

GRADO EN INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO FIN DE GRADO

***CARACTERIZACIÓN DE LA
MICROESTRUCTURA EN LFT_s PARA LA
OPTIMIZACIÓN DE SU DISEÑO Y
PROCESADO I***

Alumno/Alumna: Bermejo, Guinea, Itxaso.

Director/Directora (1): Iturrondobeitia, Ellacuria, Maider.

Director/Directora (2): Ibarretxe, Uriguen, Julen.

Curso: 2018-2019

Fecha: 11-02-2019

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Alcance.....	2
2. Fundamentos teóricos.....	3
2.1 Materiales.....	3
2.1.1 Tipos de composites.....	3
2.1.1.1 Tipos de matrices.....	3
2.1.1.2 Tipos de Fibras.....	5
2.2 Materiales más utilizados en el sector de la automoción.....	6
2.3. Materiales utilizados en el estudio.....	6
2.3.1 Poliamida.....	6
2.3.2 Fibra de vidrio.....	7
2.4. Composite de resina termoplástica y fibras de vidrio largas.....	10
2.4.1 Técnicas de procesado de composites termoplásticos reforzados con fibra larga.....	11
2.4.1.1 Proceso de moldeo por inyección.....	11
2.4.1.1.1 Problemas en el proceso de moldeo por inyección.....	13
2.4.1.1.1.1 Máquina de inyección.....	13
2.4.1.1.1.2 Diseño de la pieza y el molde.....	14
2.4.1.1.1.3 Condiciones de procesamiento.....	14
2.4.1.2 Proceso de extrusión.....	15
2.4.2 Técnicas de caracterización mecánica de composites termoplásticos reforzados con fibra larga.....	15
2.4.2.1 Ensayo de tracción.....	15
2.4.3 Técnicas de caracterización de la microestructura de composites termoplásticos reforzados con fibra larga.....	17
2.4.3.1 Microscopio óptico.....	17
2.4.3.1.1 Partes de un microscopio óptico.....	17
2.4.3.1.2 Funcionamiento.....	19
2.4.3.2 Microscopio electrónico.....	20

2.4.3.2.1	Tipos de microscopios electrónicos.....	20
2.4.4	Técnicas de medición de las fibras de composites termoplásticos.....	22
2.4.4.1	Método de pirólisis.....	22
2.5	Anova.....	23
2.5.1	Análisis de efectos principales.....	23
2.5.2	Análisis de efectos principales combinados.....	23
2.5.3	Análisis de la significatividad de los efectos principales	24
3.	Metodología experimental.....	25
3.1	Introducción.....	25
3.2	Proceso de inyección.....	25
3.3	Ensayo de tracción.....	26
3.4	Características y datos.....	26
3.5	Caracterización de la microestructura.....	28
3.5.1	Corte de muestras.....	28
3.5.1.1	Material utilizado.....	28
3.5.2	Colocación en moldes.....	29
3.5.3	Lijado y pulido.....	32
3.5.4	Captura de imágenes.....	36
3.5.5	Preparación de la imagen.....	39
3.5.6	Binarización.....	40
3.5.7	Obtención de datos.....	41
3.5.8	Optimización del proceso.....	44
3.6	Anova.....	46
4.	Resultados.....	47
4.1	Condiciones de procesado.....	47
4.2	Datos obtenidos del análisis de imagen.....	48
4.3	Propiedades mecánicas.....	50
4.4	Análisis de efectos.....	51
4.4.1	Análisis de efectos principales en la relación que tienen las condiciones de procesado con la microestructura y las propiedades mecánicas	52
4.4.1.1	Nº de Partículas.....	52
4.4.1.2	Media de Fi.....	53
4.4.1.3	Media de Theta.....	54

4.4.1.4	Parámetro a_{12}	55
4.4.1.5	Parámetro a_{11}	56
4.4.1.6	Parámetro a_{22}	57
4.4.1.7	Parámetro a_{33}	58
4.4.1.8	Tensión de rotura.....	59
4.4.1.9	Módulo de elasticidad “E”	60
4.4.1.10	Elongación “%”	61
4.4.2	Análisis de efectos principales en la relación que tienen los parámetros del tensor de orientación con las propiedades mecánicas finales.....	63
4.4.2.1	Tensión de rotura.....	63
4.4.2.2	Módulo de elasticidad “E”	64
4.4.2.3	Elongación “%”	65
4.4.3	Análisis de la significatividad de los efectos principales.....	66
4.4.3.1	Primer caso.....	66
4.4.3.1.1	Diagramas de Pareto.....	67
4.4.3.2	Segundo caso.....	70
4.4.3.2.1	Diagramas de Pareto.....	71
4.5	Conclusiones.....	72
5.	Bibliografía.....	76

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Actualmente, se tiende a utilizar piezas hechas con materiales de base polimérica con el fin de reducir el peso en automoción. Por ello, se está sustituyendo a las piezas metálicas en cada vez más componentes del vehículo.

La comunidad Autónoma del País Vasco, comprende algunas empresas dedicadas al procesado de productos poliméricos para el sector de la automoción, interesadas en desarrollar nuevos productos con el fin de sustituir los productos metálicos utilizados actualmente.

Estas empresas han optado por la introducción de composites poliméricos reforzados con fibra, tanto en base termoestable como termoplástico.

Esta fibra puede ser larga o corta, con el objetivo de mejorar sus propiedades.

El empleo de fibra corta es muy utilizado, mejorando las propiedades finales del material, pero esta mejora está limitada, queriéndose conseguir un refuerzo mayor.

Por eso, se está empleando cada vez más la fibra larga, con el fin de obtener unas propiedades finales de mayor margen. Sin embargo, el procesado de las fibras largas es más complicado y menos conocido, y plantea dificultades a los transformadores de plástico a la hora de predecir las propiedades de las piezas obtenidas.

Para ello Leartiker, un centro de investigación, trabaja con empresas del sector de la automoción que han detectado una necesidad de mejora del diseño de estas piezas.

El proceso de diseño de una pieza nueva comienza por el cuaderno de cargas (especificaciones), definidas por el cliente. Una vez se tiene esto, se determinan una serie de parámetros, como su geometría y el material a utilizar. A continuación se realiza una simulación del procesado de la pieza, utilizando distintos modelos de comportamiento del material durante la inyección, de donde se obtienen ciertas características de la pieza final: nivel de llenado, densidad, orientaciones de las fibras, etc.

A partir de esos datos obtenidos en la simulación del procesado, se lleva a cabo una simulación del comportamiento mecánico de la pieza, obteniéndose sus propiedades finales, las cuales deben cumplir con los requisitos que en un principio se querían conseguir.

Sin embargo, al no tener datos exhaustivos para los composites de fibra larga y de su comportamiento durante el proceso de fabricación, se obtienen resultados poco fiables en la simulación del procesado, por lo que se tiende a sobredimensionar las piezas y a realizar pruebas experimentales, lo que supone un alto coste.

1.2 OBJETIVO

Mediante las simulaciones del proceso de moldeo por inyección se obtiene la microestructura de la fibra, la cual no coincide con la medida experimental.

Por ello, este proyecto tiene dos objetivos principales:

- Primero, analizar y comprender la relación que existe entre las condiciones de procesado, la microestructura y las propiedades mecánicas finales de piezas compuestas de un composite de base polimérica reforzado con fibras largas hechas por moldeo por inyección.
- Segundo, optimizar el proceso para conseguir una reducción del peso de las piezas, así como el coste del diseño y desarrollo.

Para cumplir estos dos objetivos principales es necesario llevar a cabo una caracterización experimental específica de la microestructura de la fibra.

1.3 ALCANCE

En este trabajo, se va a trabajar en el primer objetivo descrito anteriormente.

Para ello, se han preparado tras un proceso de inyección 16 tipos de probetas compuestas de Poliamida PA66, reforzadas con una serie de fibras de vidrio largas.

Estas se han producido con unas condiciones de procesado distintas, lo que conlleva a una diferencia en sus propiedades mecánicas y microestructura finales.

Por tanto, se hará un estudio de su microestructura, con el fin de, junto con las propiedades mecánicas obtenidas y las condiciones de procesado utilizadas, conocer qué relación existe entre ellas.

Se analizarán dichas relaciones con la intención de ajustar las condiciones de procesado a las propiedades buscadas.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 MATERIALES

Un material compuesto o composite está formado por dos o más materiales de distinta naturaleza sin que se disuelvan el uno en el otro y que se combinan para ofrecer propiedades superiores a las de los componentes originales.

Los composites poliméricos disponen de un material o fase polimérica que hace las funciones de matriz, a la que se unen otros materiales, los cuales harán de refuerzo.

La matriz del composite suele ser la más tenaz, aunque también la menos resistente y dura. El refuerzo suele ser, por el contrario, la de mayor resistencia y con más alto módulo elástico, pero también la de mayor fragilidad. La combinación y compensación de dureza y blandura, fragilidad y tenacidad hace que estos materiales tengan muchas aplicaciones. Se puede decir que la fibra aporta rigidez y resistencia y que la matriz es flexible y poco resistente, aglomera las fibras, les da forma y transmite los esfuerzos entre fibras. [1, 2]

2.1.1 TIPOS DE COMPOSITES

Dentro de los composites se pueden establecer tres tipos:

- Composites particulados:
 - La fase inmersa en la matriz se compone de partículas con una forma más o menos esférica.
- Composites fibrosos (Utilizado en este estudio):
 - El material de refuerzo está formado por fibras.
 - Las fibras pueden quedar orientadas de diversas formas:
 - a) De forma unidireccional (fibras largas).
 - b) De manera aleatoria (fibras cortas).
 - c) Con disposición ortogonal (mallas ortogonales).
 - d) En varias capas alternadas.
- Composites laminados:
 - Suelen alternarse las fases componentes en forma laminar, y no siempre con espesores semejantes.

2.1.1.1 TIPOS DE MATRICES

Las matrices de los composites poliméricos, se pueden clasificar en termoestables o termoplásticas, en función de si presentan reticulaciones o no.

- Matrices termoestables.

Las matrices termoestables son aquellas que sufren una serie de reacciones químicas, llamadas de curado o reticulación, dando lugar a un producto rígido, insoluble e infusible. La obtención de matrices termoestables se da en dos etapas:

1. En la planta química se polimeriza parcialmente el monómero formando cadenas lineales.
2. En la planta de producción se completa la reticulación bajo calor y presión.

Características:

- Complicada reciclabilidad.
- Alta tenacidad.
- Mayor fragilidad con respecto a las matrices termoplásticas.
- Estabilidad térmica.
- Resistencia química.
- Poca fluencia y relajación por tensión.
- Buena capacidad de impregnado.
- Facilidad de fabricación.
- Economía.

Dentro de las matrices termoestables existen:

- Resinas de poliéster insaturado.
- Resinas Vinil-éster.
- Resinas fenólicas.
- Resinas Epoxi
- Resinas de polyimida.

- Matrices termoplásticas.

Las matrices termoplásticas están compuestas por moléculas lineales unidas por enlaces sencillos. Por encima de su temperatura de fusión empiezan a fluir y por debajo de esa temperatura vuelven a su estado sólido.

Para la obtención de los termoplásticos se debe realizar una fase de calentamiento para ablandar el material, y un moldeo y posterior enfriamiento para endurecerlo una vez moldeado en su forma apropiada.

Características:

- Alta resistencia debido a la capacidad de cristalización.
- Buena resistencia química.
- Baja absorción de humedad.
- Baja capacidad de impregnado.
- Procesos de fabricación cortos.
- Se reparan fácilmente.

- Reciclables, por lo que cada vez más están sustituyendo a las resinas termoestables.

Dentro de las matrices termoplásticas existen:

- Resinas de nylon.
- Resinas de poliéster.
- Resinas de policarbonato.
- Resinas de poliacetato.
- Resinas poliamida.
- Resinas Poliéter-Éter Ketonas.
- Resinas de Polisulfonato.

2.1.1.2 TIPOS DE FIBRAS

Las fibras utilizadas como refuerzo tienen que ser fuertes, resistentes, rígidas, ligeras y con una temperatura de fusión alta.

Las propiedades del composite dependen tanto del porcentaje como de la orientación de las fibras. Un porcentaje mayor de fibras hará que la resistencia y rigidez del composite sea mayor, pero se debe tener en cuenta que el porcentaje máximo estará limitado para asegurar que la superficie de las fibras quede recubierta con el material tenaz de la matriz.

La orientación de las fibras también influye en las características del composite, y sobretodo, en su módulo de elasticidad.

Las fibras continuas y colocadas paralelas y unidireccionalmente, hacen que el material sea más resistente, cuando las cargas se aplican paralelas a ellas, aunque tendrán una fuerte anisotropía.

Las fibras también pueden estar orientadas aleatoriamente en todas direcciones, o sin ninguna dirección predominante, obteniendo un menor refuerzo del composite.

Además, hay una relación entre la orientación y el porcentaje máximo de las fibras. Por ejemplo, cuando se trata de fibras continuas colocadas unidireccionalmente se puede obtener un máximo de 70-80% de fibras. En el caso en que se dispongan de forma ortogonal, los porcentajes de las fibras se reducen a un 45-65%. Y finalmente, en el caso en que la distribución se ha hecho de forma aleatoria, el porcentaje se reduce hasta un 20-40%.

Los principales tipos de fibras utilizadas en los composites pueden clasificarse en cuatro grandes grupos: vidrio, sintéticas, carbono y aramida.

Las fibras de vidrio son las utilizadas en este estudio, las cuales se explicarán más adelante.

2.2 MATERIALES MÁS UTILIZADOS EN EL SECTOR DE LA AUTOMOCIÓN

Los composites más utilizados en el sector de la automoción son los siguientes:

- **Composites comerciales de resinas termoplásticas y fibras de vidrio y carbono en formato discontinuo de fibra corta y larga.**
 - Este tipo de material es actualmente, el más utilizado en el sector de automoción.
 - Son ideales para el proceso de inyección, y por tanto para altas series y producción masiva.
 - Cada vez salen más materiales con prestaciones de altos requerimientos estructurales en los formatos de fibra corta-larga.

- **Composites de resinas termoestables y fibras de vidrio y carbono en formato continuo “preimpregnados”.**
 - Este tipo de material se utiliza ya que cada vez más en este sector se necesitan materiales con altas prestaciones para aplicaciones estructurales, siendo las fibras continuas las que aportan valor añadido al material compuesto.

- **Composites de resinas termoplásticas y fibras de vidrio y carbono continuo “organosheets”.**
 - Este tipo de material se utiliza por el mismo motivo que en los preimpregnados, anteriormente descrito.

En este estudio estamos ante el caso 1: Composite de resina termoplástica y fibras de vidrio en formato discontinuo de fibra larga. La resina termoplástica utilizada es la poliamida PA66.

2.3 MATERIALES UTILIZADOS EN EL ESTUDIO

2.3.1 POLIAMIDA

La poliamida es un polímero cuyos enlaces son de tipo amida. Se pueden encontrar en la naturaleza, como la seda o la lana, o ser sintéticas, como el nylon o el kevlar.

La designación utilizada para llamar a este tipo de polímero es PA.

La poliamida ofrece una óptima resistencia mecánica, al desgaste, rigidez y tenacidad. Todo ello hace que este material sea un buen aislante eléctrico y poseer una buena resistencia química.

Es muy utilizada en la fabricación de elementos mecánicos y para el mantenimiento industrial. Se caracteriza por tener una muy buena resistencia a la fatiga y buenas propiedades dieléctricas.

Las poliamidas además de dureza y tenacidad alta, poseen una alta resistencia a la deformación térmica (resistencia a temperaturas de -40°C a 100°C). Sin embargo, las buenas propiedades mecánicas apenas se alcanzan después de un acondicionamiento del material, por lo que deberá volver a acondicionarse después de un recocido. Además, este acondicionamiento también se presentará con un almacenaje prolongado al aire.

Por tanto, la poliamida tiene las siguientes propiedades:

- Alta Resistencia y rigidez.
 - Alta resistencia al choque y resiliencia.
 - Alta resistencia a la deformación con calor.
 - Alto poder amortiguador.
 - Buenas propiedades de deslizamiento.
 - Alta resistencia a la fatiga.
 - Fácil de mecanizar.
 - Buena resistencia a sustancias químicas (disolventes orgánicos y carburantes).
- [3, 14]

2.3.2 FIBRA DE VIDRIO

La fibra de vidrio es una fibra cerámica elaborada con los siguientes componentes: sílice, cal, alúmina y magnesita, añadiendo ciertos óxidos en porcentajes muy estrictos, según los tipos de fibras que se quieran obtener. Todos estos componentes se deben mezclar y triturar hasta que se consigue una mezcla homogénea para luego introducirla en un horno de fusión a una temperatura de 1550°C , pasando así, a un estado líquido.

A continuación pasa por unas hileras, con cientos de orificios de 1 a 2 mm de diámetro, en cuya salida se estiran mecánicamente hasta conseguir unos filamentos de 5 a 24 micras. Posteriormente se recubren con un material denominado ensimaje que protege la superficie del deterioro por fricción o abrasión y facilita la unión entre la fibra y la matriz.

La fibra de vidrio tiene las siguientes características:

- Buenas resistencias mecánicas.
- Buen aislante eléctrico.
- Baja densidad.

- Incombustibilidad.
- Estabilidad dimensional.
- Facilidad de fabricación.
- Imputrescibilidad.
- Buena flexibilidad.
- Bajo coste.
- Buena resistencia a agentes químicos.
- Baja rigidez.
- Menor resistencia a la fatiga que otras fibras.
- Alta dureza.

La fibra de vidrio se utiliza para reforzar muchos productos poliméricos, formando un compuesto fuerte y ligero. Aunque no es tan fuerte o rígida como la fibra de carbono, es más barata y menos frágil.

Existen varios tipos de fibras de vidrio, los más comunes son:

- **Fibra de vidrio E.**

Representa el 90% del refuerzo utilizado en los composites, y es la que más se utiliza en la industria textil. Tiene muy buenas propiedades eléctricas, una alta durabilidad, bajo coste y poca absorción de humedad.

- **Fibra de vidrio A.**

Contiene un alto porcentaje de sílice. Tiene unas propiedades mecánicas y un módulo menores que el vidrio E. Se utiliza como reforzante, tiene una gran resistencia química y es resistente a medios alcalinos.

- **Fibra de vidrio B.**

Es un borosilicato de calcio de bajo contenido en álcalis, con una gran durabilidad y posee excelentes propiedades eléctricas.

- **Fibra de vidrio S.**

Tiene una alta resistencia a la tracción y es muy estable térmicamente. Se utiliza, fundamentalmente, en aeronáutica.

- **Fibra de vidrio C.**

Tiene una alta resistencia química. Es un tipo intermedio entre el A y el E. Se utiliza en las superficies de elementos expuestos a la corrosión o de estructuras anticorrosión.

- **Fibra de vidrio R.**

Tiene una resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad muy superiores a los demás tipos. Se emplea en aeronáutica, aviación, armamento y cuando se necesitan materiales muy resistentes a la fatiga, la temperatura y la humedad.

- **Fibra de vidrio D.**

Tiene unas altas propiedades dieléctricas por lo que se recomienda utilizar en la construcción de materiales electrónicos, de comunicación y como material permeable a las ondas electromagnéticas. Se utiliza en la fabricación de radares y ventanas electromagnéticas.

- **Fibra de vidrio AR.**

Utilizada para armar los morteros de cemento por ser resistente a los álcalis del cemento.

Las más utilizadas son la fibra de vidrio E y S.

Las fibras, además, se pueden clasificar en: Cortas, largas y continuas.

Fibras cortas:

Mediante el procesado, estas fibras se orientan de forma aleatoria, lo que hace que tenga un comportamiento isotrópico y facilite la preparación. Sin embargo, en los últimos años se están utilizando las fibras cortas alineadas, obteniendo un incremento de la resistencia, que aunque no sea tan considerable como en el caso de las fibras largas, su preparación tiene un menor coste.

Los compuestos con fibras cortas tienen una velocidad de producción rápida y se pueden formar piezas complicadas, las cuales no son posibles con la utilización de fibras continuas.

Fibras largas y continuas:

Mediante el procesado, estas tienden a alinearse en una dirección, lo que hace que tenga muy buena resistencia a la tracción en esa misma dirección. Sin embargo tienen la dificultad de soportar cargas en la dirección transversal.

En cuanto a la presentación, la fibra de vidrio puede tener las siguientes formas:

- **Mat de hilos cortados:** Fibras de vidrio cortadas y unidas mediante un aglutinante en emulsión o polvo de poliéster. Son compatibles con el poliéster insaturado, vinil-éster y otras variedades. Se utilizan para fabricación de embarcaciones, tablas de surf, tanques y otras aplicaciones.
- **Mat de filamento continuo:** Fibras de vidrio continuas que constituyen un aglomerado compacto como felpa. Estas se mantienen unidas agregando una resina de poliéster insaturado. Se utiliza para moldeado de laminados por compresión y en procesos de pultrusión.
- **Roving:** bobinas de filamentos (roving directo) o hilos de vidrio (roving ensamblado) que han recibido un ensimaje plástico. Se utiliza para pultrusión y bobinado filamentario.
- **Tejido:** superficies constituidas por mechas de roving directo en trama y urdimbre, tratados principalmente con ensimaje plástico. Se utiliza para la producción de telas de alta resistencia, contenedores de transporte, armadura balística, alas de aeronaves y puertas.
- **Hilo cortado (fibra larga):** Está formado por hilos continuos de vidrio tipo E, cortados a longitudes específicas, y están diseñados para utilizarse en compuestos moldeables de resinas de poliéster y epoxi, en aplicaciones con resinas fenólicas, en la industria eléctrica y en la industria del transporte. Se utiliza en procesos de termocompresión e inyección.
- **Hilo cortado (fibra corta):** Formado por hilos continuos de vidrio tipo E cortados a longitudes específicas. Se utiliza como refuerzo de termoplásticos como el ABS, polipropileno, poliamida, poliestireno, PVC y SAN.
- **Fibra molida:** Fibras trituradas con longitudes comprendidas entre 0,1 y 0,02 mm con un diámetro de entre 10 y 17 micras. Son filamentos de vidrio que se recubren por un apresto haciéndolos compatibles con resinas específicas y se muelen proporcionando una densidad específica a granel. Se utiliza en una variedad de compuestos termoplásticos y termófilos.
- **Velos:** Finas telas de fibra de vidrio con una superficie lisa y uniforme. Se utilizan como capa superficial en laminados para dar un acabado suave a las piezas. [1, 2]

2.4 COMPOSITE DE RESINA TERMOPLÁSTICA Y FIBRAS DE VIDRIO LARGAS

Los compuestos termoplásticos de fibra larga se utilizan para casos que requieren una alta rigidez y un buen impacto en aplicaciones estructurales y de reemplazo de metales. Ofrece un mejor rendimiento en tracción y fatiga, una mejorada estabilidad dimensional y tiene una superficie con muy buen acabado, en comparación con los productos tradicionales de fibra corta.

Ofrece un reemplazo de las piezas metálicas mediante un material altamente eficiente y económico. Algunos ejemplos son: Componentes del tren motriz, el capó y el cuerpo del automóvil, reduciendo el peso y el consumo de combustible.

También se utilizan en aplicaciones industriales estructurales, tales como carcasas para bombas, soportes y componentes estructurales, permitiendo una mayor libertad de diseño, menor peso para menores requerimientos de energía y la capacidad de consolidar piezas.

CARACTERÍSTICAS

- Buen rendimiento a temperaturas entre -20°C y 160°C.
- Resistencia a la fluencia y la fatiga.
- Excelente estabilidad dimensional.
- Muy buena resistencia química.
- Puede ser procesado con máquinas de moldeo por inyección. [4]

2.4.1 TÉCNICAS DE PROCESADO DE COMPOSITES TERMOPLÁSTICOS REFORZADOS CON FIBRA LARGA.

La forma en que estos materiales son procesados interviene en el desempeño final de la pieza.

Los métodos de procesado de materiales plásticos más comunes son: los procesos de extrusión e inyección, siendo este último el más usado para el conformado de termoplásticos con aplicaciones ingenieriles.

2.4.1.1 PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN

El proceso se inicia en una tolva que se llena a través de un dosificador con gránulos o partículas esféricas (pellets) (1).

El material entra en el barril, y lo conduce a través de la unidad de inyección, fundiéndolo mediante bandas que generan calor, colocadas alrededor del barril (2).

El material fundido avanza a través del barril mediante un husillo, el cual es impulsado por un sistema hidráulico preparado con un motor eléctrico, el cual realiza un movimiento axial del barril (3).

La unidad de moldeo está compuesta por dos placas portamoldes que unen herméticamente ambas partes del molde, formando la cavidad de la pieza, y resisten la presión que se ejerce al inyectar el material en el molde.

La parte del molde que está pegada a la unidad de inyección se mantiene fija, mientras que la otra se mantiene en movimiento durante el ciclo de moldeo, y se conoce como parte extractora o de cierre.

La unidad de moldeo se abre de nuevo cuando una vez enfriada la pieza, mediante un fluido refrigerante, se solidifica.

Finalmente se expulsa mediante unos pernos botadores del lado extractor, y se inicia nuevamente el ciclo.

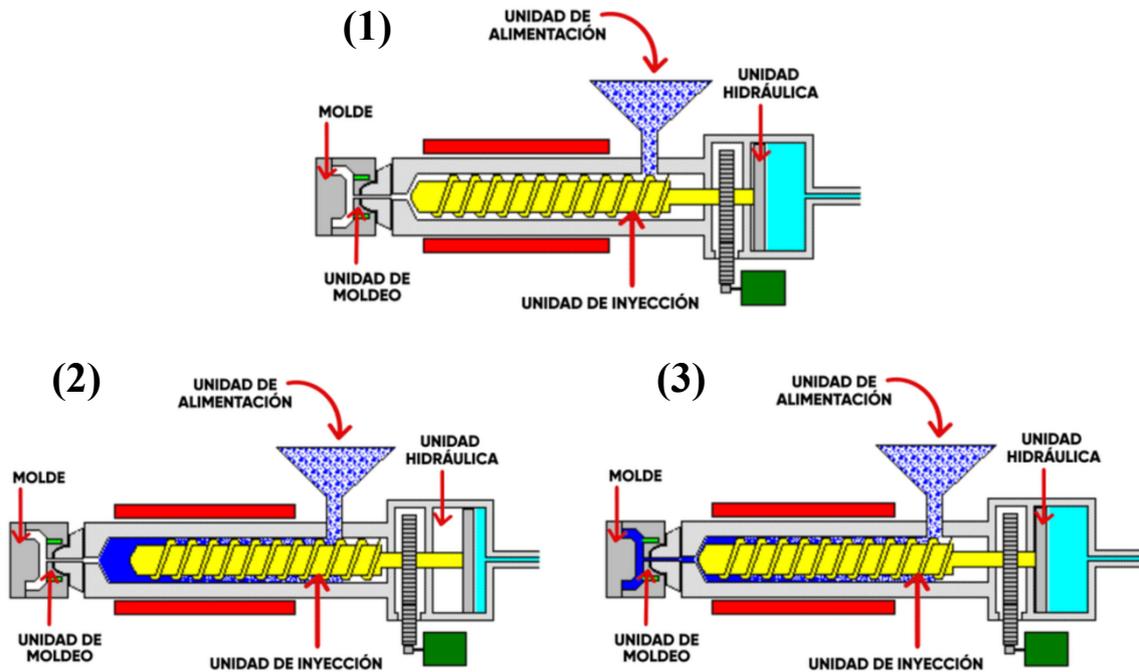


Imagen 1. Proceso de moldeo por inyección.

Por tanto, el proceso de moldeo por inyección se puede resumir en lo siguiente:

- El material se funde en la máquina de moldeo por inyección.
- Es inyectado en un molde a alta presión.
- Dentro del molde se enfría, solidifica y es liberado abriéndose las dos mitades del molde.

Además, de este proceso se obtienen unos parámetros importantes, los cuales se han utilizado en este estudio, que son:

- **Velocidad de inyección:** es el caudal de material que sale de la máquina de inyección durante el proceso y viene principalmente determinada por la velocidad de avance del husillo.
- **Temperatura del molde:** es la temperatura a la que se encuentra la superficie de la cavidad de moldeo.

- **Presión de mantenimiento:** es la presión que se aplica al final de la inyección del material, cuando el molde se encuentra casi completamente lleno.
- **Temperatura de inyección:** es la temperatura a la que se calienta el material para posteriormente introducirlo en el interior del molde.
- **Contrapresión:** es la presión que se aplica al husillo para impedir que este se mueva hacia atrás cuando está cargando material. [5 - 7]

2.4.1.1.1 PROBLEMAS EN EL PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN

La longitud de la fibra mejora las propiedades mecánicas de estos materiales, incrementándose la resistencia al impacto o tenacidad manteniendo su rigidez. Para que ocurra esto, las fibras se deben mantener largas durante el proceso de moldeo.

Sin embargo, un material de fibras largas se puede convertir en uno de fibras cortas, debido a un mal procesamiento. Por tanto, si la longitud de las fibras varía durante el procesado, no se alcanzará el desempeño que se deseaba.

Por ello, con el fin de mantener la longitud de las fibras durante el moldeo, se deben tener en cuenta tres factores: la máquina de inyección, el diseño de la pieza y el molde, y las condiciones de procesamiento.

2.4.1.1.1.1 MÁQUINA DE INYECCIÓN

Los equipos ya utilizados para moldear compuestos con fibras cortas se pueden usar para moldear los de fibras largas, pero hay casos en que se necesitan equipos adicionales para ayudar a preservar la longitud de las fibras.

Un husillo con su zona de alimentación, compresión y dosificación puede trabajar bien, aunque el daño a las fibras puede ser rebajado reduciendo la relación de compresión en la zona de dosificación.

En cuanto a la boquilla de la máquina, algunos materiales termoplásticos se procesan mejor con una boquilla de ángulo inverso, la cual puede generar un gran cizallamiento al inyectarse en la cavidad del molde, y por tanto degradar la longitud de las fibras.

Por ello, es recomendable utilizar una que permita un flujo fácil de las fibras largas de la boquilla hacia la pieza. Además, debe tener un diámetro de boquilla y de bebedero de 5,5 mm o más, y no tener aristas vivas.

2.4.1.1.1.2 DISEÑO DE LA PIEZA Y EL MOLDE

Un buen diseño de las piezas y el molde ayudan a mantener la longitud de las fibras. Eliminando las aristas vivas se evitan esfuerzos innecesarios en la pieza y también se reduce el desgaste de las fibras.

La pieza debe ser diseñada con un espesor de pared igual en toda su extensión, ya que si existen variaciones se puede generar un llenado endeble y una orientación de fibras no deseable. Donde se necesiten paredes más delgadas o gruesas, se deben evitar cambios bruscos en el espesor porque estos pueden generar zonas de alta cizalladura que a su vez pueden dañar las fibras y ser una fuente de concentración de esfuerzos. Siempre se intenta ubicar el punto de inyección en las paredes más gruesas para que el flujo se dirija a las paredes más delgadas, siendo éstas las últimas del llenado.

Para compuestos termoplásticos de fibra larga, el espesor de pared ideal es de 3 mm, siendo como mínimo de 2 mm. En caso de que fuera menor al mínimo, es probable que se origine la ruptura de fibras al entrar en el molde.

Gran parte del daño que pueden sufrir las fibras, se debe a la forma en que el material entra al molde. Por tanto, también se deben tener en cuenta los canales de alimentación y los puntos de inyección.

Los canales de alimentación deben ser totalmente redondos y un diámetro mínimo de 5,5 mm, aunque también se aceptan canales de colada caliente abiertos.

Los puntos de inyección deben tener un espesor de 2 mm como mínimo, y deben ubicarse a lo largo de un borde que tenga flujo libre a la cavidad.

2.4.1.1.1.3 CONDICIONES DE PROCESAMIENTO

La longitud de la fibra se puede ver afectada si el proceso no está parametrizado correctamente, por lo que se deben identificar las zonas que pueden causar una excesiva cizalladura.

Se debe tener una contrapresión durante la plastificación en la cual el tornillo se mueva de manera consistente. Una contrapresión de 1,5 a 2,5 bar es suficiente para lograr esto.

También se debe tener en cuenta la velocidad del husillo, la cual debe ser la mínima que garantice una plastificación consistente, por ejemplo, de 30 a 70 rpm.

En cuanto al calor en el proceso de inyección, generalmente se aumenta la temperatura a medida que el material se mueve de la tolva a la boquilla, pero para estos compuestos, se recomiendan mayores temperaturas en la tolva, ya que así los pellets se ablandan antes de entrar a la zona de compresión, la cual tiene una mayor cizalladura.

2.4.1.2 PROCESO DE EXTRUSIÓN

El material se coloca en una tolva en forma de granulado, donde un cilindro con rosca de tornillo lo transporta a lo largo del tubo. El material se funde poco a poco con calentadores y es forzado a pasar mediante el empuje de un husillo a través de un cabezal, donde se enfría y se recoge con un perfil geométrico preestablecido. [8]

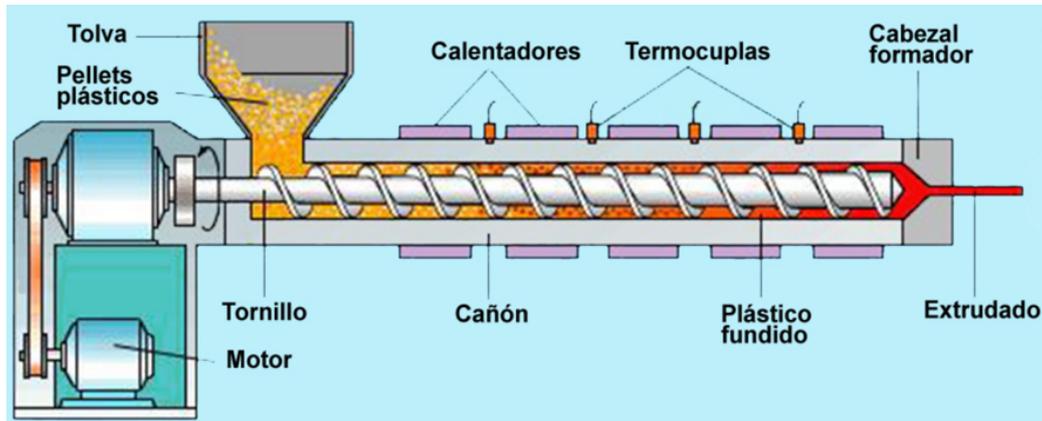


Imagen 2. Proceso de extrusión.

2.4.2 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE COMPOSITOS TERMOPLÁSTICOS REFORZADOS CON FIBRA LARGA

Las propiedades mecánicas de un material indican el comportamiento que tiene cuando se encuentra sometido a fuerzas exteriores, como por ejemplo un estiramiento del material por una fuerza exterior.

El ensayo más elemental de todas las pruebas mecánicas que se puede realizar en un material es el de tracción. [9, 14]

2.4.2.1 ENSAYO DE TRACCIÓN

Este ensayo consiste en someter a un material a una fuerza de tracción, es decir, a una fuerza que trata de estirar el material. Durante el ensayo se realizará cada vez más fuerza sobre él hasta llegar a su rotura.

Estirando el material, se determina cómo éste reacciona ante las fuerzas que se le aplican. A medida que el material se estira, se registra la fuerza que se aplica en cada momento y la cantidad que se alarga.

Para realizar un ensayo de tracción se utilizan probetas o muestras. Una probeta es un trozo de material con forma y dimensiones normalizadas (ISO527), las cuales son la longitud de la probeta y el área de su sección transversal.

La probeta se suele colocar verticalmente y se agarra por sus extremos entre dos accesorios llamados mordazas. Después se comienza a aplicar una fuerza exterior en uno de los extremos de la probeta a una velocidad lenta y constante, mientras que el otro extremo se queda fijado al agarre, aunque en algunas máquinas de tracción se hace fuerza en ambos extremos.

La probeta se deforma en el sentido de aplicación de la fuerza, la cual es en la dirección de su eje. Se estira, disminuyendo su sección y aumentando su longitud, y se aplica cada vez más fuerza externa hasta que llegue un momento en que la probeta rompa. Este momento se denomina momento de la fractura.

Mediante este ensayo se obtienen los datos necesarios para realizar la curva de Tensión-Deformación. Se mide la deformación de la probeta entre dos puntos fijos de la misma a medida que se incrementa la carga aplicada, y se representa gráficamente en función de la tensión.

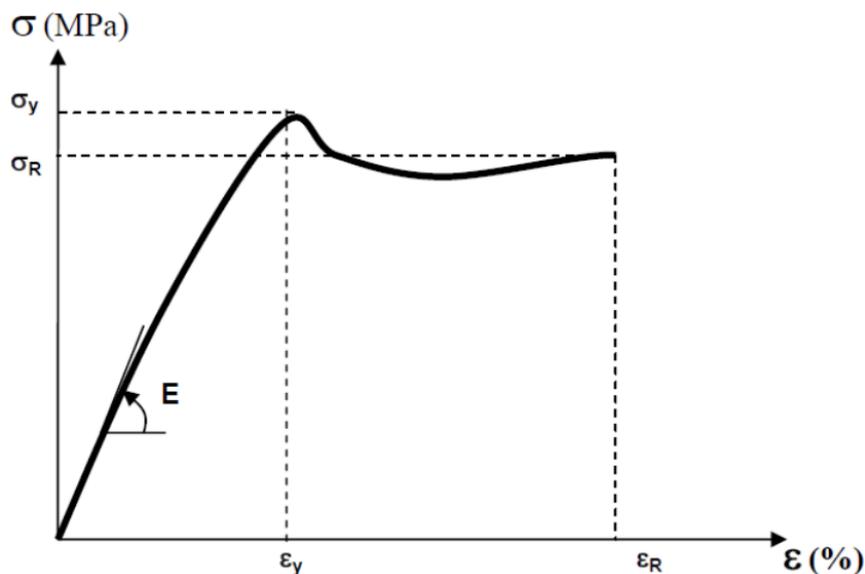


Imagen 3. Curva de Tensión-Deformación en un ensayo de tracción.

Con este ensayo obtenemos:

- Módulo de elasticidad (E): Relación entre la tensión y la deformación en la zona de comportamiento proporcional.
- Resistencia a la tracción (σ_y): Tensión máxima que soporta la probeta durante el ensayo.
- Tensión de rotura (σ_R): Tensión de tracción soportada por la probeta en el momento de su rotura.
- Alargamiento de rotura (%): Mayor alargamiento plástico alcanzado por la probeta.



Imagen 4 y 5. Máquina de ensayo de tracción.

2.4.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA DE COMPOSITES TERMOPLÁSTICOS REFORZADOS CON FIBRA LARGA

Dos técnicas comunes de caracterización de la microestructura de materiales plásticos son: Microscopio óptico y microscopio electrónico.

2.4.3.1 MICROSCOPIO ÓPTICO

El microscopio óptico es un instrumento complejo, formado por un sistema óptico y un sistema mecánico, y su objetivo es poder visualizar microorganismos y estructuras no visibles a simple vista. [10, 11]

2.4.3.1.1 PARTES DE UN MICROSCÓPIO ÓPTICO

Como se ha dicho anteriormente, en un microscopio óptico se puede distinguir entre el sistema óptico y el sistema mecánico, los cuales se pueden describir de la siguiente manera:

- Sistema óptico: conjunto de lentes y elementos de manipulación de la luz necesarios para obtener una imagen aumentada. Dentro de este sistema se encuentran:
 - **Foco**: Elemento que dirige los rayos de luz hacia el condensador.
 - **Condensador**: Lo atraviesan los rayos de luz antes de llegar a la muestra, y se encarga de concentrarlos sobre la preparación a observar.
 - **Diafragma**: Acoplado al condensador, el cual regula la cantidad de luz incidente.
 - **Objetivo**: Conjunto de lentes situadas en el revólver, las cuales captan la imagen, la amplían según su aumento, y la transmiten luego hacia el ocular.
 - **Ocular**: Elemento que amplía la imagen proveniente del objetivo. A través de él se observa la muestra.

- Sistema mecánico: proporciona el soporte estructural a los anteriores elementos.
 - **Base**: Permite una posición estable del microscopio.
 - **Brazo**: Estructura principal que conecta la base con el sistema óptico.
 - **Platina**: Plataforma horizontal donde se coloca la muestra. Normalmente tiene unas pinzas para sujetar la muestra.
 - **Tornillo macrométrico**: Desplaza la platina arriba y abajo para acercar o alejar la muestra del objetivo y así poder enfocar la muestra.
 - **Tornillo micrométrico**: sirve para enfocar de forma precisa la muestra.
 - **Revólver**: Parte donde están montados los objetivos, normalmente 3 o 4, y permite girarlos para seleccionar el deseado.
 - **Tubo**: Elemento que conecta los objetivos y el ocular.

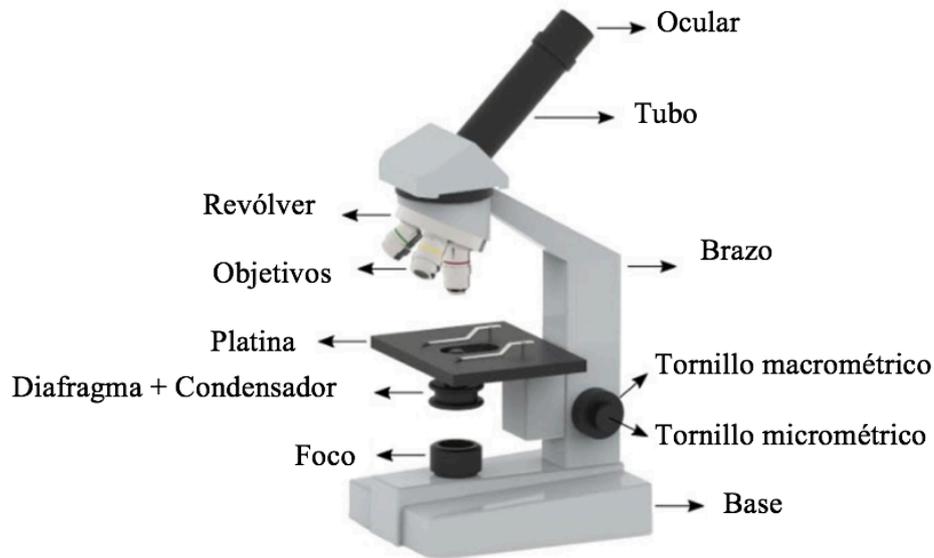


Imagen 6. Partes de un microscopio óptico.

2.4.3.1.2 FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de un microscopio óptico es el siguiente:

1. En el microscopio óptico se combinan dos juegos de lentes, el objetivo y el ocular. Detrás de la muestra, el foco atraviesa la muestra con su luz y forma una imagen en el objetivo que se amplía y proyecta al ocular (Imagen 7).
2. La imagen proyectada por el objetivo se forma en el aire entre el objetivo y el ocular. A esta imagen se la denomina imagen primaria o aérea (Imagen 8).
3. Esta imagen alcanza al ocular, que actúa como una lupa ampliando la imagen primaria, denominándose imagen secundaria. Esta es finalmente la que alcanza el observador con su retina. También se conoce como imagen virtual, ya que se percibe como un plano que va más allá del objeto real que se observa. (Imagen 9).

Por tanto, el funcionamiento del microscopio óptico hace que se den dos ampliaciones de la imagen, una en el objetivo y otra en el ocular.

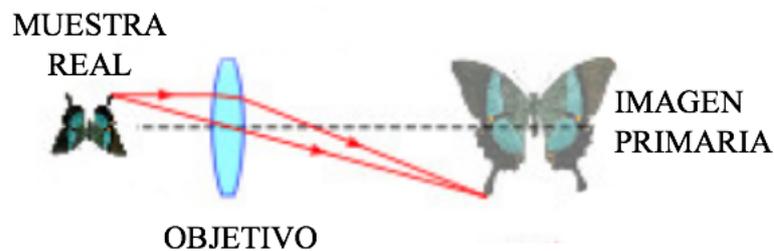


Imagen 7. Fase 1 del funcionamiento de un microscopio óptico.

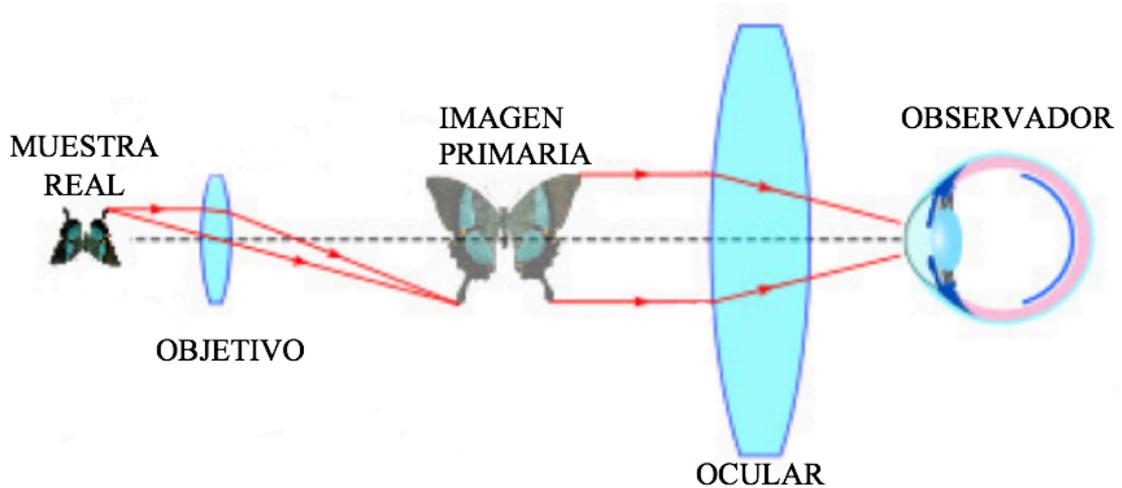


Imagen 8. Fase 2 del funcionamiento de un microscopio óptico.

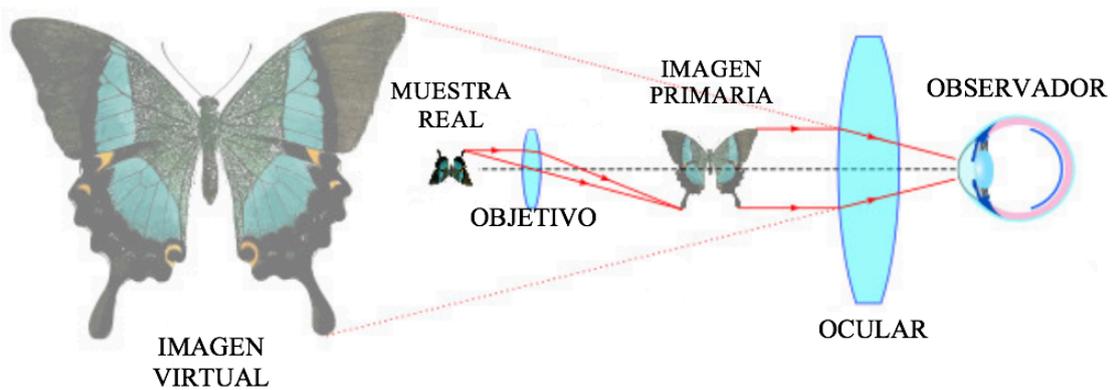


Imagen 9. Fase 3 del funcionamiento de un microscopio óptico.

2.4.3.2 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO

El microscopio electrónico es el que utiliza electrones en vez de luz visible para formar imágenes. [10, 12]

2.4.3.2.1 TIPOS DE MICROSCOPIOS ELECTRÓNICOS

Existen dos tipos:

1. Microscopio electrónico de transmisión (TEM).
2. Microscopio electrónico de barrido (SEM).

1) MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE TRANSMISIÓN (TEM)

Este tipo de microscopio electrónico utiliza los electrones que atraviesan la muestra, y funciona de la siguiente manera:

1. Las lentes electromagnéticas conducen a los electrones hacia la muestra, y cuando impactan contra ella, algunos consiguen atravesarla y otros se dispersan.
2. Los electrones que consiguen atravesar la muestra son capturados por un detector dando lugar así a una imagen. Es necesario que la muestra sea lo suficientemente delgada para que el máximo número de electrones la puedan atravesar.

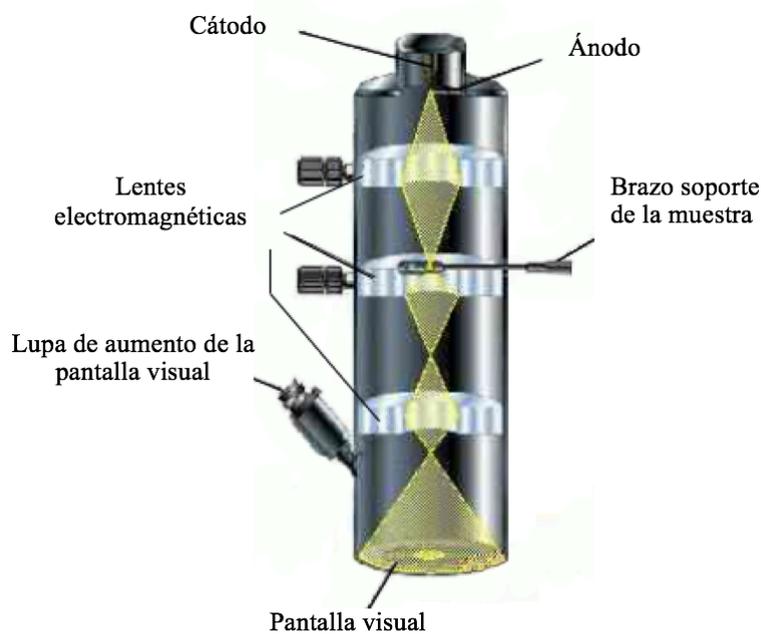


Imagen 10. Partes de un microscopio electrónico de transmisión.

2) MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

En este tipo de microscopio también se necesita el impacto de los electrones contra la muestra.

Los electrones no iluminan toda la muestra a la vez, sino que se hace un escaneado avanzando por los distintos puntos de la muestra.

Los electrones pierden energía cuando impactan contra la muestra, ya que parte se transforma en calor o en emisiones de rayos X.

Además, muchos de los electrones se desprenden de la superficie de la muestra, los cuales se conocen como electrones secundarios.

El funcionamiento de este tipo de microscopio consiste generalmente en medir la cantidad de electrones secundarios que emite la superficie cuando es bombardeada con electrones.

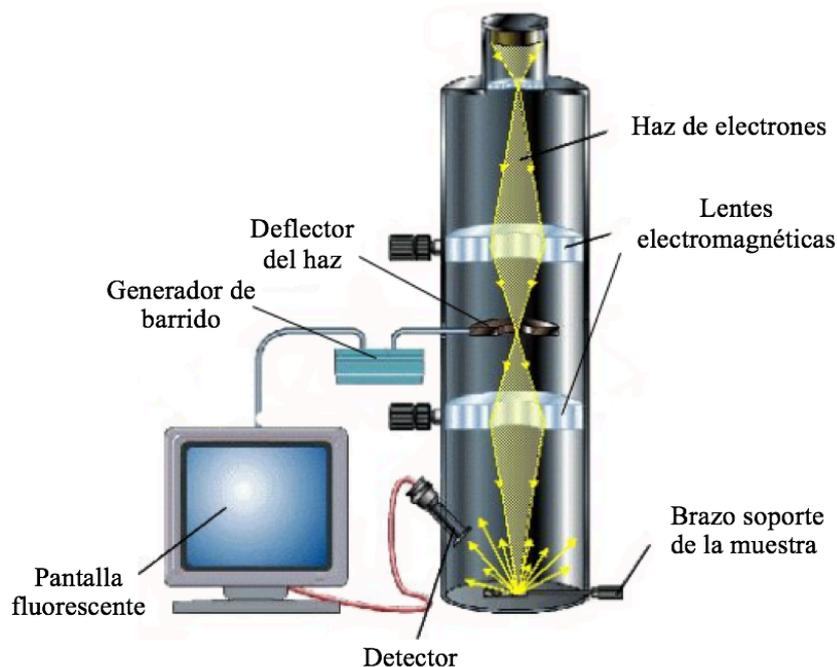


Imagen 11. Partes de un microscopio electrónico de barrido.

En este caso, no se ha utilizado un microscopio electrónico ya que las fibras del estudio son muy grandes y es necesario analizar un número estadísticamente significativo. Por tanto, se ha utilizado un microscopio óptico, el cual ofrece una resolución suficiente.

2.4.4 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE LAS FIBRAS DE COMPOSITES TERMOPLÁSTICOS

Con el fin de obtener la longitud de las fibras presentes en un composite termoplástico se realiza el método de pirólisis. [12, 14]

2.4.4.1 MÉTODO DE PIRÓLISIS

La pirólisis es un proceso que consiste en calentar una materia a una temperatura muy alta en presencia de oxígeno, produciendo su descomposición química o un cambio de estado. Se puede considerar que la pirólisis comienza en torno a los 250 °C, llegando a ser prácticamente completa en torno a los 500°C. Este proceso no funciona ni en metales ni en vidrios, por lo que es un método ideal para obtener las fibras, desapareciendo la resina.

Los productos que se forman son los siguientes:

- Gases: Monóxido de Carbono, Dióxido de Carbono, Metano, Etano y pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros.
- Sólidos: Fibra e impurezas inorgánicas que pueda contener el polímero.

2.5 ANOVA.

Un análisis de varianza (ANOVA) prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. Se evalúa la importancia de una o más variables al comparar las medias de respuesta en los diferentes niveles de las variables. La hipótesis nula establece que todas las medias de la población (medias de los niveles de las variables) son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente. Para llevarlo a cabo se debe tener una respuesta continua y al menos una variable con dos o más niveles.

Los modelos ANOVA permiten comparar los valores medios que toma la respuesta en J poblaciones para unos niveles distintos de las variables, para determinar si existen diferencias relevantes según dichos niveles o la respuesta en cada población es independiente de los niveles de las variables. [13 - 15]

2.5.1 ANÁLISIS DE EFECTOS PRINCIPALES

ANOVA permite analizar los efectos principales, con el fin de conocer el efecto de las variables en la respuesta y comparar la fuerza relativa de los efectos. Se dibuja un solo gráfico de efectos principales para una variable, o una serie de gráficos para dos o más variables.

Se trazan las respuestas medias para cada nivel de la variable y después se conectan dichos puntos. Además, Se dibuja una línea de referencia en la media general. Para visualizar si los efectos son principales se debe mirar la línea que conecta los niveles de la variable. Un efecto principal está presente cuando el cambio en la respuesta media a través de los niveles de una variable es significativo.

Si la línea es horizontal (paralela al eje x), no hay un efecto principal presente. Por tanto, la respuesta media es la misma para todos los niveles de las variables.

Si la línea no es horizontal, puede haber un efecto principal presente, lo que indica que los diferentes niveles de la variable afectan a la respuesta de manera diferente.

Cuanto mayor sea la pendiente de la línea, más fuerte será el efecto.

2.5.2 ANÁLISIS DE EFECTOS PRINCIPALES COMBINADOS

ANOVA también permite analizar efectos principales combinados. Se dibuja un gráfico de interacciones para dos variables, o una matriz de gráficos para tres o más variables.

Para cada combinación de variables, se traza la respuesta media y se conectan los puntos para los niveles bajos y altos de la variable trazada en el eje x.

Para determinar si una interacción está presente o no, se debe mirar las líneas que conectan los niveles de la variable. Una interacción está presente cuando el cambio en la respuesta media del nivel bajo al nivel alto de una variable depende del nivel de una segunda variable.

Si las líneas son paralelas entre sí, no hay interacción presente. Esto significa que el cambio en la respuesta media del nivel bajo al nivel alto de una variable no depende del nivel de una segunda variable.

Si las líneas no son paralelas entre sí, puede haber una interacción presente, por lo que el cambio en la respuesta media del nivel bajo al nivel alto de una variable depende del nivel de una segunda variable.

Cuanto mayor sea el grado de desviación de ser paralelo, más fuerte será el efecto.

2.5.3 ANÁLISIS DE LA SIGNIFICATIVIDAD DE LOS EFECTOS PRINCIPALES

Además, ANOVA permite evaluar si un efecto es estadísticamente significativo, lo que significa que la respuesta depende de forma relevante del efecto en cuestión.

Para ello se realiza una prueba de hipótesis, la cual utiliza los datos de la muestra para determinar si se puede rechazar la hipótesis nula.

La hipótesis nula indica que un parámetro de población (tal como la media, la desviación estándar, etc.) es igual a un valor hipotético. Se basa en análisis previos o en conocimiento especializado.

Por el contrario, la hipótesis alternativa indica que un parámetro de población es más pequeño, más grande o diferente del valor hipotético de la hipótesis nula. La hipótesis alternativa es lo que se podría pensar que es cierto o se espera probar que es cierto. Para poder rechazar la hipótesis nula se utiliza el nivel de significación.

El nivel de significación se define como la probabilidad de tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula cuando ésta es verdadera, y es representado por el símbolo α (alfa).

Por ejemplo, un nivel de significación de 0,05 indica un riesgo del 5% de concluir que existe una diferencia entre los resultados del estudio y la hipótesis nula cuando en realidad no hay ninguna diferencia.

Cuanto menor sea el nivel de significación, mayor será la certeza de que un hecho no se debe a una mera coincidencia.

La decisión se toma utilizando el valor p , el cual muestra la probabilidad de haber obtenido el resultado que se ha obtenido si se supone que la hipótesis nula es cierta.

Si el valor p es inferior al nivel de significación, entonces la hipótesis nula es rechazada. Cuanto menor sea el valor p , más significativo será el resultado.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCIÓN

Se han fabricado un conjunto de probetas mediante un proceso de inyección, y posteriormente han sido sometidas a un ensayo de tracción, con el fin de obtener datos sobre sus propiedades mecánicas.

Se ha hecho un estudio sobre su microestructura, para así ayudar a entender las relaciones entre las condiciones de procesado y propiedades mecánicas de las piezas fabricadas, y así optimizar las simulaciones del comportamiento del material.

3.2 PROCESO DE INYECCIÓN

El proceso de inyección se ha llevado a cabo con la máquina “Engel insert 200” a una temperatura de entre 285° y 310°.

Los pellets utilizados tienen las siguientes características:

Tabla 1. Características de los pellets utilizados.

LONGITUD MÍNIMA (mm)	LONGITUD MÁXIMA (mm)	LONGITUD MEDIA (mm)	CONTENIDO DE FIBRAS (%)
11,468	11,997	11,71	60

Por tanto, la longitud máxima de la fibra que se puede conseguir es de alrededor de 12 mm, ya que las fibras siguen el flujo de inyección. Sin embargo, en el proceso de inyección la longitud de cada fibra disminuye, ya que sufren roturas debidas al mismo. Además, estas se dispersan a lo largo del molde desconociendo su orientación final.

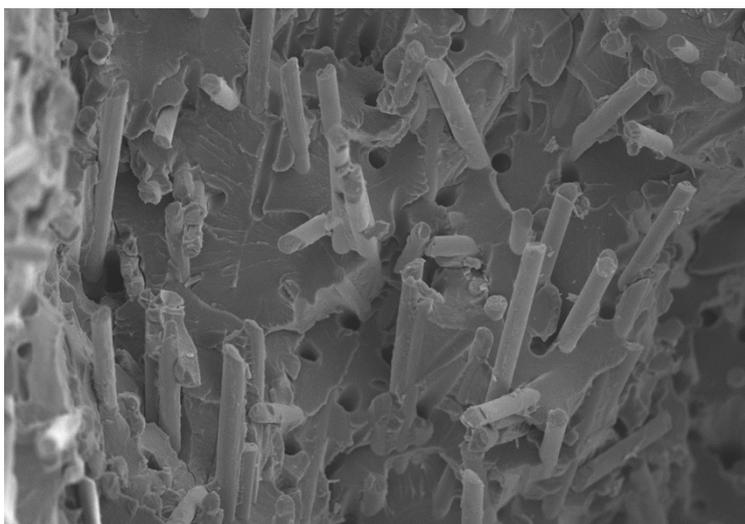


Imagen 12. Ejemplo de la orientación de las fibras.

Se conoce la media en peso de la longitud de las fibras de dos de las probetas estudiadas, la cual oscila entre 2 y 3 mm. Sabiendo que se parte de una longitud de casi 12 mm, se puede observar una disminución considerable.

En el proceso de inyección se ha obtenido una pieza de la cual se ha estudiado una de sus zonas, la “ISO 527”. [16]

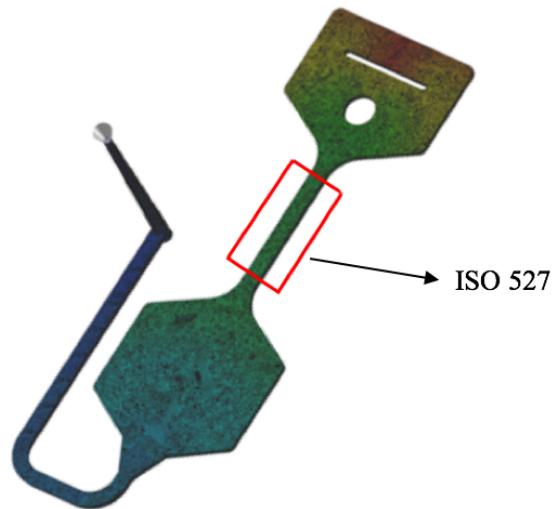


Imagen 13. Zona ISO 527.

3.3 ENSAYO DE TRACCIÓN

El ensayo de tracción se ha realizado con la máquina “MTS Insight”, a una velocidad de 1 mm/min para el cálculo del módulo de elasticidad, y de 5 mm/min hasta la rotura. Con este ensayo se ha obtenido el módulo de elasticidad, tensión de rotura y alargamiento de cada probeta.

3.4 CARACTERÍSTICAS Y DATOS

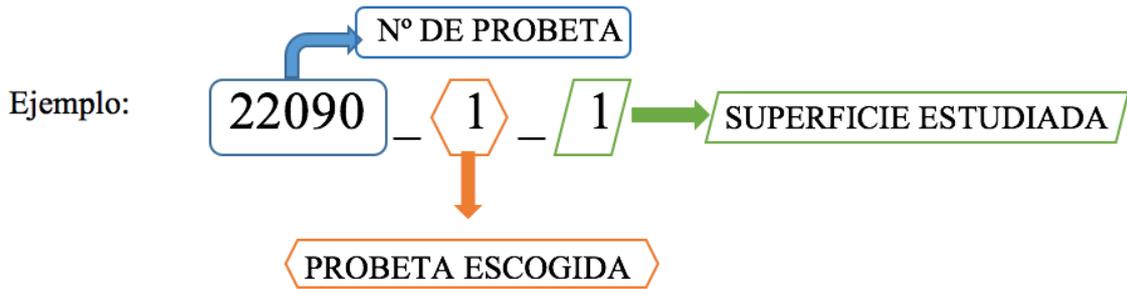
El estudio se ha realizado en 16 probetas. Los parámetros de procesado se han variado en cada una de ellas, utilizando dos niveles para cada uno de ellos. Estos parámetros son:

- **Temperatura de inyección (°C)** => 285 - 310
- **Temperatura del molde (°C)** => 80 - 100
- **Contrapresión (bar)** => 3 - 15
- **Velocidad de inyección (mm/s)** => 15 - 60
- **Presión de mantenimiento (bar)** => 40 - 80

Cada probeta se ha fabricado varias veces, pero en este estudio solo se ha escogido una de ellas al azar de cada tipo, salvo en la primera, en la que se han escogido varias para comparar resultados entre sí.

Así mismo, para una de las escogidas de la primera probeta, se han estudiado tres superficies diferentes.

La nomenclatura utilizada ha sido la siguiente:



Las probetas estudiadas han sido:

Tabla 2. Probetas estudiadas.

22090_1	<ul style="list-style-type: none"> 22090_1_1 22090_1_2 22090_1_3 	22095_5
22090_2		22096_5
22090_3		22097_4
22090_4		22098_2
22091_1		22099_4
22092_5		22100_4
22093_1		22101_1
22094_5		22102_3
		22103_1
		22104_3
		22105_1

3.5 CARACTERIZACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA

Para realizar el análisis se tuvieron que hacer una serie de fases, las cuales son:

1. Corte de las muestras.
2. Colocación en moldes.
3. Lijado y pulido.
4. Captura de imágenes.
5. Preparación de la imagen.
6. Binarización.
7. Obtención de datos.
8. Optimización del proceso.

3.5.1 CORTE DE MUESTRAS

La primera fase consiste en realizar el corte de una zona en cada probeta, el cual se hace en la parte central, con el fin de obtener la superficie a estudiar.

CROQUIS:

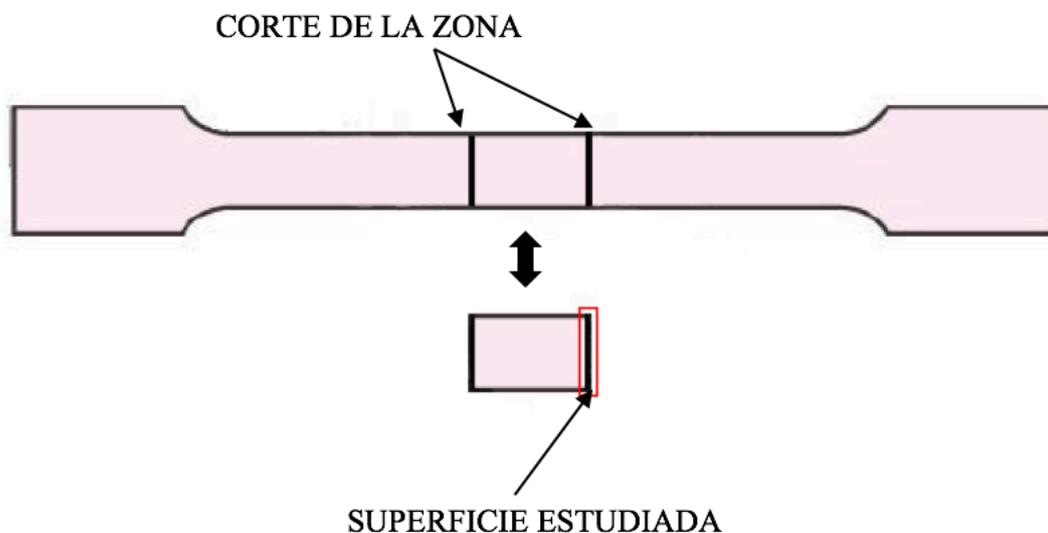


Imagen 14. Croquis del corte de las muestras.

3.5.1.1 MATERIAL UTILIZADO

Para realizar el corte de las probetas se ha utilizado una cortadora de precisión “Ultracut” (Imagen 15).

Para ello se ha colocado la probeta dentro de una mordaza de forma plana y paralela (Imagen 16), bien sujeta para que el corte se realice de forma recta. La mordaza se coloca en la cortadora y se ajusta la velocidad del disco cortador.

Se debe tener en cuenta que para que el disco funcione correctamente debe impregnarse ligeramente de un lubricante, el cual se echa en el fondo de la base sobre la que está colocada el disco.

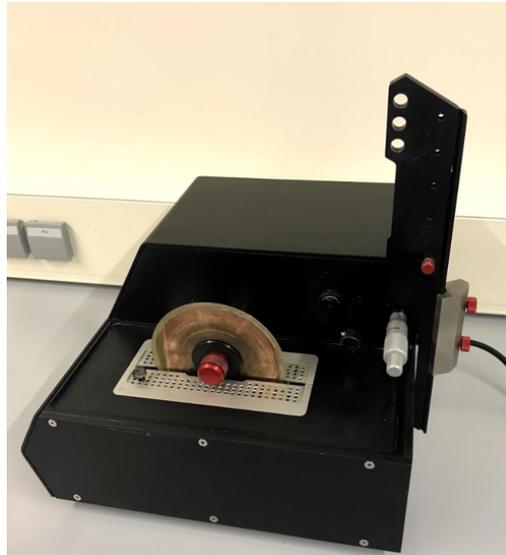


Imagen 15. Cortadora de precisión "Ultracut".



Imagen 16. Mordaza.

3.5.2 COLOCACIÓN EN MOLDES

Una vez realizados los cortes de cada pieza, se han colocado dentro de unos moldes de 3 cm de diámetro y 3 cm de alto (Imagen 17). Para ello cada pieza debe ir sujeta con un soporte, con el fin de que la pieza quede totalmente perpendicular al fondo.

Este soporte se coloca con la superficie a estudiar mirando hacia la cara inferior del molde.



Imagen 17. Molde.

Estos moldes han sido rellenos de resina epoxi que se prepara en laboratorio. Esta está compuesta por:

1. **Resina:** Aka-Resin Liquid, Transparent, low viscosity, low shrinkage epoxy resin.
2. **Agente de curado:** Aka-cure Slow, Epoxy curing Agent Slow cure Schedule for impregnation.

La proporción de la mezcla es de 100 - 12, de resina y agente de curado, respectivamente.

Se debe mezclar bien para que no quede ninguna burbuja en su interior, y así quede con una mayor uniformidad. Además, se endurece pasadas 24 h desde que se prepara. Esto hace que las piezas queden totalmente rodeadas de ésta, y así poder desmoldar fácilmente. Al conjunto de pieza y mezcla se le ha llamado muestra.

Una vez se tiene la muestra endurecida, se debe cortar de manera muy ligera su cara inferior, ya que el contorno del fondo del molde no es totalmente recto. Para ello se ha vuelto a utilizar la cortadora de precisión anteriormente descrita, junto con una mordaza para piezas redondas (Imagen 18), donde se ha colocado la muestra para su corte.



Imagen 18. Mordaza para piezas redondas.

Antes de continuar con otro proceso se debe enumerar de algún modo cada muestra para evitar equivocaciones a lo largo del estudio. Para ello se ha escrito en la parte inferior de la muestra con un cúter el número de la probeta que corresponde, únicamente con los últimos valores, diferentes en cada pieza. Además se debe poner también la dirección en la que se realizarán las imágenes (Imagen 19).

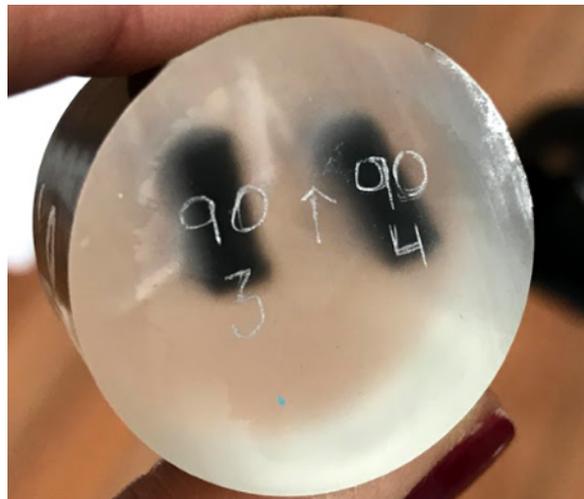


Imagen 19. Numeración y dirección.

3.5.3 LIJADO Y PULIDO

Para hacer que las características de interés sean accesibles al sistema de imagen del microscopio, se debe realizar una serie de lijados y un pulido.

Esta serie de lijados y pulidos tratan de eliminar la rugosidad de las muestras hasta que queden como un espejo y así se permita ver el tamaño de los objetos deseados, en este caso la fibras.

Estos se han realizado de forma proporcional al tamaño de las partículas de cada lija o paño, de mayor a menor tamaño de partícula. La máquina utilizada es “Struers TegraPol-11 Polisher” (Imagen 20).



Imagen 20. Struers TegraPol-11 Polisher.

Los datos a tener en cuenta son:

- Velocidad de la lija o paño - Velocidad de las muestras: 180 - 50 rpm.
- Utilizar agua.
- Fuerza aplicada.
- Tiempo.
- Sentido de giro de la muestra y de la lija o paño.

Los pasos a seguir con cada muestra son:

1. LIJA GRANULACIÓN 320. (Imagen 21).

- Fuerza aplicada: 10 N
- Tiempo: 2 min
- Sentido de giro de la muestra opuesto al de la lija.

2. LIJA GRANULACIÓN 800. (Imagen 22).

- Fuerza aplicada: 10 N
- Tiempo: 2 min
- Sentido de giro de la muestra opuesto al de la lija.

3. LIJA GRANULACIÓN 1200. (Imagen 23).

- Fuerza aplicada: 10 N
- Tiempo: 2 min
- Sentido de giro de la muestra opuesto al de la lija.

4. LIJA GRANULACIÓN 4000. (Imagen 24).

- Fuerza aplicada: 25 N
- Tiempo: 10 min
- Sentido de giro de la muestra opuesto al de la lija.

5. PAÑO 3 μ m. (Imagen 25).

En este caso, se echan al paño las partículas de 3 μ m, con un pulverizador.

- Partículas
- Fuerza aplicada: 25 N
- Tiempo: 10 min
- Sentido de giro de la muestra igual al del paño.

A continuación se puede observar el proceso detallado de cada lijado y pulido, en función de las imágenes siguientes:

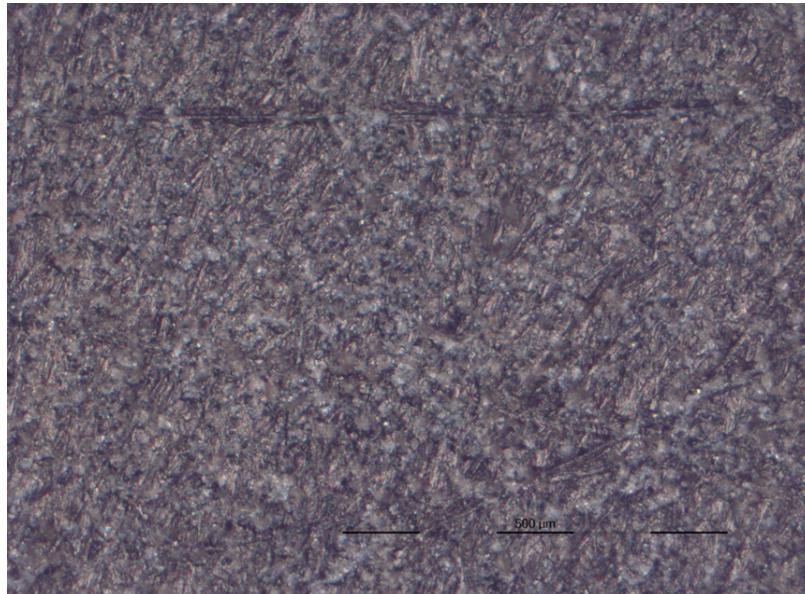


Imagen 21. Lija Granulación 320.

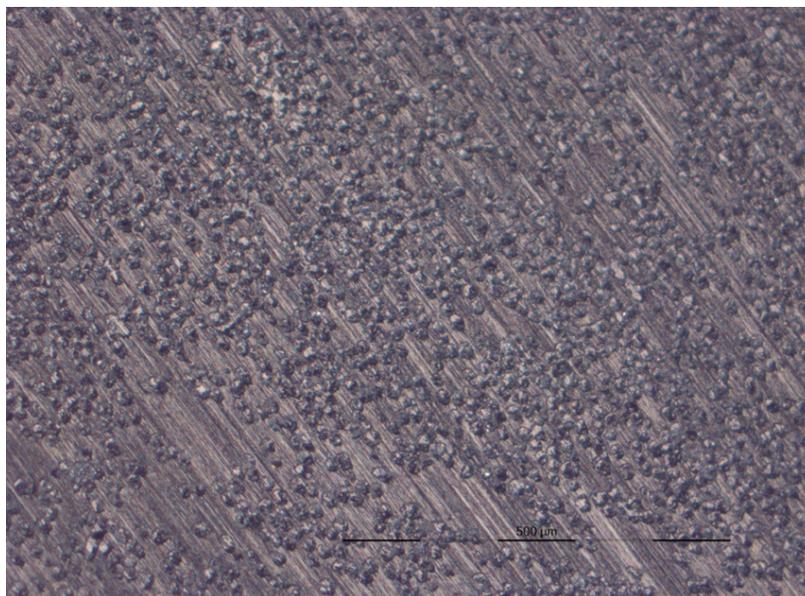


Imagen 22. Lija granulación 800.

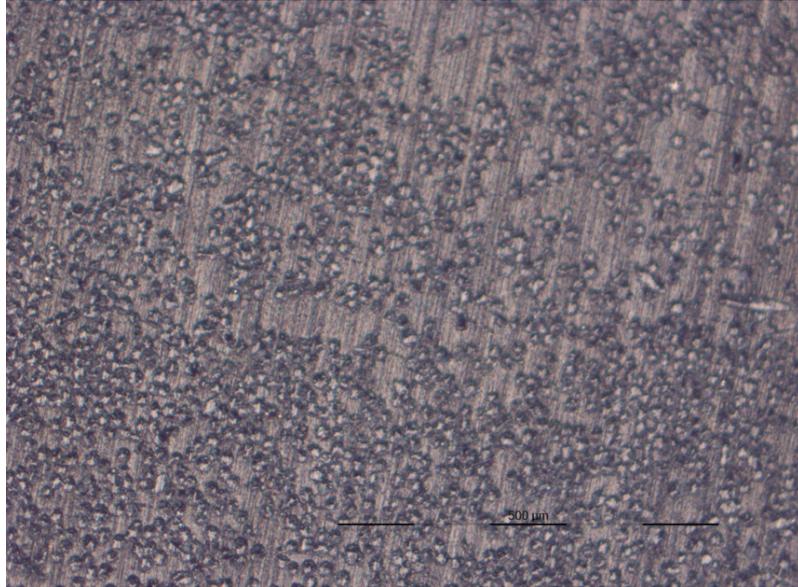


Imagen 23. Lija granulación 1200.

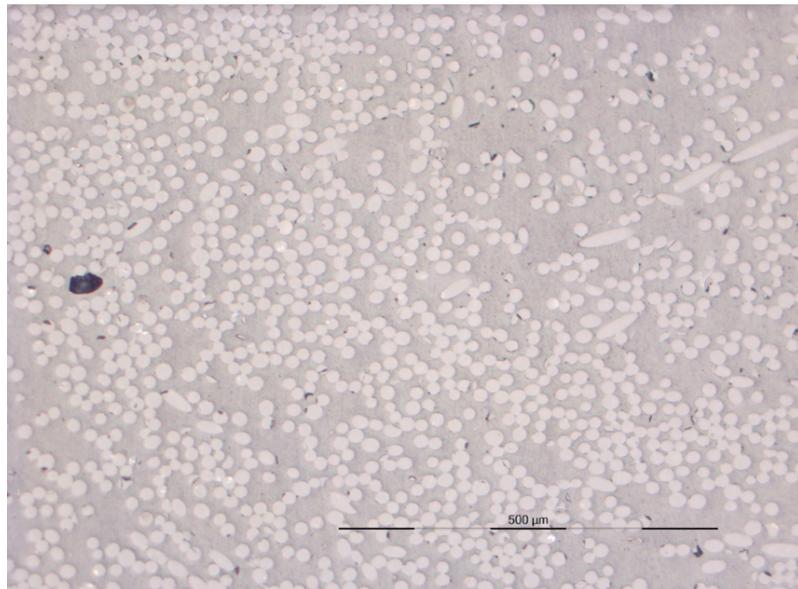


Imagen 24. Lija granulación 4000.

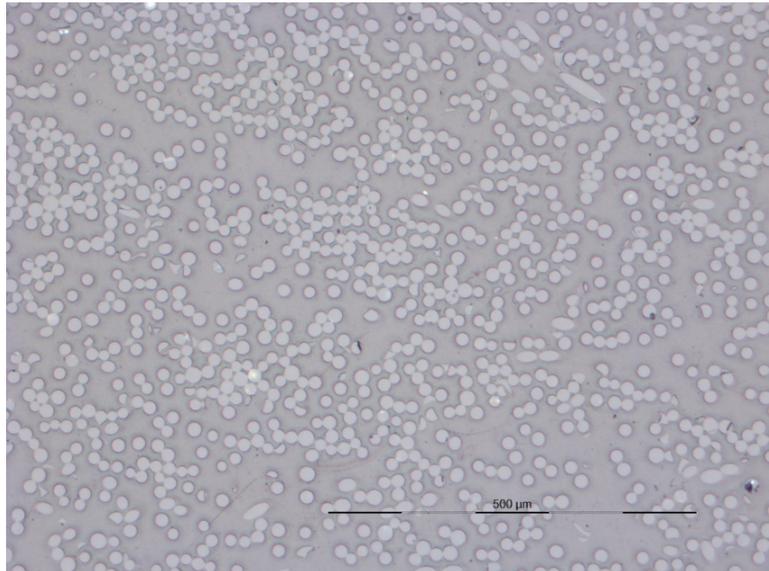


Imagen 25. Paño 3µm.

Se puede comprobar que a medida que se van utilizando partículas más pequeñas de lija, se tiene una mayor homogeneidad en la muestra y una mayor claridad del contenido, obteniéndose así una diferencia clara entre las fibras de vidrio y el polímero.

3.5.4 CAPTURA DE IMÁGENES

Para realizar la captura de imágenes de la superficie de cada pieza a estudiar, se ha utilizado el microscopio óptico “Leica DM4000 con cámara digital Genoptic C7” (Imagen 26), junto con un programa llamado “PROGRES CAPTURE”.



Imagen 26. Microscopio óptico

En este caso se ha requerido una imagen de la superficie completa, de 4 mm de alto y 10 mm de ancho, ya que la sección no es homogénea, y por tanto los datos varían de unas zonas a otras. En la imagen siguiente se puede observar como en la zona central hay una cantidad de fibras superior al resto de la sección.

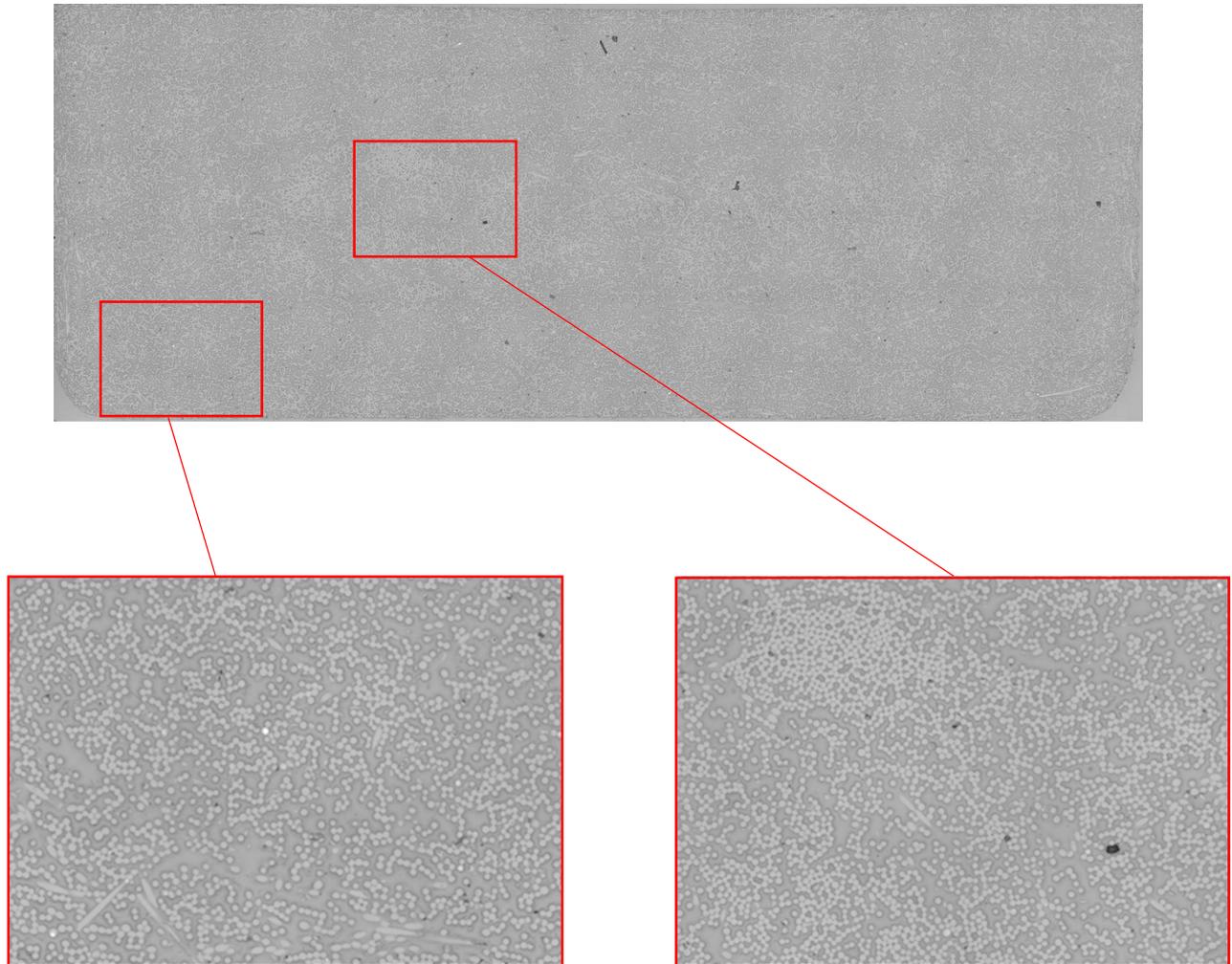


Imagen 27. Diferencias entre distintas zonas de la sección.

La medida utilizada para la captura de imágenes es de 100x, con la cual se obtiene una resolución de $0,34 \mu\text{m}/\text{pixel}$. Esta resolución es suficiente para caracterizar las fibras, ya que su tamaño es mucho mayor que $0,34$.

Se ha escogido la medida de 100x ya que se obtiene tanto una resolución, como un número de imágenes a realizar razonable. Con una medida mayor, la calidad de imagen sería superior, pero el número de imágenes que se necesitarían para obtener la sección completa sería inviable. En este caso se han realizado un total de 11×6 imágenes, en sentido horizontal y vertical, respectivamente.

Para realizar la captura se debe colocar la muestra sobre un portaobjetos. Para asegurarse de que toda la muestra esté en foco simultáneamente (en la medida de lo posible), se debe colocar sobre una pequeña bola de plastilina y se prensa utilizando un papel de por medio para dañar lo menos posible la superficie de la muestra (Imagen 28 y 29).



Imagen 28 y 29. Colocación de la muestra en el portaobjetos.

A continuación se coloca en la platina para observar en microscopio y se enfoca, comprobando así que toda la superficie tiene la misma nivelación.

La captura de imágenes se empieza por la esquina superior izquierda, y se avanza hacia la derecha hasta la otra esquina. Después se desciende y se va hacia la izquierda. Así sucesivamente hasta que se tenga toda la superficie. Se debe dejar en la imagen posterior un trozo de la anterior y se debe tener el mismo número de imágenes en cada fila, intentando que el inicio y final de cada fila sea aproximadamente el mismo.

CROQUIS:

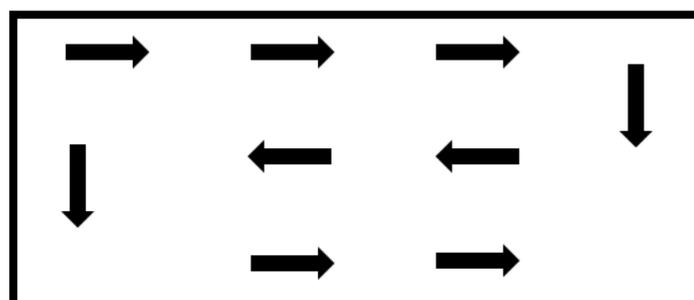


Imagen 30. Croquis de cómo realizar la captura de imágenes de una sección completa.

Una vez se tienen todas las imágenes, se deben juntar para crear la sección completa.

3.5.5 PREPARACIÓN DE LA IMAGEN

Para obtener una imagen completa de la superficie a partir de todas las imágenes realizadas se ha utilizado el programa "ImageJ". Este programa lee cada imagen y las une en las partes que coinciden, creando así la superficie al completo (Imagen 31).



Imagen 31. Unión de las imágenes para la obtención de la sección completa.

Una vez se tiene la superficie completa, se debe buscar que tenga la mejor calidad posible para su posterior estudio. Para ello se realizarán una serie de cambios:

- 1) El modo original de color de la imagen es 8 bit por cada canal de color, y se quiere tener en una escala de grises de 8 bits, por lo que se debe pasar primero a RGB color, y a continuación a 8 bit en escala de grises.
- 2) Además, se debe colocar la imagen lo mas paralela posible al eje horizontal y recortar de forma que la imagen no tenga partes que no correspondan a la superficie de la probeta (Imagen 32 y 33).

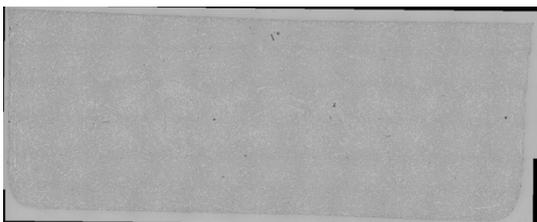


Imagen 32. Superficie original.

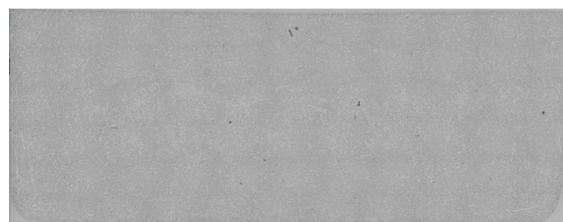


Imagen 33. Superficie rotada y recortada.

3.5.6 BINARIZACIÓN

El proceso de binarizar consiste en distinguir qué es fibra y qué es polímero en cada una de las secciones a estudiar, con el fin de obtener únicamente información de las fibras, en este caso.

Para binarizar la imagen de cada sección se deben realizar una serie de pasos:

- Aplicar un filtro para suavizar la imagen y así obtener unas fibras con bordes más redondeados.
- Convertir la imagen a blanco y negro (binario) por el proceso “Threshold”, distinguiendo qué parte se desea que sea blanco (las fibras) y qué parte negro (la superficie restante), mediante la utilización de un umbral. (Imagen 34).
- Invertir la imagen de modo que la parte blanca y negra sea la contraria.
- Recortar la parte de la imagen que interesa, con toda la información necesaria, prescindiendo de las zonas de las esquinas que queden emborronadas.
- Creación de elipses. La elipse permitirá cuantificar el tamaño de fibra, con lo que posteriormente se calculará los parámetros del tensor de orientación. Se debe indicar el límite inferior y superior de los diámetros mayor y menor de la elipse con el fin de obtener únicamente las elipses de buena calidad. En la imagen 34 se observa que hay partículas de tamaño muy pequeño, lo que indica que algunas fibras se han roto, y por tanto no se obtiene la información real de ellas. Por ello, hay que indicar un límite inferior del diámetro menor que no las tenga en cuenta. Lo mismo ocurre cuando se encuentran fibras unidas, el programa las considerara una única fibra, por lo que también hay que limitar el valor superior del diámetro mayor. Cada elipse corresponde a una fibra de la superficie. (Imagen 35 y 36).

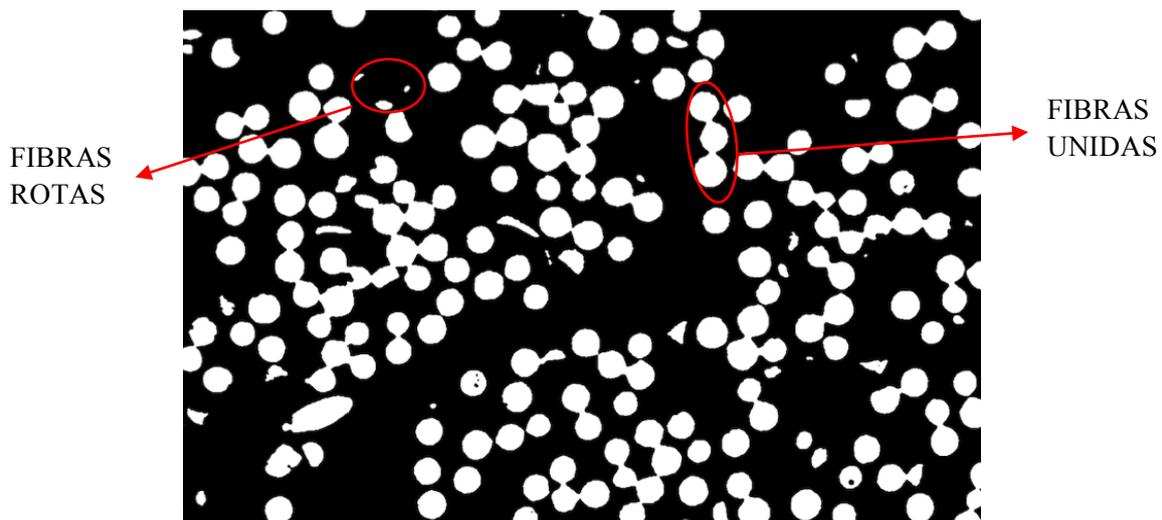


Imagen 34. Conversión a blanco y negro (binario).

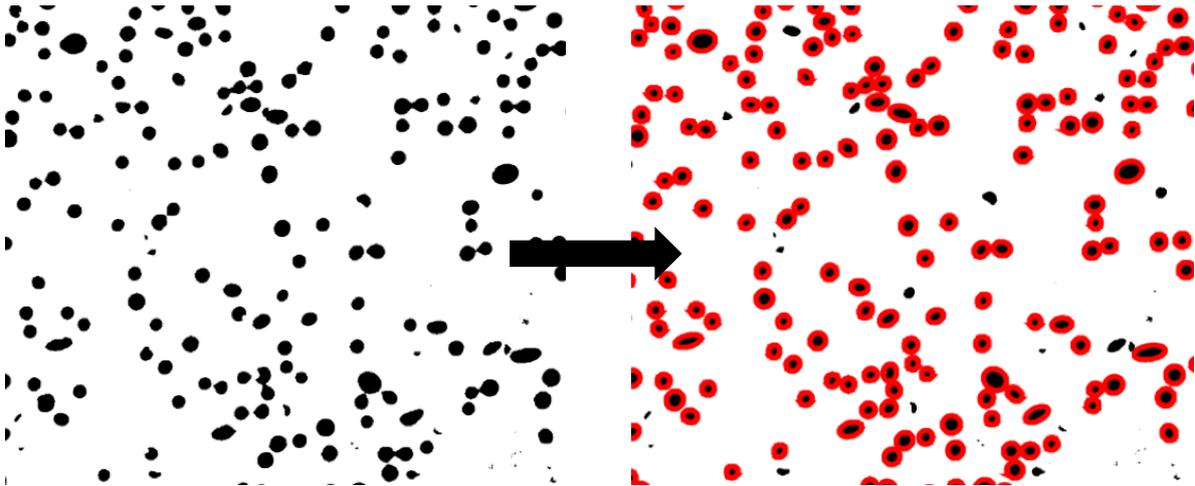


Imagen 35 y 36. Creación de elipses.

Con el fin de obtener una solución óptima, el diámetro menor se ha variado para estudiar como afectaba, de modo que únicamente se escogieran las partículas de fibra entera y no solapadas. El valor del límite superior se ha dejado fijo con un valor de 70 píxeles, y el inferior se ha variado entre 0 y 60 píxeles, para la probeta 22090-1-1. A partir de ahí se ha elegido de forma visual el valor de 20 píxeles.

3.5.7 OBTENCIÓN DE DATOS

Mediante el ajuste de elipses se han obtenido todos los datos necesarios de cada fibra de cada una de las superficies a estudiar.

Estos datos son:

- Número de fibras en cada sección.
- Coordenadas x e y.
- Longitud del diámetro mayor y menor.
- Relación de aspecto: proporción entre la longitud del ángulo mayor y menor.
- Ángulo de rotación o Theta (θ): Ángulo de orientación del eje mayor de la elipse con respecto al eje x (Imagen 37).

A partir de la relación de aspecto se ha obtenido el ángulo Φ (Φ), el cuál es el que hay entre el eje de la fibra y la vertical (Imagen 37).

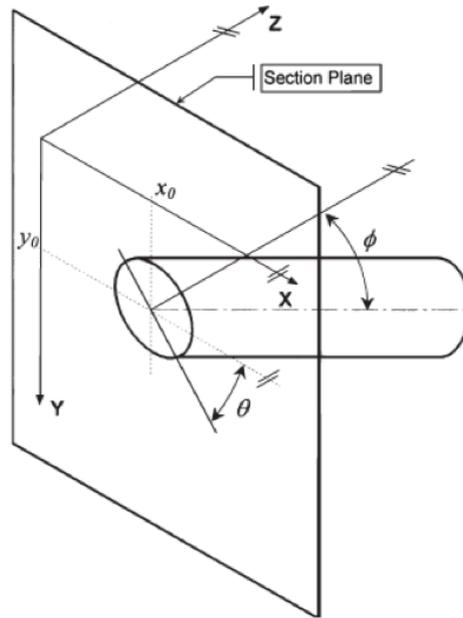


Imagen 37. Situación de una fibra en el espacio.

El número de fibras obtenido en cada sección es de alrededor de 50.000.

A partir de los ángulos se han realizado una serie de cálculos con el fin de obtener la orientación de cada fibra, y con ello conseguir los parámetros del tensor de orientación promedio de las fibras de cada sección, lo que caracteriza su orientación en el espacio. Estos parámetros son los que se utilizan en simulaciones de este tipo de materiales, por tanto son importantes.

Sin embargo, mediante esta metodología se obtienen limitaciones, como que no se puede determinar el signo del ángulo “ ϕ ” (Imagen 38), y por tanto sólo se pueden determinar cuatro de los seis elementos del tensor de orientación. (a_{11} , a_{22} , a_{33} y a_{12}) (Imagen 39).

El tensor de orientación completo solo se puede obtener mediante caracterización 3D, lo cual no se encuentra al alcance en la Universidad del País Vasco.

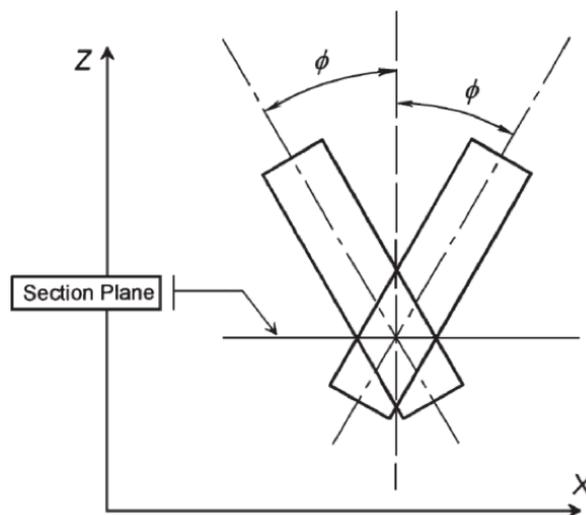


Imagen 38. Signo del ángulo ϕ .

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

Imagen 39. Tensor de orientación.

A partir de la representación gráfica siguiente se puede entender qué son estos parámetros (Imagen 40):

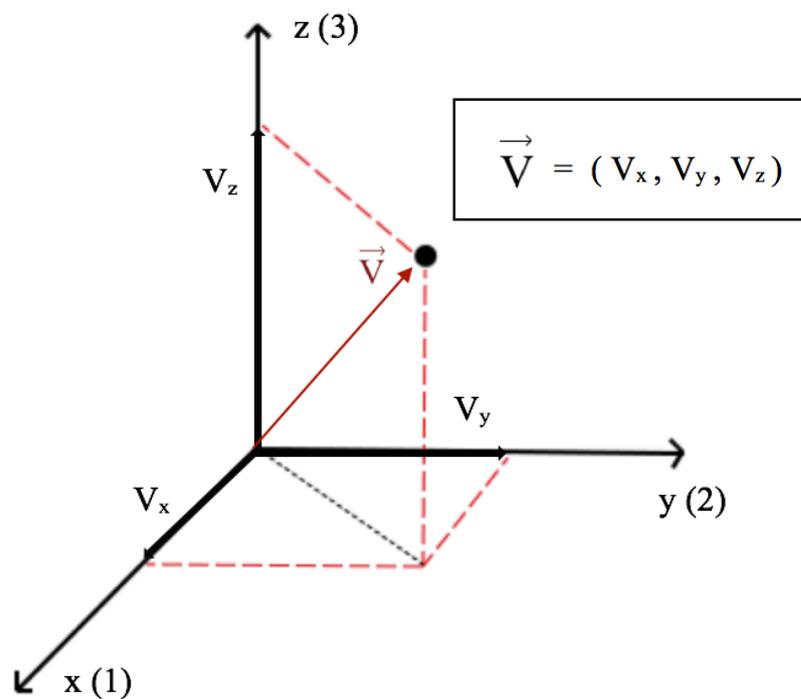


Imagen 40. Representación gráfica del tensor de orientación.

Los parámetros del tensor de orientación salen del gráfico anterior, siendo:

- $a_{11} = V_x \cdot V_x$
- $a_{22} = V_y \cdot V_y$
- $a_{33} = V_z \cdot V_z$
- $a_{12} = a_{21} = V_x \cdot V_y$

Los parámetros más interesantes son el a_{11} , a_{22} , y a_{33} , los cuales se pueden cuantificar con mayor exactitud mediante esta metodología. Además, estos parámetros son los que comúnmente se utilizan en simulaciones de comportamiento mecánico de este tipo de materiales.

Además, el parámetro a_{33} suele tener un valor superior al resto, ya que el flujo de inyección se realiza en el sentido del eje z de coordenadas, haciendo que la mayoría de las fibras se orienten en mayor medida en esa dirección.

3.5.8 OPTIMIZACION DEL PROCESO

Como bien se ha descrito anteriormente, el estudio se ha realizado en la parte central de cada probeta, sin embargo en la 22090_1 se ha realizado el estudio en 3 zonas, con el fin de comprobar una similitud en sus resultados y así poder asegurar que con el estudio de una de las zonas es suficiente.

Además, se ha estudiado la parte central de todas las probetas 22090, para comprobar de igual forma, que sus resultados no varían, y así solo estudiar una al azar de cada una de las probetas.

CROQUIS:

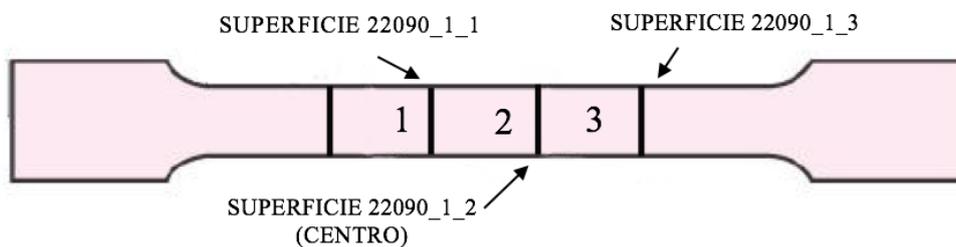


Imagen 41. Croquis de las tres zonas de estudio.

Las probetas de este proceso son las siguientes:

Tabla 3. Probetas estudiadas en este proceso.

22090_1	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="font-size: 2em; margin-right: 5px;">{</div> <div style="text-align: left;"> <p>22090_1_1</p> <p>22090_1_2</p> <p>22090_1_3</p> </div> </div>
22090_2	
22090_3	
22090_4	

Algunos de los datos de la microestructura que se han obtenido en este estudio se ven reflejados en la tabla siguiente:

Tabla 4. Datos de la microestructura probetas 22090.

MUESTRA NÚMERO	Nº PARTICULAS (20-70)	MEDIA DE FI (20-70)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE FI (20-70)	MEDIA DE THETA (20-70)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE THETA (20-70)
22090_1_1	50812	23	11	-20	48
22090_1_2	49554	23	12	-17	52
22090_1_3	48688	22	12	-9	49
22090_2	48756	22	12	-10	49
22090_3	48935	23	13	-10	46
22090_4	48290	22	12	-11	49

Se pueden diferenciar dos partes:

- 1) Corresponde a las tres zonas descritas anteriormente de una misma probeta, en este caso la 22090_1.
- 2) Corresponde a otras tres probetas del tipo 22090.

A continuación, se detallará cada uno de los datos para entender mejor esta tabla.

Nº Partículas:

Se puede observar que para todas las superficies estudiadas el nº de partículas ronda las 50.000 partículas.

Ángulo Fi:

En cuanto al ángulo Fi, se ha obtenido la media de los valores de Fi de todas las partículas de cada sección, así como la desviación estándar que tienen sus valores.

Se tienen unas medias y unas desviaciones estándar de Fi muy similares, por lo que se considera que tienen una gran similitud en cuanto a esta orientación, tanto en las tres zonas de la probeta 22090_1, como en las tres probetas del tipo 22090.

Ángulo Theta:

En cuanto al ángulo Theta, se tienen los mismos datos que en el ángulo Fi, obteniéndose una ligera diferencia en sus medias, y unas desviaciones estándar similares.

Si estudiamos las dos partes enunciadas anteriormente por separado, se puede ver que las probetas del tipo 22090 tienen una gran similitud en sus medias de Theta. Por contra, para las tres zonas de la probeta 22090_1 se pueden observar diferencias en sus valores.

Sin embargo, se considera que es una similitud aceptable, ya que el ángulo de diferencia es de 11°, y no se cree que sea significativa.

Además, para un análisis más específico, se han estudiado los parámetros promedio del tensor de orientación de las fibras de cada sección, los cuales aparecen en la siguiente tabla:

Tabla 5. Datos de los parámetros del tensor de orientación probetas 22090.

MUESTRA NÚMERO	a₁₂	a₁₁	a₂₂	a₃₃
22090_1_1	-0,0212	0,0864	0,0823	0,8313
22090_1_2	-0,0166	0,0818	0,0854	0,8328
22090_1_3	-0,0084	0,0887	0,0698	0,8416
22090_2	-0,0078	0,0913	0,0755	0,8332
22090_3	-0,0086	0,1099	0,0650	0,8251
22090_4	-0,0109	0,0896	0,0751	0,8353
MEDIA	-0,0122	0,0913	0,0755	0,8332
DS	0,0049	0,0088	0,0069	0,0049

Para entender mejor esta tabla, se describirá más extensamente a continuación.

Parámetros a₁₂, a₁₁, a₂₂ y a₃₃:

Se puede apreciar que el valor de los parámetros no varía de forma significativa entre superficies estudiadas, salvo para el parámetro a₁₂, donde se puede ver que la desviación estándar es un tanto significativa con respecto a la media, siendo de alrededor del 40%. Sin embargo, no se considera que sea un valor tan alto como para tenerlo en cuenta, ya que este parámetro no es tan importante a la hora del estudio.

También se observa que los valores promedio del parámetro a₃₃ son muy superiores al resto. Esto se debe a que las fibras se orientan en mayor medida en la dirección del flujo de inyección, lo que coincide con el eje z (3).

Además, el proceso de tracción se ha realizado de igual manera en la dirección del flujo de inyección, de donde se han obtenido las propiedades mecánicas del material, por lo que se considera que el parámetro más importante en el estudio es el a₃₃.

Como se ha mencionado anteriormente, los valores promedio del parámetro a₃₃ son muy similares entre sí, siendo la desviación estándar de casi un 1% con respecto a la media, por lo que se considera insignificante.

Por tanto, se llega a la conclusión de que para cada probeta es suficiente escoger un tipo y una de sus zonas. En este caso se ha elegido la zona central, según el croquis anteriormente descrito.

3.6 ANOVA

El proceso utilizado para la obtención de resultados es “ANOVA”, mediante el programa Minitab. Con él se quiere conocer qué relación existe y como afectan las condiciones de procesado, propiedades mecánicas y la microestructura, entre sí, así como si esos efectos son significativos o no. Para ello se lleva a cabo un análisis multifactorial, en el cual se analizan los resultados mediante gráficas de efectos principales y Pareto, para determinar cuales son los efectos estadísticamente significativos.

4. RESULTADOS

4.1 CONDICIONES DE PROCESADO

A continuación se tienen los datos de cuáles han sido las condiciones de procesado utilizadas para el proceso de inyección en cada una de las probetas estudiadas, los cuales se ven en la siguiente tabla:

Tabla 6. Datos de las condiciones de procesado probetas 22090 – 22105.

MUESTRA NÚMERO	Tª INYECCIÓN (°C)	Tª MOLDE (°C)	CONTRAPRESIÓN (bar)	VELOCIDAD (mm/s)	PRESIÓN MANTEN (bar)
22090	285	80	3	15	80
22091	310	80	3	15	40
22092	285	100	3	15	40
22093	310	100	3	15	80
22094	285	80	15	15	40
22095	310	80	15	15	80
22096	285	100	15	15	80
22097	310	100	15	15	40
22098	285	80	3	60	40
22099	310	80	3	60	80
22100	285	100	3	60	80
22101	310	100	3	60	40
22102	285	80	15	60	80
22103	310	80	15	60	40
22104	285	100	15	60	40
22105	310	100	15	60	80

Para poder entender mejor los datos, es preferible desglosarlo uno a uno.

Temperatura de inyección:

Se han dado dos valores para la temperatura de inyección, una de 285°C y otra de 310°C. Para la primera probeta se ha utilizado 285°C, para la segunda 310°C, y así sucesivamente.

Temperatura del molde:

Se tiene un valor de 80°C para la temperatura del molde, y otra de 100°C, utilizando el primer valor para las dos primeras, el segundo valor para las dos siguientes, y así sucesivamente.

Contrapresión:

Se tienen dos valores para la contrapresión, uno de 3 bar y otro de 15 bar. Para las cuatro primeras probetas se ha utilizado 3 bar, para las cuatro siguientes 15 bar, y así en adelante.

Velocidad de inyección:

Para la velocidad de inyección se tiene un valor de 15 mm/s y otro de 60 mm/s. Para la primera mitad se ha utilizado 15 mm/s, y para la otra mitad 60 mm/s.

Presión de mantenimiento:

Se puede ver que se han dado dos valores para la presión de mantenimiento, uno de 80 bar y otro de 40 bar. La serie que se ha seguido para las 16 probetas es la siguiente:

80-40-40-80 ; 40-80-80-40 ; 40-80-80-40 ; 80-40-40-80 (bar)

4.2 DATOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DE IMAGEN

Como bien se ha descrito anteriormente en el apartado “Obtención de datos”, se han obtenido todos los datos necesarios de cada una de las fibras de cada superficie estudiada, así como el valor promedio. Con ello se ha podido calcular otra serie de datos necesarios con los que finalmente se han obtenido los parámetros promedio del tensor de orientación que se buscaban en este estudio.

Los datos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7. Datos de la microestructura probetas 22090 – 22105.

MUESTRA NÚMERO	Nº PARTICULAS (20-70)	MEDIA DE FI (20-70)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE FI (20-70)	MEDIA DE THETA (20-70)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE THETA (20-70)
22090	49173	23	12	-13	49
22091	50467	27	12	-7	51
22092	49475	28	13	-6	49
22093	51993	24	12	-9	47
22094	49486	28	13	0	48
22095	50847	21	13	-3	47
22096	49225	23	14	-4	48
22097	50550	22	13	-6	46
22098	49846	22	13	-5	47
22099	50160	23	13	-2	48
22100	51884	24	14	-1	49
22101	49726	23	14	-9	49
22102	49212	23	14	4	48
22103	51024	21	13	-7	47
22104	51607	22	13	-8	48
22105	50075	22	12	-2	50

Para una mejor comprensión, se analizarán estos resultados uno a uno:

Nº Partículas:

Todas las superficies estudiadas tienen un nº de partículas similar, en torno a 50.000.

Ángulo Fi:

Los valores promedio del ángulo Fi son bastante parecidos para todas superficies estudiadas, siendo su mayor valor de 28°, y el menor de 21°. Lo mismo ocurre con la desviación estándar promedio, ya que es prácticamente la misma en cada una de las superficies estudiadas, siendo 14° y 12° sus valores máximo y mínimo, respectivamente.

Ángulo Theta:

Los valores promedio del ángulo Theta varían algo más entre las superficies estudiadas, obteniéndose valores positivos y negativos, siendo -13° y 4° sus valores extremos.

En cuanto a la desviación estándar promedio, es muy parecida en cada una de las superficies estudiadas, siendo 51° y 46° sus valores máximo y mínimo, respectivamente.

Gracias a estos datos, se han podido obtener los parámetros promedio del tensor de orientación de las fibras de cada probeta estudiada, siendo estos los siguientes:

Tabla 8. Datos de los parámetros del tensor de orientación probetas 22090-22105.

MUESTRA NÚMERO	a ₁₂	a ₁₁	a ₂₂	a ₃₃
22090	-0,0122	0,0913	0,0755	0,8332
22091	-0,0109	0,1238	0,1074	0,7688
22092	-0,0086	0,1369	0,1095	0,7535
22093	-0,0094	0,1098	0,0825	0,8077
22094	0,0099	0,1423	0,1024	0,7553
22095	-0,0004	0,0898	0,0654	0,8448
22096	-0,0022	0,0974	0,0796	0,8230
22097	-0,0049	0,0937	0,0676	0,8387
22098	-0,0039	0,0974	0,0702	0,8324
22099	-0,0030	0,1002	0,0772	0,8226
22100	0,0014	0,1083	0,0812	0,8105
22101	-0,0063	0,0997	0,0830	0,8173
22102	0,0022	0,0974	0,0797	0,8228
22103	-0,0069	0,0861	0,0678	0,8461
22104	-0,0085	0,0938	0,0742	0,8319
22105	-0,0020	0,0883	0,0721	0,8396

Para obtener una mejor percepción de los datos obtenidos, se realizará un análisis uno a uno:

Parámetro a₁₂:

Los valores varían de forma que algunos son negativos y otros positivos, con una diferencia de 0,022 entre el valor negativo máximo perteneciente a la probeta 22090 y el positivo máximo, perteneciente a la probeta 22094.

Parámetro a_{11} :

El valor máximo perteneciente a la probeta 22094 es de 0,1423, y el mínimo, perteneciente a la probeta 22103 es de 0,0861. Este último podría considerarse prácticamente la mitad del valor máximo.

Parámetro a_{22} :

Se puede ver un valor máximo de 0,1095 perteneciente a la probeta 22092, y un mínimo de 0,0654 perteneciente a la probeta 22095. A este último le falta bastante poco para ser la mitad del valor máximo.

Se puede observar que para casi todos los valores obtenidos, se cumple que para los mayores valores del parámetro a_{11} , su parámetro a_{22} también es mayor, y viceversa.

Parámetro a_{33} :

Se obtiene un valor máximo en la probeta 22103 de 0,8461, y un mínimo en la probeta 22092 de 0,7535. Se cumple que para la mayoría de los valores obtenidos, los mayores valores del parámetro a_{11} corresponde a unos parámetros a_{33} menores, y viceversa.

Además, se puede ver como este parámetro es mucho mayor que el resto, lo que nos indica lo ya mencionado anteriormente, que la mayoría de las fibras se han orientado en el sentido del flujo de inyección, que corresponde con el eje z (Imagen 37).

4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS

Por otra parte, mediante el ensayo de tracción, el cual también se ha realizado en la dirección del flujo de inyección, se han obtenido las propiedades mecánicas de cada probeta, las cuales son:

Tabla 9. Datos de las propiedades mecánicas probetas 22090 – 22105.

MUESTRA NÚMERO	TENSIÓN ROTURA (MPa)	E (MPa)	%
22090	217	22284	1,269
22091	214	23549	1,098
22092	217	23851	1,164
22093	195	24247	0,953
22094	200	23096	1,083
22095	222	24415	1,159
22096	213	24078	1,156
22097	197	23301	0,982
22098	207	22562	1,102
22099	206	24138	1,079
22100	230	23450	1,397
22101	206	22687	1,072
22102	220	23458	1,268
22103	197	22616	1,006
22104	197	22604	1,06
22105	203	24120	1,053

Como en los casos anteriores, se describirá cada uno de los datos por separado.

Tensión de rotura:

La tensión de rotura oscila entre 195 y 230 MPa, siendo su variación de 35 MPa, lo cual es una diferencia bastante evidente.

Módulo de elasticidad “E”:

El módulo de elasticidad oscila entre 22284 y 24415 MPa. No existe evidencia de que aumente cuanto mayor sea la tensión de rotura, ni viceversa, o al contrario. Los datos obtenidos son bastante dispares entre sí, variando entre su máximo y mínimo un valor de 2131 MPa.

Elongación “%”:

La elongación no varía de manera proporcional a la tensión de rotura, ni al módulo de elasticidad, pero sí coincide en que su máximo valor, de 1,397, corresponde con el máximo de la tensión de rotura. Lo mismo ocurre con el mínimo, de 0,953.

4.4 ANÁLISIS DE EFECTOS

El proceso utilizado para la obtención de resultados es ANOVA, mediante el programa Minitab. Este es un programa diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas. Se encarga de simplificar la obtención de conocimientos a partir de unos datos previos. Este programa se ha utilizado debido a que se tienen muchos parámetros a analizar simultáneamente, de modo que es lo más apropiado si no se quiere olvidar de ningún efecto.

En este caso, se quiere estudiar qué relación existe y como afectan las condiciones de procesado, la microestructura y propiedades mecánicas, entre sí.

Uno de los métodos más usados en el análisis estadístico es el test de hipótesis. Uno de los test de hipótesis ofrecidos por Minitab es el análisis de varianza o ANOVA.

En primer lugar se ha empleado un diseño factorial, el cual permite realizar un estudio simultáneo de los efectos que varios factores pueden tener en un proceso.

Las variables del análisis del primer apartado serán las condiciones de procesado, y las respuestas la microestructura y las propiedades mecánicas. Y, las variables del análisis del segundo apartado serán los parámetros del tensor (microestructura) y las respuestas las propiedades mecánicas.

Mediante este diseño factorial se han obtenido unos gráficos, indicando los efectos que se producen en unas cuantas respuestas en función de dos niveles de cada variable.

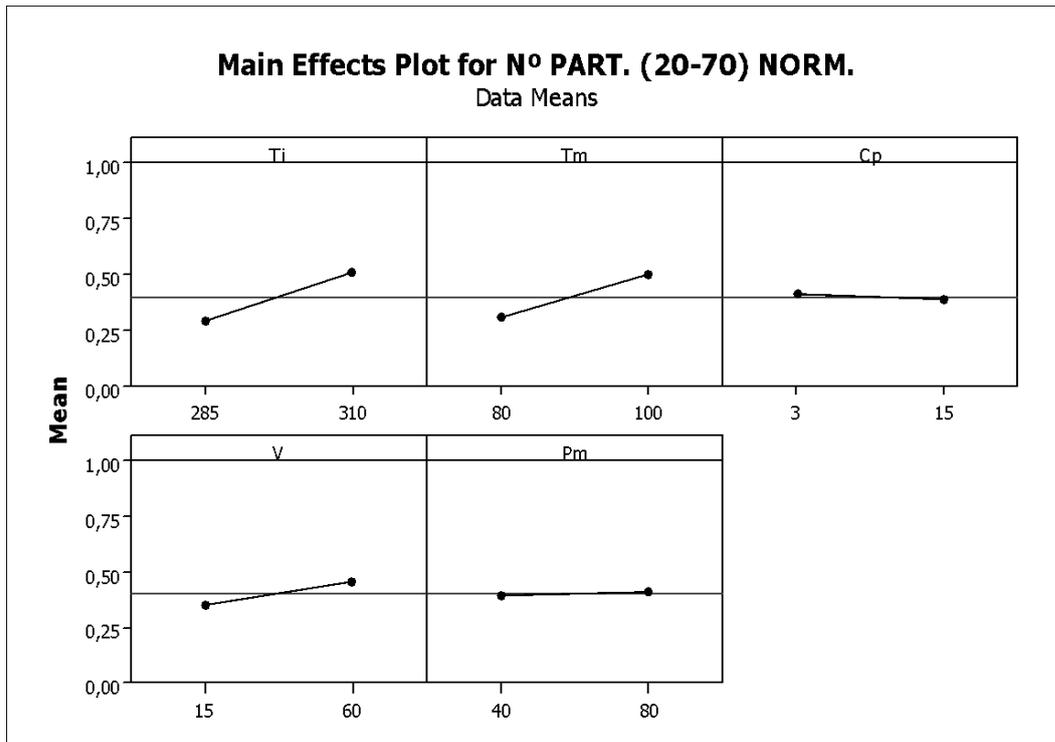
Para la interpretación de los gráficos se tendrá en cuenta lo siguiente:

- Cuando mayor sea la diferencia en la posición vertical de los puntos trazados (cuanto menos paralela sea la línea al eje x), mayor será el efecto que esta condición de procesado tiene sobre la variable. [13, 17]

4.4.1 ANÁLISIS DE EFECTOS PRINCIPALES EN LA RELACIÓN QUE TIENEN LAS CONDICIONES DE PROCESADO CON LA MICROESTRUCTURA Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS.

4.4.1.1 N° DE PARTÍCULAS

Gráfico 1. Efectos de las condiciones de procesado sobre el n° de partículas.



Los efectos que se producen son los siguientes:

Temperatura de inyección 285-310 (°C).

- Se obtiene un menor n° de partículas cuanto menor es la Tª de inyección.

Temperatura del molde 80-100 (°C).

- Se puede ver que cuanto menor es la Tª del molde, menor es el n° de partículas.

Contrapresión 3-15 (bar).

- Se observa ligeramente un mayor n° de partículas cuanto menor es la contrapresión.

Velocidad de inyección 15-60 (mm/s).

- Se obtiene un n° de partículas menor cuanto menor es la velocidad de inyección.

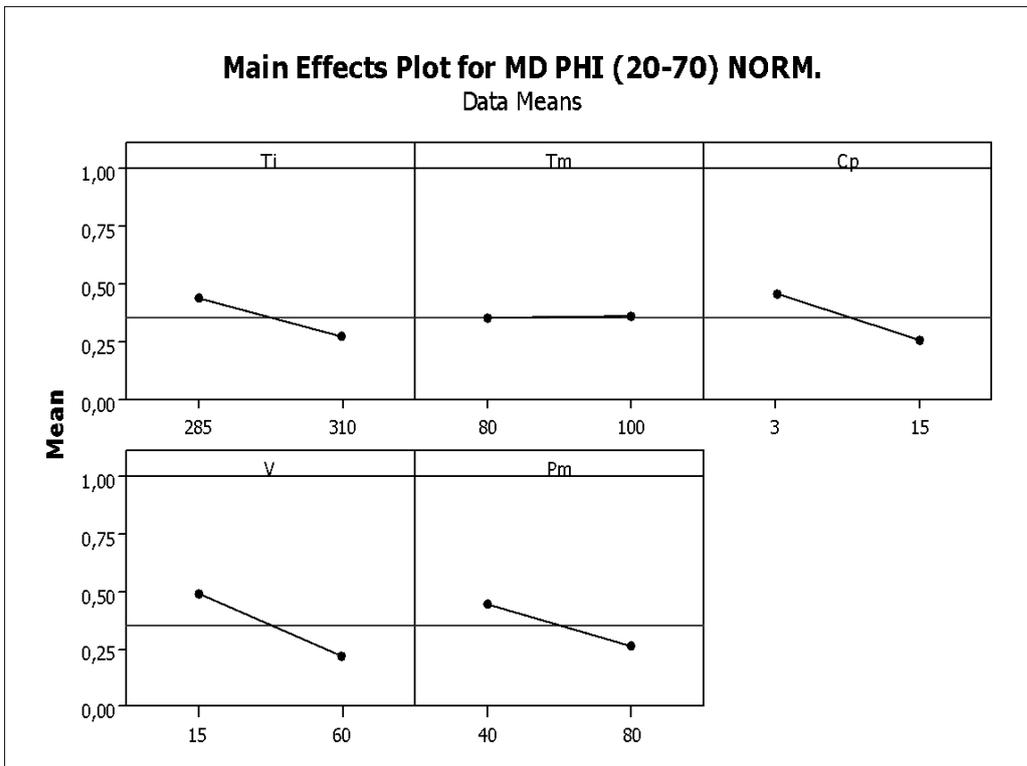
Presión de mantenimiento 40-80 (bar).

- Se puede ver ligeramente que se tiene un nº menor de partículas cuanto menor es la presión de mantenimiento.

Mediante este breve análisis se puede ver que tanto la temperatura de inyección como la temperatura del molde tienen un mayor efecto en el número de partículas.

4.4.1.2 MEDIA DE FI

Gráfico 2. Efectos de las condiciones de procesado sobre la media de Fi.



Según el gráfico se producen los siguientes efectos:

Temperatura de inyección 285-310 (°C).

- Se puede ver que se tiene un mayor valor de la media de Fi cuanto menor es la T^a de inyección.

Temperatura del molde 80-100 (°C).

- Se obtiene ligeramente un menor valor de la media de Fi cuanto menor es la T^a del molde.

Contrapresión 3-15 (bar).

- Se tiene que cuanto menor es la contrapresión, mayor valor tiene la media de Fi.

Velocidad de inyección 15-60 (mm/s).

- Se observa un valor superior de la media de F_i cuando la velocidad de inyección es menor.

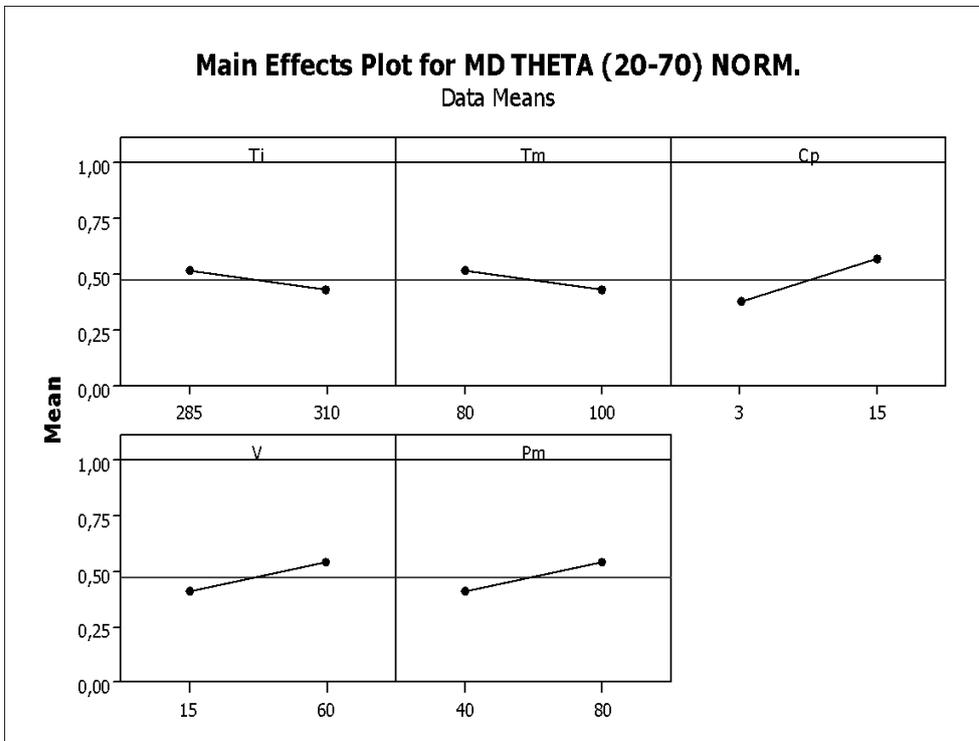
Presión de mantenimiento 40-80 (bar).

- Se obtiene un mayor valor de la media de F_i cuanto menor es la presión de mantenimiento.

La velocidad de inyección es la condición de procesado que más efecto tiene en la media de F_i .

4.4.1.3 MEDIA DE THETA

Gráfico 3. Efectos de las condiciones de procesado sobre la media de Theta.



En el gráfico se pueden observar los siguientes efectos:

Temperatura de inyección 285-310 (°C).

- Se obtiene un mayor valor de la media de theta cuanto menor es la T^a de inyección.

Temperatura del molde 80-100 (°C).

- Se consigue un valor superior de la media de theta cuanto menor es la T^a del molde.

Contrapresión 3-15 (bar).

- Con un valor de contrapresión menor se obtiene un menor valor de la media de theta.

Velocidad de inyección 15-60 (mm/s).

- Se observa un menor valor de la media de theta cuanto menor es la velocidad de inyección.

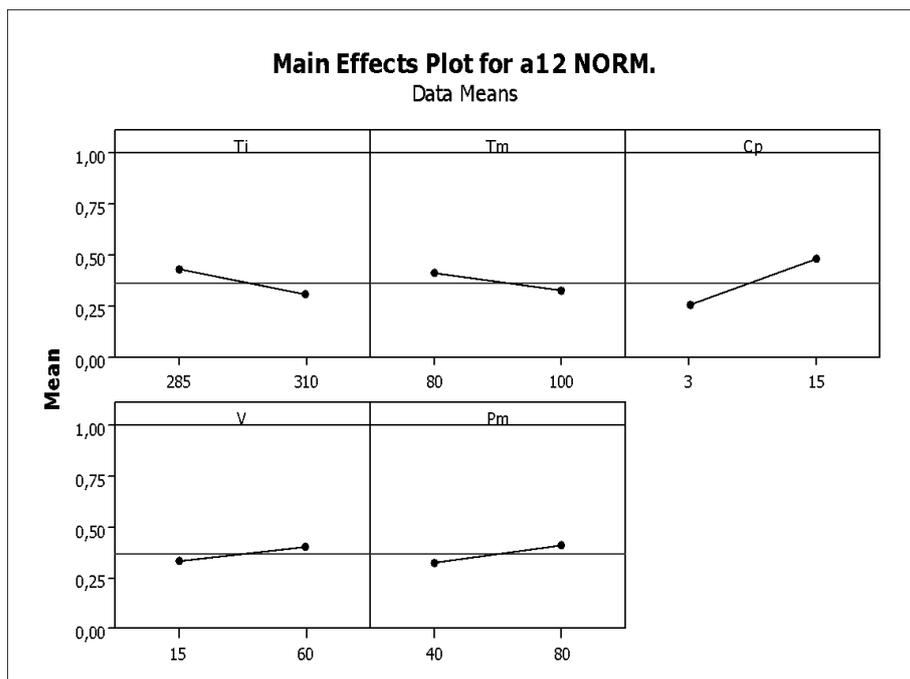
Presión de mantenimiento 40-80 (bar).

- Mediante una menor presión de mantenimiento se consigue un menor valor de la media de theta.

La condición de procesado que más efecto tiene en la media de theta es la contrapresión.

4.4.1.4 PARÁMETRO a_{12}

Gráfico 4. Efectos de las condiciones de procesado sobre el parámetro a_{12} .



Los efectos que se producen son los siguientes:

Temperatura de inyección 285-310 (°C).

- Se obtiene un mayor valor del parámetro a_{12} cuanto menor es la T^a de inyección.

Temperatura del molde 80-100 (°C).

- Se consigue un valor superior del parámetro a_{12} cuando la T^a del molde es menor.

Contrapresión 3-15 (bar).

- Se tiene un valor inferior del parámetro a_{12} cuanto menor es la contrapresión.

Velocidad de inyección 15-60 (mm/s).

- Mediante una menor velocidad de inyección se consigue un menor valor del parámetro a_{12} .

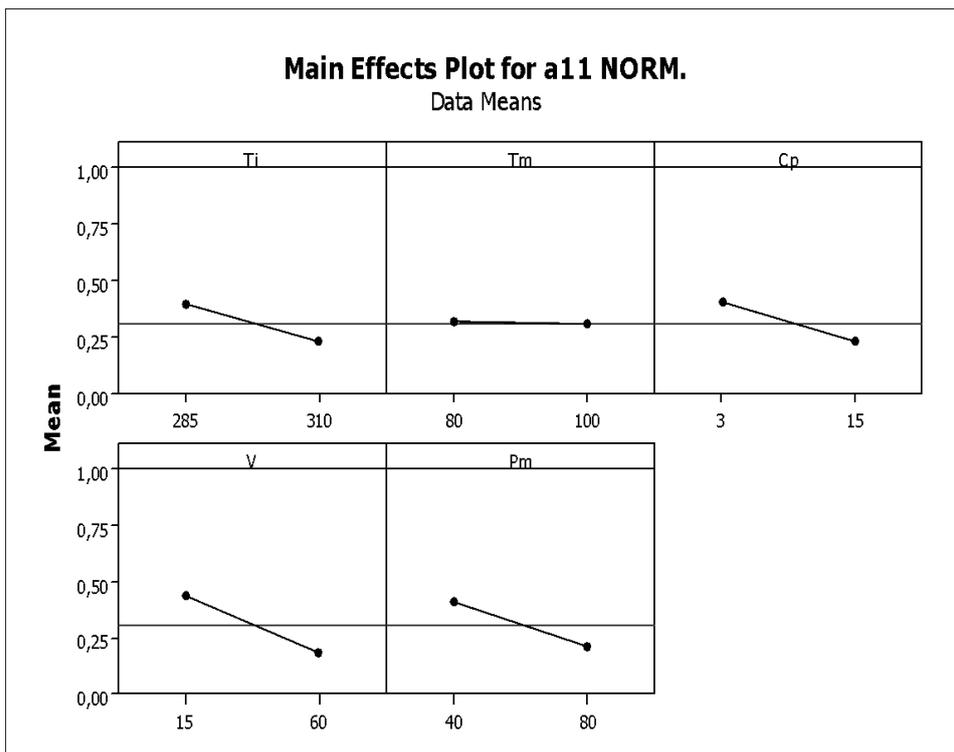
Presión de mantenimiento 40-80 (bar).

- Se obtiene un menor valor del parámetro a_{12} cuando la presión de mantenimiento es menor.

La contrapresión tiene un mayor efecto en el parámetro a_{12} .

4.4.1.5 PARÁMETRO a_{11}

Gráfico 5. Efectos de las condiciones de procesado sobre el parámetro a_{11} .



En el gráfico se pueden observar los siguientes efectos:

Temperatura de inyección 285-310 (°C).

- Se consigue un mayor valor del parámetro a_{11} cuanto menor es la T^a de inyección.

Temperatura del molde 80-100 (°C).

- Se obtiene ligeramente un valor superior del parámetro a_{11} cuanto menor es la T^a del molde.

Contrapresión 3-15 (bar).

- Cuanto menor es la contrapresión, mayor valor del parámetro a_{11} se consigue.

Velocidad de inyección 15-60 (mm/s).

- Se tiene un mayor valor del parámetro a_{11} cuando la velocidad de inyección es menor.

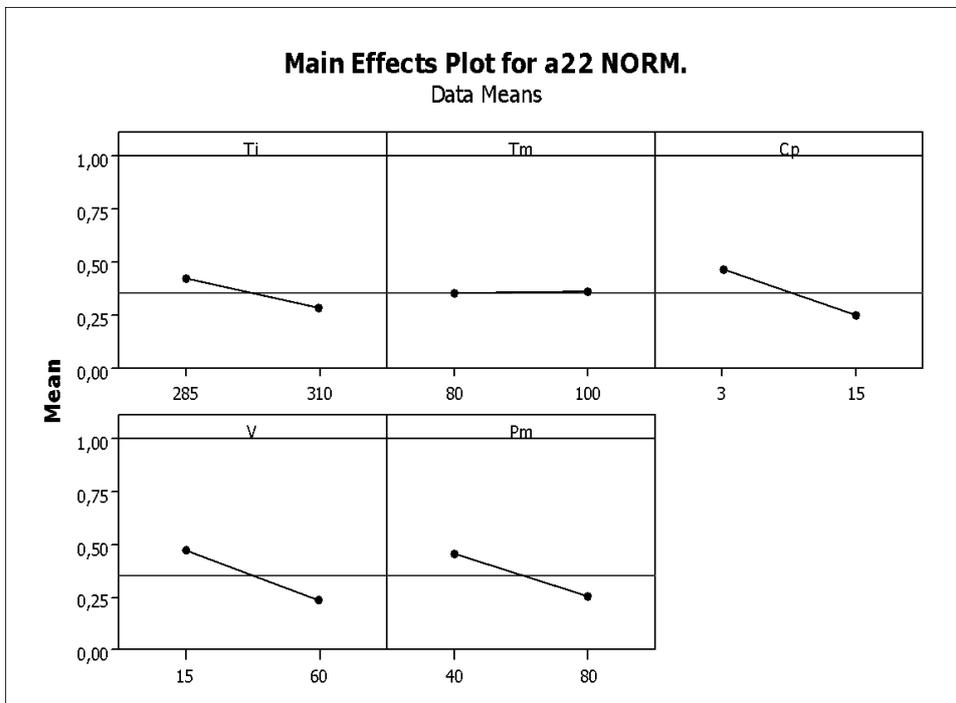
Presión de mantenimiento 40-80 (bar).

- Se obtiene un valor mayor del parámetro a_{11} cuanto menor es la presión de mantenimiento.

La velocidad de inyección es la condición de procesado que más efecto tiene en el parámetro a_{11} .

4.4.1.6 PARÁMETRO a_{22}

Gráfico 6. Efectos de las condiciones de procesado sobre el parámetro a_{22} .



Según el gráfico se producen los siguientes efectos:

Temperatura de inyección 285-310 (°C).

- Se puede ver que para una T^a de inyección menor, se obtiene un mayor valor del parámetro a_{22} .

Temperatura del molde 80-100 (°C).

- Se obtiene ligeramente un menor valor del parámetro a_{22} cuanto menor es la T^a del molde.

Contrapresión 3-15 (bar).

- Se consigue un valor superior del parámetro a_{22} cuanto menor es la contrapresión.

Velocidad de inyección 15-60 (mm/s).

- Se observa que cuanto menor es la velocidad de inyección, mayor es el parámetro a_{22} .

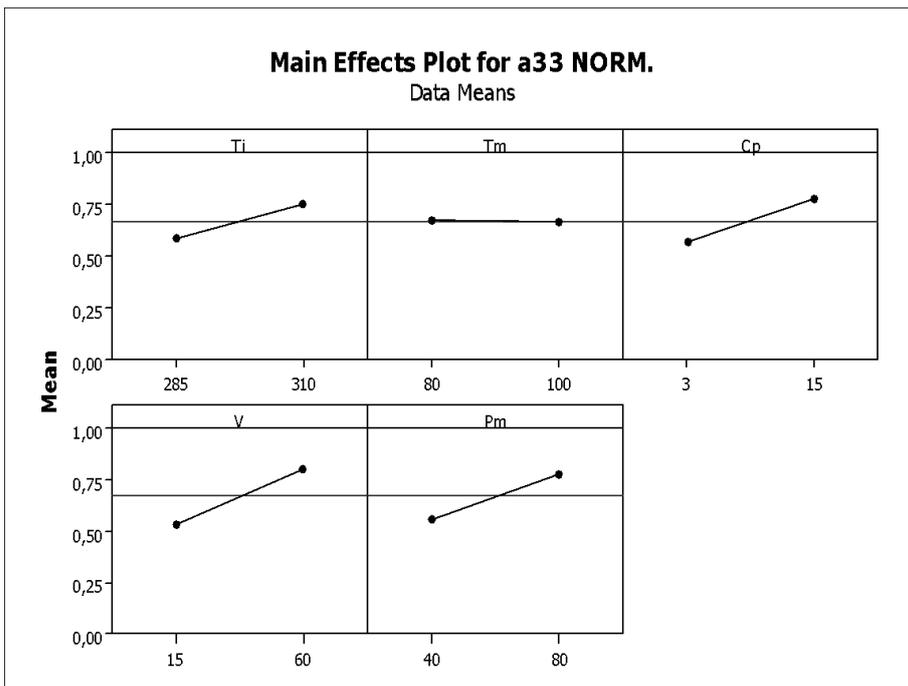
Presión de mantenimiento 40-80 (bar).

- Se obtiene un mayor valor del parámetro a_{22} cuanto menor es la presión de mantenimiento.

La condición de procesado que más efecto tiene en el parámetro a_{22} es la velocidad de inyección.

4.4.1.7 PARÁMETRO a_{33}

Gráfico 7. Efectos de las condiciones de procesado sobre el parámetro a_{33} .



Los efectos que se observan en el gráfico son los siguientes:

Temperatura de inyección 285-310 (°C).

- Se obtiene un menor valor del parámetro a_{33} cuanto menor es la T^a de inyección.

Temperatura del molde 80-100 (°C).

- Se consigue ligeramente un valor superior del parámetro a_{33} cuanto menor es la T^a del molde.

Contrapresión 3-15 (bar).

- Se puede ver que para un menor valor de la contrapresión se obtiene un menor valor del parámetro a_{33} .

Velocidad de inyección 15-60 (mm/s).

- Se puede observar un menor valor del parámetro a_{33} cuanto menor es la velocidad de inyección.

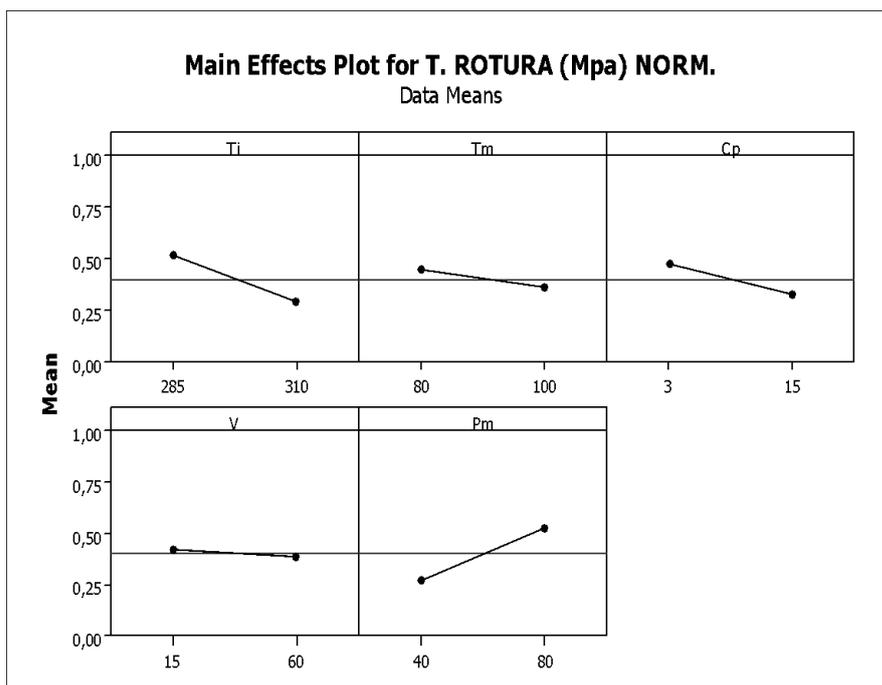
Presión de mantenimiento 40-80 (bar).

- Para un menor valor de la presión de mantenimiento se tiene un valor inferior del parámetro a_{33} .

La velocidad de inyección es la que más efecto tiene en el parámetro a_{33} .

4.4.1.8 TENSION DE ROTURA

Gráfico 8. Efectos de las condiciones de procesado sobre la tensión de rotura.



Mediante el gráfico se pueden distinguir los efectos siguientes:

Temperatura de inyección 285-310 (°C).

- Para un menor valor de la T^a de inyección se obtiene un mayor valor de la tensión de rotura.

Temperatura del molde 80-100 (°C).

- Se obtiene un mayor valor de la tensión de rotura cuanto menor es la T^a del molde.

Contrapresión 3-15 (bar).

- Se consigue un valor superior de la tensión de rotura cuanto menor es la contrapresión.

Velocidad de inyección 15-60 (mm/s).

- Se puede ver ligeramente que para una velocidad de inyección menor se tiene un mayor valor de la tensión de rotura.

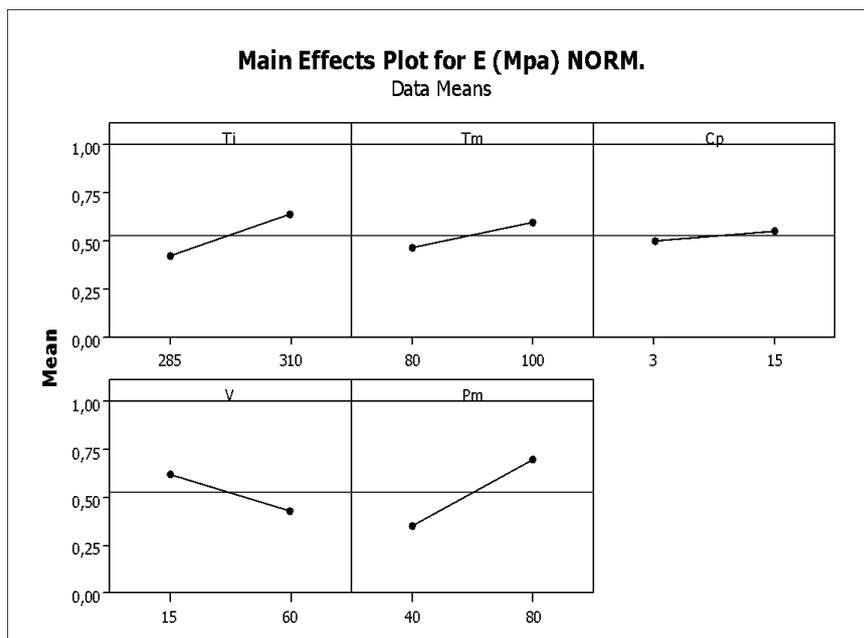
Presión de mantenimiento 40-80 (bar).

- Se puede ver que se tiene un valor inferior de la tensión de rotura cuanto menor es la presión de mantenimiento.

Tanto la temperatura de inyección como la presión de mantenimiento tienen un mayor efecto en la tensión de rotura.

4.4.1.9 MÓDULO DE ELASTICIDAD “E”

Gráfico 9. Efectos de las condiciones de procesado sobre el módulo de elasticidad.



A partir del gráfico se pueden observar los siguientes efectos:

Temperatura de inyección 285-310 (°C).

- Se consigue un menor valor de E cuando la T^a de inyección es menor.

Temperatura del molde 80-100 (°C).

- Se obtiene un menor valor de E cuanto menor es la T^a del molde.

Contrapresión 3-15 (bar).

- Se puede ver ligeramente que cuanto menor es la contrapresión, menor valor se tiene de E.

Velocidad de inyección 15-60 (mm/s).

- Se obtiene para una menor velocidad de inyección, un mayor valor de E.

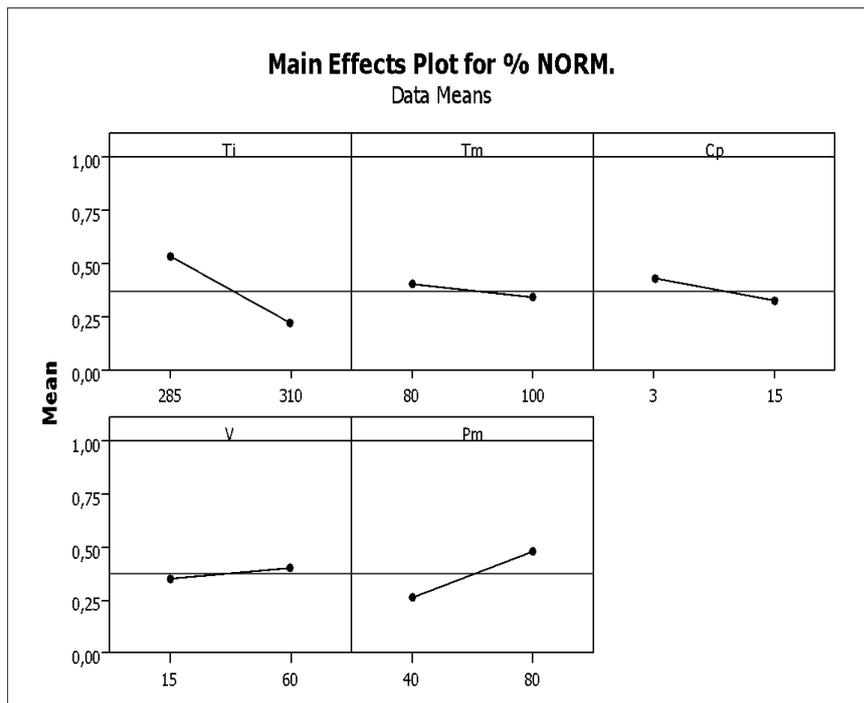
Presión de mantenimiento 40-80 (bar).

- Se puede observar un menor valor de E cuanto menor es la presión de mantenimiento.

La presión de mantenimiento es la condición de procesado que más efecto tiene en el módulo de elasticidad.

4.4.1.10 ELONGACIÓN “%”

Gráfico 10. Efectos de las condiciones de procesado sobre la elongación.



Los efectos que se distinguen en el gráfico son los siguientes:

Temperatura de inyección 285-310 (°C).

- Se puede observar que para una menor T^a de inyección se tiene un mayor valor de %.

Temperatura del molde 80-100 (°C).

- Se obtiene ligeramente un mayor valor de % cuanto menor es la T^a del molde.

Contrapresión 3-15 (bar).

- Para una menor contrapresión se consigue un mayor valor de %.

Velocidad de inyección 15-60 (mm/s).

- Se ve ligeramente un menor valor de % cuanto menor es la velocidad de inyección.

Presión de mantenimiento 40-80 (bar).

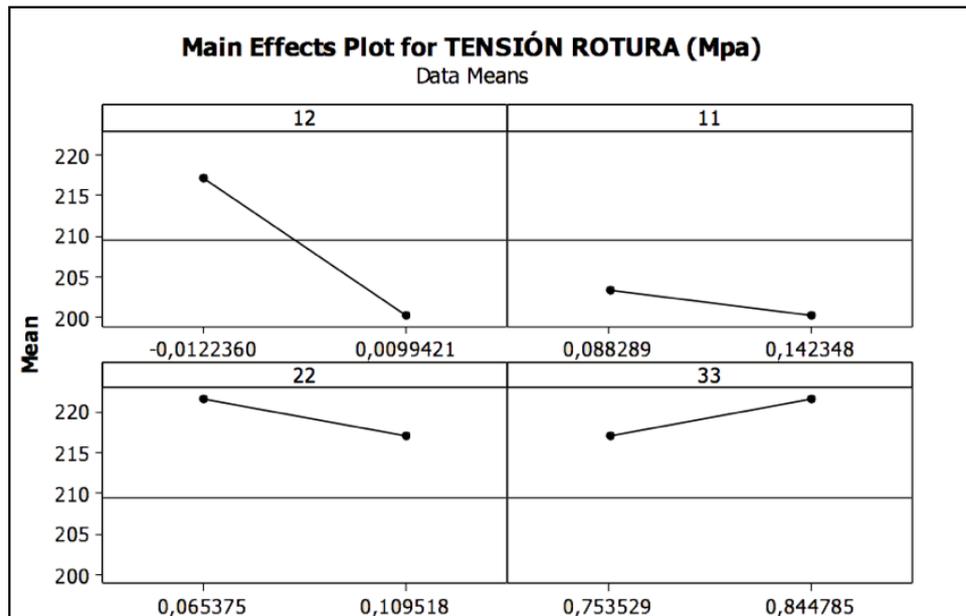
- Se obtiene un valor inferior de % cuando la presión de mantenimiento es menor.

La condición de procesado que más efecto tiene en la elongación es la temperatura de inyección.

4.4.2 ANÁLISIS DE EFECTOS PRINCIPALES EN LA RELACIÓN QUE TIENEN LOS PARÁMETROS DEL TENSOR DE ORIENTACIÓN CON LAS PROPIEDADES MECÁNICAS FINALES.

4.4.2.1 TENSIÓN DE ROTURA

Gráfico 11. Efectos de los parámetros del tensor de orientación sobre la tensión de rotura.



A partir del gráfico se pueden observar los siguientes efectos:

Parámetro a_{12} :

- Para un menor valor del parámetro a_{12} se obtiene un mayor valor de la tensión de rotura.

Parámetro a_{11} :

- Se obtiene ligeramente un mayor valor de la tensión de rotura cuanto menor es el parámetro a_{11} .

Parámetro a_{22} :

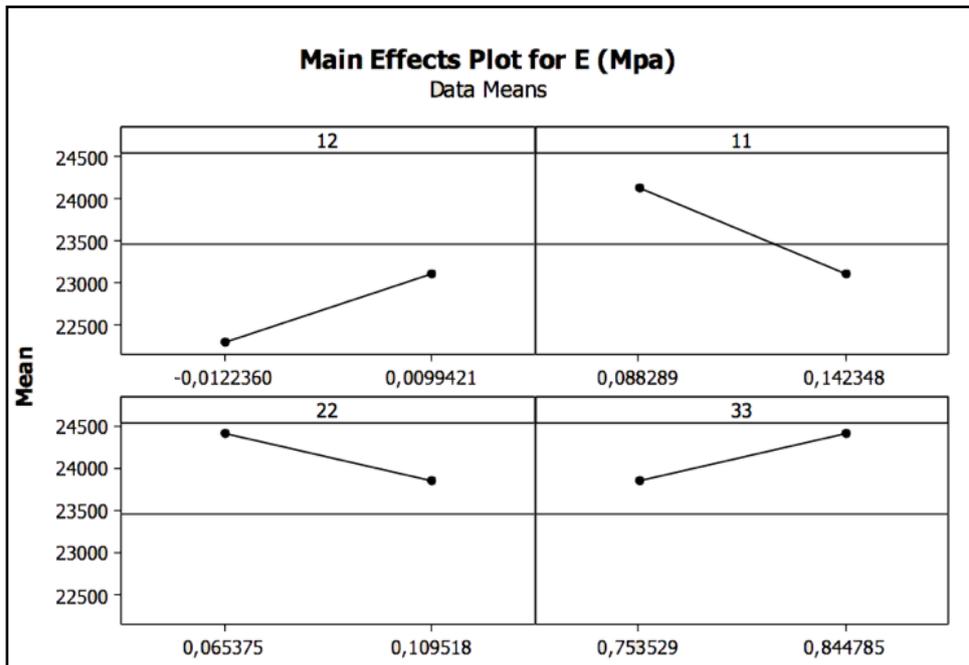
- Se consigue un valor superior de la tensión de rotura cuanto menor es el parámetro a_{22} .

Parámetro a_{33} :

- Se puede ver que para un parámetro a_{33} mayor se tiene un valor superior de la tensión de rotura.

4.4.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD “E”

Gráfico 12. Efectos de los parámetros del tensor de orientación sobre el módulo de elasticidad.



A partir del gráfico se pueden observar los siguientes efectos:

Parámetro a_{12} :

- Se consigue un mayor valor de E cuando el parámetro a_{12} es mayor.

Parámetro a_{11} :

- Se obtiene un valor superior de E cuanto menor es el parámetro a_{11} .

Parámetro a_{22} :

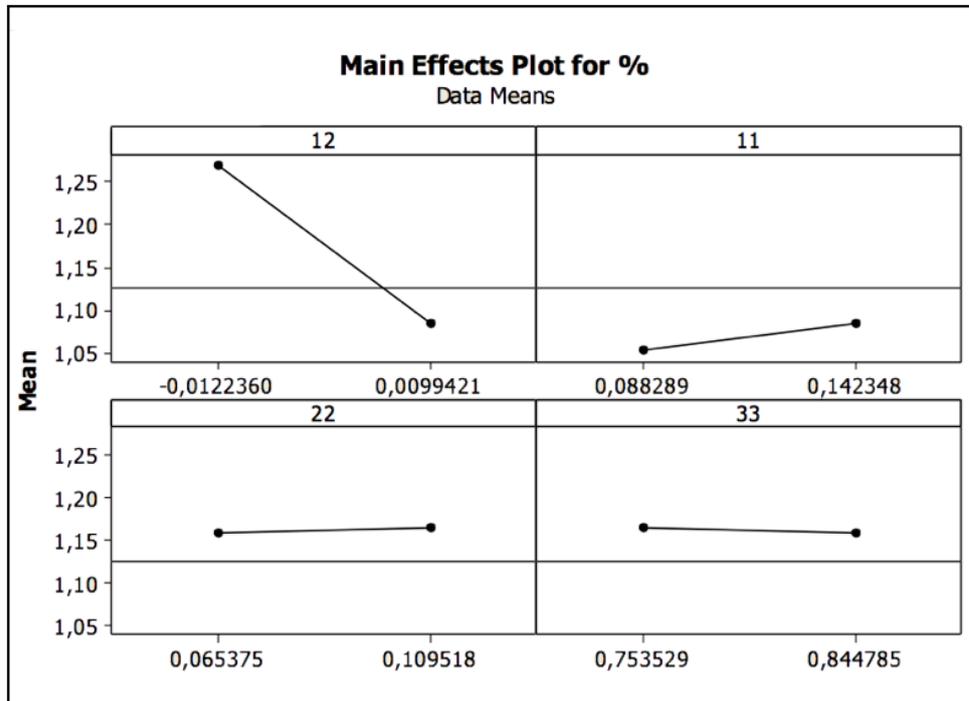
- Se puede ver que cuanto menor es el parámetro a_{22} , mayor valor se tiene de E.

Parámetro a_{33} :

- Se obtiene para un mayor valor del parámetro a_{33} , un mayor valor de E.

4.4.2.3 ELONGACIÓN “%”

Gráfico 13. Efectos de los parámetros del tensor de orientación sobre la elongación.



Los efectos que se distinguen en el gráfico son los siguientes:

Parámetro a_{12} .

- Se puede observar que para un menor valor del parámetro a_{12} se tiene un mayor valor de %.

Parámetro a_{11} .

- Se obtiene ligeramente un mayor valor de % cuanto mayor es el parámetro a_{11} .

Parámetro a_{22} .

- Para un mayor valor del parámetro a_{22} se consigue un ligero mayor valor de %.

Parámetro a_{33} .

- Se ve ligeramente un mayor valor de % cuanto menor es el parámetro a_{33} .

Mediante los análisis anteriores se ha podido ver qué efectos tienen algunas variables sobre unas respuestas en concreto, pero se desconoce si estas variables tienen un efecto significativo. Que una variable sea significativa significa que tiene un efecto muy relevante sobre la respuesta en cuestión.

4.4.3 ANÁLISIS DE LA SIGNIFICATIVIDAD DE LOS EFECTOS PRINCIPALES

Para conocer si las variables analizadas son significativas, se deben obtener los diagramas de Pareto, los cuales sirven para organizar los datos en orden descendente, y así visualizar qué variables son significativas para cada respuesta.

En el diagrama de Pareto se muestra el valor absoluto de los efectos, siendo los que se extienden más allá de la línea de referencia los significativos.

Para ello se ha predeterminado un nivel de referencia, conocido como α (alfa), el cual ha sido de 0,10.

Se han establecido dos casos.

4.4.3.1 PRIMER CASO

Las variables son:

- Temperatura de inyección (TI)
 - Temperatura del molde (TM)
 - Contrapresión (Cp)
 - Velocidad de inyección (V)
 - Presión de mantenimiento (Pm)
- } CONDICIONES DE PROCESADO

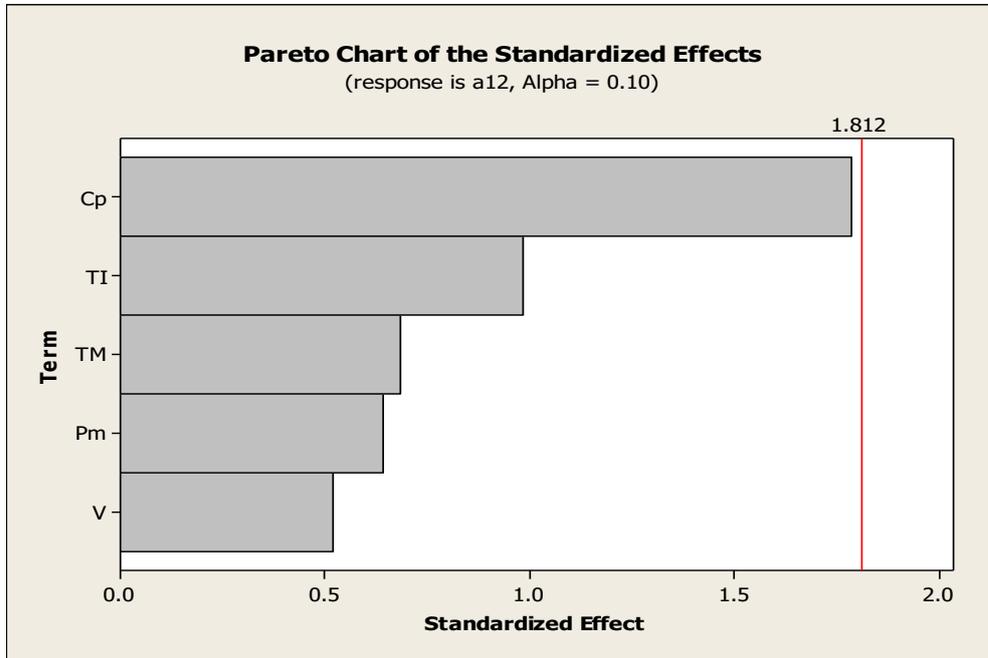
Las respuestas son:

- Parámetro a_{12}
 - Parámetro a_{11}
 - Parámetro a_{22}
 - Parámetro a_{33}
- } PARÁMETROS DEL TENSOR DE ORIENTACIÓN
- Tensión de rotura
 - Módulo de elasticidad
 - Elongación
- } PROPIEDADES MECÁNICAS

4.4.3.1.1 DIAGRAMAS DE PARETO

1) PARÁMETRO a_{12}

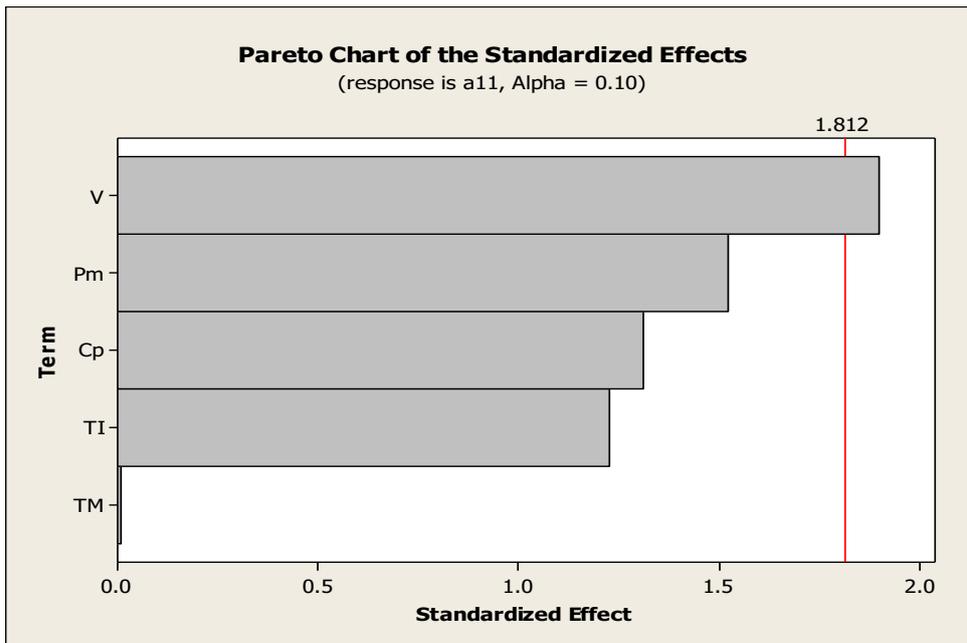
Gráfico 14. Significatividad de las condiciones de procesado sobre el parámetro a_{12} .



- Para el parámetro a_{12} , no hay ninguna variable significativa, siendo la que más se acerca la contrapresión, para $\alpha=0,10$.

2) PARÁMETRO a_{11}

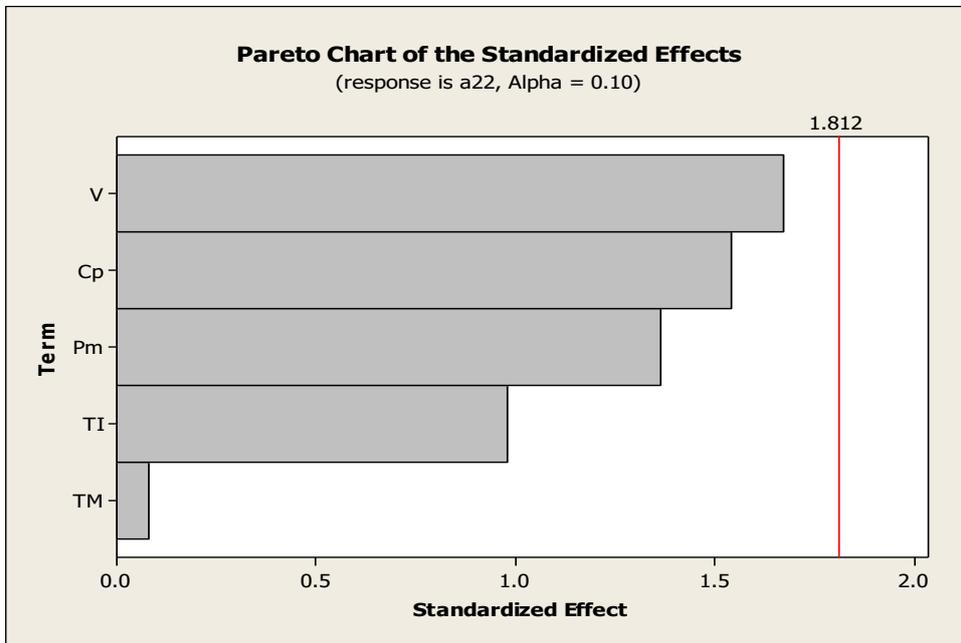
Gráfico 15. Significatividad de las condiciones de procesado sobre el parámetro a_{11} .



- Únicamente la velocidad de inyección es una variable significativa para el parámetro a_{11} , para $\alpha=0,10$.

3) PARÁMETRO a_{22}

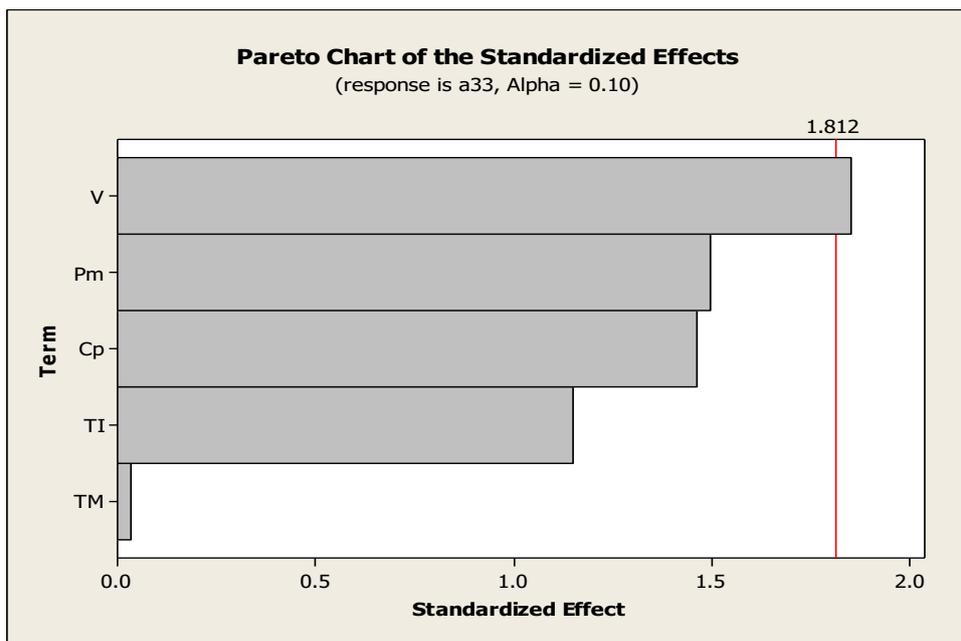
Gráfico 16. Significatividad de las condiciones de procesado sobre el parámetro a_{22} .



- No hay ninguna variable significativa para el parámetro a_{22} , siendo la que más se acerca la velocidad de inyección, para $\alpha=0,10$.

4) PARÁMETRO a_{33}

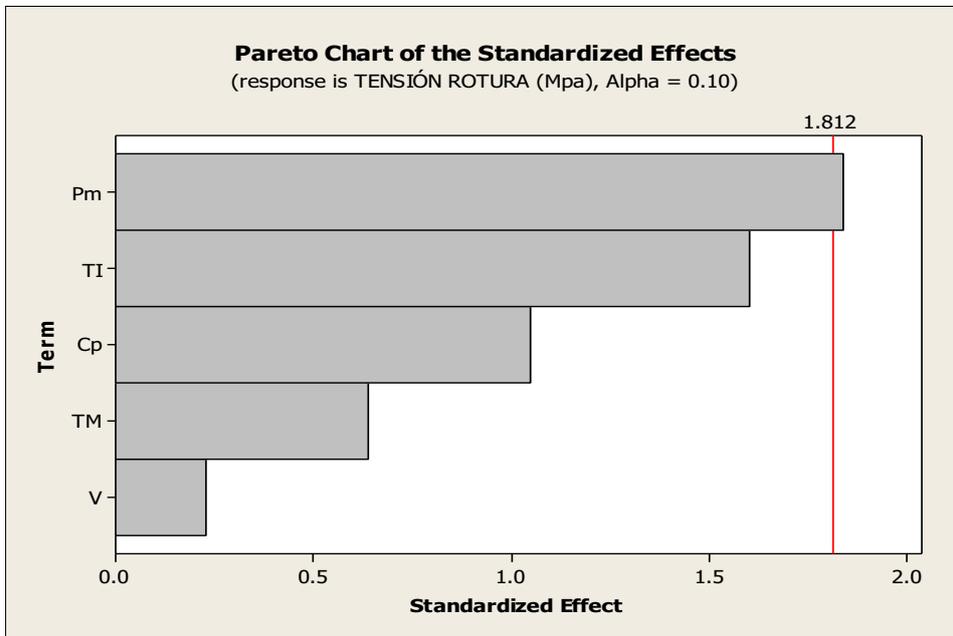
Gráfico 17. Significatividad de las condiciones de procesado sobre el parámetro a_{33} .



- Para el parámetro a_{33} , únicamente la velocidad de inyección es una variable significativa, para $\alpha=0,10$.

5) TENSIÓN DE ROTURA

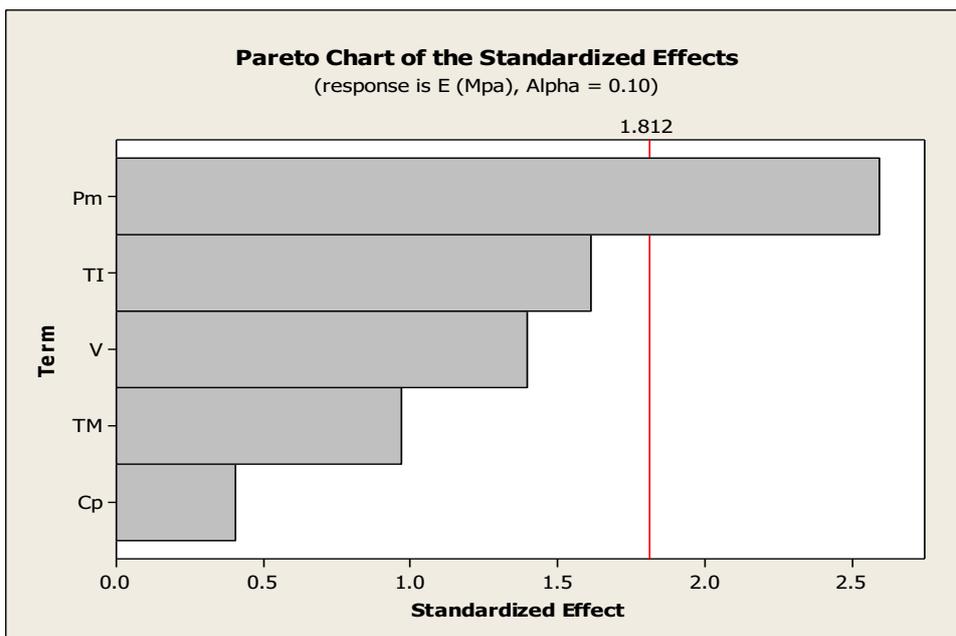
Gráfico 18. Significatividad de las condiciones de procesado sobre la tensión de rotura.



- Solamente la presión de mantenimiento es una variable significativa para la tensión de rotura, para $\alpha=0,10$.

6) MÓDULO DE ELASTICIDAD “E”

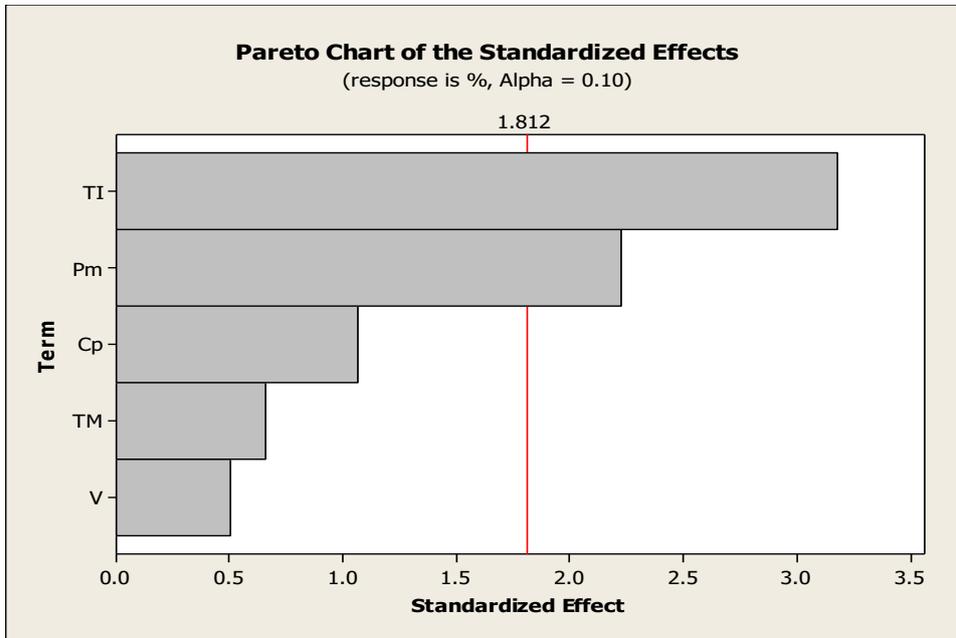
Gráfico 19. Significatividad de las condiciones de procesado sobre el módulo de elasticidad.



- Para el módulo de elasticidad, la presión de mantenimiento es la única variable significativa, para $\alpha=0,10$.

7) ELONGACIÓN “%”

Gráfico 20. Significatividad de las condiciones de procesado sobre la elongación.



- Para la elongación, la temperatura de inyección y la presión de mantenimiento son variables significantes, siendo de mayor efecto la primera, para $\alpha=0,10$.

4.4.3.2 SEGUNDO CASO

Las variables son:

- Parámetro a_{12} (12)
 - Parámetro a_{11} (11)
 - Parámetro a_{22} (22)
 - Parámetro a_{33} (33)
- } PARÁMETROS DEL TENSOR DE ORIENTACIÓN

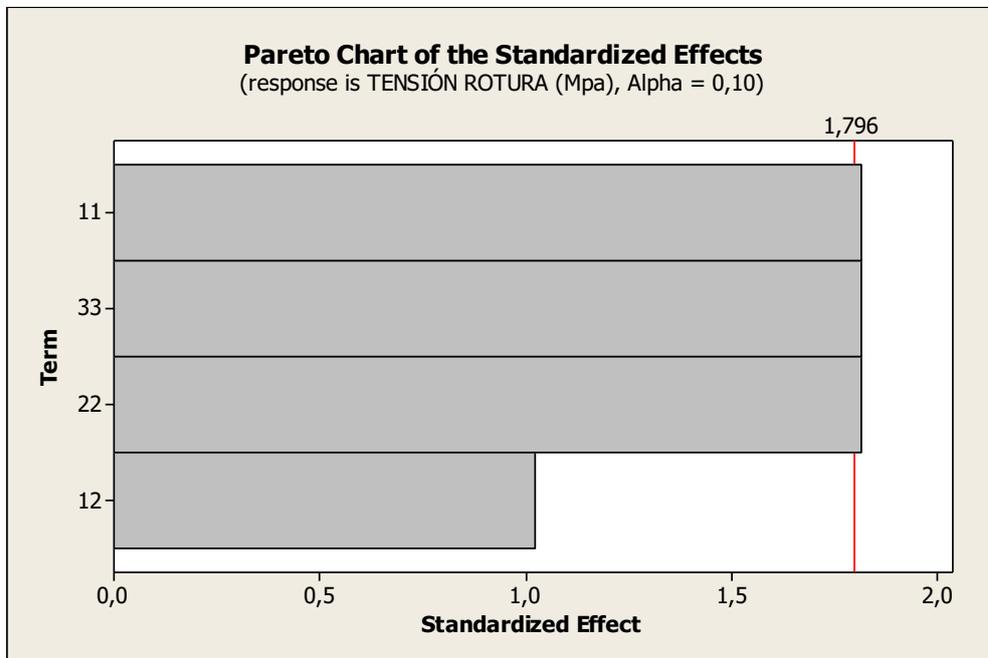
Las respuestas son:

- Tensión de rotura
 - Módulo de elasticidad "E"
 - Elongación "%"
- } PROPIEDADES MECÁNICAS

4.4.3.2.1 DIAGRAMAS DE PARETO

1) TENSIÓN DE ROTURA

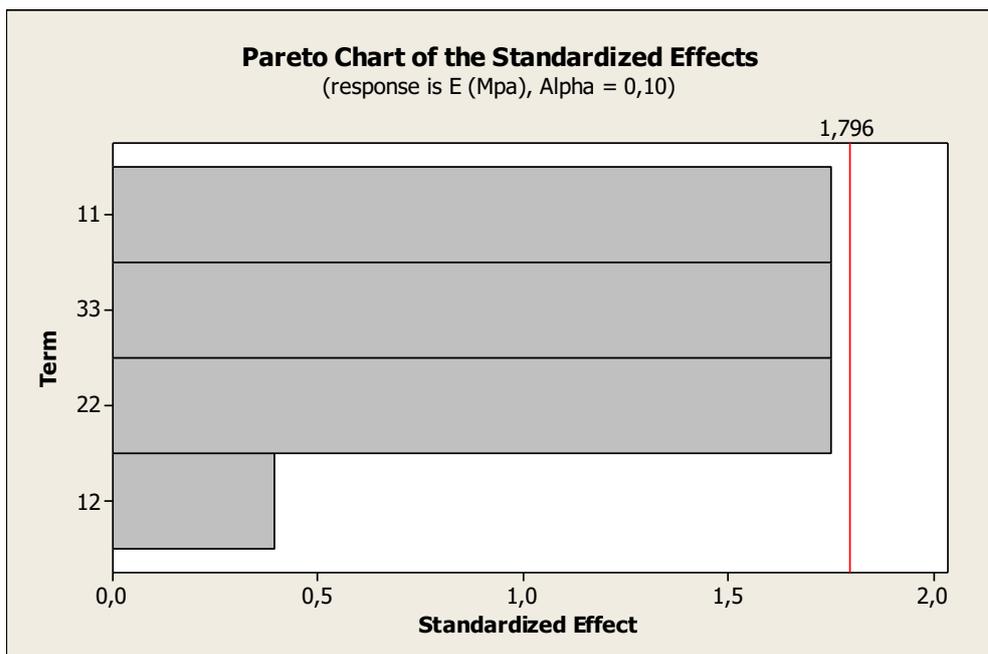
Gráfico 21. Significatividad de los parámetros del tensor de orientación sobre la tensión de rotura.



- Para la tensión de rotura, los parámetros a_{11} , a_{22} y a_{33} son variables significantes en la misma proporción, para $\alpha=0,10$.

2) MÓDULO DE ELASTICIDAD “E”

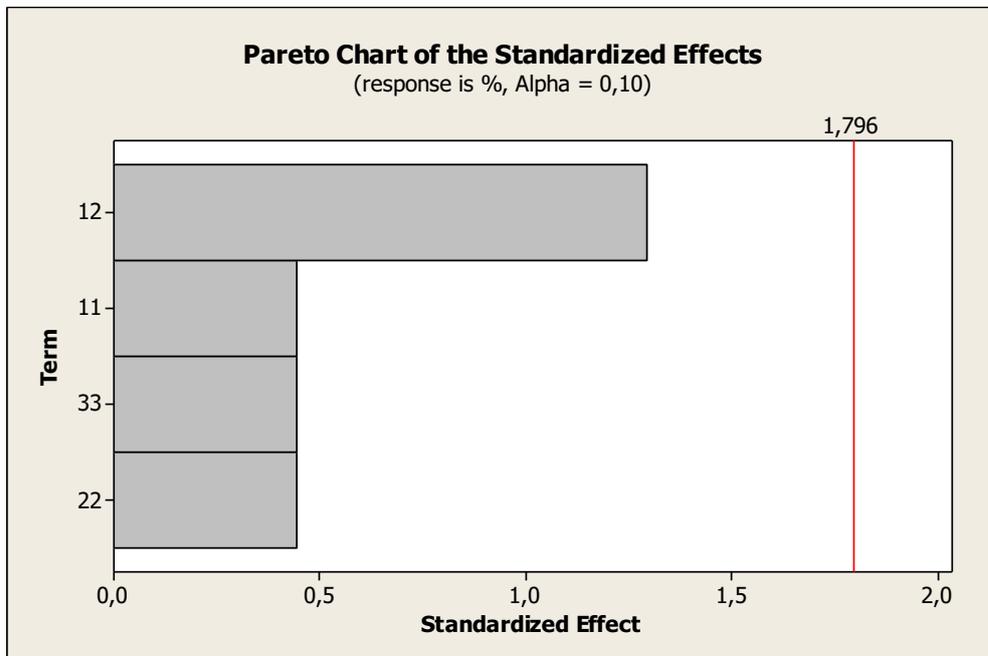
Gráfico 22. Significatividad de los parámetros del tensor de orientación sobre el módulo de elasticidad.



- Para el módulo de elasticidad, no hay ninguna variable significativa, siendo las que más se acercan los parámetros a_{11} , a_{22} y a_{33} en la misma proporción, para $\alpha=0,10$.

3) ELONGACIÓN “%”

Gráfico 23. Significatividad de los parámetros del tensor de orientación sobre la elongación.



- No existe ninguna variable significativa para la elongación, siendo la que más se acerca el parámetro a_{12} , para $\alpha=0,10$.

4.5 CONCLUSIONES

En este proyecto se diseñó una combinación de condiciones de procesado con el fin de alterar la microestructura de las muestras (y por tanto de las propiedades mecánicas finales) para generar un conjunto de muestras que permitiera estudiar las relaciones entre el procesado, la microestructura y las propiedades finales de composites de fibra larga procesados por moldeo por inyección. Sin embargo, aparentemente no se ha conseguido alterarlas lo suficiente, siendo la variación en las propiedades mecánicas medidas muy pequeña de una muestra a otra.

Mediante el refuerzo con fibra larga se pretendía aumentar las propiedades finales del material. Este aumento es mayor con una alineación de fibras en el sentido del flujo durante el proceso de moldeo por inyección. No obstante, mediante este proceso las fibras largas sufrieron roturas pasando a ser fibras cortas, lo que conlleva a una menor tendencia de alineación en ese sentido. Además, al tener fibra corta las condiciones de procesado no intervienen tanto a la hora de conseguir diferencias en las propiedades mecánicas, que era lo que se pretendía conseguir.

A pesar de no haberse aprovechado el valor de refuerzo que tiene la fibra larga, existe un aumento importante del módulo de elasticidad y la tensión de rotura con respecto al polímero (PA66). Los valores son los siguientes:

- La poliamida PA66 tiene una tensión de rotura de alrededor de 40 MPa, mientras que con el refuerzo de la fibra larga se tiene una entorno a 200 MPa.
- En cuanto al módulo de elasticidad, La poliamida PA66 tiene uno de 1400 MPa, mientras que con fibra larga se consigue aumentar hasta alrededor de 20000 MPa.

Por otro lado, en este trabajo se ha limitado a estudiar las relaciones entre procesado, orientaciones de las fibras y las propiedades finales, sin tener en cuenta otra serie de parámetros microestructurales, los cuales también pueden ser afectados por el procesado. Entre estos parámetros se encuentran la cristalinidad del material y el tamaño de fibra en la muestra final.

Como propuesta de mejora para el siguiente estudio se plantea volver a diseñar el DoE de procesado, tratando de preservar la longitud de la fibra mediante unas condiciones de procesado menos agresivas y consiguiendo una variación mayor en las propiedades de las probetas producidas.

A pesar de lo anteriormente descrito, se ha realizado un análisis para buscar las relaciones que existen entre las condiciones de procesado, la microestructura y las propiedades mecánicas, sin olvidar la limitada validez de las conclusiones que se puedan obtener.

Revisando los análisis de efectos principales realizados anteriormente sobre qué relación tienen las condiciones de procesado con los parámetros del tensor de orientación y las propiedades mecánicas, se pueden resumir los datos obtenidos en la tabla que se presenta a continuación.

Tabla 10. Datos obtenidos del análisis de efectos principales en la relación que tienen las condiciones de procesado con los parámetros del tensor de orientación y las propiedades mecánicas.

RESPUESTA	VARIABLE DE MAYOR EFECTO	EFECTO QUE EJERCE	EFECTO SIGNIFICATIVO
a ₁₂	Contrapresión (Cp)	$\searrow Cp \Rightarrow \searrow a_{12}$	No
a ₁₁	Velocidad de inyección (V)	$\searrow V \Rightarrow \nearrow a_{11}$	Sí
a ₂₂	Velocidad de inyección (V)	$\searrow V \Rightarrow \nearrow a_{22}$	No
a ₃₃	Velocidad de inyección (V)	$\nearrow V \Rightarrow \nearrow a_{33}$	Sí
Tensión rotura	Temperatura de inyección (Ti)	$\searrow Ti \Rightarrow \nearrow$ Tensión rotura	No
	Presión de mantenimiento (Pm)	$\nearrow Pm \Rightarrow \nearrow$ Tensión rotura	Sí
Módulo de elasticidad "E"	Presión de mantenimiento (Pm)	$\nearrow Pm \Rightarrow \nearrow E$	Sí
Elongación "%"	Temperatura de inyección (Ti)	$\searrow Ti \Rightarrow \nearrow \%$	Sí
	Presión de mantenimiento (Pm)	$\nearrow Pm \Rightarrow \nearrow \%$	Sí

Basándose en las variables con un efecto significativo se puede desglosar lo siguiente:

- ✓ El valor de los parámetros a_{11} y a_{33} depende de la velocidad de inyección (V).
- ✓ La presión de mantenimiento es la variable que afecta a la tensión de rotura, módulo de elasticidad y elongación.
- ✓ Además, otra variable que afecta a la elongación es la temperatura de inyección.

Teniendo en cuenta también los análisis de efectos principales llevados a cabo sobre la relación que tienen los parámetros del tensor de orientación con las propiedades mecánicas finales, se puede resumir lo siguiente:

Tabla 11. Datos obtenidos del análisis de efectos principales en la relación que tienen los parámetros del tensor de orientación con las propiedades mecánicas finales.

RESPUESTA	VARIABLES ESTUDIADAS	EFECTO QUE EJERCE	EFECTO SIGNIFICATIVO
Tensión rotura	a_{12}	$\searrow a_{12} \Rightarrow \nearrow$ Tensión rotura	No
	a_{11}	$\searrow a_{11} \Rightarrow \nearrow$ Tensión rotura	Sí
	a_{22}	$\searrow a_{22} \Rightarrow \nearrow$ Tensión rotura	Sí
	a_{33}	$\nearrow a_{33} \Rightarrow \nearrow$ Tensión rotura	Sí
Módulo de elasticidad "E"	a_{12}	$\nearrow a_{12} \Rightarrow \nearrow$ E	No
	a_{11}	$\searrow a_{11} \Rightarrow \nearrow$ E	No
	a_{22}	$\searrow a_{22} \Rightarrow \nearrow$ E	No
	a_{33}	$\nearrow a_{33} \Rightarrow \nearrow$ E	No
Elongación "%"	a_{12}	$\searrow a_{12} \Rightarrow \nearrow$ %	No
	a_{11}	$\nearrow a_{11} \Rightarrow \nearrow$ %	No
	a_{22}	$\nearrow a_{22} \Rightarrow \nearrow$ %	No
	a_{33}	$\searrow a_{33} \Rightarrow \nearrow$ %	No

De igual forma, se puede observar lo siguiente en cuanto a las variables con un efecto significativo:

- ✓ La tensión de rotura depende de los parámetros del tensor de orientación a_{11} , a_{22} y a_{33} .

Por tanto, se puede ver lo siguiente:

- La tensión de rotura depende de los parámetros del tensor de orientación a_{11} , a_{22} y a_{33} . Además, a_{11} y a_{33} dependen a su vez de la velocidad de inyección.
- La tensión de rotura depende también de la presión de mantenimiento.
- Tanto el módulo de elasticidad "E" como la elongación "%" dependen de la presión de mantenimiento.
- Por otra parte, la elongación "%" depende de la temperatura de inyección.

En consecuencia, se llega a la siguiente conclusión:

- Con una mayor presión de mantenimiento aumentan el módulo de elasticidad, elongación y tensión de rotura de la pieza.
- Se quiere conseguir que las fibras estén orientadas en mayor medida en el sentido del flujo para que las propiedades mecánicas aumenten. Esto se consigue para un valor mayor del parámetro a_{33} . Para ello se debe tener una mayor velocidad de inyección.

Los datos muestran cómo las condiciones de procesado afectan sobre la microestructura y ésta a su vez sobre las propiedades mecánicas finales. Por tanto, la caracterización de la microestructura es fundamental para optimizar los procesos de fabricación. Además, aunque no permita calcular todos los parámetros del tensor de orientación, la técnica utilizada es adecuada, siendo simple, rápida y barata en comparación a otras como la 3D (Sectioning o rayos X).

Basándose en las relaciones encontradas entre las condiciones de procesado, microestructura y propiedades mecánicas finales se llevará a cabo la segunda etapa del proyecto, que consiste en la optimización de la simulación del procesado.

Existe una gran incertidumbre en la simulación del procesado en cuanto a las orientaciones de las fibras largas. Por ese motivo, como continuación del trabajo realizado en este TFG, se va a intentar mejorar la simulación del procesado centrándose en éstas, para poder predecir con menor margen de error las propiedades mecánicas finales de la pieza.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Olivares Santiago, C. Galán Marín, J. Roa Fernández. Los composites: Características y aplicaciones en la edificación, 2003, Universidad de Sevilla.
- [2] <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/materiales-compuestos.html>
- [3] <http://www.elaplas.es/materiales/plasticos-tecnicos/poliamida-pa/>
- [4] <https://www.mexpolimeros.com/los%20compuestos%20de%20fibra%20larga.html>
- [5] <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/inyeccion-de-materiales-plasticos-i.html>
- [6] <https://www.pt-mexico.com/art%C3%ADculos/c%C3%B3mo-moldear-termoplasticos-reforzados-con-fibras-largas>
- [7] <https://www.privarsa.com.mx/moldeo-por-inyeccion-de-plastico/>
- [8] <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materialesplasticos.html>
- [9] <https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>
- [10] <https://www.mundomicroscopio.com/>
- [11] <https://www.lifeder.com/partes-microscopio-optico/>
- [12] <https://www.ecured.cu/>
- [13] <https://support.minitab.com/>
- [14] <https://es.wikipedia.org/>
- [15] Manual de Minitab
- [16] R. Hernández. Design of experiments applied to LFT
- [17] J. Antonio Ordaz Sanz, M. Del Carmen Melgar Hiraldo, C. María Rubio Castaño, Métodos estadísticos y econométricos en la empresa y para finanzas. Universidad Pablo de Olavide.