



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
Unidad Profesional Zacatenco.
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

TESIS

***“OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIAL
COMPUESTO POLICARBONATO – FIBRA DE VIDRIO”***

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
MECÁNICA.**

PRESENTA:

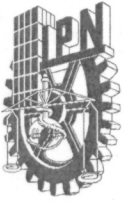
M. en S. OMAR SOLORZA NICOLÁS.

DIRIGIDA POR:

DR. ORLANDO SUSARREY HUERTA.

DR. HILARIO HERNÁNDEZ MORENO.

MÉXICO, 2019



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 19:00 horas del día 05 del mes de Junio del 2019 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. para examinar la tesis titulada:

**“OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIAL COMPUESTO
 POLICARBONATO-FIBRA DE VIDRIO”**

SOLORZA

Apellido paterno

NICOLÁS

Apellido materno

OMAR

Nombre(s)

Con registro:

A	1	4	0	5	5	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.
LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis


 DR. ORLANDO SUSARREY HUERTA


 DR. HILARIO HERNÁNDEZ MORENO

Presidente


 DR. ALEXANDER BALANKIN

Segundo Vocal


 DR. HILARIO HERNÁNDEZ MORENO

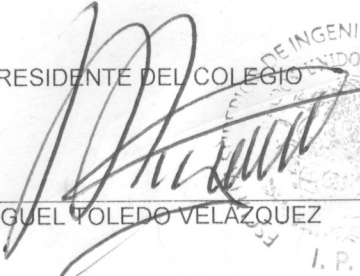
Tercer Vocal


 DR. PEDRO ALEJANDRO TAMAYO MEZA

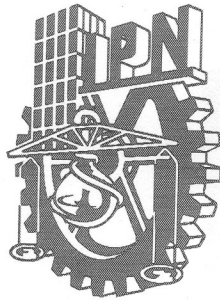
Secretario


 DR. EZEQUIEL GALLARDO HERNÁNDEZ

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


 DR. MIGUEL TOLEDO VELÁZQUEZ

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE
 POSGRADO E INVESTIGACIÓN



INSTITUTO POLITECNICO
NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION
Y DESARROLLO.

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS.

En la ciudad de México, CDMX, el día 10 de junio del 2019, el que suscribe M. en. S. Omar Solorza Nicolás del programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica con numero de registro A1405056 , adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación ESIME Zacatenco , manifiesto ser autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del Dr. Orlando Susarrey Huerta y el Dr. Hilario Hernández Moreno y cedo los derechos del trabajo titulado “Obtención y caracterización de material compuesto policarbonato-fibra de vidrio”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión , con fines académicos y de investigación

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, datos o gráficos sin el permiso expreso del autor y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones : osolorza2@hotmail.com, osusarrey@gmail.com, hihernandezm@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario dar el agradecimiento y citar la fuente de este.



M. en S. Omar Solorza Nicolás.



Resumen

“Caracterización físico- mecánico de policarbonato y fibra de vidrio.”

Esta tesis presenta la caracterización física y mecánica de un policarbonato reforzado con 4 % de fibra de vidrio tejida orientada a $0/90^\circ$ y $\pm 45^\circ$ producido por inyección y compresión e inserto de película. Se propone un método de fabricación utilizando dos métodos convencionales, moldeo por inserción de película (FIM) y moldeo por compresión (CM), para obtener muestras rectangulares del tamaño de 250 x 35 x 2,5 mm de policarbonato reforzado con 4% de fibra de fibra de vidrio con orientaciones $90 / 0^\circ$ y $\pm 45^\circ$, para investigar, desorientación de las fibras. Se realizó un análisis por el método de elementos finitos, utilizando Moldflow Synergy para determinar las condiciones iniciales para predecir el comportamiento del polímero durante la etapa de compactación y luego fabricar el molde.

La caracterización mecánica incluye pruebas de tracción con muestras que tienen orientación de fibra a $0/90^\circ \pm 45^\circ$ y muestras sin refuerzo, donde se obtuvo el módulo elástico en las direcciones principales, la resistencia máxima, el módulo de corte y la resistencia al corte. La alineación de la fibra, las fracciones de volumen y la densidad fueron medidas; estos resultados mostraron una mejora del 141% en la resistencia a la tracción para las muestras reforzadas con fibra de vidrio de $0 / 90^\circ$, en comparación con las muestras sin refuerzo. El proceso de inyección-compresión de la película reduce la desalineación de la fibra en un rango de 1.16° a 2.13° , lo que corresponde a la primera desviación estándar.

Este resultado demuestra el potencial del policarbonato tejido de fibra como material útil para los polímeros termoplásticos. La producción de materiales compuestos por moldeo por inyección-compresión de películas presenta la ventaja de ser fabricados con ciclos de producción más rápidos que los termoestables.

Palabras clave: Simulación, propiedades mecánicas, FIM, propiedades físicas.



Abstract

“Mechanical characterization of polycarbonate reinforces with woven glass fiber.”

This dissertation presents the physical and mechanical characterization of a polycarbonate reinforced with 4% woven glass fiber oriented at $0/90^\circ$ and $\pm 45^\circ$ produced by injection and compression and film insert. We propose a manufacturing method using two conventional methods, film insert molding (FIM) and compression molding (CM), to obtain rectangular samples of the size of $250 \times 35 \times 2.5$ mm of polycarbonate reinforced with 4% fiber of fiberglass with orientations $90/0^\circ$ and $\pm 45^\circ$, to investigate, disorientation of the fibers. A finite element method was performed, using Moldflow Synergy to determine the initial conditions to predict the behavior of the polymer during the compaction stage and then manufacture the mold.

The mechanical characterization includes tensile tests with samples that have fiber orientation at $0/90^\circ \pm 45^\circ$ and samples without reinforcement, where the elastic modulus was obtained in the main directions, the maximum resistance, the cutting modulus and the resistance to cut. The alignment of the fiber, the volume fractions and the density were measured; these results showed an improvement of 141 % in the tensile strength for the samples reinforced with glass fiber of $0 / 90^\circ$, in comparison with the samples without reinforcement. The injection-compression process of the film reduces the misalignment of the fiber in a range of 1.16° to 2.13° , which corresponds to the first standard deviation.

This result demonstrates the potential of fiber-woven polycarbonate as a useful material for thermoplastic polymers. The production of composite materials by injection-compression molding of films has the advantage of being manufactured with faster production cycles than thermostable ones.

Keywords: Simulation, mechanical properties, FIM, physical properties.



Agradecimientos.

Agradezco a mis padres Omar Solorza Feria y María Nicolas López, por el apoyo y tiempo brindado en sus vidas.

A mi hermana Natalí, José y a Maricruz, por su motivación y su incondicional apoyo dado durante el desarrollo de este trabajo.

A mi sobrino José e hija Alejandra, por convertirse en mi primera causa de motivación para concluir.

Agradezco a Industrias Romfer S.A de C.V, especialmente a Néstor Romero Partida, por brindarme su apoyo y proporcionarme los materiales y equipos para el desarrollo de este trabajo.

A mis asesores Dr. Orlando y Dr. Hilario, por brindarme la oportunidad de colaborar con ellos, las enseñanzas como ser humano ante los retos que ellos mismos me ponían, la paciencia y confianza de ambos, por concluir mi trabajo. Y su exigencia por hacer las cosas mejor cada día.



Índice

Resumen.	2
Abstract.	3
Agradecimientos.	4
Índice de Figuras.	5
Índice de Tablas.	7
Capítulo 1: Introducción.	8
Descripción del problema.	8
Solución propuesta.	10
Objetivos y Alcances.	10
Justificación.	11
Metodología.	11
Organización del trabajo.	12
Capítulo 2: Revisión del estado ciencia y la técnica.	14
2.1 Materiales Compuestos.	14
2.2 Policarbonato.	16
2.3 Conceptos básicos de mecánica de materiales compuestos.	19
2.3.1 Relación de masa y volumen.	19
2.3.2 Elasticidad y resistencia de los laminados.	20
2.3.3 Teoría de falla (Esfuerzos).	22
2.3.4 Teoría de falla (TSAI-WU).	22
Capítulo 3: Identificación de los parámetros del proceso	24
3.1 Identificación de las condiciones para procesamiento del polímero.	24
3.2 Diseño del herramental para fabricación.	28
3.3 Modelado.	34
3.4 Resultados.	38
Capítulo 4: Fabricación del herramental.	42
4.1 Etapas de fabricación.	43
4.2: Maquinado CNC.	45
Capítulo 5: Obtención del compuesto.	52
5.1 Compresión.	52
5.2 Inyección.	53
5.3 Resultados.	57
Capítulo 6: Caracterización Físico – Mecánica.	61
6.1. Caracterización Física.	61
6.2. Caracterización Mecánica.	63
6.3. Resultados.	65
Capítulo 7: Discusión de resultados.	70
Conclusión.	72
Trabajos a futuro.	73
Referencias	74
ANEXOS.	84

Índice de figuras.

Figura 1.1: Esquema de la metodología empleada.	13
Figura 2.1: Pirámide de pruebas.	20
Figura 3.1 Diagrama del proceso de compresión.	26
Figura 3.2. Proceso de moldeo por inyección-compresión.	26
Figura 3.3. Film Injection Molding.	28
Figura 3.4: Componentes de FIM y compresión. (1) Espécimen de 250 x 35 mm. (2) Película de policarbonato. (3) Policarbonato inyectado. (4) Fibra de vidrio tejida orientada (90/0 °, ± 45 °).	29
Figura 3.5: Secuencias de FIM y compresión. (A) Inserción de película y tela de fibra de vidrio en el molde; (B) Cierre del molde que deja una abertura para que el policarbonato se llene; (C) Los cilindros hidráulicos comienzan a comprimir el policarbonato; la compuerta se cierra; (D) Compresión y empaque; (E) El molde se abre, el espécimen se libera.	30
Figura. 3.6: Dimensiones en milímetros de las platinas de una maquina Battenfeld plus 350/075	31
Figura 3.7: Perfil de presión interna en cavidad [82].	32
Figura 3.8: Condiciones de frontera para simulación de inyección.	33
Figura 3.9: Dimensiones de placas para herramental.	36
Figura 3.10: Medidas generales de la placa para simulación.	37
Figura 3.11: Medidas generales de la compuerta de inyección	38
Figura 3.12: Vista en sección del tipo de malla utilizada para inyección, moldeo por compresión. (1) Punto de inyección (2) Canal caliente, (3) Compuerta en abanico, (4) Parte de la muestra.	39
Figura 3.13: Diseño de molde (1) Cilindros hidráulicos de 5 toneladas, (2) Parte macho que comprime la película y policarbonato, (3) Compuerta, (4) Parte hembra (110 °C), (5) Inserto de película con tejido fibra de vidrio, (6) policarbonato.	41
Figura 3.14: Tiempo de llenado de la pieza en 16%,32%,48%,64%, 80% y 100 %.	41
Figura 3.15: Volumen de la cavidad durante el llenado y compactación del termoplástico.	42
Figura 3.16. Porcentaje del volumen de la cavidad.	42
Figura 3.17: Gráficos de presión durante el proceso de inyección-compresión A) Presión en el lugar de la inyección: Trazado XY, B) Fuerza de cierre.	43
Figura 3.18: Velocidad de compactación.	44
Figura 3.19 Desplazamiento de actuadores neumáticos	44
Figura 3.20: Perfil de velocidad de llenado de la pieza	45
Figura 3.21: Deformación total de pieza, posterior al ciclo. XY, C) Desplazamiento de pistón, D) Fuerza de cierre.	45
Figura 4.1: Etapas de maquinado para molde de inyección.	48
Figura 4.2: Placas de porta molde y cavidades en estado bruto.	49
Figura 4.3: Barrenado para refrigeración y conexión de agua ¼ NPT.	50
Figura 4.4: Maquinado de placa de cavidad.	51
Figura 4.5: Plano de manufactura para postes de alineación.	51
Figura 4.6: Simulación del programa de acabado para el punto de inyección y cavidad lado fijo.	52
Figura 4.7: Cavidad lado fijo, concluida.	53

Figura 4.8: Corazón del lado móvil, Acero 4140 T, ajuste h6.	54
Figura 4.9: Esquema lado fijo del molde. 1) Pistones neumáticos, 2) Corazón lado fijo.	54
Figura 4.10: Piezas terminadas para ensamble de herramental.	55
Figura 4.11: Vistas del herramental final, ensamblado.	55
Figura 4.12. Componentes generales del molde.	56
Figura 5.1: Herramental de compresión	57
Figura 5.2: Herramental abierto durante el proceso de compresión.	58
Figura 5.3: Pruebas de inyección. (A) Máximo volumen de inyección. (B) Compactación 2 t. (C) Compactación 4 t. (D) Compactación 6t. (E) Compactación 8t.	59
Figura 5.4: Se muestran burbujas en la primera etapa de llenado, debido a presencia de agua.	60
Figura 5.5: Degradación por inyección y desorientación de la fibra.	60
Figura 5.6: Mala impregnación de la fibra.	61
Figura 5.7: Espesores muy elevados.	61
Figura 5.8: Inserto de película de policarbonato y fibra de vidrio.	61
Figura 5.9: Hoja de parámetros de inyección real.	62
Figura 5.10. Diagrama de distribución de probetas para orientación de fibra y caracterización físico-mecánica.	63
Figura 5.11: Inspección visual de policarbonato reforzado con fibra de vidrio tejida orientada en $0/90^\circ$ y $\pm 45^\circ$.	64
Figura 6.1. Proceso de caracterización física de muestras de policarbonato reforzadas con fibra de vidrio. (A) Muestras de policarbonato reforzado con fibra de vidrio tejida. (B) Muestras sumergidas en agua. (C) Muestras ponderados en crisol. (D) Crisoles colocados en un horno de mufla. (E) El crisol con la fibra colocada en un deshumidificador. (F) Especímenes ponderados.	67
Figura 6.2. Probeta con galga para obtención de deformaciones.	69
Figura 6.3. Ensayo de tensión para probetas de policarbonato solo y policarbonato reforzado.	70
Figura 6.4: Grafica esfuerzo máximo de ruptura vs deformación máxima de ruptura de policarbonato sin refuerzo.	72
Figura 6.5: Grafica esfuerzo máximo de ruptura vs deformación máxima de ruptura de policarbonato reforzado con vidrio del tipo telar orientado $0/90^\circ$.	73
Figura 6.6. Grafica esfuerzo máximo de ruptura vs deformación máxima de ruptura de policarbonato reforzado con fibra de vidrio del tipo telar orientado $\pm 45^\circ$.	73
Figura 6.7. Grafica esfuerzo máximo de corte vs deformación máxima de ruptura de policarbonato	74
Figura 6.8. Grafica esfuerzo máximo de corte vs deformación máxima de ruptura de policarbonato reforzado con fibra de vidrio del tipo telar orientado $\pm 45^\circ$.	74



Índice de Tablas.

Tabla 2.1 Condiciones de proceso del Policarbonato [46].	18
Tabla 3.1: Condiciones iniciales.	37
Tabla 3.2: Valores de malla.	38
Tabla 3.3: Llenado y compactación.	38
Tabla 3.4: Resultados de simulación.	42
Tabla 5.1: Orientación en grados para 0/90°.	60
Tabla 5.2: Orientación en grados para ± 45 .	61
Tabla 6.3.1: Fracciones volumétricas.	66
Tabla 6.3.2: Medidas generales de las probetas.	66
Tabla 6.3.3: Propiedades mecánicas de policarbonato sin refuerzo.	68
Tabla 6.3.4: Propiedades mecánicas de policarbonato con refuerzo de fibra de vidrio del tipo telar orientado 0/90°.	70
Tabla 6.3.5: Propiedades mecánicas de policarbonato con refuerzo de fibra de vidrio del tipo telar orientado 0/90°.	70

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se describe el contexto en el que se desarrolla esta tesis, se empieza por la descripción del problema, enseguida se propone la solución al problema planteado, posteriormente, se establecen los objetivos y alcances de la tesis, así como la metodología empleada, adicional a ello se ofrece en la última sección una descripción del contenido de este documento.

1.1 Descripción del problema.

La necesidad de buscar fuentes sustentables de energía ha promovido el desarrollo y empleo de los generadores eólicos, los cuales existen en diversos tipos y capacidades; además, de que se ha incrementado la eficiencia de estos gracias, entre otras cosas, al avance en las herramientas y técnicas para el diseño aerodinámico, pero también al empleo de materiales con altas relaciones de resistencia y rigidez con respecto al peso, es por ello, que en la actualidad, muchos de los aerogeneradores emplean componentes fabricados en materiales compuestos poliméricos, tal es el caso de los grandes aerogeneradores axiales, los cuales al presente prácticamente todos emplean palas en materiales compuestos. La mayor parte de estos compuestos, tienen como matriz polímeros termoestables, los cuales por su naturaleza no tiene punto de fusión, debido a que su formación se debe a una reacción química irreversible, lo que limita, por un lado, su reparación y por otro el reprocesamiento, reutilización o reciclado una vez que su vida útil ha terminado, además de que la energía requerida para fabricación de un componente requiere largos ciclos de curado, por lo que el consumo energético para la fabricación puede ser relativamente elevado [1-3].

Por otro lado, los polímeros termoplásticos presentan, a diferencia de los termoestables, un punto de fusión, lo cual representa una ventaja desde el punto de vista de la manufactura, ya que el ciclo de polimerización está dissociado del proceso de fabricación de una pieza, en el cual se aprovecha su punto de fusión para darle forma al polímero, esto normalmente se lleva a cabo empleando tiempos de procesamiento mucho más cortos que para el conformado de una pieza termoestable [4]. Por ejemplo, una pieza termoplástica puede ser elaborada en 45 s, con una temperatura de proceso de 250 °C, contrario al curado de una pieza termoestable en donde se requiere aproximadamente un ciclo de 2.5 h, a una temperatura de 210°C. [5]

El empleo de materiales compuestos de matriz termoplástica ha tenido avances en diversas industrias, por ejemplo, la aeronáutica en donde ya se fabrican los bordes de ataque de las alas de las más grandes aeronaves de transporte con termoplásticos, así como en la industria automotriz, y en aplicaciones marinas [6-14].

La introducción de materiales compuestos de matriz termoplástica en los aerogeneradores traería como beneficios: un menor consumo de energía para el conformado de las piezas, que el empleado para fabricación de materiales compuestos de matriz termoestable, facilidad de reparación ya que al disponer de punto de fusión se pueden emplear la unión



(soldadura) con el mismo material. Además de ello, al disponer de una matriz tenaz puede imprimirle en los elementos importantes del aerogenerador tolerancia al daño y resistencia a los impactos, ejemplo de esto pueden ser la fabricación de palas de aerogeneradores en este tipo de materiales los cuales están expuestos a colisiones con aves [15,16].

Dentro de los polímeros termoplásticos existen algunos que además de su alta ductilidad presentan una alta resistencia, tal es el caso del policarbonato, estas características hacen que este material tenga una amplia difusión para aplicaciones en donde se requiere resistencia al impacto, adicionalmente sufre una menor degradación bajo radiación solar [17-20]. El policarbonato termoplástico está involucrado en gran medida en el diseño y la fabricación de componentes industriales, ya que pueden producirse de forma económica en múltiples formas a través de procesos convencionales como la extrusión y el moldeo por inyección. Este tipo de producción permite una fabricación más rápida y mercados de gran volumen, incluso en transporte y producción automotriz [21,22].

Una de las combinaciones con altas perspectivas de aplicación industrial es el empleo de matriz de policarbonato y refuerzo de fibra de vidrio, por ser estos ampliamente disponibles en el mercado internacional; sin embargo, no se ha encontrado referencias sobre los parámetros de fabricación de un material compuesto como este, empleado fibra de vidrio en forma de tejido, ni tampoco reportes sobre caracterización físico-mecánica con esta configuración. Se han encontrado referencias sobre el empleo de refuerzos en forma de fibras cortas, lo que no es lo óptimo para el diseño de piezas estructurales, debido a que no se tiene una orientación en las fibras. De entre las limitantes para la realización de un compuesto policarbonato-fibra de vidrio en tela, se tiene el proceso de fabricación, ya que la temperatura a la que se debe de procesar el policarbonato se encuentra en un intervalo aproximado entre los 290 °C y 320 °C, además de que el tiempo que puede estar expuesto a estas condiciones es muy corto, aproximadamente 20 s, de lo contrario, la temperatura puede provocar una rápida degradación del material, que repercute en sus propiedades de resistencia y tenacidad, lo cual ya no sería atractivo para aplicaciones estructurales [23-28].

Los estudios existentes han reportado combinaciones de materiales óptimos para un mejor desempeño estructural, pero aún hay una falta de información sobre el policarbonato reforzado con fibra de vidrio tejida fabricada mediante moldeo por inyección. Por lo tanto, este trabajo aborda una forma de ampliar los conocimientos y propuestas existentes en la manufactura y obtención de policarbonato con fibra de vidrio del tipo telar por inyección de polímero [29].

1.2 Solución propuesta.

En miras de avanzar en dirección de lo que se explicó anteriormente, se propone en este trabajo la obtención de placas de material compuesto policarbonato-fibra de vidrio en tela, de dimensiones representativas en tamaño de laminados que se pudieran encontrar en estructuras fabricadas con este material. Además de ello las condiciones de fabricación deben representar la tecnología actual disponible industrialmente, con el fin de que los resultados de este trabajo puedan contribuir al escalamiento con miras a su industrialización. Por otro lado, conocer las propiedades mecánicas que sirvan de base para el diseño de estructuras, en este caso y como parte inicial se pretenden obtener las propiedades elásticas y de resistencia.

1.3 Objetivos y Alcances

Como objetivo general, se tiene el de explorar un método para fabricar laminados en material compuesto de policarbonato reforzados con fibra de vidrio tipo telar que, por un lado, tenga posibilidades de ser escalado industrialmente y por otro, que incremente las propiedades de resistencia, con respecto al policarbonato, así como obtener sus propiedades mecánicas y físicas bajo un comportamiento de membrana.

Una vez que se declaró el objetivo global, este implica el logro de los siguientes objetivos particulares:

1. Revisar el estado ciencia y tecnología.
2. Identificar el proceso para la obtención del MC.
3. Identificar los parámetros que permiten que el proceso sea viable.
4. Diseño y fabricación del herramental para la obtención del MC.
5. Obtener una serie de probetas representativas.
6. Realizar la caracterización física y mecánica.

El alcance esperado de esta tesis está en obtener un laminado de material compuesto a base de policarbonato reforzado con fibra de vidrio para obtener sus propiedades físicas (densidades y fracción volumétrica), propiedades mecánicas elásticas y de resistencia bajo un comportamiento en membrana.

1.4 Justificación.

El propósito del presente trabajo es de crear un material compuesto de matriz termoplástica amorfa (policarbonato) con refuerzo de fibra de vidrio en forma de tela orientada a $0/90^\circ$ y $\pm 45^\circ$ por el método de inserto de película e inyección-compresión e identificar el comportamiento mecánico del material para el uso de palas de un aerogenerador vertical, que actualmente la revisión del estado del arte muestra que no se ha desarrollado alguna investigación.

1.5 Metodología.

La metodología que se emplea en esta tesis parte primero de una investigación bibliográfica sobre los avances en la obtención de materiales compuestos de matriz termoplástica, así como una investigación de campo sobre las técnicas actuales de procesamiento de termoplásticos, esto con el fin de establecer el estado de la ciencia y la técnica.

Posteriormente, una vez establecido el estado del arte, se identifican los procesos susceptibles de ser empleados para la obtención de láminas de material compuestos de policarbonato y fibra de vidrio en tela, con el fin de seleccionar el proceso más conveniente, teniendo en consideración los aspectos tecnológicos actuales y que el proceso seleccionado pueda ser escalado posteriormente a un nivel de industrialización.

Una vez seleccionado el proceso, se tienen que identificar los parámetros adecuados para que se pueda llevar a cabo la obtención de las placas de material compuesto, entre estos están aspectos importantes como son la temperatura y el tiempo de proceso. Además de ello, es necesario diseñar el herramental adecuado para obtener la placa de material compuesto.

Enseguida, es indispensable fabricar el herramental que se diseñó en el paso anterior, para poder realizar unas primeras pruebas de validación y puesta a punto del proceso. Para, finalmente, elaborar una cantidad suficiente de placas de material compuesto para extraer las probetas necesarias y llevar a cabo la caracterización física como mecánica.

Las probetas extraídas se someten a ensayos para la obtención de las propiedades físicas como densidad y fracciones volumétricas, así como para la obtención de las constantes elásticas y las propiedades de resistencia para un comportamiento en membrana. Una vez concluidos los ensayos y procesados los datos experimentales, se realiza el análisis correspondiente y posteriormente se establecen las conclusiones de todo el trabajo. Un diagrama de esta metodología se presenta en la Figura 1.1.

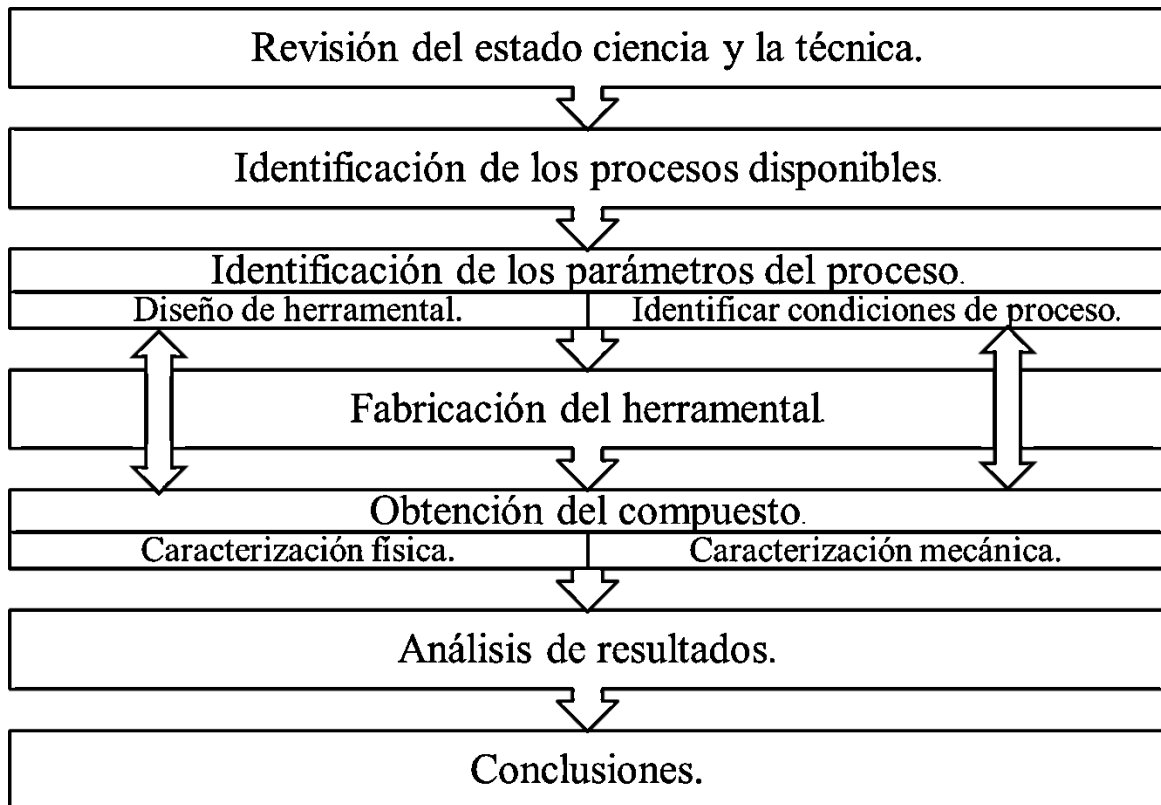


Figura 1.1 Esquema de la metodología empleada.

1.6 Organización del trabajo.

El presente trabajo se encuentra estructurado de la siguiente forma:

En el capítulo 1, se da una introducción al tema de trabajo, planteamiento de problema en el cual se focaliza una solución propuesta, su objetivo general y alcances, así como sus objetivos particulares a cumplir con la investigación realizada, la metodología que se emplea en este trabajo, así como una investigación de campo sobre las técnicas actuales de procesamiento de termoplásticos para cumplir con los objetivos.

En el capítulo 2, se ofrece un análisis sobre el estado del arte de los materiales compuestos empleados en los últimos años, se muestra el paradigma actual de desarrollo de piezas en materiales compuestos, desde el punto de vista normativo. Se describen las propiedades mecánicas del policarbonato, así como el tipo de refuerzo (fibra de vidrio) que se emplea en el presente trabajo. Se describen algunos avances tecnológicos para la fabricación de material compuesto y las condiciones de proceso. Se hace mención de la caracterización física de los materiales compuestos, caracterización mecánica y los criterios de falla por resistencia usados en los materiales compuestos.

En el capítulo 3, se describen los procesos por los cuales se realizan los materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio con matriz termoplástica, posteriormente se identifica el proceso susceptible de adaptar para la obtención del material que se propone, se explica en que consiste el proceso y se explica por qué se selecciona como base.



Posteriormente se desarrolla el herramental para el proceso definido y se presentan los cálculos necesarios para procesar el policarbonato.

En el capítulo 4, Se describe de forma breve, el proceso de selección de materiales para la fabricación del herramental (molde). En este capítulo se describen las etapas por las que deben pasar las piezas para la fabricación de moldes, desde la adquisición de materia prima, rectificado, maquinado convencional y maquinado CNC, así como los ajustes y ensamble de todos los componentes.

En el capítulo 5 se justifica el método de inyección-compresión insertando una película delgada, haciendo mención del proceso de compresión e inyección de manera separada. Se menciona los resultados exploratorios obtenidos por esos métodos, los que condujeron a la puesta a punto del proceso final. Se describe la obtención del compuesto de manera real, mostrando la hoja de parámetros de inyección y compresión. De entre los resultados aquí mostrados se presentan las desviaciones en el alineamiento de las fibras con el proceso seleccionado.

En el capítulo 6 se describe la caracterización físico - mecánica del material compuesto en donde se presentan los resultados de las fracciones volumétricas, sus constantes elásticas, así como las propiedades de resistencia obtenidas.

En el capítulo 7: Se discuten los resultados obtenidos, para tener la conclusión del trabajo de investigación.

Capítulo 2: Revisión del estado ciencia y la técnica.

La metodología que se emplea en este trabajo parte primero de una investigación bibliográfica sobre los avances en investigación en la obtención de materiales compuestos de matriz termoplástica, así como una investigación de campo sobre las técnicas actuales de procesamiento de termoplásticos, esto con el fin de establecer estado de la ciencia y la técnica.

En este capítulo se hace una revisión bibliográfica sobre los materiales compuestos de matriz polimérica, describiendo primero que es un material compuesto, matriz, refuerzo y al combinarse crean un nuevo material. Posteriormente se describen algunas aplicaciones de los materiales compuestos de matriz termoplástica, las técnicas actuales de procesamiento, haciendo mención especial del policarbonato, enseguida se describen, las fibras de vidrio y el uso que estas tienen en el sector energético. Por último, se describe la filosofía actual del desarrollo de estructuras en material compuesto, además de los procesos de caracterización mecánica y los criterios de falla por resistencia de los materiales compuestos.

2.1 Materiales Compuestos.

Los materiales compuestos son materiales formados por la combinación de dos o más materiales de naturaleza diferente, con propiedades mecánicas diferentes, en el cual uno de ellos funciona como matriz (fase continua) y otro como refuerzo (fase dispersa). Sin embargo, la combinación de estos dos materiales crea un material completamente nuevo. Las propiedades del material compuesto de nuevo diseño son diferentes de los materiales constituyentes originales que actúan de forma independiente [30].

La matriz es el componente de cuerpo de un material compuesto que rodea al refuerzo en la estructura. Un compuesto puede tener una matriz metálica, cerámica o polimérica. Los refuerzos son más resistentes y mejoran las propiedades de la matriz. Para aplicaciones estructurales destacan los materiales denominados estratificados, en donde el material compuesto resultante consiste en capas de refuerzos y la matriz, apilados de tal forma para conseguir las propiedades mecánicas deseadas [30].

Los materiales compuestos de matriz polimérica se componen de fibras de alta resistencia (fibra de vidrio, fibra de carbono), en una resina comúnmente termoestable, donde el material inicial requiere de un catalizador para que lleve a cabo una reacción de polimerización. Las matrices termoestables no tienen un punto de fusión, se debe considerar que existe una relación entre la resistencia mecánica y su resistencia térmica. Esta relación lleva a considerar el desarrollo de matrices que puedan ofrecer tanto resistencia mecánica como resistencia térmica, esto lleva a desarrollar matrices termoplásticas. Las matrices termoplásticas ofrecen ya procesadas, resistencia al impacto, resistencia a flexión y compresión, resistencia química, baja absorción de humedad, contienen punto de fusión, esto último permite que puedan ser soldados entre ellos y que dichas matrices sean reutilizables. Sus desventajas son: tendencia a la fluencia a temperaturas elevadas, requieren presiones elevadas para su moldeo [31].



Los materiales compuestos de matriz polimérica son flexibles y con una alta resistencia a la intemperie y a la corrosión. Una de las principales ventajas de estos materiales es su conformación durante la fabricación. Se pueden adaptar a superficies planas, curvas o esculpir contornos, mostrando así una gran flexibilidad de diseño.

El comportamiento mecánico de los materiales compuestos depende de: tipo de fibra, matriz, dirección de la fibra; número de capas, magnitud de las cargas, frecuencia de carga y medio ambiente.

En la actualidad, estos materiales compuestos se utilizan en una amplia gama de aplicaciones. En los sectores aeroespaciales y de automotriz, se utilizan principalmente para la eficiencia del combustible debido a su bajo peso. Debido a las formas curvas de los productos a estos sectores, los fabricantes también están tomando ventaja de su flexibilidad de diseño y consolidación de las piezas que estos compuestos de polímeros pueden proporcionar. En el sector energético, la creciente demanda de la energía eólica ha llevado a un mayor interés para palas de turbinas a base de materiales compuestos de matriz polimérica. La demanda de los combustibles fósiles, unido con el cambio climático observado durante estos años han motivado la búsqueda de nuevas fuentes de energía tales como la energía eólica, por lo que esta fuente de energía ha tenido un desarrollo sustentable en los últimos años [32]. Recientemente, la práctica de reciclaje se ha promovido con el aumento de la conciencia ambiental y el ahorro de recursos naturales. Esto, junto con el alto costo del polímero y el alto costo de materia de desechos generados durante la fabricación, hacen de este procedimiento una opción viable y atractiva [33].

Los materiales compuestos más frecuentemente usados son de matriz termoestable, haciendo que su proceso de reciclaje sea poco o nulo [34]. Sin embargo, con la revisión bibliográfica, se han encontrado materiales reforzados con matriz termoplástica, las cuales se pueden reciclar. Materiales como los polipropilenos, poliamidas y ABS, son materiales que su temperatura de transformación no sobrepasa los 300 °C [34,35], y se han obtenido materiales compuestos con refuerzo de polietileno de alta densidad (HDPE) y Polipropileno (PP) de los cuales hay evidencia de una adecuada adhesión fibra/matriz [36].

Los materiales compuestos son susceptibles al daño debido al proceso de manufactura que llevaron para ser un elemento y después una estructura, lo que los lleva a una etapa de falla a condiciones de carga inesperada, fatiga accidental, impacto y degradación [36]. Estos daños son más complejos en comparación al de las estructuras metálicas. El daño que se provoca en los materiales compuestos es una combinación de agrietamiento en la matriz, rotura de fibras en tensión y/o compresión, esfuerzos cortantes en refuerzo-matriz y en de laminación [37]. Estos daños en estructuras de materiales compuestos reducen la su capacidad de carga, y el tiempo de su vida en servicio [37]. La reparación o mantenimiento de los daños estructurales son inevitables para mejorar dicha integridad. Sin embargo, este proceso no es rentable por su alto costo.

En los últimos años una serie de nuevos sectores industriales, tales como la industria automotriz, electrónica, informática han empleado piezas compuestas con gran durabilidad y características funcionales que puede sustituir a los materiales metálicos convencionales ampliamente [38]. En el proceso de producción para reducir el costo de piezas automotrices, el proceso de moldeo por inyección es la mejor solución [39]. La rápida expansión de materiales compuestos en la industria de energía eólica, partes aeronáuticas, partes metálicas reforzadas, piezas automotrices están siendo fabricadas por este método [40].

El proceso de moldeo por inyección se utiliza ampliamente en la fabricación de plásticos, ya que permite la producción de piezas complicadas, con precisión dimensional, un tiempo de ciclo relativamente corto [41]. El moldeo por inyección de fibra reforzada combina las ventajas de procesamiento inherentes de moldeo por inyección de plásticos con las características superiores de rendimiento mecánico de los materiales compuestos. Las propiedades resultantes pueden “adaptarse”, ya que se pueden obtener diferentes orientaciones de las fibras dependiendo de los requerimientos y a las condiciones de proceso [42,43].

La distribución de la orientación de fibra juega un papel importante en las propiedades mecánicas de piezas de materiales compuestos reforzados con fibra. Pontes et al. [42] indicó que las propiedades mecánicas de piezas moldeadas por inyección de materiales reforzados con vidrio son sensibles al proceso, debido a los desalineamientos producidos, tanto por el flujo de polímero, como por las condiciones de carga durante el proceso. Algunos programas de simulación comerciales permiten la predicción de la orientación de las fibras inducida durante el proceso de inyección [43].

2.2 Policarbonato

Policarbonato (PC) es un material amorfo polimérico termoplástico con naturaleza transparente, de alta ductilidad, resistencia al impacto y comparativamente peso ligero. Lámina de policarbonato de propósito general conserva las propiedades de impacto significativamente mejor que los termoplásticos, de gran consumo y de ciertos polímeros de ingeniería (PMMA,ASA) [44], resiste la exposición a la radiación solar [44] y mantiene un alto grado de transmisión de luz a través del tiempo [43].

La resistencia al impacto del policarbonato es de las mejores con respecto a los termoplásticos, (65 kJ/m^2), por lo cual, es adecuada para aplicaciones como protectores para la cara, gafas, ventanas y escudos de protección contra explosiones, cascos para el uso con bicicletas, faros de luces en los automóviles, carcasas de celular y computadoras por lo que la respuesta al impacto de la estructura del policarbonato se ha vuelto un tema de interés [42,43].

El policarbonato requiere técnicas especiales para su procesamiento y difiere de la mayoría de los termoplásticos [44]. El PC pierde rigidez muy rápidamente por encima de 188°C [44]. Tiene un rango de formación de alta temperatura muy estrecho ($290\text{-}310^\circ\text{C}$). A temperaturas más altas, la humedad arrastrada puede resultar en ebullición y degradación del material [45]. Por ello el material, debe secarse previamente al proceso en un horno, para garantizar que no se producirá burbujeo durante el procesamiento [46].

Las condiciones de proceso mostrados en la tabla 2.1 del policarbonato reportados son:

Temperatura de molde.	80-95 °C
Velocidad de Inyección	15-50 mm/ s
Presión de sostenimiento	60 MPa (610 kgf /cm ²)
Tiempo de sostenimiento	15 s aprox.
Tiempo de enfriamiento	20 s
Velocidad del tornillo extrusor	100 rpm

Sin embargo, para el policarbonato donde su temperatura de transformación y de proceso se encuentra en los 290 °C y 320 °C, no se reportan un material compuesto refuerzo/matriz, en donde la matriz sea del tipo telar con orientación específica, obtenido con método de inyección/compresión [47]. Dentro de los trabajos realizados con materiales compuestos de matriz termoplástica se encuentran los siguientes:

F. C. Smith [48] en su investigación, reporta el policarbonato reforzado con tela de fibra de carbón, en la cual utiliza películas de policarbonato, las cuales son atacadas por cloruro de metileno, colocando la tela de fibra de carbón entre cada capa de las películas de policarbonato, para posteriormente ser prensados durante un tiempo de 8 horas. Como resultado obtiene una mala impregnación en ciertos puntos del laminado y debido a la reacción química, se obtienen burbujas de aire en el laminado, que esto ocasionara una falla mecánica en los puntos que contengan aire.

En otra investigación, A. D. Drozdov [49], Utiliza dos películas de policarbonato reforzadas con pellets y fibra de vidrio, elaboradas por medio de extrusión. En este trabajo se utilizan fibras unidireccionales y se observa variación en la temperatura del proceso, 250 °C y 290 °C. Otra variación se encuentra en el contenido de fibra y el tipo de policarbonato que se utiliza; policarbonato virgen o nuevo, policarbonato reciclado y policarbonato reforzado con 20 % de fibra de vidrio, dando como resultado que el incremento en las propiedades mecánicas se obtiene con una mayor temperatura de procesamiento, policarbonato nuevo y mayor contenido de fibra.

Srinivasan T et. al [50], reporta un material compuesto de policarbonato reforzado con tela de fibra de vidrio, de 4 mm de espesor, 7 capas de tela de fibra de vidrio y 6 capas de policarbonato de 0.5 mm cada una, utilizando método de compresión por medio de prensas. Sin reportar orientación de las fibras y no se reportan las propiedades físico-mecánicas del compuesto resultante. El proceso que se realiza es por medio de compresión, y se realizan pruebas de taladrado en dicho material compuesto, por lo que no se demuestra si hubo completa impregnación entre cada película de policarbonato.

Por parte de materiales con matriz de policarbonato reforzados con fibra corta por medio de inyección se encuentran una considerable información. Los refuerzos de fibra a menudo varían entre 0.20 y 0.40 mm de longitud, y las fibras más grandes alcanzan longitudes superiores a 1 mm por citar algunos:

En algunos casos como el de Yung-Kuang et. al [51], en el que se usa inyección de policarbonato con fibras de PTFE (politetrafluoroetileno), se reportan diversos tipos de refuerzos en el policarbonato, sin embargo, se utiliza el proceso convencional de agregar dichos refuerzos en los pellets, sin tener alguna orientación en específica.

K. K Biswas [53] realizó el estudio del policarbonato reforzado con 10, 20 y 30 por ciento de fibra corta para determinar la deformación a temperaturas de 90 a 130 °C. Obteniendo como resultado que el porcentaje de fibra ayuda a evitar la deformación de la pieza. Mayor contenido de fibra, menor será la deformación sin importar la temperatura a la que se encuentre, por lo que se debe obtener el mayor contenido de fibra, dependiendo el método de obtención del compuesto. Con su investigación, se puede definir que el incremento de fibra de vidrio mejora las propiedades del compuesto, y estas fibras no son afectadas por las temperaturas de proceso.

Parkar [54], reporta que una de las desventajas de agregar fibra de vidrio al policarbonato, es que la viscosidad del material aumenta, haciendo que el polímero necesite de mayor presión para poder desplazarse dentro de la cavidad. Otro de los factores es que pierde transparencia, una propiedad importante de este material.

Por mencionar una última alternativa en el proceso para la obtención de policarbonato reforzado por fibras, Myoung-Rae [55], agregó por separado las fibras de vidrio cortas al policarbonato en estado de plastificación para poder obtener sus propiedades mecánicas, en este proceso las fibras pueden mantener su longitud de mejor forma, previamente a ser procesado, la desventaja de este proceso es que no se puede obtener una orientación de fibra específica.

Los procesos mencionados, sirven para definir el punto en el que se encuentra el estado del arte para la manufactura de material compuesto con matriz de policarbonato y a partir de ese punto desarrollar la investigación, por lo que se observó que, en la fabricación de piezas con policarbonato, no existe un proceso que permita la orientación de las fibras tejidas, por método de inyección-compresión.

El último paso del proceso antes de entrar a la producción es verificar y optimizar el diseño, por lo que se requiere la elaboración de un gran número de elementos y componentes, los cuales deben de ser ensayados a cargas estáticas y dinámicas.

El MIL-HDBK-17-1-2 [56] establece una metodología para el desarrollo de estructuras en materiales compuestos, que tiene como base una pirámide de ensayos. Figura 2.1 que se considera necesaria para la calificación y certificación de las estructuras en materiales compuestos poliméricos.

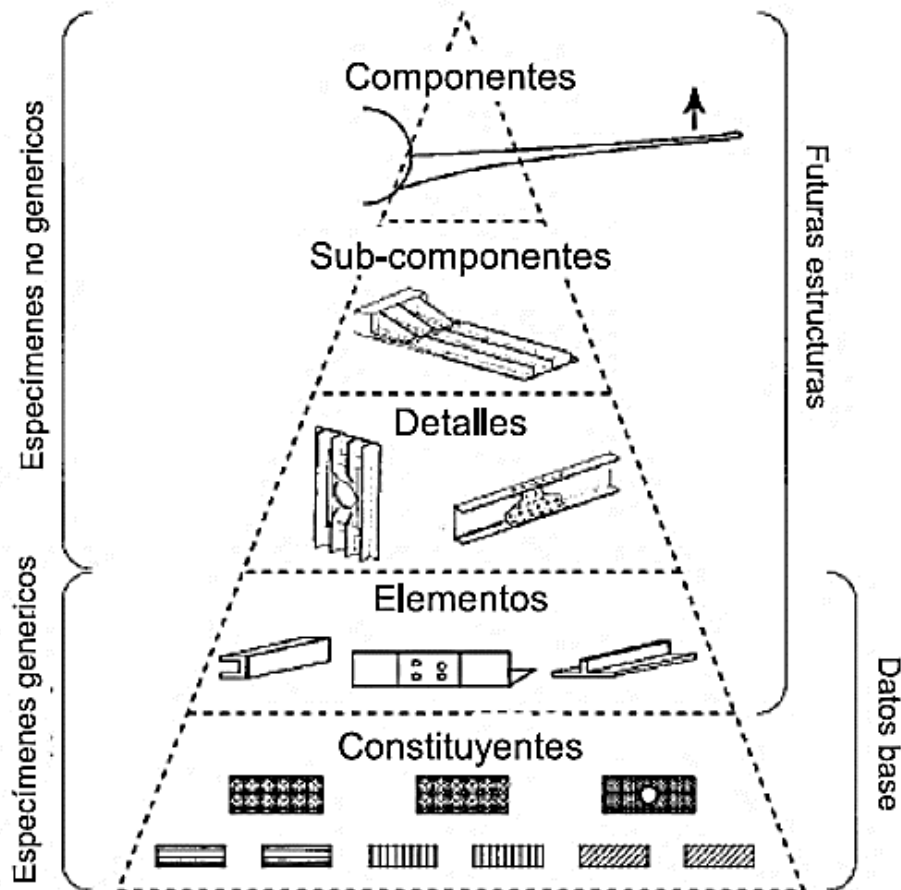


Figura 2.1 Pirámide de pruebas [56].

Esta metodología busca obtener: Valores base del material y sus magnitudes para el diseño, basado en el diseño/análisis de la estructura. Selecciona las áreas críticas para subsecuentes pruebas, determina los modos de falla críticos. Selecciona las pruebas ambientales que producirán la falla crítica del modelo, en el modo crítico por resistencia. Posteriormente la intención es diseñar y probar una serie de especímenes, para cada condición de carga, además de ello se diseñan y realizan una serie de pruebas que evalúen las condiciones de carga con mayor posibilidad de falla, comparando los resultados experimentales con los modelos analíticos y por simulación y se realizan los ajustes necesarios. Posteriormente se diseñan los componentes estructurales y lleva a cabo pruebas estáticas y de fatiga a escala natural para validar la integridad del componente frente a las cargas aplicadas y compara con el análisis. Al aplicar este tipo de ensayos a modelos de escala menor, reducirá el costo de las iteraciones de diseño, mientras se llega al diseño final del producto [57].

2.3 Conceptos básicos de mecánica de materiales compuestos.

2.3.1 Relación de masa y volumen.

Previamente a la obtención de las propiedades de una lámina conviene establecer una definición más precisa de los parámetros relativos a los contenidos de fibra y matriz. Un

parámetro de definición del material compuesto, que se utiliza ampliamente, es el contenido volumétrico de refuerzo. Por lo que la lámina es caracterizada de esta forma, donde V_f es la relación de volumen, donde V_{olF} , es el volumen de fibra, V_{olCom} es el volumen total del compuesto, W_f la relación de peso de la fibra, donde W_{fib} es el peso de la fibra y W_{com} es el peso del compuesto., V_m es la relación del volumen de la matriz donde V_{mat} es el volumen de la matriz y V_{com} es el volumen del compuesto, W_m relación del peso de la matriz, V_v volumen de huecos.

$$V_f = \frac{V_{olF}}{V_{olCom}} \quad (2.1)$$

$$W_f = \frac{W_{fib}}{W_{com}} \quad (2.2)$$

$$V_m = \frac{V_{mat}}{V_{com}} \quad (2.3)$$

$$W_m = 1 - W_f \quad (2.4)$$

$$V_v = 1 - V_f - V_m \quad (2.5)$$

2.3.2 Elasticidad y resistencia de los laminados.

Gran mayoría de las estructuras de material compuesto, están hechas de láminas o placas de cascaron delgado. Eso se debe a que la estructura es más eficiente en membrana o cascarón delgado, aparte de que es más complicado producir cascaron de pared gruesa [58].

La mayoría de las estructuras de material compuesto están diseñadas bajo condiciones de membrana, debido a que el espesor es pequeño y el material es resistente. Por lo que generalmente la falla del material no se da como en los metales, pero si en condiciones de membrana.

Los modelos matemáticos de los materiales compuestos difieren del de los metales en tres aspectos. Primero, las ecuaciones constitutivas de cada lámina son ortotrópicos. En segundo, las ecuaciones constitutivas del elemento dependen de las suposiciones cinemáticas de la teoría de cascaron utilizada e implementación en el elemento. Por último, la simetría del material es tan importante como la simetría geométrica y carga al utilizar condiciones de simetría en los modelos.

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} dz$$

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} z dz \quad \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} z dz \quad \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} z dz \quad (2.6)$$

Donde N es el número total de capas del estratificado y Z_{k-1} y Z_k son las coordenadas en la parte inferior y superior de la capa k , $\sigma\sigma$ son los esfuerzos, N_x, N_y, N_{xy} , son las fuerzas en el plano por unidad de longitud, M_x, M_y, M_{xy} [58].

Remplazando las ecuaciones constitutivas y resolviendo la integral obtenemos:

$$\begin{pmatrix} N_X \\ N_Y \\ N_{XY} \\ M_X \\ M_Y \\ M_{XY} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_X^0 \\ \epsilon_Y^0 \\ \gamma_{XY} \\ \kappa_X \\ \kappa_Y \\ \kappa_{XY} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{pmatrix} V_Y \\ V_X \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} H_{44} & H_{45} \\ H_{45} & H_{55} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_{YZ} \\ \gamma_{XZ} \end{pmatrix}$$

Donde

$$A_{ij} = \sum_{K=1}^N (\overline{Q}_{ij})_k t_k; \quad i,j=1,2,6 \quad (2.8)$$

$$B_{ij} = \sum_{K=1}^N (\overline{Q}_{ij})_k t_k \overline{Z}_K; \quad i,j=1,2,6$$

$$D_{ij} = \sum_{K=1}^N (\overline{Q}_{ij})_k \left(t_{kz_k^2} + \frac{t_k^3}{12} \right); \quad i,j=1,2,6$$

$$H_{ij} = \frac{5}{4} \sum_{K=1}^N (\overline{Q}_{ij})_k \left[t_k - \frac{4}{t^2} \left(t_{kz_k^2} + \frac{t_k^3}{12} \right) \right]; \quad i,j=1,2,6$$

Donde $(\overline{Q}_{ij})_k$ son los coeficientes de rigidez en el plano en el sistema de ejes globales del plano para la capa k , t_k es el espesor de la capa k y Z_K es la coordenada de la superficie media de la capa. En resumen A_{ij} representa la rigidez de la placa, B_{ij} el

acoplamiento flexión – extensión, D_{ij} representa los coeficientes de flexión y H_{ij} representa la rigidez en corte transversal.

2.3.3 Teoría de falla (Esfuerzo máximo.)

De acuerdo a la teoría del esfuerzo máximo, este se da cuando al menos un esfuerzo es mayor a la resistencia del material sobre la dirección que es aplicada la fuerza. El esfuerzo se obtiene en los ejes principales del material ($\sigma_1, \sigma_2, \tau_6$) y expresado en la forma de tres criterios.

$$\sigma_1 = \begin{cases} F_{1t} & \text{cuando } \sigma_1 > 0 \\ -F_{1c} & \text{cuando } \sigma_1 < 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\sigma_2 = \begin{cases} F_{2t} & \text{cuando } \sigma_2 > 0 \\ -F_{2c} & \text{cuando } \sigma_2 < 0 \end{cases}$$

$$|\tau_6| = F_6 \quad (2.10)$$

Donde σ_1 y σ_2 son los esfuerzos normales, τ_6 es el esfuerzo cortante los tres en el plano, F_{1t} es la resistencia a la tracción longitudinal del material, F_{1c} es la resistencia a la compresión longitudinal del material, F_{2t} es la resistencia a la tracción transversal, F_{2c} es la resistencia a la compresión transversal del material y para un estado de dos dimensiones con $\tau_6 = 0$.

2.3.4 Teoría de falla (TSAI-WU)

Esta teoría es factible para predecir los esfuerzos en condiciones generales, sin tener datos previos obtenidos de forma experimental. La forma original propuesta de este criterio de forma compacta es:

$$I_F = \frac{1}{R} = \left[-\frac{B}{2A} + \sqrt{\frac{B^2}{4A^2} + \frac{1}{A}} \right]^{-1} \quad (2.20)$$

$$A = \frac{\sigma_1^2}{F_{1t}F_{1c}} + \frac{\sigma_2^2}{F_{2t}F_{2c}} + \frac{\sigma_3^2}{F_{3t}F_{3c}} + \frac{\sigma_4^2}{F_4^2} + \frac{\sigma_5^2}{F_5^2} + \frac{\sigma_6^2}{F_6^2} - \frac{\sigma_2\sigma_3}{\sqrt{F_{2t}F_{2c}F_{3t}F_{3c}}} - \frac{\sigma_1\sigma_3}{\sqrt{F_{1t}F_{1c}F_{2t}F_{2c}}} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sqrt{F_{1t}F_{1c}F_{2t}F_{2c}}} \quad (2.21)$$

$$B = (F_{1t}^{-1} - F_{1c}^{-1})\sigma_1 + (F_{2t}^{-1} - F_{2c}^{-1})\sigma_2 + (F_{3t}^{-1} - F_{3c}^{-1})\sigma_3 \quad (2.22)$$

Para I_F , es, índice de falla (Failure Index), que se define como la relación del esfuerzo sobre la carga. Donde R es la inversa de I_F y se predice que la falla ocurre cuando $R \leq 1$.

Donde los valores F_{3t} y F_{3c} son valores obtenidos por medio de ensayos o de la literatura cuando se conoce el tipo de material compuesto a analizar y se haya realizado una caracterización mecánica previa, como ejemplo el AS4D/9310 que es un material de fibra de carbón unidireccional con matriz epóxica y sus valores son 57 MPa y 228 MPa. Con esto se puede determinar el esfuerzo máximo a partir del cual el compuesto sufre daño o falla. [59]

2.3.5 Teoría de falla (TSAI-HILL)

La ecuación de Tsai-Hill [60] asume que un material compuesto presenta una falla al cumplirse la siguiente condición.

$$\frac{\sigma_x^2}{F_x^2} - \frac{\sigma_x \sigma_y}{F_x^2} + \frac{\sigma_y^2}{F_y^2} + \frac{\tau_{xy}^2}{F_{xy}^2} \geq 1 \quad (2.23)$$

Dónde los valores de σ_x , σ_y y τ_{xy} corresponden a los esfuerzos presentes en un punto a evaluar en el laminado y los valores de F_x , F_y y F_{xy} corresponden a los valores de resistencia máxima en el eje x , el eje y y el plano xy . Si los esfuerzos normales son positivos, el valor de resistencia máxima que se debe utilizar es el que corresponde a la resistencia ultima en tensión, por otro lado, si los esfuerzos normales son negativos entonces habrán de utilizarse los valores de resistencia ultima en compresión y el lado derecho de la ecuación (2.23) corresponde al valor de la envolvente de falla.

Capítulo 3: Identificación de los parámetros del proceso

En este capítulo se mencionan algunos procesos por los cuales se pueden procesar los materiales compuestos, con matriz polimérica termoplástica y después se describe el proceso más adecuado para desarrollar en el trabajo de tesis. Posteriormente, se diseña el herramental para la transformación del policarbonato con refuerzo telar, mencionando los cálculos esenciales para poder obtener una lámina de material compuesto.

3.1 Identificación de las condiciones para procesamiento del polímero.

La manufactura por moldeo por compuestos líquidos (LMC). Se apila material de refuerzo, en un molde. El termoplástico es inyectado sobre la preforma, el vacío es útil en la reducción de la porosidad residual, pero se debe aplicar cuidadosamente en algunos sistemas de resina para evitar la volatilización durante la inyección. La succión, es la que proporciona la presión necesaria para dar forma a la pieza. Este proceso está limitado ya que se debe tener una cámara de vacío, y no se conoce si puede ser utilizado con policarbonato, debido a que este puede sufrir degradación por el tiempo de residencia durante el proceso [61].

El método por conformado a prensa se asocia simultáneamente con procesos de deformación en caliente o con procesos de flujo. El moldeo de compuestos por uso de compounds a granel o en inglés Sheet Molding Compound (SMC) la conformación térmica radica en la diferencia de temperatura entre los moldes (unos 150°C y temperatura ambiente). Al colocarla en el molde, la masa de moldeo empieza a calentarse por contacto con la superficie inferior. Por el contacto entre la superficie superior del molde y las hojas pre-impregnadas de material compuesto se inicia la fase de conformación, continuando el incremento de temperatura de la masa de moldeo, que aumenta su fluidez. Sin embargo, la temperatura del molde es una limitante, ya que materiales que tienen punto de fusión bajo, tal como el polipropileno y el polietileno, pueden ser utilizados en ese proceso, aquellos materiales que requieran que el molde se encuentre por encima de 250 °C no pueden ser procesados. El policarbonato requiere de una temperatura entre 290 y 310 °C para poderse procesar [62].

El termoformado es un proceso que consiste en dar forma a una lámina plástica por medio de calor (120 °C a 180 °C) y vacío (600 a 760 mmHg) utilizando un molde o matriz (madera, resina epóxica o aluminio). Un exceso de temperatura puede "fundir" la lámina y la falta de calor o una mala calidad de vacío incurrirán en una pieza defectuosa y sin detalles definidos [63].

A diferencia de otros procesos como la inyección, el soplado y el rotomoldeo, el termoformado parte de una lámina rígida, de espesor uniforme, realizada por el proceso de extrusión, y permite realizar pequeñas producciones por su bajo costo en el tipo de molde, ya que puede realizarse desde madera hasta aceros, llegando a ser rentable en altas

producciones. Sin embargo, se requiere de sistemas adicionales que puedan elevar el termoplástico a temperaturas de 290 a 310 °C, en este proceso solo se pueden conformar una placa de refuerzo y una placa de matriz, en el caso de no utilizar pre impregnados, y no se obtiene una adhesión completa entre refuerzo y matriz [64-70].

Las propiedades mecánicas y dimensionales de una pieza hecha por compresión, como se muestra en la Figura 3.1, dependen del proceso de manufactura de la pieza. El diseño final de la pieza está influenciado por el diseño de la cavidad del molde, colocación del refuerzo, y las condiciones de proceso, como temperatura del compuesto, enfriamiento y calentamiento del molde, velocidad de cierre del molde por mencionar algunas [71].

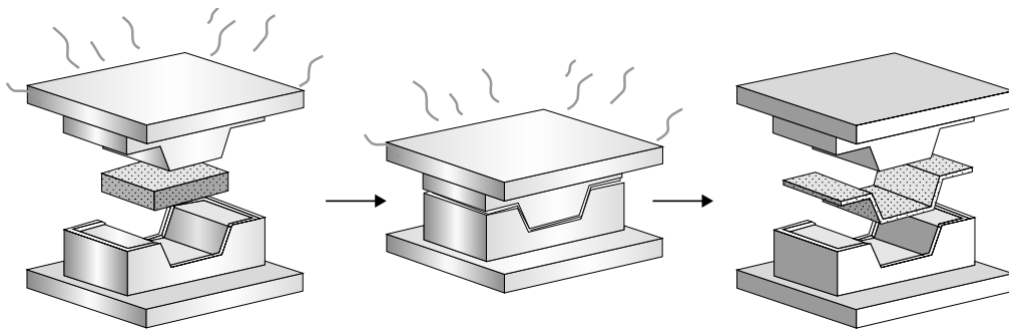


Figura 3.1 Diagrama del proceso de compresión.

La orientación del refuerzo y el flujo del termoplástico, están directamente relacionados en el modo en que se llenara el molde. En este capítulo se describe como fluye el termoplástico dentro del molde durante la compresión.

Antes de llenar el molde, se deben de considerar varios aspectos para preparar el material. Aquí interviene la forma en que se corta la fibra, colocación y peso del refuerzo. Esto se hace principalmente a mano, sin embargo, de forma industrial se utilizan robots para reducir el tiempo de ciclo.

El proceso de moldeo por inyección-compresión, Figura 3.2, es una extensión del moldeo por inyección convencional. Después de introducir una cantidad preestablecida de polímero en una cavidad abierta, se comprime. La compresión también puede tener lugar cuando se va a inyectar el polímero. La principal ventaja de este proceso es la capacidad de producir piezas dimensionalmente estables, relativamente libres de esfuerzos residuales, que, al enfriarse la pieza, puedan crear alabeos o deformaciones que comúnmente se le conoce como “warping” en inglés, en una máquina de inyección con menor capacidad de fuerza de cierre (típicamente de 20 a 50% menor a la capacidad de cierre de una máquina de inyección.) [72].



Figura 3.2. Proceso de moldeo por inyección-compresión.



El utilizar el método de inyección - compresión reduce el error humano y la variación de la pieza. Este proceso involucra 2 distintas fases, obtención del compuesto y después el llenado del compuesto. En la primera etapa se calienta el material previamente a ser comprimido, cuando se comprimen termoplásticos. La etapa de llenado se lleva a cabo cuando la parte superior del molde hace contacto con la parte inferior del molde. Una vez que hace contacto la presión de la platina o placa superior de la máquina, comienza a ejercer presión sobre ambos materiales (matriz y refuerzo) para crear la unión entre ambos materiales. Esta fase termina cuando la parte superior deja de hacer contacto con la parte inferior en cierto tiempo. Esta etapa ocurre cuando la pieza pierde cantidad de calor y la pieza se considera fría [73] y estable dimensionalmente para soportar las cargas originadas por la extracción del molde.

Cuando se procesan termoplásticos, la temperatura del molde debe encontrarse en la temperatura de plastificación del polímero. Por lo que el molde debe tener resistencias para alcanzar esta temperatura, sin embargo, también debe de contener líneas de enfriamiento para reducir el tiempo de enfriamiento de la pieza. Esto debido a que los termoplásticos se tienden a degradar si el tiempo de residencia es elevado, también se ve afectado si la temperatura del molde es superior al rango de proceso del material [74,75].

En el proceso de moldeo por inyección de inserto de película o Film Injection Molding (FIM), Figura 3.3, el polímero que se encuentra en temperatura de proceso se inyecta en la cavidad del molde donde una parte del molde, normalmente la parte inferior está aislada con una película pre adherida. El FIM es una técnica rentable que elimina diversos procedimientos de post procesamiento (serigrafía, pintura en aerosol, laminados, etc.) y mejora la calidad de la superficie y la durabilidad. Muchos productos, tales como partes interiores de automóviles, carcasas de teléfonos celulares, diseños de logotipos en productos de plástico se producen utilizando el método FIM [76,77]. La adhesión entre la película y el sustrato puede mejorarse utilizando este proceso, ya que la resina fundida caliente inyectada puede adherirse parcialmente a la película [78].

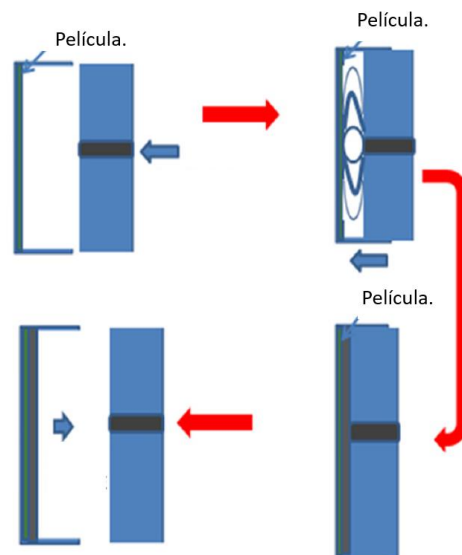


Figura 3.3. Film Injection Molding.

La presión producida en este proceso es más uniforme que la presión en inyección convencional, a lo largo de la pared de la cavidad y más baja durante la etapa posterior al llenado, por lo tanto, produce menos esfuerzos residuales y cortantes, y menos alabeo de las piezas, que en el proceso de inyección convencional. [79,80]

Un aspecto clave de esta investigación es la introducción de fibra de vidrio tejida como refuerzo para un polímero termoplástico con orientaciones de fibra a $0/90^\circ$ y $\pm 45^\circ$, manteniendo las características principales del moldeo por inyección de película, combinado con el moldeo por inyección de película y garantizando una desalineación mínima de la fibra y la degradación del policarbonato durante el proceso de fabricación. Figura 3.4

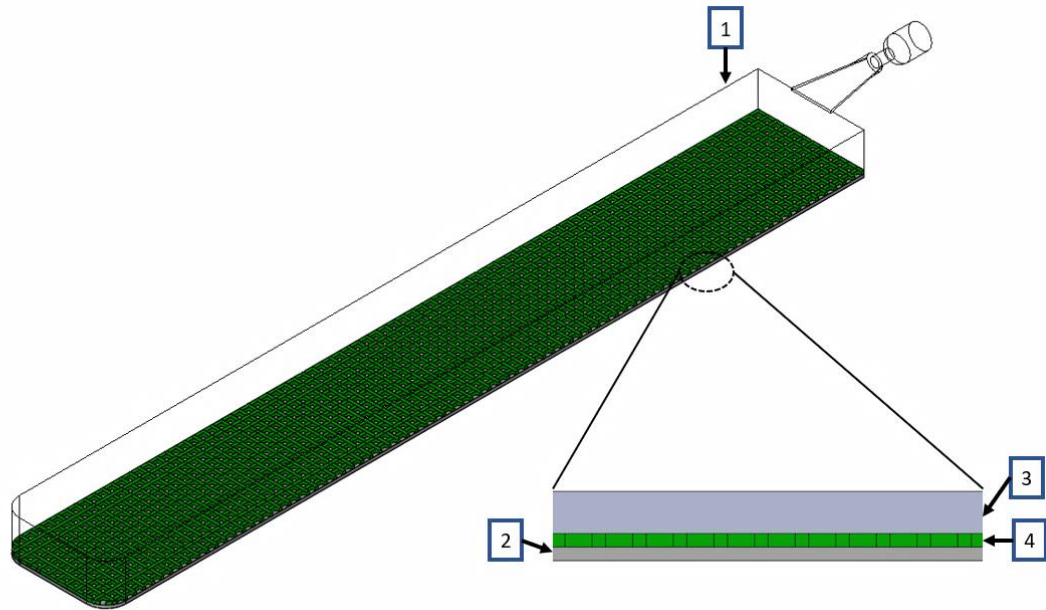


Figura 3.4: Componentes de FIM y compresión. (1) Espécimen de 250 x 35 mm. (2) Película de policarbonato. (3) Policarbonato inyectado. (4) Fibra de vidrio tejida orientada ($90/0^\circ, \pm 45^\circ$).

El método que se propuso para llevar a cabo el estudio se muestra en la Figura 3.5 donde muestra las secuencias de la FIM y el proceso de compresión. Posteriormente se muestra a detalle los componentes del molde.

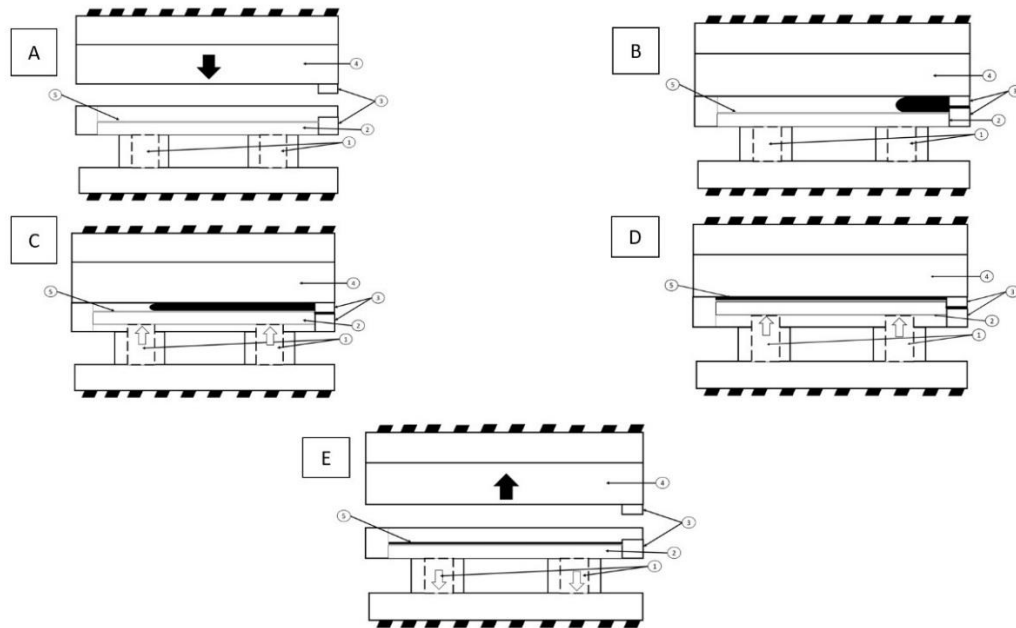


Figura 3.5: Secuencias de FIM y compresión. (A) Inserción de película y tela de fibra de vidrio en el molde; (B) Cierre del molde que deja una abertura para que el policarbonato se llene; (C) Los cilindros hidráulicos comienzan a comprimir el policarbonato; la compuerta se cierra; (D) Compresión y empaque; (E) El molde se abre, el espécimen se libera.

3.2 Diseño del herramental para fabricación

De acuerdo con la NORMA ASTM D3039 [81] para probetas de material compuesto, la probeta debe medir 25 x 250 mm. Para el desarrollo del trabajo se diseñó un molde para que se pudiera obtener una placa con dimensiones de 35 x 250 mm, que posteriormente fuera cortada para obtener las dimensiones normalizadas.

Para obtener las placas (probetas) con esas dimensiones, se contó con una maquina inyectora Battenfeld 350, cuya interfaz tiene las dimensiones mostradas en la Fig. 3.6:

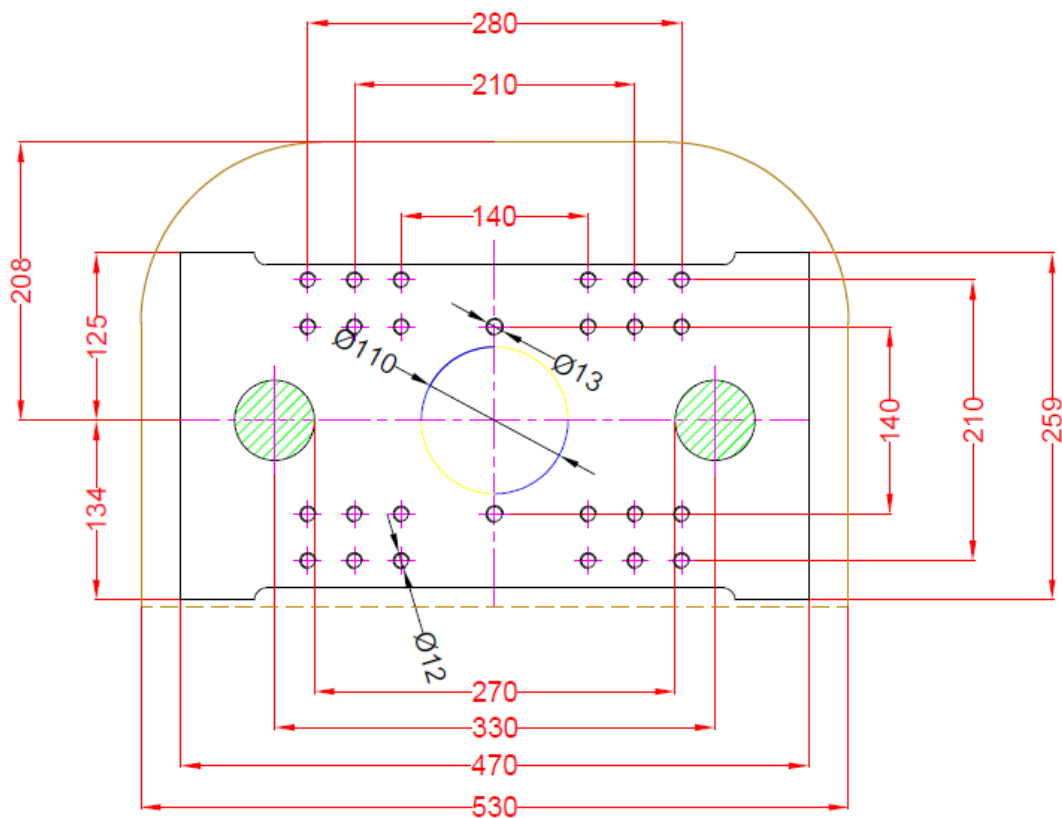


Figura. 3.6: Dimensiones en milímetros de las platinas de una maquina Battenfeld plus 350/075.

La capacidad de fuerza de cierre de esta máquina es de 350 kN, con una capacidad máxima de inyección de 38 cm³. Con una dimensión máxima de molde de 250 mm para evitar interferencia con las barras de las platinas. Para el desarrollo, en la Figura (3.7) se muestran las etapas durante el proceso de inyección y compresión.

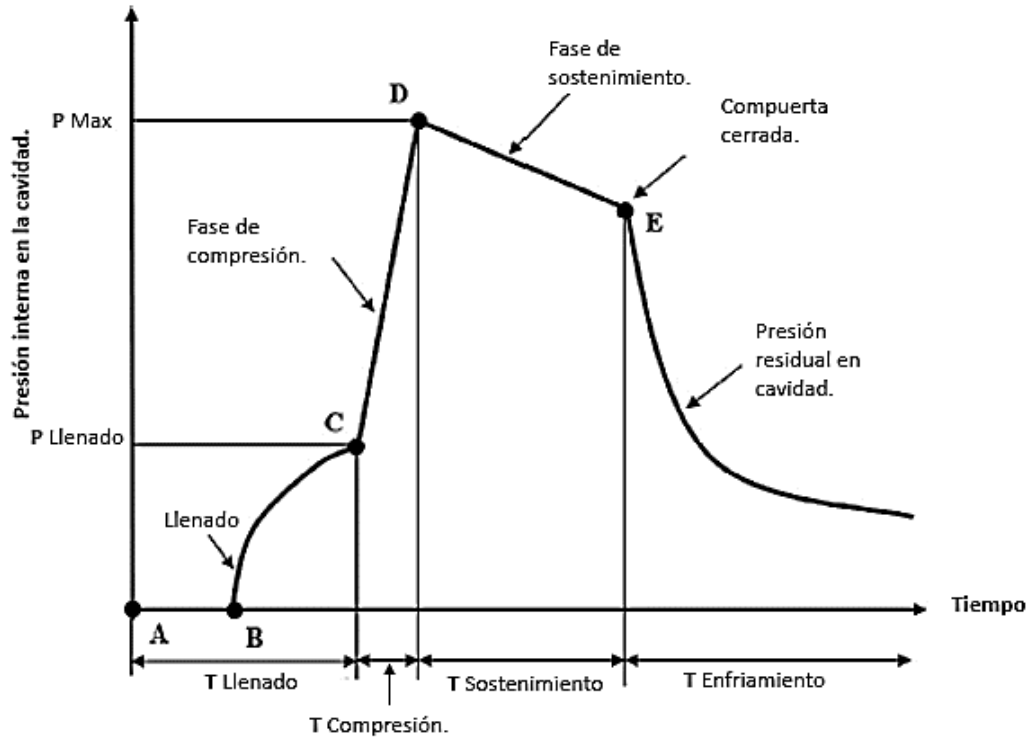


Figura 3.7: Perfil de presión interna en cavidad [82].

La distancia del punto A al punto C representa la etapa de llenado, en la que el polímero fundido entra en la cavidad del molde, mostrando un aumento en la presión interna de la cavidad de forma gradual. La fase de llenado concluye en el punto C, donde todo el volumen de la cavidad está lleno, pero sin ser comprimida. La etapa de compresión comienza en el punto C y se prolonga hasta el punto D, en este último punto se muestra la máxima presión interna P_{max} , esta presión es la que definirá la fuerza de cierre requerida. El tiempo desde el punto C al D es el tiempo en el cual el incremento de presión es positivo sobre las cavidades, hasta el punto donde la compuerta se enfría por completo y posteriormente la pieza se enfría, reduciendo la presión interna en la cavidad del herramental.

3.2.1 Simulación.

La simulación de moldeo por inyección implica el uso de una computadora para resolver un conjunto de ecuaciones y sus condiciones de contorno asociadas, que constituyen un modelo matemático del proceso de moldeo. En términos generales, las simulaciones de hoy conducen a una gran cantidad de datos calculados que se muestran con frecuencia como diagramas de color de una determinada variable de interés, como patrones de llenado, distribuciones de presión, contracciones, alabeo del componente o esfuerzos causados al llenado. [83]

El moldeo por inyección es un proceso complejo, se requiere lidiar con el comportamiento de un fluido compresible no newtoniano, temperatura variable y cambio de fase. Para la

simulación, se necesitan conocer algunas propiedades del material. Estas propiedades del material cambian durante el proceso. Por lo tanto, la determinación de las propiedades del material no es sencillo. Las pruebas de laboratorio para medir las propiedades de flujo se realizan con frecuencia en condiciones que son muy diferentes a las encontradas durante el proceso de inyección. El uso de estos datos en la simulación conduce a errores comunes, que no son identificados hasta después de la inyección real [83].

Las propiedades del material requeridas para simular el moldeo por inyección dependen de la simulación que se llevará a cabo. Para análisis de flujo (llenado, empaquetamiento y enfriamiento) se requiere conocer la viscosidad μ , capacidad térmica del material c , conductividad térmica k , la temperatura de transición vítrea T_g y los valores P , V y T (presión, volumen y temperatura).

Para realizar una simulación se deben conocer las ecuaciones que gobiernan al proceso de inyección. Estas ecuaciones son aplicables al flujo de un polímero en estado fundido y se obtienen utilizando los principios de conservación de masa, momento (cantidad de movimiento) y energía.

3.2.2 Condiciones de frontera.

Existen condiciones de frontera que son específicas para el moldeo por inyección y se aplican tanto a las ecuaciones de conservación general como a las ecuaciones simplificadas. Basados en la Figura 3.8, donde Σ_{inj} es la superficie por donde el flujo entra a la cavidad, Σ_{em} el borde del molde, ΣW^+ superficie superior del molde, ΣW^- superficie inferior del molde y Σm^f es la superficie que define el frente del flujo. Dependiendo de la geometría del molde y del número de cavidades pueden existir varios de estos.

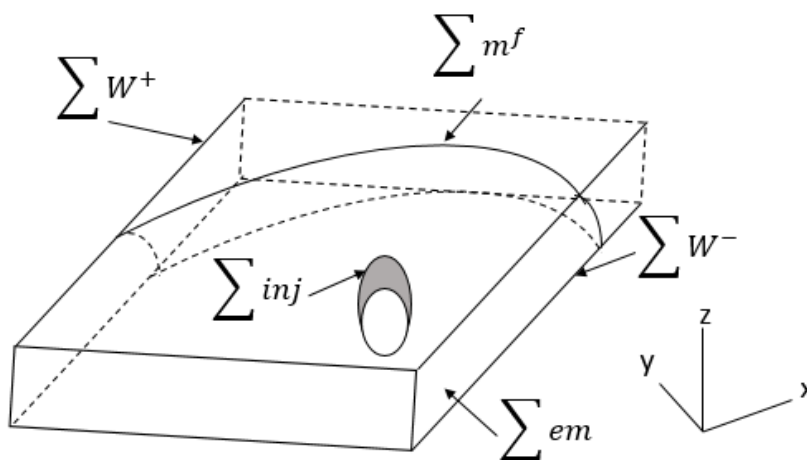


Figura 3.8: Condiciones de frontera para simulación de inyección.

Para problemas generales de flujo, las condiciones de frontera en una superficie generalmente se dan en términos de fuerzas de tracción o velocidades, o una combinación de ambas. Las condiciones de contorno relacionadas con la presión se encuentran en cualquier límite impermeable, el gradiente de presión en la dirección normal al flujo es cero. Los límites impermeables son los bordes del molde, las paredes del molde y cualquier inserción de molde. Por lo tanto:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \text{ en } \Sigma_{em}, \Sigma_{W+}, \Sigma_{W-} \quad (3.1)$$

Esto se refiere a que físicamente, el flujo no puede pasar por las paredes del molde o insertos que este lleve. La velocidad de flujo de fusión q , o la presión p , se especifica en la superficie donde la masa fundida entra en la cavidad como se muestra en la ecuación 3.2. Es decir

$$q = q_{inj} \text{ en } \Sigma_{mf} \quad (3.2)$$

El software de análisis de flujo usualmente usa un índice de flujo específico en la fase de llenado. Esto se obtiene dividiendo el volumen de la cavidad que se va a llenar por el tiempo de llenado especificado por el usuario. Las condiciones de frontera de la fase de empaque generalmente especifican una o varias presiones en los puntos de inyección. En el software básico, esto puede ser constante. Sin embargo, para garantizar una densidad del material más uniforme, la presión puede variar.

Suponiendo que la presión en el frente del flujo del material fundido que avanza en el interior del molde corresponde a la presión atmosférica, la presión es cero en el frente de fusión. Es decir

$$P = 0 \text{ en } \Sigma_{mf} \quad (3.3)$$

Si bien esta es una suposición razonable, dado que la mayoría de los moldes se ventilan principalmente en la parte final de llenado, para permitir que escape el aire, existen algunos procesos que pueden requerir que se cambie.

Las condiciones de frontera relacionadas con la temperatura son: el perfil de temperatura a través del volumen de la cavidad, $T(z)$, se entiende para la superficie a través de la cual se inyecta la masa fundida. Esto es:

$$T(z) = T_{inj}(z) \quad (3.4)$$

Donde $T_{inj}(z)$ es la temperatura de inyección, la mayoría de los softwares de análisis de flujo asume que la temperatura es uniforme en los puntos de inyección, en la práctica, esto no es así, ya que la masa fundida se transporta rápidamente a la cavidad. Un área donde esto puede ser crítico ocurre cuando un canal de inyección se usa para transportar polímero en varias cavidades. Debido al calentamiento por cizallamiento en el canal y a la temperatura de fusión alrededor de las esquinas, es posible que se produzcan diferencias de viscosidad en las compuertas de las diversas cavidades y, por lo tanto, que exista una variación en el llenado.

A pesar de la simplificación de las ecuaciones que gobiernan el fenómeno, continuidad (Ec.3.5), momento (Ec. 3.6), energía (Ec. 3.7) las ecuaciones resultantes requieren de un enfoque numérico para su solución. Los métodos numéricos que se emplean pueden ser por medio de diferencias finitas, o por elementos finitos que se resuelven para obtener aproximaciones al fenómeno real. Debe tenerse en cuenta que los métodos numéricos empleados en productos comerciales están relacionados con la capacidad de procesamiento.

Ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (3.5)$$

Donde ρ es la densidad, t es el tiempo y v es el vector de velocidad.

Ecuación de momento.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \rho g + \nabla \cdot \tau \quad (3.6)$$

Donde g es la gravedad y τ es el esfuerzo cortante (Shear stress).

Ecuación de energía.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) + \nabla \cdot (\rho C_p v T - k \nabla T) = \eta \dot{\gamma}^2 + \Delta H \quad (3.7)$$

Donde T es el perfil de temperatura, C_p es la capacidad calorífica, k es el coeficiente de conductividad térmica, η es la viscosidad del fluido, $\dot{\gamma}$ representa el rango en cual el polímero no se degrada por el esfuerzo cortante y ΔH es la cantidad de energía generada.

Un software para uso en simulaciones de polímeros debe evaluarse por su precisión, la complejidad para crear el modelo geométrico, la capacidad de obtener datos de los materiales relevantes y los recursos computacionales para poder implementar el método numérico.

El modelo de viscosidad de cross-WLF se aplicó para describir el comportamiento reológico:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{t^*}\right)^{1-n}} \quad (3.8)$$

Donde:

$$\eta_0 = D_1 \exp \left\{ -\frac{A_1 [T - (D_2 + D_3 p)]}{A_2 + D_3 p + [T - (D_2 + D_3 p)]} \right\} \quad (3.9)$$

Donde n , t^* , D_1 , D_2 , D_3 , A_1 , y A_2 son coeficientes establecidos y obtenidos en la reología de polímero, η , $\dot{\gamma}$, T , y p son la viscosidad, velocidad cortante, temperatura y presión del fluido.

La ley de Darcy se considera para la etapa de compresión, aunque no sea preforma. En este estudio, la simulación se basa en las ecuaciones que rigen sin tener en cuenta el

término de dispersión. Una ecuación de balance de energía simplificada, que esta hace referencia a la ecuación (3.7), donde Ω es la porosidad de la fibra y se puede expresar como:

$$\rho C_P \frac{dT}{dt} + \rho_r C_{pr} \vec{v} * \vec{\Delta} T = k \nabla^2 T + \Omega \Delta H \dot{m} \quad (3.10)$$

Se decidió utilizar el software Moldflow Synergy, debido a los conocimientos adquiridos en años previos y experiencia trabajando con ese software, para la modificación y determinación de malla.

3.2.1 Fuerza de cierre requerida.

Una de las primeras limitaciones es identificar si la capacidad de la máquina es adecuada para la fabricación de la placa que se requiere. Para esto se debe determinar la fuerza de cierre que opone la maquina inyectora durante la inyección del polímero. Esta fuerza de cierre es de gran importancia, especialmente cuando se requiere de una prensa.

La fuerza de cierre es la fuerza que debe oponer la máquina a la presión que ejerce el material sobre el herramental, esta fuerza evita que se dañe el herramental o que se abra, provocando exceso de material en los bordes de la placa y mala compactación. Esta fuerza restringe: el tamaño de molde, altura de molde, apertura de molde, método de sujeción a la máquina, si el herramental cuenta con sistemas de calefacción o de refrigeración, se debe saber por dónde se harán las conexiones. En la Figura 3.9 se muestra el tamaño de placa que se requiere para posteriormente obtener las medidas de acuerdo con la norma ASTM 3039 [82].

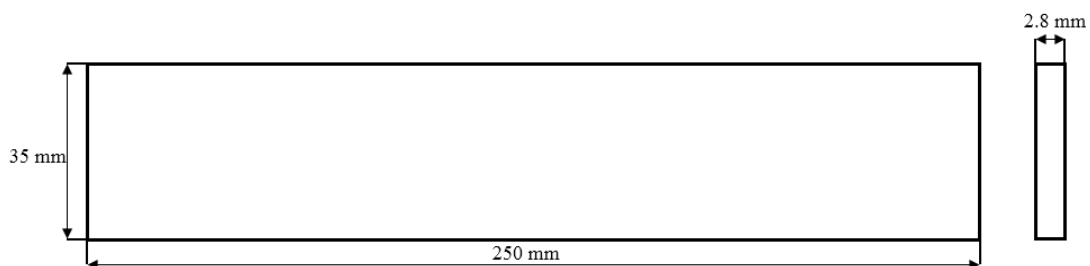


Figura 3.9: Dimensiones de placas para herramental.

La fuerza de cierre máxima típicamente ocurre al final de la fase de llenado, cuando la presión de llenado está en su valor máximo, o al inicio de la fase de empaquetamiento, cuando toda la cavidad del molde se presuriza a la presión de empaquetamiento.

Como la presión de empaquetamiento depende del proceso de moldeo y de la contracción deseada, el valor exacto de la presión de empaquetamiento no se conoce hasta que el molde se haya fabricado y operado. Por esta razón, un enfoque conservador es suponer que la presión de llenado se ejercerá en todas partes en la cavidad con un valor aproximado de 100 MPa [84,85]. La fuerza de cierre no es sencilla de predecir, por lo que en muchos casos se realizan simulaciones numéricas, que consideren el enfriamiento del

polímero durante la fase de llenado y la variación de las presiones causadas por ese efecto [85]. Sin embargo, pocas herramientas o software pueden predecir el flujo inducido para este proceso especial, debido a la falta de fundamentos teóricos [86]. Para caracterizar completamente el comportamiento del flujo en una cavidad de molde no uniforme o compleja, se debe utilizar un cálculo tridimensional (3D), incluso si implica una gran cantidad de cálculos.

Para determinar la fuerza de cierre, se realizó un análisis 3D por elementos finitos. Como mencionó W.Cao et.al [86], hay poca información para respaldar el proceso de inyección y compresión de manera analítica, por lo que no se dispone de la información necesaria para realizar un análisis con FIM, con fibra de vidrio tejida, por eso el método fue realizado por elemento finito y luego compararlo con resultados experimentales. Este modelo fue realizado con el software de elementos finitos Moldflow Synergy, como se menciona anteriormente.

3.3 Modelado.

Para realizar el análisis numérico, se debe obtener una geometría 3D, la cual es mallada para aplicarle condiciones iniciales y de frontera la obtención aproximada de resultados. En la Figura.3.10 se muestran las dimensiones de la placa, junto con las dimensiones de la compuerta de inyección y la parte final de la boquilla de máquina inyectora. En la Figura 3.11 se muestra una vista a detalle de la compuerta del polímero y de la boquilla de máquina inyectora.

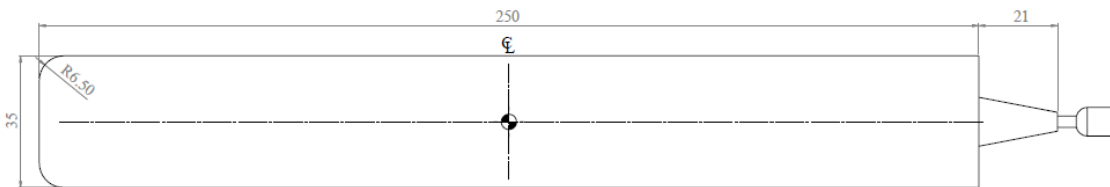


Figura 3.10: Medidas generales de la placa para simulación.

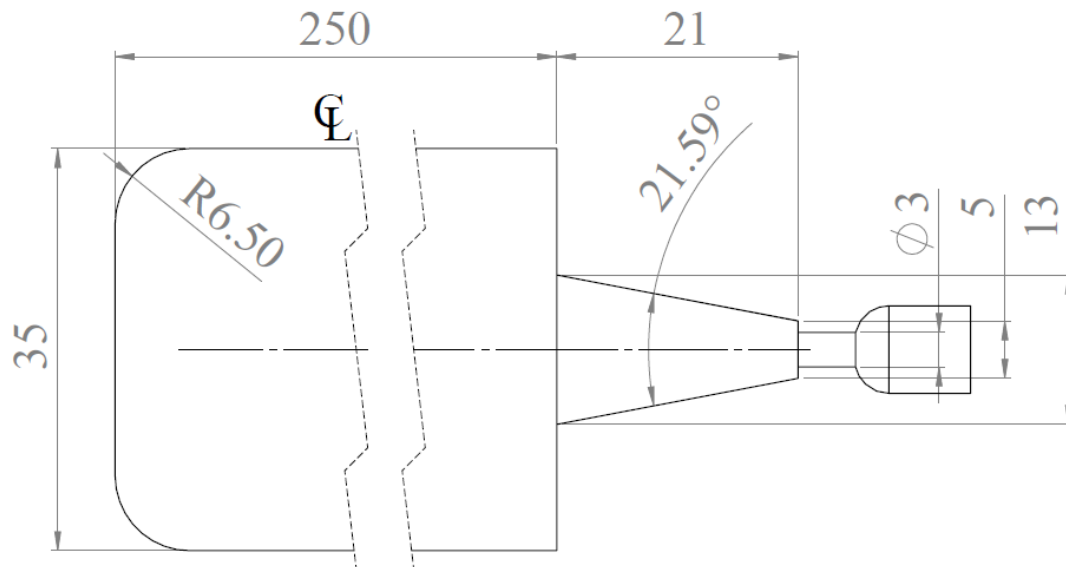


Figura 3.11: Medidas generales de la compuerta de inyección.

El modelo 3D se simula sin considerar el espesor de la película con fibra de vidrio tejida, porque se considera que la presión y el flujo del polímero se encuentran inicialmente en la parte superior de la fibra, y el volumen de la cavidad se considera, a partir de la fibra de vidrio, al lado de la cavidad y con un espesor de 1,6 mm. Se considera que el resultado agrega el espesor de la película y la fibra de vidrio tejida.

Como primer punto, se determinó el análisis, que es un análisis de inyección-compresión. La ubicación de la inyección estaba en la parte inicial de la pieza, de modo que la malla se hizo desde ese nodo ($x=-141$, $y=0$, $z=0$). El tipo de malla es diferente en la boquilla, porque se determinó que esta parte se considera un canal caliente y luego se hizo un refinamiento en la compuerta para analizar cómo el frente de flujo puede afectar la orientación de la fibra de vidrio tejida causada por el flujo, degradación del polímero, cortante (tensión creada entre las capas del flujo del polímero que se rozan entre sí) como se muestra en la Figura 3.12

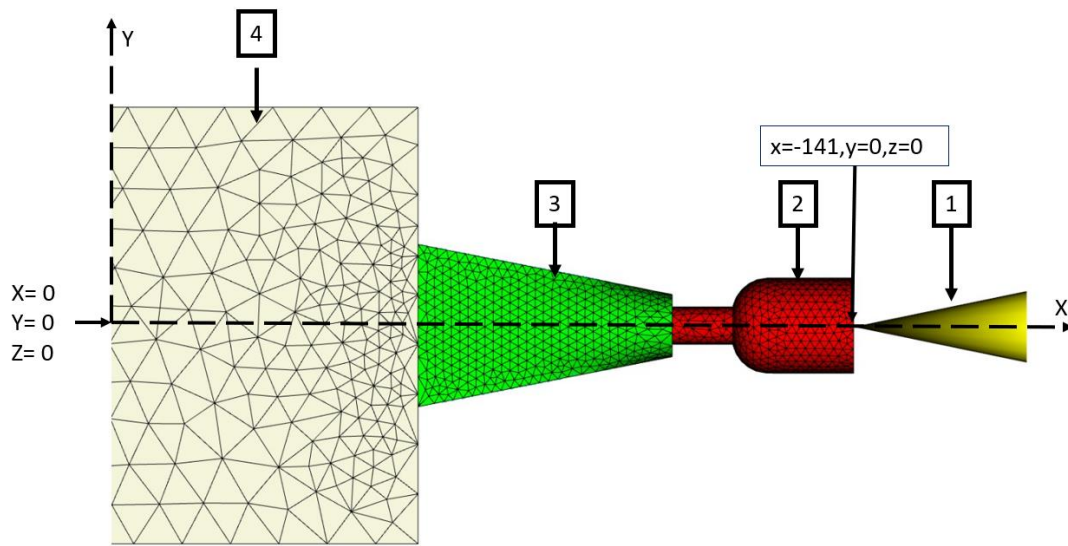


Figura 3.12: Vista en sección del tipo de malla utilizada para inyección, moldeo por compresión. (1) Punto de inyección (2) Canal caliente, (3) Compuerta en abanico, (4) Parte de la muestra.

Para el flujo del polímero, se utiliza una compuerta en abanico para reducir la velocidad de la masa fundida cuando ingresa al corazón del molde, esto produce un flujo más lento, una mejor orientación de la masa fundida y una mejor inyección, al permitir el ingreso del material sin acelerar el flujo a la cavidad lo que afecta el resultado de las propiedades mecánicas de la muestra [43].

La Tabla3.1 muestra las condiciones iniciales y la Tabla3.2 muestra los valores de malla de la pieza una vez que se reparó la malla 2D y luego se realizó la malla 3D. En el caso de los softwares de simulación de inyección de plástico, se tienen 3 tipos de mallas únicamente, 1D conocidas como mallas tipo viga, que esta malla solo es utilizada en los canales de refrigeración de la pieza. La malla 2.5D, la cual crea una malla únicamente en la parte superior de la pieza, esta malla es utilizada para análisis de llenado rápido ya que no es conveniente para modelos donde se requiere el análisis de compactación o de mejor análisis de llenado. La malla 3D tetragonal, es usada para piezas en donde se requiere el análisis de inyección y compactación, así como las deformaciones causadas por diferencia de temperatura (alabeos). La malla 3D tetragonal es única que puede simular el comportamiento reológico del material durante el proceso de inyección. Por último, en la Tabla3.3 se muestran los valores de llenado, compactación.

Tabla 3.1: Condiciones iniciales.	
Volumen total	22.6316 cm ³
Material	PC (Makrolon 2407 Covestro)
Volumen inicial.	0.4557 cm ³
Volumen por llenar.	22.1758 cm ³
Volumen de compuerta y colada caliente.	0.3483 cm ³
Temperatura de inyección.	320 °C
Temperatura de molde.	110 °C
Volumen de compuerta en abanico.	0.34 cm ³
Tiempo de inyección.	1.6 s.
Área proyectada.	89.20 cm ²

Tabla 3.2: Valores de malla.	
Tipo de elemento.	3D Tetragonal
Capas (número de veces que se divide el espesor de la pieza).	8
Nodos	21290
Punto de inyección.	1 (x=-140, y=1, z=0)
Nodos en punto de inyección.	1 (n° 39,174)
Número de elementos.	105,651
Elementos tetragonales en pieza.	95,125
Elementos en el canal de inyección.	10,526

Tiempo de enfriamiento.	20 s.
Dirección de compactación.	+Z.
Carrera de pistones.	10 mm.
Tiempo de compactación.	15 s.
Fuerza de compactación.	10.0 Toneladas.
Presión de inyección.	14.9742 MPa.
Máxima fuerza de cierre.	10.5836 Toneladas.
Punto de cambio.	1.8529 s.
Presión en el punto de cambio.	20.0394 MPa.

Los detalles del diseño del molde se muestran en la Figura 3.13. La parte macho consiste en una pequeña cavidad para sujetar el inserto de película durante el proceso de inyección, sin mecanismo de fijación para el inserto de película, el espacio entre la parte macho y la parte hembra permite que el policarbonato fundido continúe fluyendo durante la etapa de compresión, y al espécimen liberado sin pines expulsores. Para la compresión, se utilizaron dos cilindros hidráulicos simples. La parte hembra consta de una superficie recta para evitar rebaba en la muestra durante la etapa de compresión. Se empleó una resistencia térmica de cartuchos dentro de la parte hembra, para mantener la temperatura del polímero en 110 °C, esto permite que la masa fundida tenga la viscosidad más baja sin degradación de la temperatura cuando llega a la cavidad y permite que el polímero fluya durante la etapa de compresión. La temperatura del molde se controló con un sistema periférico de enfriamiento de agua, para evitar el intercambio de calor directo entre el molde y la máquina de inyección.

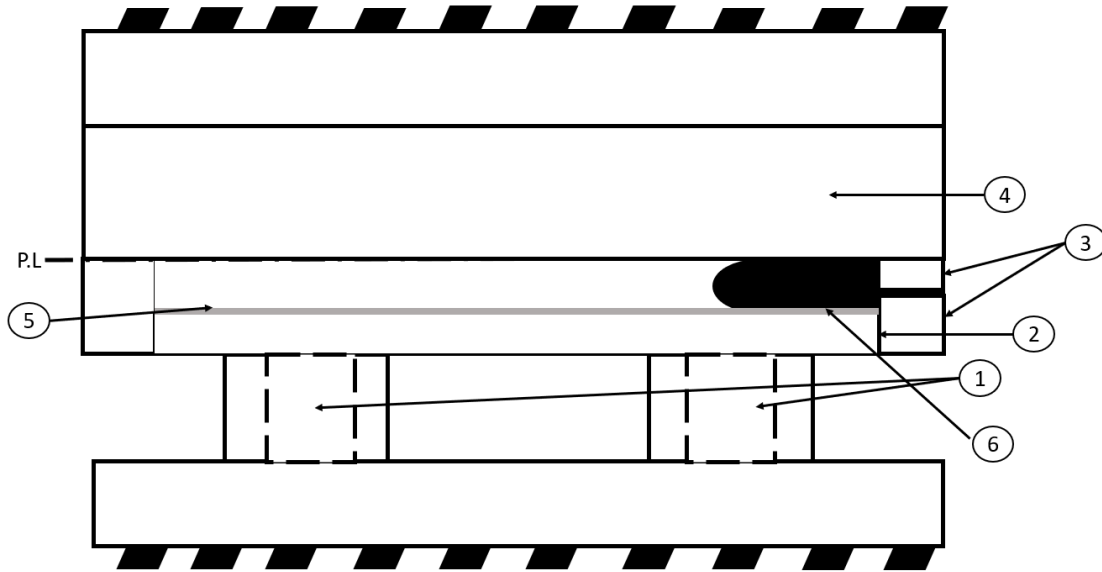


Figura 3.13: Diseño de molde (1) Cilindros hidráulicos de 5 toneladas, (2) Parte macho que comprime la película y policarbonato, (3) Compuerta, (4) Parte hembra (110 °C), (5) Inserto de película con tejido fibra de vidrio, (6) policarbonato.

3.4 Resultados.

Una forma de confirmar la correcta impregnación de las fibras de refuerzo es mediante la realización de pruebas mecánicas. Una impregnación exitosa debería traer una mejora en las propiedades mecánicas, mientras que lo contrario no mostrará cambios o incluso una disminución de las propiedades mecánicas debido a los huecos y la baja unión de las fibras a la matriz [87].

En esta sección, se muestran los resultados de la simulación numérica para determinar si la máquina de inyección y los pistones permanecen dentro del rango de operación requerido para obtener la placa de policarbonato reforzado con fibra de vidrio. Por medio de simulaciones, la orientación de las fibras cortas (1-1.5 mm) se ha obtenido, sin embargo, para materiales ortotrópicos como los de fibra de vidrio tejida, se ha determinado la deformación, pero no la orientación de las fibras [88].

Como referencia del proceso, la Figura 3.14 muestra el tiempo de llenado de la probeta en los tiempos 0.47 s, 0.94 s, 1.42, 1.89 s, 2.36 s y 2.84 segundos.

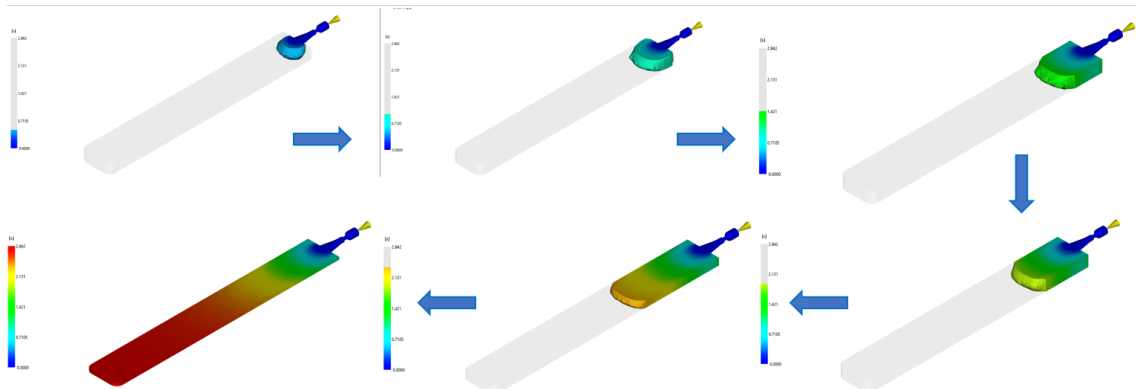


Figura 3.14: Tiempo de llenado de la pieza en 16%,32%,48%,64%, 80% y 100 %.

En la Figura 3.15, se muestra el volumen de la cavidad con respecto al tiempo, esta grafica considera el volumen inicial sin el termoplástico, posteriormente la gráfica va cambiando como el polímero fundido ingresa a la cavidad, hasta el punto donde se realiza la compresión por medio de los actuadores neumáticos.

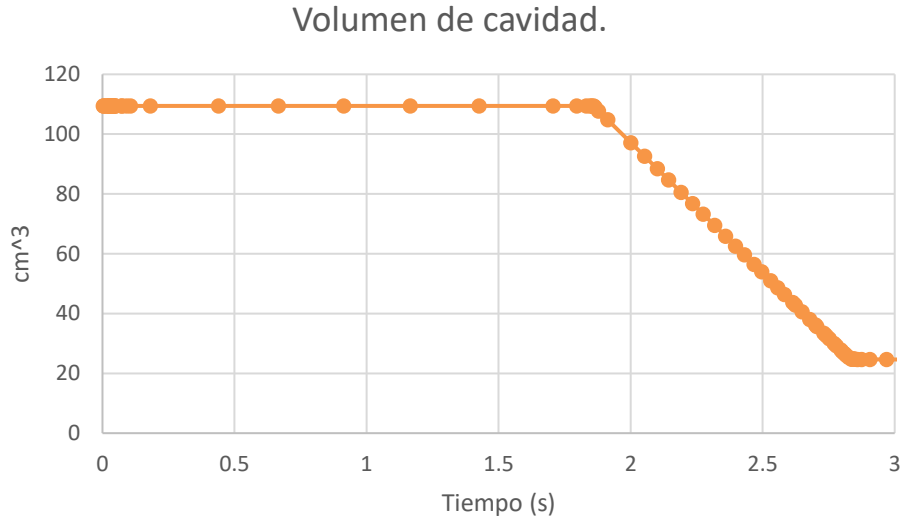


Figura 3.15: Volumen de la cavidad durante el llenado y compactación del termoplástico.

Por otra parte, la Figura 3.16, muestra el porcentaje del volumen de la cavidad con respecto al tiempo. Esta grafica hace referencia a la Figura 3.11.

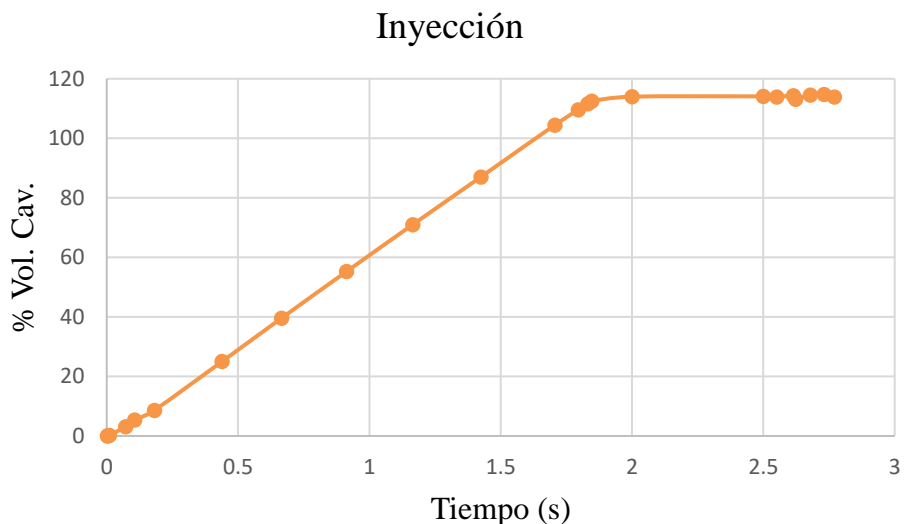


Figura 3.16. Porcentaje del volumen de la cavidad.

La Figura 3.17 muestra la presión en el lugar de la inyección, donde se aprecia que durante la fase de inyección la presión máxima alcanzada es de 20 MPa, luego la presión disminuye momentáneamente, apreciando el gráfico de la presión ejercida por los pistones neumáticos. En 1.6 segundos, la presión en el punto de inyección aumenta nuevamente hasta aproximadamente 15 MPa durante la etapa de compresión porque parte

del flujo se dirige de manera inversa al flujo de inyección, lo que nos lleva a considerar que la muestra tendrá una mayor variación de espesor en las áreas cercanas al punto de inyección. La fuerza máxima presión se obtiene en 1.6 segundos y es de 12.19 toneladas porque esta fuerza de cierre es la que se opone a la fuerza ejercida durante la compresión.

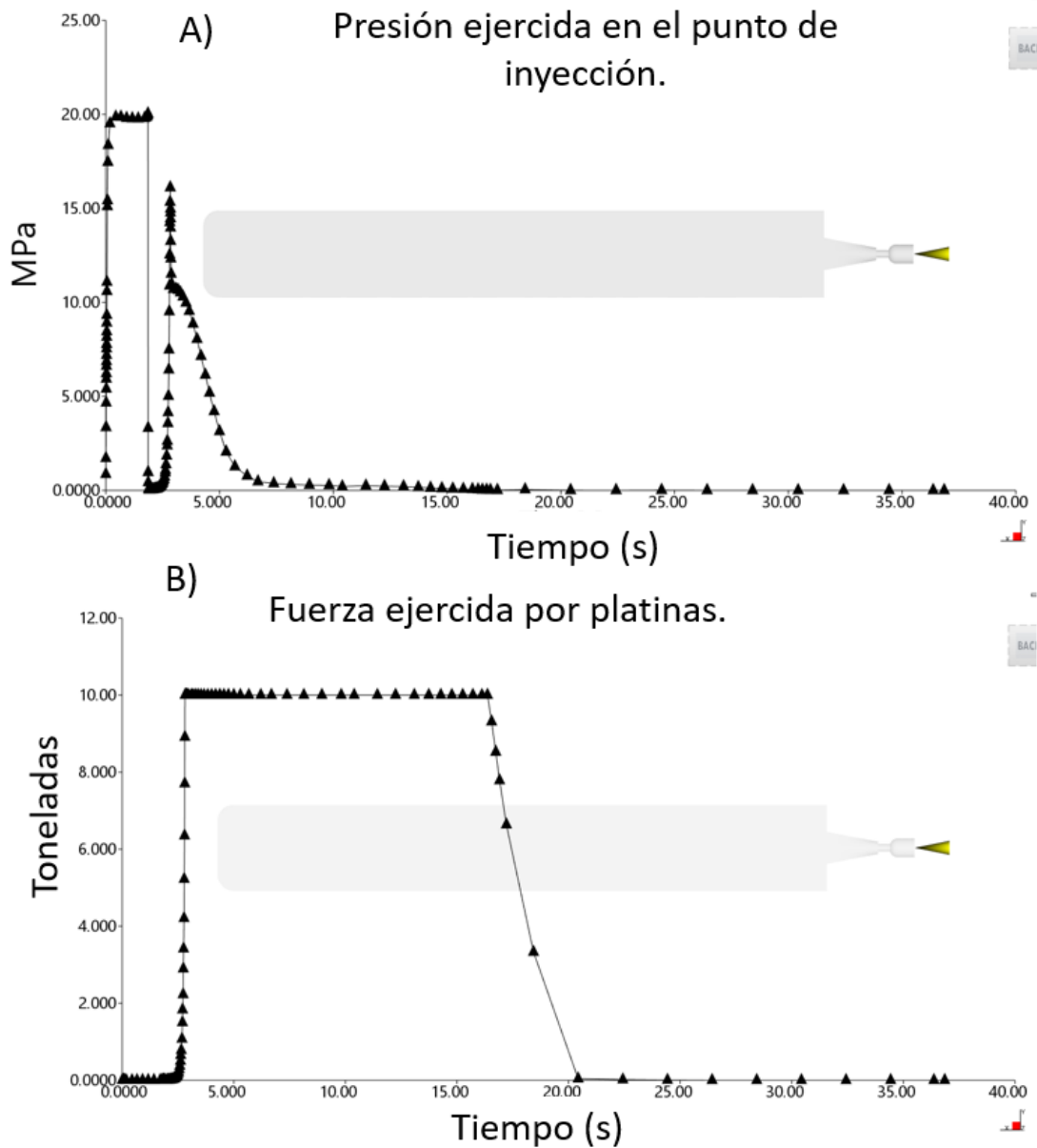


Figura 3.17: Gráficos de presión durante el proceso de inyección-compresión A) Presión en el lugar de la inyección: Trazado XY, B) Fuerza de cierre.

La velocidad de compactación de los actuadores neumáticos se muestra en la Figura 3.18, donde se observa que la velocidad es de 10 mm/s en un instante, posteriormente en la Figura 3.19, se observa el desplazamiento de los actuadores neumáticos en el tiempo 1.6 segundos de 10 mm, que posteriormente se mantienen en esa posición hasta que se concluye el ciclo de enfriamiento.

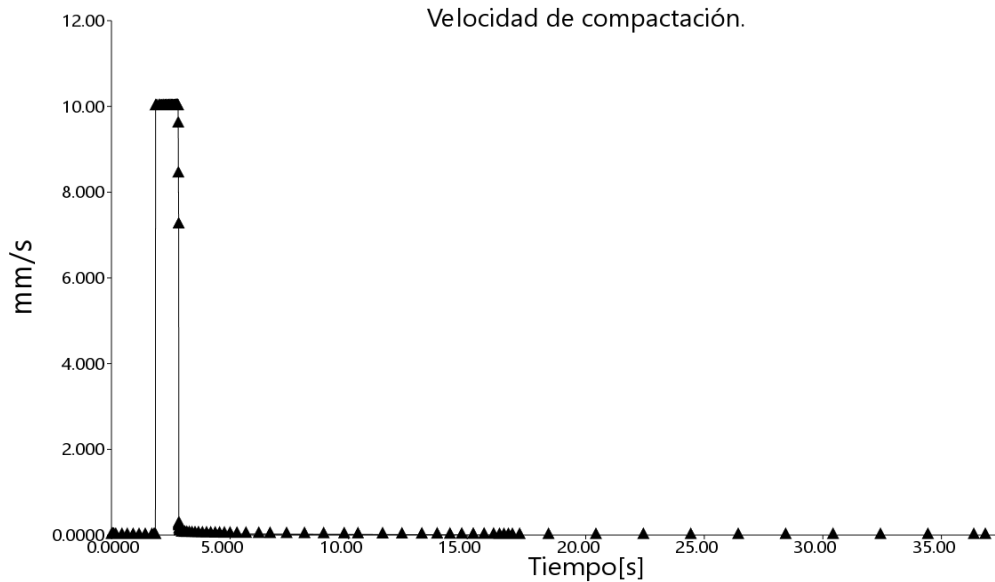


Figura 3.18: Velocidad de compactación.

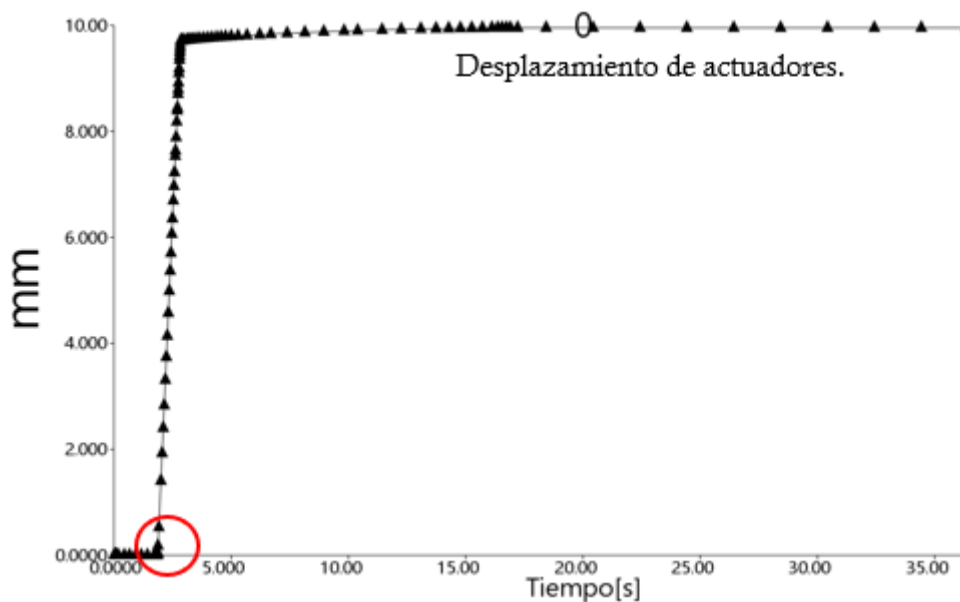


Figura 3.19 Desplazamiento de actuadores neumáticos.

La presión ejercida en el punto de inyección se puede observar de manera más grafica e ilustrativa en la Figura 3.20, donde se observa el perfil de llenado de 25%, 50%, 75% y 100% del ciclo de llenado y compactación. En la figura 3.18 se aprecia que al final del ciclo las flechas de llenado tienden a cambiar de dirección debido a la presión ejercida por los pistones, sin embargo, no se salen del molde debido a que el punto de inyección ya se encuentra frio y evita la fuga del material, pero haciendo que el espesor de la pieza en esa zona sea mayor al resto de toda la pieza.

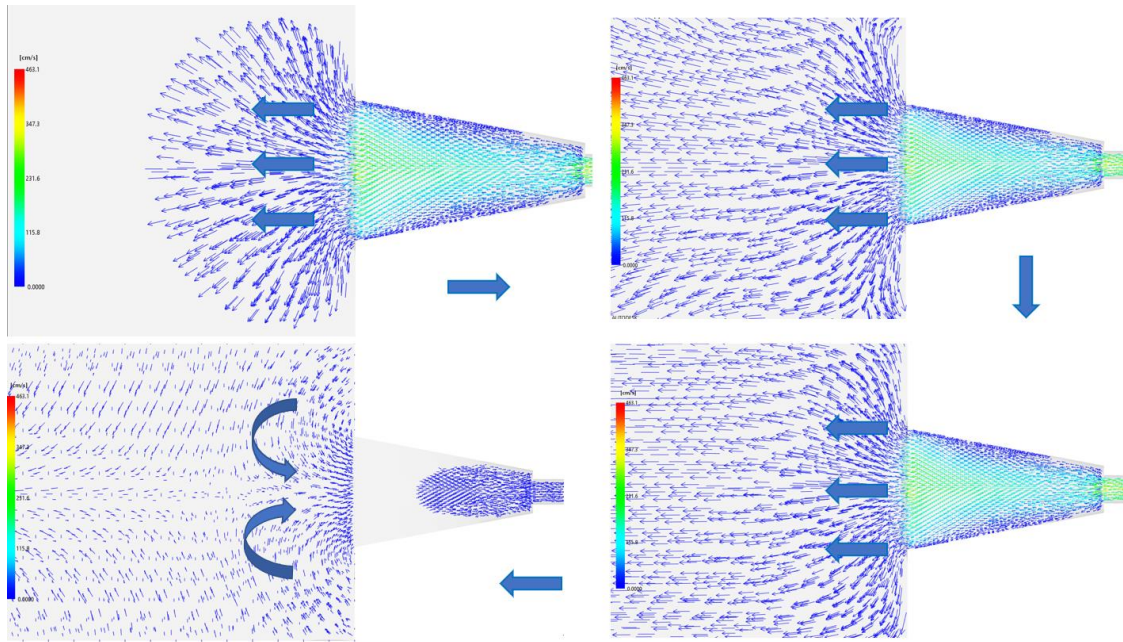


Figura 3.20: Perfil de velocidad de llenado de la pieza.

En la Figura 3.21, se muestra la deformación de la pieza después de concluir el ciclo. Esta deformación es causada por dos factores, temperatura y tiempo de enfriamiento. La temperatura debido a la diferencia entre el lado fijo del molde y el lado móvil del molde el cual se encuentra con menor temperatura. El tiempo de enfriamiento no puede ser muy alto como se mencionó anteriormente debido a que puede llegar a degradarse. La deformación de la pieza es 1.2 mm máximo, esta diferencia entre el punto de inyección y el último punto de llenado, se ve claramente en la pieza física que en capítulo posterior se mencionará.

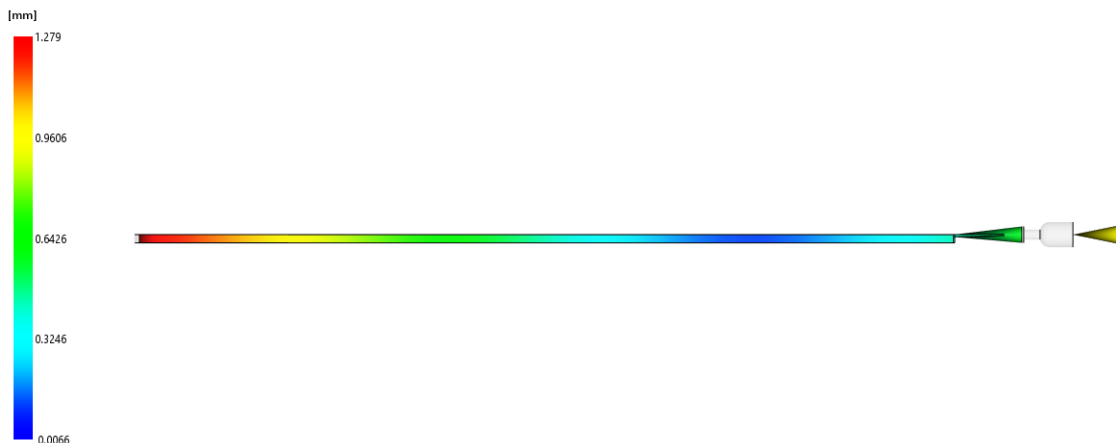


Figura 3.21: Deformación total de pieza, posterior al ciclo.

En la Tabla 3.4 se muestran los resultados de la simulación, donde se observa que la fuerza máxima requerida para realizar dichas pruebas es menor que la capacidad de la máquina disponible, tanto para el volumen como para la fuerza de cierre.



Tabla 3.4: Resultados de simulación.

Peso total.	23.3219 g
Peso de muestra.	23.3260 g
Peso de compuerta.	0.3759 g
Presión de inyección.	20.00 MPa.
Fuerza de cierre.	12.19 Toneladas.
Fuerza de cierre.	1.67 s.
Presión en el punto de inyección durante la compactación.	14.97 MPa.

De estos resultados se concluye que la maquina pretendida se puede ser empleada considerando la fuerza de cierre, capacidad de inyección y presión requerida en el proceso de inyección.

Capítulo 4: Fabricación del herramental.

Una vez obtenidos los resultados de simulación, se comenzó a desarrollar la manufactura del herramental. Previamente se definió que sería un herramental de prototipo, debido a costos y cantidad de piezas que se obtendrían. Dos de los factores para determinar esto fueron: funcionalidad, donde se revisaron detalles de ensamble de los componentes del herramental, como fueron pistones, ajustes y tolerancias entre dichos componentes. Otro parámetro fue el servicio, para ello se analizó el número de piezas que se pueden obtener con dicho herramental, dependiendo del número de ciclos que se esperaría realizar de aproximadamente (50 a 300 ciclos) [88].

La importancia de los moldes para inyección de polímeros es la capacidad de fabricar herramientas que soporten altas temperaturas y de presiones durante el moldeo, esto es lo que se determina la selección de los materiales, que generalmente son aceros debido a su alta rigidez mecánica y buena conductividad térmica, por lo que han sido clasificados como la mejor opción para la manufactura de moldes de inyección [88], debido a que sus propiedades mecánicas pueden ser modificadas dependiendo el tipo de aleación, tratamiento térmico, o estado superficial. Los requisitos principales que se consideraron fueron: resistencia a la compresión a altas temperaturas (320 ° C), resistencia al desgaste debido a la fibra de vidrio, la tenacidad del material, buena conductividad térmica y sobre todo, materiales que se puedan maquinar de forma convencional utilizando máquinas de control numérico sin requerir procesos de electro erosión o rectificadas que hacen que el proceso de sea costoso [88, 89] y que no requieran tratamientos térmicos posteriores al maquinado.

Para las cavidades del molde se utilizó un acero 4140 T (templado y revenido), este acero es de grado maquinaria, Cromo-Molibdeno, con dureza de 28 a 34 HRC, buena resistencia mecánica, por lo tanto, es adecuado para piezas y partes de maquinaria de uso general, normalmente no requiere un tratamiento térmico adicional. Para el resto del porta-molde se utilizó un acero al carbón A36 (ASTM A36), ya que dicho material es un acero estructural de propósito general, normalmente usado para este propósito, una de sus ventajas es el costo y la capacidad de ser maquinados.

4.1 Etapas de fabricación.

Para la fabricación del molde se tienen etapas como lo muestra la Figura 4.1

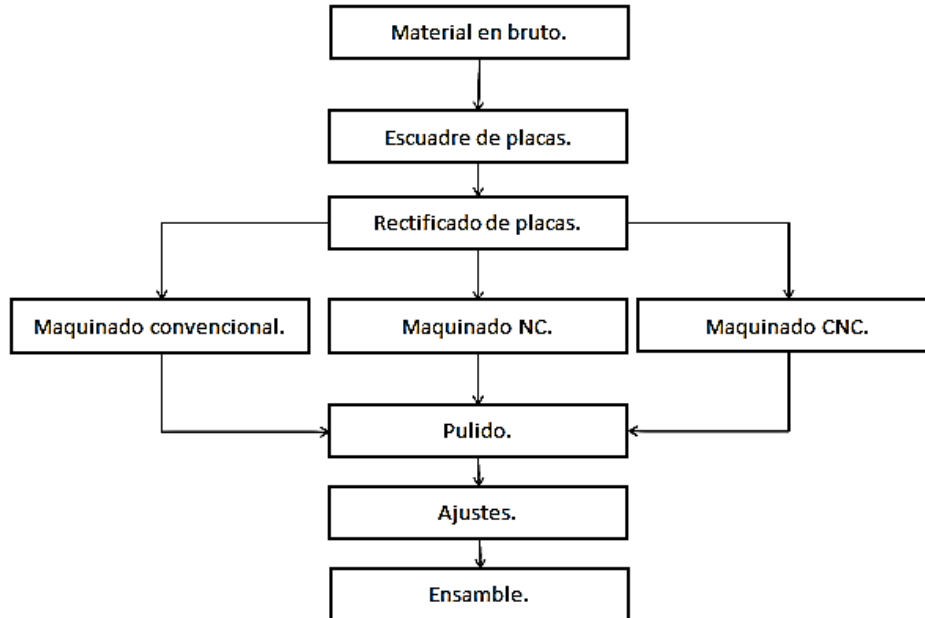


Figura 4.1: Etapas de maquinado para molde de inyección.

Durante la primera etapa el material fue adquirido con el proveedor, el cual entrego el material en estado normal con medidas mayores (sobre espesores) como se muestra en la Figura 4.2. Este material se verifica con sus hojas de especificación y certificado de calidad para determinar su estado y como resultado de esta primera inspección aceptarlo o rechazarlo.

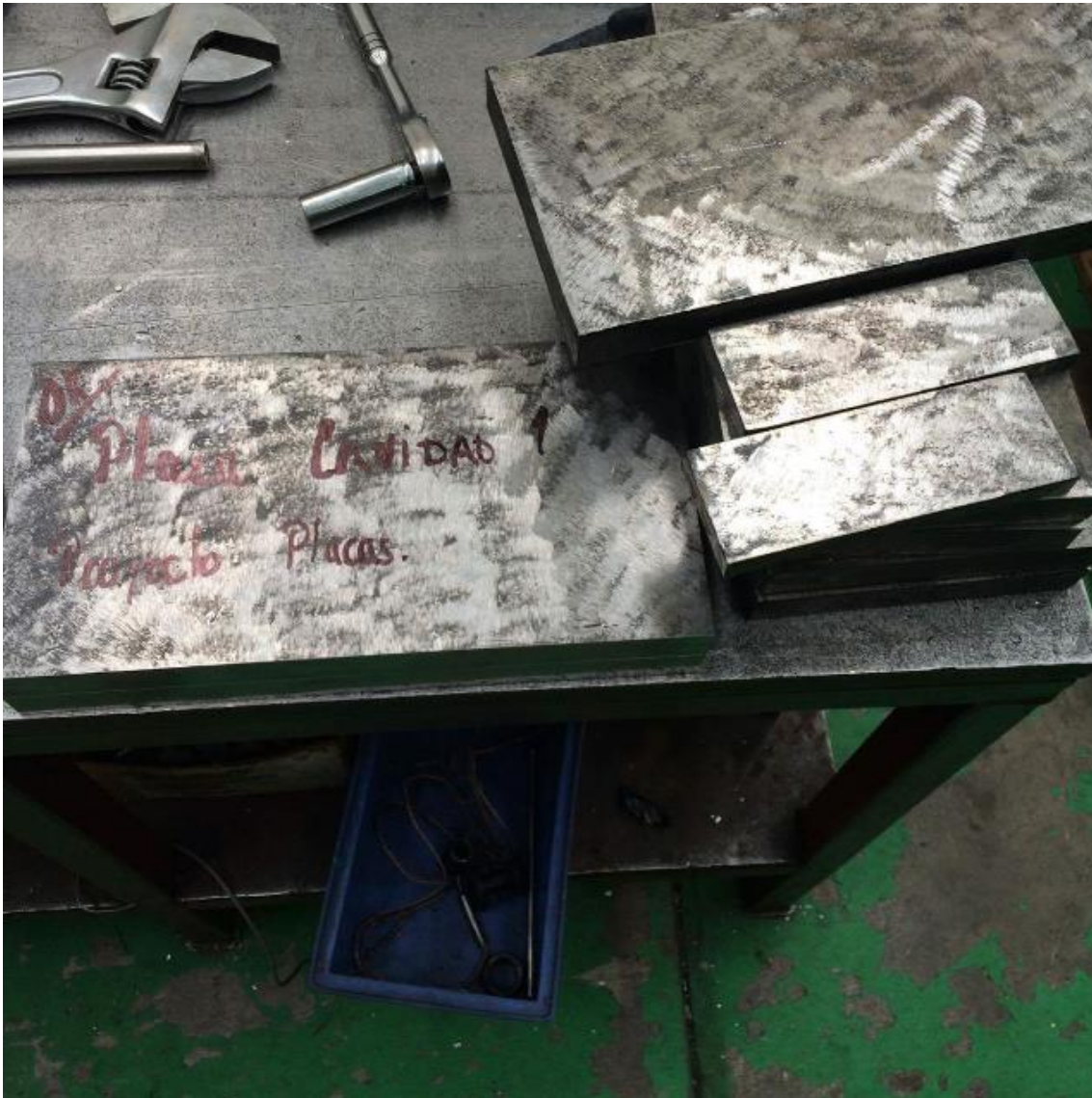


Figura 4.2: Placas de porta molde y cavidades en estado bruto.

En la segunda y tercera etapa, las placas se limpiaron y posteriormente, se escuadraron en una maquina convencional de fresado para obtener medidas aproximadas que no afectan de forma directa al ensamble ni mecanismos del molde, en el caso de los insertos y mecanismos se realiza maquinado y rectificado para obtener medidas finales y posteriormente realizar ajustes y tolerancias mecánicas. En esta etapa se realiza el rectificado de todas las placas debido a la precisión que se requiere en la fabricación de moldes de inyección.

Durante el maquinado, las placas se dividen en el proceso, en la Figura 4.3 se muestra la placa de refrigeración, esta placa evita la transferencia de calor del molde con la maquina inyectora como a su vez mantener el molde a la temperatura de operación (85 °C) y con

eso evitar que el policarbonato regrese a su estado sólido. Este proceso se realiza de forma manual, centrando las placas con un indicador de caratula debido a la precisión en la manufactura. Se generan programas de forma manual con base en códigos G [Anexo 1], dichos códigos son el lenguaje de las maquinadas CNC.



Figura 4.3: Barrenado para refrigeración y conexión de agua 1/4 NPT.

4.2: Maquinado CNC.

La ventaja del maquinado CNC es la combinación de precisión y rapidez que se desea, el tiempo es reducido, pero el factor costo se ve afectado por este, debido al factor hora/máquina. Entre más cerrada sea la precisión del maquinado, tendrá mayor tiempo, lo que elevará el costo del maquinado.

Las geometrías, que originalmente se tienen en software CAD, son importadas a un software CAM (Manufactura Asistida por Computadora), para preparar la cantidad de programas requeridos para las dimensiones finales. Esto se basa prácticamente en un programa para desbaste, dejando sobre espesores de hasta 2 mm, con avance de corte de 1 mm/min y profundidades de 0.7 mm a revoluciones de 2000 rpm. Posteriormente se realizó un programa de semi-acabado en el cual se reducen los diámetros a medidas finales, dejando sobre espesor de 0.1 mm para verificar medidas, en este paso se aumentan las revoluciones hasta 5000 rpm, reduciendo el avance a 0.3 mm/min y con profundidades de 0.3 mm. Por último, se realizó un programa de acabado en el cual se obtiene las medidas finales, para esto se utilizan las mismas herramientas del semi acabado, pero aumentando las revoluciones a 10 000 rpm, con avance 0.1 mm/min longitudinales y profundidad, esto con la finalidad de obtener buenos acabados superficiales, que no interfieran en la calidad del producto final.

Una vez realizados los programas, se generaron los códigos G de forma automática en el programa CAM, para ser modificados al tipo de máquina en el cual fue maquinado la pieza o cavidad. En la Fig.4.4 se muestra la placa de cavidad lado móvil siendo maquinado

el registro del poste de alineación, para este caso, se utiliza códigos G normales con ciclos enlatados o subrutinas para mayor velocidad, debido a que no se requiere crear un programa CNC.

En la figura 4.5, se muestra el plano para manufactura de las cajas para registro y orientación de las placas de cavidad. Cabe mencionar que, en la manufactura de cavidades de moldes de inyección, las coordenadas se toman a partir del centro para evitar desfases con la parte contraria del molde.

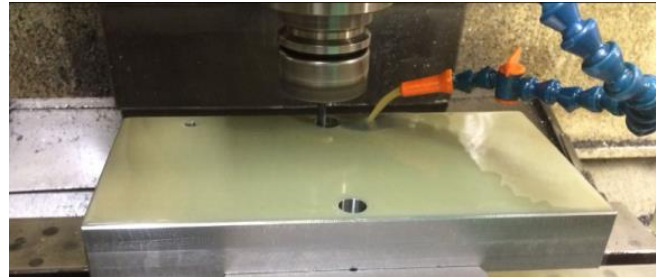


Figura 4.4: Maquinado de placa de cavidad.

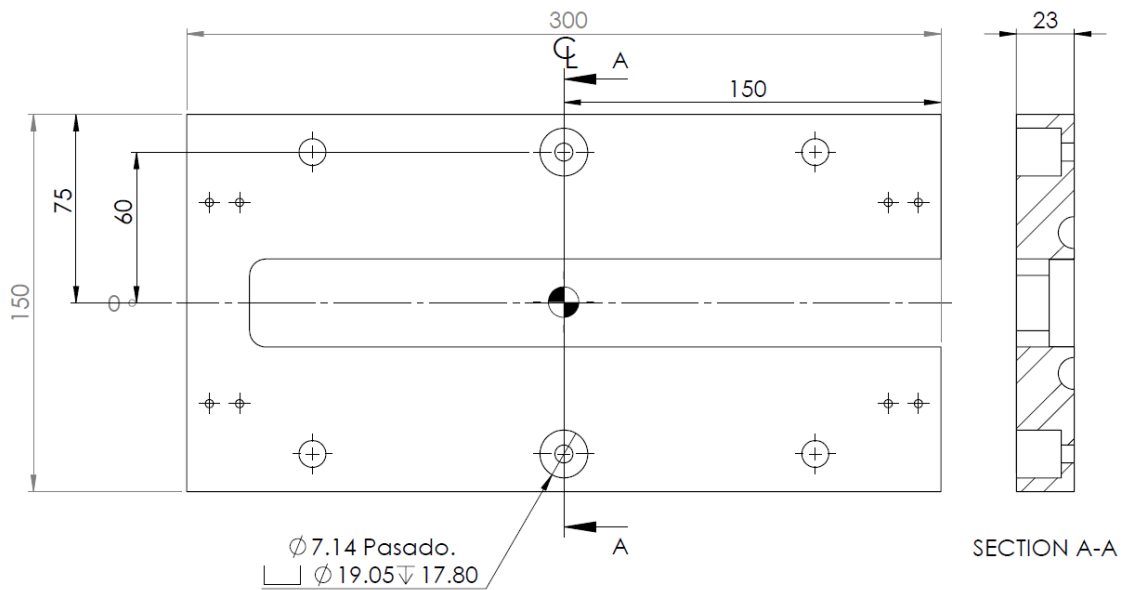


Figura 4.5: Plano de manufactura para postes de alineación.

Los códigos NC que se generaron para realizar el maquinado, exclusivamente de las cajas de los postes de registro son:

Cortador de $\varnothing 6.35$ mm con profundidades de corte de $Z = -0.2$ mm. En este caso se puede meter ese cortador debido a que previamente se realizó un barreno de 7.14 mm para el desahogo de la herramienta durante el maquinado.

G91G28Z0.0; Se desplaza en modo incremental, e ir a posición de home de la máquina.

G28G0; Se desplaza al home de la máquina, con velocidad máxima de la máquina.

G28X0.0; Se desplaza a la 0 pieza, con velocidad máxima de la máquina.
 G92X200.0Y100.0Z30.0; Posición central de pieza con respecto a los ejes principales de la maquina CNC. X=200, Y=100 es el origen de la pieza con respecto a las coordenadas de la máquina.

G0G90X0.0; Coordenadas X=0 con respecto a la pieza.

G0G90Y0.0; Coordenadas Y=0 con respecto a la pieza.

S3000; Revoluciones del husillo a 3000 rpm.

M03; Encendido del husillo en sentido horario.

G0G90X0.0Y60.0Z10.0; Movimiento rápido de velocidad máxima de la maquina CNC a coordenadas X=0, Y=60, Z=10.

G01G90Z0.0F200; Desplazamiento lineal con Z=0.0 con velocidad de 200.

M98P890001; Se llama a la subrutina que está en el programa 0001 y se va a ejecutar 89 veces, por lo tanto, $(0.2) (89) = 17.8$

G01G90F500; Reducir velocidad de avance a 500.

G0G90Z30.0; Posiciona la herramienta en Z=30.

M05; Se detiene el husillo.

M09M30; Fin del programa.

Sub-rutina.

O0001; Nombre y número del programa.

G01Z-0.2F150; Desplazamiento lineal, con velocidad de avance de 150 con profundidad de corte de 0.2 mm

G01X-6.35Y0.0F2000; Desplazamiento lineal en X=-6.35 con Y=0 y con velocidad de 2000.

G02X12.7Y0.0R6.35; Desplazamiento circular hacia la derecha de 12.7 mm considerando un radio de 6.35 mm.

G02X-12.7Y0.0R6.35; Desplazamiento circular hacia la derecha de -12.7 mm con un radio de 6.35 mm.

G01X6.35Y0.0; Desplazamiento lineal en X=6.35 mm, esto deja el cortador en su posición inicial.

M99; Fin de la subrutina.

Para cavidades o puntos de inyección se generaron programas CNC, utilizando el programa POWERMILL. En la Figura 4.6 se muestra la simulación tanto de la boquilla como de la cavidad lado fijo.

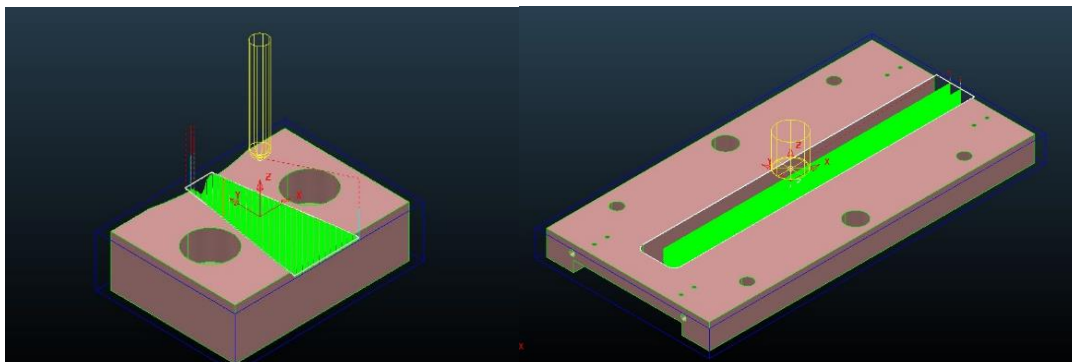


Figura 4.6: Simulación del programa de acabado para el punto de inyección y cavidad lado fijo.

Con esto se maquinaron las placas de la porta molde y cavidades del molde como se muestra en la Figura 4.7.



Figura 4.7: Cavity lado fijo, concluida.

Debido a que esta pieza no requiere de algún acabado especial, y al estar expuesta a la fibra de vidrio, se omitió el pulido en las cavidades.

Ya concluido el maquinado de las piezas, se verifican las medidas finales para ajustar dimensiones, tanto de componentes consumibles (resistencias, tornillos, postes, tazas...), como de placas. Uno de los componentes afectados y que requieren de ajuste especial es el corazón lado fijo, Figura 4.8 y mostrado en el esquema de la Figura 4.9 , parte macho debido a que estará en constante movimiento realizando la compactación del polímero durante la fase de compresión. Por esto se realizó un ajuste H7/h6 para permitir el correcto deslizamiento del corazón sin permitir la fuga del material [90].



Figura 4.8: Corazón del lado móvil, Acero 4140 T, ajuste h6.

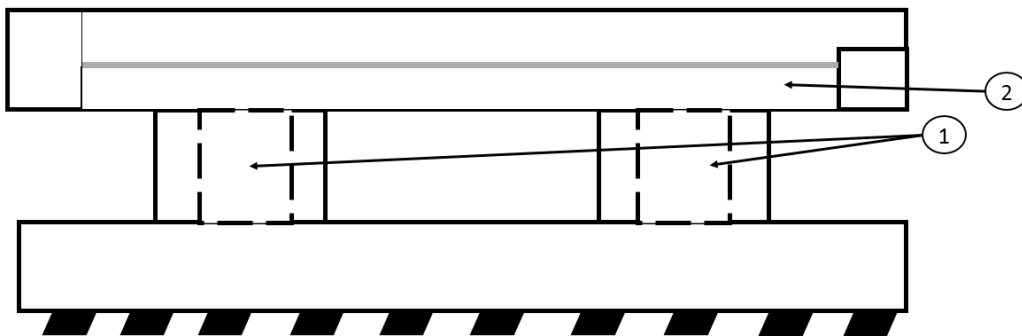


Figura 4.9: Esquema lado fijo del molde. 1) Pistones neumaticos, 2) Corazón lado fijo.

En la última etapa, se reúnen todos los componentes del herramental, como son consumibles y placas, Figura 4.10, para comenzar a ensamblar todos los componentes del molde y obtener el conjunto del herramental. En la Figura 4.11 se muestran las tres vistas del molde ya ensamblado y en la Figura 4.12 se describe de forma general los componentes del molde.



Figura 4.10: Piezas terminadas para ensamble de herramental.

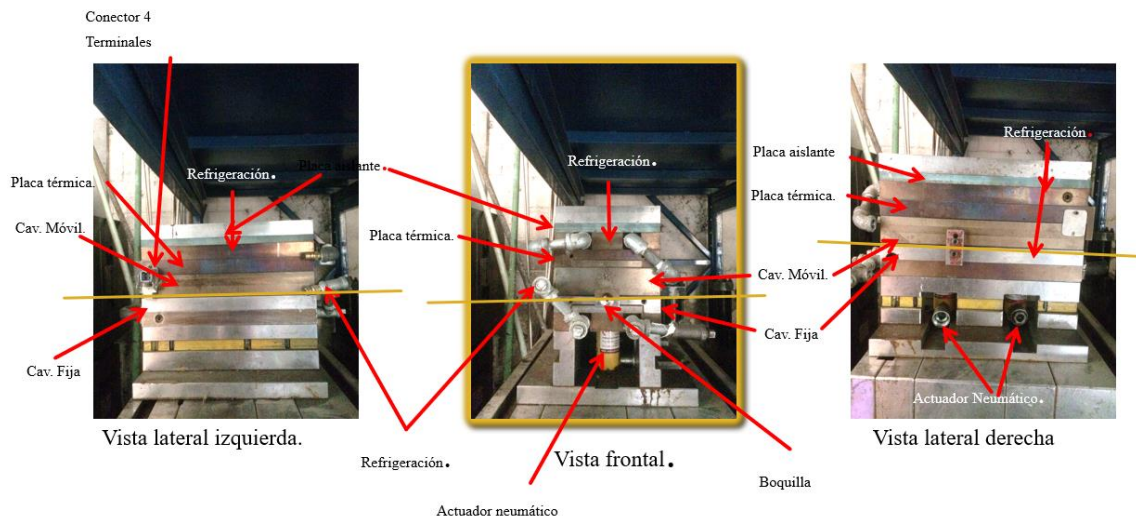


Figura 4.11: Vistas del herramental final, ensamblado.

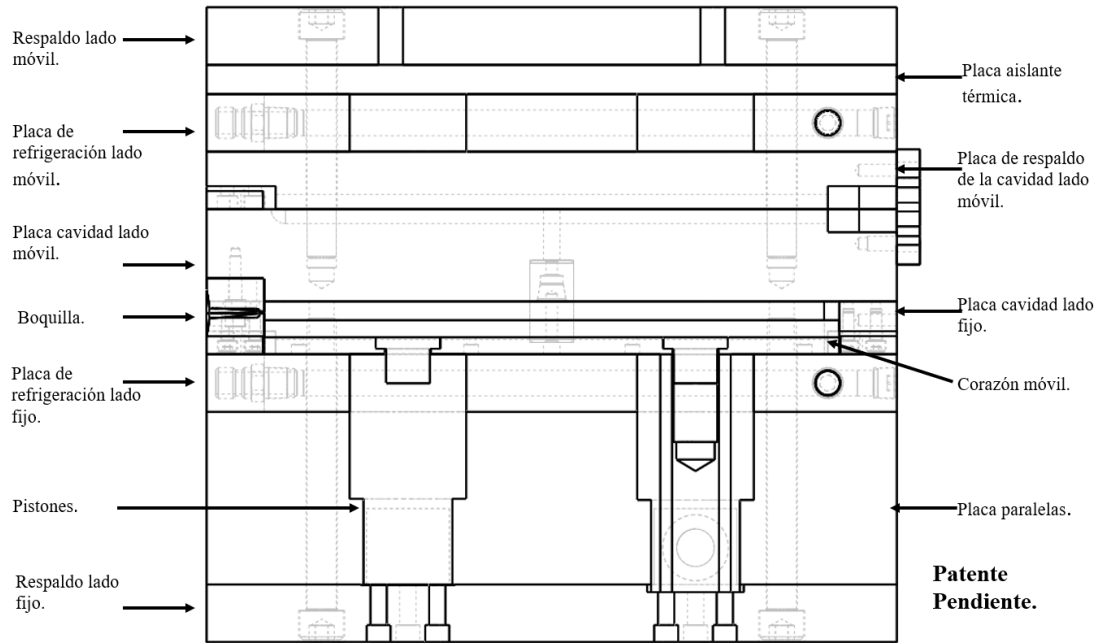


Figura 4.12. Componentes generales del molde.

Por cuestiones de secreto de empresa, no está autorizada su reproducción parcial o total del molde. Es por ello por lo que no se describe los mecanismos, funciones o configuraciones de dicho molde.

Capítulo 5: Obtención del compuesto.

Realizado el herramental para inyección y compresión, se procedió a realizar las pruebas, para la obtención del compuesto. Vale la pena mencionar que este proceso no fue la única opción que se desarrolló, se exploraron varias otras, pero solo se describe aquí el método por el cual se obtuvieron los resultados deseables. Dentro de esas opciones se encontraba el proceso de compresión e inyección obteniendo resultados no deseados.

5.1 Compresión.

Basado en el trabajo de F. C. Smith [48], en el cual, se colocó fibra de vidrio entre 2 películas de policarbonato y siendo comprimidos por el herramental a 320 °C por 3 minutos y dejando enfriar por 48 horas. En la Figura 5.1 se muestra el herramental para compresión.



Figura 5.1: Herramental de compresión.

En la Fig. 5.2 se aprecia que la fibra se destruye en varias partes de la probeta. El policarbonato sufre degradación debido al tiempo de residencia, este tiempo es lo que dura el material en su temperatura de proceso (320 °C) que es aproximadamente 90 s máximo. Mostrando una mala adhesión en la gran mayoría de la probeta, lo que ocasionaría en los ensayos de tensión la fractura en ese punto.



Figura 5.2: Herramental abierto durante el proceso de compresión.

En la Fig. 5.2 se muestra el herramental, el cual fue modificado para tener resistencias térmicas para elevar la temperatura del herramental a 320 °C con un sistema de refrigeración que se creyó beneficiaria en el enfriamiento de la pieza y así no sufrir de degradación por temperatura, sin embargo, se obtuvieron resultados similares a los de F.C. Smith [48], es decir que la pieza no tubo completa impregnación en toda la superficie, gran parte del material sufrió degradación por el tiempo de residencia en temperatura de proceso y al abrir el molde, la pieza se separó en más de dos partes, haciendo que no fuera posible obtener ninguna muestra representativa para su caracterización física o mecánica.

5.2 Inyección.

Durante el proceso de inyección se cuidaron de 6 factores importantes: a) Diseño de la probeta rectangular, en donde ya se definió las dimensiones que la norma ASTM 3039 solicita. b) Selección de material, basados en la revisión del estado del arte (se definió el uso de policarbonato). c) Diseño y fabricación de herramental, en esta etapa se diseñó el herramental para inyección, posteriormente para inyección y compresión. d) La fabricación del herramental se realizó en ambos casos para probar y modificar puntos de inyección. e) Máquina inyectora, esta máquina ya se tenía definida, debido a la disponibilidad del equipo por parte de la empresa, en este caso una máquina vertical Battenfeld de 35 t de fuerza de cierre. Por último: f) El proceso de inyección, basados en

la simulación se continuo con realizar las pruebas de inyección y posteriormente las de inyección –compresión.

La primera variable que se controló fue la cantidad de material y llenado de la cavidad sin refuerzo como se muestra en la Figura 5.3.



Figura 5.3: Pruebas de inyección. (A) Máximo volumen de inyección. (B) Compactación 2 t. (C) Compactación 4 t. (D) Compactación 6t. (E) Compactación 8t.

Como se muestra en la figura 5.3, se obtiene el volumen requerido para compactar el flujo de policarbonato, que posteriormente se va compactando con diferentes cargas para realizar las pruebas de forma segura y evitar dañar el equipo de inyección.

La siguiente etapa fue agregar refuerzo, sin embargo, como se muestra en la Figura 5.4, el policarbonato absorbía humedad, aun si el material ya había sido deshidratado por 3 horas previas a ser colocado en la máquina de inyección, debido a que el ambiente no estaba controlado y durante las pruebas eran días húmedos.

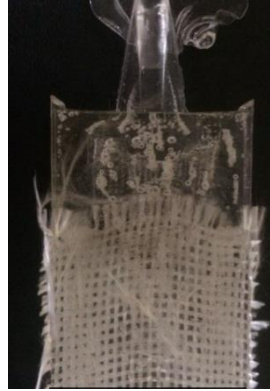


Figura 5.4: Se muestran burbujas en la primera etapa de llenado, debido a presencia de agua.

Una vez controlada la atmósfera, se volvieron a realizar pruebas de inyección, sin embargo, mostraron defectos como los que se muestran en la Figura 5.5, donde se aprecia degradación del material por el tiempo de residencia en la unidad de inyección y mucha distorsión de la fibra provocado por el arrastre que ocasionaba el policarbonato al ingresar en la cavidad.



Figura 5.5: Degradación por inyección y desorientación de la fibra.

Otro defecto mostrado en el proceso de inyección fue la mala impregnación debido a que el polímero no cubría en su totalidad a la fibra de vidrio, como se muestra en la Figura 5.6. Por otro lado, los espesores de la probeta eran muy elevados como se muestran en la Figura 5.7, el proceso no presentaba repetibilidad, por lo que se optó a modificarlo.

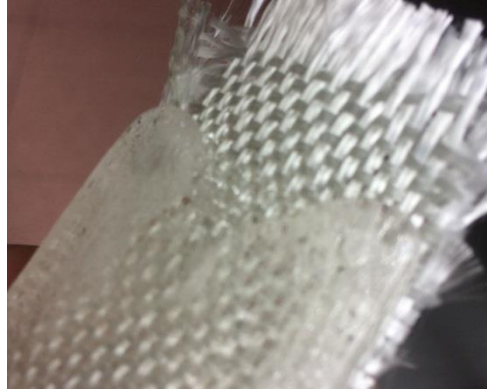


Figura 5.6: Mala impregnación de la fibra.



Figura 5.7: Espesores muy elevados.

Basados en el proceso de inyección y compresión, se optó por crear un inserto que estaría colocado dentro del herramental previo a la inyección. Este inserto, como se muestra en la Fig. 5.8, estaría compuesto por una película de policarbonato adherida a una fibra de fibra orientada de forma $0/90^\circ$ o $+45/-45^\circ$ (Dependiendo de la probeta). Con esto la temperatura del polímero al ingresar a la cavidad, deformaría a la película de policarbonato de tal forma que se adhirieran ambos materiales permitiendo a la fibra permanecer entre los dos.



Figura 5.8: Inserto de película de policarbonato y fibra de vidrio.

5.3 Resultados.

Una vez que se llevaron a cabo, tanto la simulación, como la fabricación del molde, se realizaron las pruebas físicas, en la Figura 5.9 se muestran los parámetros reales para el proceso de inyección-compresión, donde se muestran los valores introducidos en la máquina con respecto a la simulación realizada. mostrado.

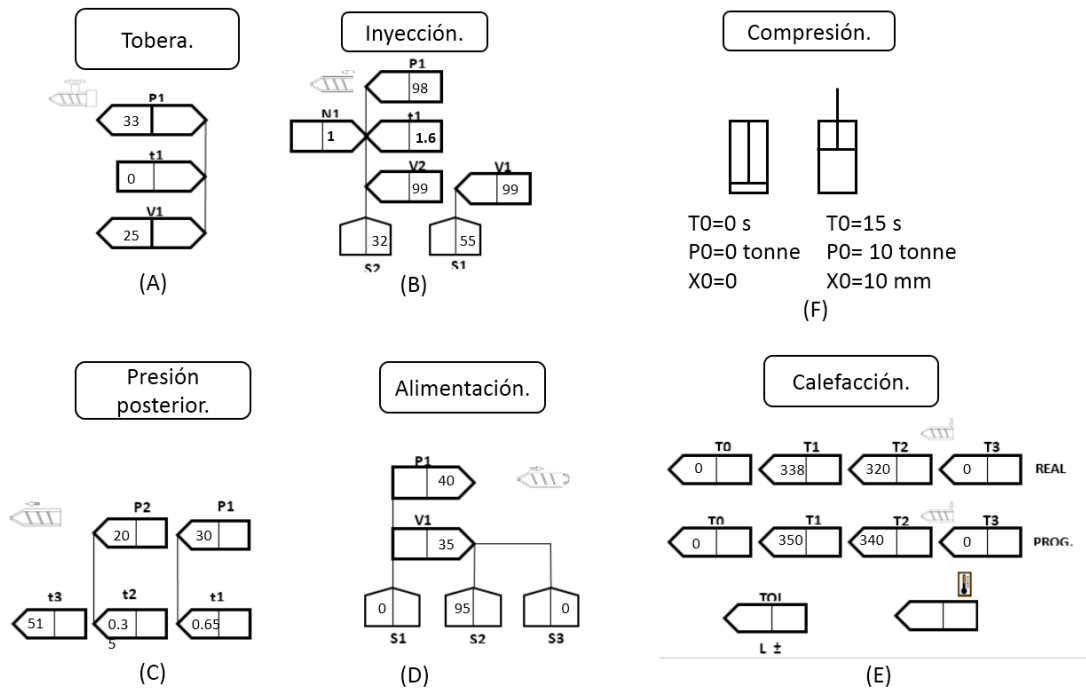


Figura 5.9: Hoja de parámetros de inyección real.

Explicando los diagramas, hablando de porcentajes (Ver ANEXO 2) la tobera (A), representa la velocidad de carga del material en porcentajes de presión (0-100 %), tiempo de elevación (0-99.99 s), la velocidad de carga en porcentajes de máquina (0-100%). Para inyección (B), N1 igual a 1 es el programa de cambio a presión posterior que depende del tiempo, esto significa que después de la inyección comience la presión posterior o sostenimiento comience. P1 es la presión de inyección máxima que puede alcanzarse dado en porcentajes (0-100%). La presión posterior depende de t1 que es el tiempo de inyección y el tiempo que debe transcurrir para pasar a la fase de compactación. V1 es la velocidad de recorrido de inyección (0-100 %) y V2 es la velocidad de recorrido efectivo en la presión posterior. S1 y S2 representan el recorrido de inyección y del recorrido del cambio de presión.

Presión posterior (C), P1 es la presión posterior 1 efectiva durante el tiempo de presión posterior. P2, es la presión posterior 2 efectiva durante el tiempo de presión posterior 2. Los tiempos de dichas presiones están dadas por t1 y t2, el tiempo de enfriamiento t3 es el tiempo que permanecerá cerrado el molde hasta que concluya el ciclo.

Dosificación o Descompresión (D), P1 es la reserva de material (0-100%), V1 es la velocidad de dosificación, S1 es el recorrido de descompresión antes del proceso de

dosificación, S2 es el recorrido de dosificación y determina la cantidad del material a dosificar (0-100%), S3 es el recorrido de descompresión del proceso de dosificación.

Calefacción (E), T0 es la temperatura en la tobera, que es el primer punto donde ingresa el material en estado sólido, T1 representa la temperatura en la zona 1 que es la prefijación directa de temperatura por medio de reguladores. T2 representa la zona 2 y T3 es la temperatura en zona 3 o zona de reserva que el valor de entrada nominal debe ser 0. En este caso se censan la real y la programada.

Compresión (F), P0 representa la presión inicial de los pistones hidráulicos, T0 es el tiempo de compactación con la presión P0. X0 representa el recorrido de compactación.

Una vez que se concluyeron las pruebas y se descartó el proceso de inyección, se hicieron los insertos, creando un ajuste (H7/m6) entre la placa del corazón y los insertos de películas con fibra de vidrio, para inmovilizar las fibras y permitir que el policarbonato fluya sin alterar la orientación de las fibras. Como se muestra en la Figura 5.10, la orientación de las fibras con respecto al proceso de inyección no se aprecia arrastre de las fibras con respecto al método convencional de inyección. La Tabla 5.1 y la Tabla 5.2 muestran las mediciones realizadas con un goniómetro.

En la Figura 5.10 se muestra un diagrama de distribución de las muestras obtenidas. El número de muestras obtenidas, fueron obtenidas el mismo día tanto para las muestras de policarbonato solo, como para las muestras con refuerzo. Aquí se observa como las muestras se obtuvieron del molde, se es claro que las piezas aun tienen el punto de inyección en forma de abanico y su medida es de 35 mm, por lo que posteriormente fueron cortadas a la medida de 25 mm y se les desprendió el punto de inyección. Este numero de probetas se separaron para diferentes propósitos tales como orientación de fibra y su caracterización físico-mecánica.

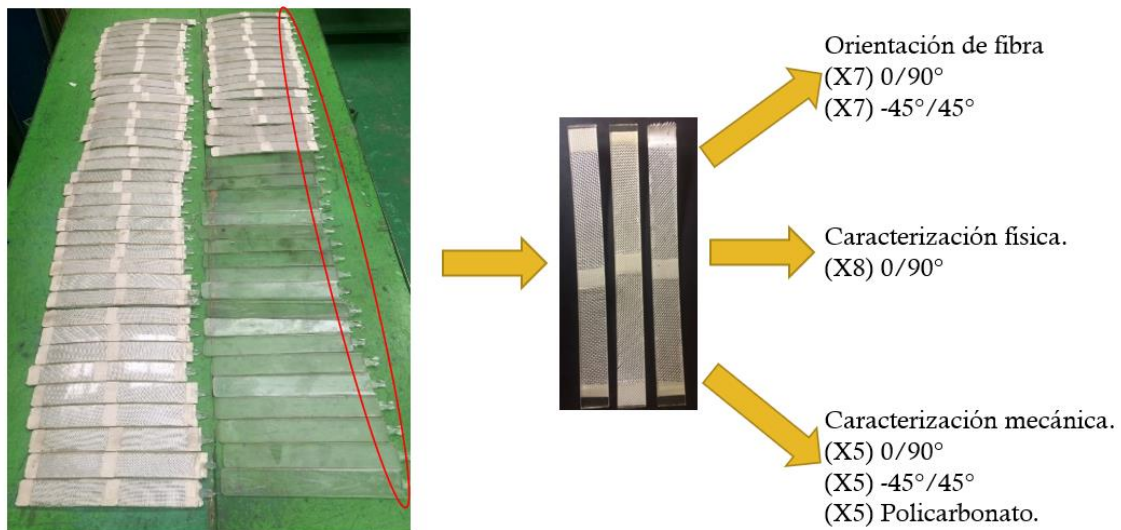


Figura 5.10. Diagrama de distribución de probetas para orientación de fibra y caracterización físico-mecánica.

Para determinar la orientación de las fibras, se midieron cinco muestras de cada grupo de orientación de las fibras (0/90°, ±45°) con un goniómetro en siete puntos diferentes desde el punto de inyección hasta el último punto de llenado y compresión, de cada

probeta y los valores globales (media general, desviación estándar y coeficiente de variación) de la alineación de las fibras.

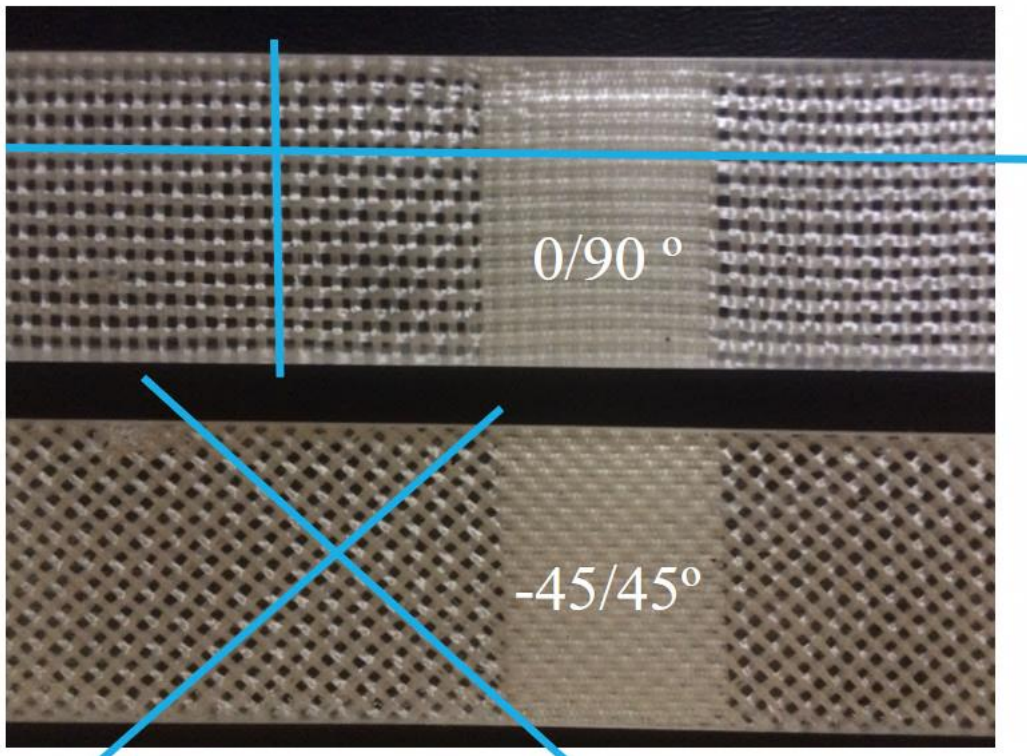


Figura 5.11: Inspección visual de policarbonato reforzado con fibra de vidrio tejida orientada en $0/90^\circ$ y $\pm 45^\circ$.

Tabla 5.1: Orientación en grados para $0/90^\circ$.

Probeta	P1-0-90°		P2-0-90°		P3-0-90°		P4-0-90°		P5-0-90°	
1	0.00	90.00	0.00	90.00	3.00	90.00	3.00	91.00	0.00	89.00
2	0.00	90.00	0.00	90.00	3.00	92.00	4.00	89.00	0.00	89.00
3	0.00	90.00	0.00	90.00	3.00	91.00	4.00	93.00	0.00	90.00
4	0.00	90.00	0.00	90.00	4.00	91.50	5.00	92.00	0.00	91.00
5	0.00	96.00	0.30	90.00	4.00	90.00	6.00	93.00	0.00	89.00
6	0.00	94.00	0.40	90.00	2.60	90.00	5.00	93.00	0.00	91.00
7	0.00	94.00	0.00	90.00	4.00	90.00	5.00	93.00	0.00	91.00
\bar{x}	0.00	92.00	0.10	90.00	3.37	90.64	4.57	92.00	0.00	90.00
s	0.00	2.58	0.17	0.00	0.60	0.85	0.98	1.53	0.00	1.00
CV	0.00	0.03	1.73	0.00	0.18	0.01	0.21	0.02	0.00	0.01
Promedio	PT-0	PT-90								
\bar{x}_T	1.61	90.93								
s _T	0.43	1.01								
CV _T	0.27	0.01								

Tabla 5.2: Orientación en grados para ± 45 .

Probeta	P1-45°		P2-45°		P3-45°		P4-45°		P5-45°	
1	44.00	-45.00	4.00	-41.00	41.00	-42.00	37.00	-45.00	44.00	-42.00
2	44.10	-44.00	43.00	-41.00	41.00	-42.50	37.00	-46.00	44.00	-42.00
3	42.50	-42.00	43.00	-40.00	43.00	-42.00	38.00	-47.00	45.00	-42.00
4	44.00	-42.00	43.00	-42.00	45.00	-42.00	38.00	-47.00	45.00	-42.00
5	46.00	-44.00	40.00	-42.00	42.00	-42.00	39.00	-48.00	45.00	-43.00
6	46.00	-43.00	40.00	-41.00	45.00	-42.00	39.00	-48.00	4400	-43.00
7	46.20	-43.00	41.00	-40.00	45.00	-42.00	40.00	-47.00	44.00	-44.00
\bar{x}	44.69	-43.29	41.86	-41.00	43.14	-42.07	38.29	-46.86	44.43	-42.57
s	1.40	1.11	1.46	0.82	1.86	0.19	1.11	1.07	0.53	0.79
CV	0.03	-0.03	0.03	-0.02	0.04	0.00	0.03	-0.02	0.01	-0.02
Promedio	PT +45	PT -45								
\bar{x}_T	42.48	-43.16								
sT	2.60	2.23								
CVT	0.06	-0.05								

Capítulo 6: Caracterización Físico - Mecánica.

Obtenidas las piezas, se obtuvo el contenido de fibra de vidrio, matriz y poros (huecos) que pudiera tener la probeta. Posteriormente se procedió a obtener las características mecánicas del material, para determinar si se obtuvo alguna mejora en las constantes elásticas o su comportamiento es igual al del policarbonato por sí solo.

6.1. Caracterización Física.

Para las propiedades físicas, se utilizaron dos tipos de pruebas, el método de combustión [91] para determinar las fracciones volumétricas y el método hidrostático basado en el principio de Arquímedes para determinar el volumen y la densidad de la muestra.

En el proceso de la caracterización física se obtienen los valores de densidad ρ , fracciones volumétricas de ambos refuerzos V_f , fracción volumétrica de la matriz V_m , y la fracción volumétrica de la porosidad V_p .

Para la caracterización física, siete muestras fueron cortadas (A) (25 mm x 20 mm), como muestra en la figura 6.1 para medir su masa tanto en agua como en aire. Para medir la masa en agua (B), se sumerge la masa en agua, para esto se acopla un alambre en forma de gancho donde es colocada la muestra y sumergida completamente, después se procede a tomar lectura de la masa marcada en la báscula. Para medir su masa en aire, se coloca la muestra en la báscula y se toma lectura. Con esto se puede obtener el empuje hidrostático (F_H) la cual se obtiene de la diferencia de la masa en aire m_{aire} y la masa en agua m_{agua} .

$$F_H = m_{aire} - m_{agua} \quad (6.1)$$

Para obtener el volumen de la muestra $V_{muestra}$, se divide el empuje hidrostático F_H sobre la densidad del agua ($\rho_{agua(20^\circ C)}$), que es de 0.99823 g/cm³.

$$V_{muestra} = \frac{F_H}{\rho_{agua(20^\circ C)}} \quad (6.2)$$

Con esto se puede obtener la densidad de la muestra $\rho_{muestra}$ dividiendo la masa en aire m_{aire} , entre el volumen de la muestra $V_{muestra}$.

$$\rho_{muestra} = \frac{m_{aire}}{V_{muestra}} \quad (6.3)$$

El proceso de calcinación se basa en retirar el contenido de matriz del compuesto, para obtener la masa del refuerzo por medio de la combustión de la matriz (policarbonato) con el oxígeno del aire. Para esto, se colocan las muestras (previamente pesadas y obtenido su volumen) en crisoles este conjunto (probeta-crisol) se pesa, Figura 6.1 (C) para introducirlos en un horno que alcance los 500 °C durante 3 horas para que se realice la calcinación de la matriz (D). Posteriormente se retiran los crisoles del horno, asegurando que ya no esté presente la matriz y se dejan enfriar (E) para volver a obtener las lecturas de las masas, del crisol con el refuerzo (F).

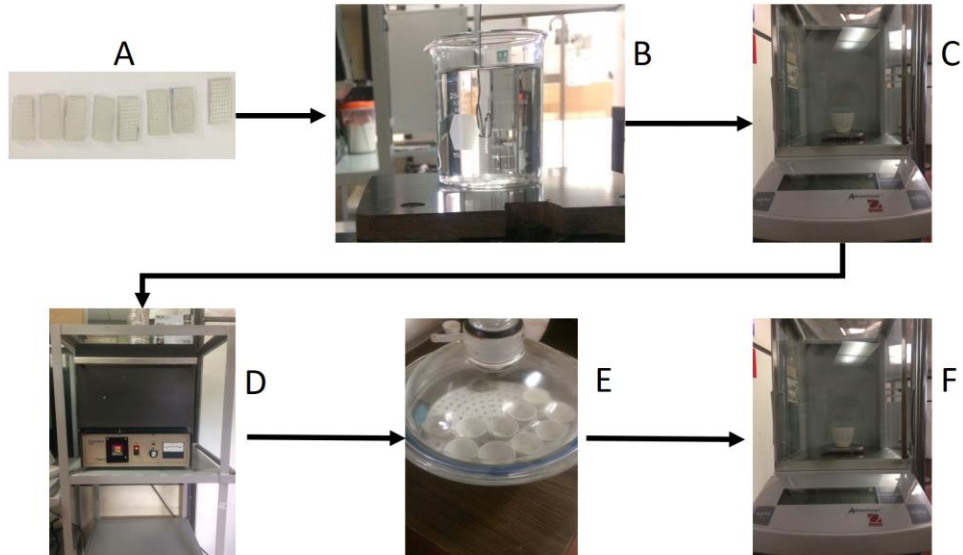


Figura 6.1. Proceso de caracterización física de muestras de policarbonato reforzadas con fibra de vidrio. (A) Muestras de policarbonato reforzado con fibra de vidrio tejida. (B) Muestras sumergidas en agua. (C) Muestras ponderadas en crisol. (D) Crisoles colocados en un horno de mufla. (E) El crisol con la fibra colocada en un deshumidificador. (F) Especímenes ponderados.

El contenido de refuerzo, el porcentaje en peso, el volumen de la matriz y el porcentaje de huecos se calcularon de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

$$W_m = \left(\frac{M_m}{M_i} \right) 100 \quad (6.1)$$

$$V_m = (M_m - M_i) 100 \frac{\rho_c}{\rho_m} \quad (6.2)$$

$$V_v = 100 - (V_r + V_m) \quad (6.3)$$

Donde M_i es la masa inicial de la muestra, M_m es la masa final de la muestra, ρ_m es la densidad de la matriz, ρ_c es la densidad del compuesto, V_r es el volumen de la fibra, V_m es el volumen final de la matriz y V_v es el volumen contenido de poros.

6.2. Caracterización Mecánica.

Se realizaron pruebas mecánicas de los especímenes con el fin de obtener el módulo de elasticidad E_I , el módulo de corte G_{I2} , esfuerzos máximos a tensión $\sigma_{I_{maxT}}$ y el esfuerzo máximo de corte $\tau_{I2_{max}}$ de acuerdo con la norma ASTM D 3039 [82] y D3518 [92] que consisten en ensayos de tensión.

Las muestras se cortaron en una máquina de fresado de 3 ejes, para dimensiones de 250 x 25 mm, con una herramienta de carburo de tungsteno solido de grado IC02. Se necesitaron dos conjuntos de muestras, uno con la fibra alineada en las direcciones $0^\circ/90^\circ$, y el otro conjunto con una alineación de fibra $\pm 45^\circ$ para obtener las propiedades mecánicas en corte. Para obtener datos de deformación tanto longitudinal como transversal cada muestra se acondicionó con dos galgas extensométricas, alineadas en direcciones axial y transversal, como se muestra en la Figura 6.2. Las galgas extensométricas (HBM 6/120 LY11) tienen resistencia nominal de 120 Ohm, coeficiente expansión térmico de $93 \pm 10 [10^{-6} / K]$ y un factor de galga de $2.05 \pm 1,0\%$.

Se probaron cinco muestras de cada conjunto (Policarbonato, $\pm 45^\circ$, $0/90^\circ$), con una velocidad de desplazamiento de 2 mm / min, de acuerdo con la norma ASTM D3039 [82], en una máquina de ensayo universal Shimadzu AG-1 con una capacidad máxima de 100 kN. Antes de la prueba de tracción, cada muestra se midió en 5 secciones a lo largo de la zona de prueba en ancho y espesor para obtener el área de la sección transversal media A. Se coloca la muestra entre las mordazas de la máquina de ensayo, con el eje axial de la muestra según la dirección de ensayo. Para el registro de deformación se utilizó un indicador de deformación Vishay P3 [93]. Tanto la máquina de ensayo como el P3 se configuraron para una velocidad de muestreo de 1 Hz y 2 Hz para la máquina de ensayos.

Este ensayo concluye en el momento que la muestra se fractura. Para obtener el esfuerzo σ_i que corresponde al valor de la probeta cuando se fractura, la carga P_i , que es la carga máxima que soporto la probeta, se divide entre la sección inicial A de la probeta.



Figura 6.2. Probeta con galga para obtención de deformaciones.

Para obtener el módulo de elasticidad dirección axial E_1 , se emplea una definición de módulo cuerda, que consiste en obtener la pendiente en la zona elástica, tomando dos puntos, correspondiente a los valores en la deformación longitudinal de 1000 y 3000 $\mu\epsilon$, de acuerdo con la norma ASTM D3039 [82].

Para la relación de Poisson longitudinal-transversal ν_{12} , se obtiene del valor negativo de la división de la diferencia de deformaciones transversales entre la diferencia de la deformación longitudinal, ambos en el mismo intervalo de 1000-3000 $\mu\epsilon$. El esfuerzo cortante máximo en el plano τ_{12max} , se cortaron cinco muestras con orientación ($\pm 45^\circ$) y se obtiene al dividir P_i entre dos veces el valor del área transversal. El módulo de elasticidad de corte G_{12} se calcula obteniendo la pendiente que existe se en el rango de 1500 a 2500 $\mu\epsilon$.

En la Figura 6.3 Se muestra como fueron colocadas las probetas en la máquina de ensayo, hasta el punto de fractura. Aquí se aprecia que las muestras ya tienen adheridas las galgas y de igual manera estas galgas por medio de cables ya están conectadas al P3. En primer imagen de derecha a izquierda se observa la probeta de policarbonato solo, en la imagen central se observa la probeta de policarbonato reforzada con fibras orientadas a $0/90^\circ$ y en la ultima imagen se observa la probeta ya ensayada de policarbonato reforzada con fibras orientadas a $-45/45^\circ$.



Figura 6.3. Ensayo de tensión para probetas de policarbonato solo y policarbonato reforzado.

Para la tenacidad, que es la energía total que es capaz de absorber o acumular un material antes de alcanzar la rotura en condiciones de impacto, se obtuvo el área bajo la curva de esfuerzo máximo a tensión y deformación máxima. Esto debido a que el material que se caracterizó es un policarbonato y como se menciona en el estado del arte, es un material utilizado principalmente para protección o ciertos casos escudos de protección [43].

6.3. Resultados.

Los resultados de la caracterización física se muestran en la Tabla 6.3.1, donde aparecen las fracciones volumétricas de fibra, matriz y poros, así como los valores medios, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Tabla 6.3.1: Fracciones volumétricas.

Probeta	V_f	V_m	V_p
Pc/ Fibra de vidrio 1	0.047	0.927	0.026
Pc/ Fibra de vidrio 2	0.047	0.936	0.018
Pc/ Fibra de vidrio 3	0.048	0.936	0.016
Pc/ Fibra de vidrio 4	0.044	0.941	0.015
Pc/ Fibra de vidrio 5	0.034	0.953	0.013
Pc/ Fibra de vidrio 6	0.035	0.962	0.003
Pc/ Fibra de vidrio 7	0.041	0.939	0.020
Pc/ Fibra de vidrio 8	0.032	0.945	0.023
\bar{x}	0.041	0.942	0.017
s	0.006	0.011	0.007
CV	0.157	0.012	0.412

Para los ensayos mecánicos, primero se presentan las dimensiones de los especímenes utilizados en la Tabla 6.3.2, área A , ancho b y espesor e_c ; a continuación, se presentan las curvas esfuerzo - deformación para las probetas de policarbonato de la Figura 6.4, para las muestras de fibra de vidrio / policarbonato 0/90 de la Figura 6.5 y para la fibra de vidrio / policarbonato con una alineación de $\pm 45^\circ$ en la Figura 6.6.

Para el esfuerzo máximo de corte del policarbonato se muestran en la Figura 6.7 y para el esfuerzo máximo de corte del policarbonato reforzado con una alineación de $\pm 45^\circ$ en la Figura 6.8.

Tabla 6.3.2: Medidas generales de las probetas.

Probeta.	e_c (mm)	b (mm)	A (mm ²)		e_c (mm)	b (mm)	A (mm ²)		e_c (mm)	b (mm)	A (mm ²)
P1-0-90	2.82	25.05	70.64	p1-45	2.75	25.07	68.94	PPc-1	2.57	25.12	64.51
P2-0-90	2.43	25.04	60.85	p2-45	2.61	25.00	65.25	PPc-2	2.00	24.73	49.46
P3-0-90	2.91	25.45	74.06	p3-45	3.24	25.21	81.68	PPc-3	2.40	25.59	61.42
P4-0-90	3.26	25.33	82.58	p4-45	2.84	25.23	71.65	PPc-4	2.98	25.65	76.44
P5-0-90	2.82	25.19	71.04	p5-45	2.98	25.41	75.72	PPc-5	2.58	24.90	64.24
\bar{x}	2.84	25.21	71.49		2.88	25.18	72.43		2.49	25.20	62.61
s	0.26	0.16	6.97		0.21	0.14	5.67		0.32	0.37	8.60
CV	0.09	0.01	0.10		0.07	0.01	0.08		0.13	0.01	0.14

Los valores experimentales del módulo elástico E_1 , del módulo de corte G_{12} , de la resistencia máxima a la tracción σ_{\max}^T , de la resistencia máxima al corte τ_{\max} y del coeficiente de Poisson ν_{12} se muestran en la Tabla 6.3.3 para policarbonato, Tabla 6.3.4

para policarbonato con 0/90 reforzado y Tabla 6.3.5 para policarbonato con refuerzo ± 45 .

Policarbonato sin refuerzo

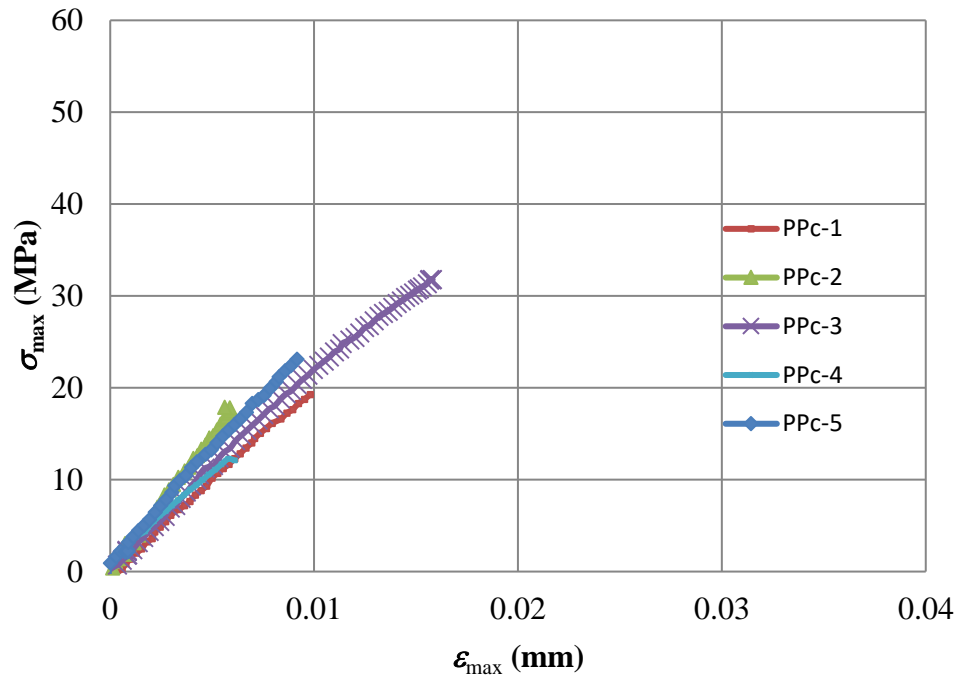


Figura 6.4: Grafica esfuerzo máximo de ruptura vs deformación máxima de ruptura de policarbonato sin refuerzo.

Policarbonato reforzado con fibra de vidrio del tipo telar orientado -0/90°.

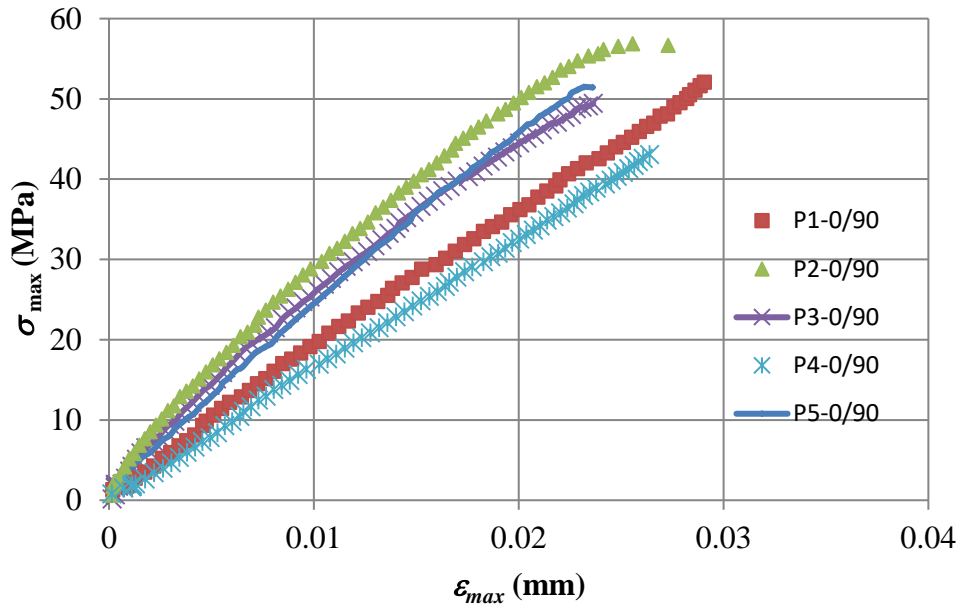


Figura 6.5: Grafica esfuerzo máximo de ruptura vs deformación máxima de ruptura de policarbonato reforzado con vidrio del tipo telar orientado 0/90°.

Policarbonato reforzado con fibra de vidrio del tipo telar orientado $\pm 45^\circ$.

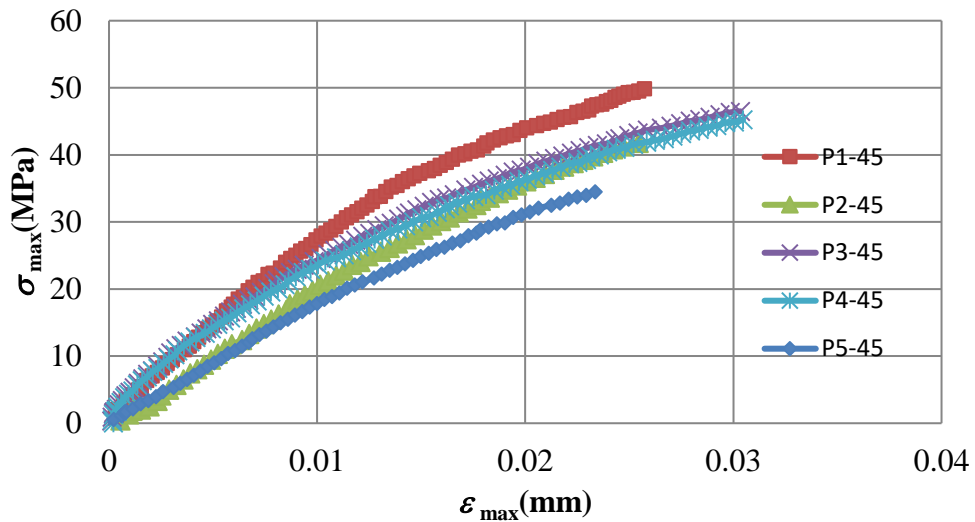


Figura 6.6. Grafica esfuerzo máximo de ruptura vs deformación máxima de ruptura de policarbonato reforzado con fibra de vidrio del tipo telar orientado $\pm 45^\circ$.

Policarbonato sin refuerzo.

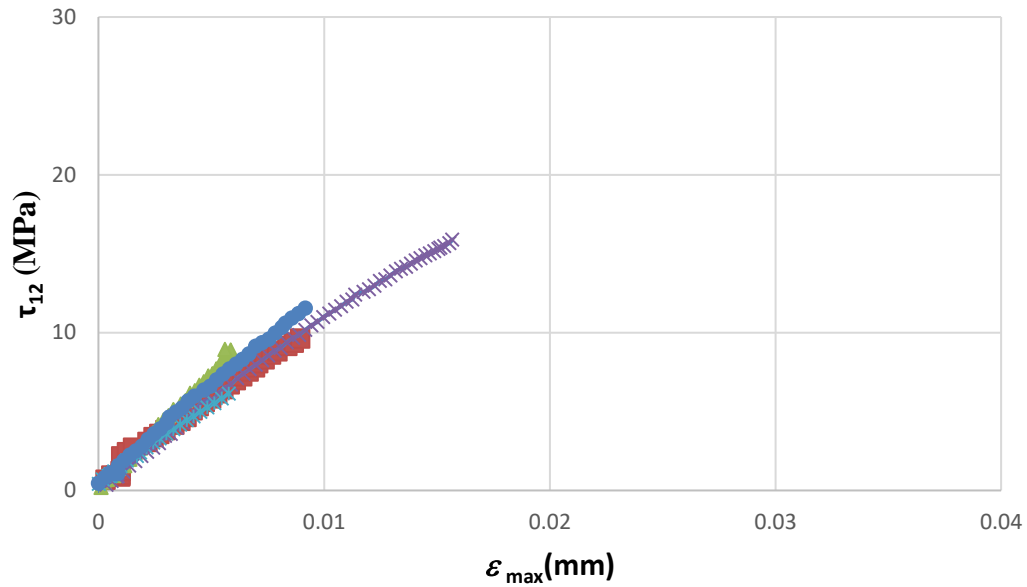


Figura 6.7. Grafica esfuerzo máximo de corte vs deformación máxima de ruptura de policarbonato.

Policarbonato reforzado con fibra de vidrio del tipo telar orientado $\pm 45^\circ$.

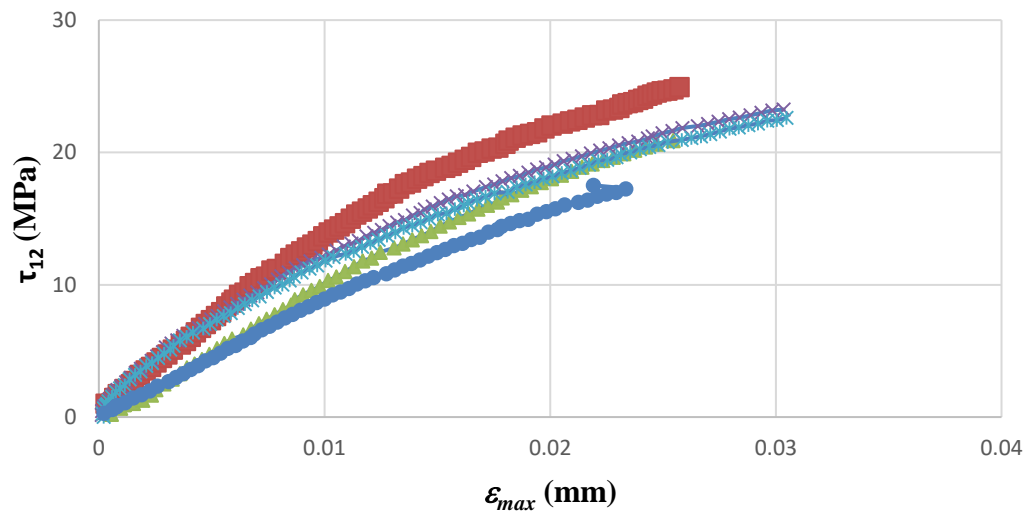


Figura 6.8. Grafica esfuerzo máximo de corte vs deformación máxima de ruptura de policarbonato reforzado con fibra de vidrio del tipo telar orientado $\pm 45^\circ$.

Tabla 6.3.3: Propiedades mecánicas de policarbonato sin refuerzo.

Probeta	$E_1(\text{MPa})$	$\sigma_{1\max}^T(\text{MPa})$	ν_{12}	$G_{12}(\text{MPa})$	$\sigma_{1\max}^T/\rho$ (10^2 (Ncm)/g)	E_1/ρ (10^2 Ncm/g)	ϵ_{1rup}	$\int \sigma_1 d\epsilon_1$ (J cm^3)
PPc-1	2235.8531	20.394	0.405	795.314	17.115	1876.345	0.009	0.095
PPc-2	3336.967	17.880	0.371	1216.588	15.005	2800.409	0.005	0.050
PPc-3	2457.158	31.801	0.340	916.338	26.688	2062.066	0.015	0.270
PPc-4	1914.646	12.265	0.380	693.283	10.292	1606.786	0.006	0.043
PPc-5	2539.965	23.106	0.378	921.505	19.390	2131.558	0.009	0.111
\bar{x}	2496.918	21.089	0.375	892.543	17.698	2095.433	0.009	0.114
s	528.278	7.201	0.023	196.391	6.043	443.335	0.004	0.092
CV	0.211	0.341	0.062	0.220	0.341	0.211	0.433	0.808

Tabla 6.3.4: Propiedades mecánicas de policarbonato con refuerzo de fibra de vidrio del tipo telar orientado 0/90°.

Probeta	E_{1c} (MPa)	σ_{1max}^T (MPa)	ν_{12}	σ_{1max}^T/ρ (10^2 (N cm)/g)	E_1/ρ (10^2 N cm/g)	ϵ_{1rup}	$\int \sigma_1 d\epsilon_1$ (J cm ³)
P1-0-90	1838.98	52.07	0.34	41.934	1481.085	0.029	0.773
P2-0-90	3260.84	56.85	0.38	45.788	2626.221	0.025	0.960
P3-0-90	3021.81	50.42	0.50	40.610	2433.711	0.017	0.667
P4-0-90	1484.08	43.44	0.25	34.989	1195.252	0.026	0.564
P5-0-90	2200.77	51.47	0.25	41.453	1772.459	0.023	0.660
\bar{x}	2361.29	50.85	0.34	40.955	1901.746	0.024	0.725
s	760.52	4.82	0.10	3.881	612.506	0.004	0.150
CV	0.32	0.09	0.30	0.094	0.322	0.180	0.208

Tabla 6.3.5: Propiedades mecánicas de policarbonato con refuerzo de fibra de vidrio del tipo telar orientado -45/45°.

Probeta	G_{12c} (MPa)	τ_{12max} (MPa)	σ_{1max}^T/ρ (10^2 (N cm)/g)	E_1/ρ (10^2 N cm/g)	ϵ_{1rup}	$\int \sigma_1 d\epsilon_1$ (J cm ³)
P1-45	923.880	0.040	41.032	2202.624	0.025	0.775
P2-45	907.330	0.032	34.059	1441.535	0.025	0.592
P3-45	792.880	0.046	43.230	2434.689	0.030	0.899
P4-45	710.450	0.048	37.794	2134.575	0.030	0.867
P5-45	726.480	0.030	28.218	1334.986	0.021	0.446
\bar{x}	812.200	0.039	36.867	1909.682	0.026	0.716
s	99.500	0.008	5.945	490.270	0.003	0.192
CV	0.120	0.205	0.161	0.256	0.135	0.268

Capítulo 7: Discusión de resultados.

Por medio de la simulación CAE de inyección, se pudo determinar la fuerza máxima de cierre de la maquina inyectora, la presión máxima en el punto de inyección, la velocidad de recorrido de los actuadores neumáticos, así como la velocidad de compactación.

Dentro de ese proceso se observó que la temperatura del policarbonato no se pudo establecer por debajo de 320 °C, porque no permitió que el flujo avanzara durante la etapa de compresión, por lo que se encontró que uno de los policarbonatos que resisten la temperatura de 320-325 ° es Makrolon [94].

Las muestras de policarbonato reforzado con una capa de fibra de vidrio tejida con una orientación de 0/90 ° y ± 45 ° han demostrado una pequeña distorsión en la orientación de la fibra. Para el caso de muestras de 0/90 °, la desviación máxima se muestra con 2.58 °, lo que representa una desalineación causada por la etapa de compresión, en esta etapa el flujo que se encuentra cerca del punto de inyección tiende a estar a una menor temperatura que la del resto del flujo, por lo que en el momento de realizar la compactación cierto material tiende a regresarse a la boquilla del molde causando alteración en las fibras. Esto también sucedió en 0°, donde la desviación estándar máxima es de 0.98° y las muestras a + 45 ° tienen una desviación estándar de 1.86 °, y para las fibras a -45° tienen un valor de 1.11 °.

La orientación para las fibras de 45 °, son valores mayores a los de 0/90°, debido al factor humano en la manipulación de las fibras después de ser cortadas, de igual forma al ir preparando los insertos de película, la orientación de las fibras pudo haber aumentado.

Los valores promedio de la caracterización física indican un 4.10 % del contenido de fibra de vidrio y un 94.2 % de matriz y un 1.7 % de porosidad.

Los resultados de las pruebas mecánicas indican que la relación de Poisson y el módulo de elasticidad no presentan diferencias entre las muestras de policarbonato reforzadas y no reforzadas. Por lo que las curvas de esfuerzo - deformación, para las probetas de policarbonato tienen un esfuerzo máximo promedio de 20.11 MPa y las probetas reforzadas con fibra de vidrio tiene un esfuerzo máximo de 50.66 MPa.

Los esfuerzos máximos cortantes para probetas de policarbonato tienen un esfuerzo máximo promedio de 10.54 MPa y las probetas reforzadas con fibra de vidrio tiene un esfuerzo máximo de corte de 22.84 MPa.

Conclusión.

Se exploró un método para fabricar laminados en material compuesto de policarbonato reforzados con fibra de vidrio del tipo telar. Por medio de los métodos tradicionales de inyección y compresión no son factibles para reforzar el policarbonato con fibras de vidrio en tela [48], sin algún tratamiento químico en las fibras, debido a que en el proceso de compresión la muestra se destruye, tanto fibras como el policarbonato, durante el desmoldeo, sufre degradación por tiempo de residencia y con el proceso de inyección las fibras son arrastradas durante la inyección al fondo de la cavidad, esto se debe a que las fibras pierden la alineación deseada.

Por lo que se desarrolló el proceso de moldeo por inyección y compresión de inserto de película o Film Injection Compression Molding (FICM), este método fue desarrollado durante la investigación ya que no se encontró alguna referencia o desarrollo del proceso por lo que se diseñó y manufacturo un molde de inyección con modificaciones para incorporar la compresión e inserción de películas de policarbonato.

Durante la simulación, se pueden obtener valores tanto de inyección como de compresión en el proceso. Sin embargo, en la simulación, no se puede determinar la adhesión parcial o total entre los dos tipos de policarbonato. Por lo tanto, se deben realizar pruebas mecánicas para determinar si hay alguna adhesión entre la fibra y el policarbonato, para determinar si existe alguna mejora en las propiedades mecánicas [95].

Otro factor importante que la simulación no cuenta es cómo medir la orientación real de las fibras tejidas colocadas durante la etapa de inyección y compactación. Cabe mencionar que este factor se determinó en la máquina y se realizaron varias configuraciones para obtener los resultados deseados.

La orientación de la fibra en una pieza terminada varía de una ubicación a otra, esto a causa de la compactación, ya que el flujo cercano al punto de inyección tiende a regresarse por lo que puede alterar la orientación de la fibra. El factor humano también afecta la orientación de las fibras ya que no se tiene la precisión de manipular las fibras con las manos. Las partes reforzadas con fibra son inherentemente más rígidas debido a la presencia de fibras. En consecuencia, la orientación de las fibras en la pieza moldeada reforzada se convierte en un desafío mayor.

Los resultados de las pruebas mecánicas indican que la relación de Poisson y el módulo de elasticidad no presentan diferencias entre las muestras de policarbonato reforzadas y no reforzadas. La resistencia a la tracción de las muestras de policarbonato reforzado muestra un incremento del 141 % con respecto al policarbonato sin refuerzo.

Las curvas de esfuerzo - deformación, el esfuerzo para las probetas de policarbonato tiene esfuerzo máximo promedio de 20.11 MPa y una relación de Poisson media de 0.37. Las curvas de esfuerzo-deformación del ensayo de tracción de muestras de policarbonato reforzado con fibra de vidrio con una orientación de fibra de 0/90 ° se muestran en la Fig. 6.4, el policarbonato reforzado muestra un esfuerzo máximo de 50.66 MPa a tensión, y una relación de Poisson de 0.33 que muestra que no hay modificaciones notables en la relación de Poisson.



Se obtuvo un aumento del esfuerzo máximo de 2.5 veces con respecto al policarbonato solo y aumento de 2.16 veces el esfuerzo máximo de corte con respecto al policarbonato solo.



Trabajos a futuro.

Proceso.

Las siguientes sugerencias de trabajos a futuro se proponen

- Agregar fibra de vidrio corta al proceso, para visualizar el comportamiento del flujo y la interacción con la fibra de vidrio del tipo telar.
- Fabricar piezas con otras geometrías de mayor complejidad, tales alabes para analizar su factibilidad.
- Cambiar materiales.
- Lograr simular por medio de insertos, la fibra de vidrio en el proceso.

Caracterización mecánica.

Los siguientes objetivos planeados son:

- Proponer un modelo matemático para entender la interacción de la fibra con el policarbonato y explicar el aumento del esfuerzo máximo en los ensayos realizados.

Referencias

- [1] IIE-PNUD (2006), Plan de acción para eliminar barreras para el desarrollo de la generación Eolo eléctrica en México, Programa conjunto del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Instituto de Investigaciones Eléctricas, disponible en: <http://planeolico.iie.org.mx/iiepnud.htm>
- [2] G.M. Joselin Herbert, S. Iniyan, E. Sreevalsan and S. Rajapandian. (2007) A review of wind energy technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, issue 6, 1117-1145.
- [3] J.K.Kaldellis.(2010).Stand-alone and hybrid wind energy systemsTechnology, energy storage and applications.Chapter 5 .pp 165 -180 . 2010
- [4] E.B. Mano, (1996). *Polimeros como materiais de engenharia*, Editora Edgard Blücher, Sao Paulo.
- [5] Alcock, B., Cabrera, N.O., Barkoula, N.M., Wang, Z., Peijs, T. (2008), The effect of temperature and strain rate on the impact performance of recyclable all polypropylene composites. *Compos. Part B-Eng.* 39 (3), 537e547.
- [6] Santos, P.A., Spinac_e, M.A., Feroselli, K.K., Paoli, M.A.(2007).Polyamide 6/vegetal fiber composite prepared by extrusion and injection molding. *Compos. Part AAppl. S* 38 (12), 2404e2411.
- [7] Liu, W., Zhao, H.B., Inoue, Y.K., Wang, X., Bradford, P.D., Kim, H., Qiu, Y.P., Zhu, Y.T. (2012).Poly (vinyl alcohol) reinforced with large-diameter carbon nanotubes via spray winding. *Compos. Part A-Appl. Sci. Manuf.* 43 (4), 587-592.
- [8] Lu, Y., Broughton, J., Winfield, P.(2014). A review of innovations in disbanding techniques for repair and recycling of automotive vehicles. *Int. J. Adhes. Adhes.* 50, 119-127.
- [9] Sopher, M., Carreau, P. J., Moan, M., & Ausias, G. (2004). Rheological properties of short fiber model suspensions. *Journal of Rheology*, 48(5), 1023–1048.
- [10] Le Corre, S., Dumont, P., Orgéas, L., & Favier, D. (2005). Rheology of highly concentrated planar fiber suspensions. *Journal of Rheology*, 49(5), 1029–1058.
- [11] Ustunel U. (2006).Modern multiaxials improve performance. *Reinforced Plastics*.Vol.50 p 34-38
- [12] S.Laurenzi,A.Grilli,M.Pinna.(2014).Process simulation for large composite aeronautic beam by resin transfer molding.*Composites*. Vol 57.p 47-55
- [13] F.Rezaei, R.Yunus, N.A.Ibrahim.(2009) Effect of fiber lenght on thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polypropylene composites. *Materials and Design*.Vol.30 P.260-263

- [14] Hameed, M. S., & Afaq, S. K. (2013). Design and analysis of a straight bladed vertical axis wind turbine blade using analytical and numerical techniques. *Ocean Engineering*, 57, 248–255.
- [15] Veers, P. S., Ashwill, T. D., Sutherland, H. J. (2003). Trends in the Design, Manufacture and Evaluation of Wind Turbine Blades, *Wind Energy*, 6(3), pp. 245-259.
- [16] K. Yamada, K. Tomari, T. Harada, H. Hamada, N. Ikuta. (2001) Effect of urethane binder on fiber reinforced polycarbonate injection moldings. *Composite Interfaces*, Vol. 8, No. 6, pp. 403–413
- [17] Hameed, M. S., & Afaq, S. K. (2013). Design and analysis of a straight bladed vertical axis wind turbine blade using analytical and numerical techniques. *Ocean Engineering*, 57, 248–255.
- [18] Thomse, O. T. (2009). Sandwich Materials for Wind Turbine Blades-Present and Future. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. Vol. 11 p. 7-26
- [19] Richardson, R. (2010). New Design Tool Improves Manufacture of Composite Wind Turbine Blades. *Power*. vol 154. p. 62-65
- [20] Karian H. (2003). *Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites revised and expanded*. CRC Press.
- [21] Richardson M, Wisheart M. (1996). Review of low-velocity impact properties of composite materials. *Compos A Appl Sci Manuf*; 27:1123–31.
- [22] Srinivasan, T., Palanikumar, K., Rajagopal, K. (2014). Influence of Thrust Force in Drilling Of Glass Fiber Reinforced Polycarbonate (GFR/PC) Thermoplastic Matrix Composites using Box-Behnken Design. *Procedia Materials Science* 5 2152-2158
- [23] Parvin Shokria, Naresh Bhatnagarba. (2012). Effect of the Post-Filling Stage on Fiber Orientation at the Mid-Plane in Injection Molding of Reinforced thermoplastics. *Physics Procedia* 25 79 – 85
- [24] Jung-Wook Wee, Sang-Yoon Park, Byoung-Ho Choi. (2015) Observation and understanding of scratch behaviors of glass fiber reinforced polycarbonate plates with various packing pressures during the injection molding process. *Tribology International*. Vol. 2015 P. 491-501.
- [25] Heidar Pour, R., Soheilmoghaddam, M., Hassan, A., & Bourbigot, S. (2015). Flammability and thermal properties of polycarbonate /acrylonitrile-butadiene-styrene nanocomposites reinforced with multilayer graphene. *Polymer Degradation and Stability*, 120, 88–97.
- [26] Keisuke Tanaka. (2014). Effect of fiber orientation on fatigue crack propagation in short-fiber reinforced plastics. *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 123. p. 44-58



- [27] Cem Ozkana, N. Gamze Karşlıb, Ayşe Aytac. (2014). Short carbon fiber reinforced polycarbonate composites: Effects of different sizing materials. *Composites Part B: Engineering*. Vol.62. p230-235
- [28] Nodo, K., Leong, Y. W., & Hamada, H. (2012). Effect of knitted and woven textile structures on the mechanical performance of poly(lactic acid) textile insert injection-compression moldings. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(S2), E200–E207.
- [29] F.C Campbell. *Structural Composites Materials*. Chapter 1. Pp 1-29 .ASM INT 2010.
- [30] Michaeli, W./Wegener, M. (1992). *Tecnología de los composites/plásticos reforzados*. Hanser Publishers. Barcelona.
- [31] Suong V.Hoa.(2009). *Principles of manufacturing composites materials*. Chapter 2. Pp 2-54 DeschTech.
- [32]. Wang, J., Mao, Q., & Chen, J. (2013). Preparation of polypropylene single-polymer composites by injection molding. *Journal of Applied Polymer Science*, 130(3), 2176–2183
- [33] Mehdi Moayyedian, Kazem Abhary, Romero Marian. (2015) .New Design Feature of Mold For Scrap Reduction. *Procedia Manufacturing* 2 P. 241-245
- [34] Shih-Hsing Chang, Jiun-Ren Hwang, Ji-Liang Doong.(1999). Optimization of the injection molding process of short glass fiber reinforced polycarbonate composites using grey relational analysis. *Journal of Materials Processing Technology* 97 p.186-193.
- [35]. Jian Wang, Qianchao Mao, Jinnan Chen Alei. P.E. (2013). Preparation of Polypropylene Single-Polymer Composites by Injection Molding. *Applied Polymer Science*.
- [36] Sun Il Hwang. (2003). Technical Development Trend of functional composite, Korea Institute of science and technology information, p1-p8
- [37] Gin Ho Kim, “A Study on Fracture Strength of Carbon Fiber Reinforced Composite Materials Using Injecting Mold” Chonbuk University Ph.D Thesis, 2013, p31-33
- [38] Whying Le Lee , sung Min Ha, Yung Jae RYU, Sung Goo Lee, Recent Reserch and Development Trend of Thermal conductivity Polymer composite, p30-p33
- [39] T. Matsuoka, J. Takabatake, Y. Inoue, and H. Takahashi. (1990). Prediction of fiber orientation in injection molding parts of short-fiber-reinforced thermoplastics,” *Polym. Eng. Sci.*, 30, 957-966.
- [40] G. S. Springer and Q. Wang. (1994). The effects of form on the mechanical properties of glass fiber reinforced composites,” *J. Rein. Plastics Compos.*, 13, 448-466.



- [41] A. J. Pontes, N. M. Neves, and A. S. Pouzada. (2003). The role of the interaction coefficient in the prediction of the fiber orientation in planar injection moldings,” *Polym. Compos.*, 24, 358-366.
- [42] Fraser RAW, Ward IM. (1977) The impact fracture behaviour of notched specimens of polycarbonate. *J Mater Sci*; 12(3):459–68.
- [43] Inberg JPF, Gaymens RJ. Polycarbonate and co-continuous polycarbonate/abs
- [44] S. Yang and B. (2008) Boulet in *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS)*, San Francisco, CA, USA.
- [45] Asthana, Rajiv, Kumar, Ashok, Dahotre, Narendra B. (2006). *Materials Processing and Manufacturing Science*. Butterworth-Heinemann. p.398
- [46] Makrolon 2407, Polycarbonate resins, High productivity UV-Stabilized Grade with release, Bayer Materials Science
- [47]. T.Chen, P.Xue, M.Jia. (2015) The Property of Polycarbonate/Acrylonitrile Butadiene Styrene-Based Conductive Composites Filled by Nickel-Coated Carbon Fiber and Nickel–Graphite Powder. *Polym. Eng. Sci*.
- [48] Smith, F. C., Moloney, L. D., Matthews, F. L., & Hodges, J. (1996). Fabrication of woven carbon fibre/polycarbonate repair patches. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27(11), 1089–1095.
- [49] Drozdov, A. D., Al-Mulla, A., & Gupta, R. K. (2003). The viscoelastic behavior of melts of virgin and recycled polycarbonate reinforced with short glass fibers. *Mechanics Research Communications*, 30(6), 595–614.
- [50] Srinivasan.T, Palanikumar.K, Rajagopal.K. (2014). Influence of Thrust Force in Drilling Of Glass Fiber Reinforced Polycarbonate (GFR/PC) Thermoplastic Matrix Composites using Box-Behnken Design. *Procedia Materials Science* 5.2152-2158
- [51] Yang, Y.-K., Yang, R.-T., & Tzeng, C.-J. (2012). Optimization of mechanical characteristics of short glass fiber and polytetrafluoroethylene reinforced polycarbonate composites using the neural network approach. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 3783–3792.
- [52] Zhu, P., Liu, X., Wang, Y., Guan, C., Yang, Y., Zhu, J., Frost, R. L. (2017). Production and characterization of recycled polycarbonate based composite material containing recycled glass fibers. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(4), 3439–3446.
- [53] K. K. Biswas M. Ikueda and S. Somiya, Study on creep behavior of glass fiber reinforced polycarbonate. *Adv. Composite Mater.* (2001). Vol. 10, No. 2,3, pp. 265–273



- [54]Parkar, A., Nunn, R. E., Orroth, S. A., (1994).Fiber Length Degradation in the Feed Zone During Injection Molding, ANTEC.
- [55] Myong-Rae.(2013)Investigation of mechanical damping characteristic in short fiberglass reinforced polycarbonate composites.World Scientific Publishing Company. Vol.27 No. 15 p.1350108 1-13
- [56] Department of defense handbook.(2002) Composites Materials Handbook.Vol.3
- [57] Composite Materials Handbook, vol. 1, ch. 2. (2002)Departamento de Defensa de EUA.
- [58] Isaac M. Daniel, Ori Ishai.(2006).Engineering Mechanics of Composite Materials, second edition. Oxford University Press.
- [59]Michaeli/Wegener/Capella.(1992)Tecnología de los composites/plásticos reforzados.Hanser Editorial, Barcelona. P.31
- [60] Song, Y., Gandhi, U., Sekito, T., Vaidya, U. K., Vallury, S., Yang, A., & Osswald, T. (2018). CAE Method for Compression Molding of Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Composite Using Bulk Materials. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.
- [61] W.S. Guan, H.X. Huang.(2012).Back melt flow in injection-compression molding: Effect on part thickness distribution, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39 792-797.
- [62] I. Min, K. Yoon. (2011) An experimental study on the effects of injection-molding types for the birefringence distribution in polycarbonate discs, Korea-Australia Rheology Journal, 23 155.
- [63] S.C. Chen, Y.C. Chen, N.T. Cheng, M.S. Huang. (1998).Simulation of injection-compression mold-filling process, International Communications in Heat and Mass Transfer, 25 907-917.
- [64] W.B. Young. (2005) .Effect of process parameters on injection compression molding of pickup lens, Applied Mathematical Modelling, 29 955-971.
- [65] S.Y. Kim, H.J. Oh, S.H. Kim, C.H. Kim, S.H. Lee, J.R. Youn. (2008). Prediction of residual stress and viscoelastic deformation of film insert molded parts, Polym. Eng. Sci. 48 1840–1847.
- [66] S.Y. Kim, S.H. Lee, J.R. Youn, Warpage of film insert molded parts and optimum processing conditions, Int. Polym. Proc. 25 (2010) 109–117. [3] Y.W. Leong, S. Yamaguchi, M. Mizoguchi, H. Hamada, U.S. Ishiaku, T. Tsujii, The effect of molding conditions on mechanical and morphological properties at the interface of film insert injection molded polypro



- [67] Y.W. Leong, S. Yamaguchi, M. Mizoguchi, H. Hamada, U.S. Ishiaku, T. Tsujii. (2004) .The effect of molding conditions on mechanical and morphological properties at the interface of film insert injection molded polypropylene-film/polypropylene matrix, Polym. Eng. Sci. 44 2327–2334.
- [68] A.I. Isayev, M. Dekker.(1987)Injection and Compression Molding Fundamentals, Taylor & Francis.
- [69] L.J. Lee, J.D. Fan, J. Kim, Y.T. Im. (1991)Flow analysis of sheet molding compounds in compression molding, Int. Polym. Proc. 6 61–72.
- [70]Peter Jones.(2008). The Mould Design Guide.Smithers Rapra. P.6
- [71]Kennedy, P. , Zheng, R. (2013)Flow Analysis of Injection Molds 2E. Hanser Publishers, Munich ,Hanser Publications, Cincinnati.
- [72].W.Cao,Z.Min,S.Zhang,T.Wang,J.Jiang,H.Li,Y.Wang,C.Shen.(2016)Numerical Simulation for Flow-Induced Stress in Injection/Compression Molding. Polym. Eng. Sci.
- [73] Joao Azenha,¹ Marta Gomes,² Pedro Silva,³ Antonio J. Pontes ¹. (2018)High Strength Injection Molded Thermoplastic Composites, POLYM. ENG. SCI.VC 2018 Society of Plastics Engineers.
- [74] Zhihao Zuo, Zhiliang Fan, Franco Costa, David Astbury. (2016) Warpage Simulation of injection over-molding plastic on continuous fiber reinforced composites, SPE ANTEC™ Indianapolis.
- [75] Kazmer, D. (2016).Injection Mold Design Engineering 2E. Hanser Publishers, Munich,Hanser Publications, Cincinnati
- [76]A.Chvalier.(2002) Dibujo Industrial, LIMUSA, Mexico.
- [77] ASTM International, D3800, Standard Test Method for Density of High-Modulus Fibers.
- [78] ASTM D3039 / D3039M-17, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org
- [79] ASTM D3518 / D3518M-18, Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org
- [80] S.Takayuki, H.Daisuke, T. yoshitaka, O.Akio, N.Asami, Braiding pultrusion system for continuous fiber reinforced thermoplastic composite. ANTEC 2010.
- [81] ASTM D3039 / D3039M-17, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.



- [82] Huang, M.-S. (2007). Cavity pressure based grey prediction of the filling-to-packing switchover point for injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 183(2-3), 419–424.
- [83] Peter Jones. *The Mould Design Guide*. Smithers Rapra. 2008. P.6
- [84] Kennedy, P. , Zheng, R. *Flow Analysis of Injection Molds 2E*, 2013
- [85] Huang, M.-S. (2007). Cavity pressure based grey prediction of the filling-to-packing switchover point for injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 183(2-3), 419–424.
- [86] W. Cao, Z. Min, S. Zhang, T. Wang, J. Jiang, H. Li, Y. Wang, C. Shen. *Numerical Simulation for Flow-Induced Stress in Injection/Compression Molding*. *Polym. Eng. Sci.* 2016
- [87] Joao Azenha, 1 Marta Gomes, 2 Pedro Silva, 3 Antonio J. Pontes 1, *High Strength Injection Molded Thermoplastic Composites*, *POLYM. ENG. SCI.*, 2018. VC 2018 Society of Plastics Engineers.
- [88] Zhihao Zuo, Zhiliang Fan, Franco Costa, David Astbury, *Warpage Simulation of injection over-molding plastic on continuous fiber reinforced composites*, *SPE ANTEC™ Indianapolis 2016*
- [89] Kazmer, D, *Injection Mold Design Engineering 2E*, Hanser, Germany 2016.
- [90] A. Chevalier, *Dibujo Industrial*, LIMUSA, Mexico 2002.
- [91] ASTM International, D3800, *Standard Test Method for Density of High-Modulus Fibers*.
- [92] ASTM International, D3518, *Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate* Standard Test Method for Density of High-Modulus Fibers.
- [93] *Strain Indicator and Recorder P3* , Vishay Precision Group, Micro-Measurements. <http://www.vishaypg.com/docs/11102/p3.pdf>
- [94] Makrolon 2407, Polycarbonate resins, Bayer Material Science-2006-07-18, ISO 7391-PC, MLR, 49-18-9. plastics.bayer.com
- [95] S. Takayuki, H. Daisuke, T. Yoshitaka, O. Akio, N. Asami, *Braiding pultrusion system for continuous fiber reinforced thermoplastic composite*. ANTEC 2010.



ANEXOS.

● Anexo 1

Códigos G

G-code es un lenguaje de programación para CNC que le indica a las máquinas dónde y cómo moverse. La mayoría de las máquinas hablan un “dialecto” diferente de código g, por lo que los códigos varían según el tipo, la marca y el modelo. Cada máquina viene con un manual de instrucciones que muestra el código de esa máquina en particular para una función específica.

El código G significa "código geométrico" y sigue algunas variaciones del patrón alfanumérico:

N## G## X## Y## Z## F## S## T## M##

- N: número de línea
- G: movimiento
- X: posición horizontal
- Y: posición vertical
- Z: Profundidad
- F: Velocidad de avance
- S: velocidad del husillo
- T: selección de herramientas
- M: Funciones varias
- I y J: centro incremental de un arco.
- R: Radio de un arco.

Los códigos alfanuméricos se utilizan para la programación, ya que son una forma sencilla de:

- Definir movimiento y función (G ##)
- Declara una posición (X ## Y ## Z ##)
- Establecer un valor (F ## y / o S ##)
- Seleccione un artículo (T ##)
- Encienda y apague algo (M ##), como refrigerante, husillos, movimientos de indexación, bloqueos de ejes, etc.

Por ejemplo,

G01 X1 Y1 F20 T01 M03 S500

generalmente indicaría un movimiento de alimentación lineal (G01) a la posición XY dada a una velocidad de alimentación de 20. Está usando la Herramienta 1, y la velocidad del husillo es 500. Las diferentes funciones variarán de una máquina a otra, por lo que para saber cuál es la significa m-code, el manual de instrucciones de la máquina deberá ser referenciado.



Movimiento de la máquina

Todo lo que una máquina puede hacer se basa en tres tipos básicos de movimiento:

Movimiento rápido: un movimiento lineal a una posición XYZ lo más rápido posible

Movimiento de avance: un movimiento lineal a una posición XYZ a una velocidad de avance definida

Movimiento circular: un movimiento circular a una velocidad de avance definida

Cada código G le dice a la máquina qué variación de estos movimientos básicos debe realizar y cómo hacerlo.

X e Y son coordenadas cartesianas para la posición horizontal y vertical, y Z representa la profundidad de la máquina. Estos números alfa seguirán el comando de movimiento / función (G) para declarar la posición de la máquina.

A continuación, F determina la velocidad de avance (para movimientos de avance o movimientos circulares), mientras que S determina la velocidad del husillo. T se utiliza para seleccionar una herramienta. Otros números alfa utilizados en la programación pueden incluir I, J y R, que tienen que ver con los centros de arco y los radios.

Códigos misceláneos

La línea de un programa también puede incluir códigos m, que generalmente son códigos que le dicen a una máquina cómo realizar una acción. Si bien no se garantiza que sean iguales en todas las máquinas, algunos códigos estándar comunes son:

M00: Parada del programa

M01: Parada opcional del programa

M02: Fin del programa.

M03: Husillo en sentido horario

M04: Husillo en sentido antihorario

M05: Tope del husillo

M06: Cambio de herramienta

M08: Inundación de refrigerante

M09: Inundación de refrigerante

M30: Fin del programa / regreso al inicio.

M41: Rango de engranaje bajo del husillo

M42: Gama de alta velocidad del husillo

Modalidad

Al igual que una luz permanecerá encendida hasta que se apague, las funciones de código g (en los controladores que admiten la modalidad) permanecerán activas hasta que otro código las desactive. En otras palabras, solo una función puede estar activa en un momento dado. Para desactivar una función, simplemente seleccione una nueva función.

Ciclos enlatados

Los ciclos fijos son un tipo de condición modal que incorpora todos los movimientos para completar una tarea común en un solo código.

Por ejemplo, muchas veces G81 es un código para una función de perforación básica. En el caso de perforación básica, la herramienta tendría que ser 1) movida al punto de inicio de la ubicación del orificio, 2) rápida al plano de separación, 3) alimentada a la profundidad, y 4) rápida. ¡Eso sería cuatro líneas de código en el programa que tendrían



que repetirse para cada nueva posición de perforación! Con el ciclo fijo G81, solo es necesario especificar las ubicaciones de los orificios después de la activación. Los ciclos fijos como el G81 reducen significativamente la cantidad de código al incorporar múltiples movimientos en un código.

Existen algunos otros ciclos fijos comunes para taladrar por picadura, taladrar a presión y roscar.

Grupos de código modal

Los grupos de códigos modales permiten que haya múltiples códigos en una sola línea, pero solo puede haber un código de cada grupo en una línea. Esto se debe a que los códigos dentro de un grupo se anularán entre sí.

Los grupos modales para códigos g son:

Grupo 1 (movimiento): G00, G01, G02, G03, G80, G81, G82, G84, G85, G86, G87, G88, G89

Grupo 2 (selección de plano - XY, YZ, ZX): G17, G18, G19

Grupo 3 (modo absoluto / incremental): G90, G91

Grupo 5 (modo de velocidad de avance): G93, G94

Grupo 6 (unidades - pulgadas / milímetros): G20, G21

Grupo 7 (compensación del radio de corte - CRC): G40, G41, G42

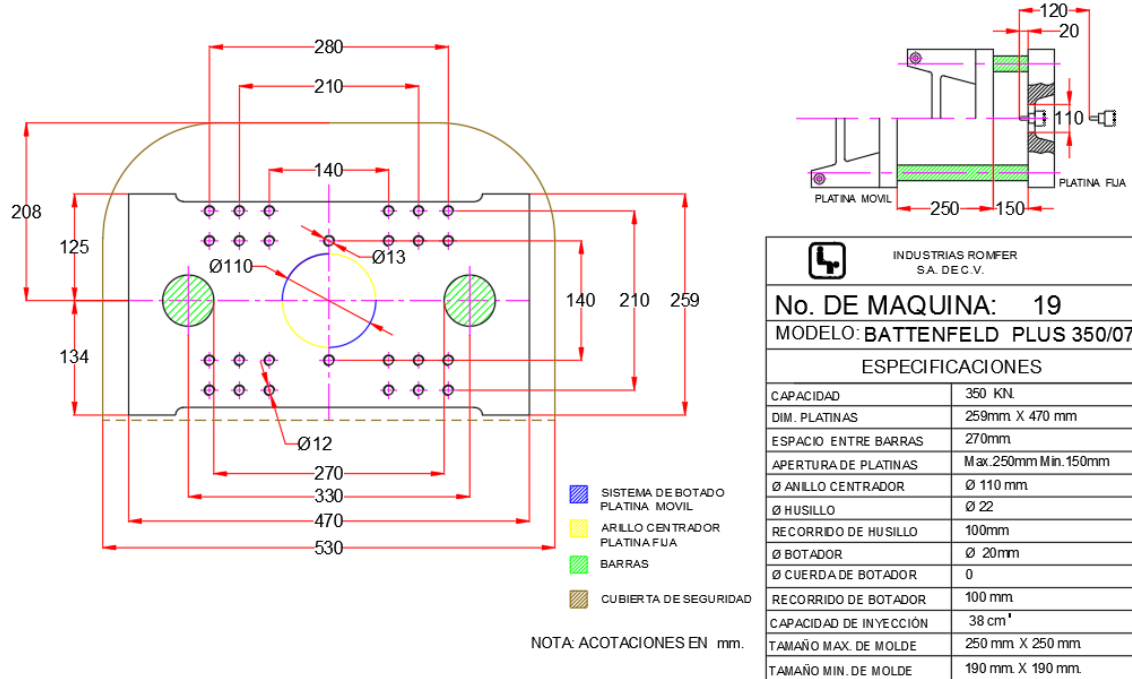
Grupo 8 (desplazamiento de longitud de herramienta - TLO): G43, G49

Grupo 10 (modo de retorno en ciclos fijos): G98, G99

Grupo 12 (selección de sistema de coordenadas de trabajo - WCSS): G54, G55, G56, G57, G58, G59)

• Anexo 2

Datos de manual de mantenimiento de Maquina inyectora Battenfeld Plus 350 TM



Unidad de inyección 350								
Diámetro tornillo sin fin	mm	inch	30	1,18	35	1,38	40	1,57
Presión de inyección específico	bar	psi	2835	41117	2083	30211	1595	23133
Cilindrada calculada	ccm	cu in	123	7,51	169	10,31	220	13,42
Peso por embolada máx. (poliestireno)	g	oz	110	3,88	153	5,40	198	6,98
Peso por embolada máx. (polietileno)	g	oz	86	3,03	119	4,20	154	5,43
Relación L/D de tornillo sin fin			22					
Recorrido de tobera	mm	inch	250	9,84	250	9,84	250	9,84
Fuerza de presión de tobera	kN	sh tn	86	9,48	86	9,48	86	9,48
Recorrido tornillo sin fin	mm	inch	175	6,89	175	6,89	175	6,89
Potencia calorífica cilindro	kW	7,7		10,4		12,1		
Número de puntos de regulación			1 + 3					
Accionamiento del tornillo sin fin (estándar)								
Velocidad máx. del tornillo sin fin	min-1		298					
Par del tornillo sin fin	Nm	lbf ft	621	458,03	621	458,03	621	458,03
Potencia plastificante (PS)	g/s	lb/h	11,2	88,89	15,5	123,02	16,1	127,78
Accionamiento del tornillo sin fin (aumentada)								
Velocidad máx. del tornillo sin fin	min-1		238					
Par del tornillo sin fin	Nm	lbf ft	490	361,41	490	361,41	490	361,41
Potencia plastificante (PS)	g/s	lb/h	8,9	70,99	12,4	98,25	12,9	102,05

