientación de fibras se ha elaborado un procedimiento de actuación. Este procedimiento, de forma completa, puede observarse en la figura 2. En el pueden advertir cuatro etapas claramente diferenciadas que pasaremos a explicar con detalle más adelante. La primera etapa es la que denominaremos como obtención de las muestras. En esta etapa se aportan determinados valores de variables sobre las que posteriormente obtendremos las muestras.

En la segunda etapa se procede a la preparación de la muestra, de manera que pueda ser manipulada de manera estándar y que no presente problemas posteriormente.

La tercera etapa es la fase de proceso de imágenes. En esta etapa se procede a la captura de imágenes, en la que se elegirán los aumentos sobre los que se va a trabajar. A continuación se trabaja en la depuración de la imagen, la aplicación de filtros y finalmente la sectorización de la imagen y la medición de las fibras.

Como etapa final del procedimiento se trabaja sobre los datos obtenidos en la etapa anterior, aplicándose un tratamiento estadístico que posibilite la interpretación, modelización y normalización de los mismos.

A continuación se procede a la exposición de cada una de las etapas en las que se puede subdividir el procedimiento.

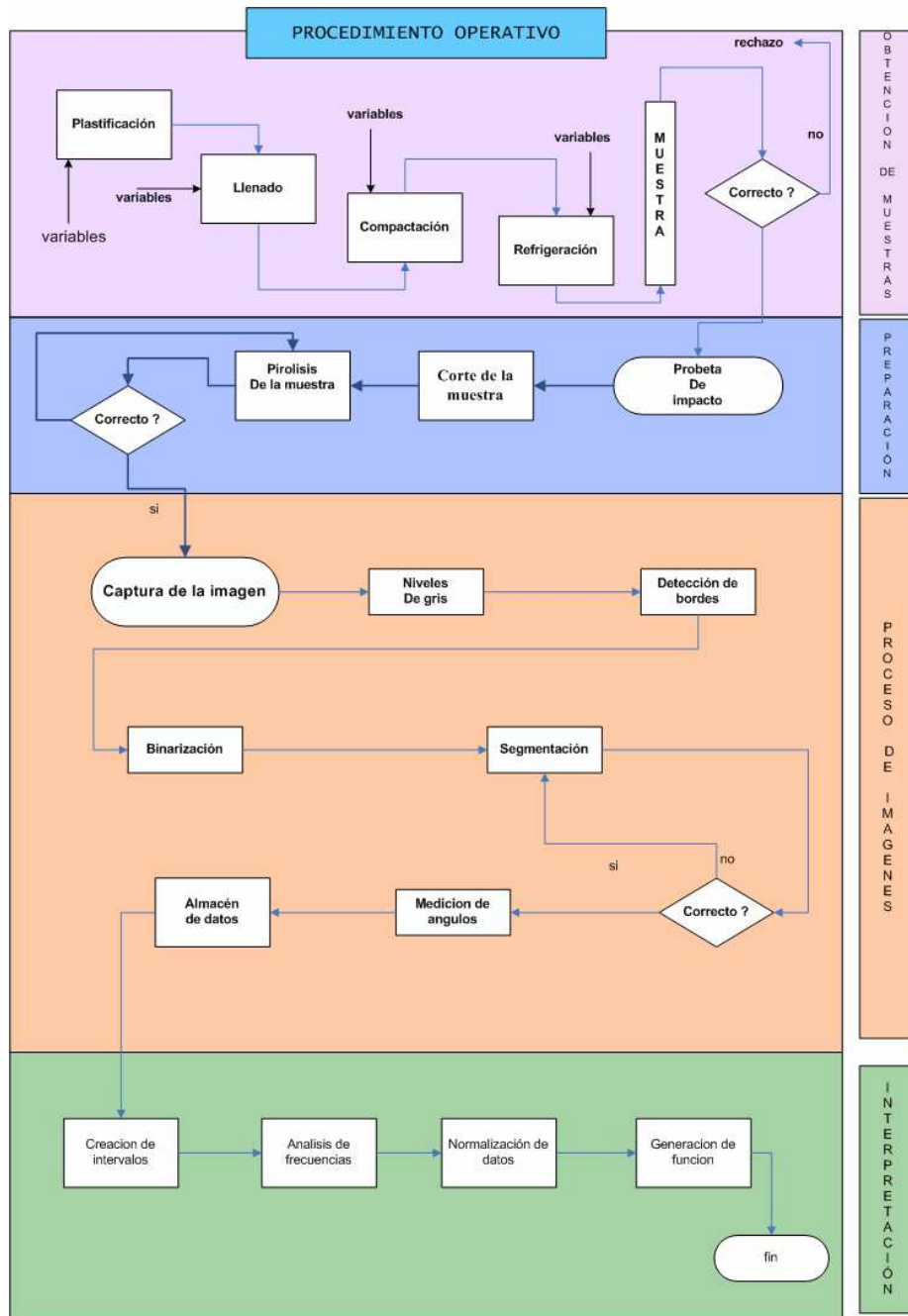


Figura 2.- Procedimiento de actuación

5.2.1.- Obtención de muestras

El primer paso del procedimiento operativo será la obtención de las muestras mediante la programación de los parámetros de la máquina de inyección.

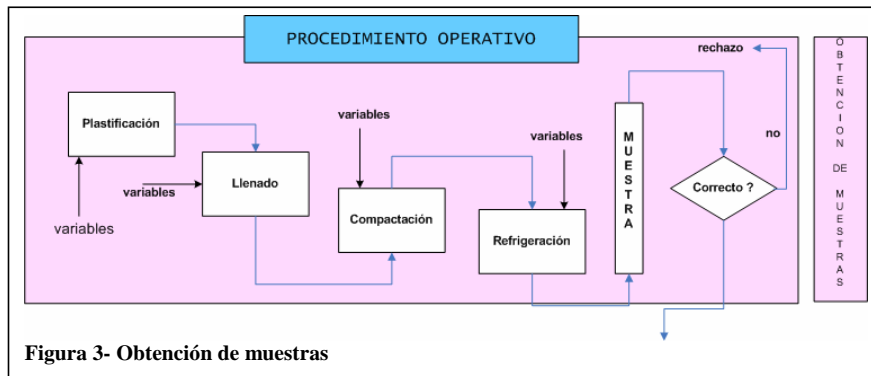


Figura 3- Obtención de muestras

Como puede observarse en la figura 3 existen cuatro etapas dentro del proceso de inyección dentro de los cuales hay que programar una serie de variables que pueden tener una serie de influencias en la pieza final. Según algunos autores¹¹ las variables de proceso pueden ser clasificadas como variables de entrada, variables de estado de proceso y variables de salida. En las variables de proceso de entrada se manejan datos que entran en el sistema pero que cambian independientemente. Pueden ser clasificadas como variables de máquina y variables externas. Por ejemplo, velocidad de rotación de husillo o velocidad de inyección pueden ser consideradas como variables de máquina que son programadas por el operador. La variación de la viscosidad del material dentro del husillo puede ser considerada como una variable que no está controlada por el operador. Se podría considerar como una perturbación externa mientras no pueda ser controlada durante la operación.

En las variables de estado de proceso se podrían considerar aquellas características del polímero que pueden ser función del tiempo. Por ejemplo la temperatura de fundido en el interior del molde se puede considerar función de la temperatura de fundido y de la velocidad de enfriamiento. La velocidad de llenado se podría considerar como otra variable de estado de proceso. Estas variables son extremadamente importantes por estar íntimamente relacionadas con las características finales de la pieza.

Como variables de salida se consideran las características físicas y químicas de la pieza moldeada. Estas propiedades dependen estrechamente de las variables de entrada y de las variables de estado de proceso. Dentro de la gama de estas variables podemos encontrar el peso, tolerancia dimensional, estructura molecular, acabado superficial y aquellas características que podrían definir la calidad de acabado final de la pieza moldeada. Por desgracia estas propiedades son difícilmente controlables durante el proceso de transformación.

Por lo anteriormente expuesto Kazmer¹² basándose en las premisas de Ma, establece un análisis que permita predecir la calidad final de la pieza moldeada. Esta teoría se basa en cumplir con una serie de buenas prácticas. Desafortunadamente esta teoría hay que

aplicarla entendiendo estadísticas, simulaciones numéricas, inyección, técnicas de optimización y diseño de metodologías. Esto nos daría idea de lo complejo que puede convertirse el proceso de transformación y la sensibilidad que puede tener una variable en el acabado final de la pieza. Una solución la manifiesta Reilly¹³ relacionando las distintas etapas del proceso de inyección, las variables de entrada y de proceso que intervienen en cada etapa y finalmente asignan una serie de variables de salida que se corresponden con las características de calidad que se quiere alcanzar. Dentro de esta clasificación existe una relación entre etapa, variable y característica sobre la que existe una influencia de calidad final.

La clasificación que realiza considera que existen una serie de variables de entrada como pueden ser la temperatura de cilindro, revoluciones de husillo, contrapresión que entrarían en juego en la etapa de plastificación. Como variables de estado en esta etapa aparecen la calidad de fundido y el tiempo de residencia que a su vez pueden afectar sobre una serie de atributos de calidad como pueden ser la integridad y la apariencia. Sobre la etapa de inyección actúan las variables de entrada como serían el perfil de velocidad de inyección, máxima presión de inyección. Como variables de estado encontraríamos la presión de inyección, temperatura de fundido y volumen de fundido. Tras la inyección o llenado las variables de estado que encontramos serían la velocidad de frente de flujo y desarrollo de la capa fría, que afecta a la orientación de fibras. Todas estas variables provocan unos atributos de calidad como podrían ser ráfagas y resistencia.

Tras el llenado hallaríamos la compactación. En las variables de entrada se situarían el perfil de compactación y el tiempo de compactación. Como variables de estado que alimentan a esta etapa descubriríamos la viscosidad de fundido, la velocidad de avance de flujo y la presión. Como variables de estado después de esta etapa estarían la fuerza de cierre y nuevamente la evolución de la capa fría. Los atributos de calidad que se encuentran en la fase compactación serían las tensiones residuales y el peso de la pieza.

Cuando alcanzamos la etapa de refrigeración descubrimos que las variables de entrada serían la temperatura del refrigerante del molde y el tiempo de enfriamiento. Como variables de estado nos encontramos con presión, temperatura y densidad de la masa fundida en la cavidad y como variables de estado de salida en la etapa de refrigeración serían el tiempo de ciclo, el desarrollo de la capa fría. Estas variables nos influenciarán en la etapa final de las variables de calidad como pueden ser los aspectos económicos derivados del tiempo de ciclo o bien en las dimensiones finales de la pieza, derivado de la evolución de la capa fría. Las variables de estado que aparecen en la salida de la etapa de refrigeración estarían la temperatura, tensión y deformación de la pieza. La última etapa que atiende Reilly es la etapa de expulsión en la que aparecen las variables de entrada de máquina como la presión de la expulsión y la velocidad de expulsión de la pieza. Las variables de estado que hemos visto son las de temperatura, tensión y deformación que también actuarían como variables de estado en la entrada de la etapa de expulsión. Como variables de salida tendríamos la relajación y la expulsión propia de la pieza. Las variables de calidad que se verían afectadas por esta etapa figuran la distorsión de la pieza y el fallo de molde.

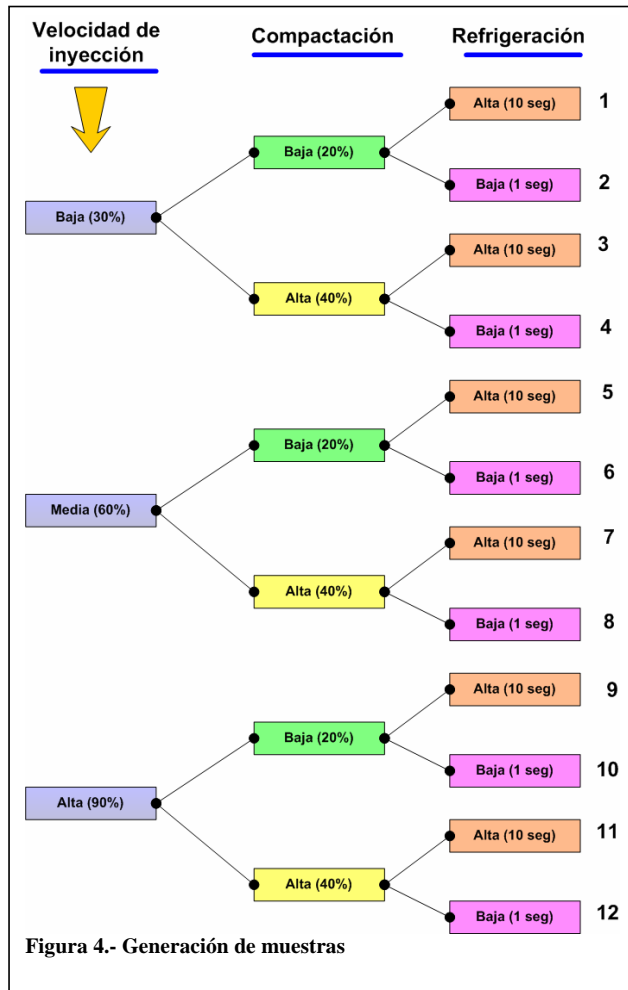
Esta interpretación del proceso de inyección y de las variables que intervienen a lo largo del proceso se podría considerar como el más completo. Ahora bien, Barbosa y Kenny¹⁴ abordan el proceso de una manera más simplificada. El objetivo también, es el encontrar una relación entre las variables de proceso y las características finales de la pieza

inyectada. La propiedad que finalmente nos podrá interesar en nuestro trabajo es el de la orientación final de las fibras de refuerzo. Barbosa¹⁴ propone un diagrama de flujo en el que consideran, ya no las etapas que hemos estado viendo anteriormente, sino determinados elementos que intervienen en el proceso. Estos elementos son el material, el flujo o fundido, la inyección, el molde y finalmente se alcanza la pieza. La interpretación que se le da está relacionada con las variables que afectan a cada uno de los elementos que intervienen en forma global en el proceso. Por ello establece que en el material las variables que tienen influencia son la concentración de la mezcla. Por tratarse de mezcla de material con fibra de vidrio podría establecerse como el porcentaje de fibra de vidrio que posee el material. El siguiente elemento es el flujo de material fundido al que le asocia las siguientes variables de temperatura de cilindro, contrapresión y velocidad de rotación de husillo. En el siguiente elemento, considerado como el del propio proceso (inyección) las variables asociadas son las del punto swichover o punto de cambio, velocidad de inyección y la presión de inyección. El siguiente elemento es el molde. Para el molde Barbosa asocia las variables de temperatura de molde, punto de inyección (situación en la pieza), presión de compactación y tiempo de compactación. Todas estas variables programadas nos permiten alcanzar la pieza final en la que las características de calidad que se consideran serían la contracción, propiedades mecánicas, orientación de fibras, longitud de las mismas, cristalinidad y adhesión. Estas relaciones son las que posteriormente aplica en el diseño de experimentos (método Taguchi y ffe). Es interesante el empleo que efectúa del diseño de experimentos y del diseño factorial fraccional (ffe). Finalmente establece una serie de etapas para el diseño en las que podemos encontrar como primer paso la selección y evaluación de factores y/o iteraciones. Como segundo paso encontraríamos la selección del número de niveles a evaluar. La tercera etapa sería la selección del nivel apropiado o matriz de ensayo. A continuación se asignaría los factores a sus respectivas columnas. El paso número cinco sería la realización de ensayos, seguido del análisis de resultados para finalmente confirmar la fase experimental.

En los ensayos que realiza Barbosa hay que señalar que realizar una cuadrícula de la pieza con objeto de establecer una clasificación por zonas de la pieza y tenerlo en cuenta en el momento de interpretar los resultados.

Dave y Chundrury¹⁵ es tal vez el que más simplifica las variables que entran en juego de manera que solo tiene en cuenta la temperatura de cilindro, temperatura de molde, temperatura de enfriamiento, contrapresión, velocidad de inyección, velocidad de rotación de husillo y la presión de compactación. Aplica también un análisis de experimentos que en este caso y relaciona estas variables de proceso con unas características mecánicas finales. En ellas no observamos que se tenga en cuenta la orientación de las fibras, aunque sí tiene en cuenta las tensiones de deformación e impacto, módulos de flexión, contracción e impacto. Por ello se atenderá más al modelo propuesto por Barbosa-Kenny¹⁴ y completando en caso necesario el modelo con el modelo expuesto por Reilly¹³. Se tendrán en cuenta cada una de las etapas de plastificación, llenado, compactación y enfriamiento en el momento de la confección de la muestra y además las variables que intervienen en cada una de estas etapas, tal y como se ha expuesto en la figura 3, obtención de muestras.

La secuencia de fabricación aplicando el diseño de experimentos quedaría expresado en una total de doce muestras, figura 4, trabajando con combinaciones de velocidad de inyección. La velocidad se considerará baja, media y alta.



El segundo nivel de muestreo será la variable de compactación que será baja (20%) y alta (40%). El tercer nivel de muestreo será el tiempo de enfriamiento, estipulado en tiempo alto (10 seg) y bajo (1 seg).

La introducción de datos se realiza en el programa de gestión estadística, figura 5, con objeto de poder realizar el análisis de los mismos. Se han realizado pruebas con el uso del programa Design Express™ y el paquete Statgraphics™.

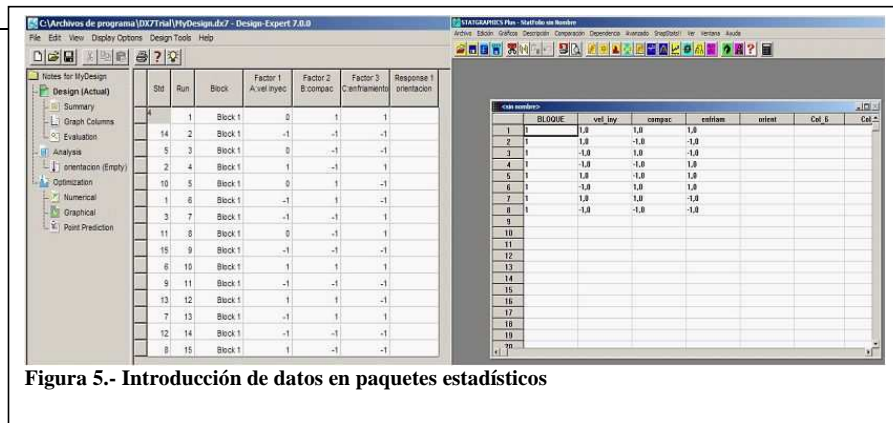


Figura 5.- Introducción de datos en paquetes estadísticos

El paquete Statgraphics no nos permite realizar una introducción de tres factores en el elemento de la velocidad de inyección, mientras que con el paquete Design Express si que nos lo permite.

5.2.2.- Preparación.

Una vez obtenidas las muestras mediante el moldeo por inyección se procede a un tratamiento de la muestra con objeto de poder visualizar correctamente las orientaciones de fibras que tendrán que estudiarse posteriormente.

Hemos visto en la figura 6 que las muestras obtenidas son una muestra de probeta de impacto y otra muestra de probeta de tracción. En el procedimiento actual, figura 8 tomaremos inicialmente la probeta de impacto teniendo la posibilidad de recortar la muestra a la mitad de su longitud e insertarla en el útil, diseñado específicamente para su siguiente función.

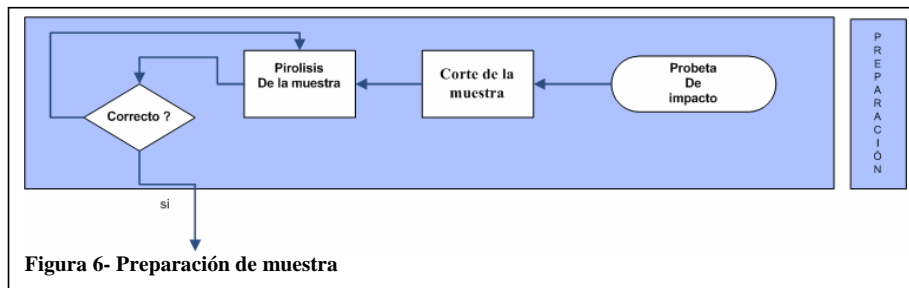
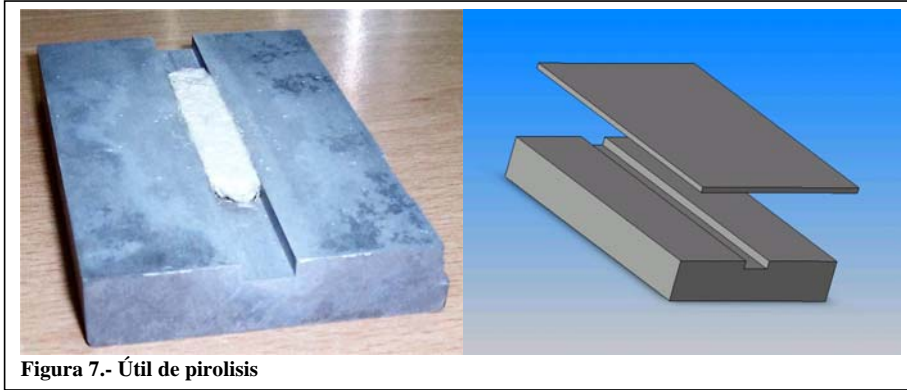


Figura 6- Preparación de muestra

En la figura 7 se puede observar el útil con la muestra de la media probeta de impacto una vez realizada la pirolisis de la misma en una mufla a 500°C, durante 30 minutos. La tapa superior nos permite el control de deformación de la muestra en el momento del quemado. Sin la tapa superior, la expansión de la muestra durante el estufado provocaría

deformaciones elevadas de la misma e incluso una pérdida total de la orientación de sus fibras, lo cual no nos permitiría el posterior tratamiento, captura y análisis de la muestra.



En la imagen 8 podemos observar las diferencia de captura de imagen sin que haya existido pirolisis de la muestra y a la derecha la misma muestra capturada después de la pirolisis de la muestra.



En la imagen sin pirolisis se observa que la parte visual es solo la del acabado superficial del molde, impidiendo la matriz que pueda alcanzarse la figura de la orientación de las fibras.

En la imagen de la derecha, figura 8, por el contrario puede observarse la disposición de las fibras largas de vidrio una vez completada la pirolisis en la que ha desaparecido la masa del polímero dejando únicamente la estructura de la fibra. En este caso se aprovecha la capacidad que muestra el material durante el proceso de transformación según el cual se genera un esqueleto que se mantiene intacto aunque exista una pirolisis posterior de la pieza¹⁶.

5.2.3.- Procesado de imágenes

Una vez quemada la muestra, nos encontraríamos en disposición de realizar la captura de imagen de la muestra a la que se quiere analizar, tal y como se observa en la figura 9. La cámara de video esta acoplada a la lupa de manera que se puede controlar la iluminación y hacer llegar la mayor cantidad de información al ordenador de una manera sencilla. La imagen se digitaliza automáticamente y se ha almacenado de manera digital.

Se continúa con un procesado de la imagen. Este procesado se inicia con una transformación de color a escala de grises¹⁷. Esto se ha efectuado así deliberadamente porque los elementos de nuestro interés se pueden distinguir más fácilmente.

Otro aspecto relevante es la resolución espacial. Podemos definirla como el número de píxeles que podemos incluir por unidad de longitud¹⁷. En el caso de la resolución no existe un estándar, sino que su valor viene limitado por el mismo sistema. El efecto que se detecta con la disminución de la resolución es la indefinición de contornos de la imagen. Por lo tanto es conveniente digitalizar una imagen por encima de los 75 píxel/cm. Resulta evidente que a mayor resolución se obtendrá una mayor matriz de datos. El tamaño de la imagen no depende de la resolución sino que es una característica del sistema de digitalización que utilizemos.

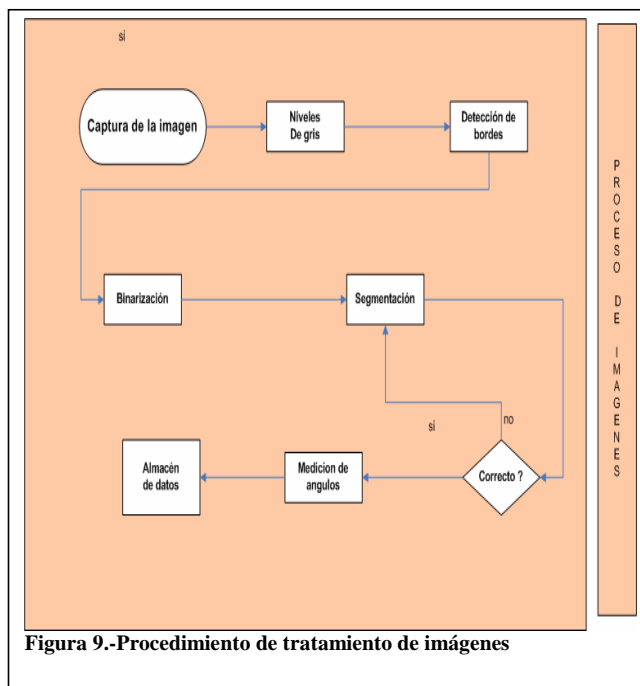


Figura 9.-Procedimiento de tratamiento de imágenes

Una vez realizado la transformación a escala de grises se aplica el procedimiento optimizado expuesto en el capítulo anterior. Realizamos la detección de bordes y posteriormente la binarización de la imagen.

Para cada muestra se ha realizado una captura múltiple de imágenes, figura 10, que serán analizadas y estudiadas independientemente. Posteriormente se elaborará una media de resultados de valores de orientación.

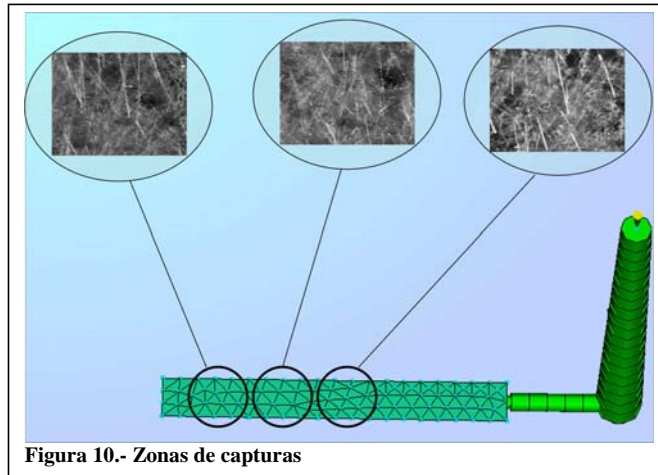


Figura 10.- Zonas de capturas

Los valores que serán comparativos son el valor de fp y el valor del elemento a_{11} de la matriz del tensor orientación.

5.2.4.- Interpretación de datos.

La siguiente etapa que se debe atender es la manipulación y ordenación de los resultados de las medidas efectuadas en cada imagen, figura 11. La primera acción que se realiza es la agrupación de datos en intervalos.

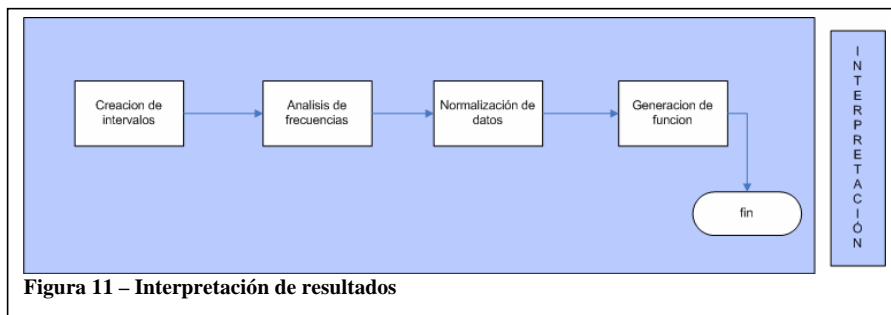


Figura 11 – Interpretación de resultados

Vahlund y Gebart¹⁸ establecen para sus estudios de orientaciones unos intervalos que abarcan entre los -90° y los 90° . En esta amplitud subdividen a su vez los intervalos en -36° , 0° , $+36^\circ$ hasta alcanzar los 90° del final de la amplitud de medición. Sirkis, Cheng, Disgusta y Pandelidis¹⁹ simplemente establece un intervalo global de 0 a 180° , para reflejar la evolución de la orientación de fibras, sin llegar en ningún momento a

reagrupar en intervalos intermedios otras lecturas de orientación. Únicamente en la implementación posterior de un algoritmo de cálculo tiene en cuenta las distintas orientaciones agrupándolas en horizontal, vertical y oblicua.

Por su parte Yang y Chin²⁰ plantean la distribución de frecuencias en sus mediciones en un intervalo inicial de 0° a 90°. Partiendo de 0° establecen periodos de 10° hasta alcanzar los 90° y a continuación analizan la frecuencia de mediciones en cada uno de los intervalos. Creasy y Kang²¹ también utilizan el mismo sistema de clasificación de orientaciones y frecuencias de distribución, centrando sus resultados en tres intervalos de 0°, 45° y 90°. Sin embargo Sanomura²² es el que establece un rango de intervalos mas pormenorizado, ya que su rango alcanza entre los -90° y los 90°, creando subintervalos de -60,-30,0 30 y 60 y agrupando en ellos las lecturas y computando las frecuencias encontradas en cada medición.

En nuestro caso nos inclinaremos más por la metodología de Vahlund para derivar en caso necesario al criterio de Sanomura. Por lo tanto se establecerán en principio rangos de -90 a 90°, con intervalos de 0 y +36,-36°. En caso de alcanza r elevadas frecuencias se pueden subdividir según el criterio de Sanomura y pasar a pormenorizar mas el numero de intervalos y sus frecuencias.

5.3.- Análisis de Resultados parciales

Tras la aplicación del diseño de experimentos hemos analizado un total de 12 muestras con diferentes parámetros de transformación, considerando la temperatura de fundido y la temperatura de molde constante. En cada lote se han tomado varias fotografías.

- Muestra 1

En esta primera muestra se han considerado unas velocidades de inyección baja (30%), con una compactación baja (20%) y un tiempo de refrigeración alta (10 segundos), el resto de parámetros se consideraran constantes en todas las muestras.

La primera imagen más cercana al punto de entrada nos muestra la siguiente distribución de frecuencias, figura 12. La dirección predominante se encuentra en dirección favorable al flujo.

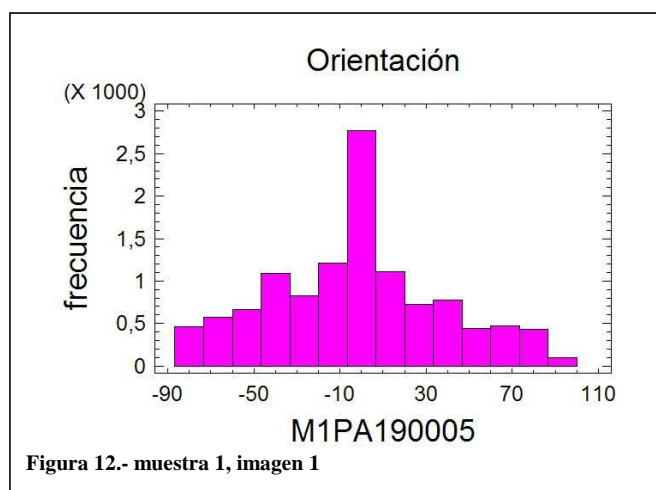
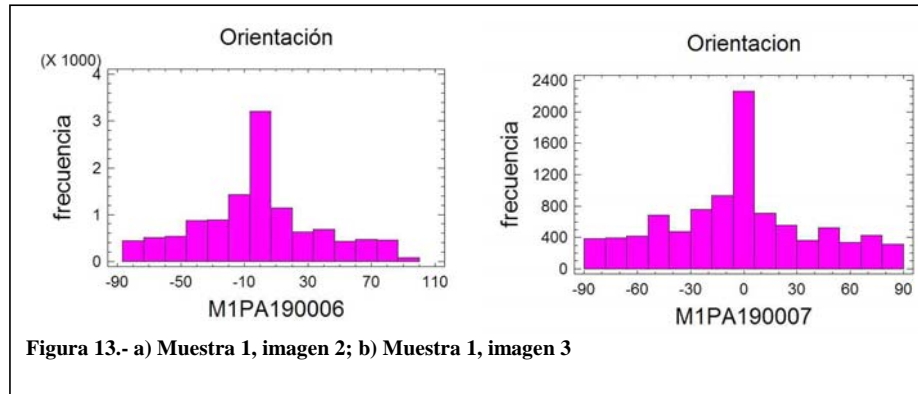
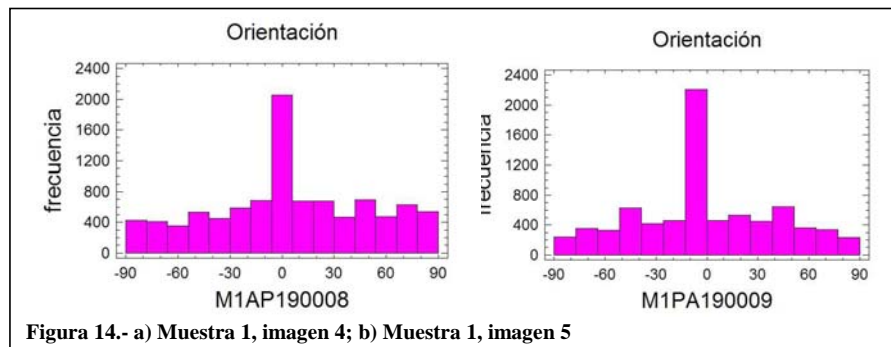


Figura 12.- muestra 1, imagen 1

La segunda y tercera imagen situada al lado de la primera nos muestra la siguiente distribución de frecuencias, figura 13. La dirección predominante se encuentra en dirección favorable al flujo.



La cuarta y quinta imagen situada al lado de las anteriores nos muestra la siguiente distribución de frecuencias, figura 14. La dirección predominante se encuentra nuevamente en dirección favorable al flujo.



Los valores numéricos obtenidos mediante la aplicación del criterio de Yamamura han sido los siguientes:

	<i>fp</i>	<i>a11</i>
m-1	0,4678	0,6452
m-2	0,5103	0,6735
m-3	0,4674	0,6449
m-4	0,3824	0,5882
m-5	0,4352	0,6234

Tabla 1.- Resultados muestra 1

La conclusión que se observa en los resultados es que a medida que nos alejamos del punto de entrada los valores disminuyen o tienen una tendencia a disminuir. Gráficamente lo podemos observar en la grafica de la figura 15.

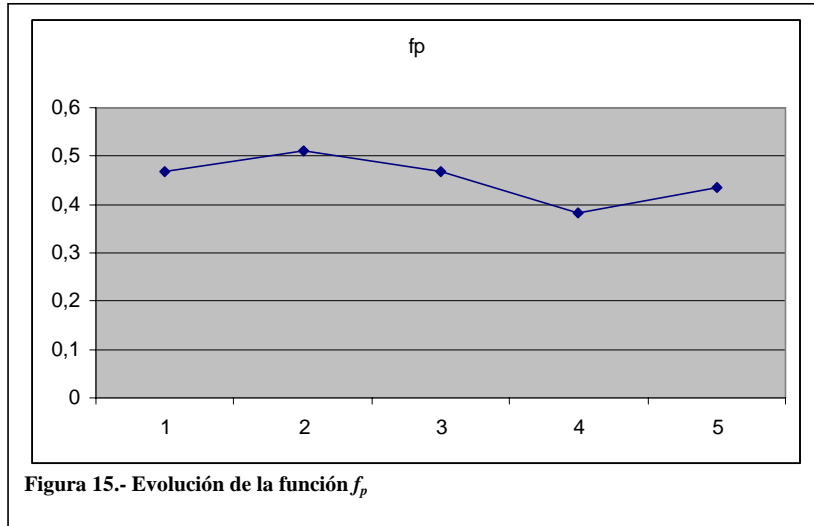


Figura 15.- Evolución de la función f_p

El criterio de interpretación de la función de Hermans⁴ lo expresa de nuevo Gedde. Esta interpretación establece orientaciones principales según se expone:

- Fibras alineadas a lo largo del flujo $f_p = 1$
- Distribución al azar $f_p = 0$
- Alineación transversal al flujo $f_p = -0,5$

Los resultados de los análisis de las imágenes nos indica, figura 15, que la orientación de fibras se vuelve más aleatoria a medida que nos alejamos del punto de entrada.

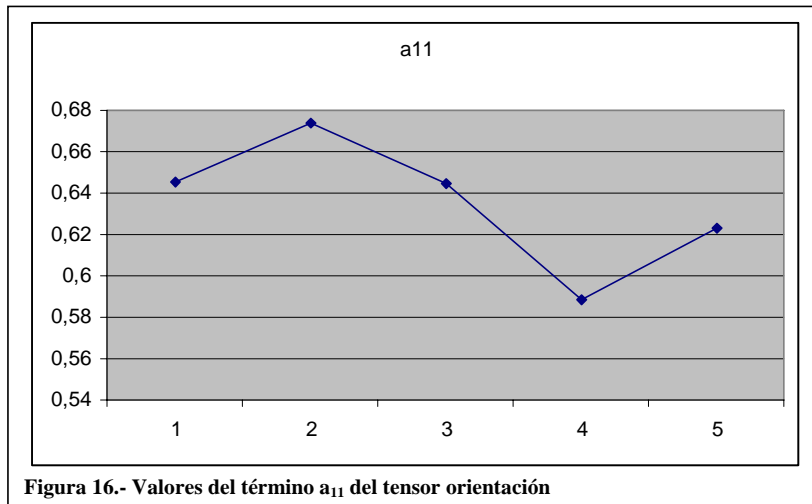


Figura 16.- Valores del término a_{11} del tensor orientación

Los valores observados en la interpretación de datos del coeficiente a_{11} del tensor orientación nos indica la misma tendencia, figura 16.

Nos quedará únicamente realizar la comprobación de comparabilidad de datos obtenidos en cada una de las capturas de las imágenes. Para ello realizaremos un ensayo de Hipótesis nula²³.

Inicialmente comparamos las imágenes de 005 y 006 obteniendo los siguientes estadísticos:

Resumen Estadístico

	M1PA190005	M1PA190006
Frecuencia	12136	12229
Media	81,5216	81,7071
Varianza	3910,43	4193,98
Desviación típica	62,5334	64,761
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	2,58324	3,52007
Curtosis típificada	-33,8896	-34,9446

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 81,52 y 81,7071
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 62,53 y 64,76
 Tamaños de la Muestra = 12136 y 12229

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -0,1871 +/- 1,59867 [-1,78577;1,41157]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -0,229384
 p-Valor = 0,818566
 No rechazar la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0,0$

Dada una muestra de 12136 observaciones con una media de 81,52 y una desviación típica de 62,53 y una segunda muestra de 12229 observaciones con una media de 81,7071 y una desviación típica de 64,76, el estadístico t calculado es igual a -0,229384.

Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -1,78577 y 1,41157.

En cuanto a la comparación de muestras 005 y 007 se obtienen los siguientes resultados

Resumen Estadístico

	M1PA190005	M1PA190007
Frecuencia	12136	9849
Media	81,5216	82,339
Varianza	3910,43	3973,56
Desviación típica	62,5334	63,0362
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	2,58324	1,87954
Curtosis típicada	-33,8896	-30,347

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 81,52 y 82,34
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 62,53 y 63,04
 Tamaños de la Muestra = 100 y 100

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -0,82 +/- 17,51 [-18,33;16,69]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -0,0923505
 p-Valor = 0,926513
 No rechazar la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 <> 0,0$

Dada una muestra de 100 observaciones con una media de 81,52 y una desviación típica de 62,53 y una segunda muestra de 100 observaciones con una media de 82,34 y una desviación típica de 63,04, el estadístico t calculado es igual a -0,0923505. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula se rechaza para el

95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -18,33 y 16,69.

Para las muestras 005 y 008 obtenemos lo resultados similares a los anteriores

Resumen Estadístico

	M1PA190005	M1PA190008
Frecuencia	12136	10057
Media	81,5216	76,0664
Varianza	3910,43	3428,45
Desviación típica	62,5334	58,553
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	2,58324	9,37851
Curtosis típicada	-33,8896	-25,9254

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 81,52 y 76,07
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 62,53 y 58,55
 Tamaños de la Muestra = 12136 y 10057

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 5,45 +/- 1,59596 [3,85404;7,04596]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 6,69304
 p-Valor = 2,1978E-11
 Rechazar la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0,0$

Dada una muestra de 12136 observaciones con una media de 81,52 y una desviación típica de 62,53 y una segunda muestra de 10057 observaciones con una media de 76,07 y una desviación típica de 58,55, el estadístico t calculado es igual a 6,69304. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula se rechaza para el 95,0%

de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre 3,85404 y 7,04596.

La 005 y 009 presenta los siguientes resultados

Resumen Estadístico

	M1PA190005	M1PA190009
Frecuencia	12136	8159
Media	81,5216	69,4165
Varianza	3910,43	3523,65
Desviación típica	62,5334	59,3604
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	2,58324	11,165
Curtosis típicada	-33,8896	-24,3048

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 81,52 y 69,41
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 62,5 y 59,36
 Tamaños de la Muestra = 12136 y 8159

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 12,11 +/- 1,70161 [10,4084;13,8116]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 13,9487
 p-Valor = 0,0
 Rechazar la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 12136 observaciones con una media de 81,52 y una desviación típica de 62,5 y una segunda muestra de 8159 observaciones con una media de 69,41 y una desviación típica de 59,36, el estadístico t calculado es igual a 13,9487. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre 10,4084 y 13,8116.

La media global de todos los valores para la muestra 1 quedaría definida como la media geométrica de los valores que si puedan ser comparables. Esta media es de 0,483 para el valor de f_p y de 0,6552 para el valor de a_{11} .

Para el resto de términos se aplican las expresiones

$$a_{12} = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N \text{sen} \theta_n \cos \theta_n \approx 0$$

en el resto calculamos que $a_{11} + a_{22} = 1$ y $a_{12} = a_{21}$.

Por tanto la matriz del tensor orientación quedará de la forma

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,6552 & 0 \\ 0 & 0,3448 \end{bmatrix}$$

Muestra 2

En esta muestra se han considerado unas velocidades de inyección baja (30%), con una compactación baja (20%) y un tiempo de refrigeración baja (1 segundos), el resto de parámetros se consideraran constantes en todas las muestras.

La imagen más cercana al punto de inyección nos muestra la distribución de frecuencias, figura 17, que presenta orientación predominante en ángulo 0° y en segundo lugar un ángulo cercano a -50° .

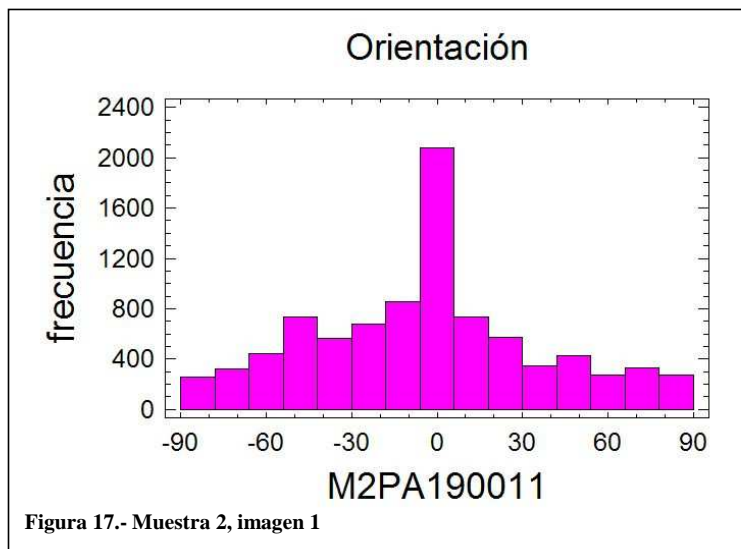
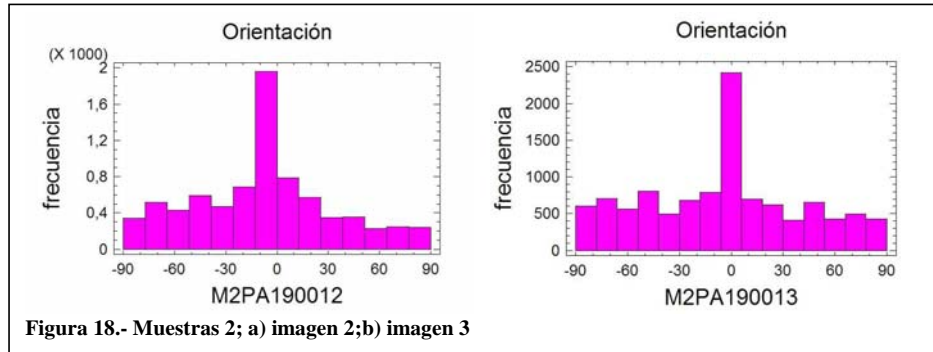


Figura 17.- Muestra 2, imagen 1

Para las muestras que se alejan del punto de entrada, las distribuciones son similares, figura 18. La imagen 3, figura 18b, presenta un incremento de valores mas alejados del valor cero y acercándose a los valores extremos de 90 y -90

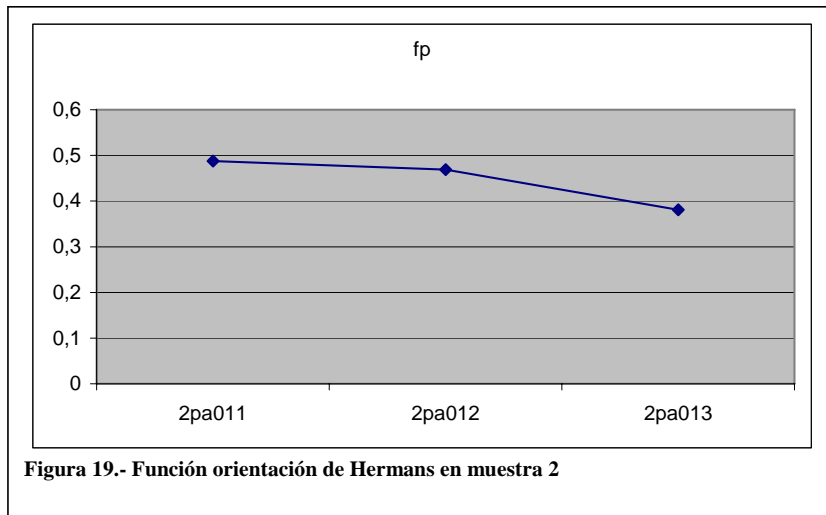


Los valores obtenidos de f_p y a_{11} según el criterio de Yamamura se reflejan en la tabla 2

	f_p	a_{11}
2pa011	0,4876	0,6584
2pa012	0,4691	0,6461
2pa013	0,3811	0,5874

Tabla 2.- Muestra 1

Se observa que el valor de la orientación disminuye a medida que nos alejamos del punto de entrada de la probeta, figura 19, para el valor de la función de Hermans



Para los valores del término de a_{11} del tensor orientación nos confirman la misma evolución que en la función de Hermans⁴, figura 20

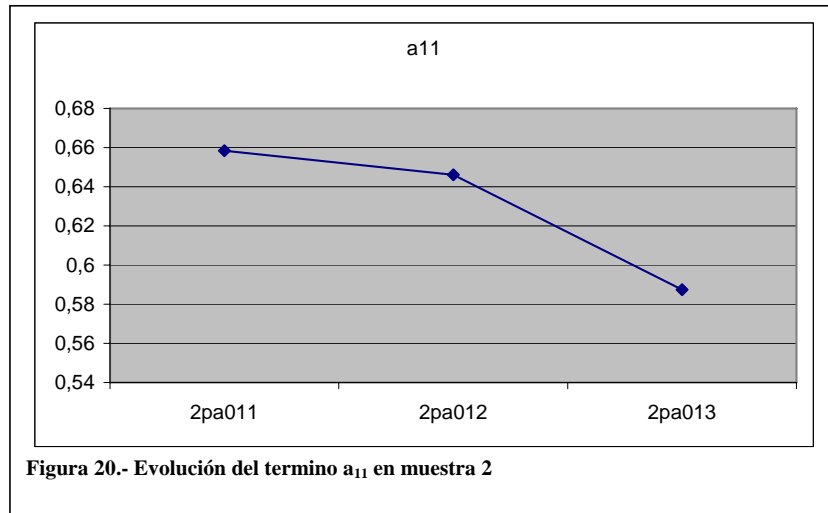


Figura 20.- Evolución del término a_{11} en muestra 2

Nos queda únicamente establecer una comparación de compatibilidad de datos en cada una de las imágenes analizadas de la muestra 2, para ello realizamos un contraste de hipótesis estadística.

Para las imágenes M2PA190011 y M2PA190012 el valor estadístico queda expresado de la siguiente forma

Resumen Estadístico

	M2PA190011	M2PA190012
Frecuencia	9172	8040
Media	83,8128	84,4868
Varianza	4051,76	4026,89
Desviación típica	63,6534	63,4578
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	0,176448	-0,87179
Curtosis típicada	-30,0913	-27,618

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 83,81 y 84,48
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 63,65 y 63,45
 Tamaños de la Muestra = 9172 y 8040

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -0,67 +/- 1,90272 [-2,57272;1,23272]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -0,690157
 p-Valor = 0,490093
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 9172 observaciones con una media de 83,81 y una desviación típica de 63,65 y una segunda muestra de 8040 observaciones con una media de 84,48 y una desviación típica de 63,45, el estadístico t calculado es igual a -0,690157. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -2,57272 y 1,23272.

Para las imágenes M2PA190011 y M2PA190013 los valores obtenidos son:

Resumen Estadístico

	M2PA190011	M2PA190013
Frecuencia	9172	11244
Media	83,8128	79,5341
Varianza	4051,76	3538,27
Desviación típica	63,6534	59,4834
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	0,176448	2,71084
Curtosis típicada	-30,0913	-29,5028

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 83,81 y 79,53
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 63,65 y 59,48
 Tamaños de la Muestra = 9172 y 11244

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 4,28 +/- 1,70455 [2,57545;5,98455]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
Alternativa: no igual
Estadístico t calculado = 4,92133
p-Valor = 8,60852E-7
Rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < > 0,0$

Dada una muestra de 9172 observaciones con una media de 83,81 y una desviación típica de 63,65 y una segunda muestra de 11244 observaciones con una media de 79,53 y una desviación típica de 59,48, el estadístico t calculado es igual a 4,92133. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula se rechaza para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre 2,57545 y 5,98455.

Tras este análisis se calculan los valores medios geométricos de los valores f_p y a_{11} que presentan los valores de 0,479 y 0,6527 respectivamente.

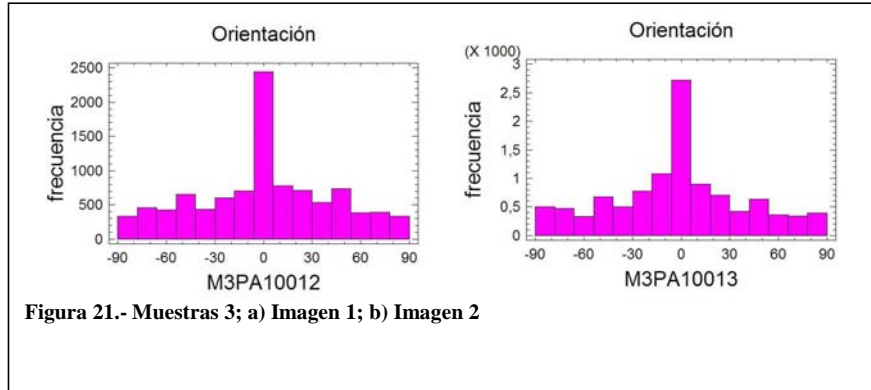
El valor de la matriz del tensor orientación presenta la siguiente formulación:

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,6527 & 0 \\ 0 & 0,3473 \end{bmatrix}$$

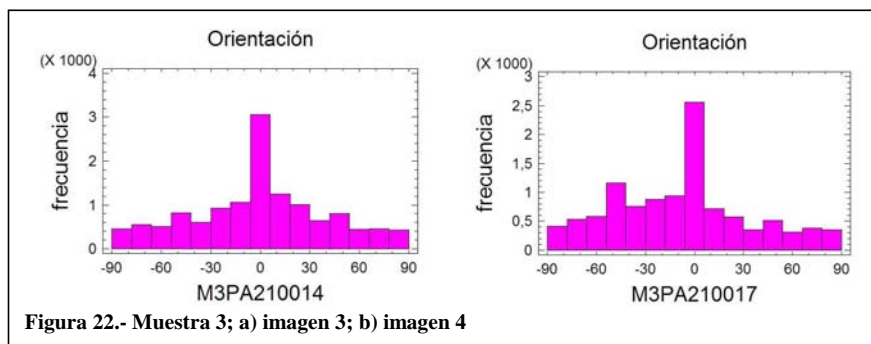
Muestra 3

En esta muestra se han considerado unas velocidades de inyección baja (30%), con una compactación alta (40%) y un tiempo de refrigeración alta (10 segundos), el resto de parámetros se consideraran constantes en todas las muestras.

La imagen más cercana al punto de inyección nos muestra la distribución de frecuencias, figura 21, que presenta orientación predominante en ángulo 0° y en segundo lugar un ángulo cercano a -50° y a 50°.



A medida que nos alejamos del punto de entrada del material de la muestra se observa una mayor dispersión de los valores de la imagen, figura 22b

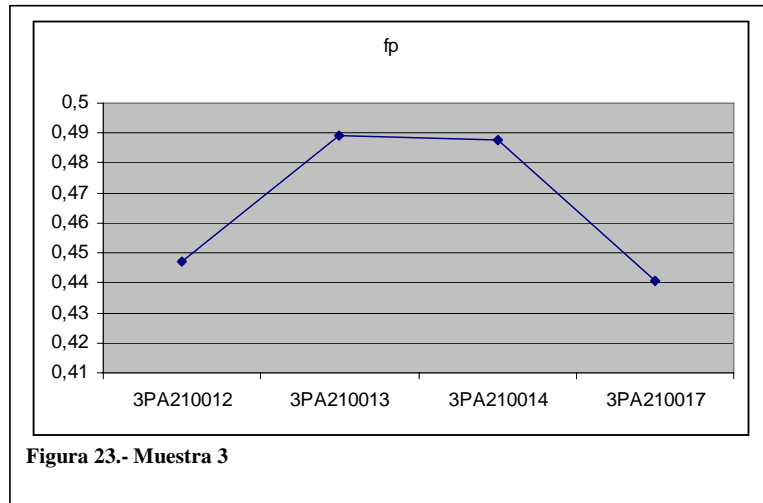


Los valores observados de todas las imágenes de la presente muestra se pueden observar en la siguiente tabla 3

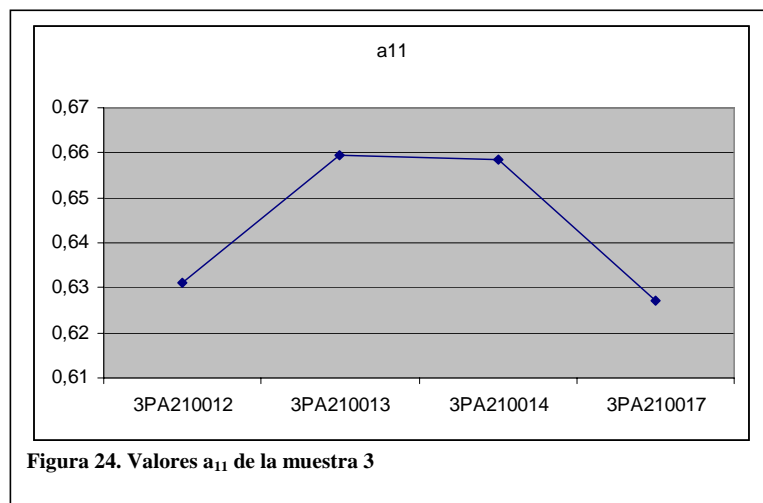
	fp	a11
3PA210012	0,4469	0,6312
3PA210013	0,4891	0,6594
3PA210014	0,4874	0,6583
3PA210017	0,4408	0,6272

Tabla 3.- Muestra 3

Gráficamente se observa la variación de la orientación desde el punto de entrada hasta el extremo de llenado de la probeta, figura 23



Los valores se confirman con la expresión grafica de la evolución de los valores del término a_{11} del tensor orientación, figura 24.



Nos queda únicamente establecer una comparación de compatibilidad de datos en cada una de las imágenes analizadas de la muestra 3, para ello realizamos un contraste de hipótesis estadística.

Para los valores de las imágenes 3PA210012 y 3PA210013

Resumen Estadístico

	M3PA210012	M3PA210013
Frecuencia	10430	11139

Media	73,5625	80,1641
Varianza	3672,23	4074,86
Desviación típica	60,5989	63,8346
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	11,0652	5,41353
Curtosis tipificada	-28,3908	-32,3261

 Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 73,56 y 80,16
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 60,59 y 63,83
 Tamaños de la Muestra = 10430 y 11139

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -6,6 +/- 1,66048 [-8,26048;-4,93952]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -7,79038
 p-Valor = 6,66134E-15
 Rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 <> 0,0$

Dada una muestra de 10430 observaciones con una media de 73,56 y una desviación típica de 60,59 y una segunda muestra de 11139 observaciones con una media de 80,16 y una desviación típica de 63,83, el estadístico t calculado es igual a -7,79038. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -8,26048 y -4,93952.

Para el análisis de las imágenes 012 y 014

Resumen Estadístico

	M3PA210012	M3PA210014
Frecuencia	10430	13417

Media	73,5625	75,6483
Varianza	3672,23	3897,7
Desviación típica	60,5989	62,4315
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	11,0652	10,9671
Curtosis tipificada	-28,3908	-34,4179

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 73,56 y 75,64
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 60,59 y 62,43
 Tamaños de la Muestra = 10430 y 13417

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -2,08 +/- 1,57689
 [-3,65689;-0,503107]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -2,58529
 p-Valor = 0,00972962
 Rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0,0$

Dada una muestra de 10430 observaciones con una media de 73,56 y una desviación típica de 60,59 y una segunda muestra de 13417 observaciones con una media de 75,64 y una desviación típica de 62,43, el estadístico t calculado es igual a -2,58529. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -3,65689 y -0,503107.

Y finalmente para las imágenes 012 y 017 de la muestra número 3

Resumen Estadístico

	M3PA210012	M3PA210017
Frecuencia	10430	11478
Media	73,5625	85,3205
Varianza	3672,23	3856,17

Desviación típica	60,5989	62,0981
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	11,0652	-4,62804
Curtosis tipificada	-28,3908	-32,4601

 Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 73,56 y 85,32
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 60,59 y 62,09
 Tamaños de la Muestra = 10430 y 11478

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -11,76 +/- 1,62744 [-13,3874;-10,1326]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -14,1629
 p-Valor = 0,0
 Rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 10430 observaciones con una media de 73,56 y una desviación típica de 60,59 y una segunda muestra de 11478 observaciones con una media de 85,32 y una desviación típica de 62,09, el estadístico t calculado es igual a -14,1629. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -13,3874 y -10,1326.

Los valores de la media geométrica de la muestra 3 adoptan un valor de 0,4672 para f_p y de 0,6448 para a_{11} .

La representación de la matriz a_{ij} queda expresada de la forma

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,6448 & 0 \\ 0 & 0,3552 \end{bmatrix}$$

Muestra 4

En esta muestra se han considerado unas velocidades de inyección baja (30%), con una compactación alta (40%) y un tiempo de refrigeración baja (1 segundos), el resto de parámetros se consideraran constantes en todas las muestras.

La imagen más cercana al punto de inyección nos muestra la distribución de frecuencias, figura 25, que presenta orientación predominante en ángulo 0° . En la segunda imagen existe una distribución menos diferenciada, encontrando una aumento de valores entre los ángulos de -90 y 0° .

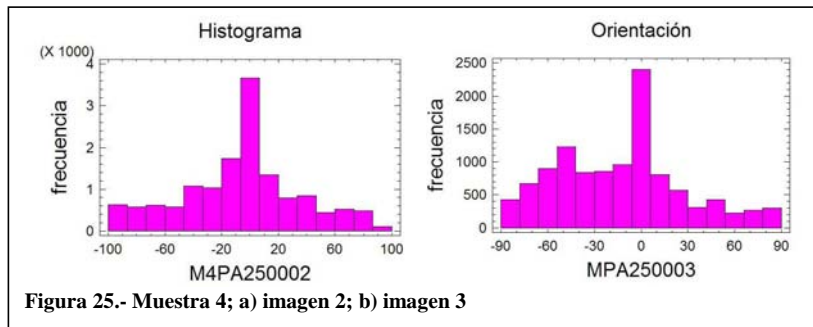


Figura 25.- Muestra 4; a) imagen 2; b) imagen 3

En las imágenes 4 y 5 también se observan las mismas tendencias, figura 26

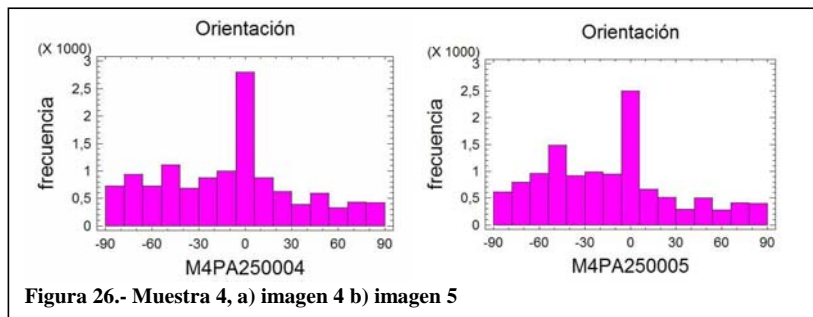


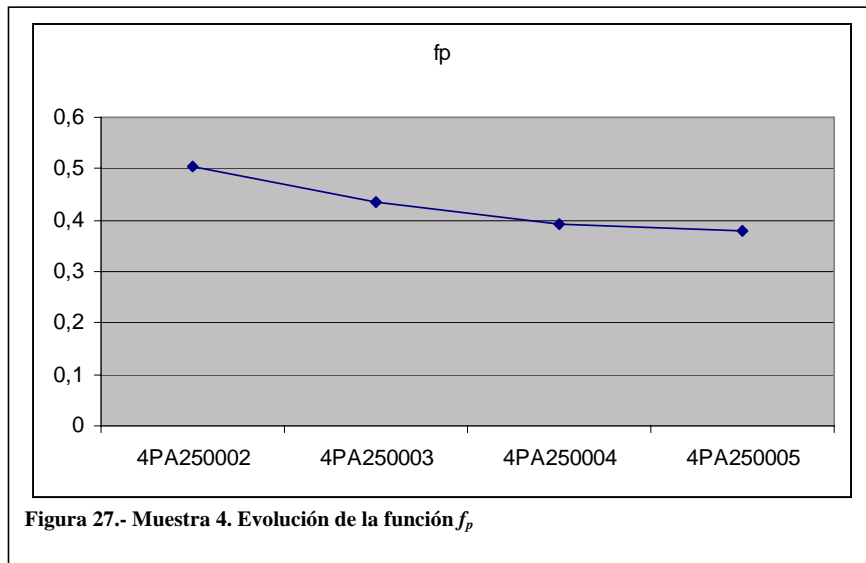
Figura 26.- Muestra 4, a) imagen 4 b) imagen 5

Para realizar una comparativa más certera podemos analizar los valores numéricos de las funciones de Hermans y término a_{11} del tensor orientación

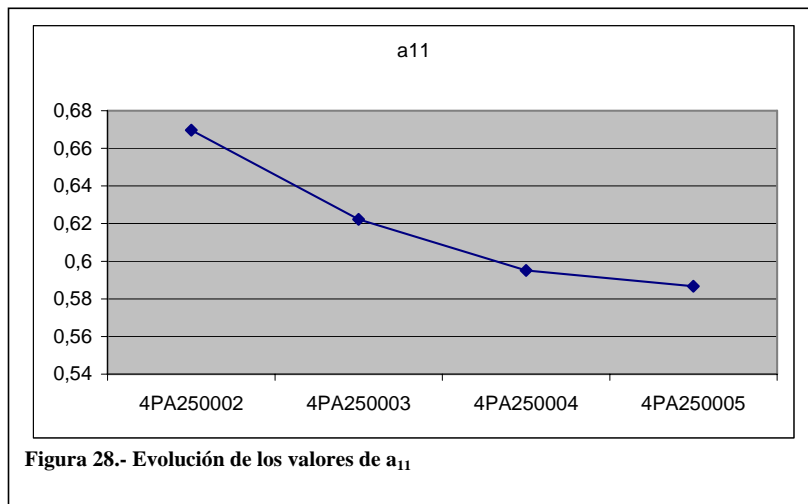
	f_p	a_{11}
4PA250002	0,5046	0,6697
4PA250003	0,4336	0,6223
4PA250004	0,3927	0,5951
4PA250005	0,3801	0,5867

Tabla 4.- Muestra 4

En este caso se observa una variación interesante de los valores de orientación mostrándose tendencias descendentes en ambos casos, figura 27.



Si se compara con la evolución del término a_{11} observamos que se sucede la misma tendencia, figura 28, que en el caso anterior. El significado es que la fibras toman una orientación aleatoria a medida que se alejan del punto de entrada de la probeta, en estas condiciones de procesado.



Analizaremos a continuación la comparativa estadística de las imágenes estudiadas, arrancando con las imágenes 0002 y 0003.

Resumen Estadístico

	M4PA250002	M4PA250003
Frecuencia	14439	11574
Media	81,7489	89,2582
Varianza	4157,38	3803,76
Desviación típica	64,4777	61,6746
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	3,52568	-10,3749
Curtosis tipificada	-37,8852	-31,6998

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 81,75 y 89,25
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 64,48 y 61,67
 Tamaños de la Muestra = 14439 y 11574

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -7,5 +/- 1,53897 [-9,03897;-5,96103]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -9,55166
 p-Valor = 0,0
 Rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 14439 observaciones con una media de 81,75 y una desviación típica de 64,48 y una segunda muestra de 11574 observaciones con una media de 89,25 y una desviación típica de 61,67, el estadístico t calculado es igual a -9,55166. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula no se puede rechazar para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -9,03897 y -5,96103.

Para las muestras 0002 y 0004

Resumen Estadístico

	M4PA250002	M4PA250004
Frecuencia	14439	13069
Media	81,7489	83,8386
Varianza	4157,38	3658,83
Desviación típica	64,4777	60,4883
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	3,52568	-3,85335
Curtosis tipificada	-37,8852	-32,9182

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 81,74 y 83,84
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 64,48 y 60,49
 Tamaños de la Muestra = 14439 y 13069

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -2,1 +/- 1,47705 [-3,57705;-0,622952]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -2,78659
 p-Valor = 0,00532664
 Rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 14439 observaciones con una media de 81,74 y una desviación típica de 64,48 y una segunda muestra de 13069 observaciones con una media de 83,84 y una desviación típica de 60,49, el estadístico t calculado es igual a -2,78659. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula no se puede rechazar para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -3,57705 y -0,622952.

Para los valores de las imágenes 003 y 004 se obtiene

Resumen Estadístico

	M4PA250003	M4PA250004
Frecuencia	11574	13069
Media	89,2582	83,8386
Varianza	3803,76	3658,83
Desviación típica	61,6746	60,4883
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	-10,3749	-3,85335
Curtosis tipificada	-31,6998	-32,9182

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 89,25 y 83,84
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 61,67 y 60,48
 Tamaños de la Muestra = 11574 y 13069

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 6,0 +/- 16,8732 [-10,8732;22,8732]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 0,701239
 p-Valor = 0,483977
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 100 observaciones con una media de 89,0 y una desviación típica de 61,0 y una segunda muestra de 100 observaciones con una media de 83,0 y una desviación típica de 60,0, el estadístico t calculado es igual a 0,701239. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -10,8732 y 22,8732.

Por tanto los valores de las medias geométricas calculados quedarán representados por los valores siguientes:

$f_p = 0,4299$ y el valor del término $a_{11} = 0,6199$. Por lo tanto la matriz del tensor orientación quedará expresada de la manera

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,6199 & 0 \\ 0 & 0,3801 \end{bmatrix}$$

Muestra 5

En esta muestra se han considerado unas velocidades de inyección media (60%), con una compactación baja (20%) y un tiempo de refrigeración alta (10 segundos), el resto de parámetros se consideraran constantes en todas las muestras.

Las distribuciones de frecuencias en la primera imagen, la más cercana al punto de entrada, figura 29, presentan una orientación predominante en el valor de 0°.

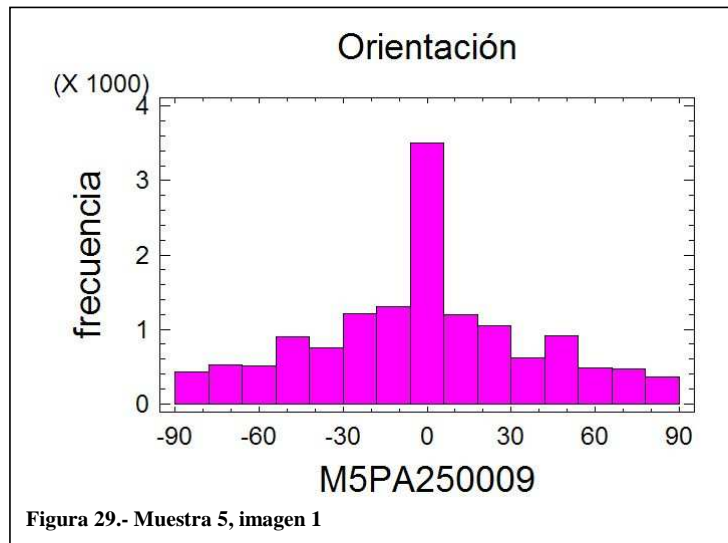


Figura 29.- Muestra 5, imagen 1

Las dos imágenes más captadas de la muestra se sitúan a continuación de la imagen primera en el sentido de llenado del flujo, figura 30.

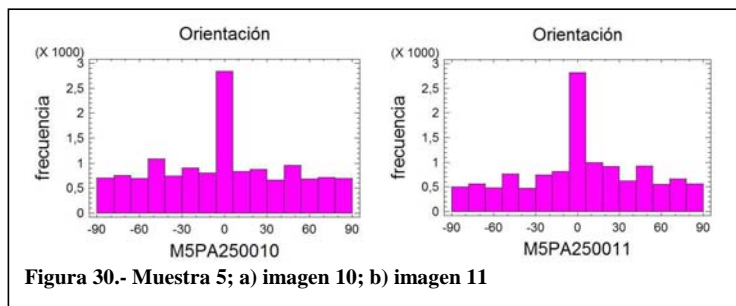


Figura 30.- Muestra 5; a) imagen 10; b) imagen 11

Las distribuciones en la imagen 10 se muestran más homogéneas después de frecuencia de cero grados. Los valores numéricos se pueden apreciar en la tabla 5.

	<u>fp</u>	<u>a11</u>
5PA250009	0,5143	0,6762
5PA250010	0,3515	0,5677
5PA250011	0,413	0,6087

Tabla 5.- Muestra 5. Valores de f_p y a_{11}

Los valores mayores de orientación se observan en la imagen más cercana al punto de entrada. Acto seguido se observa un descenso del valor de orientación a medida que nos alejamos. El punto de inflexión queda marcado en esta muestra en el punto central, con poca diferencia de la última imagen.

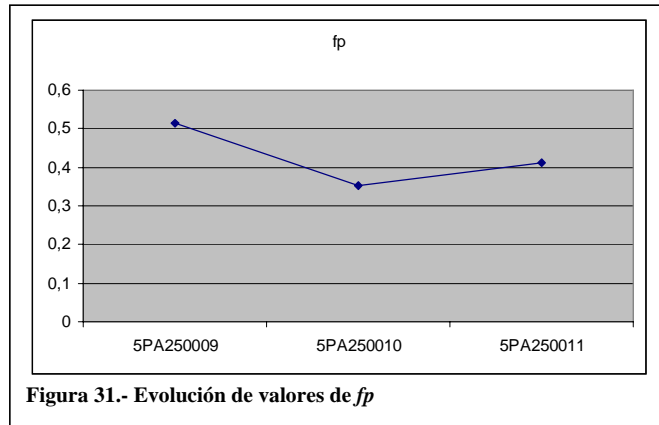


Figura 31.- Evolución de valores de f_p

Para los valores del término de a_{11} del tensor orientación, la variación es similar, fig 32

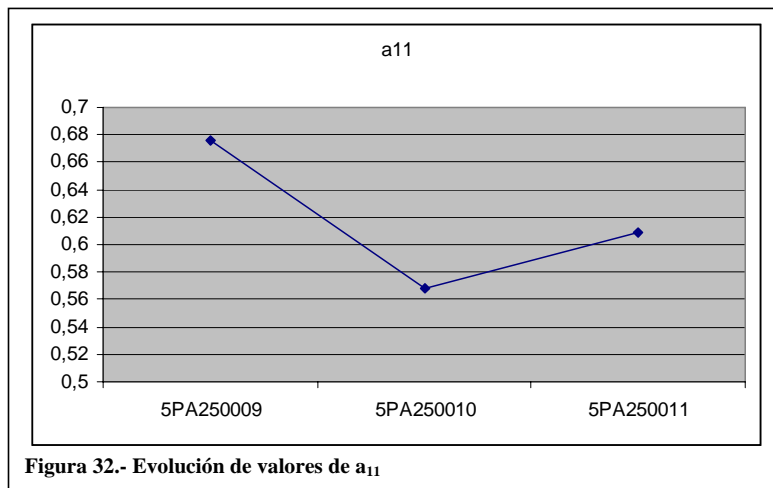


Figura 32.- Evolución de valores de a_{11}

El punto de inflexión se localiza en la segunda muestra, aunque con poca diferencia de la imagen 0011. Globalmente se observa la pérdida de orientación a medida que avanza el flujo a través de la muestra.

El estudio estadístico nos permitirá conocer la compatibilidad de las muestras. Se inicia con las muestras 5PA250009 y 5PA250010.

Resumen Estadístico

	M5PA250009	M5PA250010
Frecuencia	14675	14618
Media	78,8153	78,6546
Varianza	4098,92	3316,82
Desviación típica	64,0228	57,5919
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	7,8155	4,50384
Curtosis tipificada	-37,9185	-32,2476

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 78,81 y 78,65
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 64,02 y 57,59
 Tamaños de la Muestra = 14675 y 14618

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 0,16 +/- 1,39444 [-1,23444;1,55444]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 0,22489
 p-Valor = 0,82206
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 <> 0,0$

Dada una muestra de 14675 observaciones con una media de 78,81 y una desviación típica de 64,02 y una segunda muestra de 14618 observaciones con una media de 78,65 y una desviación típica de 57,59, el estadístico t calculado es igual a 0,22489. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -1,23444 y 1,55444.

El contraste de hipótesis para las imágenes 0009 y 0011 quedaría reflejado como sigue:

Resumen Estadístico

	M5PA250009	M5PA250011
Frecuencia	14675	12918
Media	78,8153	73,7768
Varianza	4098,92	3512,13
Desviación típica	64,0228	59,2632
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	7,8155	12,9941
Curtosis tipificada	-37,9185	-29,8125

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 78,81 y 73,77
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 64,02 y 59,26
 Tamaños de la Muestra = 14675 y 12918

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 5,0 +/- 17,1656 [-12,1656;22,1656]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 0,574409
 p-Valor = 0,566343
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0,0$

Dada una muestra de 100 observaciones con una media de 78,0 y una desviación típica de 64,0 y una segunda muestra de 100 observaciones con una media de 73,0 y una desviación típica de 59,0, el estadístico t calculado es igual a 0,574409. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -12,1656 y 22,1656.

Como son comparables las muestras se realiza un cálculo de la media geométrica para poder obtener, según el criterio de Yamamura, los valores de la función de Hermans y el valor del término del tensor orientación. Los valores obtenidos son de 0,4269 para la función f_p y de 0,6180 para el valor de a_{11} .

La matriz del tensor orientación tomaría la siguiente forma

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,6180 & 0 \\ 0 & 0,3820 \end{bmatrix}$$

Muestra 6

En esta muestra se han considerado unas velocidades de inyección media (60%), con una compactación baja (20%) y un tiempo de refrigeración baja (1 segundos), el resto de parámetros se consideraran constantes en todas las muestras.

Las distribuciones de frecuencias en la primera imagen, la más cercana al punto de entrada, figura 33, presentan una orientación predominante en el valor de 0°.

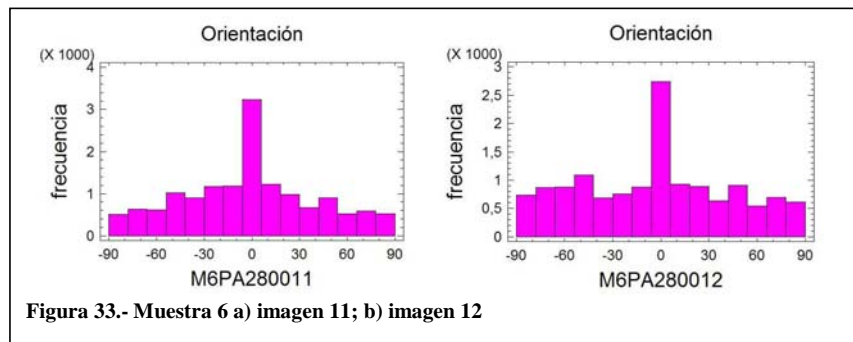


Figura 33.- Muestra 6 a) imagen 11; b) imagen 12

La imagen 12 presenta una distribución más homogénea, fuera del valor mayoritario. En este caso la imagen 11 es la más cercana al punto de inyección de la muestra.

La dos imágenes capturadas a continuación muestra la evolución de la orientación a concatenando con las imágenes 11 y 12, figura 34.

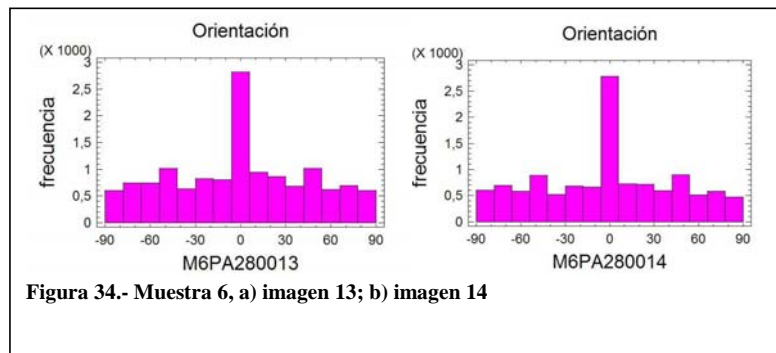


Figura 34.- Muestra 6, a) imagen 13; b) imagen 14

Los valores visuales de frecuencias son muy similares en todas las muestras, observándose picos en los valores de 50° . Para conocer realmente los valores de las funciones y poder comparar, recurriremos a los valores numéricos calculados, tabla 6

	fp	a11
6PA280011	0,4617	0,6412
6PA280012	0,3523	0,5682
6PA280013	0,3691	0,5794
6PA280014	0,3665	0,5777

Tabla 6.- Muestra 6

Los valores numéricos muestran una mayor orientación de fibras cerca de la entrada de la muestra, evolucionando hacia una aleatoriedad en las siguientes imágenes, figura 35.

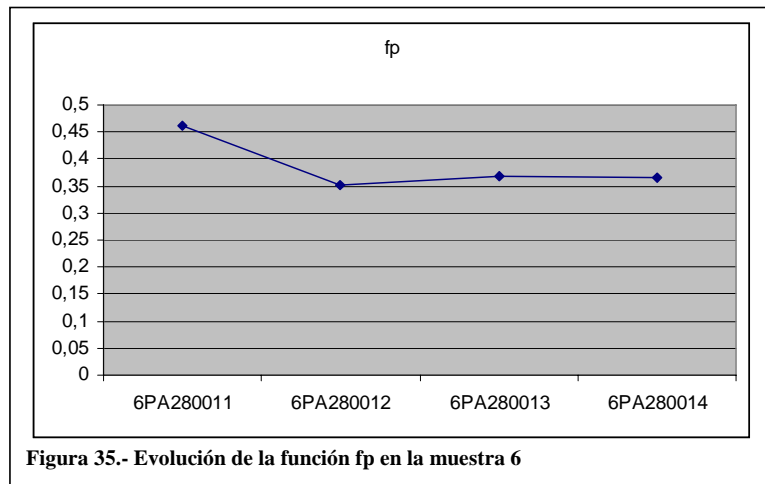


Figura 35.- Evolución de la función fp en la muestra 6

Tras una caída de valores inicial, se considera que se mantiene constante a lo largo del llenado de la probeta. Una evolución similar puede observarse en los valores de la función de tensor orientación, figura 36.

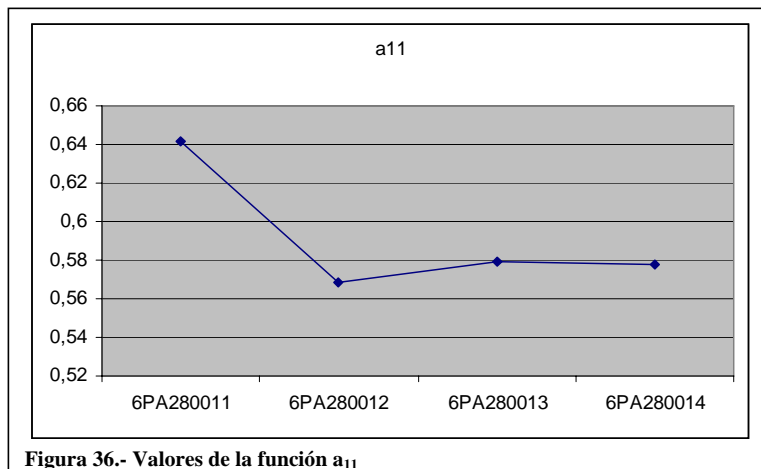


Figura 36.- Valores de la función a₁₁

Se puede observar que el comportamiento es similar en las dos graficas de orientación. El estudio estadístico nos permitirá conocer la compatibilidad de las muestras. Se inicia con las muestras 280011 y 280012, observando los siguientes resultados:

Resumen Estadístico

	M6PA280011	M6PA280012
Frecuencia	15145	14368
Media	79,8718	79,201
Varianza	3848,95	3338,11
Desviación típica	62,0399	57,7763
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	5,15327	3,36897
Curtosis típicada	-37,3493	-32,2705

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 79,87 y 79,2
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 62,04 y 57,77
 Tamaños de la Muestra = 15145 y 14368

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 0,67 +/- 16,7178 [-16,0478;17,3878]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 0,0790353
 p-Valor = 0,937085
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).
 Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 <> 0,0$

Dada una muestra de 100 observaciones con una media de 79,87 y una desviación típica de 62,04 y una segunda muestra de 100 observaciones con una media de 79,2 y una desviación típica de 57,77, el estadístico t calculado es igual a 0,0790353. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -16,0478 y 17,3878.

Para el estadístico de las muestras 0011 y 0013 obtenemos

Resumen Estadístico

	M6PA280011	M6PA280013
Frecuencia	15145	14230
Media	79,8718	76,8365
Varianza	3848,95	3359,28
Desviación típica	62,0399	57,9593
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	5,15327	7,21026
Curtosis tipificada	-37,3493	-31,9464

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 79,87 y 76,83
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 62,03 y 57,96
 Tamaños de la Muestra = 15145 y 14230

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 3,04 +/- 16,6091 [-13,5691;19,6491]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 0,36096
 p-Valor = 0,718517
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 15145 observaciones con una media de 79,87 y una desviación típica de 62,04 y una segunda muestra de 14230 observaciones con una media de 76,83 y una desviación típica de 57,96, el estadístico t calculado es igual a 0,36096. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -13,5691 y 19,6491.

Para los valores de las muestras 0011 y 0014 quedarían de la manera siguiente:
 Resumen Estadístico

	M6PA280011	M6PA280014
Frecuencia	15145	12579
Media	79,8718	74,4199

Varianza	3848,95	3337,51
Desviación típica	62,0399	57,7712
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	5,15327	8,10464
Curtosis tipificada	-37,3493	-29,4916

 Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 79,87 y 74,42
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 62,04 y 57,77
 Tamaños de la Muestra = 15145 y 12579

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 5,45 +/- 1,41261 [4,03739;6,86261]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 7,56176
 p-Valor = 3,9968E-14
 Rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).
 Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 15145 observaciones con una media de 79,87 y una desviación típica de 62,04 y una segunda muestra de 12579 observaciones con una media de 74,42 y una desviación típica de 57,77, el estadístico t calculado es igual a 7,56176. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre 4,03739 y 6,86261.

Finalmente realizamos los cálculos de la media geométrica de los valores de la función de orientación f_p y de los valores del tensor orientación, quedando las expresiones como siguen

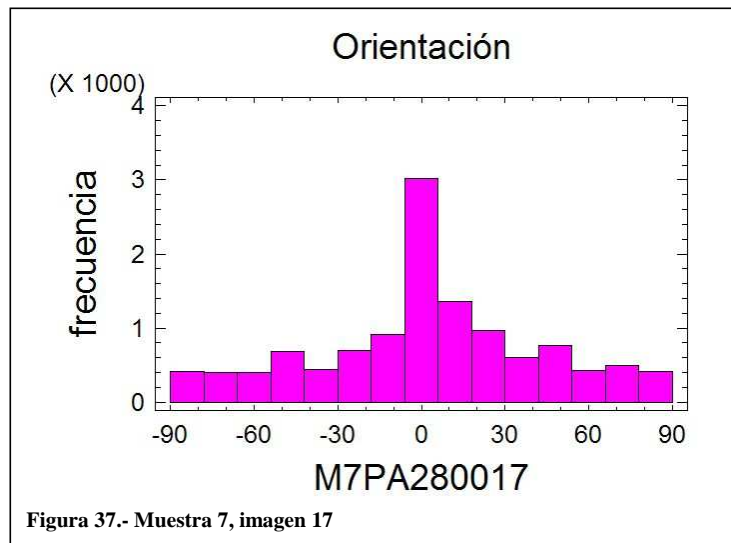
$$f_p = 0,3891$$

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,5928 & 0 \\ 0 & 0,4072 \end{bmatrix}$$

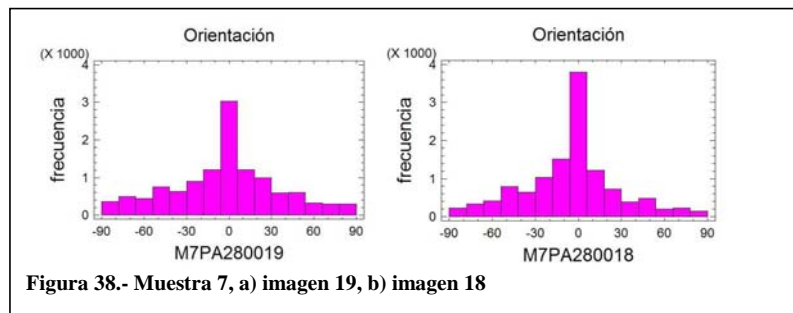
- Muestra 7

En esta muestra se han considerado unas velocidades de inyección media (60%), con una compactación alta (40%) y un tiempo de refrigeración alta (10 segundos), el resto de parámetros se consideraran constantes en todas las muestras.

Las distribuciones de frecuencias en la primera imagen, la más cercana al punto de entrada, figura 37, presentan una orientación predominante en el valor de 0°, el resto de valores se observan homogéneos.



Las restantes imágenes presentan orientaciones similares, figura 38.



Para una mejor visualización comparativa de resultados se obtendrán los valores numéricos del tratamiento de datos de las imágenes. Se considera que la muestra 0017 es la más cercana al punto de entrada de la probeta, seguida de la imagen 18 y finalmente la imagen 19

	<u>fp</u>	<u>a11</u>
7PA280017	0,5053	0,6702
7PA280018	0,635	0,7567
7PA280019	0,547	0,698

Tabla 7.- Muestra 7

Los valores de esta muestra revelan una alta orientación en el centro de la probeta alcanzando valores de 0,76, para el tensor orientación y unos valores muy bajos en la cercanía de la entrada de la probeta, figura 39

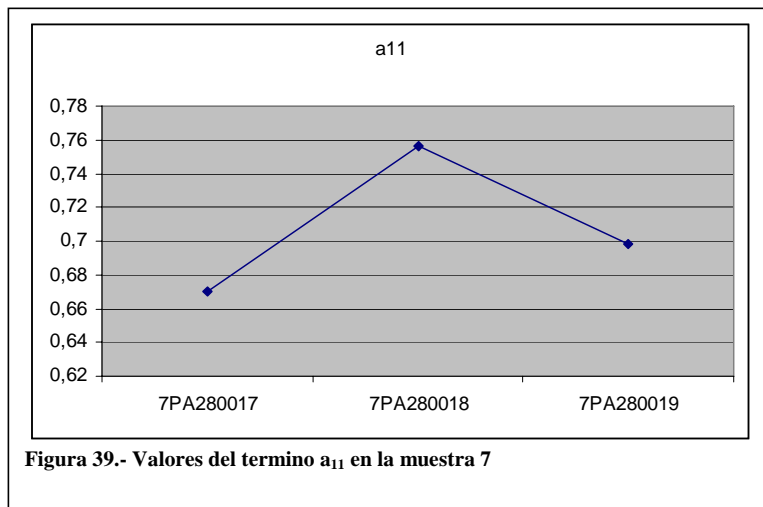


Figura 39.- Valores del termino a₁₁ en la muestra 7

Los valores observados de la función de Hermans siguen un comportamiento similar, figura 40, al expuesto anteriormente en la figura 39.

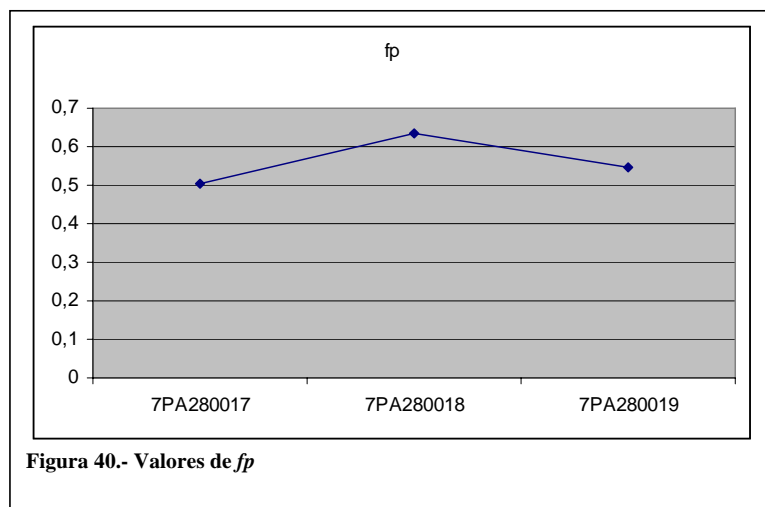


Figura 40.- Valores de fp

Una vez comparadas las imágenes realizamos la verificación de la compatibilidad de datos mediante la aplicación del contraste de hipótesis. Las primeras muestras comparadas son las 0017 y 0018.

Resumen Estadístico

	M7PA280017	M7PA280018
Frecuencia	12367	12435
Media	70,7692	81,402
Varianza	3862,78	4839,78
Desviación típica	62,1513	69,5685
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	17,4516	3,77714
Curtosis típicada	-30,5237	-38,7656

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 70,77 y 81,4
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 62,15 y 69,57
 Tamaños de la Muestra = 12367 y 12435

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -10,63 +/- 1,64165 [-12,2716;-8,98835]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -12,6912
 p-Valor = 0,0
 Rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 12367 observaciones con una media de 70,77 y una desviación típica de 62,15 y una segunda muestra de 12435 observaciones con una media de 81,4 y una desviación típica de 69,57, el estadístico t calculado es igual a -12,6912. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula se rechaza para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -12,2716 y -8,98835.

Para las muestras 0017 y 0019 se obtiene:

Resumen Estadístico

	M7PA280017	M7PA280019
Frecuencia	12367	12416
Media	70,7692	78,5706
Varianza	3862,78	4259,76
Desviación típica	62,1513	65,2668
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	17,4516	7,835
Curtosis tipificada	-30,5237	-35,7266

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 70,77 y 78,57
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 62,15 y 65,27
 Tamaños de la Muestra = 12367 y 12416

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -7,8 +/- 1,58694 [-9,38694;-6,21306]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -9,63345
 p-Valor = 0,0
 Rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).
 Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 <> 0,0$

Dada una muestra de 12367 observaciones con una media de 70,77 y una desviación típica de 62,15 y una segunda muestra de 12416 observaciones con una media de 78,57 y una desviación típica de 65,27, el estadístico t calculado es igual a -9,63345. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula se rechaza para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -9,38694 y -6,21306.

Nos quedará únicamente determinar la media geométrica de los valores de la función orientación de Hermans y el valor de la matriz del tensor orientación de los valores no rechazados, siendo $f_p = 0,6350$ y el valor de $a_{11} = 0,7567$. Las expresiones quedarían de la forma siguiente:

$$f_p = 0,6350$$

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,7567 & 0 \\ 0 & 0,2433 \end{bmatrix}$$

Estos datos nos definen la orientación de la muestra 7.

- Muestra 8

En esta muestra se han considerado unas velocidades de inyección media (60%), con una compactación alta (40%) y un tiempo de refrigeración baja (1 segundos), el resto de parámetros se consideraran constantes en todas las muestras.

Las distribuciones de frecuencias en la primera imagen, la más cercana al punto de entrada, figura 41, presentan una orientación predominante en el valor de 0°, el resto de valores en la distribución de la imagen 4 se observan altas orientaciones en ángulos entre 60 y 20°. Ello indica una mayor aleatoriedad de las fibras a lo largo de la muestra.

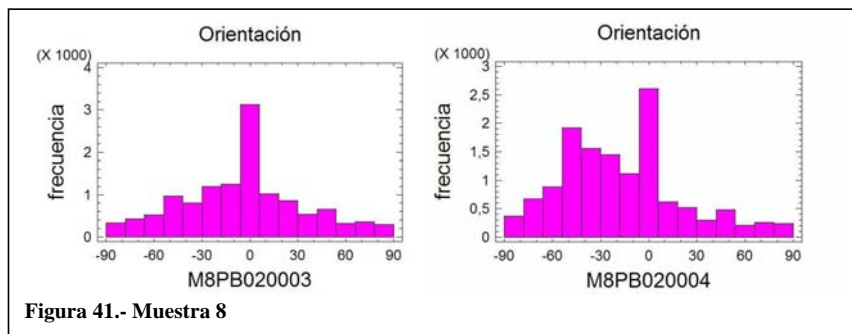


Figura 41.- Muestra 8

La muestra 3 representa la imagen más cercana al punto de entrada de la muestra. Las distribuciones del resto de muestra presentan distribuciones mas homogéneas.

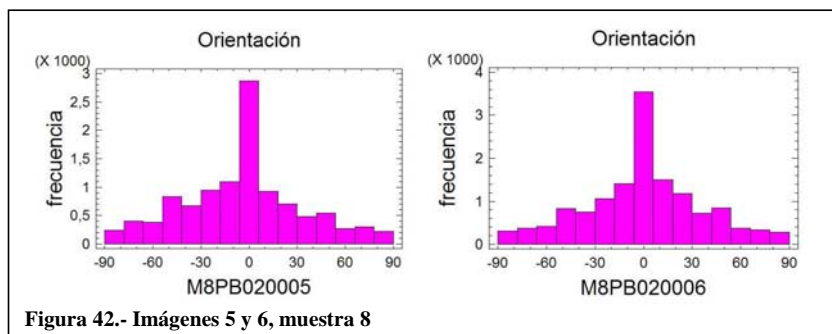


Figura 42.- Imágenes 5 y 6, muestra 8

Para poder comparar de una manera más efectiva resumimos los valores en una tabla en la que figuran los elementos a_{11} y f_p

	<u>fp</u>	<u>a₁₁</u>
8PB020003	0,5307	0,6872
8PB020004	0,4504	0,6336
8PB020005	0,5455	0,697
8PB020006	0,5769	0,718

Tabla 8.- Valore fp y a₁₁ de la muestra 8

La evolución grafica de los valores antes expuestos, nos representan la variación de los valores de la función de Hermans a medida que nos alejamos del punto de entrada de la muestra.

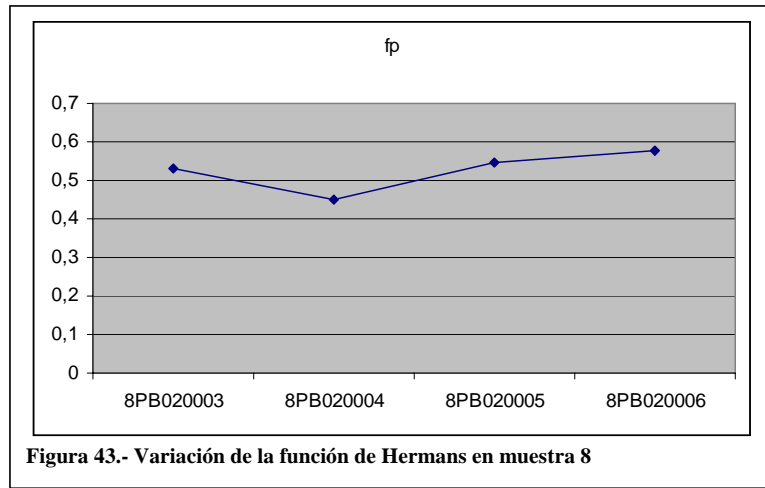


Figura 43.- Variación de la función de Hermans en muestra 8

En este caso la orientación aumenta, figura 43, a medida que nos alejamos de la entrada, alcanzando el valor máximo en el punto mas alejado.

De manera similar se encuentra el comportamiento de los valores del término a₁₁ del tensor orientación, figura 44.

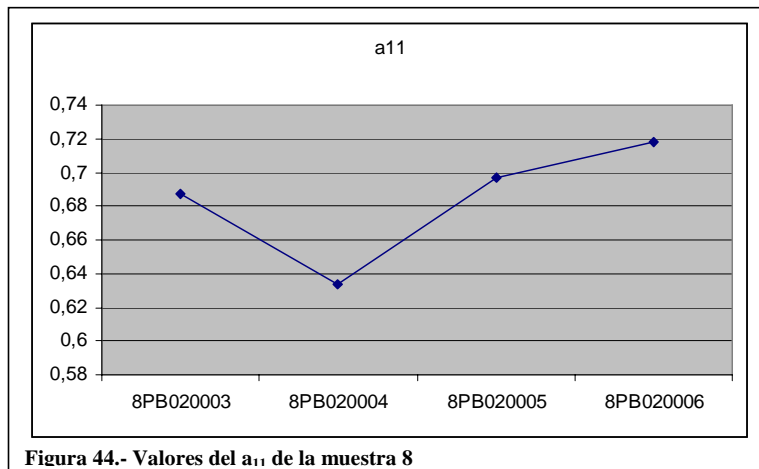


Figura 44.- Valores del a₁₁ de la muestra 8

Una vez comparadas las imágenes realizamos la verificación de la compatibilidad de datos mediante la aplicación del contraste de hipótesis, iniciándose en las imágenes 003 y 0004

Resumen Estadístico

	M8PB020003	M8PB020004
Frecuencia	13069	13632
Media	82,9699	96,6374
Varianza	4235,98	3729,23
Desviación típica	65,0844	61,0674
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	1,16642	-23,5771
Curtosis típicada	-37,3275	-30,8453

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 82,97 y 96,63
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 65,08 y 61,06
 Tamaños de la Muestra = 13069 y 13632

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -13,66 +/- 1,51512 [-15,1751;-12,1449]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0

Alternativa: no igual

Estadístico t calculado = -17,6707

p-Valor = 0,0

Rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$

Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 <> 0,0$

Dada una muestra de 13069 observaciones con una media de 82,97 y una desviación típica de 65,08 y una segunda muestra de 13632 observaciones con una media de 96,63 y una desviación típica de 61,06, el estadístico t calculado es igual a -17,6707. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -15,1751 y -12,1449.

Para la comparación de las imágenes 003 y 005 se obtiene

Resumen Estadístico

	M8PB020003	M8PB020005
Frecuencia	13069	11251
Media	82,9699	81,7676
Varianza	4235,98	4322,64
Desviación típica	65,0844	65,7468
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	1,16642	2,67322
Curtosis típicada	-37,3275	-34,822

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 82,97 y 81,77
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 65,08 y 65,74
 Tamaños de la Muestra = 13069 y 11251

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 1,2 +/- 1,64816 [-0,448162;2,84816]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 1,42702
 p-Valor = 0,153573
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).
 Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 13069 observaciones con una media de 82,97 y una desviación típica de 65,08 y una segunda muestra de 11251 observaciones con una media de 81,77 y una desviación típica de 65,74, el estadístico t calculado es igual a 1,42702. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -0,448162 y 2,84816.

Y para las imágenes 0003 y 0006, obtenemos

Resumen Estadístico

	M8PB020003	M8PB020006
--	------------	------------

Frecuencia	13069	14312
Media	82,9699	76,6886
Varianza	4235,98	4333,34
Desviación típica	65,0844	65,8281
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	1,16642	11,8256
Curtosis típicada	-37,3275	-38,3689

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 82,97 y 76,69
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 65,08 y 65,82
 Tamaños de la Muestra = 13069 y 14312

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 6,28 +/- 1,5517 [4,7283;7,8317]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 7,93234
 p-Valor = 2,22045E-15
 Rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).
 Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < > 0,0$

Dada una muestra de 13069 observaciones con una media de 82,97 y una desviación típica de 65,08 y una segunda muestra de 14312 observaciones con una media de 76,69 y una desviación típica de 65,82, el estadístico t calculado es igual a 7,93234. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre 4,7283 y 7,8317.

Comparadas las muestras y aceptadas se procede al calculo de las medias geométricas de la muestra para expresar las funciones de orientación correspondientes

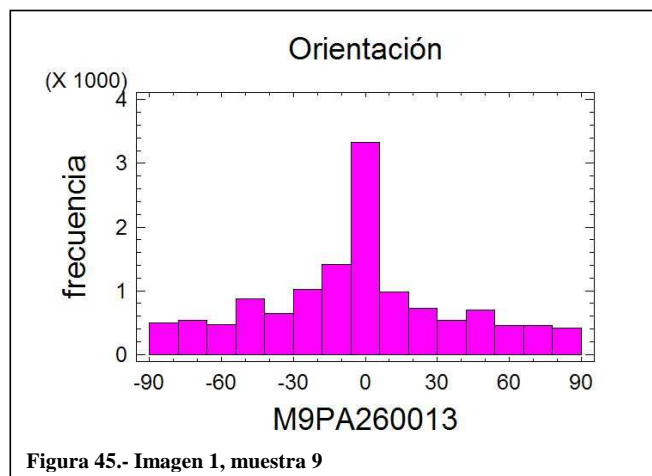
$$f_p = 0,5256$$

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,6838 & 0 \\ 0 & 0,3162 \end{bmatrix}$$

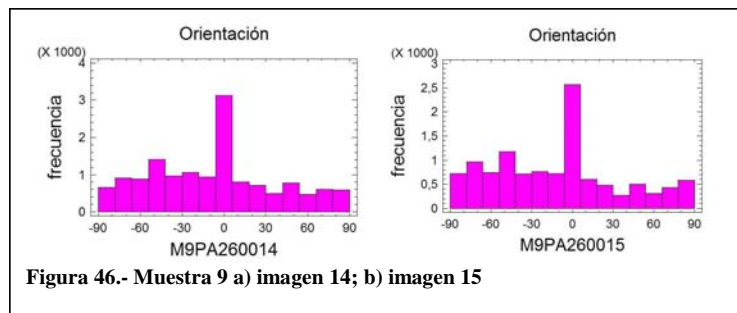
- Muestra 9

En esta muestra se han considerado unas velocidades de inyección alta (90%), con una compactación baja (20%) y un tiempo de refrigeración alta (10 segundos), el resto de parámetros se consideraran constantes en todas las muestras.

Las distribuciones de frecuencias en la primera imagen, la más cercana al punto de entrada, figura 45, presentan una orientación predominante en el valor de 0°, el resto de valores en la distribución aparecen dispersos.



En las siguientes imágenes, se muestra la progresión del avance de flujo a lo largo de la muestra. La imagen 14 y 15, figura 46, presenta mayor dispersión que en la imagen anterior.



La secuencia final de las imágenes en la probeta nos acaba de reflejar la evolución de la distribución al final de la probeta, figura 47.

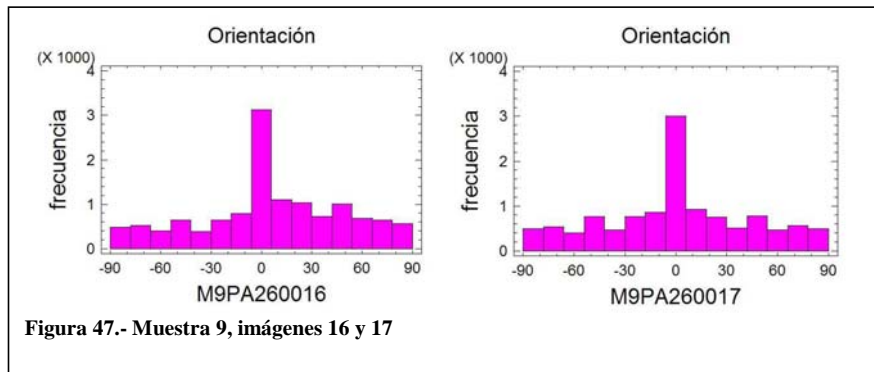


Figura 47.- Muestra 9, imágenes 16 y 17

Para detallar más exactamente la evolución de la orientación, se presentan los valores numéricos que se han obtenido del análisis de las imágenes, tabla 9.

	<u>fp</u>	<u>a11</u>
9PA260013	0,4938	0,6625
9PA260014	0,3755	0,5836
9PA260015	0,3322	0,5548
9PA260016	0,4286	0,6191
9PA260017	0,4381	0,6254

Tabla 9.- Resultados muestra 9

Visualizando gráficamente la evolución numérica de la orientación se observa un descenso de la orientación en posiciones cercanas al punto de entrada, figura 48. Puede estimarse una tendencia a la baja en el avance de la orientación a medida que se llena la muestra.

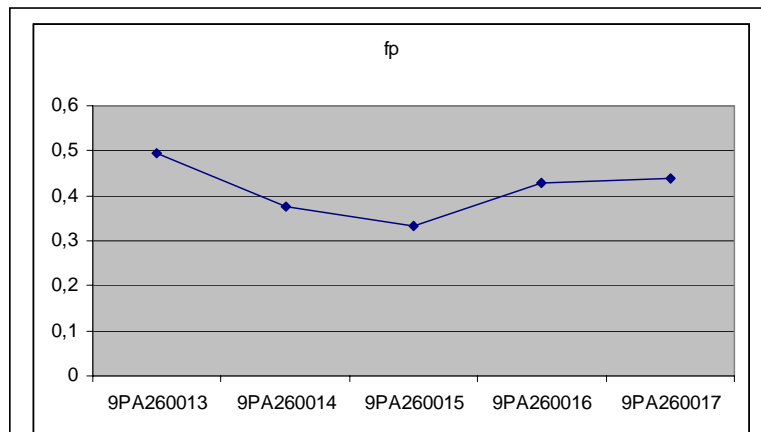


Figura 48.- Evolución de la función fp

La misma perspectiva nos ofrece la gráfica de los valores de a_{11} , siendo equivalente a la función de Hermans, figura 49.

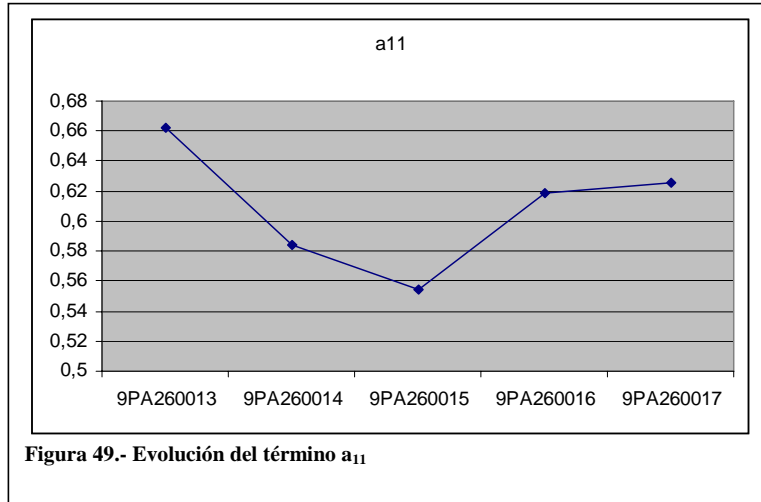


Figura 49.- Evolución del término a_{11}

Una vez comparadas las imágenes realizamos la verificación de la compatibilidad de datos mediante la aplicación del contraste de hipótesis, iniciándose en las imágenes 0013 y 00014.

Resumen Estadístico

	M9PA260013	M9PA260014
Frecuencia	13531	15050
Media	82,5031	84,0205
Varianza	4130,79	3537,49
Desviación típica	64,2712	59,4768
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	2,69665	-5,06792
Curtosis típicada	-36,2857	-34,7705

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 82,5 y 84,02
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 64,27 y 59,47
 Tamaños de la Muestra = 13531 y 15050

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -1,52 +/- 1,43471 [-2,95471;-0,0852867]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -2,07648
 p-Valor = 0,0378495
 Rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).
 Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 13531 observaciones con una media de 82,5 y una desviación típica de 64,27 y una segunda muestra de 15050 observaciones con una media de 84,02 y una desviación típica de 59,47, el estadístico t calculado es igual a -2,07648. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -2,95471 y -0,0852867.

Para las muestras 014 y 015

Resumen Estadístico

	M9PA260014	M9PA260015
Frecuencia	15050	12139
Media	84,0205	84,5935
Varianza	3537,49	3411,32
Desviación típica	59,4768	58,4065
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	-5,06792	-8,05231
Curtosis tipificada	-34,7705	-29,4673

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 84,02 y 84,59
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 59,47 y 58,4
 Tamaños de la Muestra = 15050 y 12139

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -0,57 +/- 1,40784 [-1,97784;0,837844]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -0,793541
 p-Valor = 0,427461
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$

Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 15050 observaciones con una media de 84,02 y una desviación típica de 59,47 y una segunda muestra de 12139 observaciones con una media de 84,59 y una desviación típica de 58,4, el estadístico t calculado es igual a -0,793541. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -1,97784 y 0,837844.

Para las muestras 16 y 17

Resumen Estadístico

	M9PA260016	M9PA260017
Frecuencia	13334	12310
Media	69,3471	74,5767
Varianza	3455,69	3714,1
Desviación típica	58,7851	60,9434
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	20,1124	10,7138
Curtosis tipificada	-27,0574	-30,83

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 69,34 y 74,57

Desviaciones Típicas de la Muestra = 58,78 y 60,94

Tamaños de la Muestra = 13334 y 12310

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -5,23 +/- 1,46564 [-6,69564;-3,76436]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0

Alternativa: no igual

Estadístico t calculado = -6,99397

p-Valor = 2,6894E-12

Rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 <> 0,0$

Dada una muestra de 13334 observaciones con una media de 69,34 y una desviación típica de 58,78 y una segunda muestra de 12310 observaciones con una media de 74,57 y una desviación típica de 60,94, el estadístico t calculado es igual a -6,99397. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -6,69564 y -3,76436.

Y las muestras 13 y 17

Resumen Estadístico

	M9PA260013	M9PA260017
Frecuencia	13531	12310
Media	82,5031	74,5767
Varianza	4130,79	3714,1
Desviación típica	64,2712	60,9434
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	2,69665	10,7138
Curtosis tipificada	-36,2857	-30,83

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 82,5 y 74,57
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 64,27 y 60,94
 Tamaños de la Muestra = 100 y 100

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 7,93 +/- 17,4658 [-9,53583;25,3958]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 0,895356
 p-Valor = 0,371684
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).
 Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 <> 0,0$

Dada una muestra de 13531 observaciones con una media de 82,5 y una desviación típica de 64,27 y una segunda muestra de 12310 observaciones con una media de 74,57 y una desviación típica de 60,94, el estadístico t calculado es igual a 0,895356. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -9,53583 y 25,3958.

Finalmente nos queda únicamente realizar el cálculo de las dos funciones de orientación estudiadas

$$f_p = 0,4140$$

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,6093 & 0 \\ 0 & 0,3907 \end{bmatrix}$$

- Muestra 10

En esta muestra se han considerado unas velocidades de inyección alta (90%), con una compactación baja (20%) y un tiempo de refrigeración baja (1 segundos), el resto de parámetros se consideraran constantes en todas las muestras.

Las distribuciones de frecuencias en la primera imagen, la más cercana al punto de entrada, figura 50, presentan una orientación predominante en el valor de 0°, el resto de valores en la distribución toman una dispersión típica. Esta distribución coincide con el punto más cercano a la entrada del flujo en la probeta.

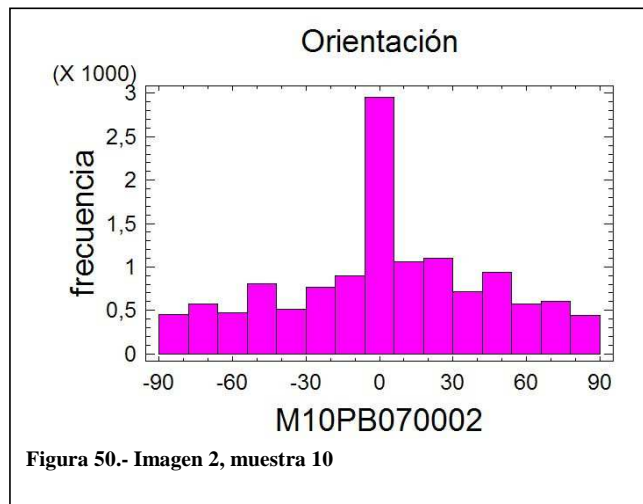
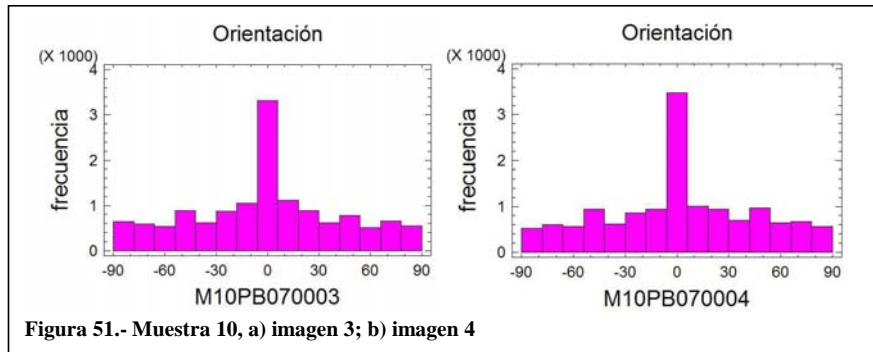
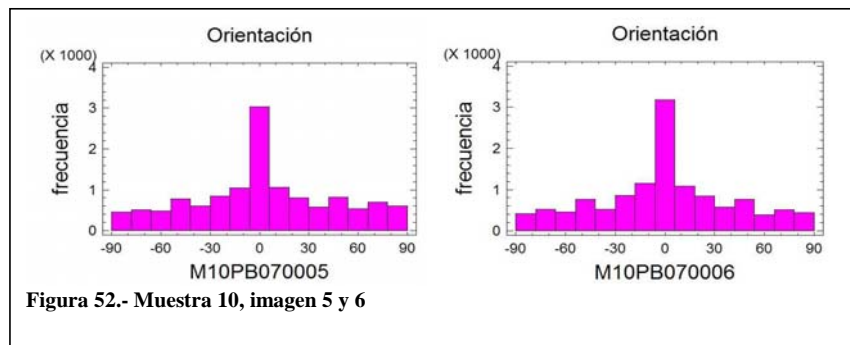


Figura 50.- Imagen 2, muestra 10

Para el resto de muestras se puede ver que las distribuciones siguen patrones similares, figura 51, a medida que nos alejamos del punto de entrada.



La última muestra, figura 52, es la que mantiene una orientación mas centrada sobre los cero grados.



Para poder realizar la comparación más objetiva, necesitamos conocer cuales son los valores numéricos mas exactos de la evolución de la orientación a lo largo de la muestra, tabla 10.

	fp	a11
10PB070002	0,4466	0,6311
10PB070003	0,4411	0,6274
10PB070004	0,4312	0,6208
10PB070005	0,4412	0,6274
10PB070006	0,4941	0,6627

Tabla 10.- Resultado de las muestras 10

La evolución de los valores de la orientación es muy similar a lo largo del llenado de la probeta, incrementando el valor en la zona mas alejada de la misma, figura 53.

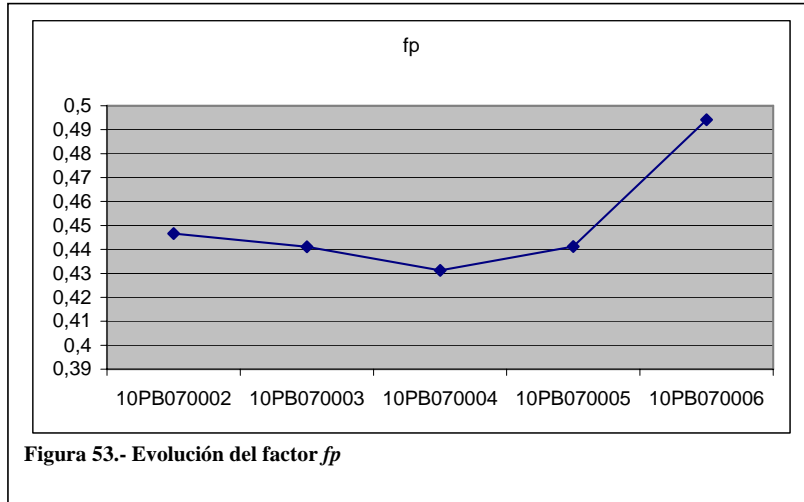


Figura 53.- Evolución del factor fp

Una evolución similar se observará en la lectura de los datos del término a_{11} del tensor orientación, figura 54, que muestra un incremento de la orientación en la zona más alejada del punto de entrada de la muestra.

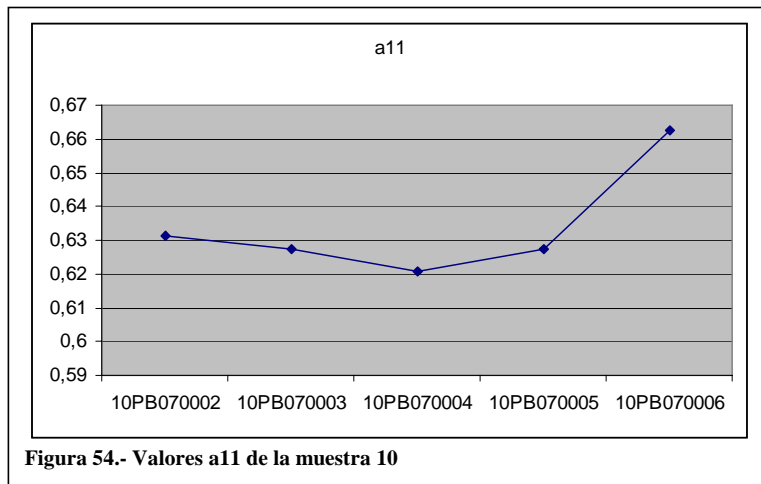


Figura 54.- Valores a_{11} de la muestra 10

Vistos los resultados solo nos queda realizar la comparación estadística de los datos con objeto de conocer su compatibilidad. Arrancaremos con la comparación de las muestras 002 y 003. Los resultados obtenidos son

Resumen Estadístico

	M10PB070002	M10PB070003
Frecuencia	13318	14111
Media	72,5521	77,0327
Varianza	3601,26	3773,18
Desviación típica	60,0105	61,4262
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	15,2201	8,84644
Curtosis tipificada	-30,9017	-34,0157

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 72,55 y 77,03
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 60,01 y 61,43
 Tamaños de la Muestra = 100 y 100

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -4,48 +/- 16,9351 [-21,4151;12,4551]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0

Alternativa: no igual

Estadístico t calculado = -0,521677

p-Valor = 0,602478

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$

Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0,0$

Dada una muestra de 13318 observaciones con una media de 72,55 y una desviación típica de 60,01 y una segunda muestra de 14111 observaciones con una media de 77,03 y una desviación típica de 61,43, el estadístico t calculado es igual a -0,521677. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -21,4151 y 12,4551.

Ahora comparamos las muestras 03 y 04 obteniendose

Resumen Estadístico

	M10PB070003	M10PB070004
Frecuencia	14111	14577
Media	77,0327	73,9009
Varianza	3773,18	3625,9

Desviación típica	61,4262	60,2154
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	8,84644	12,4754
Curtosis tipificada	-34,0157	-33,0337

 Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 77,03 y 73,9
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 61,43 y 60,21
 Tamaños de la Muestra = 100 y 100

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 3,13 +/- 16,9627 [-13,8327;20,0927]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 0,363882
 p-Valor = 0,716334
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).
 Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 14111 observaciones con una media de 77,03 y una desviación típica de 61,43 y una segunda muestra de 14577 observaciones con una media de 73,9 y una desviación típica de 60,21, el estadístico t calculado es igual a 0,363882. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -13,8327 y 20,0927.

Los valores de las muestras 4 y 5

Resumen Estadístico

	M10PB070004	M10PB070005
Frecuencia	14577	13289
Media	73,9009	76,2815
Varianza	3625,9	3738,83
Desviación típica	60,2154	61,146
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	12,4754	9,93169

Curtosis típicada -33,0337 -32,6016

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 73,91 y 76,28
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 60,21 y 61,15
 Tamaños de la Muestra = 100 y 100

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -2,37 +/- 16,9233 [-19,2933;14,5533]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -0,276169
 p-Valor = 0,782706
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).
 Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 <> 0,0$

Dada una muestra de 14577 observaciones con una media de 73,91 y una desviación típica de 60,21 y una segunda muestra de 13289 observaciones con una media de 76,28 y una desviación típica de 61,15, el estadístico t calculado es igual a -0,276169. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -19,2933 y 14,5533.

Y finalmente las muestras 5 y 6

Resumen Estadístico

	M10PB070005	M10PB070006
Frecuencia	13289	12887
Media	76,2815	77,8791
Varianza	3738,83	4040,55
Desviación típica	61,146	63,5653
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	9,93169	8,90805
Curtosis típicada	-32,6016	-34,2181

Contraste de Hipótesis

 Medias de la Muestra = 76,28 y 77,88
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 61,15 y 63,57
 Tamaños de la Muestra = 100 y 100

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -1,6 +/- 17,3946 [-18,9946;15,7946]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -0,181392
 p-Valor = 0,856246
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).
 Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 13289 observaciones con una media de 76,28 y una desviación típica de 61,15 y una segunda muestra de 12887 observaciones con una media de 77,88 y una desviación típica de 63,57, el estadístico t calculado es igual a -0,181392. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -18,9946 y 15,7946.

Seguidamente realizamos el cálculo de la media geométrica para determinar los valores finales de la función de Hermans y el término de a_{11} del tensor orientación

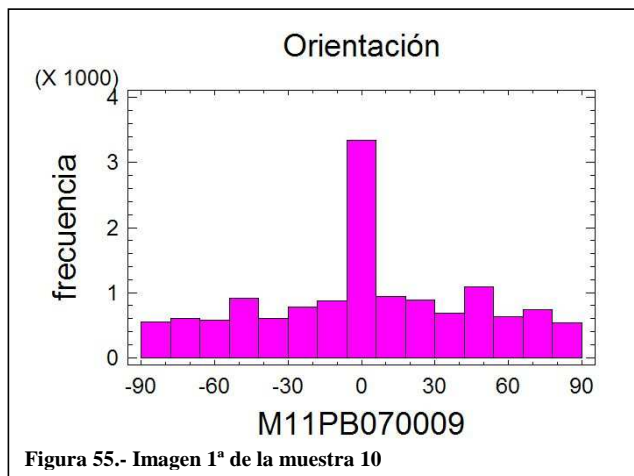
$$f_p = 0,4501$$

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,6334 & 0 \\ 0 & 0,3666 \end{bmatrix}$$

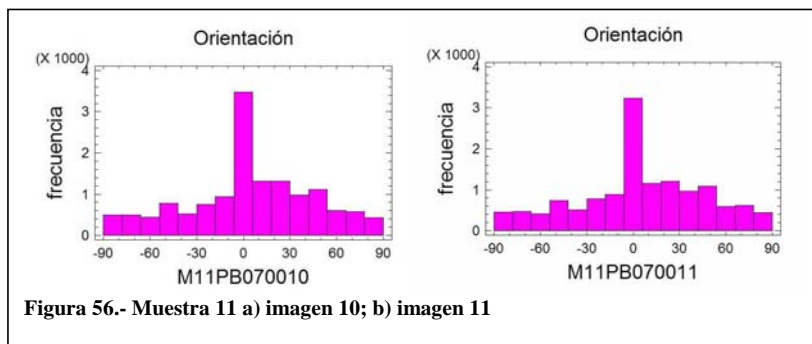
- Muestra 11

En esta muestra se han considerado unas velocidades de inyección alta (90%), con una compactación alta (40%) y un tiempo de refrigeración alta (10 segundos), el resto de parámetros se consideraran constantes en todas las muestras.

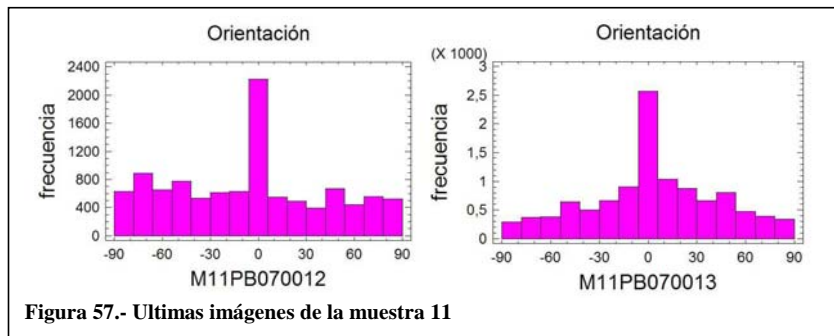
Las distribuciones de frecuencias en la primera imagen, la más cercana al punto de entrada, figura 55, presentan una orientación predominante en el valor de 0°, el resto de valores en la distribución toma valores estables.



Para el resto de las muestras observamos distribuciones similares, aunque en estos casos se incrementan los valores de orientación positiva, figura 56.



Las últimas imágenes tomadas de la probeta nos indican las distribuciones observadas en el llenado a lo largo de la muestra, figura 57.

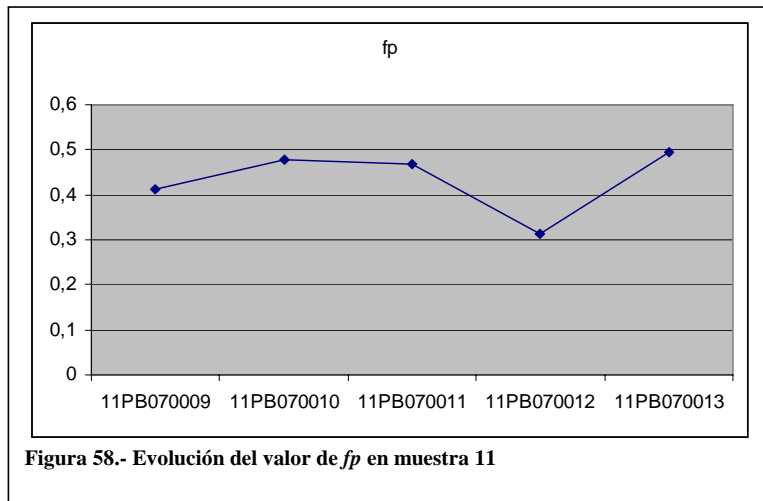


Al igual que con las muestras anteriores determinamos los valores numéricos tabulados para una mejor comparación de los mismos, tabla 11

	<u>fp</u>	<u>a11</u>
11PB070009	0,4129	0,6086
11PB070010	0,4787	0,6525
11PB070011	0,4665	0,6443
11PB070012	0,3146	0,5431
11PB070013	0,4951	0,6634

Tabla 11.- Valores de la muestra 11

Observamos una variación bastante fuerte en los valores mas alejados del punto de entrada, en la que se presenta una disminución muy abrupta, figura 58



Lo mismo se aprecia en la variación del término a_{11} , figura 59

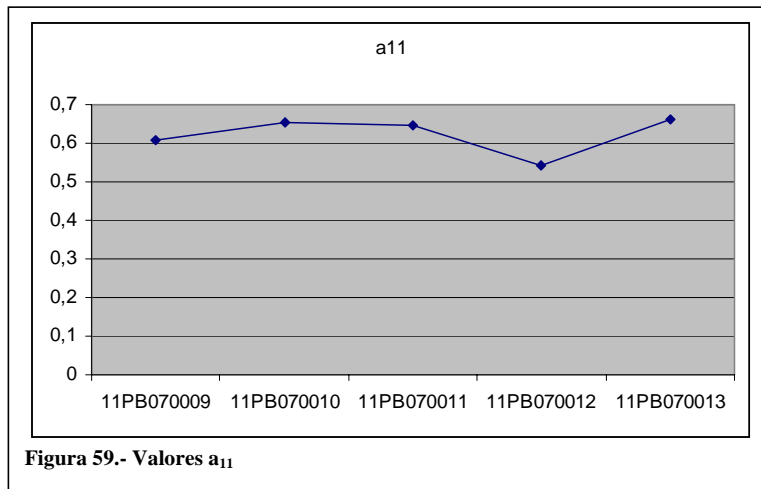


Figura 59.- Valores a₁₁

Solo nos quedará realizar el test de hipótesis para verificar la compatibilidad de los datos obtenidos. Iniciamos la comparación con las imágenes 09 y 10.

Resumen Estadístico

	M11PB070009	M11PB070010
Frecuencia	14315	14769
Media	72,7597	67,7659
Varianza	3501,49	3573,89
Desviación típica	59,1734	59,782
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	13,3224	23,5147
Curtosis tipificada	-31,5526	-29,5991

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 72,76 y 67,77
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 59,17 y 59,78
 Tamaños de la Muestra = 100 y 100

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 4,99 +/- 16,587 [-11,597;21,577]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 0,59326
 p-Valor = 0,553684
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).
Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 14315 observaciones con una media de 72,76 y una desviación típica de 59,17 y una segunda muestra de 14769 observaciones con una media de 67,77 y una desviación típica de 59,78, el estadístico t calculado es igual a 0,59326. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -11,597 y 21,577.

Para las muestras 10 y 11

Resumen Estadístico

	M11PB070010	M11PB070011
Frecuencia	14769	14064
Media	67,7659	69,2028
Varianza	3573,89	3561,51
Desviación típica	59,782	59,6784
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	23,5147	21,2741
Curtosis típicada	-29,5991	-29,4582

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 67,77 y 69,2
Desviaciones Típicas de la Muestra = 59,78 y 59,68
Tamaños de la Muestra = 100 y 100

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -1,43 +/- 16,6579 [-18,0879;15,2279]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
Alternativa: no igual
Estadístico t calculado = -0,169289
p-Valor = 0,865742
No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).
Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$

Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 14769 observaciones con una media de 67,77 y una desviación típica de 59,78 y una segunda muestra de 14064 observaciones con una media de 69,2 y una desviación típica de 59,68, el estadístico t calculado es igual a -0,169289. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -18,0879 y 15,2279.

Y las muestras 11 y 12

Resumen Estadístico

	M11PB070011	M11PB070012
Frecuencia	14064	11025
Media	69,2028	80,1805
Varianza	3561,51	3242,97
Desviación típica	59,6784	56,9471
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	21,2741	-0,353378
Curtosis típicada	-29,4582	-27,122

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 69,2 y 80,18
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 59,67 y 56,94
 Tamaños de la Muestra = 100 y 100

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -10,98 +/- 16,2649 [-27,2449;5,2849]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -1,33126
 p-Valor = 0,184635
 No rechazar la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

(No se asumen varianzas iguales).
 Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 14064 observaciones con una media de 69,2 y una desviación típica de 59,67 y una segunda muestra de 11025 observaciones con una media de 80,18

y una desviación típica de 56,94, el estadístico t calculado es igual a -1,33126. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -27,2449 y 5,2849.

Y finalmente los valores 12 y 13

Resumen Estadístico

	M11PB070012	M11PB070013
Frecuencia	11025	11273
Media	80,1805	74,2486
Varianza	3242,97	3868,39
Desviación típica	56,9471	62,1964
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	-0,353378	13,5655
Curtosis tipificada	-27,122	-30,347

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 80,18 y 74,24
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 56,94 y 62,19
 Tamaños de la Muestra = 100 y 100

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 5,94 +/- 16,628 [-10,688;22,568]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 0,704464
 p-Valor = 0,481971
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).
 Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 11025 observaciones con una media de 80,18 y una desviación típica de 56,94 y una segunda muestra de 11273 observaciones con una media de 74,24 y una desviación típica de 62,19, el estadístico t calculado es igual a 0,704464. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -10,688 y 22,568.

Comparadas las muestras realizamos el cálculo de los valores medios de las funciones de orientación

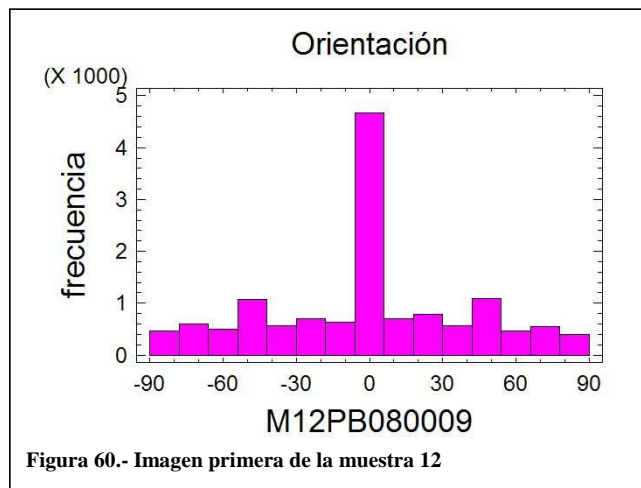
$$f_p = 0,4369$$

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,6246 & 0 \\ 0 & 0,3754 \end{bmatrix}$$

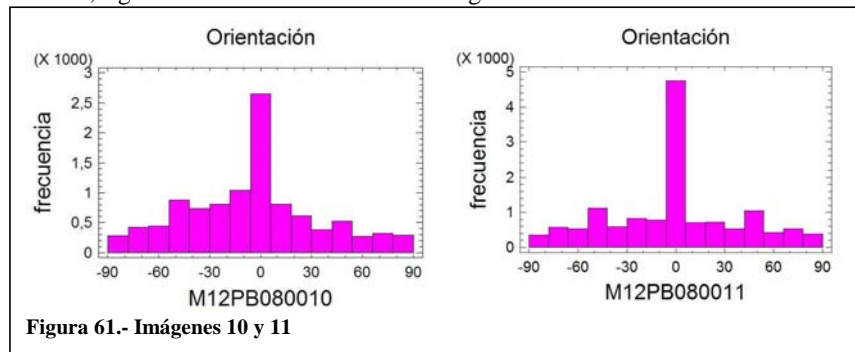
- Muestra 12

En esta muestra se han considerado unas velocidades de inyección alta (90%), con una compactación alta (40%) y un tiempo de refrigeración baja (1 segundos), el resto de parámetros se consideraran constantes en todas las muestras.

Las distribuciones de frecuencias en la primera imagen, la más cercana al punto de entrada, figura 60, muestra una gran orientación en el ángulo 0° y el resto mas disperso.



En la segunda imagen se observa una distribución más repartida a lo largo del rango de frecuencias, figura 61. La distribución de la imagen 11 se muestra más similar a la de la



muestra 9. A continuación se analizan las distribuciones mas alejadas del punto de entrada en la probeta, figura 62.

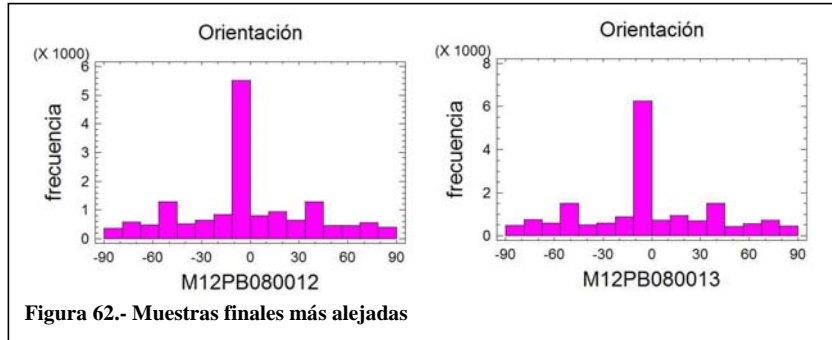


Figura 62.- Muestras finales más alejadas

Para una comparación más exacta de la evolución de la orientación, podremos recurrir a los valores numéricos de las orientaciones, tabla 12.

	<u>fp</u>	<u>a11</u>
12PB080009	0,4431	0,6288
12PB080010	0,503	0,6687
12PB080011	0,4649	0,6433
12PB080012	0,4671	0,6447
12PB080013	0,4393	0,6262

Tabla 12.- Resultados de muestra 12

En el caso de los valores de f_p se observa una variación de mayor orientación cerca del punto de entrada a una mayor aleatoriedad en la zona más alejada. Este efecto se aprecia claramente si se visualiza el factor en forma de grafica, figura 63.

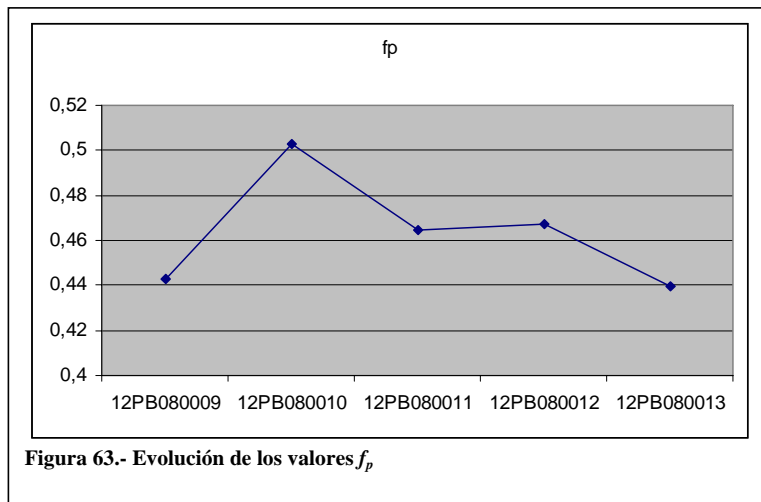


Figura 63.- Evolución de los valores f_p

La misma evolución podemos observar con el cálculo del término a_{11} del tensor orientación, figura 64.

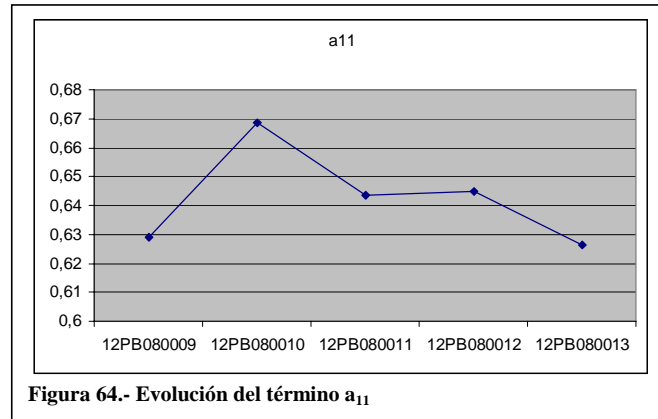


Figura 64.- Evolución del término a_{11}

Como en casos anteriores nos queda comprobar la compatibilidad de los datos calculados, mediante tests de hipótesis. Arrancaremos con las muestras 009 y 010.

Resumen Estadístico

	M12PB08009	M12PB080010
Frecuencia	14888	10870
Media	65,1144	83,7093
Varianza	3498,39	4151,64
Desviación típica	59,1472	64,4333
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	18,2645	-0,514122
Curtosis tipificada	-31,5897	-33,2755

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 65,11 y 83,71
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 59,14 y 64,43
 Tamaños de la Muestra = 14888 y 10870

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: -18,6 +/- 1,51893 [-20,1189;-17,0811]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = -24,0007
 p-Valor = 0,0

Rechazar la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 14888 observaciones con una media de 65,11 y una desviación típica de 59,14 y una segunda muestra de 10870 observaciones con una media de 83,71 y una desviación típica de 64,43, el estadístico t calculado es igual a -24,0007. Puesto que el p-valor para el test es inferior a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -20,1189 y -17,0811.

Para las imágenes 10 y 11

Resumen Estadístico

	M12PB080010	M12PB080011
Frecuencia	10870	14986
Media	83,7093	67,8683
Varianza	4151,64	3721,9
Desviación típica	64,4333	61,0074
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	-0,514122	15,8749
Curtosis tipificada	-33,2755	-33,811

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 83,7 y 67,86
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 64,4 y 61,0
 Tamaños de la Muestra = 100 y 100

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 15,84 +/- 17,4926 [-1,65257;33,3326]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 1,78572
 p-Valor = 0,0756753
 No rechazar la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < > 0,0$

Dada una muestra de 10870 observaciones con una media de 83,7 y una desviación típica de 64,4 y una segunda muestra de 14986 observaciones con una media de 67,86 y una desviación típica de 61,0, el estadístico t calculado es igual a 1,78572. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -1,65257 y 33,3326.

Continuamos con las imágenes 11 y 12

Resumen Estadístico

	M12PB080011	M12PB080012
Frecuencia	14986	17089
Media	67,8683	64,6969
Varianza	3721,9	3597,93
Desviación típica	61,0074	59,9827
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	15,8749	20,8318
Curtosis tipificada	-33,811	-34,2473

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 67,86 y 64,69
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 61,0 y 59,98
 Tamaños de la Muestra = 100 y 100

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 3,17 +/- 16,8704 [-13,7004;20,0404]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 0,370549
 p-Valor = 0,71137
 No rechazar la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < > 0,0$

Dada una muestra de 14986 observaciones con una media de 67,86 y una desviación típica de 61,0 y una segunda muestra de 17089 observaciones con una media de 64,69 y una desviación típica de 59,98, el estadístico t calculado es igual a 0,370549. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -13,7004 y 20,0404.

Para las imágenes 12 y 13

Resumen Estadístico

	M12PB080012	M12PB080013
Frecuencia	17089	19137
Media	64,6969	63,05
Varianza	3597,93	3412,99
Desviación típica	59,9827	58,4208
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	180,0
Rango	180,0	180,0
Asimetría tipi.	20,8318	22,2227
Curtosis típicada	-34,2473	-34,879

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 64,69 y 63,05
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 59,98 y 58,42
 Tamaños de la Muestra = 100 y 100

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 1,64 +/- 16,5115 [-14,8715;18,1515]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 0,195871
 p-Valor = 0,844912
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0,0$

Dada una muestra de 17089 observaciones con una media de 64,69 y una desviación típica de 59,98 y una segunda muestra de 19137 observaciones con una media de 63,05 y una desviación típica de 58,42, el estadístico t calculado es igual a 0,195871. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede

rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -14,8715 y 18,1515.

Los resultados finales confeccionando las medias geométricas de las imágenes de la muestra nos permite obtener los siguientes datos

$$f_p = 0,4602$$

$$a_{11} = \begin{bmatrix} 0,6401 & 0 \\ 0 & 0,3599 \end{bmatrix}$$

5.4.- Análisis de resultados globales

A continuación se expone la interpretación de los resultados de los análisis de ANOVA²⁴, que nos permitirá conocer el comportamiento de los datos que se han obtenido, así como las posibles predicciones y correlaciones que pueden detallarse entre los datos obtenidos y las variables consideradas en el experimento.

El resumen de todos los datos que se han obtenidos quedarían expresados mediante una tabulación²⁵ y una codificación específica. Para ello los valores de la variable mas bajos se asignará un valor de -1. Para un valor intermedio se asignará un valor de 0 y para el valor mas elevado se le asigna un valor de 1, tabla 13

	fp	a11	vel	comp	refri
1	0,483	0,6552	-1	-1	1
2	0,479	0,6527	-1	-1	-1
3	0,4672	0,6448	-1	1	1
4	0,4299	0,6199	-1	1	-1
5	0,4269	0,618	0	-1	1
6	0,3891	0,5928	0	-1	-1
7	0,635	0,7567	0	1	1
8	0,5256	0,6838	0	1	-1
9	0,414	0,6093	1	-1	1
10	0,4501	0,6334	1	-1	-1
11	0,4369	0,6246	1	1	1
12	0,4602	0,6401	1	1	-1

Tabla 13.- Valores de resultados codificados

Se inicia la introducción de resultados en el programa Statgraphics, que presenta la siguiente respuesta

Resumen del Diseño.

Clases de Diseño: En Pantalla

Nombre de Diseño: Factorial mezclado 3*2^2

Nombre de fichero: <mitesisultim>

Base de Diseño

 Número de factores experimentales: 3 Número de bloques: 1
 Número de residuos 1
 Número de ejecuciones: 12 Error Grados de libertad: 4
 Aleatorizado: Si

Factores	Pequeño	Grande	Unidades	Continuo
Vel_inyecc	-1.0	1.0	%	Si
Compact	-1.0	1.0	%	Si
Refrig	-1.0	1.0	seg	Si

Respuestas Unidades

 orien

Ha creado Factorial mezclado diseños que estudiaran los efectos de 3 factores en 12 ejecuciones. El diseño será ejecutado en un solo bloque. El orden de los experimentos se ha aleatorizado totalmente. Esto protegerá contra los efectos de variables ocultas.

El resumen del análisis queda de la siguiente manera

 Nombre de fichero: mitesultim.sfx

Efectos estimados para orien

 promedio = 0,662825 +/- 0,0269609
 A:Vel_inyecc = -0,0163 +/- 0,0381285
 B:Compact = 0,03475 +/- 0,0311318
 C:Refrig = 0,0143167 +/- 0,0311318
 AA = -0,05565 +/- 0,0660404
 AB = 0,0163 +/- 0,0381285
 AC = -0,01675 +/- 0,0381285
 BC = 0,0131167 +/- 0,0311318

 Los errores estándar están basados en un error total con 4 g.l.

Análisis de la Varianza para orien

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A:Vel_inyecc	0,00053138	1	0,00053138	0,18	0,6910
B:Compact	0,00362269	1	0,00362269	1,25	0,3269
C:Refrig	0,000614901	1	0,000614901	0,21	0,6695
AA	0,00206462	1	0,00206462	0,71	0,4469
AB	0,00053138	1	0,00053138	0,18	0,6910
AC	0,000561125	1	0,000561125	0,19	0,6831
BC	0,000516141	1	0,000516141	0,18	0,6952

Error Total	0,0116302	4	0,00290756
-------------	-----------	---	------------

Total (corr.)	0,0200725	11	
---------------	-----------	----	--

R-cuadrado = 42,0588 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0,0 por ciento

Error Estándar de Est. = 0,0539218

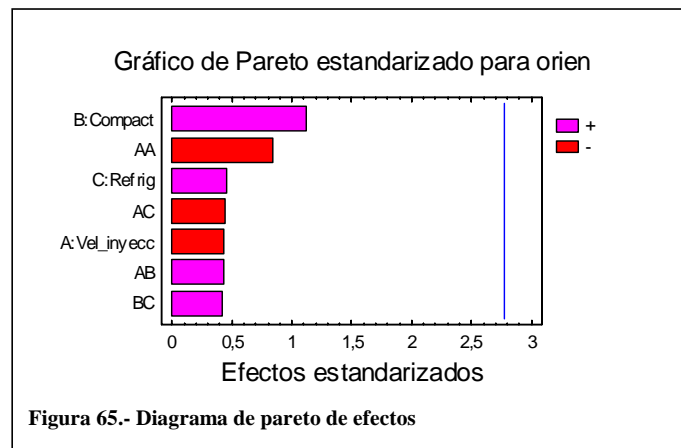
Error absoluto de la media = 0,0267

Estadístico Durbin-Watson = 1,90036 (P=0,4713)

Autocorrelación residual Lag 1 = -0,236112

La tabla de ANOVA divide la variabilidad en orien en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos. Posteriormente se prueba la significación estadística de cada efecto comparando la media al cuadrado contra una estimación del error experimental. En este caso, 0 de los efectos tienen los p-valores inferiores a 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero al 95,0% de nivel de confianza.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo así ajustado explica el 42,0588% de la variabilidad en orien. El estadístico R-cuadrado ajustado, el cual es más adecuado para la comparación de números diferentes de variables independientes, es 0,0%. El error estándar de la estimación muestra la desviación normal de los residuos para ser 0,0539218. El error absoluto de la media (MAE) de 0,0267 es el promedio del valor de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Puesto que el p-valor es superior a 0,05, no hay indicios de correlación de serie en los residuos.



Mediante el diagrama de pareto se puede observar cual es la significación de cada variable sobre el resultados de la orientación. En nuestro caso se observa una fuerte influencia del parámetro de la compactación sobre el efecto de orientación, seguido prácticamente del mismo valor de las otras dos variables.

Las variables de dispersión de cada variable quedarían reflejados en las siguientes ilustraciones, figura 66

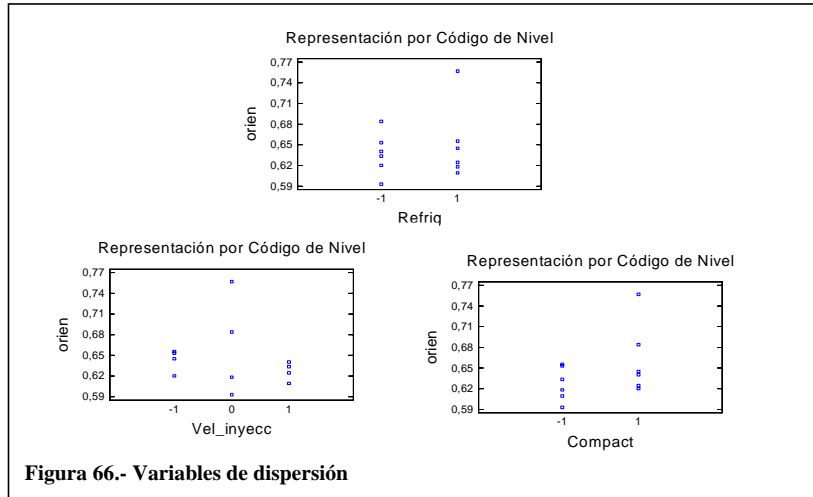


Figura 66.- Variables de dispersión

El grafico de medias para cada una de las variables se puede observar en la figura 67

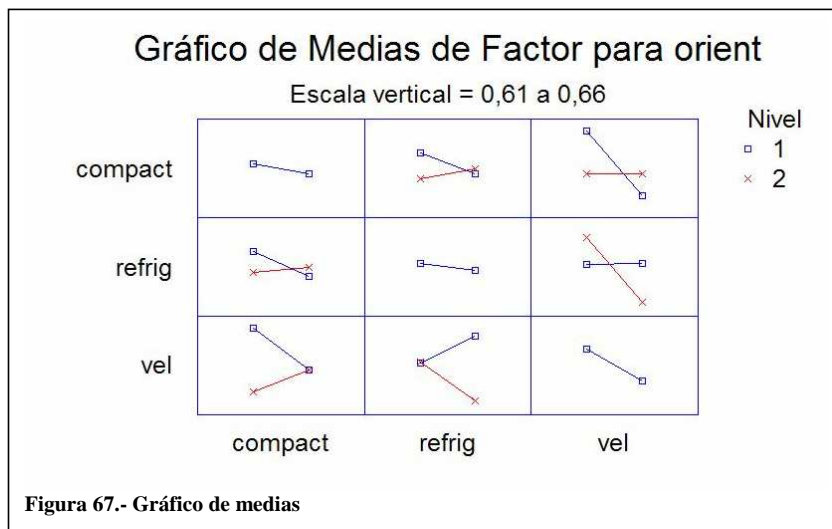
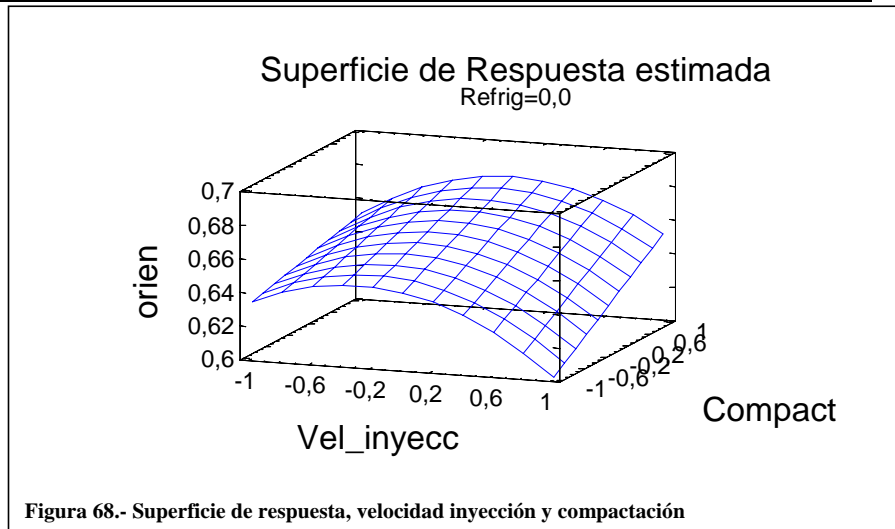
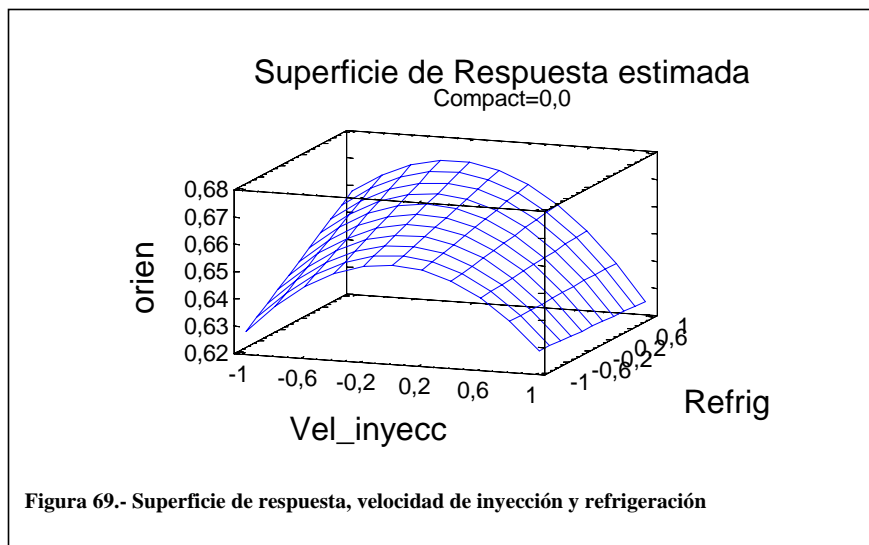


Figura 67.- Gráfico de medias

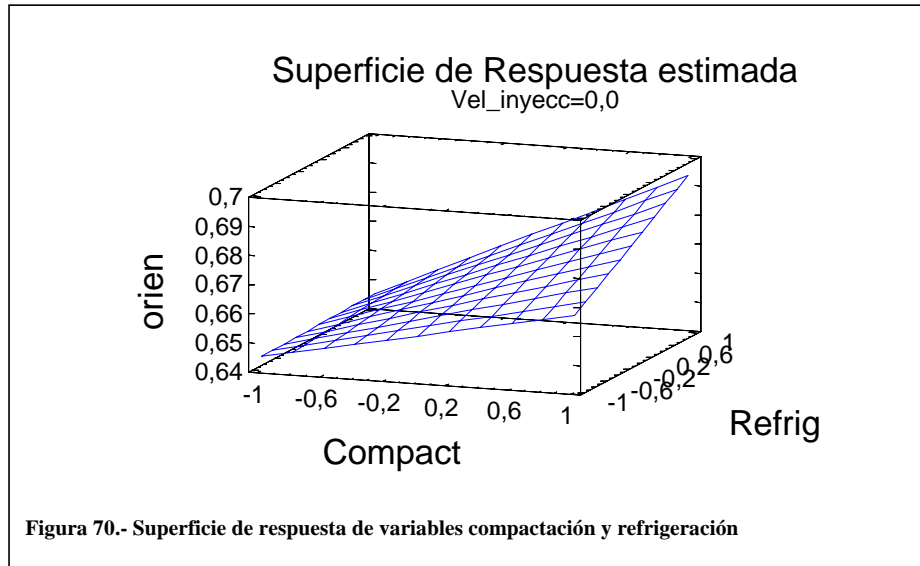
Podemos observar las superficies de respuesta mediante este software que nos permitirá conocer cual es el comportamiento de la variable resultado según la aplicación de cada una de las variables, figura 68



Una forma similar la encontramos en la superficie de respuesta de las variables de velocidad de inyección y refrigeración, figura 69.

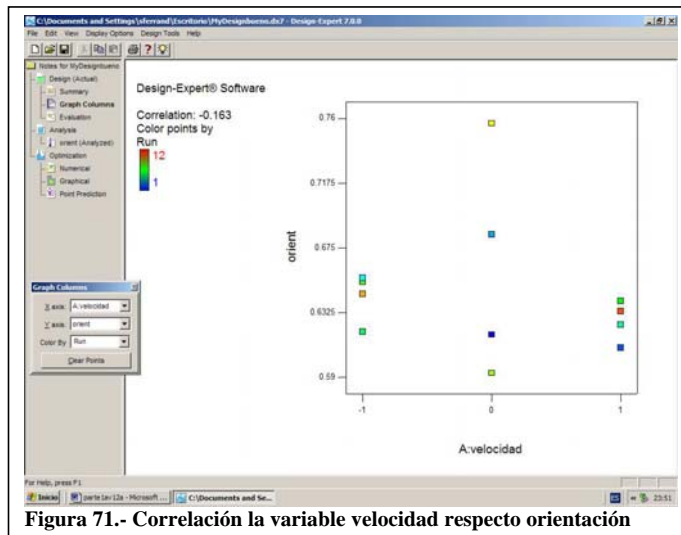


La ultima relación de variables la encontramos con compactación y refrigeración, para poder conocer el comportamiento de la orientación, figura 70



Mediante el uso del programa Design- Expert™ confeccionamos un nuevo análisis de manera que nos permita obtener una superficie de respuesta de la variable orientación respecto de las variables independientes de las que depende. Para comenzar se introducen los datos en una pantalla similar a la del programa anterior.

El primer análisis obtenemos las graficas de correlación de cada una de las variables respecto de la variable resultante, orientación, figura 71.



Seguidamente realizamos la misma operación para las variables de compactación y de refrigeración, figura 72.

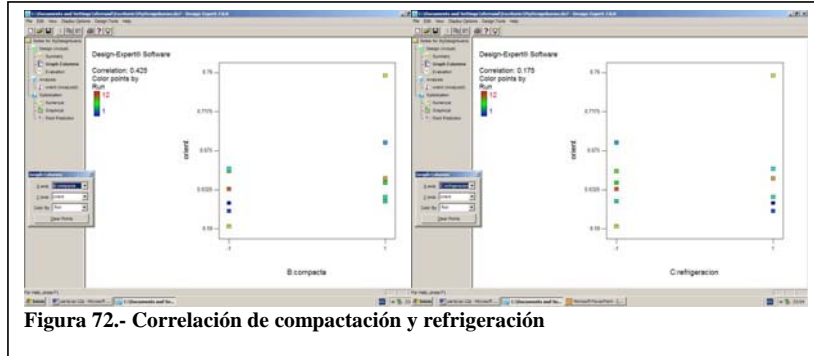


Figura 72.- Correlación de compactación y refrigeración

Los resultados numéricos quedarían expresados como sigue:

Response	1	orient	0				
Transform:	Square root	Constant:					
ANOVA for Response Surface Quadratic Model (Aliased)							
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]							
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	Prob > F	
Model	0.017	7	2.373E-003	0.96	0.5122		not significant
A-velocidad	2.726E-004	1	2.726E-004	0.11	0.7479		
B-compacta	6.608E-003	1	6.608E-003	2.66	0.1371		
C-refrigeracion	1.404E-003	1	1.404E-003	0.57	0.4711		
AB	1.576E-003	1	1.576E-003	0.64	0.4460		
AC	3.584E-004	1	3.584E-004	0.14	0.7127		
BC	1.170E-003	1	1.170E-003	0.47	0.5096		
A ²	2.335E-003	1	2.335E-003	0.94	0.3573		
B ²	0.000	0					
Residual	0.022	9	2.481E-003				
Lack of Fit	0.022	4		5.582E-003			
Pure Error	0.000	5		0.000			
Cor Total	0.039	16					

The "Model F-value" of 0.96 implies the model is not significant relative to the noise. There is a

51.22 % chance that a "Model F-value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case there are no significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy),

model reduction may improve your model.

Std. Dev.	0.050	R-Squared	0.4265
Mean	0.69	Adj R-Squared	-0.0195
C.V. %	7.27	Pred R-Squared	-1.0261
PRESS	0.079	Adeq Precision	3.145

A negative "Pred R-Squared" implies that the overall mean is a better predictor of your response than the current model.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio of 3.14 indicates an inadequate signal and we should not use this model to navigate the design space.

Factor	Coefficient	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	0.70	1	0.021	0.65	0.75	
A-velocidad	-5.088E-003	1	0.015	-0.040	0.030	1.04
B-compacta	0.021	1	0.013	-8.026E-003	0.050	1.11
C-refrigeracion	9.583E-003	1	0.013	-0.019	0.038	1.11
AB	0.013	1	0.016	-0.023	0.048	1.10
AC	-5.996E-003	1	0.016	-0.042	0.030	1.10
BC	8.747E-003	1	0.013	-0.020	0.038	1.02
A ²	-0.025	1	0.025	-0.082	0.033	1.02
B ² ALIASED	Intercept					

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$\begin{aligned} \text{Sqrt(orient)} &= \\ +0.70 & \\ -5.088E-003 & * A \\ +0.021 & * B \\ +9.583E-003 & * C \\ +0.013 & * A * B \\ -5.996E-003 & * A * C \\ +8.747E-003 & * B * C \\ -0.025 & * A^2 \end{aligned}$$

La interacciones entre variables quedan representadas en la grafica 73, que muestra la existencia de interacciones entre las variables de compactación y velocidad de inyección.

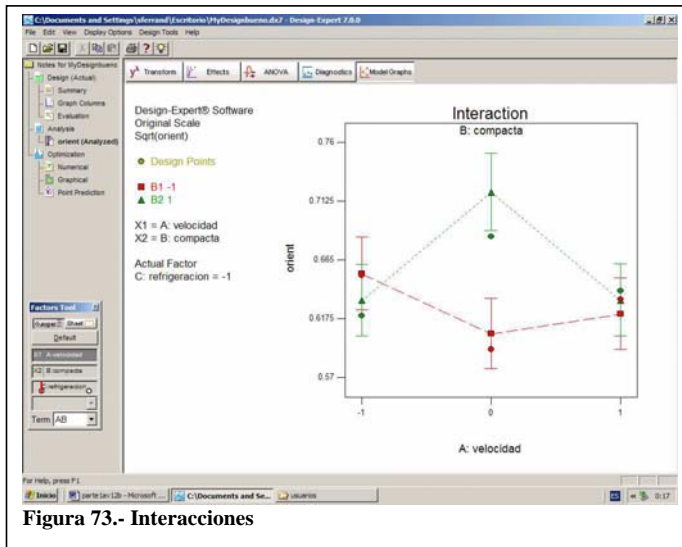


Figura 73.- Interacciones

Por tanto esta ultima expresion será la de la curva de regresión con objeto de obtener la superficie de respuesta como la que se observa en la figura 74

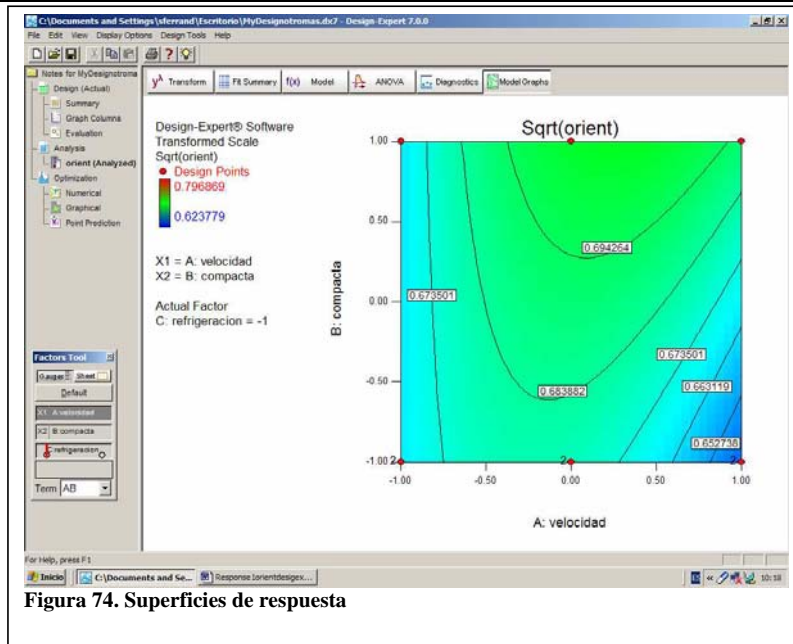


Figura 74. Superficies de respuesta

La representación de las curvas a nivel, figura 70, nos indican el efecto que se observa sobre la orientación al tener una variación de la velocidad de inyección y la compactación, para un valor de refrigeración bajo (-1). La interpretación será una refrigeración rápida.

La visualización tridimensional nos permitirá reconocer mejor la disposición espacial de la superficie, figura 75.

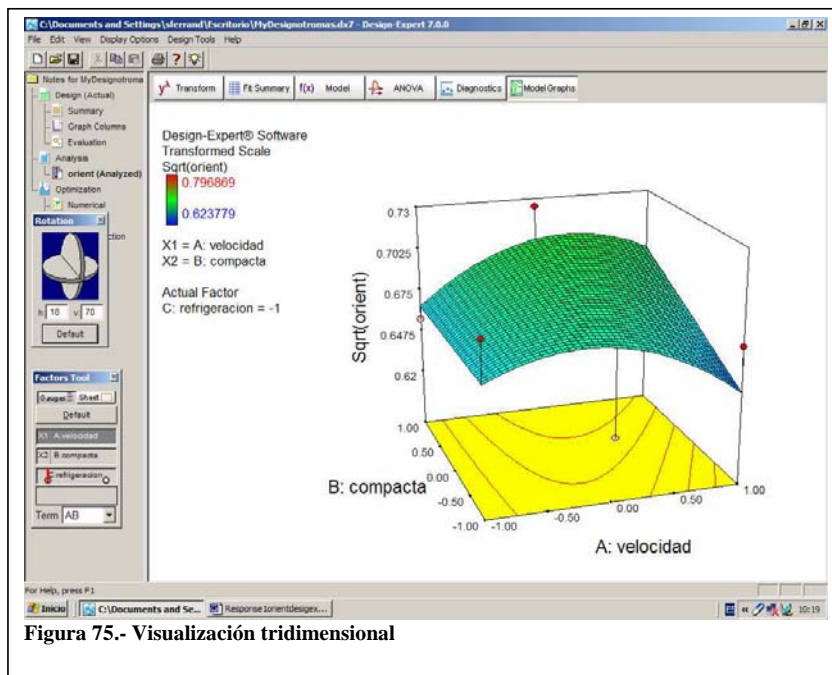


Figura 75.- Visualización tridimensional

La representación de las curvas a nivel, figura 76, nos indican el efecto que se observa sobre la orientación al tener una variación de la velocidad de inyección y la compactación, para un valor de refrigeración alto (1). La interpretación será una refrigeración lenta (10 segundos).

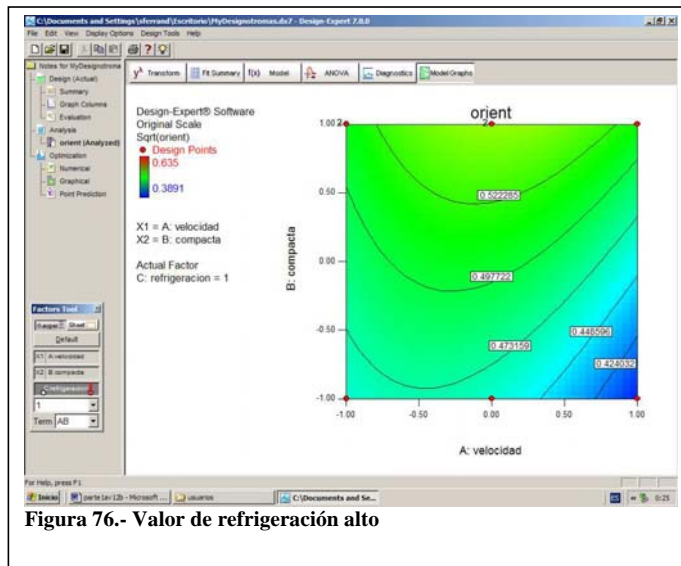


Figura 76.- Valor de refrigeración alto

Al igual que antes si se muestra la superficie tridimensionalmente se podrá observar las variaciones de una manera mas clara, figura

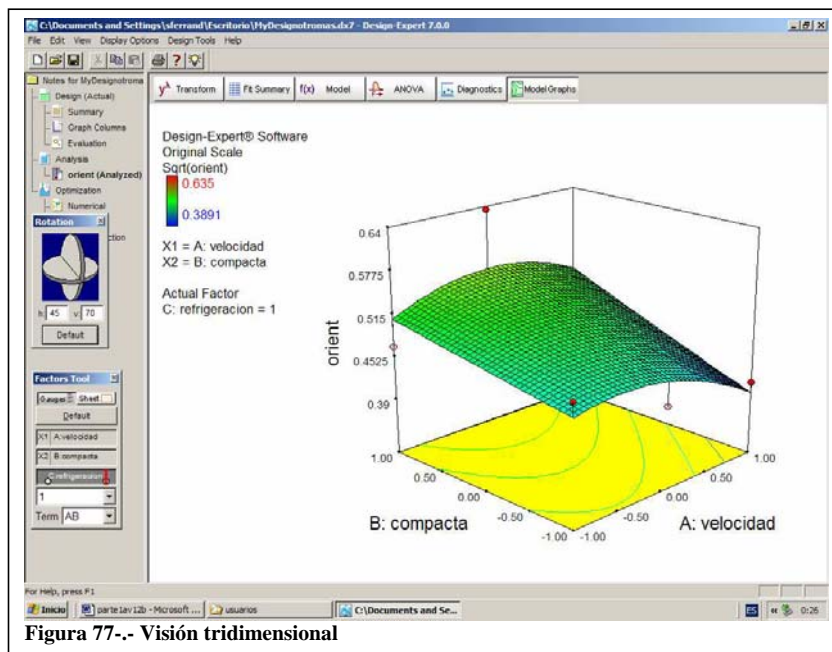


Figura 77.- Visión tridimensional

5.5.- Conclusiones parciales

Podemos alcanzar tras el estudio varias conclusiones parciales. Sobre la metodología empleada los resultados nos indican que los valores encontrados se hallan dentro de los valores de orientación típicos analizados mediante otras metodologías. Estas metodologías han sido expuestas en varias ocasiones por autores como Thomason, Davison y otros. La técnica a la que nos referimos es el análisis de imágenes de plano inclinado de la probeta inyectada. Autores como Lafranche⁶ muestran, ocasionalmente sobre fibras cortas, orientaciones superficiales que contienen valores del tensor orientación de 0,4 a 0,55. Nuestros estudios presentan valores que oscilan entre 0,5 y 0,7 para el valor mas elevado.

Paralelamente se ha realizado el cálculo e implementación del indicador de Hermans. Esta función nos ha marcado resultados similares al del tensor orientación. Puede ser interesante como alternativa comparativa al del tensor.

Por parte del estudio de las muestras implicadas en el diseño de experimentos, podemos observar que los resultados obtenidos tienen valores similares, del orden de 0,6. Existe un valor máximo de 0,75. Esta orientación máxima se obtiene en la muestra 7 que se corresponde con unos parámetros de transformación como velocidad de inyección media, compactación alta y refrigeración alta. A su vez el valor que se corresponde con la orientación más baja se corresponde con los valores de velocidad de inyección media, compactación baja y refrigeración baja.

Sobre el estudio estadístico podemos indicar que según el gráfico de Pareto, la variable de compactación es que mayor peso de influencia ha mostrado sobre la variable de respuesta que es la orientación en nuestro caso. El siguiente valor de mayor influencia ha sido la variable de refrigeración, aunque a mayor distancia que la de compactación. Dado que existen interacciones, estas muestran su mayor peso en la combinación de las variables de velocidad de inyección y la de compactación.

Otro estudio que se ha planteado ha sido la evolución de la orientación en cada una de las muestras individuales. Ello nos permite conocer como se orientan las fibras en una composición del 50% de fibra larga de vidrio. Las conclusiones esenciales del experimento han sido que existe una evolución de la orientación mas elevada en las zonas más cercanas al punto de entrada y una orientación más aleatoria a medida que nos alejamos del punto de entrada.

Si se necesitará correlacionar mas los valores de orientación, la metodología nos permite actuar sobre capas, de fácil preparación y en la cantidad necesaria en función de la exactitud necesaria.

5.6.- Referencias.

- ¹ Thomason. "The influence of fibre properties of the performance of glass-fibre-reinforced polyamide 6,6.". *Compos. Sci. and Tech.* 59, 1999.
- ² S. G. Advani, E. M. Sozer. "Process modelling in composites manufacturing". Ed. Marcel Dekker. ISBN 0824708601, 2003
- ³ Thomason. "The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene. 6. the properties of injection moulded long fibre PP at high fibre content". *Compos. Part a. apl. Sci. and man.* 36, 2005.
- ⁴ Ulf W. Gedde. "Chain Orientation". KTH Fiber- och polymerteknologi. Polymer physics course. 2006
- ⁵ Kun, Zhong. "Research on the behavior of fiber orientation probability distribution function in the planar flows". *Jour. Of zhejiang sci.* 6A, 4, 2005.
- ⁶ Lafranche, Krawczak, Ciolczyk, Maugey. "Injection moulding of long glass fiber reinforced polyamide 66: Processing conditions/microstructure/Flexural properties relationship". *Adv. In pol. Tech.*, vol 24, 2, 2005.
- ⁷ Eberhardt, Clarke. "Fibre orientation measurements in short-glass-fibre composites. Part I: Automated, high-angular-resolution measurement by confocal microscopy". *Compos. Sci. tech.* 61, 2001
- ⁸ Cintra, J.;Tucker III, C. "Orthotropic closure approximations for flow-induced fiber orientation". *J. of Rheology*, 39, 6, 1995
- ⁹ Yasuda, Mori, Nakamura. "A new visualization technique for short fibers in a slit flow of fiber suspension". *Int. jour. Of engi, sci.* 40. 2002.
- ¹⁰ Yasuda, Kyoto, Mori. "An experimental study of flow-induced fiber orientation and concentration distributions in a concentrated suspension flow through a slit channel containing a cylinder". *Rheol. Acta.* 43, 2004.
- ¹¹ Carl Y. W. Ma. "A design approach to a computer-controlled injection-molding machine". *Pol. Eng. And Sci.* Vol. 14 n° 11, 1974.
- ¹² David Kazmer. "Best practices in injection molding". *Journal of injection molding technology*". Vol.1, n° 1, 1997.
- ¹³ Reilly, Doyle, David Kazmer. "An assessment of dynamic feed control in modular tooling". *Journal of injection molding technology*". Vol. 5, n° 1, 2001.
- ¹⁴ Silvia Barbosa y J. Kenny. "Processing of short fiber reinforced polypropylene. II: Statistical study of the effects of processing conditions on the impact strength". *Pol. Eng. Sci.* vol. 39. n°. 10. 1999
- ¹⁵ P. Dave, D. Chundury. "Effect of injection molding conditions on the properties of filled and reinforced polypropylene". *Journal of inject. Molding tech.* vol 1. n° 3, 1997.
- ¹⁶ Anónimo. "Celstran®. Compel®. Long fibre reinforced thermoplastics LFT. Información técnica de Ticona™. 2000.
- ¹⁷ Pertusa Grau, José. "Técnicas de análisis de imagen. Aplicaciones en Biología". Universitat de Valencia, 2003.
- ¹⁸ Fredrik Vahlund, R. Gebart. "Analysis of an image processing method for fiber orientation in polymer composites". *Pol. Compos.*, vol 22. n° 3, june 2001.
- ¹⁹ Sirkis, Cheng, Dasgupa, Pandelidis. "Image processing based method of predicting stiffness characteristics of short fiber reinforced injection molded parts". *Journal of compos. Mat.* 28, n°9, 1994.
- ²⁰ Yang, Chin. "Mechanical properties of aligned long glass fiber reinforced polypropylene. I: Tensile Strength". *Pol. Comp.* vol. 20. n° 2. 1999.
- ²¹ T.S. Creasy, Y.S. Kang. "Fiber orientation during equal channel angular extrusion of short fiber reinforced thermoplastic". *Jour. Thermo.Comp. mat.* Vol. 17. 2004
- ²² Yukio Sanomura, Munehiro Kawamura. "Fiber orientation control of short-fiber reinforced thermoplastics by ram extrusion". *Pol. Comp.* vol.24, n°5. 2003.
- ²³ Montgomery. "Diseño y análisis de experimentos ". Limusa-Wiley. 2005. ISBN 9681861566
- ²⁴ Montgomery, G.C. Runger. "Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería". McGrawHill. 1996. ISBN 0471540412
- ²⁵ Dave, Chundury. "Effect of injection molding conditions on the properties of filled and reinforced polypropylene". *Jour. Inject. Molding tech.* vol 1, 3, 1997

CAPITULO 6

APLICACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO A MUESTRAS TRANSFORMADAS POR COMPRESIÓN

6.1.- Introducción

El moldeo por compresión es una de las tecnologías de transformación de termoplásticos más antigua y a la vez es la candidata ideal para poder fabricar elementos planos, composites con paredes finas a un coste relativamente bajo.

El proceso de fabricación puede presentar pequeñas variaciones de trabajo, pero fundamentalmente suele cubrir unas etapas elementales¹. Inicialmente debe prepararse el material que va a transformarse o la también denominada carga. Ésta, una vez preparada, debe depositarse en un molde previamente precalentado. Los materiales típicos utilizados serían las laminas de compuestos de moldeo, composites a granel, laminas de termoplásticos reforzados con fibras largas o bien termoplásticos reforzados con fibras de vidrio.

El polipropileno es el termoplástico mas usado como matriz de compuestos como el LFT o el GMT, termoplásticos reforzados con fibras largas o bien termoplásticos reforzados con fibras de vidrio.

Una vez que el material es depositado en el interior del molde, el molde se cierra, aplicándose calor y presión², causando que el material fluya y rellene la cavidad del molde. Una vez finalizada esta etapa, debe aplicarse una etapa de enfriamiento hasta que la pieza este finalizada.

La aplicación primordial que tiene el moldeo por compresión surge en el sector de automoción, donde además se exigen altos volúmenes de producción, resistencias a la corrosión, diseños con elevada rigidez y dureza. Este proceso por tanto, se adapta mejor al modelo de fabricación de elementos con altas cargas de refuerzos con fibras y que además suelen ser fibras largas.

En la industria aeroespacial, las aplicaciones de los elementos moldeados por compresión se reducen a partes no estructurales o bien estructuras secundarias.

El moldeo por compresión involucra un modesto flujo de material. Aunque pueda parecer pequeño, representa una importancia crítica en las propiedades estructurales de los elementos transformados. El flujo controlará la orientación de fibras³ y la temperatura junto con el tiempo de enfriamiento aportarán influencias sobre la orientación.

Fundamentalmente existen desarrollos de modelos matemáticos que detallan el comportamiento del flujo y el intercambio de calor. Dichos modelos hacen referencia, como categoría de clasificación, al espesor de la muestra estudiada. Estas categorías son muestras de pared delgada y muestras con espesores gruesos.

Los modelos de interpretación de la orientación de fibras, se basan en los modelos de función de distribución de orientación y en el de tensor orientación.

La expresión matemática de este parámetro quedaría definida según el criterio de Thomason⁴, como sigue

$$f_p = 2\langle \cos^2(\phi) \rangle - 1$$

Por otra parte el criterio empleado por Advani²⁻⁵ en la expresión del Índice de Hermans es como sigue

$$f_p = \frac{3\langle \cos^2(\phi) \rangle - 1}{2}$$

Los rangos que expresa el índice oscila entre un valor de 1 a un valor de -1. Según esta expresión se establece que la relación entre el parámetro y la orientación queda definida de la siguiente manera

Fibras alineadas a lo largo del flujo	$f_p = 1$
Distribución al azar	$f_p = 0$
Alineación transversal al flujo	$f_p = -1$

En la parte experimental se procederá a confeccionar una evaluación de la orientación aplicando dicho Índice.

Otra manera de describir el estado de orientación de las fibras es a través de la función de distribución de orientación (FOD)⁶. Una combinación de la descripción de la función de distribución de orientación y la naturaleza concisa de los parámetros de orientación es la descripción del tensor orientación.

Un enunciado del mismo puede alcanzarse por medio de la definición del tensor orientación de segundo orden

$$a_{ij} \equiv \langle p_i p_j \rangle$$

Lafranche⁷⁻⁸ lo expresa de la siguiente manera

$$a_{ij} = \int p_i p_j \psi(p, t) \partial p$$

Los componentes de este tensor de orientación para un grupo de n fibras pueden calcularse como sigue, según Eberhardt⁹

$$a_{ij} = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n p_i^k p_j^k \right) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

y cada uno de los seis componentes de cada fibra definida se expresaría como sigue:

$$a_{11}^k = \sin^2 \theta^k \cos^2 \phi^k$$

$$a_{22}^k = \cos^2 \theta^k \cos^2 \phi^k$$

$$\begin{aligned}
 a_{33}^k &= \cos^2 \theta^k \\
 a_{12}^k &= a_{21}^k = \text{sen}^2 \theta^k \cos \phi^2 \text{sen} \phi^k \\
 a_{13}^k &= a_{31}^k = \text{sen} \theta^k \cos \theta^k \cos \phi^k \\
 a_{23}^k &= a_{32}^k = \text{sen} \theta^k \cos \theta^k \text{sen} \phi^k
 \end{aligned}$$

Este tensor de segundo orden caracteriza el estado de orientación con respecto a la dirección del flujo, como dirección de referencia, de manera que

- $a_{11} < 0,35$ se considera perpendicular a la dirección de flujo
- $a_{11} > 0,7$ se considera orientación paralela al flujo
- $0,5 < a_{11} < 0,6$ se considera una orientación aleatoria

Para la determinación de una orientación en un plano y aplicando las propiedades conmutativas antes expuestas encontramos que el tensor orientación a_{ij} se compone de cuatro términos. Cuando el término a_{11} es igual a 1 todas las fibras están alineadas a lo largo de un eje. Cuando los elementos a_{11} y a_{22} son iguales a 0,5 se considera que esta alineadas de forma aleatoria.

Advani y Tukur¹⁰ también han definido el tensor de orientación de cuarto orden de la siguiente manera

$$a_{ijkl} = \langle p_i p_j p_k p_l \rangle$$

o bien

$$a_{ijkl} = \int_S p_i p_j p_k p_l \psi dA$$

donde ψ se define como la función de densidad de probabilidad de orientación y S representa la esfera unidad.

Nuestro cálculo de orientación de fibras se realizará mediante la aplicación de las formulaciones descritas por Yasuda¹¹⁻¹² para un flujo concentrado con fibras en suspensión y que además son fibras transparentes. Inicialmente clasifica el tipo de suspensión con el que podemos encontrarnos según

- $nL^3 < 1$ Suspensión diluida
- $1 < nL^3 < \frac{L}{D}$ Suspensión semidiluida
- $\frac{L}{D} < nL^3$ Suspensión concentrada

donde D es el diámetro de las fibras, L es la longitud y n es la densidad de fibras. Los valores del tensor orientación de segundo orden se calculan mediante la expresión

$$a_{11} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n \text{ y el valor del término } a_{12} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{sen} \theta_n \cos \theta_n$$

en el resto de los términos se aplica que $a_{11} + a_{22} = 1$ y $a_{12} = a_{21}$.

En el campo de tratamiento y medida de errores se aplicara el criterio presentado por Vahlund¹³⁻¹⁴ en el que aparte de explicar una metodología de captación de imágenes, desarrolla un tratamiento de errores según el número de fibras implicadas en el proceso. Nos indica un método estadístico de tratamiento de error. El proceso al que se aplica toda esta metodología es en el moldeo por compresión de materiales compuestos reforzados con fibra corta de vidrio.

La expresión de dicho error quedará expuesta mediante la expresión

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{m-1}{n}}$$

donde n es el numero de fibras analizadas, m representa el número de intervalos y ε el error relativo.

6.2.- Procedimiento operatorio

El trabajo de preparación de muestras, no ha necesitado de ningún procedimiento de quemado de muestra con en la transformación por inyección. Se han preparado dos muestras, empleando PP reforzado al 50% con fibra larga de vidrio. El tipo de material empleado ha sido suministrado por la casa Ticona®, grado Celstran™ PP –GF50-04 0403P10/10.

La primera muestra ha sido preparada colocando de una manera expresa, los pellets orientados en una única dirección predominante. Esta muestra responde a la etiqueta orientada. La segunda muestra ha sido preparada mediante la adición del mismo tipo de pellet, pero de una manera aleatoria. Una vez cerrado el molde se ha aplicado calor en una prensa de platos calientes.

Las condiciones de proceso han sido las siguientes:

Tiempo	Temperatura	Presión
15 minutos	140°C	450 Kg.

Tabla 1.- Condiciones de proceso

El resto de condiciones han sido constantes a los largo de todas las transformaciones. La primera muestra se obtiene mediante una adición de material de forma aleatoria, figura 1.



Figura 1.- Imagen aleatoria

El espesor de la placa es el mismo que el espesor del pellet pultrusionado y se han evitado solapamientos.

La distribución orientada, figura 2, nos permitirá conocer el comportamiento del procedimiento de tratamiento de imagen desarrollado.



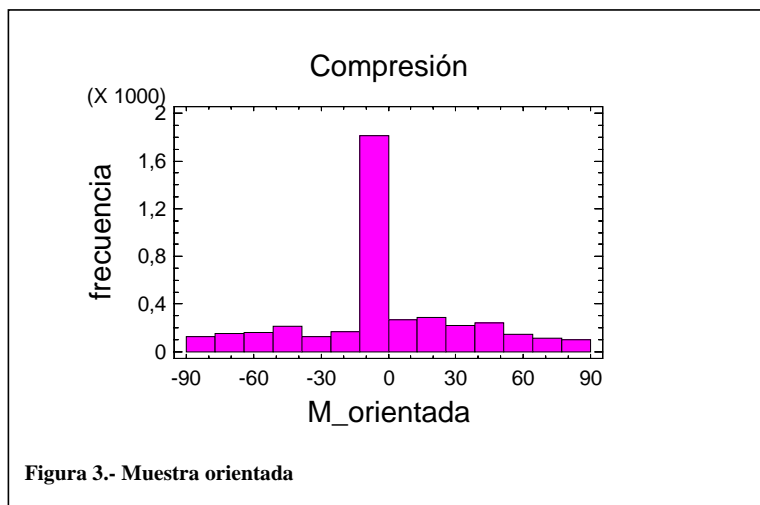
Figura 2.- Muestra orientada

Una vez aplicado el procedimiento desarrollado de tratamiento de imagen y cálculo de las orientaciones de las fibras, se realizará una comparación del error de determinación de la orientación de fibras mediante la aplicación de una metodología manual que permitirá contrastar la orientación y permitirá determinar el error cometido.

6.3.- Resultados y discusión

El histograma puede ser utilizado para describir la distribución de la orientación de fibras en una muestra. Además es posible evaluar mediante un índice el resumen de la distribución de orientación, que describe la dirección mayoritaria de la distribución de orientación.

Inicialmente se estudia la muestra que ha sido preparada con una fuerte orientación. Tras la aplicación de la macro de algoritmos, los resultados muestran una orientación predominante de 0° u orientación horizontal, figura 3.



El resto de ángulos se presenta con una distribución bastante homogénea. Con el mismo procedimiento se ha realizado la mediación de la orientación en una muestra aleatoria. La distribución de frecuencias ha quedado, figura 4, menos predominante que la

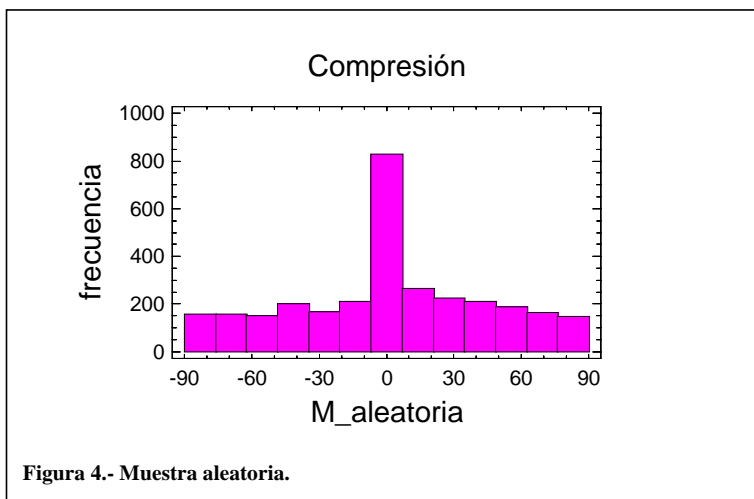


figura anterior. Completada esta distribución de frecuencias procederemos a realizar la comprobación estadística de la compatibilidad de los datos antes expuestos. Los resultados son

Resumen del Procedimiento

Muestra 1: M_aleatoria

Muestra 2: M_orientada

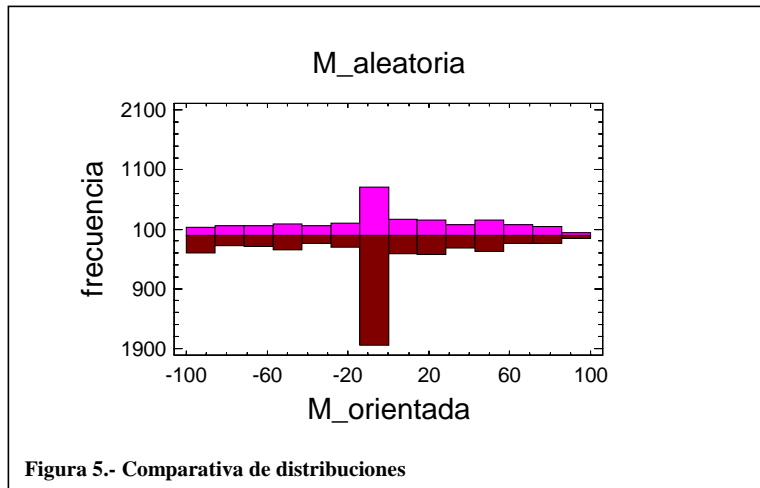
Muestra 1: 3155 valores -90,0 hasta 89,958

Muestra 2: 4370 valores -90,0 hasta 89,947

Resumen Estadístico

	M_aleatoria	M_orientada
Frecuencia	3155	4370
Media	-0,951383	-4,77398
Varianza	2056,42	1664,18
Desviación típica	45,3477	40,7944
Mínimo	-90,0	-90,0
Máximo	89,958	89,947
Rango	179,958	179,947
Asimetría tipi.	-2,95659	-9,02801
Curtosis tipificada	-6,63593	0,695669

Las diferencias pueden observarse mejor si ambas distribuciones coinciden en mismo grafico, figura 5.



Analizando el contraste de hipótesis observamos

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = -0,95 y -4,77
Desviaciones Típicas de la Muestra = 45,35 y 40,79
Tamaños de la Muestra = 3155 y 4370

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 3,82 +/- 12,0293 [-8,20926;15,8493]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
Alternativa: no igual
Estadístico t calculado = 0,626276
p-Valor = 0,531863
No rechazar la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

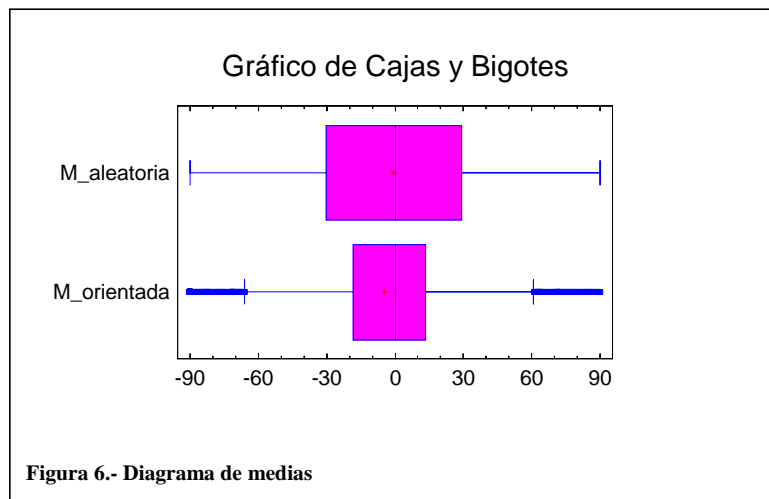
(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 3155 observaciones con una media de -0,95 y una desviación típica de 45,35 y una segunda muestra de 4370 observaciones con una media de -4,77 y una desviación típica de 40,79, el estadístico t calculado es igual a 0,626276. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -8,20926 y 15,8493.

Los valores de dispersión y medias se observan en la figura 6.



Los valores numéricos encontrados de las muestras analizadas, nos muestran de una manera más sencilla, los resultados de cada ensayo, tabla

	<u>fp</u>	<u>a11</u>
M_orient	0,5552	0,7034
M_aleatoria	0,4351	0,6234

Tabla 2.- Resultados de cada muestra

Los valores de las matrices que definen el tensor orientación quedarían reflejadas de la siguiente manera, para la muestra orientada:

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,7034 & 0 \\ 0 & 0,2966 \end{bmatrix}$$

Para la otra muestra aleatoria el tensor orientación se reflejaría de manera similar

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,6234 & 0 \\ 0 & 0,3766 \end{bmatrix}$$

Con objeto de confeccionar un análisis de errores se ha procedido a realizar una serie de mediciones mediante una técnica manual, pero que nos da la suficiente confianza para considerar la medición correcta.

La primera muestra orientada nos muestra un histograma del tipo de la figura 7, con grandes predominancias en las orientaciones centrales.

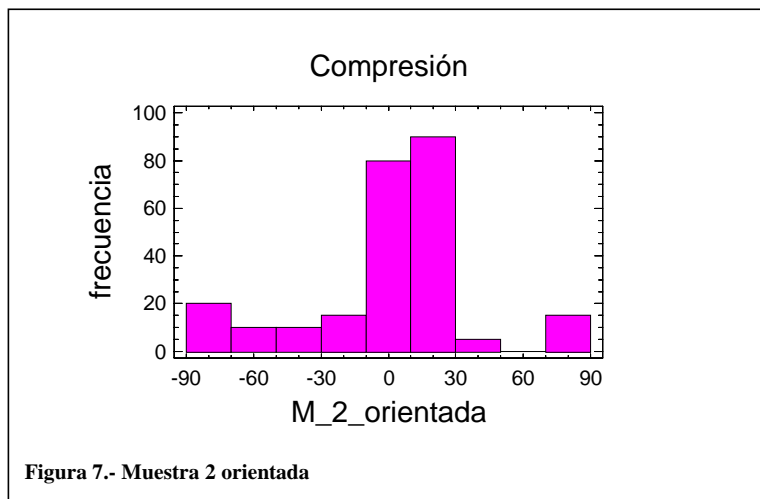
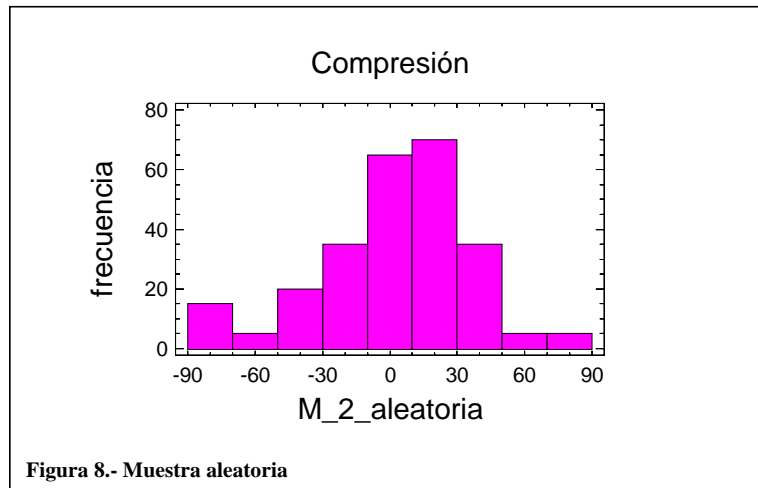


Figura 7.- Muestra 2 orientada

Para la muestra distribuida al azar, el histograma nos muestra los siguientes valores mas distribuidos que en la muestra anterior, figura 8.



Se realiza una comparación de los valores estadísticos de la muestras para conocer la compatibilidad de las mismas. Los valores son

Resumen del Procedimiento

Muestra 1: M_2_aleatoria

Muestra 2: M_2_orientada

Muestra 1: 255 valores -86,2053 hasta 70,1775

Muestra 2: 245 valores -89,1319 hasta 88,3397

Resumen Estadístico

	M_2_aleatoria	M_2_orientada
Frecuencia	255	245
Media	2,51327	1,36067
Varianza	1180,64	1437,82
Desviación típica	34,3605	37,9186
Mínimo	-86,2053	-89,1319
Máximo	70,1775	88,3397
Rango	156,383	177,472
Asimetría tipi.	-4,76839	-2,43263
Curtosis tipificada	1,83708	2,87556

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 2,51 y 1,36
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 34,36 y 37,91
 Tamaños de la Muestra = 255 y 245

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 1,15 +/- 6,35274 [-5,20274;7,50274]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 0,355666
 p-Valor = 0,722241
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 255 observaciones con una media de 2,51 y una desviación típica de 34,36 y una segunda muestra de 245 observaciones con una media de 1,36 y una desviación típica de 37,91, el estadístico t calculado es igual a 0,355666. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -5,20274 y 7,50274.

Los valores numéricos de la función de Hermans y el del tensor de orientación son

	fp	a11
M_orient	0,6223	0,7482
M_aleatoria	0,4612	0,6608

Tabla 3.- Muestras de control

Su representación mediante la forma matricial se expresaría como sigue, para la muestra orientada

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,7482 & 0 \\ 0 & 0,2518 \end{bmatrix}$$

De manera equivalente para la muestra aleatoria la expresión tomaría la forma

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,6608 & 0 \\ 0 & 0,3392 \end{bmatrix}$$

Finalmente consideraremos la compatibilidad de los dos grupos de muestras mediante la aplicación del contraste de hipótesis. Los resultados obtenidos se expresan a continuación:

Resumen del Procedimiento

Muestra 1: M_control_orien

Muestra 2: M_medida_orient

Muestra 1: 245 valores -89,1319 hasta 88,3397

Muestra 2: 4370 valores -90,0 hasta 89,947

Resumen Estadístico

	M_control_orien	M_medida_orient
Frecuencia	245	4370
Media	1,36067	-4,77398
Varianza	1437,82	1664,18
Desviación típica	37,9186	40,7944
Mínimo	-89,1319	-90,0
Máximo	88,3397	89,947
Rango	177,472	179,947
Asimetría tipi.	-2,43263	-9,02801
Curtosis tipificada	2,87556	0,695669

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 1,36 y -4,77

Desviaciones Típicas de la Muestra = 37,91 y 40,7

Tamaños de la Muestra = 245 y 4370

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 6,13 +/- 10,9685 [-4,83851;17,0985]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0

Alternativa: no igual

Estadístico t calculado = 1,10211

p-Valor = 0,271752

No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$

Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 245 observaciones con una media de 1,36 y una desviación típica de 37,91 y una segunda muestra de 4370 observaciones con una media de -4,77 y una desviación típica de 40,7, el estadístico t calculado es igual a 1,10211. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -4,83851 y 17,0985.

Por lo tanto las muestras son comparables.

6.4.- Determinación de errores

Con objeto de considerar el error relativo que estamos cometiendo se realizará inicialmente una comparación entre los valores de orientación medidos manualmente o como muestra de control y los valores obtenidos mediante nuestra formulación.

La expresión que se utilizará es la siguiente:

$$\varepsilon = \frac{v_c - v_{med}}{v_c} * 100$$

donde v_c es el valor de control y v_{med} es el valor obtenido mediante la aplicación del algoritmo

$$\varepsilon = \frac{0,6608 - 0,6234}{0,6608} * 100 = 5,66 \%$$

Este valor representa el error de la muestra aleatoria. Si se aplica el criterio de Vahlund¹³, la expresión del error quedaría de la forma:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{m-1}{n}}$$

Sustituyendo los valores se obtiene un 5,34%. Este valor es muy similar al error que hemos obtenido anteriormente.

Para el valor de la muestra orientada aplicamos la misma expresión anteriormente descrita

$$\varepsilon = \frac{0,7482 - 0,7034}{0,7482} * 100 = 5,98\%$$

Si al igual que antes aplicamos la formulación de Vahlund se obtiene un valor de 4,54%. Este valor es muy aproximado al valor obtenido según nuestra metodología.

6.5.- Conclusiones parciales

La metodología empleada para el cálculo de las funciones de Hermans de orientación y los valores de las matrices del tensor de orientación se muestra, al igual que en el moldeo por inyección, válida y eficaz.

A diferencia que ha sucedido con el moldeo por inyección, en estas muestras no ha sido necesario utilizar el procedimiento de pirolisis de las muestras. Aunque podría darse el caso que se tuviera que quemar la muestra para poder acceder a inspeccionar el contenido de fibra de la muestra. La preparación de la muestra no ha tenido más complejidad que la propia transformación por compresión.

Paralelamente se ha aplicado una metodología alternativa de medición, aunque es un método más manual, laborioso y lento, pero nos ha servido para realizar la comparación de los cálculos en cada una de las muestras. Como comparación en la determinación del error se ha aplicado el criterio de Vahlund aplicado al moldeo por compresión. Los resultados han sido satisfactorios, encontrándonos en niveles de error del orden del 5%. Cabe reseñar que la misma metodología aplicada al moldeo por inyección nos mostraba errores del 2,9-3%. Por tanto los niveles de error en ambos procesos se pueden considerar similares.

6.6.- Referencias

- ¹ S. G. Advani, E. M. Sozer. "Process modelling in composites manufacturing". Ed. Marcel Dekker. ISBN 0824708601, 2003
- ² Ali, Iannace, Nicolais. "Effects of processing conditions on the impregnation of glass fibre mat in extrusion / calendering and film stacking operations". *Compos. Sci. and tech.*, 63, 2003.
- ³ Nilson, Ericson, Holmberg. "Flow induced fiber orientation in compression molded glass mat thermoplastics". *Pol. compos.* Vol 21, nº 6. 2000.
- ⁴ Thomason. "The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene. 6. the properties of injection moulded long fibre PP at high fibre content". *Compos. Part a. apl. Sci. and man.* 36, 2005.
- ⁵ Ulf W. Gedde. "Chain Orientation". KTH Fiber- och polymerteknologi. Polymer physics course. 2006
- ⁶ Kun, Zhong. "Research on the behavior of fiber orientation probability distribution function in the planar flows". *Jour. Of zhejiang sci.* 6A, 4, 2005.
- ⁷ Lafranche, Krawczak, Ciolczyk, Maugey. "Injection moulding of long glass fiber reinforced polyamide 66: Processing conditions/microstructure/Flexural properties relationship". *Adv. In pol. Tech.*, vol 24, 2, 2005.
- ⁸ Lin, Chai. "Research on the interaction of three contact fibers in the fiber suspensions". *Jour. Mat. Sci.* 40. 2005
- ⁹ Eberhardt, Clarke. "Fibre orientation measurements in short-glass-fibre composites. Part I: Automated, high-angular-resolution measurement by confocal microscopy". *Compos. Sci. tech.* 61, 2001
- ¹⁰ Cintra, J.;Tucker III, C. "Orthotropic closure approximations for flow-induced fiber orientation". *J. of Rheology*, 39, 6, 1995
- ¹¹ Yasuda, Mori, Nakamura. "A new visualization technique for short fibers in a slit flow of fiber suspension". *Int. jour. Of engi, sci.* 40. 2002.
- ¹² Yasuda, Kyoto, Mori. "An experimental study of flow-induced fiber orientation and concentration distributions in a concentrated suspension flow through a slit channel containing a cylinder". *Rheol. Acta.* 43, 2004.
- ¹³ Vahlund, Gebart. "Analysis of an image processing method for fiber orientation in polymer composites". *Pol. Compos.* Vol 22, 3, 2001.
- ¹⁴ Vahlund. F. "Fiber orientation, rheological behaviour and simulation of the compression moulding process for composite materials". Ph.D. Thesis. Lulea University. 2001.

CAPITULO 7

APLICACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO A MUESTRAS TRANSFORMADAS POR RTM

7.1.- Introducción

El moldeo de compuestos líquidos es una clase de proceso de fabricación en la cual una cavidad de molde contiene una preforma de refuerzo y sobre la cual se inyecta una resina termoestable que permita llenar los espacios vacíos en el molde¹. Posteriormente la resina cura completamente y el elemento es desmoldeado. Este proceso es utilizado en infinidad de industrias que derivan sus diseños de metal a componentes plásticos reforzados. En estas industrias se encuentran diseños tan importantes como los utilizados en sector aeroespacial, automoción, marina e industrias civiles. Las preformas reforzadas de fibra suelen ser fibras de vidrio continuas o fibras de carbono y suelen estar secadas previamente o bien pueden estar preimpregnadas cuando se colocan en la cavidad del molde. El objetivo del proceso es fabricar el componente de material compuesto, inundando completamente la preforma con resina y provocando que no existan regiones que no estén llenas.

Los refuerzos mas utilizados en este tipo de proceso son fibra de vidrio, fibra de carbono y kevlar. Estos componentes, tanto el tipo como la forma estructural son elegidos dependiendo del tipo de propiedades mecánicas necesarias, acabado superficial y el criterio de costes. Las formas estructurales típicas son tejidos, cosidos, trenzado o aleatorio.

Por su parte Pourdeyhimi² define la importancia de los elementos que componen un composite con estructura de fibra no tejida o aleatoria. El primer elemento lo forman las propiedades de las fibras, de la que se relacionan las propiedades mecánicas, la geometría de las fibras y las propiedades superficiales. La segunda sería la estructura de la red de fibras. De esta estructura se relaciona con la orientación de fibras y con la variabilidad másica. Finalmente, el tercer elemento lo constituyen las propiedades de los sistemas de unión. De estos se desprenden relaciones de tipos de unión, propiedades o condiciones de proceso.

Dentro de la determinación de las funciones de orientación de fibras, se establecen diversas formas de análisis de las mismas. Mediante el análisis de imágenes destacan la medición directa, transformada de Fourier³, transformada de Hough, Plano inclinado⁴ o bien mediante difracción por láser. Kim⁵ establece un estudio de simulación de comportamiento de materiales reforzados de distribución aleatoria.

Un criterio comparativo importante en el uso del índice de Hermans. Advani¹⁻²⁻⁶ detalla dicho índice de la manera siguiente

$$f_p = \frac{3(\cos^2(\phi)) - 1}{2}$$

Los rangos que expresa el índice oscila entra un valor de 1 a un valor de -1. Según esta expresión se establece que la relación ente el parámetro y la orientación queda definida de la siguiente manera

Fibras alineadas a lo largo del flujo $f_p = 1$

Distribución al azar	$f_p = 0$
Alineación transversal al flujo	$f_p = -1$

En la parte experimental se procederá a confeccionar una evaluación de la orientación aplicando dicho Índice.

Si se analiza la descripción de la orientación de una fibra simple, diversos autores establecen su referencia con respecto a dos ángulos. Estos ángulos suelen definirse como Φ y θ .

Las ecuaciones que describen la orientación de fibra quedarían definidas en función de cada una de las coordenadas del vector \mathbf{P} .

$$\begin{aligned} p_1 &= \text{sen}\theta \cos\phi \\ p_2 &= \text{sen}\theta \text{sen}\phi \\ p_3 &= \cos\theta \end{aligned}$$

donde los valores de \mathbf{P} , 1,2 y 3 se definen como componentes cartesianos. Los intervalos en los que pueden oscilar los valores de los ángulos son:

$$\begin{aligned} 0 &\leq \theta \leq \pi \\ 0 &\leq \phi \leq 2\pi \end{aligned}$$

En algunas ocasiones las fibras son largas y delgadas lo que las obliga a definirse en un plano. A este caso se le suele denominar como orientación bidimensional u orientación planar.

Otra manera de describir el estado de orientación de las fibras es a través de la función de distribución de orientación (FOD)⁷. Una combinación de la descripción de la función de distribución de orientación y la naturaleza concisa de los parámetros de orientación es la descripción del tensor orientación.

Un enunciado del mismo puede alcanzarse por medio de la definición del tensor orientación de segundo orden

$$a_{ij} \equiv \langle p_i p_j \rangle$$

Lafranche⁸ lo expresa de la siguiente manera

$$a_{ij} = \int p_i p_j \psi(p, t) \partial p$$

Los componentes de este tensor de orientación para un grupo de n fibras puede calcularse como sigue, según Eberhardt⁹

$$a_{ij} = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n p_i^k p_j^k \right) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

y cada uno de los seis componentes de cada fibra definida se expresaría como sigue:

$$\begin{aligned} a_{11}^k &= \text{sen}^2 \theta^k \cos^2 \phi^k \\ a_{22}^k &= \cos^2 \theta^k \cos^2 \phi^k \\ a_{33}^k &= \cos^2 \theta^k \\ a_{12}^k &= a_{21}^k = \text{sen}^2 \theta^k \cos \phi^2 \text{sen} \phi^k \\ a_{13}^k &= a_{31}^k = \text{sen} \theta^k \cos \theta^k \cos \phi^k \\ a_{23}^k &= a_{32}^k = \text{sen} \theta^k \cos \theta^k \text{sen} \phi^k \end{aligned}$$

Este tensor de segundo orden caracteriza el estado de orientación con respecto a la dirección del flujo, como dirección de referencia, de manera que

- $a_{11} < 0,35$ se considera perpendicular a la dirección de flujo
- $a_{11} > 0,7$ se considera orientación paralela al flujo
- $0,5 < a_{11} < 0,6$ se considera una orientación aleatoria

Para la determinación de una orientación en un plano y aplicando las propiedades conmutativas antes expuestas encontramos que el tensor orientación a_{ij} se compone de cuatro términos. Cuando el término a_{11} es igual a 1 todas las fibras están alineadas a lo largo de un eje. Cuando los elementos a_{11} y a_{22} son iguales a 0,5 se considera que esta alineadas de forma aleatoria.

Advani y Toker¹⁰⁻¹¹ también han definido el tensor de orientación de cuarto orden de la siguiente manera

$$a_{ijkl} = \langle p_i p_j p_k p_l \rangle$$

o bien

$$a_{ijkl} = \int_S p_i p_j p_k p_l \psi dA$$

donde ψ se define como la función de densidad de probabilidad de orientación y S representa la esfera unidad.

Nuestro cálculo de orientación de fibras se realizará mediante la aplicación de las formulaciones descritas por Yasuda¹²⁻¹³ para un flujo concentrado con fibras en suspensión y que además son fibras transparentes.

Los valores del tensor orientación de segundo orden se calculan mediante la expresión

$$a_{11} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n \text{ y el valor del término } a_{12} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{sen} \theta_n \cos \theta_n$$

en el resto de los términos se aplica que $a_{11} + a_{22} = 1$ y $a_{12} = a_{21}$.

Pourdeyhimi² define además un factor de anisotropía descrito por un ratio de frecuencias máximas y mínimas definidas por la función de distribución de orientación. Este ratio queda expresado como

$$\frac{f(\alpha_{\max})}{f(\alpha_{\min})}$$

donde α es el ángulo de las fibras respecto a la línea horizontal. También expresa que la función f_p puede ser definida con ayuda de la función de distribución de orientación. Al igual que autores anteriormente descritos, el valor de f_p puede oscilar entre valores de -1 y 1. El valor de -1 indicará alineamiento perfectamente paralelo respecto a la dirección de referencia y el valor de 1 indicará un alineamiento perfectamente perpendicular a la dirección de referencia. La función f_p tomará un valor de 0 para una distribución aleatoria.

7.2.- Procedimiento operatorio

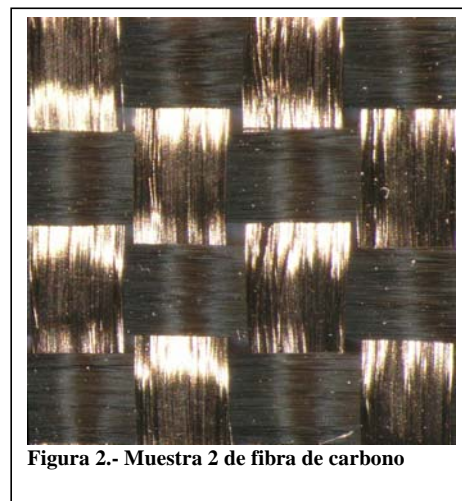
En estos casos se han tomado las muestras de las estructuras predefinidas que deberán colocarse en la cavidad del molde. Por ello no ha sido necesario realizar ninguna preparación previa a la toma de fotografías de muestra.

En el caso de operar sobre una muestra transformada deberá recurrirse a una pirolisis previa del material para poder eliminar el material de la matriz¹⁴⁻¹⁵. Una vez realizada la pirolisis, se realiza la disposición de las muestras para su posterior toma de fotografías. Posteriormente se aplicará la metodología discutida en el presente trabajo para cálculo de la función de distribución de orientación.

Las muestras sobre las que se aplicó el procedimiento, figura 1. Dicha muestra presenta una orientación predeterminada de 90 grados y 0 grados, de forma repetitiva. Dicha muestra la consideraremos perfectamente orientada.



Realizaremos una comprobación sobre una muestra de fibra de carbono, figura 2, trenzada en una orientación similar a la muestra trenzada de fibra de vidrio, figura 1.



Otra comprobación se realizará sobre otra muestra, en este caso perfectamente aleatoria, figura 3.



Finalmente se realiza la última comprobación sobre otra muestra aleatoria, como se muestra en la figura 4.



7.3.- Resultados y discusión

A la primera muestra, muestra 1 trenzada reforzada con fibra de vidrio, se le ha aplicado el procedimiento operatorio para confeccionar el cálculo de la función de Hermans. Las distribuciones de función orientación quedan reflejadas en la figura 5.

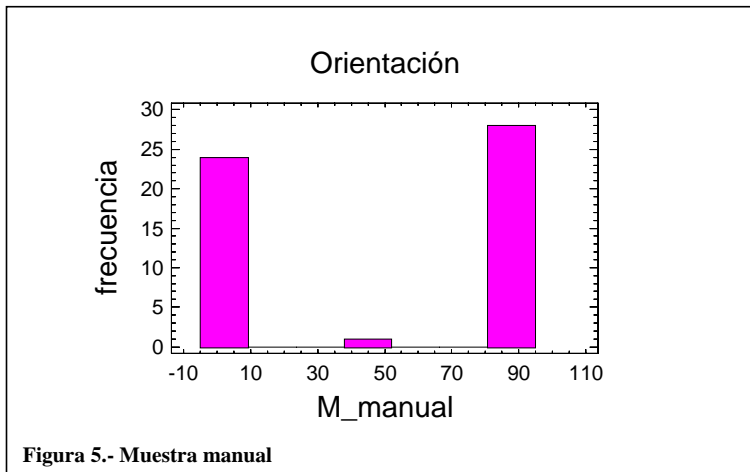


Figura 5.- Muestra manual

Fundamentalmente todas las orientaciones se distribuyen en dos ángulos principales de 90 y 0°. Mayoritariamente predomina la orientación de 90°. En la muestra calculada de manera automática mediante la secuenciación, figura 6, se observa una distribución con algunos valores intermedios.

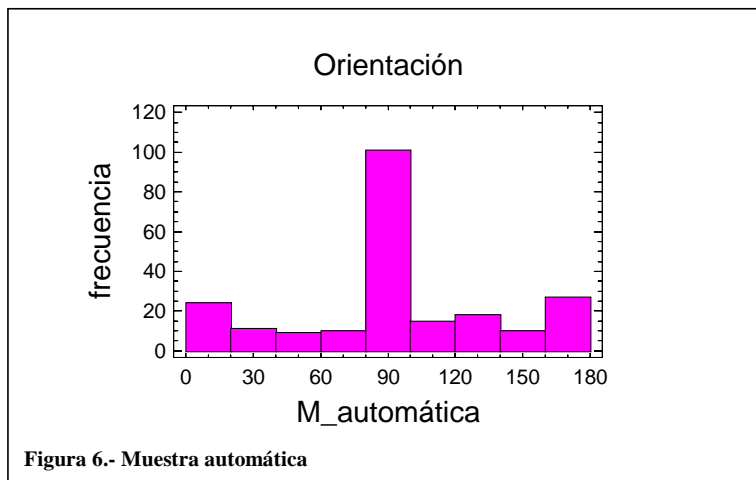


Figura 6.- Muestra automática

Al igual que con otros análisis se puede efectuar una comparación numérica de valores que nos permitirán evaluar de mejor manera las diferencias y los errores, tabla 1

	<u>fp</u>	<u>a11</u>
M_manual	0,1933	0,4622
M_automática	0,1203	0,4135

Tabla 1.- Valores numéricos

Los errores calculados mediante la diferencia entre valores manuales y valores calculados quedan dentro del orden del 10%, tabla 2

	a1
M_manual	0,1056
M_automatica	10,60%

Tabla 2

Posteriormente calculamos la compatibilidad estadística de los valores tabulados, obteniéndose los resultados mostrados a continuación

Resumen del Procedimiento

Muestra 1: M_manual

Muestra 2: M_automático

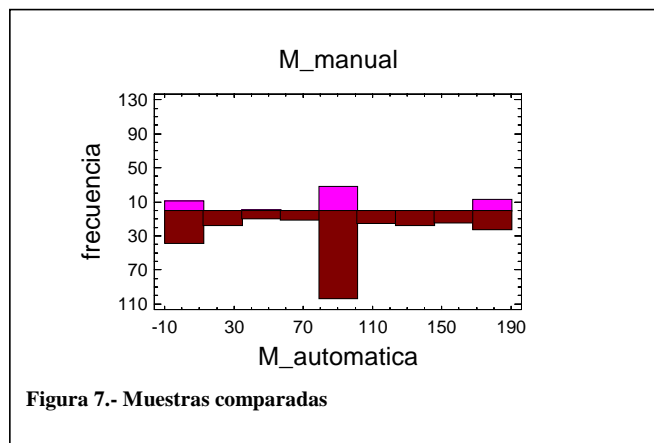
Muestra 1: 53 valores 0,0 hasta 180,0

Muestra 2: 246 valores 0,0 hasta 179,98

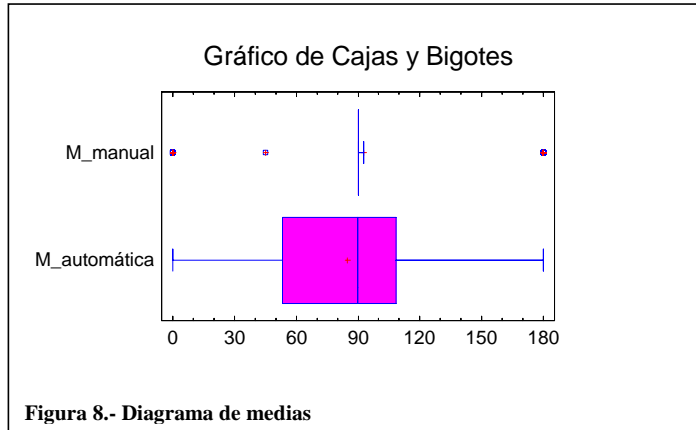
Resumen Estadístico

	M_manual	M_automático
Frecuencia	53	246
Media	92,5472	84,7621
Varianza	3770,79	2650,21
Desviación típica	61,4068	51,4802
Mínimo	0,0	0,0
Máximo	180,0	179,98
Rango	180,0	179,98
Asimetría tipi.	-0,0339517	-0,533016
Curtosis tipificada	-1,18029	-2,02724

La grafica de frecuencias comparativas se puede observar en la figura 6.



La figura 8 muestra de distribución de medias y varianzas



Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 92,54 y 84,76
 Desviaciones Típicas de la Muestra = 61,4 y 51,48
 Tamaños de la Muestra = 53 y 246

95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 7,78 +/- 15,801 [-8,02099;23,581]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
 Alternativa: no igual
 Estadístico t calculado = 0,970973
 p-Valor = 0,332747
 No rechazar la hipótesis nula para alpha = 0,05.

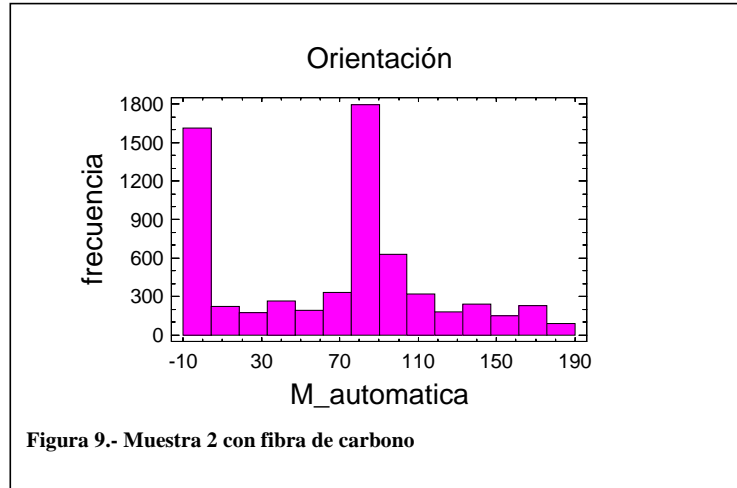
(No se asumen varianzas iguales).

Las dos hipótesis a considerar son:

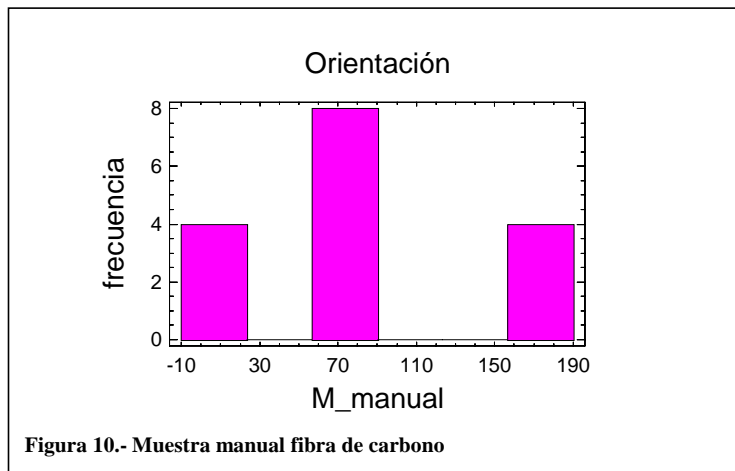
Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
 Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

Dada una muestra de 53 observaciones con una media de 92,54 y una desviación típica de 61,4 y una segunda muestra de 246 observaciones con una media de 84,76 y una desviación típica de 51,48, el estadístico t calculado es igual a 0,970973. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -8,02099 y 23,581.

Para la muestra numero 2, fibra trenzada reforzada con fibra de carbono, aplicamos el mismo procedimiento, alcanzando la siguiente distribución de frecuencias, figura 9.



Los valores predominantes son los valores de 90° y el valor de 0° , totalmente previsible en la muestra trenzada. Para la contramuestra manual se obtiene un valor similar mas centrada en dos valores, figura 10.



Para una mejor comparativa se expresan a continuación los valores numéricos que se desprenden de los cálculos de los valores del término a_{11} del tensor orientación, tabla 4.

	a11
M_manual	0,5
M_automática	0,45

Tabla 3.- Valores comparativos

Los valores de los errores cometidos de manera comparativa entre los valores teóricos y los valores automáticos se expresan a continuación

$$\varepsilon = \frac{(0,5 - 0,45)}{0,5} = 0,0992; \text{ Equivalente al } 9,92\%$$

Aplicando el criterio de Vahlund¹⁴ el error encontrado en el cálculo es del 4,5%. Lo que se puede considerar como un error aceptable.

Finalmente solo no queda realizar el análisis de compatibilidad de las muestras utilizadas en el cálculo anterior, mediante el test de hipótesis.

Resumen del Procedimiento

Muestra 1: M_manual

Muestra 2: M_automática

Muestra 1: 16 valores -90,0 hasta 90,0

Muestra 2: 6420 valores -90,0 hasta 89,989

Resumen Estadístico

	M_manual	M_automática
Frecuencia	16	6420
Media	0,0	-15,7257
Varianza	4320,0	3454,79
Desviación típica	65,7267	58,7775
Mínimo	-90,0	-90,0
Máximo	90,0	89,989
Rango	180,0	179,989
Asimetría tipi.	0,0	6,00923
Curtosis tipificada	-0,74023	-18,7607

Contraste de Hipótesis

Medias de la Muestra = 0,0 y -15,7

Desviaciones Típicas de la Muestra = 65,72 y 58,78

Tamaños de la Muestra = 16 y 6420

Aproximado 95,0% intervalo de confianza para la diferencia entre medias: 15,7 +/- 35,0425 [-19,3425;50,7425]

Hipótesis Nula: diferencia entre medias = 0,0
Alternativa: no igual
Estadístico t calculado = 0,954618
p-Valor = 0,354844
No rechazar la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

(No se asumen varianzas iguales).

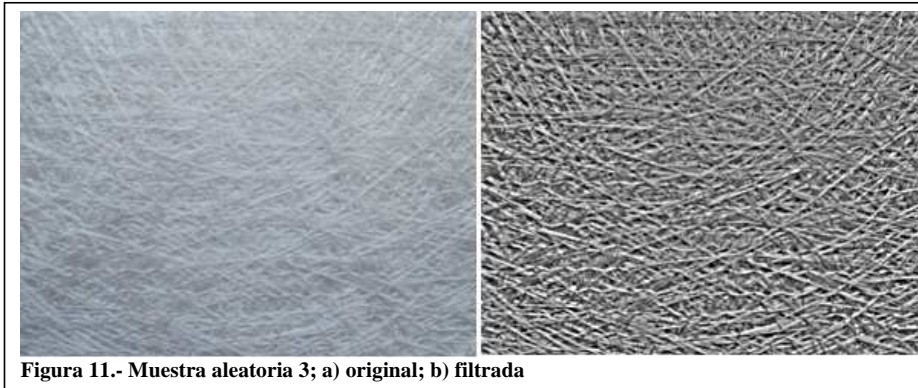
Las dos hipótesis a considerar son:

Hipótesis Nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$
Hipótesis Alternativa: $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

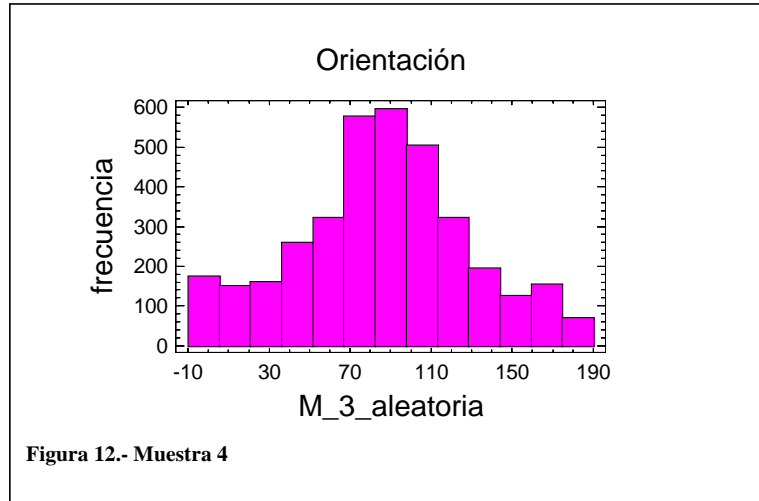
Dada una muestra de 16 observaciones con una media de 0,0 y una desviación típica de 65,72 y una segunda muestra de 6420 observaciones con una media de -15,7 y una desviación típica de 58,78, el estadístico t calculado es igual a 0,954618. Puesto que el p-valor para el test es superior o igual a 0,05, la hipótesis nula no puede rechazarse para el 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de $\mu_1 - \mu_2$ soportado por los datos se encuentran entre -19,3425 y 50,7425.

Por lo tanto las dos muestras son comparables.

Abordaremos a continuación el análisis de las muestras aleatorias identificadas como muestra 3 y 4. La primera muestra analizada queda reflejada en la figura 11



Los valores de la distribución de frecuencias quedan expresados en el siguiente histograma, figura 12. En el se observa una distribución en forma de campana bastante homogénea en cuanto a valores. Los mas destacado son valores cercanos a los 90° , tal y como se destaca en el estudio de Pouyderhimi².



Para una mejor comprensión de los valores obtenidos se expresan a continuación los valores numéricos obtenidos mediante el cálculo de la función de Hermans y el término de a_{11} del tensor orientación, tabla 5

	<u>fp</u>	<u>a11</u>
M_3_aleatoria	0,0117	0,3411

Tabla 4.- Valores de m-3

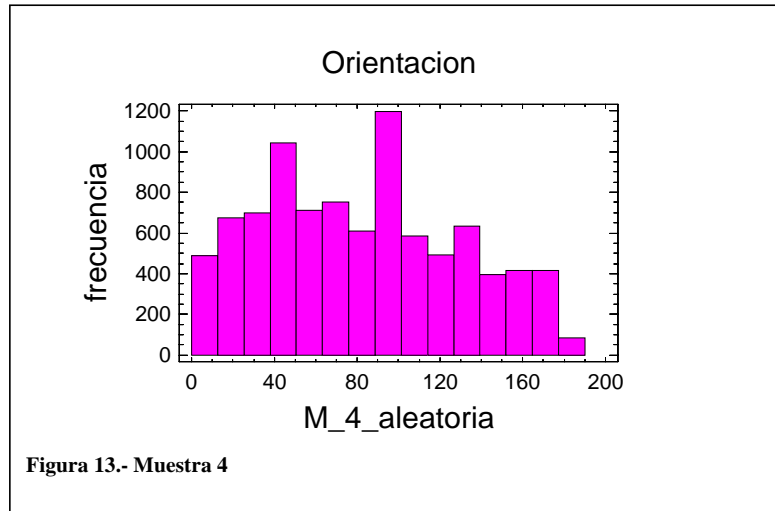
Por tanto la expresión de estos valores confirma que la muestra presenta una orientación aleatoria y que las funciones asociadas quedarían expresadas de la siguiente manera:

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,3411 & 0 \\ 0 & 0,6589 \end{bmatrix}$$

El error calculado aplicando el criterio de Vahlund¹⁴ quedaría expresado de la siguiente manera

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{m-1}{n}} = \sqrt{\frac{13}{3624}} = 0,05754 \text{ este valor equivale al } 5,75\%.$$

Aplicamos los mismos criterios expuestos hasta el momento en la muestra número 4 que es también una fibra aleatoria. A continuación se muestra el histograma de frecuencias de orientación que muestran, figura 13, unos valores más repartidos a lo largo de todo el campo de ángulos.



Al igual que con la muestra anterior mostraremos los valores numéricos obtenidos del cálculo de la función de Hermans y del término a_{11} del tensor orientación, tabla 6.

	f_p	a_{11}
M_4_aleatoria	0,3583	0,5722

Tabla 5.- Factores de f_p y a_{11} .

La expresión del término completo del tensor orientación quedaría reflejada en la siguiente formulación

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,5722 & 0 \\ 0 & 0,4278 \end{bmatrix}$$

Finalmente expresamos el error cometido en el cálculo según el criterio de Vahlund¹⁴ que quedaría reflejado de la manera siguiente

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{m-1}{n}} = \sqrt{\frac{14}{7867}} = 0,1334; \text{ por tanto el valor equivalente es del } 13,34\%$$

7.4.- Conclusiones parciales

Se han aplicado los criterios de secuenciación optimizada de algoritmos, con objeto de poder determinar la orientación de fibras. Posteriormente se ha efectuado el análisis de las imágenes de las mismas. Los criterios que se han aplicado en estos casos han sido los desarrollados por Hermans, para la función de orientación o índice de Hermans. Este criterio establece que las fibras se pueden orientar en un intervalo entre 1 y -1. Para valores de 1 la fibra esta orientada en la misma dirección que el flujo de referencia y para valores de -1, la fibra esta orientada en dirección perpendicular al flujo. Valores cercanos a 0 indicarían distribuciones al azar.

El otro criterio aplicado ha sido el calculo del termino a_{11} del tensor orientación¹⁻¹⁰⁻¹², que ha permitido obtener valores paralelos al índice de Hermans. Posteriormente se ha expresado el valor del tensor mediante la expresión matricial del tipo

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

Aunque las características mecánicas del producto involucrado en este proceso si que influyen quedan determinadas por la orientación, el tipo de fibra queda a elección del usuario, quedando limitada la misma a un abanico determinado de estructuras de fibras. Estas son del tipo no tejido, trenzado, etc.

Desde el punto de vista del procedimiento aplicado hemos observado que el mismo se muestra suficientemente valido para poder emplearse en el proceso de transformación compuestos reforzados con fibras por RTM. Las distribuciones obtenidas quedan dentro de los rangos obtenidos por Pourdeyhimi mediante otras técnicas de medición de orientación de fibras.

En cuanto a la estimación de errores se han aplicado dos metodologías. La primera ha sido la metodología comparativa, siempre desde muestras compatibles, obteniendo errores del orden del 9 al 10%. Si se aplica el criterio de cálculo de error desarrollado por Vahlund, obtenemos errores del 5-6% para muestras orientadas al azar.

7.5.- Referencias

-
- ¹ S. G. Advani, E. M. Sozer. "Process modelling in composites manufacturing". Ed. Marcel Dekker. ISBN 0824708601, 2003
 - ² Pourdeyhimi, B. "Nonwoven orientation análisis". Nonwoven cooperative research center. INTC, 2001
 - ³ Enomae, Yoon-Hee Han, Akira Isogai. "Fiber orientation distribution of paper surface calculated by image analysis". Proceeding of int. papermaking and environment. Tiajin, Book 2, 2004
 - ⁴ Blanc, ch. Germain, j.p. da costa, p. baylou, m. cataldi. "Fiber Orientation Measurements In Composite Materials". Composite testing and modelling identification. U. Bristol. 2004.
 - ⁵ Kim, Pourdeyhimi. "In-plane liquid distribution in nonwoven fabrics: part 2- simulation". INJ, 2003.
 - ⁶ Ulf W. Gedde. "Chain Orientation". KTH Fiber- och polymerteknologi. Polymer physics course. 2006
 - ⁷ Kun, Zhong. "Research on the behavior of fiber orientation probability distribution function in the planar flows". Jour. Of zhejiang sci. 6A, 4, 2005.
 - ⁸ Lafranche, Krawczak, Ciolczyk, Maugey. "Injection moulding of long glass fiber reinforced polyamide 66: Processing conditions/microstructure/Flexural properties relationship". Adv. In pol. Tech., vol 24, 2, 2005.
 - ⁹ Eberhardt, Clarke. "Fibre orientation measurements in short-glass-fibre composites. Part I: Automated, high-angular-resolution measurement by confocal microscopy". Compos. Sci. tech. 61, 2001
 - ¹⁰ Cintra, J.;Tucker III, C. "Orthotropic closure approximations for flow-induced fiber orientation". J. of Rheology, 39, 6, 1995
 - ¹¹ Kim, "Relationship between fiber oreintnation distribution function and mechanical anisotropy of thermally point-bonded nonwovens". Fibers and polymers, vol 5, nº 3, 2004
 - ¹² Yasuda, Mori, Nakamura. "A new visualization technique for short fibers in a slit flow of fiber suspension". Int. jour. Of engi, sci. 40. 2002.
 - ¹³ Yasuda, Kyoto, Mori. "An experimental study of flow-induced fiber orientation and concentration distributions in a concentrated suspension flow through a slit channel containing a cylinder". Rheol. Acta. 43, 2004.
 - ¹⁴ Vahlund. F. "Fiber orientation, rheological behaviour and simulation of the compression moulding process for composite materials". Ph.D. Thesis. Lulea University. 2001.
 - ¹⁵ Dweib, M.A., Vahlund, C.M. Ó Bradaigh. "Fibre structure and anisotropy of glass reinforced thermoplastics". Compos. Part a. apl. Sci. and man. 31, 2000.

CONCLUSIONES

8.- CONCLUSIONES

Para el proceso de moldeo por inyección podemos alcanzar tras el estudio varias conclusiones. Sobre la metodología empleada los resultados nos indican que los valores encontrados se hallan dentro de los valores de orientación típicos analizados mediante otras metodologías. Estas metodologías han sido expuestas en varias ocasiones por autores como Thomason, Davison y otros. La técnica a la que nos referimos es el análisis de imágenes de plano inclinado de la probeta inyectada. Autores como Lafranche⁶ muestran, ocasionalmente sobre fibras cortas, orientaciones superficiales que contienen valores del tensor orientación de 0,4 a 0,55. Nuestros estudios presentan valores que oscilan entre 0,5 y 0,7 para el valor más elevado.

Paralelamente se ha realizado el cálculo e implementación del indicador de Hermans. Esta función nos ha marcado resultados similares al del tensor orientación. Puede ser interesante como alternativa comparativa al del tensor.

Por parte del estudio de las muestras implicadas en el diseño de experimentos, podemos observar que los resultados obtenidos tienen valores similares, del orden de 0,6. Existe un valor máximo de 0,75. Esta orientación máxima se obtiene en la muestra 7 que se corresponde con unos parámetros de transformación como velocidad de inyección media, compactación alta y refrigeración alta. A su vez el valor que se corresponde con la orientación más baja se corresponde con los valores de velocidad de inyección media, compactación baja y refrigeración baja.

Sobre el estudio estadístico podemos indicar que según el gráfico de Pareto, la variable de compactación es que mayor peso de influencia ha mostrado sobre la variable de respuesta que es la orientación en nuestro caso. El siguiente valor de mayor influencia ha sido la variable de refrigeración, aunque a mayor distancia que la de compactación. Dado que existen interacciones, estas muestran su mayor peso en la combinación de las variables de velocidad de inyección y la de compactación.

Otro estudio que se ha planteado ha sido la evolución de la orientación en cada una de las muestras individuales. Ello nos permite conocer como se orientan las fibras en una composición del 50% de fibra larga de vidrio. Las conclusiones esenciales del experimento han sido que existe una evolución de la orientación más elevada en las zonas más cercanas al punto de entrada y una orientación más aleatoria a medida que nos alejamos del punto de entrada.

Si se necesitará correlacionar más los valores de orientación, la metodología nos permite actuar sobre capas, de fácil preparación y en la cantidad necesaria en función de la exactitud necesaria.

Para el moldeo por compresión la metodología empleada para el cálculo de las funciones de Hermans de orientación y los valores de las matrices del tensor de orientación se muestra, al igual que en el moldeo por inyección, válida y eficaz.

A diferencia que ha sucedido con el moldeo por inyección, en estas muestras no ha sido necesario utilizar el procedimiento de pirolisis de las muestras. Aunque podría darse el caso que se tuviera que quemar la muestra para poder acceder a inspeccionar el

contenido de fibra de la muestra. La preparación de la muestra no ha tenido más complejidad que la propia transformación por compresión.

Paralelamente se ha aplicado una metodología alternativa de medición, aunque es un método más manual, laborioso y lento, pero nos ha servido para realizar la comparación de los cálculos en cada una de las muestras. Como comparación en la determinación del error se ha aplicado el criterio de Vahlund aplicado al moldeo por compresión. Los resultados han sido satisfactorios, encontrándonos en niveles de error del orden del 5%. Cabe reseñar que la misma metodología aplicada al moldeo por inyección nos mostraba errores del 2,9-3%. Por tanto los niveles de error en ambos procesos se pueden considerar similares.

Para muestras RTM se han aplicado los criterios de secuenciación optimizada de algoritmos, con objeto de poder determinar la orientación de fibras. Posteriormente se ha efectuado el análisis de las imágenes de las mismas. Los criterios que se han aplicado en estos casos han sido los desarrollados por Hermans, para la función de orientación o índice de Hermans. Este criterio establece que las fibras se pueden orientar en un intervalo entre 1 y -1. Para valores de 1 la fibra esta orientada en la misma dirección que el flujo de referencia y para valores de -1, la fibra esta orientada en dirección perpendicular al flujo. Valores cercanos a 0 indicarían distribuciones al azar.

El otro criterio aplicado ha sido el calculo del termino a_{11} del tensor orientación¹⁻¹⁰⁻¹², que ha permitido obtener valores paralelos al índice de Hermans. Posteriormente se ha expresado el valor del tensor mediante la expresión matricial del tipo

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

Aunque las características mecánicas del producto involucrado en este proceso si que influyen quedan determinadas por la orientación, el tipo de fibra queda a elección del usuario, quedando limitada la misma a un abanico determinado de estructuras de fibras. Estas son del tipo no tejido, trenzado, etc.

Desde el punto de vista del procedimiento aplicado hemos observado que el mismo se muestra suficientemente valido para poder emplearse en el proceso de transformación compuestos reforzados con fibras por RTM. Las distribuciones obtenidas quedan dentro de los rangos obtenidos por Pourdeyhimi mediante otras técnicas de medición de orientación de fibras.

En cuanto a la estimación de errores se han aplicado dos metodologías. La primera ha sido la metodología comparativa, siempre desde muestras compatibles, obteniendo errores del orden del 9 al 10%. Si se aplica el criterio de cálculo de error desarrollado por Vahlund, obtenemos errores del 5-6% para muestras orientadas al azar.