



# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**



## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA DE PULTRUSIÓN Y ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS VARIABLES PARA LA OBTENCIÓN DE PERFILES “O” DE MATERIAL COMPUESTO CON MATRIZ TERMOESTABLE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
MAGÍSTER EN DISEÑO, PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

**EDGAR FABIAN SÁNCHEZ CARRIÓN**

**edgar.sanchez01@epn.edu.ec**

**JONATHAN PAÚL JIMÉNEZ GONZALES**

**jonathan.jimenez02@epn.edu.ec**

**DIRECTOR:**

**ING. WILLIAM VENEGAS, MSc.**

**william.venegas@epn.edu.ec**

**Quito, mayo, 2017**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por EDGAR FABIÁN SÁNCHEZ CARRIÓN, y JONATHAN PAÚL JIMÉNEZ GONZALES, bajo mi supervisión.

---

**ING. WILLIAM VENEGAS, MSc.**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

## **DECLARACIÓN**

Nosotros, EDGAR FABIÁN SÁNCHEZ CARRIÓN, y, JONATHAN PAUL JIMÉNEZ GONZALES, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**EDGAR FABIÁN  
SÁNCHEZ CARRIÓN**

---

**JONATHAN PAÚL  
JIMÉNEZ GONZALES**

## DEDICATORIA

Hoy que culmino un escalón más en vida profesional, quiero dedicar este presente trabajo a mis padres Edgar y Janett por darme la vida, por guiarme por el camino correcto, porque con su cariño y su amor desinteresado se constituyeron en mi gran fortaleza, porque gracias a ellos todo lo que tengo no hubiera sido posible.

A mi hermana Gaby y familia gracias de todo corazón, igualmente a Jessica quienes se constituyeron en pilar fundamental por el ánimo y empuje que me proporcionaron para culminar mi maestría.

*Edgar Sánchez.*

Este objetivo más va dedicado a mis padres Julia y Edgar quienes siempre estuvieron ahí y me apoyaron en todo instante durante toda mi vida de carrera universitaria, a mis amados hermanos Christian y Samaris que con sus palabras de aliento supieron dar el empuje a momentos difíciles, a mi amada novia Lelis que es la luz de mi vida, y a todos aquellos que siempre me apoyaron en todo el momento de este objetivo cumplido. A mis queridos y amados tíos Patricio, Irmes y Esperanza que en los momentos más críticos pudieron darme la mano para seguir adelante y poder hacer esto posible.

*Jonathan Jiménez.*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por todas las bendiciones a través de estos años y una de ellas fue darme una familia extraordinaria, a mis padres Edgar y Janett que en los momentos más duros han enseñado que trabajando duro todo es posible, y en los buenos nos han enseñado a ser humildes de corazón y con su ejemplo han dejado marcas imborrables en mi vida.

A mi Hermana que ha sido mi ejemplo a seguir y que admiro profundamente, a Jessy por entregarme momentos extraordinarios y darme la más grande bendición.

*Edgar Sánchez.*

Le agradezco primeramente a Dios por haberme guiado y acompañado a lo largo de todas mis decisiones, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad. Doy gracias a mis padres Julia y Edgar por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida, pero por sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida a seguir.

A mis hermanos por ser parte importante de mi vida y representar la unidad familiar, a mi gran amor de mi vida Lelis María por llenar de alegrías y amor cuando más lo necesitaba.

Al Ingeniero William Venegas por la confianza que nos brindó durante el desarrollo de la tesis, también quiero agradecer por su gran compromiso y sacrificio que tuvo para la elaboración de este trabajo de grado. A mi compañero y amigo de proyecto Fabián Sánchez por toda su dedicación, comprensión, trabajo y apoyo para finalizar este trabajo con mucho éxito.

*Jonathan Jiménez.*

## RESUMEN

A nivel nacional el tema de materiales ha ido tomando fuerza con pasar de los años y con la inclusión de nuevas tecnologías, estos cambios han dado paso a la atención a varios temas relacionados con los materiales compuestos. El trabajo presenta un diseño y construcción de un prototipo de máquina de pultrusión, que es un proceso para la obtención de perfiles tipo "O" en base a materiales compuestos por medio refuerzo de fibra de vidrio (FRP Fiber reinforced plastic), para el diseño se desarrolló mediante la ingeniería concurrente, estableciendo especificaciones técnicas, según las necesidades del cliente, y posteriormente se hizo un análisis funcional según módulos del prototipo y obteniendo como resultado un diseño óptimo, que finalmente se plasmó con la construcción del mismo. Una vez desarrollado la máquina se estableció un estudio experimental de las variables del proceso de pultrusión, esto se hizo en función de las pruebas realizadas, se varió los parámetros principales que son la concentración de la mezcla (resina), zonas de calor del molde y la velocidad de los pullers, con el cual al final se logró obtener los parámetros idóneos para obtener un perfil óptimo, teniendo en cuenta que el perfil tenga las características físicas necesarias, es decir, que tenga su forma y espesor deseados; cabe destacar que los principales materiales que se utilizó fueron la resina poliéster Isoftálica, catalizador, acelerante, el hilo roving entre otros. Posteriormente se caracterizó el material por medio de los ensayos desarrollados en el LANUM de la EPN, los ensayos realizados fueron a tracción y flexión a tres puntos, logrando valores aceptables dentro de las características de la máquina. Finalmente, se realizó una comparación con otros procesos de obtención de materiales compuestos logrando estar al nivel e incluso superando procesos en sus propiedades mecánicas.

**Palabras clave:** análisis funcional, estudio experimental, ingeniería concurrente, materiales compuestos, pultrusión, resina poliéster Isoftálica, refuerzo de fibra de vidrio (FRP), caracterización, tracción, flexión.

## ABSTRACT

At the national level the subject of materials has been taking over with the passing of the years and with the inclusion of new technologies, these changes have given way to the attention to several subjects related to the composite materials. The work presents a design and construction of a prototype pultrusión machine, which is a process to obtain "O" profiles based on composite materials by means of FRP Fiber reinforced plastic, for the design Was developed by the concurrent engineering, establishing technical specifications, according to the needs of the client, and later a functional analysis was done according to the prototype modules and resulting in an optimum design, which finally was reflected in the construction of the same. Once the machine was developed, an experimental study of the variables of the pultrusión process was established. This was done according to the tests performed. The main parameters were the concentration of the mixture (resin), mold heat zones and The speed of the pullers, with which in the end it was possible to obtain the ideal parameters with which an optimum profile was obtained taking into account that the profile has necessary physical characteristics, that is to say, that it has its desired shape and thickness; It should be noted that the main materials used were the polyester isophthalic resin, catalyst, accelerator, roving thread among others. Subsequently, the material was characterized by the tests developed in the LANUM of the EPN, the tests carried out were tensile and flexion to three points, achieving acceptable values within the characteristics of the machine. Finally, a comparison was made with other processes of obtaining composite materials, achieving to be level and even surpassing processes in their mechanical properties.

**Keywords:** functional analysis, experimental study, concurrent engineering, composite materials, pultrusión, isophthalic polyester resin, glass fiber reinforcement (FRP), characterization, traction, bending.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

Certificación.....	ii
Declaración.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Resumen.....	vi
Abstract .....	vii
Índice de contenidos.....	viii
Índice de tablas .....	xiii
Índice de figuras .....	xvi
Índice de anexos .....	xx
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	
Alcance.....	3
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>4</b>
1.1. Definición de material compuesto	
1.2. Componentes de los materiales compuestos	
1.3. Matriz.....	6
1.3.1. Matrices metálicas .....	7
1.3.2. Matrices cerámicas.....	8
1.3.3. Matrices poliméricas.....	9
1.4. Materiales compuestos de matriz polimérica	
1.4.1. Matrices termoplásticas.....	10
1.4.2. Matrices termoestables	
1.4.3. Tipos de resina termoestables .....	13
1.5. Refuerzos o fibras.....	14
1.5.1. Refuerzos discontinuos .....	15
1.5.2. Refuerzos continuos	
1.6. Fibra de vidrio	
1.7. Fibra de vidrio según su forma.....	16
1.7.1. Rovings	
1.7.2. Mat o esteras .....	17
1.7.3. Woven rovings .....	18
1.8. Procesos de fabricación de materiales compuestos de matriz termoestable ..	19



1.9. Pultrusión .....	20
1.10. Descripción de la máquina de pultrusión .....	21
1.10.1. Cesta o estantería .....	22
1.10.2. Tanque de impregnación de resina .....	23
1.10.3. Accesorios o guías de preformado .....	24
1.10.4. Datos de preformado o molde de formación	
1.10.5. Sistema de tracción .....	25
1.10.6. Corte por sierra .....	26
1.11. Principios de diseño de pultrusión	
1.11.1. Criterios de diseño de propiedades mecánicas	
1.11.2. Perfiles estructurales .....	28
1.11.3. Formas huecas .....	30
1.12. Normativa	
1.13. Ventajas y desventajas del proceso de pultrusión .....	32
1.14. Aplicaciones del proceso de pultrusión .....	34
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>35</b>
2.1. Casa de calidad	
2.2. Especificaciones técnicas .....	36
2.3. Análisis funcional .....	37
2.4. Generación de módulos .....	38
2.5. Generar alternativas (fundamentos y esquemas)	
2.5.1. Módulo 1	
2.5.1.1. Montaje de las bobinas de roving	
2.5.1.1.1. <i>Montaje del hilo en una cesta vertical</i> .....	39
2.5.1.1.2. <i>Montaje de hilo sobre unos rodillos horizontales</i>	
2.5.1.2. Desenrollado de hilo roving .....	40
2.5.1.3. Impregnación de resina	
2.5.1.3.1. <i>Impregnación por rodillo guía</i>	
2.5.1.3.2. <i>Impregnación con bomba recirculante</i> .....	41
2.5.1.4. Alternativas de los módulos .....	42
2.5.1.5. Evaluación y selección de los módulos .....	43
2.5.2. Módulo 2 .....	45
2.5.2.1. Pre-conformado	
2.5.2.1.1. <i>Pre-conformador recto</i>	
2.5.2.1.2. <i>Pre-conformador cónico</i> .....	46

2.5.2.2.	Zona de calor del molde	
2.5.2.2.1.	<i>Zona de calor por resistencias eléctricas</i>	
2.5.2.2.2.	<i>Zona de calor mediante calentamiento de resina</i> .....	47
2.5.2.3.	Molde o dado de pultrusión .....	48
2.5.2.4.	Alternativas de módulos	
2.5.3.	Módulo 3 .....	50
2.5.3.1.	Sistema de tracción (pullers)	
2.5.3.1.1.	<i>Cilindros reciprocantes</i>	
2.5.3.1.2.	<i>Doble oruga ó Caterpillar</i> .....	51
2.5.3.2.	Sistema de corte .....	52
2.5.3.2.1.	<i>Sistema de corte por sierra mecánica</i>	
2.5.3.2.2.	<i>Corte automatizado</i> .....	53
2.5.3.3.	Alternativas del módulo	
2.5.3.4.	Evaluación y selección de módulos .....	54
2.6.	Generación de la primera solución (esquema virtual).....	55
2.7.	Cálculo y selección de componentes mecánicos .....	56
2.7.1.	Dosificación de la fibra de vidrio	
2.7.2.	Tanque de resina .....	59
2.7.3.	Molde y sistema de calefacción .....	61
2.7.3.1.	Molde	
2.7.3.2.	Sistema de calefacción.....	62
2.7.3.3.	Sistema de tracción (cilindros reciprocantes).....	64
2.7.4.	Sistema de corte.....	66
2.8.	Cálculo y selección de componentes eléctricos	
2.8.1.	Selección de conductor .....	67
2.8.2.	Selección de protecciones .....	69
2.8.3.	Selección de protecciones para resistencias en zonas de calor .....	70
2.9.	Selección de componentes de control .....	71
2.9.1.	Elementos para tablero eléctrico	
2.9.2.	Controlador lógico programable (PLC) .....	72
2.9.3.	Control de temperatura.....	73
2.9.4.	Resistencias para el sistema de calefacción.....	74
2.10.	Cálculo y selección de componentes hidráulicos y neumáticos	
2.10.1.	Cilindros hidráulicos	
2.10.2.	Electroválvula hidráulica.....	75

2.10.3.	Bomba hidráulica .....	76
2.10.4.	Cilindros neumáticos	
2.10.5.	Electroválvula neumática .....	77
2.10.6.	Compresor de aire	
2.11.	Análisis de componentes críticos de la máquina de pultrusión .....	78
2.11.1.	Análisis al sistema reciprocante	
2.11.2.	Análisis a los pasadores de los cilindros hidráulicos .....	80
2.12.	Protocolo de pruebas de campo y correcciones al diseño .....	82
2.12.1.	Pruebas realizadas sobre la máquina	
2.12.1.1.	Prueba en vacío.....	83
2.12.1.2.	Prueba con carga .....	85
2.13.	Análisis de costos.....	88
2.13.1.	Costos del módulo 1	
2.13.2.	Costos del módulo 2.....	91
2.13.3.	Costo del módulo 3.....	93
<b>CAPÍTULO 3</b> .....		<b>97</b>
3.1.	Materiales empleados en el proceso	
3.1.1.	Datos técnicos del roving	
3.1.1.1.	Propiedades físicas .....	98
3.1.2.	Datos técnicos de la resina.....	99
3.1.2.1.	Propiedades físicas .....	100
3.1.3.	Acelerador (Octoato de cobalto)	
3.1.4.	Catalizador (Peróxido endurecedor de MEKP).....	102
3.1.5.	Carbonato de calcio.....	103
3.1.6.	Pigmentos o colorante	
3.2.	Funcionamiento de la máquina de pultrusión .....	104
3.2.1.	Diagrama de flujo del proceso de pultrusión	
3.2.2.	Puesta en marcha de la máquina.....	106
3.3.	Pruebas experimentales de la máquina de pultrusión .....	110
3.3.1.	Análisis de las pruebas experimentales .....	119
3.4.	Normas ASTM.....	123
3.4.1.	Norma de ensayo de tracción ASTM D3039	
3.4.2.	Norma de ensayo de flexión ASTM D 7264 .....	124
3.5.	Geometría de piezas estructurales .....	125
3.5.1.	Ensayo de tracción	

3.5.2. Ensayo de flexión.....	126
3.6. Caracterización mecánica de las probetas de pultrusión .....	127
3.6.1. Máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25KS	
3.6.2. Ensayo tracción.....	129
3.6.3. Ensayo flexión	
3.7. Análisis y discusión de resultados.....	130
3.7.1. Resultados del ensayo de tracción.....	131
3.7.2. Resultados del ensayo de flexión .....	133
3.8. Comparación de propiedades con otros perfiles con procesos .....	135
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>144</b>
4.1. Conclusiones	
4.2. Recomendaciones .....	146
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>156</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Algunas propiedades típicas de algunos metales y sus aleaciones. ....	8
Tabla 2. Matrices inorgánicas y orgánicas. ....	10
Tabla 3. Resinas termoestables en función de la temperatura de utilización. ....	12
Tabla 4. Propiedades mecánicas típicas de tracción de resinas en ingeniería civil. ....	13
Tabla 5. Características relativas de matrices de resinas termoestables. ....	14
Tabla 6. Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio. ....	16
Tabla 7. Procesos de fabricación de compuestos termoestables. ....	19
Tabla 8. Efecto del tipo de carga sobre el factor de diseño. ....	27
Tabla 9. Efecto de la temperatura sobre un sistema FRP. ....	28
Tabla 10. Características principales para el proceso de pultrusión. ....	28
Tabla 11. Normativas aplicadas a España. ....	30
Tabla 12. Normativas ASTM. ....	31
Tabla 13. Aplicaciones de la pultrusión en varias áreas industriales. ....	34
Tabla 14. Especificaciones técnicas a partir de la casa de la calidad. ....	36
Tabla 15. Alternativas del módulo 1. ....	43
Tabla 16. Evaluación del peso específico de cada criterio. ....	43
Tabla 17. Evaluación del peso específico del criterio “desgaste”. ....	44
Tabla 18. Evaluación del peso específico del criterio “mecanismos sencillos”. ....	44
Tabla 19. Evaluación del peso específico del criterio “fiabilidad del tensado”. ....	44
Tabla 20. Conclusión para el módulo 1”. ....	44
Tabla 21. Alternativas del módulo 2. ....	49
Tabla 22. Evaluación del peso específico del criterio “costo”. ....	49
Tabla 23. Evaluación del peso específico del criterio “mantenimiento”. ....	49
Tabla 24. Evaluación del peso específico del criterio “corte”. ....	50
Tabla 25. Conclusiones para el módulo 2. ....	50
Tabla 26. Alternativas del módulo 3. ....	54
Tabla 27. Evaluación del peso específico de cada criterio. ....	54
Tabla 28. Evaluación del peso específico del criterio “costo”. ....	54
Tabla 29. Evaluación del peso específico del criterio “fácil operación”. ....	55
Tabla 30. Evaluación del peso específico del criterio “fiabilidad del sistema”. ....	55
Tabla 31. Conclusiones para el módulo 3. ....	55
Tabla 32. Propiedades de la resina poliéster Isoftálica. ....	58
Tabla 33. Zonas de calor en el molde. ....	62

Tabla 34. Selección del conductor.....	68
Tabla 35. Selección de fusible.....	69
Tabla 36. Selección de interruptor térmico.....	70
Tabla 37. Formato de prueba en vacío.....	84
Tabla 38. Formato de prueba con carga.....	86
Tabla 39. Costos módulo 1, elementos normalizados.....	88
Tabla 40. Costos módulo 1, mano de obra.....	89
Tabla 41. Costos módulo 1, material.....	90
Tabla 42. Costos módulo 1.....	90
Tabla 43. Costos módulo 2, elementos normalizados.....	91
Tabla 44. Costos módulo 2, mano de obra.....	92
Tabla 45. Costos módulo 2, material.....	92
Tabla 46. Costos módulo 2.....	93
Tabla 47. Costos módulo 3, elementos normalizados.....	94
Tabla 48. Costos módulo 3, mano de obra.....	94
Tabla 49. Costos módulo 3, material.....	95
Tabla 50. Costos módulo 3.....	95
Tabla 51. Costos totales de la máquina.....	96
Tabla 52. Propiedades según aplicación.....	98
Tabla 53. Especificaciones técnicas.....	98
Tabla 54. Propiedades mecánicas.....	99
Tabla 55. Propiedades físicas de la resina.....	100
Tabla 56. Propiedades de los acelerantes.....	102
Tabla 57. Propiedades de los catalizadores.....	103
Tabla 58. Parámetros de la prueba 1.....	111
Tabla 59. Parámetros de la prueba 2.....	111
Tabla 60. Parámetros de la prueba 3.....	112
Tabla 61. Parámetros de la prueba 4.....	112
Tabla 62. Parámetros de la prueba 5.....	113
Tabla 63. Parámetros de la prueba 6.....	114
Tabla 64. Parámetros de la prueba 7.....	114
Tabla 65. Parámetros de la prueba 8.....	115
Tabla 66. Parámetros de la prueba 9.....	116
Tabla 67. Parámetros de la prueba 10.....	117
Tabla 68. Parámetros de la prueba 11.....	117

Tabla 69. Parámetros de la prueba 12.....	118
Tabla 70. Dimensiones recomendadas de la probeta en mm. ....	123
Tabla 71. Ensayo de tracción según la norma ASTM D3039-10.....	131
Tabla 72. Ensayo de flexión según la norma ASTM D7264-15.....	133
Tabla 73. Especificaciones del proceso Hand lay-up.....	136
Tabla 74. Especificaciones del proceso Inyección.....	137
Tabla 75. Propiedades mecánicas del proceso Filament Wound.....	138
Tabla 76. Propiedades mecánicas del proceso moldeo por compresión.....	139
Tabla 77. Propiedades mecánicas del proceso pultrusión según ensayos.....	140
Tabla 78. Propiedades mecánicas del proceso pultrusión según Molded fiber glass.....	140
Tabla 79. Propiedades mecánicas de varios procesos.....	141

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Configuración básica de un material compuesto.....	5
Figura 2. Componentes los materiales compuestos. ....	6
Figura 3. Curva Esfuerzo vs. Tensión.....	8
Figura 4. Esquema del comportamiento de fibra, compuesto y matriz (resina). ....	12
Figura 5. Fibra de vidrio tipo roving.....	17
Figura 6. Fibra de vidrio tipo estera o mat.....	17
Figura 7. Fibra de vidrio tipo woven rovings.....	18
Figura 8. Patrones de tejidos comunes.....	18
Figura 9. Vista de despiece de un material compuesto con Pultrusión. ....	21
Figura 10. Típico proceso de Pultrusión. ....	22
Figura 11. Típico proceso de Pultrusión con perfil hueco.....	22
Figura 12. Estantería para los rovings. ....	23
Figura 13. Tanque de impregnación de resina.....	24
Figura 14. Tipos de moldes en el mercado. ....	25
Figura 15. (a) Sistema de arrastre tipo Oruga y (b) Sistema de pistones recíprocos... 26	
Figura 16. Curva diferentes materiales esfuerzo vs.deformación.....	27
Figura 17. Diferencia de diseño de ángulo – acero vs FRP. ....	29
Figura 18. Diagrama de flujo.....	37
Figura 19. Módulos.....	38
Figura 20. Cesta forma vertical. ....	39
Figura 21. Cesta forma horizontal.....	40
Figura 22. Impregnación resina por rodillos. ....	41
Figura 23. Sistema de impregnación con bomba recirculante.....	42
Figura 24. Sistema de pre conformado.....	45
Figura 25. Sistema de pre conformado cónico.....	46
Figura 26. Sistema de Placas caloríficas. ....	47
Figura 27. Sistema de Calentamiento por resina. ....	47
Figura 28. Molde para proceso de pultrusión.....	48
Figura 29. Cilindros recíprocos. ....	51
Figura 30. Doble oruga.....	51
Figura 31. Sierra circular. ....	52
Figura 32. Sierra Automática. ....	53
Figura 33. Esquema de la primera solución.....	56



Figura 34. Dimensiones del perfil pultruido. ....	57
Figura 35. Dimensiones del tanque de resina. ....	59
Figura 36. Aplicación de la presión en el tanque. ....	60
Figura 37. Curva de curado en el molde. ....	61
Figura 38. Transferencia de calor en el molde. ....	62
Figura 39. Sistema cilindros reciprocantes. ....	65
Figura 40. Datos de placa motor monofásico. ....	67
Figura 41. Elementos tablero eléctrico. ....	72
Figura 42. PLC Siemens 12-24 RC. ....	72
Figura 43. Control de temperatura y termocuplas tipo J. ....	73
Figura 44. Esquema de control de temperatura. ....	73
Figura 45. Resistencias eléctricas. ....	74
Figura 46. Cilindro Hidráulico de doble efecto primer puller. ....	75
Figura 47. Cilindro Hidráulico segundo puller. ....	75
Figura 48. Electroválvula 4/2. ....	75
Figura 49. Bomba hidráulica. ....	76
Figura 50. Cilindro neumático. ....	77
Figura 51. Electroválvula 5/2 monoestable. ....	77
Figura 52. Compresor de aire 2 HP. ....	78
Figura 53. Sujeciones y carga aplicada al sistema en SolidWorks2016. ....	78
Figura 54. Mallado con elementos tetraédricos y triangulares en SolidWorks2016. ....	79
Figura 55. Análisis de los desplazamientos realizado en SolidWorks2016. ....	79
Figura 56. Análisis de Factor de Seguridad realizado en SolidWorks2016. ....	80
Figura 57. Colocación de cargas en el pasador. ....	80
Figura 58. Mallado del pasador en solidworks2016. ....	81
Figura 59. Análisis de la tensión de Von Mises en Solidworks2016. ....	81
Figura 60. Análisis de la deformación en Solidworks2016. ....	82
Figura 61. Análisis del factor de seguridad en Solidworks2016. ....	82
Figura 62. Roving empleado. ....	98
Figura 63. Resina Isoftálica. ....	100
Figura 64. Proceso de catalización de la Resina. ....	101
Figura 65. Diagrama de flujo. ....	105
Figura 66. Desenredado de los hilos rovings. ....	106
Figura 67. Tanque de resina – paso de hilo rovings. ....	106
Figura 68. Pre- conformado. ....	107

Figura 69. Dado o molde. ....	107
Figura 70. Mezcla resina. ....	108
Figura 71. Zonas de calor. ....	108
Figura 72. Pullers o sistema de cilindros reciprocanes. ....	108
Figura 73. Halado de manera manual. ....	109
Figura 74. Halado automático por los pullers. ....	109
Figura 75. Resina solidificada. ....	113
Figura 76. Perfil inestable. ....	115
Figura 77. Rotura de hilos. ....	116
Figura 78. Perfil obtenido. ....	117
Figura 79. Perfil inestable. ....	118
Figura 80. Perfil óptimo. ....	118
Figura 81. Uso de catalizador según pruebas. ....	119
Figura 82. Uso del acelerante en las pruebas. ....	119
Figura 83. Catalizador vs. Acelerante. ....	120
Figura 84. Uso del carbonato en las pruebas. ....	120
Figura 85. Uso del acelerante en las pruebas. ....	121
Figura 86. Carbonato vs color. ....	121
Figura 87. Zonas de Temperatura. ....	122
Figura 88. Velocidad de tracción. ....	122
Figura 89. Probeta de ensayo a tracción con lengüetas en los extremos. ....	124
Figura 90. Ensayo de flexión a tres puntos. ....	124
Figura 91. Ensayo de flexión a cuatro puntos. ....	124
Figura 92. Probeta tracción. ....	125
Figura 93. Probetas para el ensayo de tracción. ....	126
Figura 94. Probeta flexión. ....	126
Figura 95. Probetas para el ensayo de flexión. ....	127
Figura 96. Máquina Tinius Olsen H25KS. ....	128
Figura 97. Probeta sometida a flexión. ....	128
Figura 98. Probetas después de ser sometida a tracción. ....	132
Figura 99. Curva Esfuerzo vs. Deformación de los ensayos a tracción. ....	132
Figura 100. Probetas después de ser sometida a flexión. ....	134
Figura 101. Curva Esfuerzo vs. Deformación de los ensayos a flexión. ....	134
Figura 102. Disposición de los hilos roving en el perfil "O" ....	135
Figura 103. Proceso Hand lay-up. ....	136

Figura 104. Proceso Filament wound. ....	138
Figura 105. Proceso moldeo por compresión. ....	139
Figura 106. Comparación de resultados según ensayos LANUM y Molded fiber. ....	141
Figura 107. Comparación de esfuerzo a la tracción con otros procesos. ....	142
Figura 108. Comparación del módulo a la tracción con otros procesos. ....	142
Figura 109. Comparación de esfuerzo a la flexión con otros procesos. ....	143
Figura 110. Comparación del módulo a la flexión con otros procesos. ....	143

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A.	Casa de la calidad.....	147
Anexo B.	Especificaciones técnicas de la máquina de pultrusión .....	148
Anexo C.	Esquema eléctrico fuerza y control .....	149
Anexo D.	Programa ladder del plc .....	150
Anexo E.	Esquema hidráulico y neumático.....	151
Anexo F.	Protocolo de pruebas en vacío y con carga de la máquina de pultrusión ..	152
Anexo G.	Especificaciones técnicas del hilo roving y resina isoftálica.....	153
Anexo H.	Preparación de probetas .....	154
Anexo I.	Informe de ensayos de tracción y flexión .....	155



# **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA DE PULTRUSIÓN Y ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS VARIABLES PARA LA OBTENCIÓN DE PERFILES “O” DE MATERIAL COMPUESTO CON MATRIZ TERMOESTABLE**

## **INTRODUCCIÓN**

Un compuesto de pultrusión se compone de materiales de refuerzo, una resina que se une el material compuesto en conjunto, una estera o mat para la superficie para mejorar la apariencia compuesto en la superficie, resistencia química y resistencia a la intemperie, y una variedad de materiales auxiliares, tales como pigmentos para impartir color, aceleradores para curar la resina, agentes internos de desmolde o cargas inertes, etc... los materiales de refuerzo compuestos de fibra de vidrio habitualmente utilizados son mat de hebras continuas (mat) e hilos roving de fibra de vidrio continuos. La resina puede ser una resina de poliéster insaturado, una resina de éster de vinilo, o una resina epoxi, pero aproximadamente el 90 % de todos los productos pultrusionados actualmente utilizar resinas de poliéster.

El proceso de pultrusión tiene una forma de fabricación de manera continua en el que un polímero termoestable y refuerzo compuestas de fibras de vidrio van tomando la forma final del perfil que se quiere obtener por medio de proceso mencionado. Su significado viene del nombre que es una contracción de la palabra en inglés “pull” (significa tirar) y extrusión por halado. La obtención de los perfiles por este método garantiza la estabilidad de la composición del producto final a obtener durante todo el proceso de elaboración. Los materiales de refuerzo como son tejidos, roving e hilos de fibra de vidrio son empapados en un baño de resina líquida situado en un tanque esto es según el tipo de impregnador, el material pre-impregnado comienza a conformarse mediante un preformado, esto es de acuerdo a la geometría de la pieza que se desea fabricar, hasta introducirse en el molde donde se produce la polimerización y endurecimiento de la resina mediante calentamiento del mismo. Posteriormente hay un sistema de tracción en continuo o discontinuo que extrae el perfil totalmente formado del molde, realizándose el corte del perfil en la longitud deseada de manera automática según el método de corte utilizado. La pultrusión es un proceso de producción automatizado en continuo de perfilería, el cual permite obtener cualquier tipo de perfil de forma longitudinal con un magnífico acabado superficial a un coste mucho menor en consideración a otros métodos tradicionales de producción de plásticos reforzados.

En la actualidad el principal problema de los metales es la corrosión y oxidación debido a su exposición ante la intemperie y los productos químicos, haciendo que su vida útil disminuya considerablemente y para prevenir estos problemas se utiliza mantenimientos periódicos haciendo que a la empresa le signifique altos costos, y al final se tendrá que cambiar la pieza; por esta principal razón se ha pensado en tratar de sustituir los aceros por medio de fibras de vidrio, teniendo muchas ventajas entre ellas que son altamente resistentes a la corrosión, peso ligero en comparación a los metales, no conduce la electricidad, costo de vida útil alta, entre otras ventajas.

### **Objetivo general**

- Determinar las variables óptimas del proceso de pultrusión en la obtención de perfiles estructurales tipo “O” y su adecuado control en las diferentes etapas de fabricación, para minimizar los defectos.

### **Objetivos específicos**

- Estudiar las variables del proceso y el adecuado control en las diferentes etapas.
- Definir un pre-diseño del equipo de pultrusión, considerando las diferentes etapas del mismo.
- Presupuestar el costo en materiales y dispositivos necesarios en cada etapa del proceso.
- Diseñar e detallar el equipo que se va a emplear para la obtención de perfiles.
- Establecer los valores de los parámetros adecuados para la obtención de perfiles de calidad.
- Efectuar las pruebas mecánicas y físicas de los perfiles fabricados.
- Optimizar el proceso de pultrusión para perfiles tipo “O”.
- Establecer un estudio comparativo con propiedades de perfiles similares obtenidos por otros procesos.

## **Alcance**

- Se diseñará y construirá de un prototipo de máquina de pultrusión para generar perfiles tipo “O”, tomando las alternativas adecuadas para cada proceso involucrado en la obtención del material pultruido.
- Se controlará las variables que implican cada etapa en el proceso.
- El material de refuerzo será fibras de vidrio tipo roving y mat aleatorio, con lo cual vamos a garantizar los buenos acabados superficiales y garantizamos ciertas propiedades en los elementos pultruidos.
- Se utilizará resina poliéster insaturado con los aditivos necesarios para la obtención del elemento pultruido.
- El molde tendrá la forma necesaria para obtener el perfil tipo “O”, por lo cual se va a importar.
- La zona de calor estará alimentado por corriente eléctrica para obtener las temperaturas adecuadas de la polimerización necesaria en el perfil.
- Realizara pruebas para el perfil pultruido tipo “O” y comparar los resultados con perfiles similares.



# **CAPÍTULO 1**

## **MARCO TEÓRICO**

### **INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS**

El objetivo del presente capítulo es presentar y dar a conocer los materiales compuestos, que a través de la historia fue evolucionando, hasta que en la actualidad están sustituyendo a los materiales tradicionales debido a sus ventajas de costo-beneficio, también se hará hincapié en sus componentes, que forman un material compuesto, como son la matriz o resina y refuerzos según el tipo de matriz termoestable y termoplástica.

Además se estudiara las diferentes fibras existentes en medio como también las resinas y sus características, finalmente se hará un breve repaso de los diferentes tipos de procesos, que hay para la fabricación de un material compuesto.

Finalmente se estudiará el proceso de pultrusión, todas sus etapas que conforma, se cita sus ventajas y desventajas.

#### **1.1. Definición de material compuesto o composite**

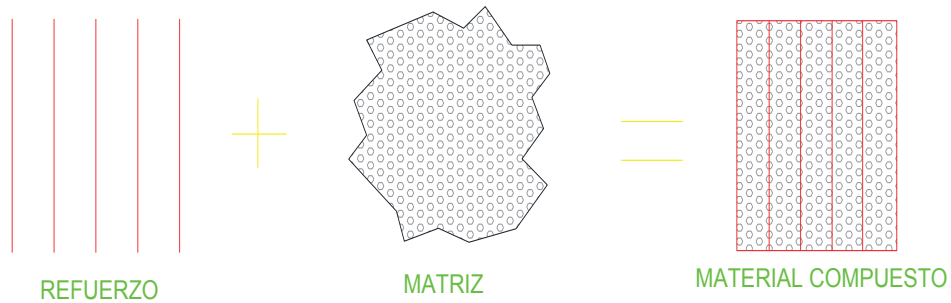
El desarrollo de los materiales compuestos surge ante la necesidad de aplicaciones con unas especificaciones de servicio muy concretas. Un material compuesto se define como un material formado por una fase discontinua, también llamada refuerzo, de la que dependen principalmente las propiedades mecánicas, y por una fase continua (resina) que engloba al refuerzo, responsable de la resistencia térmica y ambiental del material (Miracle, , 2001). El compuesto resultante presenta propiedades mejoradas respecto a los materiales constituyentes por separado.

Para ser más específico un material compuesto o composite se debe entender que están conformados por dos o más materiales diferentes sin que exista alguna reacción química entre ellos. Todo material compuesto se diferencian por dos componentes: la MATRIZ que es el componente que se representa en fase continua, y el REFUERZO, que es la fase discontinua, que es el elemento resistente que da las propiedades al material desarrollado.

#### **1.2. Componentes de los materiales compuestos o composite**

Un material compuesto es básicamente un sistema de materiales formado por dos o más fases distintas, cuya combinación proporciona propiedades que son diferentes y mejores a las de sus constituyentes. En la Figura 1 se ilustra la configuración básica de un material compuesto reforzado con fibras. De manera general se considera a un material compuesto

como un material multifásico, lo que refleja la importancia de cada una de las fases constituyentes. Es decir, la combinación de propiedades debe ser adecuada, para que el resultado obtenido sea un material con propiedades mejoradas de manera significativa. (Mazumdar, 2003).



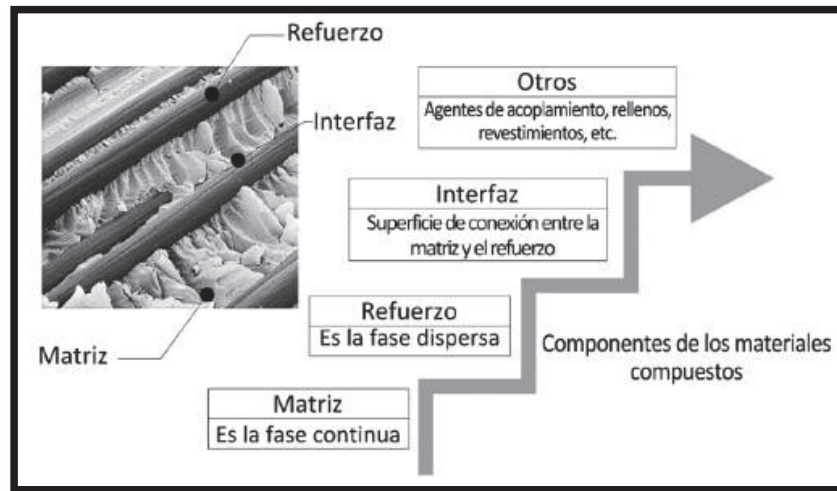
**Figura 1.** Configuración básica de un material compuesto.

(Fuente: Adaptado de Nuevos materiales: Aplicaciones estructurales e industriales Guerrero, Davila, & Galeas, 2011).

Los materiales compuestos se pueden diseñar para que satisfagan las necesidades de tecnologías relacionadas con la industria aeroespacial, automotriz, electrónica, construcción, generación de energía, biomédica, entre otras. Como resultado, estos materiales constituyen actualmente la mayor parte de los materiales ingenieriles. (Chung D. , 2010)

Más concretamente, los componentes de un material compuesto se denominan matriz y refuerzo como se mencionó anteriormente, la superficie de unión entre estos dos se lo denomina interfaz. En este tipo de materiales se puede adicionar agentes de acoplamiento, rellenos y revestimientos, con su principal objetivo de mejorar las propiedades de superficie en la interfaz del material compuesto.

El refuerzo es el componente del material compuesto que soporta la carga y que también puede aportar con propiedades al material compuesto, por ejemplo, características de conductividad eléctrica o aislamiento, estabilidad térmica, propiedades estructurales, etc... Los refuerzos pueden ser partículas, fibras o elementos estructurales. (Guerrero, Dávila, & Gálea, 2011)



**Figura 2.** Componentes los materiales compuestos.

(Fuente: Adaptado de Nuevos materiales: Aplicaciones estructurales e industriales (Guerrero, Dávila, & Gáleas, 2011).

En la figura 2 es una fotografía donde se observa un material plástico reforzado con un refuerzo de fibras. En este caso la matriz es una resina “epoxi” que es resistente al calor (hasta 400 °C) y el refuerzo son las fibras de carbono.

Este material compuesto es usado comúnmente en la industria aeroespacial y automotriz, asimismo se suele usar en la elaboración de placas de circuitos electrónicos. (lybrary, 2011)

Las propiedades de los materiales compuestos dependen de una serie de factores:

- Propiedades de la matriz y del refuerzo.
- Contenido del refuerzo.
- Orientación del refuerzo.
- Método de producción del material compuesto. (Plásticos, Tecnología de plásticos,2011)

### 1.3. Matriz

En función de la clase del material que compone la matriz, el composite o compuesto resultante se puede clasificar como compuesto de matriz metálica (CMM o en inglés Metal Matrix Composite, MMC), de matriz cerámica (CMC o en inglés Ceramic Matrix Composite, también CMC) o de matriz polimérica (CMP o en inglés Polymer Matrix Composite, PMC). Los PMCs también suelen ser nombrados como plástico reforzado por fibra (FRP o en inglés Fibre Reinforced Plastic, FRP). (Bello A. I., 2007)

### **1.3.1. Matrices metálicas**

Entre las matrices metálicas más comunes se encuentran materiales como el aluminio, magnesio, cobre, níquel y aleaciones de compuestos intermetálicos. Estos materiales comúnmente son reforzados con fibras cerámicas y metálicas. El uso de este tipo de compuestos es muy común en las industrias aeroespacial y automotriz, ya que este tipo de matrices permiten que el material compuesto trabaje a altas temperaturas. Por otro lado, la producción de este tipo de compuestos suele resultar costosa debido a la complejidad de los procesos y la tecnología de los equipos necesarios. (Akseland, 1998)

Este tipo de matrices contienen entre 20 y 50 % de volumen de refuerzo, habitualmente se utilizan cuando se va a trabajar en aplicaciones que demandan dureza, rigidez, resistencia a altas temperaturas, alta resistencia mecánica y módulo específico alto. Este tipo de matrices ofrecen una alta resistencia mecánica, elevada rigidez. Por esta razón son una opción atractiva para varias aplicaciones de ingeniería de materiales en general.

Los refuerzos utilizados con matrices metálicas deben cumplir con los siguientes requerimientos:

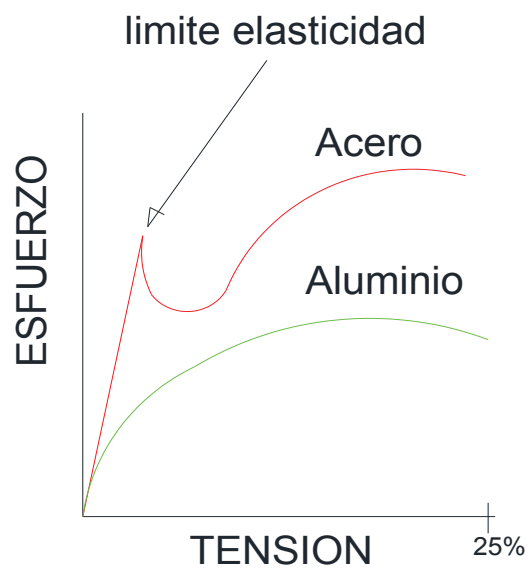
- Baja densidad.
- Estabilidad térmica.
- Compatibilidad mecánica (un coeficiente de expansión térmica bajo, pero que se adapte a las características de la matriz).
- Alto módulo de elasticidad.
- Alta resistencia a la tracción y a la compresión.
- Buena capacidad de procesamiento.
- Eficiencia económica. (Guerrero, Dávila, & Gáleas, 2011)

Algunas propiedades típicas de algunos metales y algunos de sus aleaciones se enumeran en la tabla 1 y las de ingeniería típicas curvas de deformación estrés de acero y aluminio se presentan en la figura 3. (Akovali, 2001)

**Tabla 1.** Algunas propiedades típicas de algunos metales y sus aleaciones.

<b>ALGUNAS PROPIEDADES TÍPICAS DE ALGUNOS METALES Y SUS ALEACIONES</b>				
	<b>DENSIDAD</b> $\rho$ ( $gcm^{-3}$ )	<b>MÓDULO DE YOUNG</b> ( $GPa$ )	<b>LÍMITE ELÁSTICO</b> ( $MPa$ )	<b>RESISTENCIA A LA TRACCIÓN</b> ( $MPa$ )
<b>METALES PUROS</b>				
Aluminio	2,7	70	40	200
Cobre	8,9	120	60	400
Níquel	8,9	210	70	400
Ti-6a1-4v		110	900	1000
<b>ALEACIONES DE ALUMINIO</b>				
Alta resistencia / fuerza baja	-	70	100 – 380	240 - 480
Acero inoxidable	-	195	240	365
Acero al carbono	7,9	210	250	420
<i>TI-6A1-4V: TITANIO – ALUMINIO – VANADIO</i>				

(Fuente Adaptado de Nuevos materiales: Aplicaciones estructurales e industriales Callister, 2007).



**Figura 3.** Curva Esfuerzo vs. Tensión.

(Fuente: Adaptado de lybrary, 2011).

### 1.3.2. Matrices cerámicas

Las matrices cerámicas tienen buenas propiedades a temperaturas elevadas y son menos densas en comparación con los compuestos de matriz metálica. Con este tipo de matrices es muy común que también se usen fibras cerámicas como refuerzo. De esta manera se ha logrado obtener mejor resistencia y tenacidad a la fractura en comparación con los materiales cerámicos convencionales, los mismos que se caracterizan por ser muy frágiles. (Haffner, Friedrich, Hogg, & Busfield, 1998)

### **1.3.3. Matrices poliméricas**

Las matrices poliméricas son usadas en una diversidad de aplicaciones y en grandes cantidades debido a su baja densidad, excelentes propiedades a temperatura ambiente, facilidad de conformado y costos relativamente bajos. Estas matrices pueden ser reforzadas con fibras naturales y sintéticas. Las matrices poliméricas pueden ser de tres tipos: termoplásticas, termoestables y elastómeros. Las matrices termoplásticas pasan al estado líquido cuando son calentadas. (Hsieh & Su, 1992)

A continuación citaremos algunos ejemplos que se utilizan en las matrices termoplásticas que son el polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC) y polietileno-tereftalato (PET). De igual forma, se tienen polímeros termoplásticos de origen natural, como el ácido poliláctico (PLA) o el polihidroxibutirato (PHB), en los cuales muestran con propiedades muy similares al PE, PP.

Hablando un poco más sobre las matrices termoestables tienen muchos enlaces que se entrecruzan en una estructura tridimensional, este tipo de matrices termoestables se polimeriza por una reacción química y generalmente no es “reversible”, esta matriz no se reprocesan después de que las reacciones han tenido lugar al entrecruzamiento, lo que hace difícil para un reciclaje posterior. Los termoestables no funden al calentarse, sino que empiezan a degradarse.

Algunos ejemplos son: resina poliéster, epoxi y fenólicos. (Bottcher, 1997)

Las matrices elastómeras tienen una zona elástica grande y pueden estirarse hasta cinco o seis veces su longitud original. Sin embargo, sus módulos de elasticidad son bajos. Tienen menos enlaces de reticulación entre cadenas que los termoestables. El caucho natural pertenece a este tipo de matrices. (Guerrero, Dávila, & Gáelas, 2011)

## **1.4. Materiales compuestos de matriz polimérica**

En los compuestos de matriz polimérica con sus siglas “PMC”, se pueden diferenciar entre matrices termoplásticas y termoestables. En la siguiente tabla 2 se muestran ejemplos de estos dos tipos de matrices (Sahuquillo Navarro, 2012). También en esta tabla se muestra ejemplo de matrices inorgánicas.

**Tabla 2.** Matrices inorgánicas y orgánicas.

<b>Inorgánicas</b>	Cemento, geo polímeros, yeso, matrices cerámicas, matrices metálicas	
<b>Orgánicas</b>	Termoestables	Poliéster, Viniester, Epoxi, Fenólica, Esteres cianato, Bismaleimidas, Poliamidas, Polieteramida.
	Termoplásticos	Polietileno, Poliestireno, Nylon, Polipropileno, Acetato, Policarbonato, Polimetacrilato de metilo, PET, PEEK, PEKK, PAI, PAS, Polioximetileno, Polieterimida.

(Fuente: Adaptado de tesis Sahuquillo Navarro, 2012).

Comúnmente, los polímeros de tipo termoestables se obtienen en forma de dos resinas líquidas.

#### **1.4.1. Matrices termoplásticas**

Las matrices termoplásticas de altas prestaciones se han desarrollado con el objetivo de obtener materiales aptos para altas temperaturas y conseguir elevada resistencia al impacto. Estas matrices son muy diferentes de los termoplásticos convencionales (polipropileno, polietileno, nylon, etc.), que se caracterizan por unas propiedades muy bajas a altas temperaturas comparados con las matrices de altas prestaciones, de mayor dureza y mejor comportamiento con la temperatura. (Swain, 1990) Las matrices termoplásticas convencionales se emplean fibra corta como agente de refuerzo por su gran facilidad para la producción en grandes series, aunque presentan desventajas como son el bajo módulo y poca resistencia a disolventes. Este tipo de matrices se consideran como semicristalinas o amorfas.

Entre las matrices termoplásticas más comunes destacan las resinas tipo poliariéter cetona (PEEK), el polisulfuro de fenileno (PPS) y Polieterimida (PEI). Las matrices de tipo termoplásticas tienen la características de no absorber cantidades considerables de agua, pero su mejorable resistencia a disolventes orgánicos es un área de interés en termoplásticos amorfos.

#### **1.4.2. Matrices termoestables**

Los polímeros termoestables, son líquidos a temperatura ambiente y necesitan de un curado para alcanzar el estado sólido (Michaeli, 1989). La reacción irreversible de curado, se puede llevar a cabo mediante calentamiento, siendo esta la forma más habitual, aunque para ciertos sistemas también es posible mediante diferentes tipos de radiación como la ultravioleta, haz de electrones, rayos gamma o microondas (Shull, 2000).

Al tener un sólido ya formado, resultado de ello se forma una red molecular tridimensional con cadenas poliméricas que se están unidas entre sí, estas redes formadas que están entre longitud y densidad de entrecruzamiento darán o influirán en las propiedades mecánicas del material a obtener.

Este tipo de matrices termoestables, tienen forma de líquido viscoso que se combina con un catalizador y como resultado da un entrecruzamiento por medio de una reacción química controlada, poco a poco su viscosidad aumentara hasta un punto donde pierda su fluidez (punto de gelificación), que da lugar a un sólido.

El curado de las resinas termoestables supone crecimiento de la cadena, ramificaciones y entrecruzamiento. La reticulación de las cadenas aumenta la rigidez de las resinas, eleva su resistencia mecánica y a los medios químicos a la vez que mejora la estabilidad térmica (Miravete, 2000). Estas propiedades se ven relacionadas con el grado de entrecruzamiento y el peso molecular de todas las cadenas. Hay un mayor grado de entrecruzamiento que resulta una matriz de mayor rigidez o con mayor módulo elástico, esto es un alto grado de entrecruzamiento con cadenas de alto peso molecular entre los entrecruzamientos, van a dar una gran movilidad molecular limitada, bajo alargamiento cuando haya una fractura, la baja resistencia al impacto y la menor tenacidad a fractura. La reducción en el peso molecular de las cadenas aumenta la tenacidad, aunque ve comprometida su estabilidad a los medios químicos. (Jang, 1994)

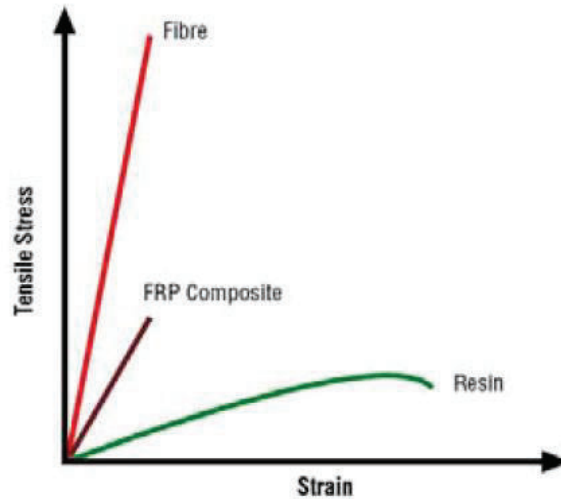
La matriz analizada en un material compuesto reforzado con fibras cumple las siguientes funciones:

- Fijar las fibras en el ordenamiento geométrico deseado.
- Transmitir los esfuerzos a las fibras.
- Mantener separadas las fibras evitando la abrasión entre ellas.
- Proteger al refuerzo de los agentes externos antes, durante y después de su procesado, como por ejemplo de la humedad o del ataque químico.

Se puede considerar que este tipo de matriz es más débil del material compuesto desde un punto de vista estructural, ya que debido a los refuerzos colocados son más resistentes y de mayor rigidez, para mayor entendimiento se puede observar la Figura 4. Aunque, la matriz facilita una transferencia muy efectiva de los esfuerzos al refuerzo empleado, para hacer efectivo a todo su potencial resistente que posee.



De este modo la fase continua (matriz), controla las propiedades transversales, la resistencia interlaminar y la resistencia a temperatura del compuesto. (Sahuquillo Navarro, 2012)



**Figura 4.** Esquema del comportamiento de fibra, compuesto y matriz (resina).  
(Fuente: Adaptado de Sahuquillo Navarro, 2012).

En las resinas termoestables podemos diferenciar las que endurecen por co-polimerización de radicales, como por ejemplo, las resinas de poliéster insaturado (UP), Viniester (VE) u otros sistemas con dobles enlaces en su estructura (Hsu C. P., 1993a) (Hsu C. P., 1993b).

También hay que tomar en cuenta que hay resinas que polimerizan por reacciones de condensación y adición entre sus grupos funcionales, como son las resinas epóxicas, fenólicas, bismaleimidias, poliamidas entre otras. Estas últimas presentan mejores características mecánicas y térmicas que las endurecidas por radicales (Michaeli, 1989).

La siguiente tabla 3 se puede observar la clasificación de las matrices termoestables en función de su temperatura de servicio (Miravete, 2000).

**Tabla 3.** Resinas termoestables en función de la temperatura de utilización.

Bajas temperaturas	Medias temperaturas	Medias – Altas temperaturas	Altas temperaturas
Poliéster	Vinil éster Epoxi	Fenólica	Bismaleimidias Poliamida Esteres cianato Polieteramida

(Fuente: Adaptado de Sahuquillo Navarro, 2012).

Hay matrices orgánicas de tipo termoestables que son para aplicaciones comerciales que se emplean como el poliéster y viniéster en aplicaciones de bajo costo y tipo epoxi para aplicaciones de alta calidad y con elevadas prestaciones. La tabla 4 se resume las propiedades a tracción típicas de estas resinas poliméricas usadas en ingeniería civil. (Hollaway, 2010)

**Tabla 4.** Propiedades mecánicas típicas de tracción de resinas usadas en ingeniería civil.

Material	Resistencia específica	Resistencia tracción (Mpa)	Módulo elasticidad (Mpa)	Coef. Expansión ( $10^{-6}/^{\circ}C$ )
Poliéster	1,28	45 – 90	2,5 – 4	100 - 110
Viniéster	1,07	90	4	80
Epoxi	1,03	90-110	3,5	45 - 65

(Fuente: Adaptado de tesis Sahuquillo Navarro, 2012).

Estas resinas termoestables para la fabricación de materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio sirvieron al dar un impulso para el crecimiento de toda la industria moderna. Al final de los años cuarenta, se empezaron a utilizar comercialmente productos basados en resinas de poliéster insaturado para fabricar depósitos, tuberías y cisternas. Las cisternas se emplean en la industria petrolera para transporte de petróleo bruto y derivados, así como depósitos para almacenaje de productos químicos. (Sahuquillo Navarro, 2012)

Las resinas de poliéster y viniéster son versátiles, tienen un costo relativamente bajo con respecto al de fabricación. La manipulación es sencilla, pueden utilizarse solos o combinados con otros polímeros. La sencillez en su manejo y fabricación, buena mojabilidad y adecuada disponibilidad en el mercado las sitúan como unos de los polímeros más utilizados a escala industrial (McConnell, 2010), en sectores industriales tan importantes como el aeronáutico, el del automóvil, el químico o el naval; de hecho los poliésteres insaturados constituyen la familia más importante de las resinas termoestables utilizadas en los materiales compuestos. Se utilizan en más del 90 % de los laminados comerciales. (Miravete, 2000)

### 1.4.3. Tipos de resina termoestables

Las matrices compuestas termoestables incluyen poliésteres, ésteres vinílicos, epoxis, bismaleimidias y ésteres de cianato (tabla 5). Las resinas epóxicas son actualmente las resinas dominantes usadas para temperaturas bajas y moderadas (hasta 275 °F o 135 °C). Las bismaleimidias se usan principalmente en el intervalo de temperaturas de 135 -175 °C (275 - 350 °F).

**Tabla 5.** Características relativas de matrices de resinas termoestables.

TIPOS	CARACTERÍSTICAS
Poliéster	Se utiliza ampliamente en aplicaciones comerciales. Relativamente barato, con flexibilidad de procesamiento. Se utiliza para materiales compuestos continuos y discontinuos.
Vinil	De manera similar a los poliésteres, pero son más duros y tienen mejor resistencia a la humedad.
Epoxis	Sistemas de matrices de alto rendimiento para materiales compuestos de fibra continua-primarias. Se puede utilizar a temperaturas de hasta 250 - 275 °C. Dar un mejor rendimiento a alta temperatura que los mat o ésteres de poliéster y vinilo.
Bismaleimidas	Matrices de resina de alta temperatura para uso en el intervalo de temperatura de 275 a 350 °F con el procesamiento de epoxi-similares. Requiere post-curado elevada temperatura.
Ester o mat de Cianato	Matrices de resina de alta temperatura para uso en el intervalo de temperatura de 275 a 350 °F con el procesamiento de epoxi-similares. Requiere post-curado elevada temperatura.

(Fuente: Adaptado de Campbell, 2010).

Los poliésteres y ésteres de vinilo, que se pueden utilizar en aproximadamente las mismas temperaturas que las resinas epoxi, se utilizan ampliamente para aplicaciones comerciales, pero rara vez para matrices compuestas de alto rendimiento debido a sus propiedades mecánicas más bajas y algo más pobre resistencia al medio ambiente.

Ésteres de cianato son una clase relativamente nueva de resinas que fueron diseñados para competir con las dos resinas epóxicas y bismaleimidas. Estas resinas más nuevas ofrecen algunas ventajas en la absorción de la humedad más baja y tienen características eléctricas atractivas pero en un precio perceptiblemente más alto. (Visco, 2008)

## 1.5. Refuerzos o fibras

Los refuerzos en los materiales compuestos tienen como objetivo principal que permitan absorber las tensiones e aumentar la rigidez y la resistencia del conjunto compuesto.

En los materiales compuestos se pueden emplear dos tipos de elementos de refuerzos: (Ingemecánica, 2016)

- Refuerzos discontinuos (partículas, plaquetas o fibras cortas).
- Refuerzos continuos (fibras largas, tejidos o laminados).

### 1.5.1. Refuerzos discontinuos

En refuerzos discontinuos hay distintos tipos de elementos que intervienen como refuerzo discontinuo en los materiales compuestos. Así, se tienen materiales de refuerzo discontinuo en forma de partícula, en forma de plaqueta (en ambos casos cuando todas sus dimensiones son iguales), y materiales de refuerzo en forma de fibra discontinua o fibra corta (que son aquellos materiales que tienen una longitud mayor que su sección transversal). (Ingemecánica, 2016)

En general, los materiales compuestos que son reforzados con los elementos discontinuos sólo se utilizan en aquellas aplicaciones donde no se necesita mucha responsabilidad estructural.

### 1.5.2. Refuerzos continuos

En este caso, también existen distintas clases de refuerzo de tipo continuo. Así, se tienen materiales de refuerzo en forma de fibra continua o fibra larga cuando tienen una longitud mucho mayor con respecto a su sección transversal; refuerzos de tipo laminado cuando están formados por dos o más láminas que tienen dos de sus dimensiones mayores que la tercera; y refuerzos en forma de tejido, también llamados estructuras sándwich, cuando la matriz forma un esqueleto que es relleno de un segundo material. (Ingemecánica, 2016)

## 1.6. Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es un tipo de material fibroso que es obtenido al hacer fluir vidrio fundido a través de una pieza de agujeros muy finos y que al solidificarse tiene una suficiente flexibilidad para ser usado como una fibra. (Wikipedia, 2016)

Es uno de los elementos más comúnmente utilizados en la fabricación de materiales compuestos.

En el medio comercial los principales tipos de fibra de vidrio son los siguientes:

- **Vidrio E (eléctrico):** Representa casi la totalidad del vidrio textil utilizado en materiales compuestos, más del 90 % de los refuerzos y tiene buenas propiedades eléctricas.
- **Vidrio A (alto contenido de álcali):** Es menos resistente y tiene un módulo más bajo que el vidrio E, presenta gran resistencia química.
- **Vidrio AR (álcali resistente):** Es el único tipo de vidrio que puede combinarse con el hormigón o cemento.

- **Vidrio C (químico):** se sitúa entre el vidrio A y el E y se utiliza entre las capas superficiales de estructuras anti corrosión, tiene una alta resistencia química.
- **Vidrio D (dieléctrico):** Con sus altas propiedades dieléctricas se utiliza sobre todo en la construcción de materiales electrónicos de telecomunicación. Estos materiales presentan muy débiles pérdidas eléctricas.
- **Vidrio B (boro):** Tiene excelentes propiedades eléctricas y gran durabilidad. Es borosilicato de calcio de bajo contenido de álcali.
- **Vidrio X:** Con base de Li<sub>2</sub>O por su transparencia a rayos X. (Ehowenespanol, 2016)

En la tabla 6 se muestra, los principales tipos de que hay de fibra de vidrio y sus principales características.

**Tabla 6.** Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio.

Tipo	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de hilo ( $\mu m$ )	5 - 13	10 - 20	10	10
Densidad ( $Kg/m^3$ )	2500	2580	2480	2590
Módulo de elasticidad ( $GPa$ )	69	72,5	86	85
Resistencia a la tracción ( $GPa$ )	3,1	3,5	4,59	3,4 - 4,4
Módulo Especifico	28	29	34	33
Coefficiente de expansión térmica ( $10^{-6}/K$ )	8,6	5	5,1	5

(Fuente: Adaptado de Miravete, 2000).

## 1.7. Fibra de vidrio según su forma

### 1.7.1. Rovings

Los rovings (también llamados estopas), se refiere a un grupo de filamentos esencialmente paralelos de fibras que han sido recogidos en una cinta y enrollada sobre un tubo cilíndrico.

Esto se llama una producción de mecha multi-fin. El proceso se inicia mediante la colocación de una serie de paquetes que forman secadas al horno en una fileta. Los extremos son luego reunidos bajo tensión y se recogen en una bobinadora de precisión de mecha que tiene una transversa-al devanado relación constante (la longitud de los hilos atravesados en una vuelta de la bobinadora). Esta relación tiene un efecto significativo sobre la estabilidad del paquete, las características del filamento, y la facilidad de las operaciones posteriores.

Rovings se utilizan en muchas aplicaciones cuando se utiliza en un proceso de fabricación por pulverización hasta las mechas se corta con una pistola de aire que impulsa las hebras de vidrio cortadas en un molde, mientras se aplica simultáneamente resina y catalizador en la proporción correcta. (Schwartz, 1997)



**Figura 5.** Fibra de vidrio tipo roving.  
(Fuente: Adaptado de Internet Ingemecánica, 2016).

### 1.7.2. Mat o esteras

Mats o esteras, es un manto de hilos cortados o de hebras continuas establecidas como una hoja plana delgada continua. Las hebras comieron uniformemente distribuidos en un patrón aleatorio, y se mantienen unidas por adhesivos aglutinantes o unidos mecánicamente por punzonado.

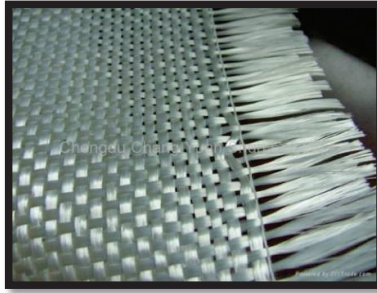
Una estera picado de cadena está formada por deposición de fibras cortadas al azar sobre una cinta o cadena y atándolos con un aglutinante químico. La estera de hebra continua se forma de una manera similar, pero sin picar, y menos aglutinante se requiere generalmente debido a la mayor entrelazamiento mecánico, que proporciona cierta integridad inherente. (Engineered materials handbook, 1987)



**Figura 6.** Fibra de vidrio tipo mat.  
(Fuente: Adaptado de Internet hbswjyfrp).

### 1.7.3. Woven rovings

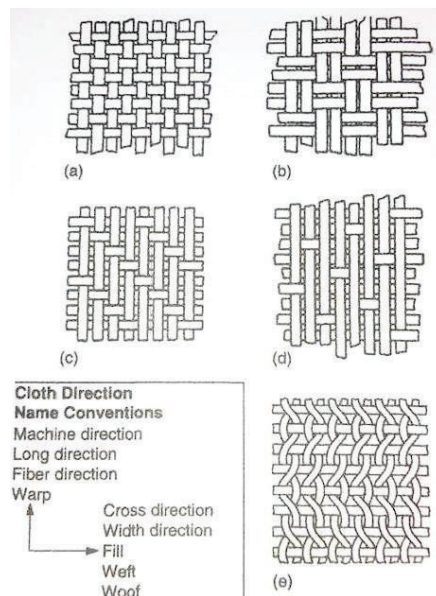
Woven rovings, tramas de mecha son producidos por el tejido de mechas de fibra de vidrio en una forma de la tela. Esto produce un producto basto que se utiliza en muchos procesos de mano de extendido de moldeo y el panel para producir polímeros reforzados con fibras.



**Figura 7.** Fibra de vidrio tipo woven rovings.

(Fuente: Adaptado de Internet diytrade, 2016).

Muchas configuraciones de la armadura están disponibles, dependiendo de los requisitos del laminado. Plano o de tela cruzada teje proporcionar resistencia en ambas direcciones, mientras que un tejido unidireccional cosido a o de punto proporciona fuerza principalmente en una dimensión. Muchos de los nuevos tejida itinerantes telas son todavía no está disponible, incluyendo biaxial y triaxial tejidos para aplicaciones especiales, como se muestra en la figura 8. (Schwartz, 1997)



**Figura 8.** Patrones de tejidos comunes. (a) cuadro o plano de la armadura, (b) la cesta o sarga, (c) pata de gallo o de ligamento raso de cinco arnés, (d) de eje largo (mancha) o satén de ocho arnés, (e) de gasa de vuelta tejido

(Fuente: Adaptado de Internet Akovali, 2001).

## 1.8. Procesos de la fabricación de materiales compuestos de matriz termoestable

La característica común a todos los procesos de fabricación es el de combinar una resina, un agente de curado y cierto tipo de fibra de refuerzo.

La elección de un proceso de fabricación u otro viene determinada por los siguientes criterios:

- Tamaño del elemento a fabricar.
- Geometría y forma del conjunto.
- Naturaleza de los materiales: tipo de resina, tipo y forma del refuerzo.
- Características mecánicas requeridas.
- Terminación superficial.
- Programación de fabricación: número de piezas a fabricar.
- Costes.

Los sistemas de fabricación se diferencian en procesos de molde abierto o cerrado, según el sistema esté o no en contacto con el exterior.

Las principales características se resumen en la tabla 7. (Sahuquillo Navarro, 2012)

**Tabla 7.** Procesos de fabricación de compuestos termoestables.

PROCEDIMIENTOS	RESUMEN
<b>PROCESOS MOLDE ABIERTO</b>	
Método de contacto a mano (hand lay-up)	Se colocan sobre el molde piezas de tejidos de fibra y se impregnan con la resina pasando un rodillo. Se van colocando capas hasta que se consiga el espesor de diseño. La pieza moldeada cura sin aporte de calor ni presión.
Proyección simultánea	Se proyectan simultáneamente los hilos cortados y la resina en un molde donde curará la pieza.
Bolsa de vacío	Se pre impregnan capas de fibras con resina y se curan parcialmente, para formar un pre impregnado. Las capas de pre impregnado se colocan en la superficie del molde con las orientaciones requeridas, se cubren con una bolsa flexible y se consolidan usando vacío y/o presión en autoclave, a la temperatura de curado requerida.
Moldeo por centrifugación	Se introducen mezclas de fibras y resina en un molde rotatorio y se dejan curar.
Enrollamiento en húmedo de filamentos (Filament winding)	Las mechas o hilos continuos de fibra se pasan por unos rodillos o guías pasando a continuación por un baño de resina. Después se enrollan sobre un mandril según unos ángulos preestablecidos. La resina cura parcial o totalmente antes de sacar el componente del mandril.



PROCESOS MOLDE CERRADO	RESUMEN
Moldeo por prensado en frío/caliente	Es un proceso a baja presión y sin calentamiento en el que las fibras se impregnan con resina y se comprimen para dar la forma entre las dos partes del molde. El proceso en caliente se trabaja calentando el molde.
Pultrusión	Alimentación continua de fibras en una orientación preseleccionada, se impregna con resina y se comprime a través de un molde calentado para darle forma de sección final. (Ejes, tubos o perfiles). Durante el paso por la matriz se produce el curado total o parcial.
Inyección	Se utiliza en resinas de curado rápido, los reactivos se mezclan antes de inyectar en el molde, donde se produce la polimerización y el curado.
Moldeo por transferencia de resina (RTM)	Se coloca fibras de tejido en el molde, el cual se cierra después. Luego se inyecta la resina en la cavidad y fluye entre las fibras hasta llenar el espacio del molde.
Moldeo por infusión	El proceso de infusión consiste en la impregnación de una o varias capas de refuerzo colocadas en un molde y cubiertas herméticamente por un film, que hace las veces de molde superior. La resina se introduce con ayuda del vacío hacia el refuerzo entre el molde y el film. A partir de aquí el proceso es igual que el moldeoado por laminado bolsa de vacío pero para piezas de mayor tamaño. Una vez curado el film se puede retirar.
Pre-impregnado	Sistemas formados por las resinas pre catalizadas y fibras según una orientación específica. Se van colocando capas de estas cintas de pre impregnados, y se realiza el curado aplicando calor y presión.

(Fuente: Adaptado de Sahuquillo Navarro, 2012).

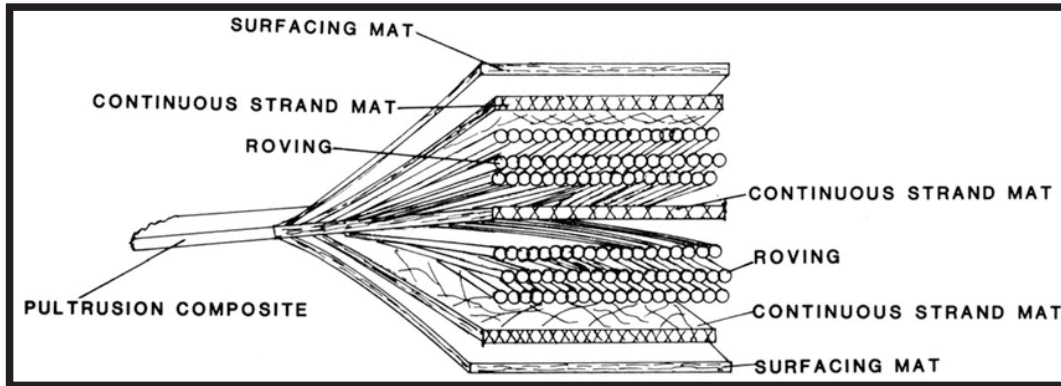
## 1.9. Pultrusión

Un material compuesto de pultrusión se compone de materiales de refuerzo, una resina de laminación que se une el material compuesto, posiblemente un mat o estera para mejorar la apariencia compuesto en la superficie, resistencia química y resistencia a la intemperie, y una variedad de materiales auxiliares, tales como pigmentos para impartir color, aceleradores para curar la resina, agentes internos de desmolde, cargas inertes, etc.

Los materiales de refuerzo utilizados normalmente son de fibra de vidrio, mallas o mat de hilo continuo y rovings de fibra de vidrio continuas. (Raymond W. Meyer, 1985)

En muchos países extranjeros el mat o estera no está disponible y opción se utiliza los hilos rovings en su lugar. La resina puede ser una resina de poliéster insaturado, una resina de éster de vinilo, o una resina epoxi, pero aproximadamente el 90% de todos los productos de pultrusión actualmente utilizar resinas de poliéster. La figura 9 muestra una vista en despiece de un tipo de compuesto con el proceso de pultrusión, que tiene mat y refuerzos de hilos de roving. Esta construcción debe ser equilibrado (misma composición anterior central horizontal como abajo) para evitar que la pieza curada de torsión y deformación.

Los perfiles de construcción no balanceadas a veces se hacen por una razón diseño específico. Algunos productos pultruidos contienen roving como el refuerzo. (Raymond W. Meyer, 1985)



**Figura 9.** Vista de despiece de un material compuesto con Pultrusión.

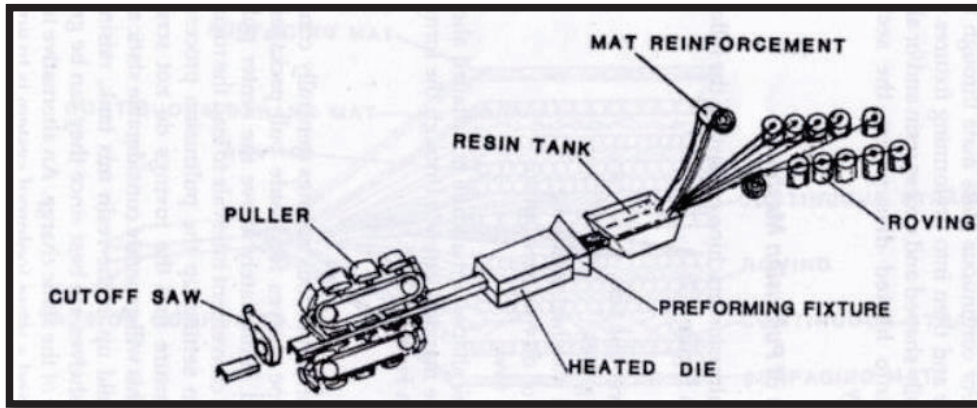
(Fuente: Adaptado de Raymond W. Meyer, 1985).

El proceso de pultrusión consiste generalmente tirar rovings continuas y mat de vidrio continuas a través de un baño de resina o de impregnación y luego en los accesorios de preformado donde la sección está parcialmente formado y el exceso de resistencia y el aire se retiran y luego en moldes calentados donde la sección se cura de forma continua. (Raymond W. Meyer, 1985)

### **1.10. Descripción de la máquina de pultrusión**

El proceso básico de la máquina de pultrusión son los siguientes elementos como se muestra en la figura 10:

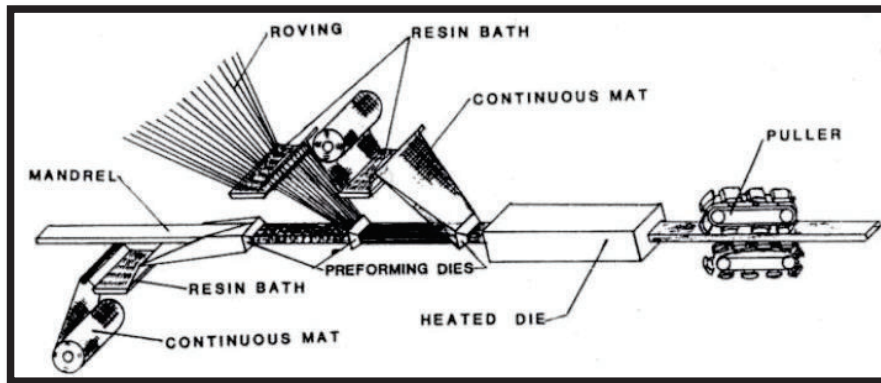
- a) Cesta.
- b) Tanque de impregnación de resina.
- c) Dados de formación.
- d) Dado acoplado metálico en caliente.
- e) Mecanismo de tracción.
- f) Corte de sierra.



**Figura 10.** Típico proceso de Pultrusión.

(Fuente: Adaptado de Raymond W. Meyer, 1985).

Para formas huecas se usa un mandril que está instalado entre pre-conformado y se extiende a través de la sección del molde de formación, como se muestra en la figura 11.



**Figura 11.** Típico proceso de Pultrusión con perfil hueco.

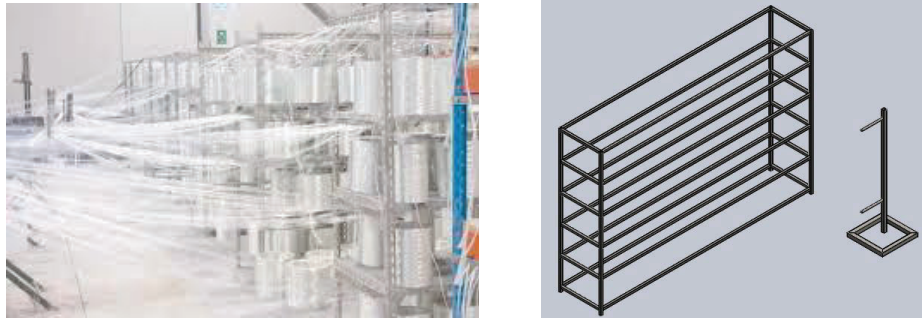
(Fuente: Adaptado de Raymond W. Meyer, 1985).

### 1.10.1. Cesta o estantería

La cesta para colocación de rovings, consiste en un “tipo de estantería”, en los estantes dentro están colocados los paquetes llenos los rovings pasan por unas guías situados inmediatamente por encima de los paquetes para realizar una extracción por el centro, se puede tener intervalos convenientes para dirigir las mechas o rovings al tanque de mezcla de resina.

En la configuración del proceso de pultrusión se debe tener cuidado para asegurar que los rovings ya que se pueden romper uno a través de los otros o también pueden generar considerables “pelusas”.

Los estantes de metales son mejores ya que se pueden conectar a tierra para disipar cargas estáticas generadas por la fricción de los hilos rovings, una alternativa es el uso de guía es de cerámica, también se pueden colocar tubos de vinilo, previene el enredo de uno a otras mechas, en la figura 12 se muestra un estante en durante el proceso.



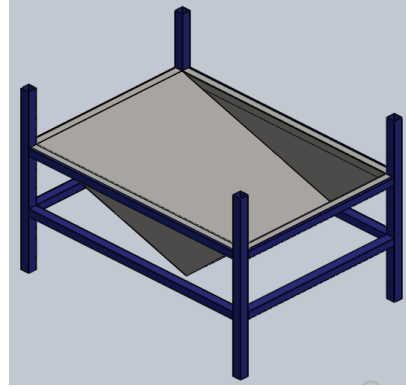
**Figura 12.** Estantería para los rovings.

(Fuente: Adaptado de Raymond W. Meyer, 1985).

### **1.10.2. Tanque de impregnación de resina**

Generalmente es usado una cubeta de metal o aluminio, donde se ubica la resina para cubrir la fibra de vidrio con la mezcla, también se ubican rodillos o ranuras que se puede ajustar para quitar el exceso de resina.

Continuando con la hebra del roving y mat o estera se tiran en una cuba de resina que contiene resina líquida, inhibidores, agente de curado, colorante, retardante de fuego y otros ingredientes. Para asegurarse de que las fibras están completamente humedecidas, las hebras se pasan a través de una serie de rodillos, que se aplastan y se extienden las mechas individuales. La técnica de baño húmedo para la impregnación de resina tiene varios inconvenientes, especialmente en el caso de resinas fenólicas, de bismaleimidas y epoxi. Una solución a esto es inyectar directamente la resina en la preforma de fibra en la entrada, mediante el uso de un sistema de bombeo a presión. Esta técnica es adecuada en el caso de resinas que tienen una vida útil corta, lo que permite para la mezcla de resina en línea. (Akovali, 2001)



**Figura 13.** Tanque de impregnación de resina.

(Fuente: Adaptado de Raymond W. Meyer, 1985).

### **1.10.3. Accesorios o guías de preformado**

Guías de teflón, polietileno de ultra alto peso molecular o de acero se usan para forzar al refuerzo impregnado en la forma deseada. (Akovali, 2001)

Consolida los refuerzos y mueve lo más cerca de la forma final proporcionada por el molde.

### **1.10.4. Dados de preformado o molde de formación**

El molde debe mantener la alineación de la fibra, comprimir las fibras a la fracción de volumen deseada, y curar el material compuesto en un período relativamente corto de tiempo. El perfil de temperatura de la matriz se selecciona dependiendo del tipo de resina. Varios elementos de calefacción se distribuyen a lo largo de la longitud del molde. En casos particulares existen fuentes de calor de radio frecuencia que inducen un calentamiento volumétrico de la muestra, no se produce calentamiento por conducción, pero cada parte de la muestra absorbe la energía de manera uniforme. (Akovali, 2001)

Pueden ser calentados por cartuchos eléctricos o por calentadores de banda o aceite caliente, generalmente es mejor calentar por medio de un conductor caliente, existen una gran variedad de formas para obtener el perfil, en la figura 14 se muestra algunos tipos de moldes.



**Figura 14.** Tipos de moldes en el mercado.

(Fuente: Adaptado de internet ALIBABA).

Las características del molde son las mismas características de diseño que se aplican a otros moldes de FRP en general son aplicables a matrices de pultrusión.

En el diseño del dado se debe normalizar su forma como también el tipo de acero, tamaños del agujero y la ubicación, el tamaño del dado, por lo que los moldes son intercambiables en una empresa que este en producción, obviamente según el perfil que se quiera obtener.

Cualquier buen acero se puede utilizar para hacer una matriz de pultrusión. Se requiere un molde razonablemente duro para compensar la acción abrasiva desde el refuerzo de fibra de vidrio que está a través del molde.

Económicamente se suele usar un AISI 4140, acero forjado pre-templado a 28 - 30 Rockwells. Las áreas internas del molde de pultrusión deben recibir una placa de cromo duro 0,0015-0,002 pulgadas de espesor para proporcionar una larga vida útil. (Raymond W. Meyer, 1985)

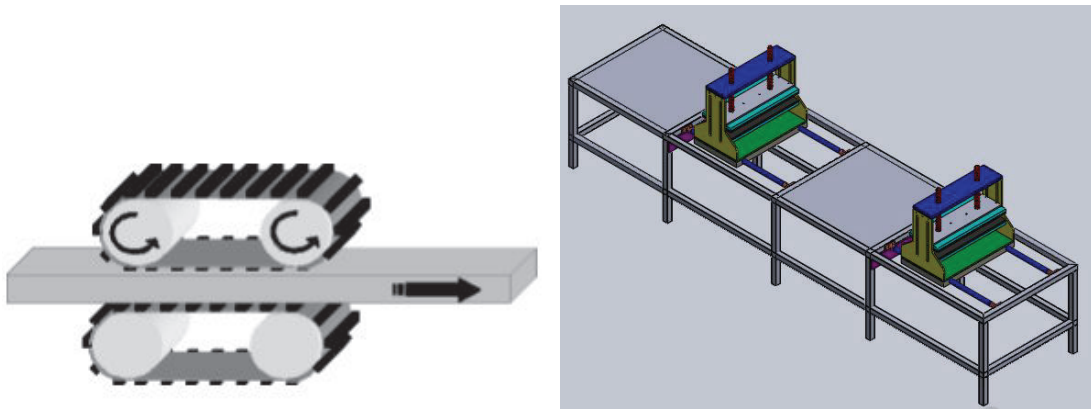
#### **1.10.5. Sistema de tracción**

El requisito básico de un sistema de tracción es para transmitir la fuerza de tracción máxima disponible a diferentes velocidades para el perfil que sale del dado o molde. La Figura 15 muestra el sistema de arrastre de Caterpillar, que es capaz de proporcionar una fuerza de tracción continua, también se muestra un sistema de tracción llamado sistema reciprocantes, que consiste de dos sistemas denominados pullers, su funcionamiento es por acción de vaivén.

Los pullers se traducen horizontalmente para sujetar el perfil. Para que el proceso sea continuo, se utilizan dos prensas, con un solo tirando mientras que el otro viaja de vuelta a



su posición inicial. El sistema de agarre de prensa-tirando hace que la acción de tracción discontinua.



(a) Tipo oruga.

(b) Tipo reciprocantes.

**Figura 15.** (a) Sistema de arrastre tipo Oruga y (b) Sistema de pistones reciprocantes.

(Fuente: Adaptado de Raymond W. Meyer, 1985).

### 1.10.6. Corte por sierra

Se puede utilizar un abrasivo o con disco de diamante en el borde y algunas veces un refrigerante para el corte. El sistema de corte se sujeta con el objeto pultruido durante la operación de corte por sierra.

## 1.11. Principios de diseño de pultrusión

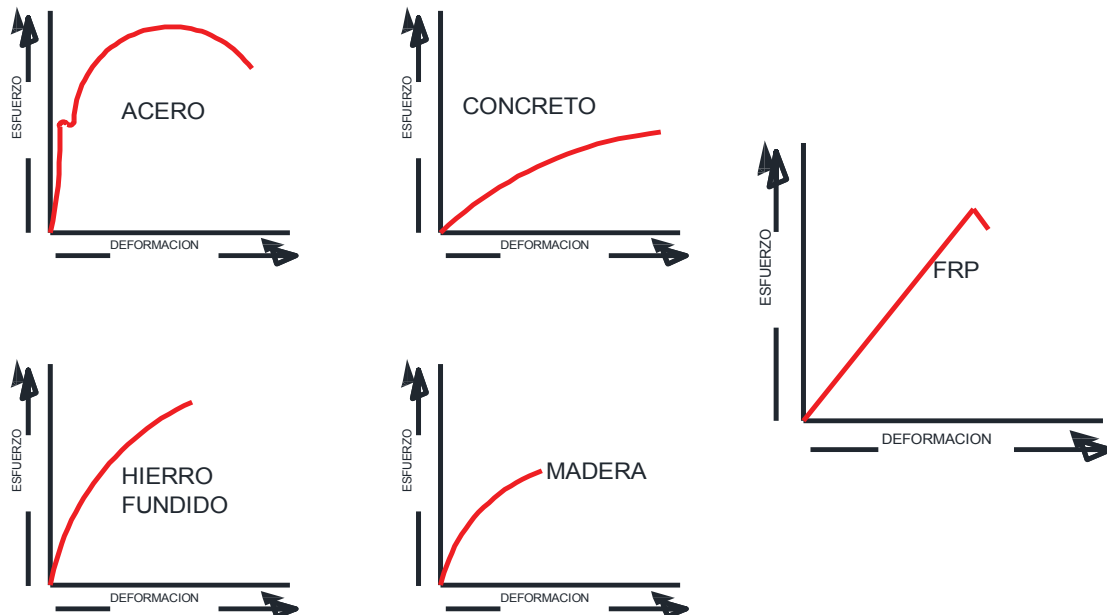
### 1.11.1. Criterios de diseño de propiedades mecánicas

Las normas para el diseño con los metales, madera y el hormigón han estado disponibles desde casi un siglo, pero este mismo tipo de datos de diseño fiables han estado fácilmente disponibles en refuerzos de fibra de vidrio/plástico (FRP Fiber reinforced plastic). Muchos de estos datos todavía necesitan ser generados.

Los principios usados en diseño de estructuras con FRP pueden ser comparados con el diseño de metales o aluminio. En el diseño normal de estructuras con metales dentro de la gama elástica se hace la suposición de que los metales nunca se tensionan más allá del límite proporcional.

Dentro de este rango elástico se dice que los materiales deben obedecer la ley de Hooke, es decir la unidad de esfuerzo es directamente proporcional a la deformación unitaria. No hay material perfectamente elástico, pero se ha encontrado experimentalmente que la mayoría de los materiales utilizados en la ingeniería se aproximan mucho a esta condición

dentro de ciertos límites en la figura 16 se representa las curvas de deformación – esfuerzo de algunos materiales.



**Figura 16.** Curvas diferentes materiales Esfuerzo vs. Deformación.

(Fuente: Adaptado de Raymond W. Meyer, 1985).

En el diseño con laminados de FRP (Fiber Reinforced Plastic) en la carga - estructuras portantes, es importante tener en cuenta los factores de diseño de seguridad se define como la relación entre la resistencia a la rotura de un material a los esfuerzos de trabajo permisibles se especifican por una autoridad de código.

La mayoría de los moldes pueden especificar de forma fiable las fortalezas finales de sus productos laminados en tracción, compresión y flexión, pero es generalmente hasta que parte el diseñador a recoger los factores de diseño. Las propiedades de resistencia tienden a aumentar a medida que la temperatura disminuye y a medida que la temperatura aumenta.

**Tabla 8.** Efecto del tipo de carga sobre el factor de diseño.

TIPO DE CARGA	MÍNIMO FACTOR DE DISEÑO
Cargas estáticas a corto plazo	2
Cargas estáticas a largo plazo	4
Cargas variables	4
Cargas repetitivas	6
Cargas de impacto	10

(Fuente: Adaptado de Raymond W. Meyer, 1985).



Tabla 8 enumera los factores de diseño mínimos para varios tipos de carga de acuerdo a Gaylord (1974) y en la tabla 9 enumera el efecto de la temperatura en un sistema FRP. Si una estructura es ser sometido a otra que las temperaturas ambientales normales es deseable probar el laminado a esta temperatura de servicio.

**Tabla 9.** Efecto de la temperatura sobre un sistema FRP.

TEMPERATURA (GRADOS F)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (PSI)	MODULO DE ELASTICIDAD (PSI)
75	20000	$2,3 \times 10^6$
125	16000	$1,8 \times 10^6$
175	12000	$1,4 \times 10^6$
200	10000	$1,2 \times 10^6$

(Fuente: Adaptado de Raymond W. Meyer, 1985).

En la tabla 10, podemos observar características de pultrusión. Hay menos restricciones en el diseñador al desarrollar formas de pultrusión que en la mayoría de los procesos de FRP, siempre que la forma tiene una sección transversal constante y se puede extraer de forma continua.

**Tabla 10.** Características principales para el proceso de pultrusión.

<b>Tamaño</b>	<i>La conformación de la matriz y el equipo de tracción dependen de la capacidad de tamaño que esto influye.</i>
<b>Forma</b>	<i>Secciones rectas, constantes, algunos tramos curvos posibles.</i>
<b>Refuerzos</b>	<i>Fibra de vidrio, fibra de carbono, fibra de aramida.</i>
<b>Resinas</b>	<i>Poliéster, Ester de vinilo, epoxi, siliconas.</i>
<b>Contenido fibra de vidrio</b>	<i>Rovings, 40 – 80% del peso. Mat, 30 – 50 % del peso. Woven rovings, 40 – 60% del peso.</i>
<b>Esfuerzos mecánicos</b>	<i>Medio a alto, principalmente unidireccional, se acerca isotrópico.</i>
<b>Intensidad de trabajo</b>	<i>Bajo a medio.</i>
<b>Costo molde</b>	<i>Bajo a medio.</i>
<b>Velocidad de producción</b>	<i>Forma y espesor relacionado.</i>

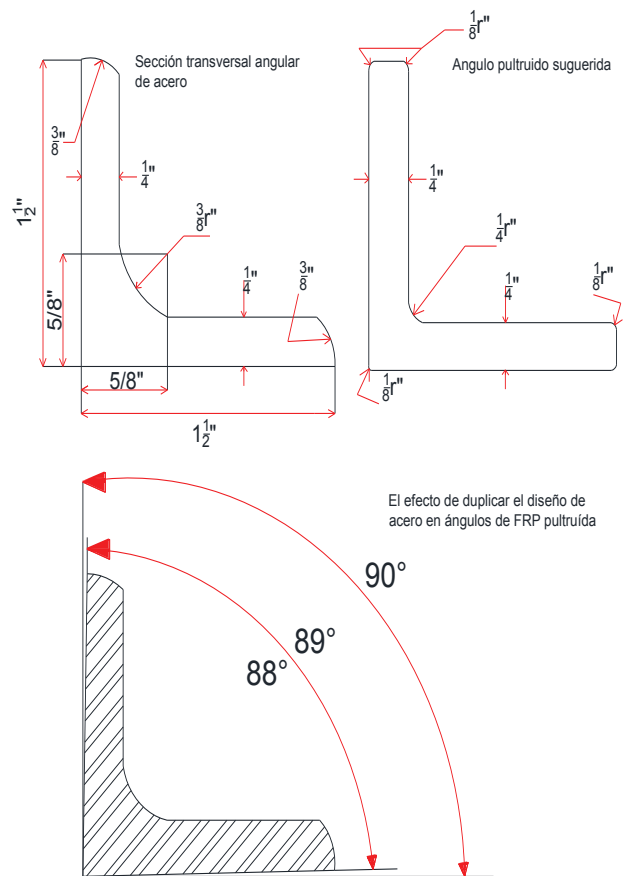
(Fuente: Adaptado de Raymond W. Meyer, 1985).

### 1.11.2. Perfiles estructurales.

Los perfiles estructurales pultrusionados se han convertido en un importante negocio para la pultrusión. Estas formas son particularmente usadas en plantas químicas, agua y tratamiento aguas residuales, en plataformas de taladrado, rejillas, etc.

Tempranamente los perfiles de pultrusión son hechos por medio de la conformidad con la práctica de estándares de elementos de acero. Pero pronto se descubrió que las formas fueron materiales heterogéneos y su contracción durante el curado estaba sujeta al tipo y la cantidad utilizada de resina, entonces esto causaba una deformación que era un gran problema.

En la figura 17 es un ejemplo de diseño estándar de un ángulo de acero de 1 ½" x 1 ½" x ¼ "pulgadas de grueso, es mostrado en sección cruzada. La gran cantidad de material en la zona de filete es particularmente perjudicial. Esto hace que los lados del ángulo a se mueven hacia adentro, y reduce el ángulo de 90 grados entre los lados como se muestra en la parte inferior de la figura 17. (Raymond W. Meyer, 1985)



**Figura 17.** Diferencia de diseño de ángulo – acero vs FRP.

(Fuente: Adaptado de Raymond W. Meyer, 1985).

Para superar este problema, el ángulo de sección transversal se rediseñó como se muestra en la figura. Estos cambios permitieron que se mejorara y que pueda ser de ayuda en las tolerancias. Algunos materiales se ahorraron como ese resultado.

Formas estructurales deben contener mat de hebras continuas, así como rovings continuos, aproximadamente el 50 - 60%, es una regla general. (Raymond W. Meyer, 1985)

### 1.11.3. Formas huecas

Formas huecas son especiales en cuanto a que requieren un mandril en el molde. Este molde debe ser la longitud del molde más el 18 - 24 pulgadas. El molde se extiende hacia afuera el lado aguas debajo de la matriz y está anclado a un poste, desde el inicio del molde hasta la salida de este, el poste de anclaje, deben ser diseñados adecuadamente de modo que no se mueva durante el funcionamiento. Si el molde se mueve, un lado del tubo hueco se sobredimensionar mientras se subdimensionado el otro lado. Este proceso de formas huecas se puede ver más claramente en la figura 11. (Raymond W. Meyer, 1985)

### 1.12. Normativa

Al ser un proceso que en Ecuador aún no está certificado, las normas que rigen este proceso son de carácter internacional, estas son las encargadas de pautar la calidad que los perfiles pultruidos requieren para ser usados en cada una de las aplicaciones a las que vayan destinados, es así que se encuentran patrones como:

- En España (Solo tiene adaptaciones de la Norma Europea En13706):

**Tabla 11.** Normativas aplicadas a España.

Nombre	Estado	Descripción
UNE-EN 13706 – 1:2003	Vigente	Materiales compuestos de plástico reforzado. Especificaciones para perfiles pultruidos. Parte 1: designación.
UNE-EN 13706 – 2:2003	Vigente	Materiales compuestos de plástico reforzado. Especificaciones para perfiles pultruidos. Parte 2: Métodos de ensayo y requisitos generales.
UNE-EN 13706 – 3:2003	Vigente	Materiales compuestos de plástico reforzado. Especificaciones para perfiles pultruidos. Parte 3: Requisitos específicos.

(Fuente: Adaptado de AENOR).

- En Japón.

**JIS K 7015:** Plásticos reforzados con fibras pultruidos, esta norma fue aprobada el 20 de Noviembre de 2006).

- Normativa ISO.

**ISO 1268 – 6:** Los métodos de producción de placas de ensayo para los plásticos reforzados con fibra. Parte 6: moldeo por pultrusión Esta norma de aplica en conjunción con la norma ISO 1268-1 (2001-12).

**ISO 1268 – 1:2001:** Plásticos reforzados con fibra. Método de producción de placas de ensayo – Parte 1: Condiciones generales.

- Normas técnicas ASTM.

**Tabla 12.** Normativas ASTM International.

Tipo de norma	Número de norma	Descripción
ANSI/ASTM	F 1092	Especificación estándar para la fibra de vidrio (GRP) pultrusión abierta- tiempo tormenta y guarda, sistemas de barandillas cuadrados. La revisión de la norma ANSI / ASTM F 1092-1997 se aprobó 01 de marzo 2004.
ASTM	C 581	Método de prueba para resistencia química de resinas termoendurecibles usadas en estructuras reforzadas con fibra de vidrio.
ASTM	C 582	Especificación para laminados de plástico reforzados para estructuras reforzadas con fibra de vidrio.
ASTM	D 2105	Método de prueba de propiedades de tracción longitudinal de tubo de plástico termo fijo reforzado.
ASTM	2143	Método de prueba de resistencia a la presión cíclica de tubos de plástico termo fijo reforzado.
ASTM	D 2310	Clasificación de tubos de resina termo fija reforzada hechos a máquina.
ASTM	D2344	Test para la determinación de la resistencia a cortante fuera del plano de laminados unidireccionales mediante el método de viga corta.
ASTM	D 2517	Especificación para tubos y accesorios de presión de gas de resina epóxicas reforzada.
ASTM	D 2562	Practica para clasificar defectos visuales en partes moldeadas de plásticos termo fijo reforzado.
ASTM	D 2563	Practica para clasificar defectos visuales en partes del laminado de plástico reforzado con fibra de vidrio.
ASTM	D 2924	Método de prueba de resistencia a la presión externa de tubos de resina termo fija.
ASTM	D 2925	Método de prueba de desviación de haz de tubos de plástico termo fijo reforzado bajo un flujo de paso completo.
ASTM	D 2992	Método para obtener bases de diseño hidrostático para tubos y accesorios de resina termo fija reforzada.
ASTM	D 2996	Especificación para tubos de resina termo fija reforzada con enrollado de filamentos.
ASTM	D 2997	Especificación para tubos de resina termo fija reforzada moldeada por centrifugación.
ASTM	D 3262	Especificación para tubos de desagüe de mortero de plástico reforzado.
ASTM	D 3299	Especificación para tanques resistentes a químicos de resina termo endurecibles reforzada con fibra de vidrio enrollado de filamentos.

ASTM	D 3518	Test para la determinación de la resistencia a cortante-deformación en el plano de laminados unidireccionales.
ASTM	D 3647	Clasificación de las formas debido a su composición de plásticos reforzados fabricados por pultrusión.
ASTM	D 3878	Definición estándar de términos relacionados con fibras de refuerzo de alto módulo y sus componentes.
ASTM	D 695	Método de prueba estándar para las propiedades de compresión de plásticos rígidos.
ASTM	D 3914	Método para la determinación de la resistencia a cortante en el plano de plásticos reforzados con fibra de vidrio (GRP) fabricados mediante pultrusión. Aprobado 2008.
ASTM	D 790	Métodos de prueba estándar para las propiedades de flexión de armado y plásticos reforzados y materiales de aislamiento eléctricos.
ASTM	D 3916	Método de prueba estándar para propiedades de tracción de barra de plástico de fibra de vidrio reforzado con pultrusión.
ASTM	D 3917	Tolerancias dimensionales de secciones de plástico reforzado con fibra de vidrio fabricadas mediante pultrusión.
ASTM	D 3918	Terminología de uso corriente en relación con plástico reforzado con productos pultruidos. Aprobado 2003.
ASTM	D 3919	Definición estándar de términos relacionados con piezas de plástico reforzado.
ASTM	D 3982	Especificación para cascos de resina termo fija reforzada con fibra de vidrio y moldeada a presión de contacto media.
ASTM	D 4385	La práctica estándar para la clasificación de los defectos visuales en productos pultruidos termoestables reforzados de plástico.
ASTM	D 4475	Método <sup>11</sup> de prueba estándar para la fuerza cortante horizontal aparente de pultrusión varillas de plástico reforzado por el método corto de la viga. Aprobada 2003.
ASTM	D 4476	Método de prueba estándar para las propiedades de flexión de fibra reforzada varillas de plástico pultruidos.
ASTM	D 5028	Método de prueba estándar para la curación de las propiedades de las resinas de pultrusión por análisis térmico. Aprobada 2003.
ASTM	D 5117	Método de prueba estándar para la penetración de tinte de fibra de vidrio solida armado de stock pultruidos.
ASTM	E 1922	Método de prueba estándar para la resistencia a la factura traslaminar de materiales compuestos de matriz polimérica laminados y pultruidos.
SAE	AMS 3811B AMS 3912B	Varillas de fibra de aramida, resina de poliéster recubierto, pultrusión. Aprobado 1998.
ASTM	D 638	Método de prueba estándar para las propiedades de tracción de los plásticos.

(Fuente: Adaptado de International).

### 1.13. Ventajas y desventajas del proceso de pultrusión

El proceso de pultrusión tiene muchas ventajas en la fabricación de perfiles así como desventajas, se debe considerar que este proceso se caracteriza por llevar un porcentaje alto de fibra de vidrio con respecto a los obtenidos por otros procesos de matriz termostable. El porcentaje en fibra de vidrio en peso de estos perfiles esta alrededor de 65 – 70 %.

A continuación citaremos algunas entre sus ventajas del proceso de pultrusión:

- Gran resistencia a la conductividad eléctrica (dieléctrico).
- Se puede componer para resistir a la corrosión de la mayoría de productos existentes.
- Excepcional comportamiento a la intemperie.
- Resistente a la humedad. Absorción de agua prácticamente nula.
- No se deteriora ni pudre como la madera. No le afectan los microorganismos.
- Fabricación de una amplia gama de colores. Coloreada la totalidad de su masa.
- Su peso llega a ser 2/3 del aluminio y 1/4 al del acero. - Mayor resistencia al impacto que las cerámicas.
- Mantiene sus propiedades mecánicas y eléctricas a altas temperaturas extremas (desde  $-70^{\circ}\text{C}$  hasta  $300^{\circ}\text{C}$ ).
- Elevadas resistencias mecánicas y al impacto según la composición del refuerzo elegido.
- Puede fabricarse con elevada resistencia a la inflamabilidad, autoextingibles y baja generación de humos no letales.

Dado que su característica de ser material compuesto, cabe la combinación de una gran variedad de perfiles, al igual que al definir algunas características muy específicas, lo que demuestra un gran potencial de adaptabilidad en la solución de muchos problemas de ingeniería de proyecto, ingeniería de mantenimiento, ingeniería de operaciones y arquitectura.

Citaremos sus desventajas del proceso de pultrusión:

- Alta dificultad para fabricar piezas que no sean unidimensionales y de sección constante.
- Necesidad de un molde de altas prestaciones con acabado muy fino, de un sistema de calentamiento y, en ocasiones, de presurización interior.
- La velocidad del proceso es relativamente baja comparada con la velocidad de la extrusión.
- Problemas de adhesión cuando es necesario unir piezas mediante adhesivos, debido al acabado tan fino de las piezas. Para obtener uniones de altas prestaciones es necesario preparar las superficies de unión mediante un proceso previo mecánico o químico.

## 1.14. Aplicaciones del proceso de pultrusión

A continuación se menciona en la tabla 13, las aplicaciones según el tipo de mercado, se toma en cuenta que su gran aporte a las diferentes áreas se van incrementando conforme el paso del tiempo.

**Tabla 13.** Aplicaciones de la pultrusión en varias áreas industriales.

<b>Mercado</b>	<b>Aplicaciones</b>
Agricultura y Horticultura	Postes de cercas eléctricas, soportes de flores, estacas del jardín, barras batidor de uva, estructuras de invernadero, estacas hortícolas, apoyos netos, palos de valores, soportes casa túnel.
Construcción	Cornisas, barras de refuerzo de hormigón, pasamanos, pasadores de pared de retención de alta resistencia a la tracción, escaleras, postes de luz, plataformas portátiles, vallas de seguridad, andamios, vigas estructurales, mangos de herramientas.
Defensa	Camuflar polos netos, elementos para aplicaciones estructurales (aleta, fuselaje, etc.), postes de la carpa.
Eléctrico	Antenas, las escalas de cables y conductos, varilla de canalización, portafusibles, pértigas, aisladores, barras de línea separadoras, manijas del horno, Poste de potencia brazos cruzados, cuñas de ranura, actuadores de conmutación, bares transformador espaciadores, soporte de cable de fibra óptica.
Marina	Manijas gaffe, puestos de mercado, látigos de amarre / escaleras del embarcadero, barandilla, varillas para boyas, unidades de protección malecón, puntales, pasarelas, listones de yates.
Minería	Auges, varillas de bombeo de petróleo, pernos rocas, soportes estructurales.
Recreación	Bastones, palos de bandera bicicleta, arcos y flechas, lanzas de buceo, postes de la bandera, Cañas de pescar, palos de golf, palos de hockey, puntales cometa, manijas de pádel, sables de la vela, bastones de esquí, barreras de campo de esquí y señales, marcador de campo de deportes, postes de la carpa, barras de tono xilófono.
Alcantarillado y abastecimiento de agua	Rejillas de filtro, rejilla, pasamanos, escaleras, pernos de salida tapado, refuerzo tanque, raspadores de lodos, guías compuerta, secciones para las plantas de tratamiento.
Transporte	Barras hinchables, pasamanos, puestos, delineador carretera, componentes de manejo de materiales, asientos, firmar puestos, componentes del trazador de líneas tirantes.
Varios	Tablillas de cama, manijas, componentes de refrigeración, asientos, perfiles, estructurales estándar, agrimensura clavijas, tubos para plantillas y accesorios, componentes paraguas, suspensiones vibrador.

(Fuente: Adaptado de Akovali, 2001).

## **CAPÍTULO 2**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE PULTRUSIÓN**

En este capítulo se define el diseño y construcción de la máquina de pultrusión a partir de la ingeniería concurrente, donde realizaremos un estudio en el que se llegará a plantear una solución según el problema planteado, para el desarrollo de esto se deberá seguir una metodología en el cual el diseño adecuado deberá contener los pasos necesarios para planear un diseño metodológico y conceptual conveniente con el fin que se atenga a todos los requerimientos que el portador de este equipo requiera tener. El método escogido es una de las técnicas que más aspectos que da valor y por lo tanto es el que más bases brindan al diseño, ya que, se fundamenta en la gestión de calidad dando herramientas para lograr un correcto diseño; este método es conocido por sus siglas en inglés “QFD” (*Quality Function Deployment*). Esta práctica ayuda a traducir y expresar los requisitos del cliente, los requerimientos del diseño e incluso dar la visión sobre la competencia con un estudio de mercado.

#### **2.1. Casa de calidad**

Las especificaciones técnicas de la máquina son determinadas a través de la casa de la calidad. La casa de la calidad es un diagrama, que se asemeja a una casa, utilizado para definir la relación entre los deseos de los clientes y la voz de los ingenieros diseñadores. (Riba, 2010)

La casa de la calidad para el presente proyecto se presenta en el anexo A.

Las conclusiones que se obtuvieron de la casa de la calidad se plasman en los siguientes requerimientos técnicos:

- Fácil ensamble mediante módulos bien definidos.
- Estabilizar la tensión de las bobinas de fibra de vidrio.
- Funcionamiento en sus componentes que no se supere los 85 dB.
- Velocidad de arrastre regulable.
- Temperatura máxima de funcionamiento regulable dentro de las etapas.

Se puede observar que estos parámetros están totalmente relacionados con dos aspectos relevantes de la máquina que son: la calidad del producto final y el volumen de producción según las especificaciones técnicas que se detallan en la parte inferior.



## 2.2. Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas se han obtenido como producto de la casa de la calidad y en la tabla 14 se elabora el documento de especificación de la máquina pultrusión.

**Tabla 14.** Especificaciones técnicas a partir de la casa de la calidad.

<b>Empresa cliente:</b>		<b>Producto:</b> <b>Máquina pultrusión</b>	Fecha inicial: 2015-08-01 Última revisión: 2015-08-10	
<b>Diseñadores:</b> Saaid Abedraabo Jonathan Jiménez Fabián Sánchez Luis Villacís			Página 1	
<b>Especificaciones</b>				
<b>Concepto</b>	<b>Fecha</b>	<b>Propone</b>	<b>R/D</b>	<b>Descripción</b>
<b>Función</b>	2016-06-01	C	R	Sistema guía para hilos Roving.
	2016-06-01	C+I	R	Sistema tensado mediante pullers.
	2016-06-01	C	R	Elementos con acabado fino para evitar daño en la materia.
	2016-06-01	I	R	Zonas de temperatura regulable para el curado de la resina.
	2016-06-01	I	R	Velocidad variable de arrastre.
	2016-06-01	I	D	Corte automatizado del perfil.
<b>Dimensión</b>	2016-06-01	I	R	No sobrepasar los 15 metros en largo y 2 metros en ancho.
<b>Señales y control</b>	2016-06-01	C	R	Indicador de temperatura en las diferentes zonas.
	2016-06-01	I	R	Paros de emergencia total y en la bomba hidráulica.
	2016-06-01	I	R	Control mediante plc de los movimientos de la máquina.
<b>Materiales</b>	2016-06-01	C+I	R	Fácil cambio de diámetros de la fibra de vidrio.
	2016-06-01	I	R	Tina de resina con material anticorrosivo.
<b>Vida útil</b>	2016-06-01	C+I	D	10 años en operación y 99% de fiabilidad.
<b>Movimientos</b>	2016-06-01	C+I	D	Movimiento de arrastre no brusco.
<b>Aspectos legales</b>	2016-06-01	I	R	Normas de seguridad OSHAS 1800.

**Propone:** C = Cliente; I = Ingeniería.

**R/D:** R = Requerimiento; MR = Modificación de requerimiento; NR = Nuevo requerimiento; D = Deseo.

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

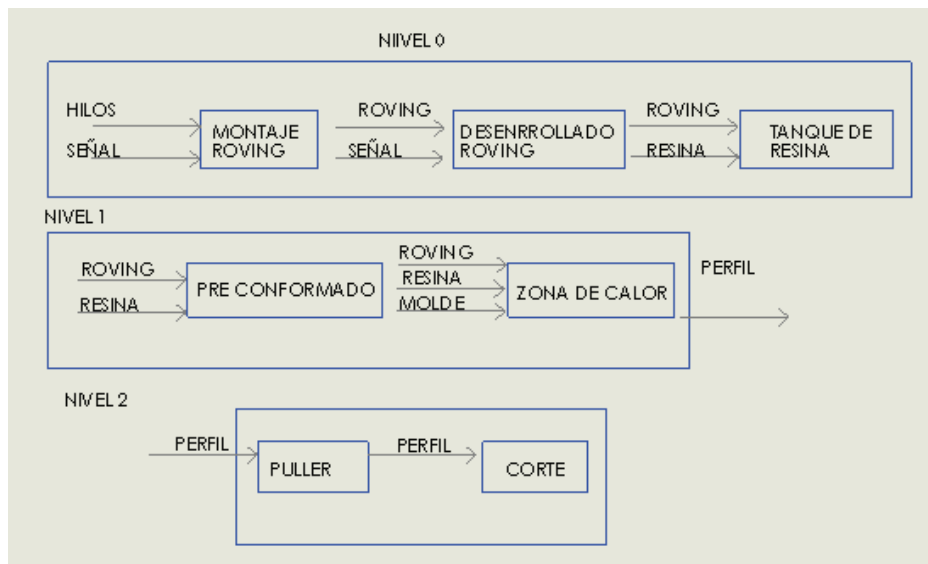
### 2.3. Análisis funcional

Es una técnica cuyo fin es separar la acción que se efectúa del componente o mecanismo para buscar varias soluciones a un mismo problema. Con esto se consigue obtener mejores productos a costos menores. (Torres, Sanz, Guerrero, & Juárez, 2014)

Para aplicar esta herramienta, se deben establecer las funciones primarias y secundarias del producto a obtener. Las funciones primarias son aquellas por la que el cliente compra el producto y las funciones secundarias nos permiten que la función primaria se desarrolle de manera eficiente y son las que se extraen para el posterior análisis.

Cuando se han establecido las funciones secundarias se plantean soluciones para luego seleccionar las que sean más convenientes. Estas funciones pueden ser agrupadas a fin de obtener módulos que sean capaces de cumplir un conjunto de funciones secundarias con lo cual se obtiene un diseño modular.

La estructura funcional para el presente proyecto, realizada mediante diagramas de flujo, se observa en la figura 18.



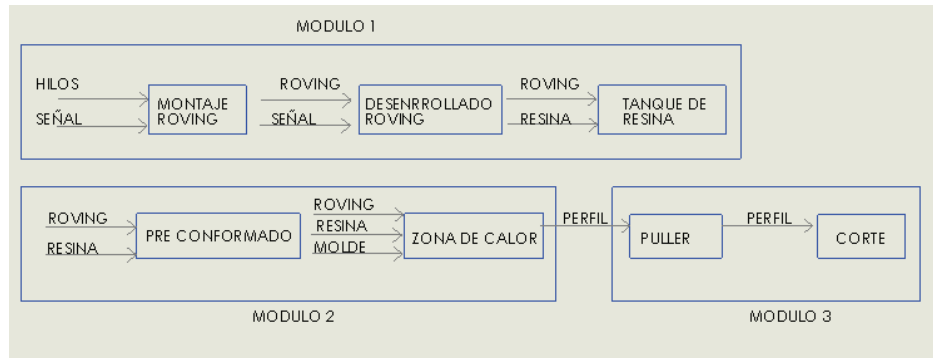
**Figura 18.** Diagrama de flujo.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Como se aprecia en la figura anterior se ha estimado conveniente realizar el diagrama funcional hasta el nivel 2 ya que no amerita la derivación de otros niveles. Se llega al nivel 2 porque es necesario que aparezcan explícitas varias acciones que no se aprecian en el nivel 1.

## 2.4. Generación de módulos

En vista que en el proceso de pultrusión es extenso, resulta conveniente realizar una división modular. Del nivel funcional 2 se destacan tres módulos claramente diferenciados, como se aprecia en la figura 19.



**Figura 19.** Módulos.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Se puede concluir que en el módulo 1 tenemos el montaje de las bobinas de hilo roving el desenredado y la guía para guiar los hilos mediante la resinas. En el módulo 2 tenemos el paso del hilo junto con la resina por el conformador y por las zonas de calor para el curado. En el módulo 3 tenemos el perfil curado y su corte como producto final.

## 2.5. Generar alternativas (fundamentos y esquemas)

### 2.5.1. Módulo 1

Este módulo cumple las siguientes funciones:

- Montar las bobinas de hilo Roving.
- Desenrollar el hilo Roving.
- Paso por el Tanque de resina (Resing Bath).

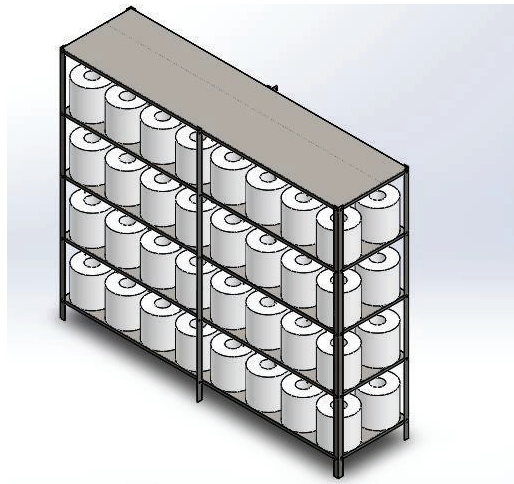
Se propone las siguientes soluciones para cada fase.

#### 2.5.1.1. Montaje de las bobinas de roving

Es el primer elemento dentro de la máquina de pultrusión y es el que almacena y provee de la materia prima al sistema. Los rollos comercialmente venden por kilogramos con un peso promedio de 18 Kg por lo cual seleccionar la manera óptima de almacenamiento que cumpla con los requerimientos del proceso. Para el montaje del rollo de roving presenta las siguientes soluciones.

#### 2.5.1.1.1. Montaje del hilo en una cesta vertical

Este tipo de sistema es usualmente usado, consta de comúnmente de cinco repisas en las cuales se distribuye el hilo Roving de forma tal que se maximiza la cantidad de hilos, con la opción de que se puede aumentar los niveles dependiendo de los requerimientos del perfil a construir, por su robustez este tipo de disposición de los hilos se los utiliza para perfiles estructurales.



**Figura 20.** Cesta forma vertical.  
(Fuente: Adaptado de propia fuente).

#### **Ventajas**

- El montaje es de fácil para de los operarios.
- Permite vigilar el estado del rollo en todo momento.
- Funcionamiento simple.

#### **Desventajas**

- La colocación del rollo es manual.
- El tamaño depende del espacio disponible.

#### 2.5.1.1.2. Montaje de hilo sobre unos rodillos horizontales

Esta disposición permite al rollo ingresar de forma horizontal el cual tiene provisto una tuerca para que no se desplace, al estar colocado de esta forma el hilo es halado por la parte superior como se muestra en la figura 21.



**Figura 21.** Cesta forma horizontal.

(Fuente: Adaptado de alibaba).

### **Ventajas**

- Se puede utilizar cualquier tipo de tamaño de roving.

### **Desventajas**

- Colocación manual.
- El halado del hilo es por la parte superior lo cual puede provocar que el hilo se enrede.

#### 2.5.1.2. Desenrollado de hilo roving

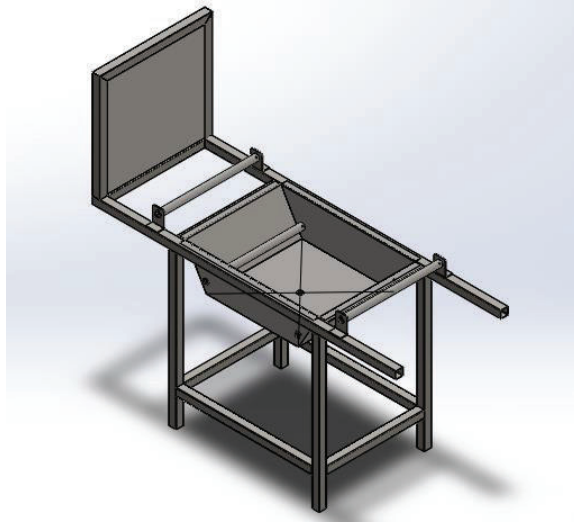
El desenrollado del hilo se lo hace manualmente para hacerlo pasar por las guías. A la tela se la hace pasar por unas guías para su posterior tensión y paso por el procedo establecido.

#### 2.5.1.3. Impregnación de resina

Para el paso por el tanque de resina es el proceso más delicado en el cual es necesario que los hilos se saturen de resina que se encuentra en estado líquido para el paso por el pre-conformador. Las soluciones establecidas para el proceso.

##### 2.5.1.3.1. *Impregnación por rodillo guía*

El tanque de resina está provisto por rodillos guías los cuales obligan al hilo a pasar por la resina con lo cual se garantiza la saturación del hilo.



**Figura 22.** Impregnación resina por rodillos.  
(Fuente: Adaptado de propia fuente).

### **Ventajas**

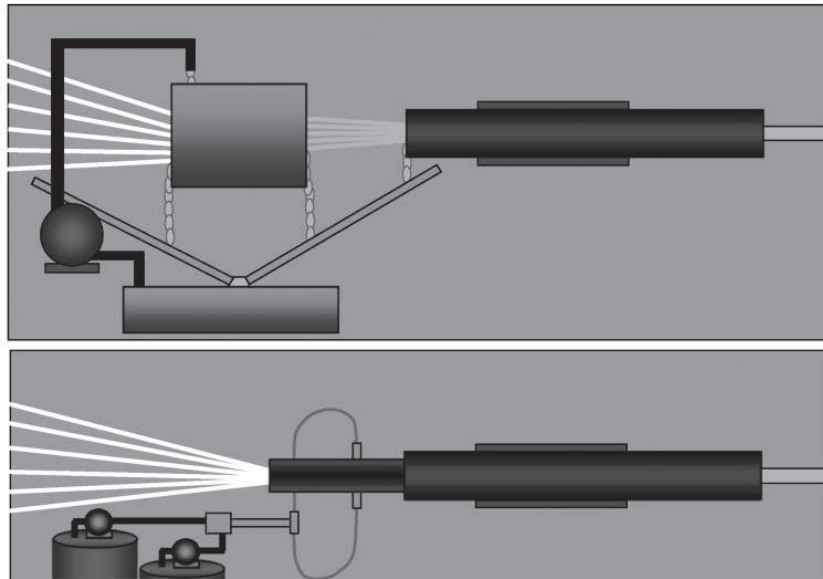
- Impregnación de resina garantiza la saturación de la misma sobre el hilo.
- Costo relativamente bajo.

### **Desventajas**

- Ingreso de la resina manualmente.

#### *2.5.1.3.2. Impregnación con bomba recirculante*

Se ha considera esta opción por la cual se obliga a la resina a estar en movimiento continuo y lo hace por medio de la parte superior del molde, en la figura 23 se visualiza el sistema de impregnación.



**Figura 23.** Sistema de impregnación con bomba recirculante.  
(Fuente: Adaptado de plásticos, 2011).

**Ventajas.**

- Poco desperdicio de la resina.
- Impregnación de la resina al hilo de forma óptima.

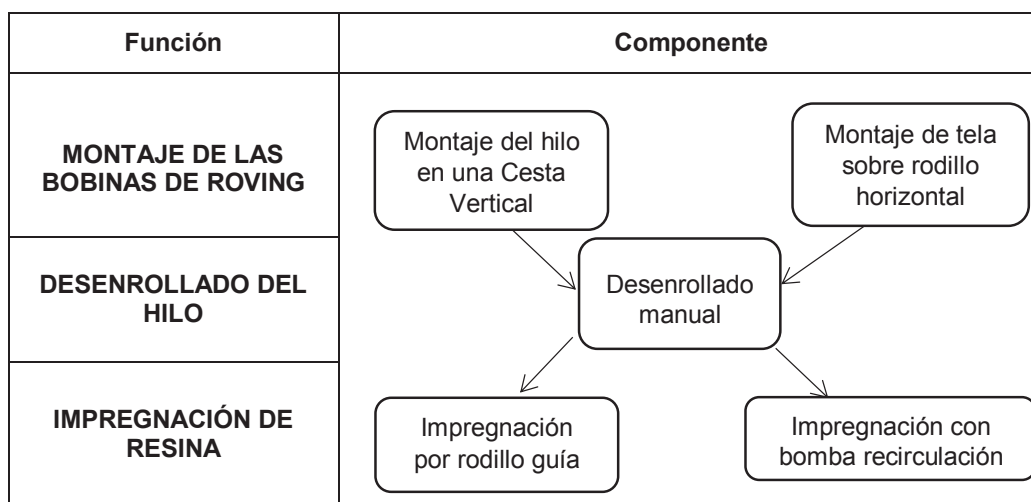
**Desventajas.**

- Costo alto.
- Difícil limpieza del sistema.

2.5.1.4. Alternativas de los módulos

Para determinar las alternativas del “*módulo 1*” se deben combinar todas las soluciones, como se lo explica en la siguiente tabla 15:

**Tabla 15.** Alternativas del módulo 1.



(Fuente: Adaptado por fuente propia).

### 2.5.1.5. Evaluación y selección de los módulos

Se analizará qué módulo es el más conveniente para el proceso usado, para este propósito se ha utilizado el método ordinal corregido de criterios ponderados.

Los criterios de valoración más determinantes son:

- Facilidad de montaje del hilo, porque de esto depende el tiempo de puesta en marcha de la máquina.
- Desgaste en los componentes, porque esto depende el mantenimiento.
- Fiabilidad del sistema y en los distintos componentes que lo conforman, ya que el mismo nos permite el correcto funcionamiento de la máquina.
- Fácil operación.

**Tabla 16.** Evaluación del peso específico de cada criterio.

	<b>Facilidad de montaje</b>	<b>Desgaste</b>	<b>Mecanismos sencillos</b>	<b>Fiabilidad del tensado</b>	<b>Σ+1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Facilidad de montaje</b>	1	1	0,5	3,5	0,29	
<b>Desgaste</b>	0,5	1	0,5	3	0,25	
<b>Mecanismos sencillos</b>	0,5	0	1	0,5	2	0,17
<b>Fiabilidad del tensado</b>	0,5	1	1	3,5	0,29	
<b>Suma</b>				12	1	
facilidad de montaje=fiabilidad del tensado>desgaste>mecanismos sencillos						

(Fuente: Adaptado por fuente propia).



**Tabla 17.** Evaluación del peso específico del criterio “desgaste”.

<b>Desgaste</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución 1</b>		1	0,5	2,5	0,38
<b>Solución 2</b>	0,5		0,5	2	0,31
<b>Solución 3</b>	0,5	0,5		2	0,31
<b>Suma</b>				6,5	1
Solución3=Solución2<Solución1					

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

**Tabla 18.** Evaluación del peso específico del criterio “mecanismos sencillos”.

<b>Mecanismos sencillos</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución 1</b>		1	0,5	2,5	0,38
<b>Solución 2</b>	0,5		0,5	2	0,31
<b>Solución 3</b>	0,5	0,5		2	0,31
<b>Suma</b>				6,5	1
Solución3=Solución2<Solución1					

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

**Tabla 19.** Evaluación del peso específico del criterio “fiabilidad del tensado”.

<b>fiabilidad del tensado</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución 1</b>		1	1	3	0,35
<b>Solución 2</b>	1		0,5	2,5	0,29
<b>Solución 3</b>	1	1		3	0,35
<b>Suma</b>				8,5	1
Solución3=Solución1>Solución2					

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

**Tabla 20.** Conclusión para el módulo 1”.

<b>Conclusiones</b>	<b>Facilidad de montaje</b>	<b>Desgaste</b>	<b>Mecanismos sencillos</b>	<b>Fiabilidad del tensado</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Prioridad</b>
<b>Solución 1</b>	0,103	0,096	0,064	0,103	0,37	1
<b>Solución 2</b>	0,086	0,077	0,051	0,086	0,30	3
<b>Solución 3</b>	0,103	0,077	0,051	0,103	0,33	2

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

La solución que más se ajusta a los criterios de evaluación es la número 1.

## 2.5.2. Módulo 2

De acuerdo el diagrama funcional, en este módulo cumple las siguientes funciones

- Pre-conformado.
- Molde.
- Zona de calor en el molde.

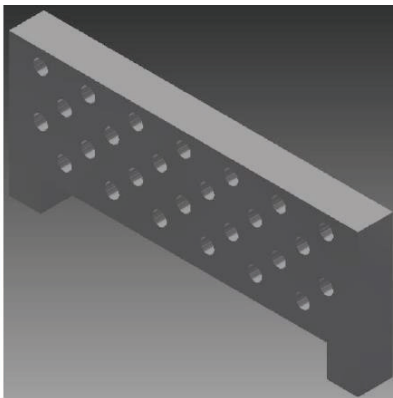
A continuación se establecen las soluciones:

### 2.5.2.1. Pre-conformado

El pre-conformado es la parte en la cual se coloca los hilos a los antes del ingreso al molde, en esta zona se encarga de eliminar la resina excedente, y la eliminación de aire y humedad y ubica a las fibras de forma que quedad homogéneas dentro del molde. Para este proceso se pone dos alternativas.

#### 2.5.2.1.1. *Pre-conformador recto*

Este pre conformador está provisto de una sola placa la cual tiene perforaciones en el cual se hace pasar al material al molde de manera uniforme.



**Figura 24.** Sistema de pre conformado.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

### Ventajas

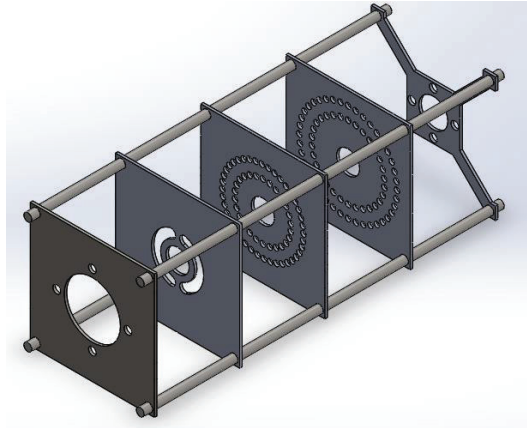
- Montaje fácil.
- Fácil mantenimiento y limpieza.
- Costo bajo.

## Desventajas

- Poca uniformidad y exceso de resina.

### 2.5.2.1.2. Pre- conformador cónico

Es la más usada la en la industria y permite una forma simétrica, bien homogeneizada en la sección que uno desea esto permite una entrada suave al molde.



**Figura 25.** Sistema de pre conformado cónico.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

## Ventajas

- Sistema simple, confiable y de bajo costo.

## Desventajas

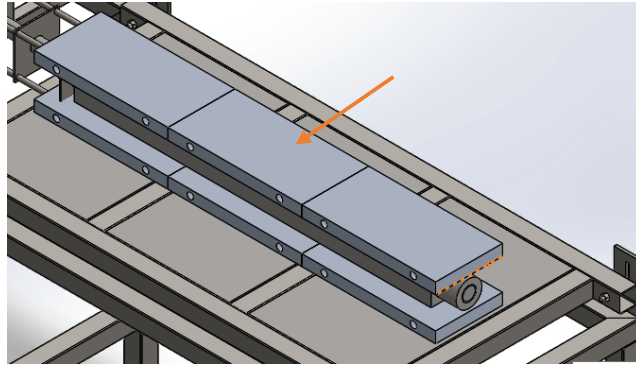
- La ubicación de las fibras lleva un alto de costo de tiempo.

### 2.5.2.2. Zona de calor del molde

Como se lo ha explicado anteriormente en el siguiente proceso que se realiza se necesita la generación de calor dentro del molde para lograr el curado de los elementos. Para lo cual se propone las siguientes soluciones:

#### 2.5.2.2.1. Zona de calor por resistencias eléctricas

En este proceso se necesita de resistencias las cuales están dentro de placas las cuales ayudan a transmitir al molde el calor.



**Figura 26.** Sistema de Placas caloríficas.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

### **Ventajas**

- Transmisión de calor uniforme.
- Temperaturas ajustables.

### **Desventajas**

- Costo.
- Consumo de energía.

#### **2.5.2.2.2. Zona de calor mediante calentamiento de resina**

El proceso se lo realiza antes del ingreso del molde lo cual se tiene la resina a una temperatura alta como se muestra la figura 27.



**Figura 27.** Sistema de Calentamiento por resina.

(Fuente: Adaptado de youtube).

### **Ventajas**

- Fácil montaje.
- Fácil mantenimiento.

## Desventajas

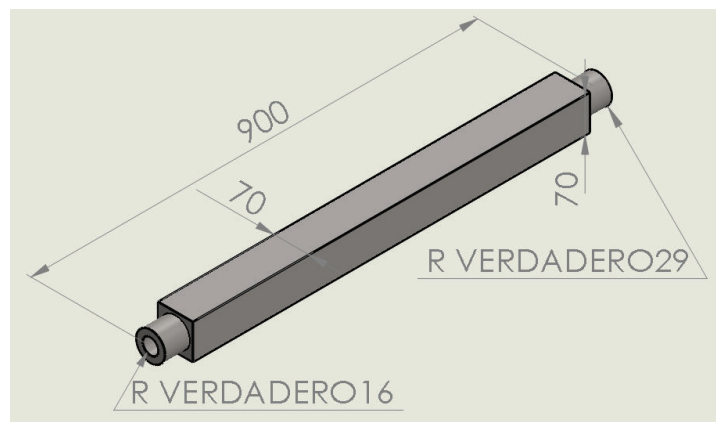
- Difícil control de temperatura por zonas para su curado.
- Costo alto.

### 2.5.2.3. Molde o dado de pultrusión

Debido a la naturaleza abrasiva de los refuerzos de fibra de vidrio, se requiere un tratamiento de superficie protectora en la cavidad de la matriz. El tratamiento más utilizado es el cromado duro en 0,001 a 0,002 pulgadas de espesor.

Considerando esto el molde es la parte más sensible de todo el proceso de pultrusión y es necesario un grado alto de acabado superficial dentro del mismo, es por lo cual se ha decidido comprarlo a proveedores fuera del país los cuales tiene más experiencias dentro de la industria.

El molde se lo adquirió en China por medio de exportación, se puede observar en la siguiente figura 28 el molde de pultrusión tipo "O".



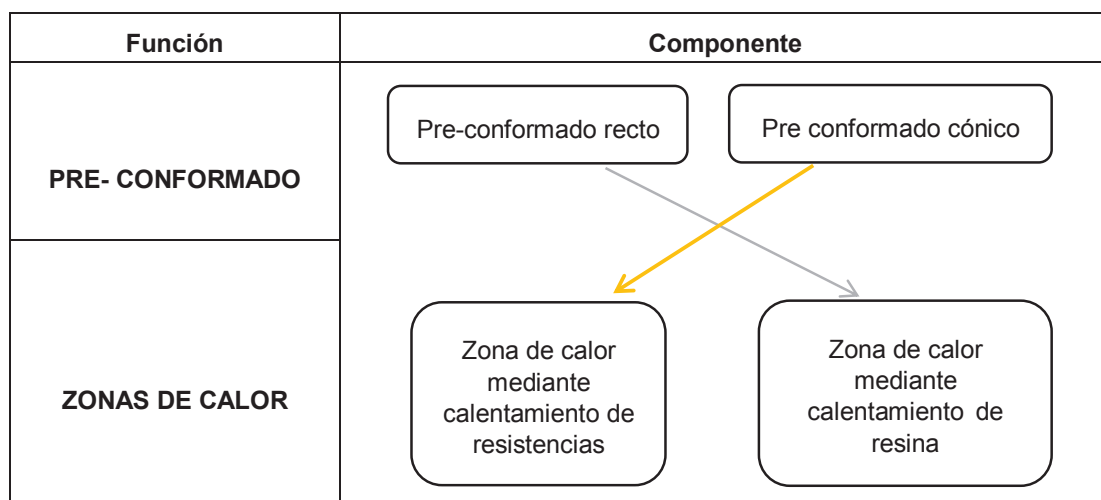
**Figura 28.** Molde para proceso de pultrusión.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

### 2.5.2.4. Alternativas de módulos

Para determinar las alternativas se debe combinar todas las soluciones, como se lo explica en la siguiente tabla 21:

**Tabla 21.** Alternativas del módulo 2.



(Fuente: Adaptado por fuente propia).

### 2.5.2.5. Evaluación y selección de los módulos

Los criterios de valoración más determinantes son:

- Costo de los elementos.
- Desgaste en los componentes, porque esto depende el mantenimiento.
- Temperatura constante.
- Fiabilidad del sistema.

**Tabla 22.** Evaluación del peso específico del criterio “costo”.

Costo	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>		0,5	1,5	0,43
<b>Solución 2</b>	1		2,0	0,57
		<b>Suma</b>	3,5	1,00
Solución2>Solución 1				

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

**Tabla 23.** Evaluación del peso específico del criterio “mantenimiento”.

Mantenimiento	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>		0,5	1,5	0,50
<b>Solución 2</b>	0,5		1,5	0,50
		<b>Suma</b>	3	1
Solución1=Solución2				

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

**Tabla 24.** Evaluación del peso específico del criterio “corte”.

Temperatura	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0,5	1,5	0,5
Solución 2	0,5		1,5	0,5
		<b>Suma</b>	3	1
Solución1=Solución2				

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

**Tabla 25.** Conclusiones para el módulo 2.

Conclusiones	Costo	Mantenimiento	Temperatura	Fiabilidad	$\Sigma$	Prioridad
Solución 1	0,12	0,11	0,11	0,14	0,48	2
Solución 2	0,16	0,11	0,11	0,14	0,52	1

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

La solución que más se ajusta a los criterios de evaluación es la número 2.

### 2.5.3. Módulo 3

De acuerdo el diagrama funcional, en este módulo cumple las siguientes funciones:

- Pullers (Arrastre).
- Corte del producto final.

A continuación se establecen las soluciones:

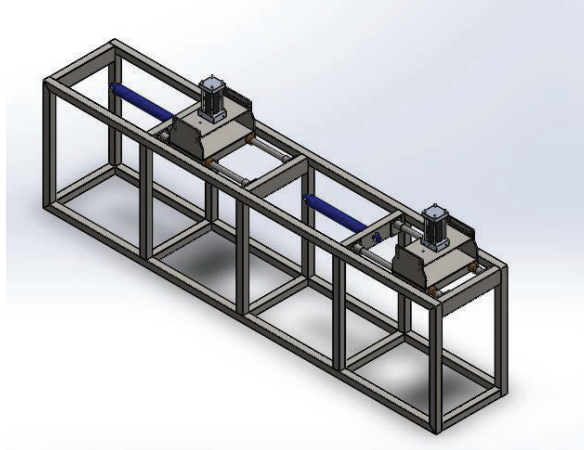
#### 2.5.3.1. Sistema de tracción (pullers)

Es el sistema en el cual se genera el movimiento de la máquina, este sistema lleva el perfil ya curado a una velocidad exacta para poder tener la mejor calidad del producto. Se recomienda que tenga una distancia de 1 a 3 metros después de la salida del perfil para permitir que el producto final este completamente duro y evitar así su deformación de los elementos.

Las soluciones para este sistema son la que se presentan a continuación:

##### 2.5.3.1.1. Cilindros reciprocantes

El movimiento se genera por cilindros que como su nombre lo dice funcionan de manera reciprocantes, estos elementos están provistos de un sistema hidráulico el cual tiene reguladores de velocidad para garantizar un óptimo control del producto final. En la figura 29 se muestra el sistema de cilindros reciprocantes.



**Figura 29.** Cilindros recíprocos.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

### **Ventajas**

- Fácil tensado.
- Principio de funcionamiento fácil.
- Fácil mantenimiento.

### **Desventajas**

- Espacio.
- Costo.

#### **2.5.3.1.2. Doble oruga ó Caterpillar**

Este elemento tiene un halador que posee dos orugas que están provistas de elementos de agarre de materiales como el poliuretano de alta resistencia que permiten control de velocidad y apertura para cualquier tipo de sección.



**Figura 30.** Doble oruga.  
(Fuente: Adaptado de Unicomposite).



### **Ventajas**

- Fácil tensado.
- Principio de funcionamiento fácil.

### **Desventajas**

- Peso del sistema total.
- Costo alto.

#### **2.5.3.2. Sistema de corte**

Una vez que el sistema tiene el perfil pultruido es necesario proceder a su corte para lo cual se dispone de dos soluciones.

##### **2.5.3.2.1. Sistema de corte por sierra mecánica**

Son máquina que tienen provista de un disco de diamante que permite cortar los perfiles pultruidos.



**Figura 31.** Sierra circular.

(Fuente: Adaptado de Stanleyworks).

### **Ventajas**

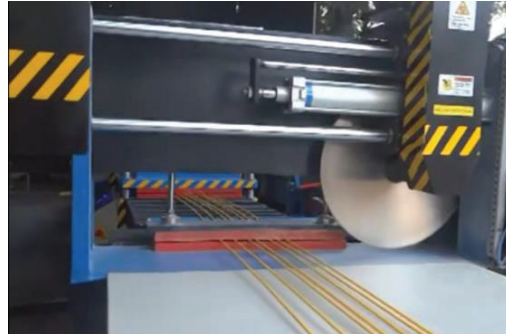
- Fácil manipulación y mantenimiento.
- Principio de funcionamiento fácil.

### **Desventajas**

- Manejo manual.

#### 2.5.3.2.2. Corte automatizado

Es un corte de mayor precisión ya que su sistema es automatizado y es controlado a la misma velocidad de los pullers y es controlado por un sistema neumático.



**Figura 32.** Sierra Automática.  
(Fuente: Adaptado de Svshydraulics).

#### **Ventajas**

- Fácil corte.
- Automatizado.

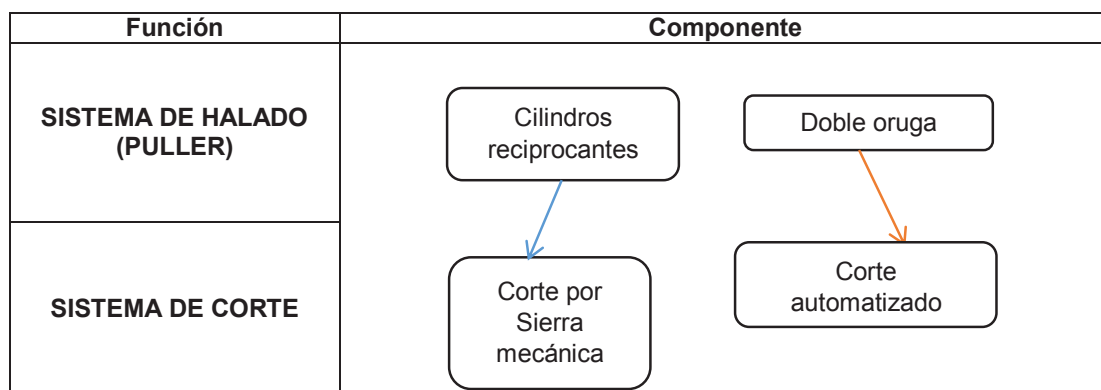
#### **Desventajas**

- Costo elevado.
- Necesita de un compresor para su funcionamiento.

#### 2.5.3.3. Alternativas del módulo

Para determinar las alternativas se debe combinar todas las soluciones, como se lo explica en la siguiente tabla 26:

**Tabla 26.** Alternativas del módulo 3.



(Fuente: Adaptado por fuente propia).

#### 2.5.3.4. Evaluación y selección de módulos

Los criterios de valoración más determinantes son:

- Costo.
- Fácil mantenimiento.
- Fácil operación.
- Fiabilidad del sistema.

**Tabla 27.** Evaluación del peso específico de cada criterio.

	Costo	Mantenimiento	Fácil operación	Fiabilidad de sistema	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo		1	0,5	0,5	3	0,25
Mantenimiento	0,5		1	0,5	3	0,25
Fácil operación	0,5	0,5		0,5	2,5	0,21
Fiabilidad de sistema	0,5	1	1		3,5	0,29
				Suma	12	1
costo<fiabilidad de sistema>mantenimiento>operación						

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

**Tabla 28.** Evaluación del peso específico del criterio “costo”.

Costo	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1	2	0,57
Solución 2	0,5		1,5	0,43
		Suma	3,5	1
Solución2>Solución 1				

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

**Tabla 29.** Evaluación del peso específico del criterio “fácil operación”.

Mantenimiento	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1	2	0,57
Solución 2	0,5		1,5	0,43
		<b>Suma</b>	3,5	1
Solución1<Solución2				

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

**Tabla 30.** Evaluación del peso específico del criterio “fiabilidad del sistema”.

Fiabilidad de sistema	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0,5	1,5	0,43
Solución 2	1		2	0,57
		<b>Suma</b>	3,5	1
Solución1<Solución2				

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

**Tabla 31.** Conclusiones para el módulo 3.

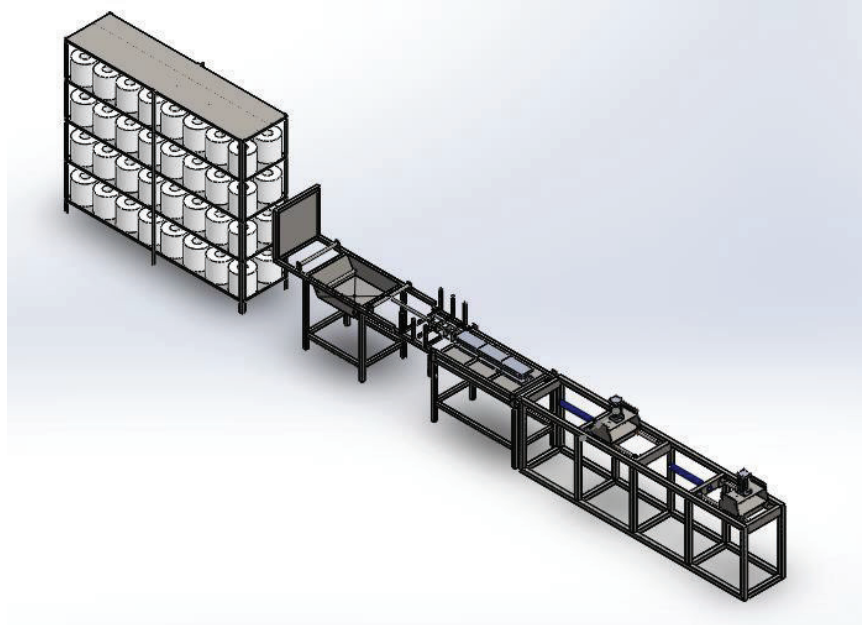
Conclusiones	Costo	Mantenimiento	Fácil operación	Fiabilidad de sistema	$\Sigma$	Prioridad
Solución 1	0,14	0,14	0,12	0,13	0,53	1
Solución 2	0,11	0,11	0,09	0,17	0,47	2

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

La solución que más se ajusta a los criterios de evaluación es la número 1.

## 2.6. Generación de la primera solución (esquema virtual)

Luego de haber analizado las distintas soluciones de cada módulo estableciendo ventajas y desventajas de cada uno y con el método ordinal corregido de criterios ponderados evaluando distintos criterios de valoración, se ha establecido que la mejor solución al diseño de la máquina de pultrusión es la que se presenta esquemáticamente en la figura 33.



**Figura 33.** Esquema de la primera solución.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

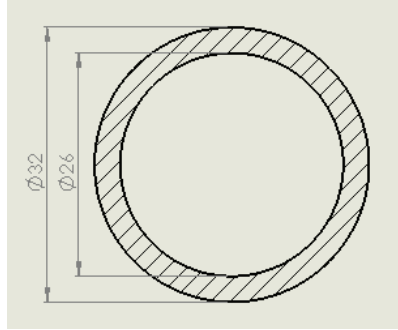
En el anexo B, se visualiza las dimensiones de la máquina en general, así como también las especificaciones de la máquina de pultrusión.

## **2.7. Cálculo y selección de componentes mecánicos**

En esta parte como proceso continuo de diseño de ingeniería se realizará el diseño detallado que transforma alternativas de conceptos, arquitecturas físicas preliminares al diseño, especificaciones y requisitos técnicos en definiciones de diseño finales e interdisciplinarias. Estos diseños se ajustan y se elabora toda la documentación que les acompaña y que se necesita para fabricación con el fin de entregar puntualmente al cliente un producto completo y totalmente definido. Por lo que se hace de suma importancia contar con las bases suficientes para esto y se elaboran una serie de pasos que lleven por todos los subsistemas de la máquina pultrusora a construir.

### **2.7.1. Dosificación de la fibra de vidrio**

Una de las partes importantes del proceso de pultrusión es la dosificación de la fibra de vidrio dentro de la sección seleccionada para el siguiente tema para lo cual es necesario conocer el número de bobinas roving se necesita. Como primer punto es necesario conocer el área de la sección del perfil seleccionado.



**Figura 34.** Dimensiones del perfil pultruido.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

En la ecuación 1 realizamos el cálculo del área del perfil a diseñar.

$$A_{total} = A_{exterior} - A_{interior} \quad (1)$$

$$A_{total} = \frac{\pi}{4} \phi_{exterior}^2 - \frac{\pi}{4} \phi_{interior}^2$$

$$A_{total} = \frac{\pi}{4} * (32)^2 - \frac{\pi}{4} * (26)^2$$

$$A_{total} = 273,32 \text{ mm}^2$$

Luego calculamos el volumen considerando que como longitud del producto final de 1000 mm, ya que el molde que poseemos es de esta unidad con lo que tenemos:

$$Vol_{total} = A_{total} * long \quad (2)$$

$$Vol_{total} = 273,32 * 1000$$

$$Vol_{total} = 273320 \text{ mm}^3$$

La proporción ideal de hilos roving es del 60 a 70 % del peso del perfil el otro 30 % es de la resina y sus componentes. Como lo observa es necesario tener las propiedades tanto de la resina como del hilo roving.

El hilo roving tiene la siguiente configuración que nos otorga el catálogo de 4800 Tex (tex =  $\frac{1g}{1000m}$ ).

El otro dato importante que se necesita es las propiedades de la resina poliéster, esta resina es compatible con el hilo roving seleccionada.

**Tabla 32.** Propiedades de la resina poliéster Isoftálica.

PROPIEDADES DE LA RESINA ENDURECIDA SIN CARGA (VALORES TÍPICOS)			
Propiedades	Valor	Unidad	Método de ensayo
Densidad (20 °C)	1,21	$\frac{g}{cm^3}$	DIN 53479
Resistencia a la tracción	70	MPa	DIN 53 455
Módulo de elasticidad en tracción	4300	MPa	DIN 53 457
Elongación a la ruptura	2	%	DIN 53 455
Resistencia a la flexión	110	MPa	DIN 53 452
Módulo de elasticidad en flexión	4300	MPa	DIN 53 457
Resistencia al impacto	10	$\frac{K}{m^2}$	DIN 53 453
Temperatura de distorsión por calor (HDT)	66	°C	DIN EN ISO 75
	67	°C	ASTM D 648
Dureza barcol GYZJ 934-1			ASTM D 2583

(Fuente: Adaptado por fuente propia del fabricante).

En esta parte se realiza el supuesto, que el perfil tiene el 100 % de su estructura compuesta solamente de resina endurecida, pues esto sería el escenario donde su peso sería el máximo, entonces se tiene que en la ecuación 3:

$$Masa = Volumen * Densidad \quad (3)$$

$$Masa = 273 \text{ cm}^3 * 1,21 \frac{gr}{\text{cm}^3}$$

$$Masa = 330,33 \text{ gr}$$

Como se considera una relación de peso del 70 % se tiene:

$$Masa_{70\%} = 330,33 \text{ gr} * 70 \% \quad (4)$$

$$Masa_{70\%} = 231,23 \text{ gr}$$

Con lo calculado lo de la masa respectiva de fibra de vidrio de cada perfil a obtener, se halla la cantidad de hilos que se necesitaran dividiendo el cálculo antes hecho entre el peso de la hilos de labobina por metro longitudinal, en la ecuación 5 se muestra el cálculo:

$$\#_{bobinas} = \frac{M_{70\%}}{tex_{roving}} \quad (5)$$

$$\#_{bobinas} = \frac{231,23 \frac{gr}{m}}{4,8 \frac{gr}{m}}$$

$$\#_{bobinas} = 48,1 \text{ bobinas}$$

Por lo que se selecciona una cantidad de 48 bobinas.

### 2.7.2. Tanque de resina

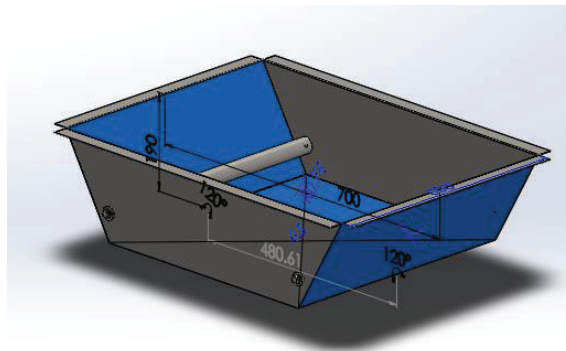
El tanque resina es una de las partes importantes de este proceso ya que en esta zona es en la cual se impregna la resina y sus aditivos en los hilos de roving es necesario tener en cuenta el dato anterior del volumen necesario para un metro de hilo.

$$Vol = \frac{Vol_{varilla} * 30\%}{1 m} \quad (6)$$

$$Vol = \frac{273 \text{ cm}^3 * 30 \%}{1 m}$$

$$Vol = 81,9 \frac{\text{cm}^3}{m} \cong 0,82 \frac{\text{litros}}{m}$$

Teniendo en cuenta la cantidad de resina mínima para un solo metro de perfil, para el diseño de este tanque se debe tener en cuenta que su forma permita el paso de la resina para su mayor impregnación y permita un paso suave de la fibra. Por lo cual se selecciona la siguiente forma de tanque.



**Figura 35.** Dimensiones del tanque de resina.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Con lo cual tenemos un volumen del tanque de resina con la siguiente relación.

$$Volumen_{resina} = Area * ancho \quad (7)$$

$$Volumen_{resina} = 1501 \text{ cm}^2 * 50 \text{ cm}$$

$$Volumen_{resina} = 750050 \text{ cm}^3 \cong 75,05 \text{ litros}$$

De lo cual en este reservorio solo se ocupara el 75 % del volumen total por lo que tenemos la siguiente expresión en la ecuación 8.

$$Volumen_{\acute{u}til} = Volumen_{resina} * 75\% \quad (8)$$

$$Volumen_{\acute{u}til} = 75,05 \text{ l} * 75 \% = 56,3 \text{ litros}$$



Con lo que podemos obtener para cuantos metros de material con la siguiente relación.

$$Longitud = \frac{\text{volumen de resina en un metro}}{\text{volumen de resina en el tanque}} \quad (9)$$

$$Longitud = \frac{56.3 \text{ l}}{0,82 \frac{\text{l}}{\text{m}}}$$

$$Longitud = 68,6 \text{ metros}$$

Esto es en condiciones ideales con una relación 70:30 y donde el perfil estará al 75 % de su valor máximo.

Ahora es necesario conocer el valor de la presión que se ejerce en el tanque de resina sobre las paredes del tanque.

$$P = \frac{F}{A} \quad (10)$$

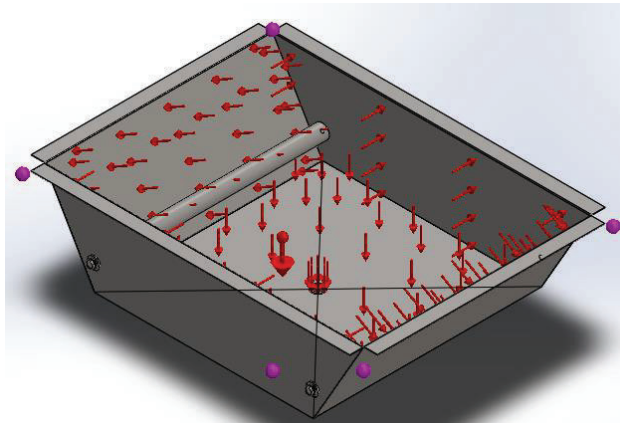
$$P = \frac{m * g}{A} = \frac{\rho A h g}{A}$$

$$P = \rho h g$$

$$P = \left(1,21 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) * (50 \text{ cm}) * \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$$

$$P = 5,9 \text{ MPa}$$

Con este valor no es muy crítico por lo cual se selecciona una lámina de acero inoxidable de 1,5 mm de espesor de AISI 430.



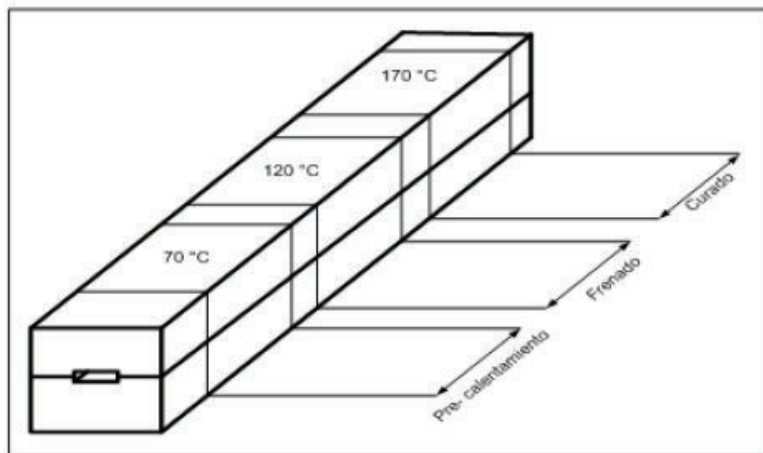
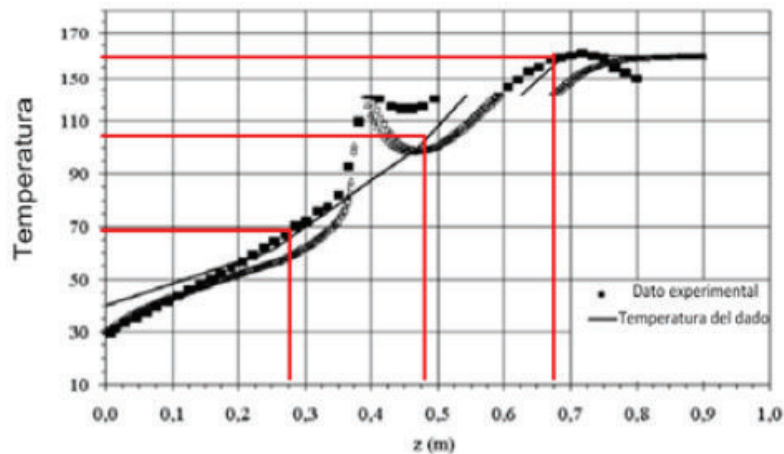
**Figura 36.** Aplicación de la presión en el tanque.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

### 2.7.3. Molde y sistema de calefacción

#### 2.7.3.1. Molde

En el artículo “The effect of a liquid CTBN rubber modifier on the thermo-kinetic parameters of an epoxy resin during a pultrusión process” (Calabrese & Valenza, 2002), se puede observar un estudio detallado por medio de la optimización de una curva de curado del material, donde esto ayudará a elegir las temperaturas y dimensiones adecuadas de cada zona de calentamiento en el molde para generar un proceso de pultrusión adecuado, además se observa la estandarización de las dimensiones en el proceso de pultrusión.



**Figura 37.** Curva de curado en el molde.

(Fuente: Adaptado de Calabrese L., Noviembre, 2002).

Como se puede observar en la figura 37 el comportamiento del curado de la fibra en cada zona de calentamiento podemos especificar los siguientes datos, mostrada en la siguiente tabla 33.

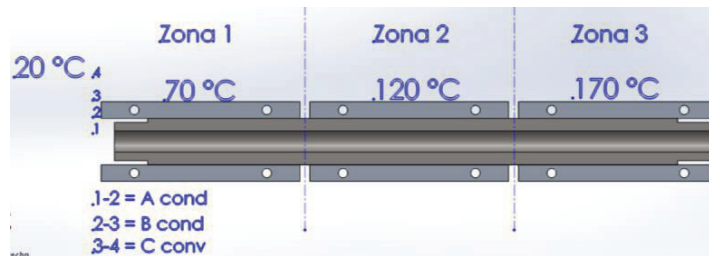
**Tabla 33.** Zonas de calor en el molde.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3
<b>Temperatura (°C)</b>	70	120	170
<b>Longitud (mm)</b>	280	220	200

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

### 2.7.3.2. Sistema de calefacción

Con el cuadro de temperaturas de la figura anterior nos basamos para encontrar la transferencia de calor del molde es necesario encontrar la potencia de las resistencias para que funcione el sistema.



**Figura 38.** Transferencia de calor en el molde.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

De la figura 38 se tiene que el circuito térmico se expresa de la siguiente manera.

Con lo cual llegamos a la siguiente ecuación 11.

$$Q_{molde} = \frac{\Delta T}{\Sigma R} = \frac{\Delta T}{R_{cond\ molde\ acero} + R_{cond\ bloque\ aluminio} + R_{conv\ ambiente}} \quad (11)$$

De donde:

$$R_{cond\ cilindro} = \frac{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}{2 * \pi * k * L}; R_{cond\ bloque\ plano} = \frac{L}{k * A}; R_{conv} = \frac{1}{h * A}$$

$R2 =$  radio externo del molde (m)

$R1 =$  radio interno del molde (m)

$k =$  coeficiente de conductividad térmica ( $\frac{W}{m^{\circ}C}$ )

$L =$  longitud calentada (m)

$h =$  coeficiente de convección ( $\frac{W}{m^2^{\circ}C}$ )

$A =$  Sección de calentamiento ( $m^2$ )

De lo que en cada zona tenemos:

- Zona 1.

$$Q_{molde} = \frac{70^{\circ}C - 20^{\circ}C}{\frac{\ln\left(\frac{0,058}{0,032}\right)}{2 * \pi * 22 \frac{W}{m^{\circ}C} * 0,3\ m} + \frac{0,22\ m}{238 \frac{W}{m^{\circ}C} * 0,3\ m * 0,07\ m} + \frac{1}{8 \frac{W}{m^2^{\circ}C} * 0,3\ m * 0,07\ m}}$$

$$Q_{molde} = 8,379\ W$$

- Zona 2.

$$Q_{molde} = \frac{120^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}}{\frac{\text{Ln}\left(\frac{0,058}{0,032}\right)}{2 * \pi * 22 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} * 0,3 \text{ m}} + \frac{0,22 \text{ m}}{238 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} * 0,3 \text{ m} * 0,07 \text{ m}} + \frac{1}{8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}} * 0,3 \text{ m} * 0,07 \text{ m}}}$$

$$Q_{molde} = 8,379 \text{ W}$$

- Zona 3.

$$Q_{molde} = \frac{170^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}}{\frac{\text{Ln}\left(\frac{0,058}{0,032}\right)}{2 * \pi * 22 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} * 0,3 \text{ m}} + \frac{0,22 \text{ m}}{238 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} * 0,3 \text{ m} * 0,07 \text{ m}} + \frac{1}{8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}} * 0,3 \text{ m} * 0,07 \text{ m}}}$$

$$Q_{molde} = 8,379 \text{ W}$$

Para transformar la energía se utiliza la siguiente ecuación donde:  $CL$  = calor latente de fusión de la resina,  $Cp$  = calor específico de la resina, y  $\dot{m}$  = flujo másico. Esto es necesario para conocer el cambio de estado de la resina.

$$Q = [(C_p * \Delta T) + C_L] * \dot{m} \quad (12)$$

El flujo másico tenemos de la siguiente expresión.

$$\dot{m} = Vol \rho = \rho A t V_{promedio} \quad (13)$$

Donde  $V$  = velocidad promedio de una máquina de pultrusión, y  $At$  = sección transversal de molde de diámetro 32 mm.

$$\dot{m} = 1,21 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} * 0,000804 \text{ m}^2 * 0,0254 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,025 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

- Zona 1.

$$Q = \left[ \left( 1500 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}^{\circ}\text{C} * (70 - 20) \right) + 100000 \frac{\text{J}}{\text{Kg}} \right] * 0,025 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 4375 \text{ W}$$

- Zona 2.

$$Q = \left[ \left( 1500 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}^{\circ}\text{C} * (120 - 70) \right) \right] * 0,025 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 1875 \text{ W}$$

- Zona 3.

$$Q = \left[ \left( 1500 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}^{\circ}\text{C} * (170 - 120) \right) \right] * 0,025 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 1875 \text{ W}$$

Se debe tener en cuenta que el calor necesario para penetrar el molde y cambiar de estado a la resina se expresa en la siguiente ecuación 14:

$$Q_{resistencia} = Q_{molde} + Q_{resina} \quad (14)$$

- Zona 1.

$$Q_{resistencia} = 4375 \text{ W} + 8,379 \text{ W} = 4383,37 \text{ W}$$

- Zona 2.

$$Q_{resistencia} = 1875 \text{ W} + 8,379 \text{ W} = 1883,37 \text{ W}$$

- Zona 3.

$$Q_{resistencia} = 1875 \text{ W} + 8,379 \text{ W} = 1883,37 \text{ W}$$

### 2.7.3.3. Sistema de tracción (cilindros reciprocantes)

El requerimiento más importante en el diseño de la máquina de pultrusión es el sistema de halado. Este sistema de halador debe generar una velocidad que está comprendida entre 0,2 a 0,4 m/min, esto se desarrollará por medio de un sistema de bombeo. Estas velocidades son las adecuadas para generar el correcto proceso de curado sobre cada tipo de perfil que se van a manejar en el proceso.

Hay que tomar en cuenta que la fuerza que se necesita que se produzca en el molde al hacer cruzar la fibra impregnada de la resina es la misma fuerza producida por el sistema halador para tirar el perfil, teniendo muy presente que las propiedades física del material van a ir variando con respeto a la temperatura de cada etapa y el post-curado.

Para el siguiente sistema se tiene que el valor máximo que permitiremos la salida de los cilindros es 40 cm de carrera. En máquinas comerciales de pultrusión con sistema reciprocantes se tiene que el arrastre efectivo es desde 4 a 6 toneladas de fuerza, (1ton = 1000Kgf).

Los cilindros que se disponen en este tipo son de doble efecto con las siguientes características.

Tienen una carrera de 40 cm y un diámetro de émbolo de 6 cm con lo que podemos tener los siguientes cálculos, en la ecuación 15 se calcula la presión admisible al cilindro:

$$P = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (15)$$

$$P = \frac{4 * 6000}{\pi 6^2}$$

$$P = 212,2 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$P \cong 3000 \text{ psi}$$

Por lo que necesitamos que la bomba erogue una presión de 3000 psi.

Se calcula también la fuerza de rozamiento aplicada en el molde que se tiene en la última fase del curado en el molde, en la ecuación 16 se calcula el volumen para posteriormente calcular la masa y peso respectivamente en las ecuaciones 16 y 17.

$$V = A * (Long.Zona) \quad (16)$$

$$V = 273 \text{ mm}^2 * 275 \text{ mm}$$

$$V = 75163 \text{ mm}^3$$

Se calcula la masa, sabiendo que la densidad de un perfil de pultrusión es de  $2 \frac{gr}{cm^3}$ .

$$m = 2 \frac{gr}{cm^3} * 75,163 \text{ cm}^3 = 0,1503 \text{ Kg} \quad (17)$$

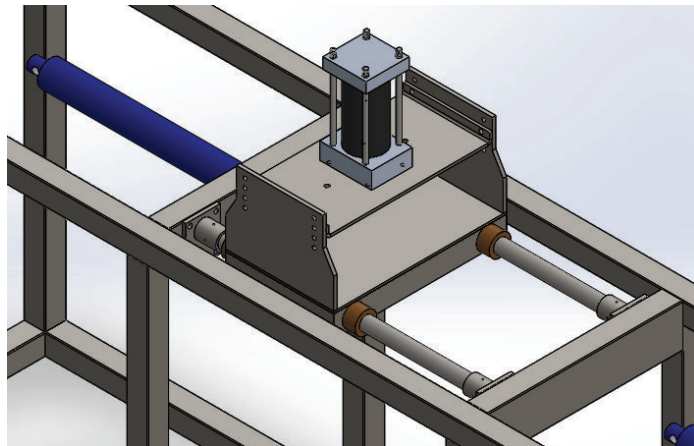
A continuación se calcula el peso del perfil a partir de esa zona.

$$W = m * g = 0,15 \text{ Kg} * 9,8 \frac{m}{s^2} = 1,47 \text{ N} \quad (18)$$

Calculamos la fuerza de rozamiento:

$$Fr = \mu N = 0,5 * 1,47 = 0,736 \text{ N} \quad (19)$$

Calculamos la fuerza de rozamiento del pullers (sistema reciprocantes), en la figura 39 se muestra el sistema.



**Figura 39.** Sistema cilindros reciprocantes.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

El sistema tiene un peso de 15 Kg. Con lo cual vamos a calcular la fuerza de rozamiento.

$$Fr = \mu N = 0,18 * 15 = 2,7 \text{ N} \quad (20)$$

Con lo que tenemos una fuerza de rozamiento total de  $Fr = 0,736 + 2,7 = 3,44$  con lo que podemos deducir que es muy pequeña para la fuerza que necesitamos así que no se considera en los cálculos.

#### 2.7.4. Sistema de corte

La sierra está compuesta de 100 dientes con un diámetro de  $254\text{mm}$  y un espesor de  $3,1\text{mm}$  suponiendo que el motor de un giro de corte de  $0,02\text{mm}$  por diente tenemos el cálculo según la ecuación 21:

$$\#dientes = \frac{\text{longitud corte}}{\text{avance de diente}} \quad (21)$$

$$\#dientes = \frac{32}{0,02} = 1600 \text{ dientes}$$

Lo que representa que el disco tope al material 1600 veces para cortar la superficie.

$$\text{revoluciones} = \frac{\#dientes \text{ de corte}}{\text{número de dientes}} \quad (22)$$

$$\text{revoluciones} = \frac{1600}{100} = 16 \text{ revoluciones}$$

Se puede observar que la mayoría de este tipo de máquinas que utilizan sierras metálicas tiene una velocidad de  $3800\text{rpm}$  podemos calcular:

$$t = \frac{16 * 1 \text{ min}}{3800 \text{ rpm}} = 0,0042 \text{ min} \cong 0,25 \text{ seg} \quad (23)$$

Con lo cual observamos que no es necesario tener un desplazamiento en el sistema de corte porque el tiempo es muy corto y no interfiere en el proceso.

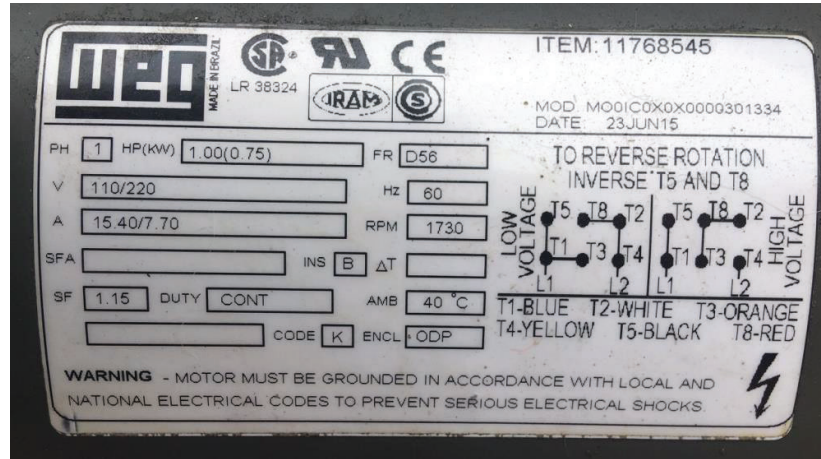
### 2.8. Cálculo y selección de componentes eléctricos

A continuación vamos a detallar el cálculo y selección de elementos eléctricos de la máquina, en la máquina de pultrusión tenemos varios elementos eléctricos, como se puede ver en el anexo C el plano eléctrico de fuerza y control de la máquina más detalladamente, adicionalmente se tiene el plano de conexiones del PLC.

Cabe resaltar que la parte eléctrica de la máquina de pultrusión, tendremos un motor que activa la bomba hidráulica, también un compresor, en la parte inferior observaremos detalladamente los cálculos necesarios para la selección de los componentes.

### 2.8.1. Selección de conductor

Según datos de placa del motor, como se muestra en la figura 40 se tiene lo siguiente.



1.0	0,746	1,25	2	56	001360S1P56	127/220	3515	13.00/6.20	14.00/7.30	M	64,0	0,70
		1,15	4	56	001180S1P56	127/220	1730	15.00/7.50	17.50/8.62	M	62,0	0,63

**Figura 40.** Datos de placa motor monofásico.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

- Potencia activa ( $P_a$ ): Es la que proporciona el eje del motor ( $W$ ), es de naturaleza netamente activa (solo componente real), está definida según la ecuación 24:

$$P_a = \frac{HP * 746}{1000} kW \quad (24)$$

$$P_a = \frac{1 * 746}{1000} kW$$

$$P_a = 0,746 kW$$

- Potencia Activa de entrada ( $P_e$ ): Es la potencia activa ( $W$ ), vista desde el punto de vista eléctrico en los terminales del motor, es la que mediríamos con un vatímetro si lo colocáramos en los terminales de alimentación del motor, la definimos como:

$$P_e = \frac{P_a}{\text{eficiencia}/100} kW \quad (25)$$

$$P_e = \frac{0,746}{93/100} kW$$

$$P_e = 0,8021 kW$$



- Corriente Nominal ( $I$ ): Es la corriente que consume el motor cuando trabaja a potencia de salida nominal, esta corriente se calcula de la siguiente forma dependiendo de si el motor es monofásico:

$$I = \frac{P_e}{V * FP} \quad (26)$$

$$I = \frac{0,8021 \text{ kW}}{120 \text{ V} * 0,85}$$

$$I = 7,46 \text{ A}$$

- Factor mult. de corriente: factor por el que se multiplicará la corriente nominal del motor para determinar la corriente de diseño, la cual será la base para el cálculo de la corriente que requiere el conductor. En este caso tomaremos el valor de 125 % según CEN 2004 430.22
- Corriente de Diseño: se define como la corriente en la que se basa la selección del conductor, el cual deberá estar en capacidad de soportarla por un periodo continuo de funcionamiento. Está definida como:

$$I_{diseño} = 1,25 * I \quad (27)$$

$$I_{diseño} = 1,25 * 7,46$$

$$I_{diseño} = 9,28 \text{ A}$$

A partir de este valor de corriente de diseño, seleccionamos el conductor que se va a utilizar, en la tabla 34 se observa el conductor seleccionado.

**Tabla 34.** Selección del conductor.

Calibre AWG - MCM	Sección Real (mm <sup>2</sup> )	Intensidad Admisible (Amperios)
14	2.081	30
12	3.309	40
10	5.261	55
8	8.366	70
6	13.300	100
4	21.150	130
3	26.670	150
2	33.630	175
1	42.410	205
1/0	53.480	235
2/0	67.430	275
3/0	85.030	320
4/0	107.200	370
250 MCM	126.700	410
300 MCM	151.000	460

(Fuente: Adaptado de Iadrilleraautomatizadablog).

Para nuestro presente trabajo escogeremos un conductor 12 AWG, nos asegura que soporta hasta 40 amperios, con eso aseguramos el correcto funcionamiento, para el control de la máquina se utilizara calibre número 14 AWG, que es suficiente para las capacidades que se va a generar en el funcionamiento.

### 2.8.2. Selección de protecciones

- Para motor monofásico.

Para seleccionar los fusibles e interruptor térmico se toman las mismas consideraciones que para el conductor, con la corriente de diseño se tiene la siguiente tabla 35 para selección de los elementos de protección.

**Tabla 35.** Selección de fusible.

CORRIENTE NOMINAL DEL MOTOR (A)		TAMAÑO FUSIBLE (A)
CON ARRANQUE DIRECTO	CON ARRANQUE ESTRELLA / DELTA	
1.5	4.0	4
1.6 – 2	4.1 – 5	6
2.1 – 4	5.1 – 10	10
4.1 – 5	10.1 – 12	16
5.1 – 8	12.1 – 18	20
8.1 – 9	18.1 – 20	25
9.1 – 12	20.1 – 28	35
12.1 – 17	28.1 – 44	50
17.1 – 25	44.1 – 60	63
25.1 – 30	60.1 – 70	80
30.1 – 37	70.1 – 85	100
37.1 – 50	81.1 – 125	125
50.1 – 75	126.0 – 160	160
75.1 – 90	161.0 – 200	200
90.1 – 120	201.0 – 250	250
121.0 – 145	251.0 – 315	315
146.0 – 185	316.0 – 355	355

(Fuente: Adaptado de Schneider).

Seleccionamos el fusible de tamaño 35 A.

En la siguiente en la tabla 36 tenemos la selección del interruptor térmico.

**Tabla 36.** Selección de interruptor térmico.

Corriente nominal [A]	Número de parte de 1 polo, 120/240V	Número de parte de 2 polos, 120/240V	Número de parte de 3 polos, 240V
<b>QO Interruptores automáticos enchufables.</b> Protección contra descarga y cortocircuito, con ventana y bandera de disparo VISI-TRIP, 10 000 A de capacidad interruptiva.			
10	QO110	QO210	QO310
15	QO115	QO215	QO315
20	QO120	QO220	QO320
30	QO130	QO230	QO330
40	QO140	QO240	QO340
50	QO150	QO250	QO350
60	QO160	QO260	QO360
70	QO170	QO270	QO370
80	-	QO280	QO380
100	-	QO2100	QO3100
125	-	QO2125	-

(Fuente: Adaptado de Schneider).

Seleccionamos el de QO210 de 2 polos.

- Para control de la máquina.

Para el control de la máquina utilizaremos las siguientes protecciones:

Fusible de tamaño 6 A.

Interruptor térmico de 2 amperios.

### 2.8.3. Selección de protecciones para resistencias en zonas de calor

Para la selección del interruptor térmico de las resistencias eléctricas nos basamos en la resistencia de cada zona dividido para el voltaje de suministro como se muestra a continuación:

- Zona 1.

$$I = \frac{P_{zona1}}{V} \quad (28)$$

$$I = \frac{7571 W}{110 V}$$

$$I = 69 A$$

Con este dato nos fijamos en la tabla 36, y se escoge el QO170.

- Zona 2.

$$I = \frac{P_{zona2}}{V} \quad (29)$$

$$I = \frac{5046 W}{110 V}$$

$$I = 46 A$$

Con este dato nos fijamos en la figura 43, y se escoge el QO150.

- Zona 3.

$$I = \frac{P_{zona3}}{V} \quad (30)$$

$$I = \frac{1346 W}{110 V}$$

$$I = 13 A$$

Con este dato nos fijamos en la tabla 36, y se escoge el QO115.

## 2.9. Selección de componentes de control

Tomamos en cuenta para el control, no se tiene una intensidad de corriente alta debido esto debemos escoger todos los elementos de control que soporten una corriente máxima de 2 amperios.

### 2.9.1. Elementos para tablero eléctrico

Para el tablero eléctrico de la máquina de pultrusión se construyó con lámina de tol y que está sujeta a la base de la máquina, los elementos de conforman el tablero son:

- Fusibles.
- Interruptores térmicos.
- Contactores
- Selectores
- Pulsador de emergencia.

Como se muestra en la figura 41 se tiene los principales elementos que se utilizó, en el tablero eléctrico de la máquina de pultrusión.



**Figura 41.** Elementos tablero eléctrico.  
(Fuente: Adaptado de propia fuente).

### 2.9.2. Controlador lógico programable (PLC)

Tenemos un PLC marca Siemens 12 – 24 RC, para realizar el control de los cilindros hidráulicos. En la figura 42 tenemos la visualización del PLC que se utiliza.



**Figura 42.** PLC Siemens 12-24 RC.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

El PLC tiene las siguientes características:

- Entradas analógicas 2.
- Entradas digitales 8.
- Voltaje de suministro 12-24 Vdc.
- Salida por contacto 4.

En el anexo D se detalla el programa del PLC, para el control del sistema hidráulico y diferentes etapas del proceso.

### 2.9.3. Control de temperatura

Para controlar la temperatura de las zonas de calor Z1, Z2 Y Z3 tenemos un control de temperatura, este elemento tiene las capacidad de medir mediante termocuplas las zonas de calor del molde, en la figura 43 se muestra el control que se utiliza.

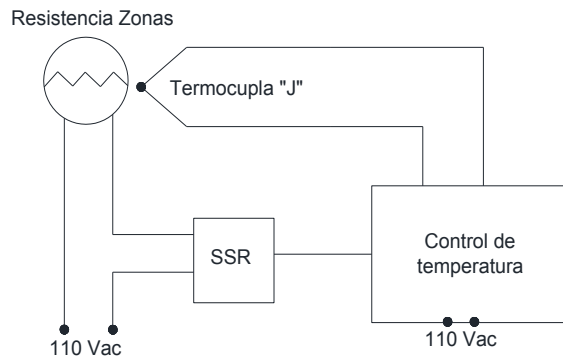


**Figura 43.** Control de temperatura y termocuplas tipo J.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Este control es un instrumento donde compara la señal del sensor de temperatura, la compara con una señal interna deseada por el usuario (setpoint) y es ajusta a la salida del dispositivo calefactor para mantener, tan cerca como sea posible, el equilibrio entre temperatura medida y la temperatura deseada.

El control de temperatura es de marca Termokew XMTG – 808 (Termokew, 2008), este dispositivo trabaja con un control PID (proporcional – integral - derivativo). El control de temperatura va asociado con un transductor tipo Termocupla “J”, que tiene el rango de temperatura de 0 – 1000 °C, dando una señal de 4 - 20 mA. Esta termocupla es suficiente para las zonas de calor detallas en la tabla 33.

También va asociado con un relé de estado sólido (SSR) de marca Fotek GTJ4 de 10 A, en la figura 44 se muestra como se realizó la conexión del control de temperatura.



**Figura 44.** Esquema de control de temperatura.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

#### **2.9.4. Resistencias para el sistema de calefacción**

Como ya se determinó en la parte de los cálculos de calefacción, tendremos 3 zonas de trabajo a diferentes temperaturas, viniendo desde una temperatura menor a una mayor. Las resistencias que se utilizaron se muestran en la figura 45.



**Figura 45.** Resistencias eléctricas.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Las resistencias eléctricas van asociadas con el control de temperatura, estas están al interior de la placa calorífica para la generación de calor por conducción al molde.

### **2.10. Cálculo y selección de componentes hidráulicos y neumáticos**

Para el cálculo de los elementos hidráulicos de la máquina realizaremos a partir de las especificaciones de la máquina que se detalló al inicio del capítulo, en el anexo E observamos con más detalles el esquema hidráulico de la máquina de pultrusión.

A continuación detallamos la selección de los componentes más relevantes de la parte hidráulica.

#### **2.10.1. Cilindros hidráulicos**

Los cilindros son de doble efecto con una carrera de 40 cm los cuales soportan una presión máxima de 5000 psi, y tienen para su anclaje y sujeción en el sistema mediante ojal con un diámetro de una pulgada. Existen dos cilindros en el sistema de los pullers, uno por cada pullers.

En la figura 46 y 47 se puede observar los cilindros utilizados en la máquina.





**Figura 46.** Cilindro Hidráulico de doble efecto primer puller.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).



**Figura 47.** Cilindro Hidráulico segundo puller.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

### 2.10.2. Electroválvula hidráulica

La Electroválvula es 4/2, se detalla las características principales:

Electroválvula de 4 vías 2 posiciones, monoestable a 110 Vac, 250 Bar de presión máxima, en la figura 48 se muestra la electroválvula.



**Figura 48.** Electroválvula 4/2.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).



### 2.10.3. Bomba hidráulica

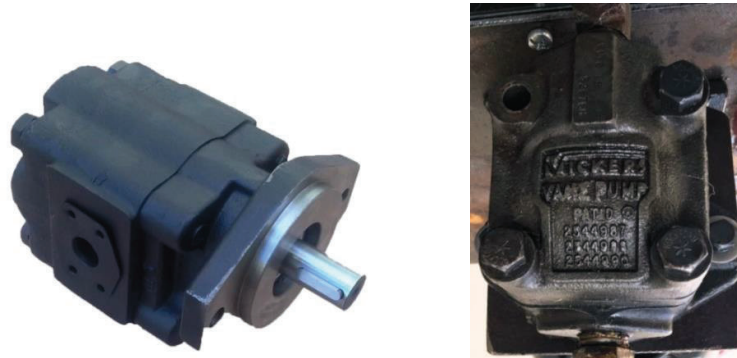
La bomba hidráulica que se necesita para este sistema es una bomba de paletas que nos de 3000 psi como se ve en los cálculos anteriores. Para tener una velocidad aproximada de 1 m/s sobre el cilindro se tiene la siguiente ecuación:

$$Q = A * Vel = 28 \text{ cm} * 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,73 \text{ gpm} \quad (31)$$

$$Q = 28 \text{ cm} * 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Q = 0,73 \text{ gpm}$$

A continuación se puede observar la bomba que se utilizará.



**Figura 49.** Bomba hidráulica.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

### 2.10.4. Cilindros neumáticos

Los cilindros neumáticos son de doble efecto con una carrera de 20 cm los cuales van a realizar la sujeción del perfil para posteriormente los cilindros hidráulicos realicen el arrastre, y su sujeción en el sistema mediante brida ajustada en la parte superior del mecanismo del pullers.

En la máquina de pultrusión tenemos un cilindros neumático por cada pullers, estos cilindros son accionados mediante una válvula 5/2 y con un compresor de 2 HP.

En la figura 50 se puede observar los cilindros utilizados en la máquina.



**Figura 50.** Cilindro neumático.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

### 2.10.5. Electroválvula neumática

La electroválvula 5/2, a continuación se detalla las características principales.

Electroválvula de 5 vías 2 posiciones, monoestable a 110 Vac, 400 psi de presión máxima, en la figura 51 se muestra la electroválvula.



**Figura 51.** Electroválvula 5/2 monoestable.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

### 2.10.6. Compresor de aire

Para nuestro compresor de aire se debe tener en cuenta que las condiciones normales de servicio, las presiones deben estar entre 4 a 8 Bar, se puede suponer que las fuerzas de rozamiento están entre un 5 a un 15 % de la fuerza teórica calculada pero según las medidas del cilindro esta fuerza de rozamiento es muy mínima. Considerando todo estos aspectos se optó por un compresor de 2 HP que nos dé una presión de 120 psi (8,2 Bar).



**Figura 52.** Compresor de aire 2 HP.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

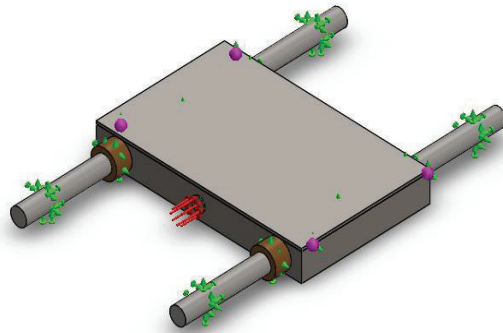
## 2.11. Análisis de componentes críticos de la máquina de pultrusión

La máquina de pultrusión diseñada, consideramos que tiene al menos dos puntos críticos, y se realizará el análisis ayudándonos del software SOLIDWORKS2016. A continuación se detalla los análisis realizados.

### 2.11.1. Análisis al sistema reciprocante

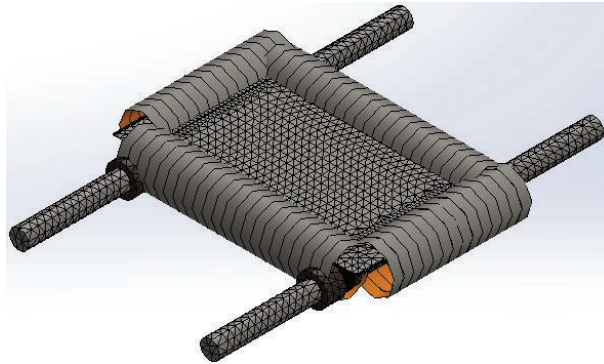
El elemento que va a estar en continuo movimiento y necesitamos que este no falle dentro del proceso es el que está en los cilindros reciprocantes, ya que toda la fuerza para arrastrar el hilo roving y el material curado se encuentra en esta sección de la máquina.

Para lo cual necesitamos definir las cargas en el elemento y los contactos necesarios para que el elemento se haga deslizante, en la figura 53 se muestra las sujeciones fijas, y la localización de la presión de arrastre que según se calculó es de aproximadamente 2000 psi, en la figura se muestra en la parte roja donde se ubica la carga, en ese punto donde va asociado con el cilindro hidráulico para realizar el arrastre del sistema.



**Figura 53.** Sujeciones y carga aplicada al sistema en SolidWorks2016.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

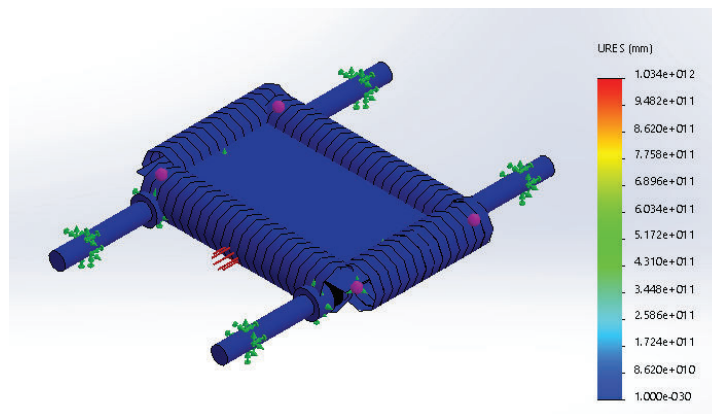
En Solidworks Simulation utiliza el método de formulación de desplazamientos de elementos finitos para calcular desplazamientos, deformaciones y tensiones de los componentes con cargas internas y externas. La geometría que se analiza se individualiza con elementos tetraédricos (3D), triangulares (2D) y de vigas, y se resuelve con un solver Direct Sparse o iterativo. Para nuestro análisis se ha realizado el mallado en forma mixta, ya que nuestro elemento a analizar es de forma compleja, este tipo de malla posee elementos tetraédricos y triangulares; se ha dispuesto elementos triangulares en la parte donde se ubica la carga aplicada para que los resultados sean más exactos. En la figura 54 se muestra la disposición de la malla, obteniendo 25337 nodos en la malla dispuesta.



**Figura 54.** Mallado con elementos tetraédricos y triangulares en SolidWorks2016.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

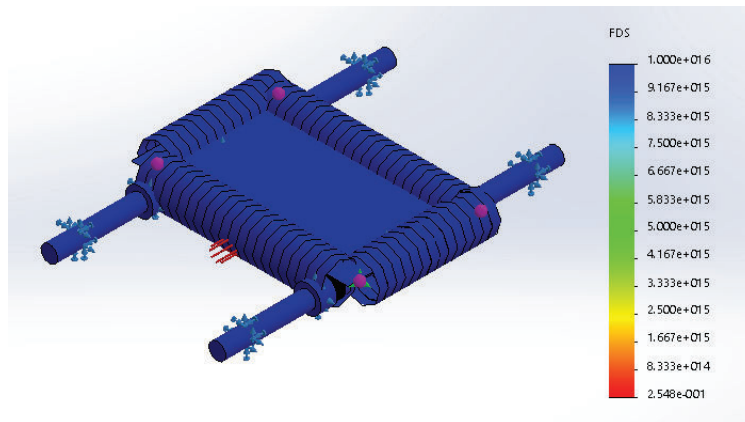
Se realiza la ejecución para el análisis estático del elemento, y tenemos como resultados lo siguiente, en la figura 55 se muestra los desplazamientos y podemos observar que son muy bajos, debido a que la presión aplicada no es la suficiente como para desplazar al elemento.



**Figura 55.** Análisis de los desplazamientos realizado en SolidWorks2016.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

A continuación se muestra el factor de seguridad del elemento, como la literatura describe que debe estar entre 2 y 5 el factor de seguridad, cabe resaltar que según el análisis que se tiene que el sistema está sobredimensionado, esto se debe a que la capacidad de la máquina está diseñada para un tonelaje mayor, y la presión que se utiliza es la de los cilindros hidráulicos suministrados por la bomba hidráulica no es suficiente como para poner en riesgo el diseño del sistema.



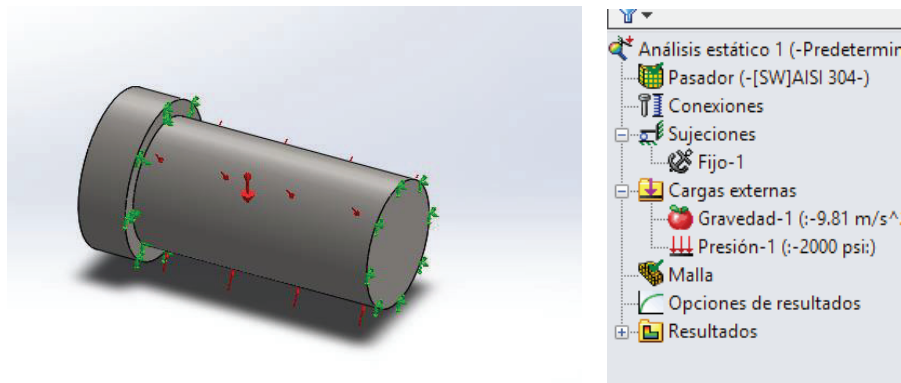
**Figura 56.** Análisis de Factor de Seguridad realizado en SolidWorks2016.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

En el análisis tenemos un FDS muy alto, asegurando el funcionamiento correcto del sistema, según sus características de funcionamiento.

### 2.11.2. Análisis a los pasadores de los cilindros hidráulicos

Otro de los puntos críticos que merecen ser analizados son los pasadores que realizan la sujeción a los cilindros hidráulicos, son de 1" pulgada de diámetro, a continuación se pone las cargas a las cuales van a estar sometido el pasador en el sistema de sujeción de los cilindros, en la figura 57 se observa detalladamente.

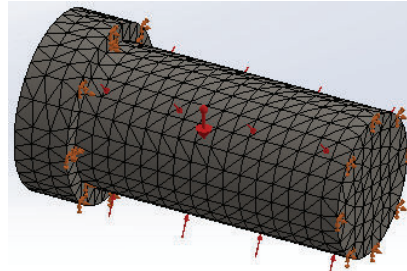


**Figura 57.** Colocación de cargas en el pasador.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Lo verde se puede evidenciar el sistema fijo y lo rojo la carga el análisis se lo realizo con 2000 psi como se puede ver en la figura 57.

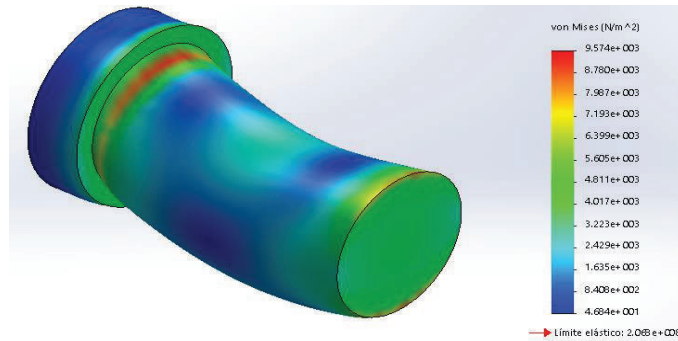
Para la elaboración de la malla se ha dispuesto a utilizar una malla tipo triangular, y se ha obtenido 10097 nodos, en la figura 58 se muestra el mallado en el elemento.



**Figura 58.** Mallado del pasador en solidworks2016.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

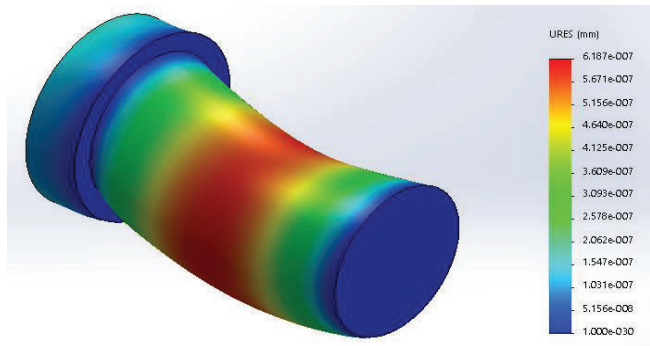
Se realiza la ejecución del análisis estático al elemento, obteniendo los siguientes resultados, la tensión de von mises máxima que obtenemos es de  $9,54 \times 10^3 \frac{N}{m^2}$ , estando lejos del límite elástico.



**Figura 59.** Análisis de la tensión de Von Mises en Solidworks2016.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

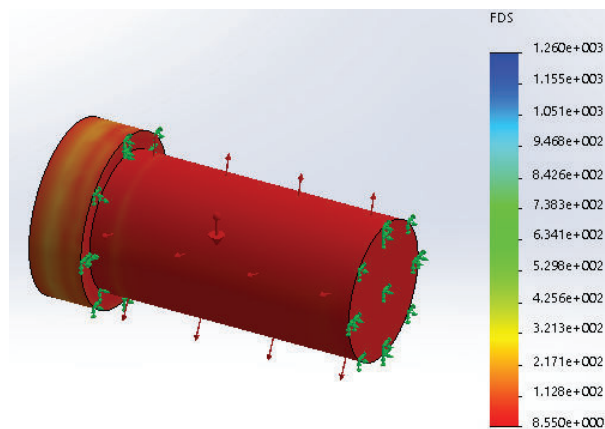
Observamos la deformación máxima es  $6,18 \times 10^{-7} mm$ , sometida en el pasador no es considerable con lo cual podemos observar que cumple con las condiciones de trabajo, esto se puede ver en la figura 60.



**Figura 60.** Análisis de la deformación en Solidworks2016.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Finalmente, se realiza el análisis del factor de seguridad (FDS), en la figura 61 se muestra el análisis estático realizado en solidworks.



**Figura 61.** Análisis del factor de seguridad en Solidworks2016.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Y obteniendo un factor de seguridad de 8,5 se asegura el funcionamiento, como se muestra en la figura anterior.

## 2.12. Protocolo de pruebas de campo y correcciones al diseño

En este punto de la fabricación se procederá a realizar las verificaciones necesarias y suficientes para determinar si la máquina cumple con las expectativas planificadas en el diseño.

### 2.12.1. Pruebas realizadas sobre la máquina

Las pruebas que se efectúan a la máquina están orientadas a comprobar las especificaciones de la misma, así como su correcto funcionamiento.



En nuestra máquina de pultrusión, se realizará dos tipos de pruebas, la primera sin carga o vacío, con el objetivo de verificar si se cumple varios aspectos según las etapas de trabajo como son las etapas de temperaturas de trabajo en el dado, secuencia de los pullers (cilindros reciprocantes) y movilidad de los elementos, es decir, si no existe algún impedimento para que los elementos se muevan con normalidad, además se verifica juegos, holguras y conexión de elementos (verificación para ser probada con carga). La segunda prueba a realizar en la máquina es una prueba con carga, es decir, con el material (hilo roving y resina), con el objetivo de determinar si se cumple la función principal de la máquina y en el caso de ser necesario determinar los cambios o mejoramientos que se deberían realizar al diseño para incrementar el rendimiento de la máquina.

#### 2.12.1.1. Prueba en vacío

Esta prueba se la realizó en el taller mecánico ubicado en la ciudad de Riobamba bajo la supervisión del Ing. Edgar Sánchez y el Ing. Jonathan Jiménez, para lo cual se determinó los parámetros a evaluar los cuales evaluaremos según los módulos de la máquina que en total son tres, a continuación detallamos los parámetros.

- Dimensiones básicas: Se toman las medidas generales de largo, ancho y altura de la máquina de pultrusión, utilizando un flexómetro.
- Ajuste de los elementos de sujeción y soldaduras: Inspección visual de todas las juntas empernadas y soldadas en la máquina, revisando que estén dentro de la tolerancia permitida y que no exista porosidad excesiva en la soldadura.
- Control de temperaturas de las etapas: Para realizar esta prueba nos ayudamos de una termocupla y controlador de temperatura que todo esto está incorporado en la máquina, adicionalmente se verifica con un termómetro industrial.
- Velocidad de arrastre de los pullers: Con un cronómetro se verifica el tiempo de recorrido de los pullers según la distancia de los finales de carrera a cada pullers.

A continuación se muestra en la tabla 37, el formato de protocolo de pruebas en vacío de la máquina de pultrusión.



**Tabla 37.** Formato de prueba en vacío.

<b>PRUEBA EN VACÍO</b>						
<b>MÁQUINA DE PULTRUSIÓN</b>						
Fecha:					Nro. Revisión	
Persona que realiza la prueba:						
<b>PRUEBAS A REALIZARSE</b>						
<b>DIMENSIONES GENERALES</b>						
Dimensiones	Herramienta Usada	Resultado (mm)			Aceptación	
		Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3	SI	NO
ALTURA (mm)						
ANCHO (mm)						
LARGO(mm)						
<b>Observaciones:</b>						
<b>AJUSTE DE ELEMENTOS SUJECCIÓN Y SOLDADURAS</b>						
MÓDULO 1	Estado			Aceptación		
Tipo de junta	Regular	Óptimo		SI	NO	
Empernada						
Soldada						
MÓDULO 2	Estado			Aceptación		
Tipo de junta	Regular	Óptimo		SI	NO	
Empernada						
Soldada						
MÓDULO 3	Estado			Aceptación		
Tipo de junta	Regular	Óptima		SI	NO	
Empernada						
Soldada						
<b>Observaciones:</b>						
<b>CONTROL DE TEMPERATURA</b>						
Etapas	Registro lecturas °C			Aceptación		
	Termocupla	Termómetro		SI	NO	
1 (70°C)						
2 (120°C)						

3 (170 °C)				
<b>Observaciones:</b>				
<b>VELOCIDAD DE ARRASTRE DE LOS PULLERS</b>				
Etapas	Tiempo (s)	Velocidad (m/s) (calculado)	Aceptación	
			SI	NO
Pullers 1				
Pullers 2				
<b>Observaciones:</b>				
<b>Firma Responsable</b>				

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

La evaluación correspondiente a la máquina se presenta en el anexo F.

#### 2.12.1.2. Prueba con carga

En esta prueba se realizó en la misma localización mencionada anteriormente, esta prueba con carga se realizó varias veces con la finalidad de tener un proceso óptimo al momento de desarrollar el perfil de pultrusión.

Los parámetros que se evaluaron fueron los siguientes:

- Función principal.
- Funciones secundarias.
- Capacidad.
- Materiales.
- Adaptabilidad y ergonomía.
- Regulación.

**Tabla 38.** Formato de prueba con carga.

<b>PRUEBA CON CARGA</b>				
<b>MÁQUINA DE PULTRUSIÓN</b>				
Fecha:		Nro. Revisión		
Persona que realiza la prueba:				
<b>PRUEBAS A REALIZARSE</b>				
<b>FUNCIÓN PRINCIPAL</b>				
<b>Ítem</b>	<b>Bueno</b>	<b>Regular</b>	<b>Malo</b>	<b>Recomendaciones</b>
Obtención perfil				
Daños visible al perfil obtenido				
<b>Observaciones:</b>				
<b>FUNCIONES SECUNDARIAS</b>				
<b>MÓDULO 1</b>				
<b>Ítem</b>	<b>Bueno</b>	<b>Regular</b>	<b>Malo</b>	<b>Recomendaciones</b>
Ubicación óptima Roving				
Distribución óptima Roving				
Impregnación Resina				
<b>Observaciones:</b>				
<b>MÓDULO 2</b>				
<b>Ítem</b>	<b>Bueno</b>	<b>Regular</b>	<b>Malo</b>	<b>Recomendaciones</b>
Pre-conformado del perfil				
Ingreso Roving al molde				
Distribución zonas calor				
<b>Observaciones:</b>				
<b>MÓDULO 3</b>				
<b>Ítem</b>	<b>Bueno</b>	<b>Regular</b>	<b>Malo</b>	<b>Recomendaciones</b>
Arrastre óptimo perfil				
Velocidad de Arrastre				
Corte perfil				

<b>Observaciones:</b>				
<b>CAPACIDAD</b>				
<b>Ítem</b>	<b>Bueno</b>	<b>Regular</b>	<b>Malo</b>	<b>Recomendaciones</b>
Funcionamiento continuo				
Capacidad 6Ton				
<b>Observaciones:</b>				
<b>MATERIALES (obtención)</b>				
<b>Ítem</b>	<b>Bueno</b>	<b>Regular</b>	<b>Malo</b>	<b>Recomendaciones</b>
Resina				
Hilo roving				
MEK y Octoato de cobalto				
<b>Observaciones:</b>				
<b>ADAPTABILIDAD Y ERGONOMÍA</b>				
<b>Ítem</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>	<b>Recomendaciones</b>	
Fácil traslado				
Fácil operación				
Adaptado al operador				
Vibraciones				
<b>REGULACIÓN</b>				
<b>Ítem</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>	<b>Recomendaciones</b>	
Desenredado				
Pre-conformado				
Dado o molde				
Zonas calor				
Pullers				
<b>Observaciones:</b>				
<b>Firma Responsable</b>				

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

La evaluación correspondiente de la prueba realizada a la máquina se presenta en el anexo F.

## 2.13. Análisis de costos

Para el análisis de costos de la construcción de la máquina se ha dividido por módulos, según lo estipulado en el capítulo de diseño de la máquina, en este análisis se considera los costos de elementos normalizados, costos de mano de obra y costos de materiales.

### 2.13.1. Costos del módulo 1

En el módulo 1 se considera los siguientes elementos de la máquina:

- Base montaje de bobinas de hilo roving.
- Desenrollado de hilo roving.
- Tanque de resina.
  
- Costo elementos normalizados:

**Tabla 39.** Costos módulo 1, elementos normalizados.

ELEMENTO	MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Arandela plana M8	Inoxidable	8	0,15	1,2
Arandela de presión	Inoxidable	8	0,2	1,6
Perno M8 x 1,25x20	Inoxidable	10	0,4	4
Percha a medida	Varios	1	90	90
Bobina Roving	Fibra vidrio	32	43	1376
			<b>TOTAL</b>	<b>1472,8</b>

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

- Costos Mano de obra:

**Tabla 40.** Costos módulo 1, mano de obra.

Maquinaria Costo HHM Pieza	Cantidad		Torno		Taladro		Oxicorte		Fresado		Soldadura		Operario general		Total
	8		1		8		4		15		2				
	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd			
Bastidor resina	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	45	3	6	51
Tanque resina	1	0	0	2	2	16	0	0	0	0	4	60	1	2	80
Eje largo resina	1	2	16	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
Eje corto resina	2	2	16	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36
Soporte ejes	4	0	0	9	9	16	1	4	1	15	1	2	1	2	184
<b>TOTAL</b>	1	0	32	0	15	32	0	4	0	120	0	10	0	10	213

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

- Costo de Material.

**Tabla 41.** Costos módulo 1, material.

Pieza	Tubo estructural 40x40x2		Ángulo 40x3		Plancha inoxidable 1mm aisi 430		Eje AISI 304 3/4 pulg		Plancha A36		Plancha perforada diam 6		Electrodo E7018 ø 1 1/8"		Total
	Cant	Usd	Cant	Usd	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	
Costo unitario	13,7		11,22		63,5		4,41		8,35		45		2		
	\$/Metro		\$/Kg		\$/Kg		\$/Kg		\$/Kg		\$/Kg		\$/Kg		
Bastidor resina	2	27,4	1	11,2	0	0	0	0	0,41	3,424	1	45	0,5	1	88,04
Tanque resina	0	0	0	0	1	63,5	0	0	0	0	0	0	0	0	63,50
Eje largo resina	0	0	0	0	0	0	2	8,82	0	0	0	0	0	0	8,82
Eje corto resina	0	0	0	0	0	0	2	8,82	0	0	0	0	0	0	8,82
Soporte ejes	0	0	0	0	0	0	0	0	4	16	0	0	0	0	16
<b>Total</b>	2	27,4	1	11,2	1	63,5	4	17,64	4,41	19,42	1	45	0	0	185,18

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

Los costos se presentan:

**Tabla 42.** Costos módulo 1.

RUBRO	VALOR
Materiales	\$185,18
Mano de obra	\$213,00
Elementos estandarizados	\$1472,80
Subtotal 1	\$1870,98
Imprevistos 10 %	\$187,10
<b>TOTAL</b>	<b>\$2058,08</b>

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

### 2.13.2. Costos del módulo 2

En el módulo 2 se considera los siguientes elementos de la máquina:

- Pre-conformado.
- Molde.
- Zonas de calor.
- Costo elementos normalizados:

**Tabla 43.** Costos módulo 2, elementos normalizados.

ELEMENTO	MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Tuercas 3/8	Galvanizada	40	0,15	6
Barra roscada 3/8	Galvanizada	2	3,2	6,4
Resistencias eléctricas	Varios	12	24	288
Pernos M8x1.25x50	Galvanizado	4	0,33	1,32
Arandela M8	Galvanizada	8	0,1	0,8
Tuerca M8x1.25	Galvanizada	8	0,12	0,96
Molde de pultrusión	Cr40 Nitruado	1	1500	1500
			<b>TOTAL</b>	<b>1803,48</b>

(Fuente: Adaptado por fuente propia).



- Costos Mano de obra:

**Tabla 44.** Costos módulo 2, mano de obra.

Maquinaria Costo HHM	Cantidad		Torno		Taladro		Plasma		Fresado		Soldadura		Operario general		Total
	Cant	Usd	8		2		4		4		15		2,5		
			Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	
Bastidor molde	1	0	0	0	4	8	0	0	0	0	2	30	3	7,5	45,5
Pre conformador	1	2	16	0	2	4	10	40	0	0	0	0	2	5	65
Placas calorificas	6	0	0	0	2	4	0	0	6	24	0	0	1	2,5	183
Placas móviles	4	0	0	0	1	2	2	8	3	12	0	0	2	5	108
<b>Total</b>															<b>401,5</b>

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

- Costo de Material.

**Tabla 45.** Costos módulo 2, material.

Pieza	Costo unitario	Tubo estructural 40x40x3		Plancha perforada		Plancha A36 de 4mm espesor		Placas de aluminio		Plancha a36 de 6mm espesor		Total
		Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	
		\$/M		\$/KG						\$/KG		
Bastidor molde		3	41,1	0	0	0	0	0	0	0	0	41,1
Pre conformador		0	0	0	0	1	30	12,68	443,8	0	0	473,8
Placas calorificas		0	0	0	0	0	0	6	210	0	0	210,00
Placas móviles		0	0	0	0	0	0	0	0	4	33,4	33,4
<b>Total</b>		3	41,1	0	0	1	30	18,68	653,8	4	33,4	758,30

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

Los costos se presentan:

**Tabla 46.** Costos módulo 2.

<b>RUBRO</b>	<b>VALOR</b>
Material es	\$758,30
Mano de obra	\$401,5
Elementos estandarizados	\$1803,48
Subtotal 1	\$2204,98
Imprevistos 10 %	\$220,498
<b>TOTAL</b>	<b>\$2425,478</b>

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

### **2.13.3. Costo del módulo 3**

En el módulo 3 se considera los siguientes elementos de la máquina:

- Pullers o sistema de cilindros reciprocantes.
- Corte.

- Costo elementos normalizados:

**Tabla 47.** Costos módulo 3, elementos normalizados.

ELEMENTO	MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Cilindro Hidráulico diam60 mm carrera 40 cm		2	500	1000
Cilindros Neumáticos		2	150	300
Perno M8 x 1.25 x 25	Inoxidable	36	0,4	14,4
Arandela presión M8	Inoxidable	36	0,15	5,4
Arandela plana M8	Inoxidable	36	0,1	3,6
Cortadora con disco diamante		1	315	315
<b>Total</b>				<b>1638,4</b>

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

- Costos Mano de obra:

**Tabla 48.** Costos módulo 3, mano de obra.

Maquinaria	Cantidad		Torno		Taladro		Plasma		Fresado		Soldadura		Operario general		Total
	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	
Costo HHM	8				2		8		4		8		3		
Pieza															
Basidor pullers	1	0	7	14	0	0	0	0	0	0	10	80	8	24	118
Caja reciprocantes	2	8	2	4	3	24	3	12	4	32	4	8	8	24	320
Total															<b>438</b>

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

- Costo de Material.

**Tabla 49.** Costos módulo 3, material.

Pieza	Tubo estructural 50x50x3		Canal C 100x50x12x3		Bronce diam 2"		Eje AISI 304 1.5"		Plancha A36 de 6mm espesor		Ángulo 2"x1/4		Total
	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	Cant	Usd	
Costo unitario		21,33		18,42		14		7,71		30		23,36	
Bastidor pullers	3	64	1	18,4	0	0	0	0	0	0	0	23,36	105,77
Caja reciprocantes	0	0	0	0	11	154	5	38,55	1,8	0	0	0	192,55
Total	3	64	1	18,4	11	154	5	38,55	1,8	0	1	23,36	298,32

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

Los costos se presentan:

**Tabla 50.** Costos módulo 3.

RUBRO	VALOR
Materiales	\$298,32
Mano de obra	\$438
Elementos estandarizados	\$1638,4
Subtotal 1	\$2374,72
Imprevistos 10 %	\$237,472
TOTAL	\$2612,192

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

Los costos totales tenemos a continuación:

**Tabla 51.** Costos totales de la máquina.

<b>COSTO TOTAL</b>	
Módulo 1	\$2058,08
Módulo 2	\$2425,47
Módulo 3	\$2612,19
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$7095,75</b>
Costo de montaje (10 %)	\$709,58
Costo de diseño (10 %)	\$709,58
Utilidad (15 %)	\$1064,36
<b>TOTAL</b>	<b>\$8514,90</b>

(Fuente: Adaptado por fuente propia).

## **CAPÍTULO 3**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se aporta toda la información referente al trabajo experimental efectuado a lo largo de la presente tesis. Para ello, en primer lugar se describen los materiales empleados, y a continuación se detallan el funcionamiento de la máquina de pultrusión, posteriormente se detallan las pruebas realizadas en función de sus parámetros, finalmente se realiza los ensayos de tracción y flexión al perfil según normas ASTM D3039 y la ASTM D7264.

#### **3.1. Materiales empleados en el proceso**

Toda la experimentación en la que se ha basado la presente tesis ha sido realizada sobre elementos específicos de material compuesto para el desarrollo del proceso de pultrusión.

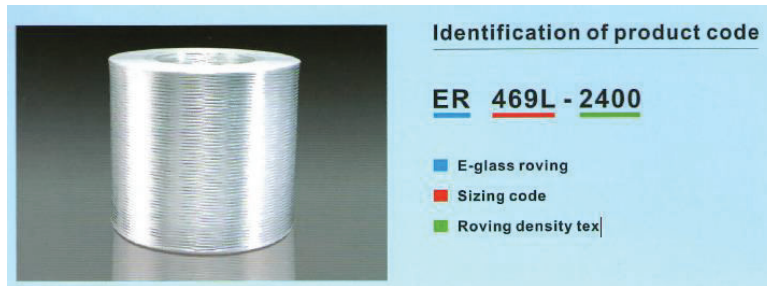
En los procedimientos experimentales que se describen en este capítulo se han utilizado un tipo de elementos estructural que son tubos huecos sección circular "O". Estos se han realizado con los siguientes materiales que se muestran a continuación.

##### **3.1.1. Datos técnicos del roving**

Se utiliza el roving clase "glass-E", de la numeración ER 469L-tex 2400, este material fue traído por medio de una empresa de Guayaquil desde China, debido a que en el medio no se encuentra este tipo de roving especialmente para la fabricación de elementos estructurales por medio del proceso de pultrusión.

Este roving es solo extremo de fibra continua de vidrio tipo E. Utilizado en el bobinado de filamentos y pultrusión, telas de tejido y fabricación de tejido roving. Son compatibles con resina poliéster insaturado (UP), éster de vinilo (VE), epoxi.

A continuación se muestra en la figura 62 el significado de la numeración del roving.



*ER-Tipo de fibra- clase E*  
*Tipo de agente humectante – up*  
*Densidad del roving – 2400 (tex)*

**Figura 62.** Roving empleado.

(Fuente: Adaptado de CPicfiber, CPicfiber, 2016).

### 3.1.1.1. Propiedades físicas

A continuación se muestra en la siguiente tabla 52 algunos de los materiales según su aplicación.

**Tabla 52.** Propiedades según aplicación.

Código	Tex	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	Resina	Aplicación
ER 469L	200/4800	11/24	UP, VE, EP	Pultrusión, enrollamiento
ER 469 KW	900/1200/2400	16/22	UP, VE, EP	Pultrusión, enrollamiento
ER 469 T	1200	16	EP	FW

(Fuente: Adaptado de CPicfiber, CPicfiber, 2016).

Identificamos el tipo de roving que se utilizó, y tiene las siguientes especificaciones, se muestra en la tabla 53.

**Tabla 53.** Especificaciones técnicas.

Calidad	Tipo de fibra	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	Densidad lineal Tex(g/km)	Contenido de combustible %
ER 469L-2400	ECT/ECR/TM	17/22	2400	0,4

(Fuente: Adaptado de CPicfiber, CPicfiber, 2016).

En la tabla 54 se muestra las propiedades mecánicas de la fibra tipo E, empleada para este proceso de pultrusión.

**Tabla 54.** Propiedades mecánicas.

<b>ER 469L - 2400</b>	
Diámetro de hilo	17 – 22 ( $\mu\text{m}$ )
Densidad	2580 ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )
Módulo de elasticidad	72 ( $\text{GPa}$ )
Resistencia a la tracción	3,5 ( $\text{GPa}$ )
Módulo Especifico	$29 \times 10^3 \frac{\text{Nm}}{\text{Kg}}$
Elongación al punto de ruptura	4,5 %

(Fuente: Adaptado de CPicfiber, CPicfiber, 2016).

Para mayor información acerca del roving empleado, revisar el anexo G.

### **3.1.2. Datos técnicos de la resina**

Se ha empleado la resina de poliéster tipo Isoftálica, marca Merican 9406, debido a sus características, costo y principalmente a que se encuentra con mayor facilidad en el mercado nacional.

La caducidad aproximada de la resina de poliéster es de 6 meses. Si se ha abierto el envase la vida del producto será mucho menor. Para su conservación se debe evitar la humedad, la alta temperatura y la luz.

Tiene una ebullición inferior a los 60 °C (Su disolvente que es el estireno tiene un punto de inflamación de 33 °C por ello es muy recomendable guardar las resinas lejos de cualquier foco inflamable). A continuación vamos detallar algunas características de la resina empleada.

La resina poliéster Isoftálica está formulada especialmente para aplicaciones de moldeo por contacto donde se requieren máxima resistencia a los agentes químicos y muy buena resistencia a la temperatura. Los laminados de ésta resina preparados en forma correcta y que estén perfectamente curados, pueden estar expuestos por largos períodos de tiempo a temperaturas de 80 °C y más, de esta manera se obtienen mejores propiedades de resistencia química. (Selley, 1991) Es importante que en este tipo de contacto con productos químicos no se pigmente, ni agregue cargas a la resina, ya que puede dañarla y perder algunas de sus propiedades.

La resina isoftálica es fabricada para las aplicaciones de moldeo por contacto, en las cuales se requiere una mayor resistencia en los agentes químicos y una excelente resistencia a la temperatura.





**Figura 63.** Resina Isoftálica.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

### 3.1.2.1. Propiedades físicas

**Tabla 55.** Propiedades físicas de la resina.

<b>Resina Polyester Isoftálica MERICAN 9406</b>	
Resistencia a la tensión	74 MPa
Módulo de elasticidad bajo tensión	3,6 GPa
Esfuerzo de fluencia a la flexión	118 MPa
Módulo de elasticidad bajo flexión	3,6 GPa
<b>Líquida</b>	
Viscosidad Brockfield LVF a 25C	1000 +/- 200
Peso específico a 25 C	1,11
Valor ácido	18mg KOH/g
Sólidos	60%
Aspecto	Amarillento
Estabilidad en la oscuridad a 20C	6 meses
Tiempo de gelificación a 25C	15 minutos
<b>Curada</b>	
Dureza Barcol (Modelo GYZJ 934-1)	45
Absorción de agua	18mg (0,17%)

(Fuente: Adaptado de Resina Isoftalica, 2017).

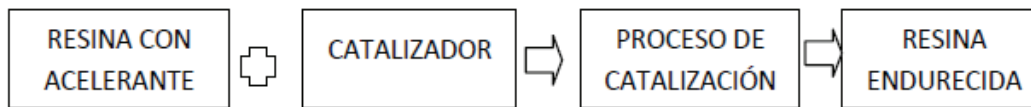
Para mayor información acerca del roving empleado, revisar el anexo F.

### 3.1.3. Acelerador (Octoato de cobalto)

Son productos que tal cual lo indica su nombre, tienen la propiedad de acelerar el tiempo de solidificación de la resina y su endurecedor.

Se tiene en cuenta, que la mezcla de resina con catalizador, por sí sola no endurece en forma aceptable, ni en tiempos previsibles, ni siquiera con seguridades en cuanto a su aspecto final.

A la resina antes de ser mezclada con su catalizador, debemos agregarle un tercer elemento llamado acelerante o acelerador, como se indica en la siguiente figura 64.



**Figura 64.** Proceso de catalización de la Resina.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Se debe comprender esto perfectamente: tanto el catalizador, como el ahora estudiado acelerador, actúan sobre el tiempo de solidificación.

En el mercado se encuentran distintos acelerante, fundamentalmente a base de Cobalto, y también el llamado Dimetil Anilina (DMA).

El agregado de estos productos acelerantes, no solo influye en el tiempo de solidificación, sino también en el color y aspecto final de la pieza, ya que mayor cantidad de acelerante provoca una tonalidad rojizo-amarillenta. Además, se desarrolla una gran cantidad de calor durante el corto tiempo de endurecimiento que ha provocado. Obviamente estos efectos nos obligan a tener precaución y a deducir que el agregado de acelerantes en cantidades no mínimas, resulta inadecuado para ciertos usos. (Bendezù Reyes, 2002)

En cambio una mínima cantidad, prácticamente no altera la transparencia de la resina incolora, a cambio de no acortar demasiado el tiempo de endurecimiento, y obtener un desprendimiento de calor menos brusco, ya que se disipa en más tiempo.

El acelerante se expende en diluciones apropiadas para ser fácilmente dosificables y así lograr agregarlo a la resina con menos dificultad. Usualmente se expende una solución de cobalto diluida al 1 % o al 0,5 % según los casos.

En ocasiones suele resultar algo difícil realizar la mezcla RESINA-ACELERANTE, pero esto se supera con la práctica. Sin embargo, seguramente con la intención de facilitarnos la utilización de estos productos la industria nos ofrece resinas pre-mezcladas con acelerantes. Y son las resinas pre aceleradas. (Bendezù Reyes, 2002)

Jamás se debe mezclar un agente acelerante con un agente endurecedor. El contacto directo entre ambos, genera una violenta reacción de tipo químico, que podría llegar a una explosión. (Bendezú, 2002)

Para una mejor aplicación de los mismos se debe tomar muy en cuenta las siguientes pautas en la siguiente tabla 56.

**Tabla 56.** Propiedades y comportamientos de los acelerantes.

Identificación química	Preparados de cobalto. DMA (Dimetil-anilina).
Efecto no deseado	Varía el color y aspecto final de la resina solidificada.
Exceso de acelerante	Mayor rapidez de solidificación. Mayor desarrollo de calor. Adquiere tonalidad rojiza amarillenta, perdiendo su transparencia.
Insuficiente de acelerante	Menor rapidez de solidificación. Menor desarrollo de calor. La pieza final mantiene la transparencia de la resina.
Precaución	No mezclar directamente un ACELERANTE con CATALIZADOR (podría causar una explosión).
Proporción mínima	0,5 %.
Proporción promedio	1 %.
Proporción máxima	3 %.

(Fuente: Adaptado de Bendezù Reyes, 2002).

### **3.1.4. Catalizador (Peróxido endurecedor de MEKP)**

Es un producto que, mezclado según proporciones determinadas, permite solidificar a la resina de poliéster. Se lo conoce e identifica como “agente endurecedor” aunque su denominación exacta es catalizador.

Podremos encontrar dos tipos de agentes endurecedores. Uno de ellos líquidos y otro de ellos en pasta.

El líquido se conoce como Peróxido Endurecedor de MEKP (Metil-Etil-Cetona). Y el otro, bajo forma de pasta, se identifica como Peróxido de Benzoilo o simplemente Benzoilo en pasta.

La proporción de endurecedor (catalizador que se agrega a la resina poliéster oscila entre el 1 % y el 4 %, según sean los trabajos y el tiempo que estimemos correcto.

- A menor cantidad de endurecedor, la pieza final obtendrá cierta elasticidad.
- A mayor cantidad de endurecedor, la pieza final resultara más frágil y quebradiza.
- La cantidad o proporción de endurecedor, también influye en el tiempo de solidificación de la resina “con mayor proporción de endurecedor, más rápido solidifica el conjunto”.

Los vapores provenientes de estos agentes catalizadores, no deben ser respirados y tampoco deben tocar nuestra piel, ya que son tóxicos. Claro que en poca cantidad el riesgo por respiración, prácticamente no existe. (Bendezù Reyes, 2002)

A continuación, en la tabla 57 sintetizando las propiedades y comportamientos básicos de los catalizadores:

**Tabla 57.** Propiedades y comportamientos de los catalizadores.

Función del catalizador	Endurecer a la resina poliéster generando un proceso llamado polimerización.
Estado	Líquido: (peróxido endurecedor MEKP). Pasta: (Peróxido de Benzoilo).
Proporción mínima	0,5 % o menos. Se solidifica lentamente y otorga cierta elasticidad a la pieza final.
Proporción máxima	4 % o algo más. Solidifica rápidamente y produce piezas rígidas y quebradizas.
Proporción promedio utilizada	1,5 % aproximadamente.

(Fuente: Adaptado de Bendezú Reyes, 2002).

### 3.1.5. Carbonato de calcio

Tiza, piedra caliza y la pescadilla (whiting) son términos a menudo se utilizan para describir el carbonato de calcio. Pescadilla (Whiting) puede ser carbonato de calcio molido finamente preparado a partir de tiza, piedra caliza, o el producto obtenido por precipitación química de una solución o suspensión que contiene cal.

El carbonato de calcio tiene una dureza de 3 en la escala de Mohs y se clasifica como un agente de relleno no reforzante. Sin embargo, cuando se utiliza en concentraciones mayores que 10 a 30 partes por cien partes de resina carbonato de calcio mejora las propiedades físicas de las resinas de poliéster.

Partículas de carbonato de calcio recubierto con ácido esteárico o resina son fácilmente dispersables en resinas de poliéster. Se ha demostrado que las propiedades físicas del laminado son una función del tamaño de partícula y distribución de tamaño de partícula de la carga y son independientes de tratamiento de la superficie. (Raymond W. Meyer, 1985)

### 3.1.6. Pigmentos o colorante

Los pigmentos o colorantes para piezas pultruidos son cada vez más importante ya que muchos productos ahora están obligados a tener el color moldeado en la parte final.

Los colorantes se dividen en tres familias básicas: tintes, pigmentos orgánicos y pigmentos inorgánicos.

Los colorantes se caracterizan por una buena transparencia, alta intensidad de color y baja gravedad específica. Tienen mala resistencia al calor y tienden a migrar. Por estas razones, rara vez se utilizan en poliésteres. En nuestro caso utilizamos el color amarillo para nuestro perfil.

Pigmentos orgánicos tienen buen brillo y brillantez. Se dividen en toners y lagos (lakes). Generalmente los colores no son tan brillantes como los obtenidos a partir de colorantes. Otras características son: solubilidad limitada, bajo peso específico, de alto valor de aumento de volumen, y la alta absorción de aceite.

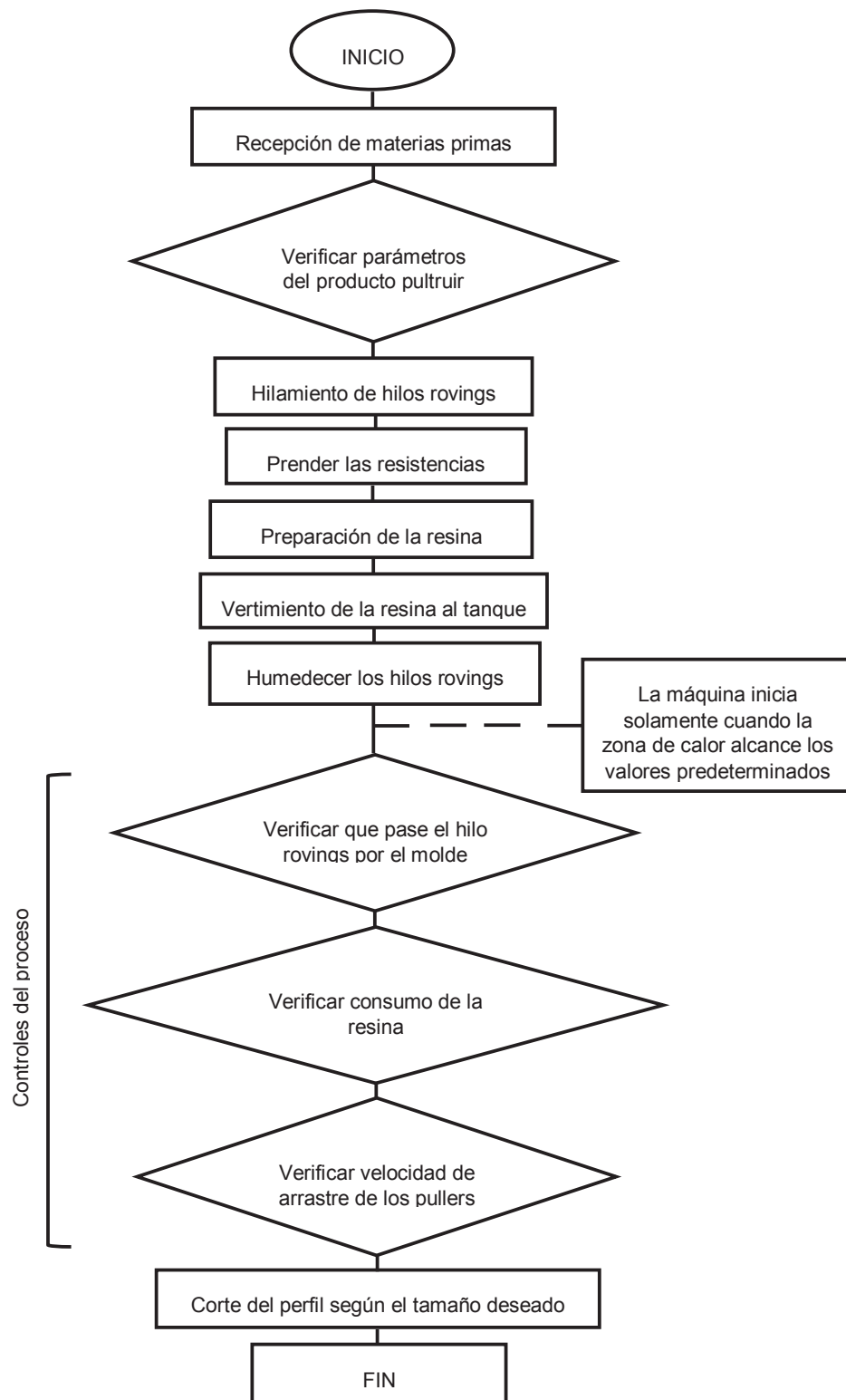
En resinas de poliéster una fuerte acción oxidante está presente durante la polimerización. Buena resistencia a la luz y buena dispersabilidad se requieren del colorante así como siendo relativamente neutral a la polimerización. Algunos pigmentos tienen un efecto fuerte ya sea en la aceleración o la inhibición de las características de curado. (Raymond W. Meyer, 1985)

## **3.2. Funcionamiento de la máquina de pultrusión**

La máquina de pultrusión fue probada en vacío y a continuación detallaremos el procedimiento con carga, ahora se detalla el procedimiento de la puesta en marcha de la máquina en general.

### **3.2.1. Diagrama de flujo del proceso de pultrusión**

En la figura 65 se muestra el diagrama de flujo del proceso de pultrusión, se toma en cuenta todos los aspectos así como también variables que se debe controlar en el proceso.



**Figura 65.** Diagrama de flujo.  
 (Fuente: Adaptado de fuente propia).

### 3.2.2. Puesta en marcha de la máquina

- Colocación de los hilos roving en la máquina hasta llegar al dado o molde. La secuencia del procedimiento se indica en las figuras 66 – 69.



**Figura 66.** Desenredado de los hilos rovings.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).



**Figura 67.** Tanque de resina – paso de hilo rovings.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).





**Figura 68.** Pre- conformado.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).



**Figura 69.** Dado o molde.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

- Realizamos la mezcla de la resina con el acelerante, catalizador, carbonato de calcio y con el colorante. Este procedimiento se lo realiza con mascarilla ya que tiene un olor muy fuerte. Para las pruebas se preparó una cantidad de 2 litros. En la figura 70 se ilustra la mezcla de resina y sus componentes.





**Figura 70.** Mezcla resina.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

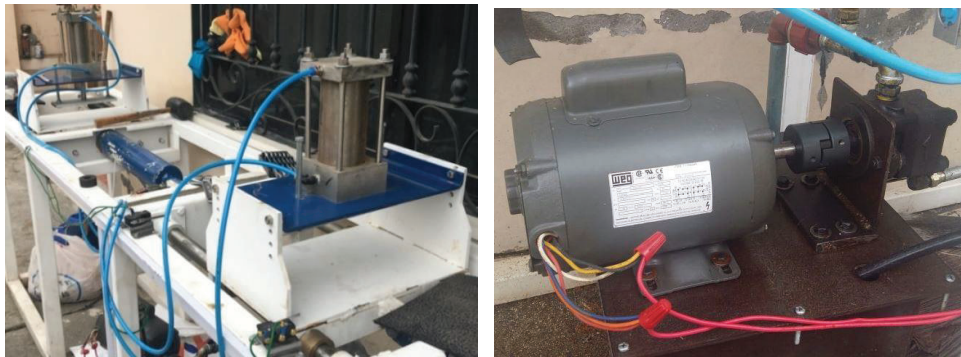
- Ahora realizamos el encendido de las zonas de calor Q1, Q2 Y Q3. Donde la Q1 está a 70 °C, Q2 está a 120 °C y la Q3 está a 170 °C. En este punto, se debe esperar alrededor de 8 minutos para que cada zona alcance su temperatura seteada. En la figura 71 se muestra la disposición como la visualización de las temperaturas.



**Figura 71.** Zonas de calor.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

- Encendemos el compresor para activar la parte neumática de los pullers.
- Se enciende la parte hidráulica de los pullers que harán el arrastre del perfil.



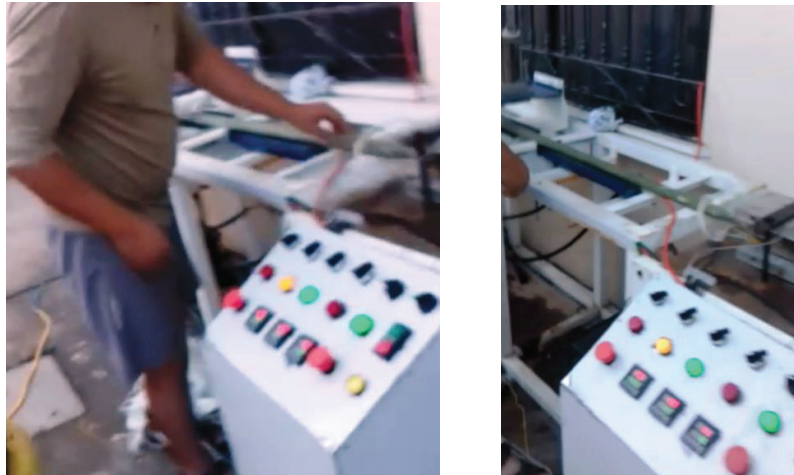
**Figura 72.** Pullers o sistema de cilindros reciprocantes.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

- Se vierte la resina en el taque para impregnación de esta a los hilos rovings.
- A continuación de manera manual se extiende los hilos roving desde la impregnación hasta que pase por el dado o molde donde se curará y esto se realiza hasta que llegue a los pullers para que a partir del sistema de pullers sea de manera automática. En la figura 73 se muestra como se hizo el procedimiento.



**Figura 73.** Halado de manera manual.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).



**Figura 74.** Halado automático por los pullers.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

- Finalmente, se realiza el corte del perfil mediante una sierra al tamaño deseado.
- Una vez terminado el proceso, se debe dejar que los pullers sigan extrayendo el perfil hasta que salga el hilo roving seco, asegurando que no se quede residuos en el molde.

### 3.3. Pruebas experimentales de la máquina de pultrusión

Según la literatura aplicada, se tiene los rangos que se debería aplicar durante las pruebas experimentales para la obtención de un perfil óptimo.

Empleamos el cálculo obtenido en la ecuación (5), que dice el número de bobinas rovings son de 48 unidades. Haciendo que el material de ingreso sea una constante para las pruebas y la obtención del perfil, se debe considerar para que el pasar los hilos por las diferentes etapas hasta llegar al dado se toma alrededor de un día.

Adicionalmente también consideramos que la distancia de curado es una constante de un metro (es la distancia entre la salida del molde al inicio del pullers).

Para la concentración de la mezcla:

- Acelerante (Octoato de cobalto) nos indica que se debe colocar entre un rango de 0,5 % a 3 %. Valor recomendado 1,5 %.
- Catalizador (Peróxido endurecedor de MEKP) nos recomienda poner entre 0,5 % a 4 %. Valor recomendado 1,5 %.
- Carbonato de calcio, se debe poner entre un 10 – 30 %.
- Colorante, nos indica colocar entre un 2 % - 5 %.

Para las zonas de calor:

- Zona 1: 60 - 80 °C.
- Zona 2: 100 -120 °C.
- Zona 3: 150 -180 °C.

Para la velocidad de arrastre de los pullers.

- Velocidad: 0,2 – 0,4 m/min.

Según esas recomendaciones, tuvimos las siguientes pruebas realizadas en la ciudad de Riobamba, en conjunto con Ing. Fabián Sánchez, Ing. Edgar Sánchez y el Ing. Jonathan Jiménez.

Temperatura ambiente de la ciudad está en un promedio de 16 °C.

Las pruebas realizadas en la máquina de pultrusión se detallan a continuación según su fecha de realización.

- **Prueba 1**

Realizada el día 11 de Noviembre 2016.

En la tabla se muestra los parámetros que se estableció en la prueba.

**Tabla 58.** Parámetros de la prueba 1.

EXPERIENCIA	PARÁMETROS VARIABLES						
	Preparación de la resina			Temperaturas de las Zonas de Calor (°C)			Velocidad de tracción de los pullers. (m/min)
	Material	Peso (g)	%	Z1	Z2	Z3	
1	Resina	2000	-	50	90	130	0,4
	Acelerante	40	2				
	Catalizador	40	2				
	Carbonato	0	0				
	Colorante	0	0				

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

**Observaciones:**

Se prueba la máquina en vacío, y se corrige algunos defectos de funcionamiento. Se hace la prueba con resina obteniendo una solidificación muy prematura, no se obtiene el perfil, ni se puede evaluar la máquina con carga.

- **Prueba 2**

Realizada el día 12 de Noviembre 2016.

En la tabla se muestra los parámetros que se estableció en la prueba.

**Tabla 59.** Parámetros de la prueba 2.

EXPERIENCIA	PARÁMETROS VARIABLES						
	Preparación de la resina			Temperaturas de las Zonas de Calor (°C)			Velocidad de tracción de los pullers. (m/min)
	Material	Peso (g)	%	Z1	Z2	Z3	
2	Resina	2000	-	50	90	130	0,4
	Acelerante	40	2				
	Catalizador	35	1,75				
	Carbonato	0	0				
	Colorante	0	0				

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

**Observaciones:**

Se pasa los hilos roving por el sistema, se produce una rotura de hilos por fricción en el desarrollador, la resina presenta una solidificación muy rápida pese a que se disminuyó la concentración de la mezcla.

- **Prueba 3**

Realizada el día 18 de Noviembre 2016.

En la tabla se muestra los parámetros que se estableció en la prueba.

**Tabla 60.** Parámetros de la prueba 3.

EXPERIENCIA	PARÁMETROS VARIABLES						
	Preparación de la resina			Temperaturas de las Zonas de Calor (°C)			Velocidad de tracción de los pullers. (m/min)
3	Material	Peso (g)	%	Z1	Z2	Z3	0,3
	Resina	2000	-	50	90	130	
	Acelerante	40	2				
	Catalizador	30	1,5				
	Carbonato	100	5				
Colorante	0	0					

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

**Observaciones:**

Se tiene problemas con el sistema hidráulico, el depósito de aceite se debe rediseñar, también se presenta fuga de aceite en uno de los cilindros. La resina se añade el carbonato y se tiene una solidificación no muy rápida.

- **Prueba 4**

Realizada el día 19 de Noviembre 2016.

En la tabla se muestra los parámetros que se estableció en la prueba.

**Tabla 61.** Parámetros de la prueba 4.

EXPERIENCIA	PARÁMETROS VARIABLES						
	Preparación de la resina			Temperaturas de las Zonas de Calor (°C)			Velocidad de tracción de los pullers. (m/min)
4	Material	Peso (g)	%	Z1	Z2	Z3	0,2
	Resina	2000	-	50	90	130	
	Acelerante	40	2				
	Catalizador	30	1,5				
	Carbonato	200	10				
Colorante	0	0					

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

**Observaciones:**

Se enciende la máquina, y se la prueba en vacío, con funcionalidad normal, se realiza la mezcla y se vierte en el tanque impregnador y se presenta la novedad que la cantidad realizada no alcanza a mojar los hilos rovings, se debe rediseñar el tanque.

- **Prueba 5**

Realizada el día 25 de Noviembre 2016.

En la tabla se muestra los parámetros que se estableció en la prueba.

**Tabla 62.** Parámetros de la prueba 5.

EXPERIENCIA	PARÁMETROS VARIABLES						
	Preparación de la resina			Temperaturas de las Zonas de Calor (°C)			Velocidad de tracción de los pullers. (m/min)
	Material	Peso (g)	%	Z1	Z2	Z3	
5	Resina	2000	-	60	100	150	0,3
	Acelerante	30	1,5				
	Catalizador	30	1,5				
	Carbonato	200	10				
	Colorante	20	1				

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

**Observaciones:**

Como conclusiones de la prueba, se tiene que la concentración de la resina fue muy alta, debido a que se solidificó demasiado rápido, con eso no se llegó a las etapas posteriores y no se pudo evaluar los módulos siguientes. En la figura 75 se muestra como quedó la resina luego de la prueba.



**Figura 75.** Resina solidificada.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

- **Prueba 6**

Realizada el día 03 de Diciembre 2016.

En la tabla se muestra los parámetros que se estableció en la prueba.

**Tabla 63.** Parámetros de la prueba 6.

EXPERIENCIA	PARÁMETROS VARIABLES						
	Preparación de la resina			Temperaturas de las Zonas de Calor (°C)			Velocidad de tracción de los pullers. (m/min)
	Material	Peso (g)	%	Z1	Z2	Z3	
6	Resina	2000	-	60	100	150	0,3
	Acelerante	20	1,5				
	Catalizador	25	1,25				
	Carbonato	200	10				
	Colorante	20	1				

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

**Observaciones:**

Durante esta prueba, se tuvo un grave problema, momento de realizar el proceso de impregnado de resina, pre-conformado y molde; se solidificó dentro del molde haciendo que se endureciera dentro de este y provocando atascamiento en el proceso. Alrededor de un par de días se demoró en dejar libre el molde.

Los demás módulos no son probados todavía, ya que no se pasa la etapa de curado.

- **Prueba 7**

Realizada el día 15 de Diciembre 2016.

En la tabla se muestra los parámetros que se estableció en la prueba.

**Tabla 64.** Parámetros de la prueba 7.

EXPERIENCIA	PARÁMETROS VARIABLES						
	Preparación de la resina			Temperaturas de las Zonas de Calor (°C)			Velocidad de tracción de los pullers. (m/min)
	Material	Peso (g)	%	Z1	Z2	Z3	
7	Resina	2000	-	60	100	150	0,2
	Acelerante	20	1				
	Catalizador	20	1				
	Carbonato	250	12,5				
	Colorante	40	2				

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

**Observaciones:**

Se obtuvo un perfil inestable, no se solidificó totalmente el perfil al momento de salir del molde, al momento de trabajar los pullers no tuvo éxito ya que el agarre no fue el preciso, por lo mencionado anteriormente. Se debe añadir un caucho en los pullers para mejorar la tracción del tubo.



Se nos terminó la resina polyester, y el pedido se tiene que hacer por medio de exportación al país.

Se bajó el porcentaje de catalizador, y se aumentó el porcentaje de talco chino para dar más volumen a la resina, esto nos servirá para cubrir espacios mínimos vacíos en el perfil.



**Figura 76.** Perfil inestable.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

- **Prueba 8**

Realizada el día 28 de Diciembre 2016.

En la tabla se muestra los parámetros que se estableció en la prueba.

**Tabla 65.** Parámetros de la prueba 8.

EXPERIENCIA	PARÁMETROS VARIABLES						
	Preparación de la resina			Temperaturas de las Zonas de Calor (°C)			Velocidad de tracción de los pullers. (m/min)
	Material	Peso (g)	%	Z1	Z2	Z3	
8	Resina	2000	-	60	100	160	0,2
	Acelerante	20	1				
	Catalizador	20	1				
	Carbonato	250	12,5				
	Colorante	40	2				

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

**Observaciones:**

Se tuvo inconveniente con las rupturas de hilos rovings durante la prueba, esto debido a la fricción de los hilos con las etapas anteriores por donde pasan los hilos.





**Figura 77.** Rotura de hilos.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

- **Prueba 9**

Realizada el día 06 de Enero 2017.

En la tabla se muestra los parámetros que se estableció en la prueba.

**Tabla 66.** Parámetros de la prueba 9.

EXPERIENCIA	PARÁMETROS VARIABLES						
	Preparación de la resina			Temperaturas de las Zonas de Calor (°C)			Velocidad de tracción de los pullers. (m/min)
	Material	Peso (g)	%	Z1	Z2	Z3	
9	Resina	2000	-	60	120	160	0,2
	Acelerante	15	0,75				
	Catalizador	20	0,75				
	Carbonato	250	12,5				
	Colorante	40	2				

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

**Observaciones:**

Se presenta problemas con el sistema hidráulico, fuga de aceite en un cilindro hidráulico.

- **Prueba 10**

Realizada el día 20 de Enero 2017.

En la tabla se muestra los parámetros que se estableció en la prueba.

**Tabla 67.** Parámetros de la prueba 10.

EXPERIENCIA	PARÁMETROS VARIABLES						
	Preparación de la resina			Temperaturas de las Zonas de Calor (°C)			Velocidad de tracción de los pullers. (m/min)
	Material	Peso (g)	%	Z1	Z2	Z3	
10	Resina	2000	-	70	120	170	0,2
	Acelerante	10	0,5				
	Catalizador	15	1				
	Carbonato	300	15				
	Colorante	50	2				

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

**Observaciones:**

Se obtiene el perfil, se nota los hilos en la superficie del perfil; hace falta colocar un poco más de carbonato, y también se debe elevar un poco más la temperatura.



**Figura 78.** Perfil obtenido.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

- **Prueba 11**

Realizada el día 28 de Enero 2017.

En la tabla se muestra los parámetros que se estableció en la prueba.

**Tabla 68.** Parámetros de la prueba 11.

EXPERIENCIA	PARÁMETROS VARIABLES						
	Preparación de la resina			Temperaturas de las Zonas de Calor (°C)			Velocidad de tracción de los pullers. (m/min)
	Material	Peso (g)	%	Z1	Z2	Z3	
11	Resina	2000	-	70	120	170	0,2
	Acelerante	10	0,5				
	Catalizador	15	1				
	Carbonato	400	20				
	Colorante	50	2				

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

**Observaciones:**

Se obtiene el perfil, ya con mejor textura, aunque la geometría del perfil se ve afectada, mejorar la ubicación de los hilos.



**Figura 79.** Perfil inestable.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

- **Prueba 12**

Realizada el día 11 de Febrero 2017.

En la tabla se muestra los parámetros que se estableció en la prueba.

**Tabla 69.** Parámetros de la prueba 12.

EXPERIENCIA	PARÁMETROS VARIABLES						
	Preparación de la resina			Temperaturas de las Zonas de Calor (°C)			Velocidad de tracción de los pullers. (m/min)
	Material	Peso (g)	%	Z1	Z2	Z3	
12	Resina	2000	-	70	120	170	0,2
	Acelerante	10	0,5				
	Catalizador	15	1				
	Carbonato	400	20				
	Colorante	50	2				

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

**Observaciones:**

Se obtiene el perfil deseado, con los parámetros ajustados en el rango de la literatura.



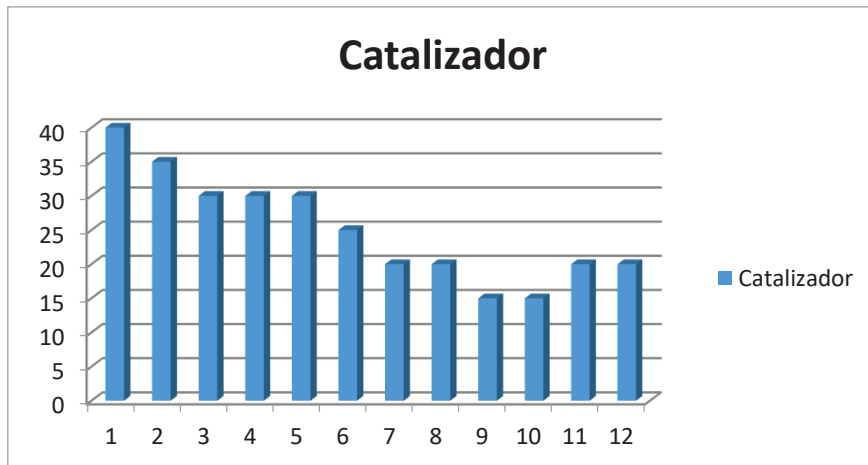
**Figura 80.** Perfil óptimo.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

### 3.3.1. Análisis de las pruebas experimentales

Los histogramas están desarrollados según las experiencias realizadas y su cantidad empleada en gramos. El catalizador y el acelerante son elementos de reacción para la resina, para que se produzca la solidificación.

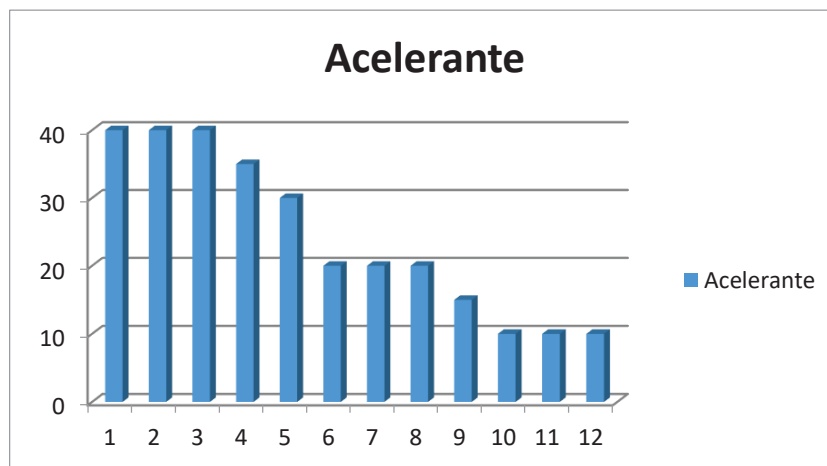
En la figura 78 se muestra el catalizador empleado en las pruebas hasta obtener la cantidad ideal.



**Figura 81.** Uso de catalizador según pruebas.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

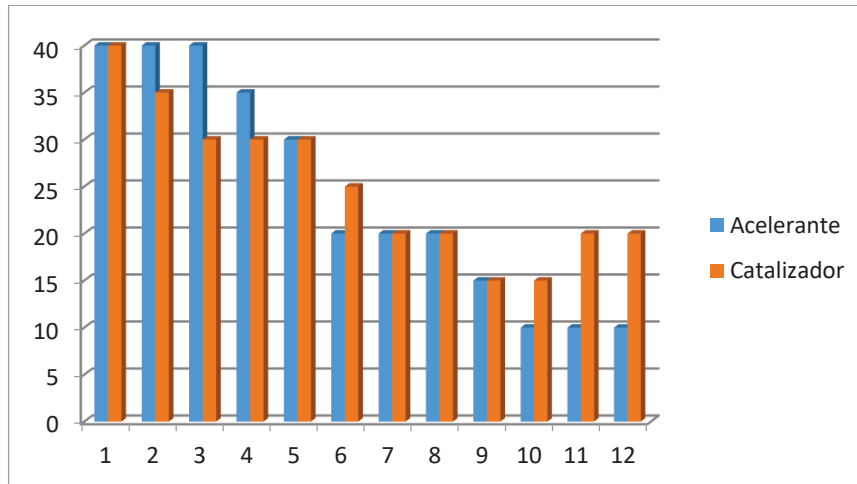
En la figura 82 se muestra el acelerante empleado en las pruebas.



**Figura 82.** Uso del acelerante en las pruebas.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

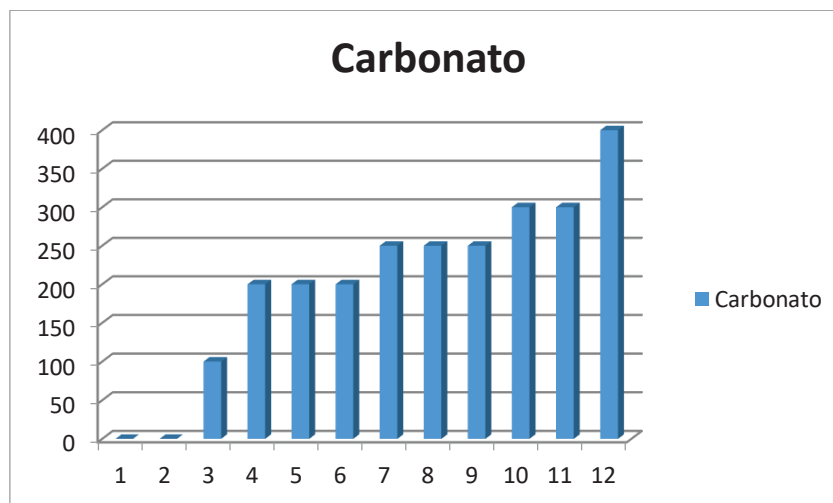
Se puede deducir según el análisis de los dos histogramas que la cantidad es de 2 a 1, es decir la cantidad de catalizador es el doble que el del acelerante.



**Figura 83.** Catalizador vs. Acelerante.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

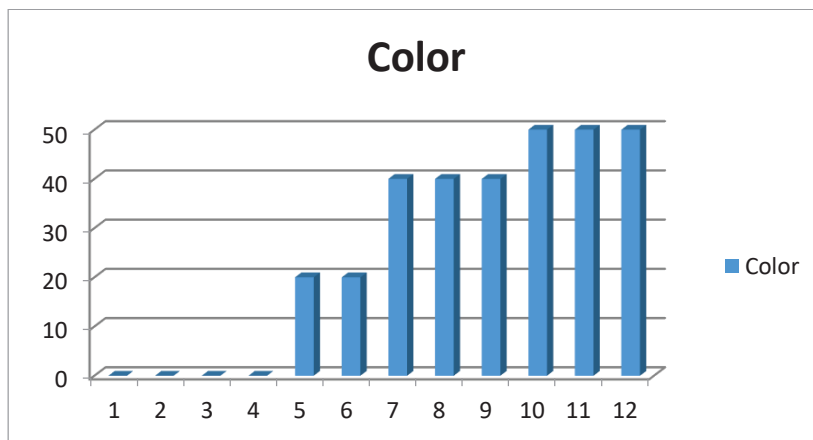
El carbonato y el colorante se puede decir que son elementos de relleno y de dar brillo al perfil pultruido.

En la figura 84 se muestra el carbonato empleado en las pruebas hasta obtener la cantidad ideal.



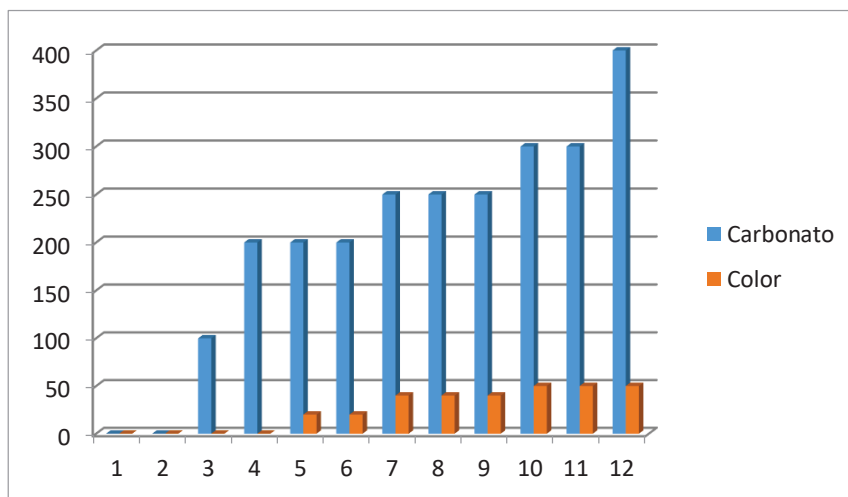
**Figura 84.** Uso del carbonato en las pruebas.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

En la figura 85 se muestra el color empleado en las pruebas.



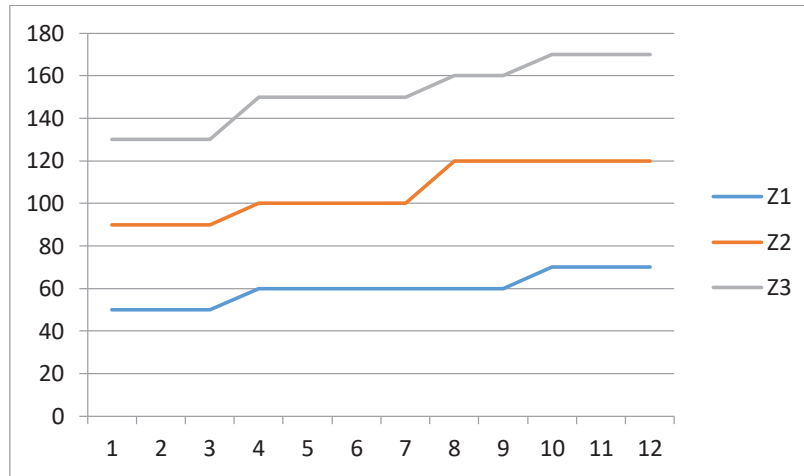
**Figura 85.** Uso del acelerante en las pruebas.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Se puede observar que el carbonato se debe emplear más que los demás componentes e incluso más que el colorante.



**Figura 86.** Carbonato vs color.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

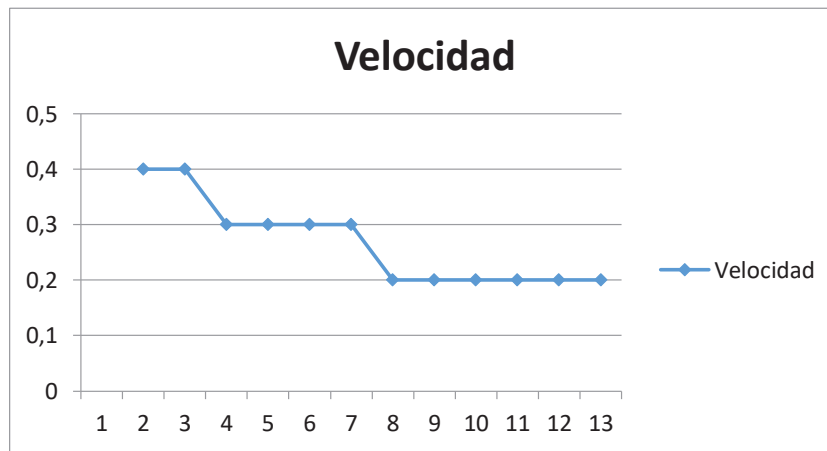
A continuación se muestra la tendencia de las temperaturas empleadas, según las pruebas realizadas, hasta encontrar la temperatura óptima para nuestro proceso.



**Figura 87.** Zonas de Temperatura.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Finalmente la velocidad empleada durante las pruebas, obteniendo un valor dentro del rango de velocidades recomendadas.



**Figura 88.** Velocidad de tracción.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

### 3.4. Normas ASTM

Las normas para el análisis de los perfiles pultruidos se detallan a continuación, entre las cuales revisaremos las ASTM D3039 y ASTM D7264.

#### 3.4.1. Norma de ensayo de tracción ASTM D3039

El ensayo de tracción uniaxial constituye el método fundamental para la determinación de datos tales como la especificación del material, inspección, investigación, desarrollo y diseño de componentes estructurales.

Para materiales compuestos de fibra de vidrio unidireccional y tejido podemos medir los siguientes parámetros:

- $E_x$  y  $E_y$ , que son los módulos de Young en la dirección de la fibra y en dirección transversal, respectivamente.
- $\nu_{xy}$ , el coeficiente de Poisson.
- $X$  e  $Y$ , la resistencia a tracción en la dirección de la fibra y en la dirección transversal, respectivamente.

Para laminados simétricos multidireccionales, podemos medir:

- $E_1$ , módulo del laminado en la dirección de aplicación de la carga.
- $\nu_{12}$ , coeficiente de Poisson.
- $X$ , resistencia a la tracción del laminado en la dirección de aplicación de la carga.

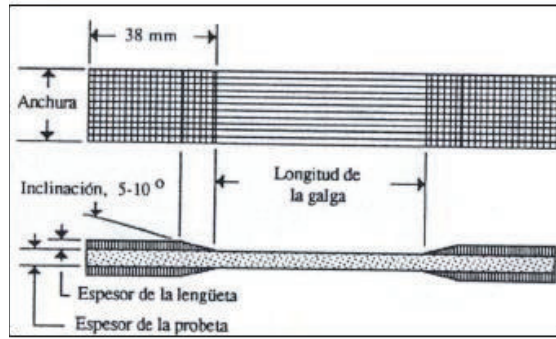
Según la normativa americana ASTM D 3039-10 para tracción de compuestos fibra-resina, se aceptan universalmente probetas rectangulares, de sección constante con lengüetas incorporadas en los extremos. (ASTM T. , 2010)

**Tabla 70.** Dimensiones recomendadas de la probeta en mm.

Orientación	Anchura (mm)	Longitud (mm)	Espesor (mm)
<i>0 grados</i>	12,7	127	1 a 2,54
<i>90 grados</i>	25,4	38	1 a 2,54
<i>Multidireccional</i>	25,4	127	1 a 2,54

(Fuente: Adaptado de norma ASTM D3039).





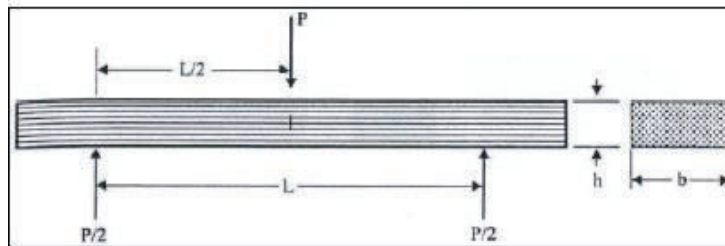
**Figura 89.** Probeta de ensayo a tracción con lengüetas en los extremos.

(Fuente: Adaptado de norma ASTM D3039).

### 3.4.2. Norma de ensayo de flexión ASTM D 7264

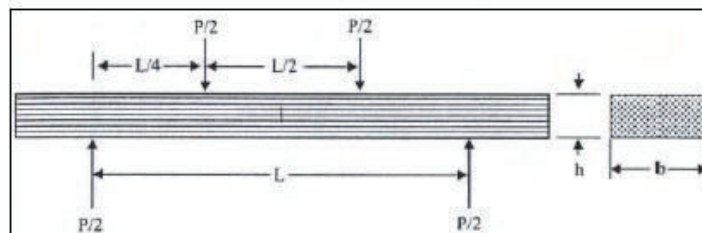
Este ensayo se utiliza para control de calidad y especificación de material. Este ensayo no sirve para caracterizar el material. También se usa para determinar la resistencia de las fibras exteriores y el módulo de Young de materiales compuestos homogéneos y poliméricos. Para el caso de ensayo de flexión de laminados multidireccionales, la interpretación de la resistencia y rigidez no es tan sencilla.

En las figuras 90 y 91 muestran los ensayos de flexión a tres y cuatro puntos, respectivamente. El ensayo a tres puntos está diseñado principalmente para materiales que rompen a una deflexión relativamente pequeña. (ASTM FLEXIÓN, 2010)



**Figura 90.** Ensayo de flexión a tres puntos

(Fuente: Adaptado de norma ASTM D7264).



**Figura 91.** Ensayo de flexión a cuatro puntos.

(Fuente: Adaptado de norma ASTM D7264).

### 3.5. Geometría de piezas estructurales

El presente trabajo tiene como uno de los objetivos, obtener un perfil en base a material compuesto tipo "O"; al momento de realizar algún tipo de ensayos tendremos inconvenientes, debido a la geometría del perfil para la obtención de las probetas, ambas normas descritas anteriormente piden probetas de forma rectangular. Al momento de extraer la probeta del nuestro perfil va a tener una curvatura, debido a que el perfil es de diámetro pequeño y al momento de amordazar en la máquina para hacer los ensayos se va a provocar una ruptura, esto nos generará resultados erróneos.

Para la obtención de la probeta se realizó lo siguiente:

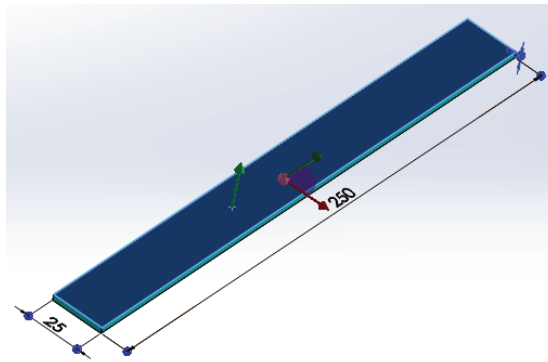
- Una vez elaborado el perfil y antes de que se cure por completo, se procedió a realizar un corte por la mitad. (las temperaturas de curado se disminuyeron)
- Se expandió la mitad del perfil y se procedió a cubrir con resina a ambas superficies.
- Se procedió a cortar según medidas establecidas por la norma.
- Se cubre con resina para dar la forma rectangular y eliminar imperfecciones.

En el anexo H, se observa detalladamente como se obtuvo las probetas.

Estos ensayos desarrollados es para comprobar las propiedades físicas del material, este ensayo se lo realiza en el Laboratorio de nuevos materiales de la EPN, en conjunto con el Ing. Orlando Campaña que es el encargo del laboratorio.

#### 3.5.1. Ensayo de tracción

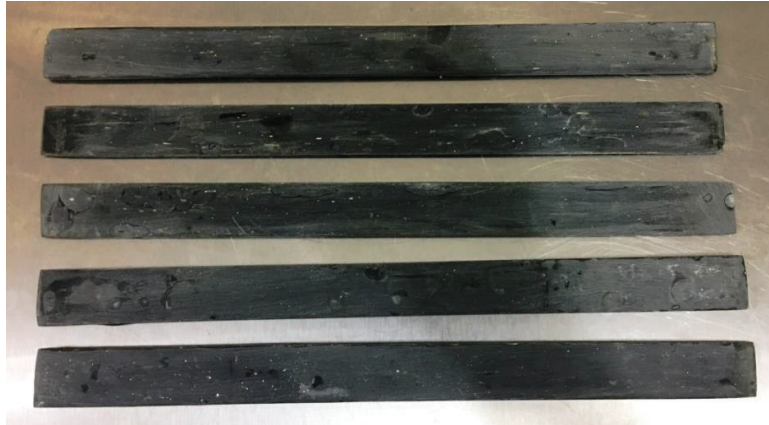
La geometría que se utilizó para el ensayo de tracción tiene una forma prismática, la cual fue obtenida de la norma ASTM D 3039 (Método de prueba para las propiedades tensoras de materiales compuestos).



**Figura 92.** Probeta tracción.

(Fuente: Adaptado de norma ASTM D3039).

La norma establece que se debe realizar 5 ensayos para determinar las propiedades físicas del material, en la figura 93 se muestra las 5 probetas utilizadas para los ensayos.



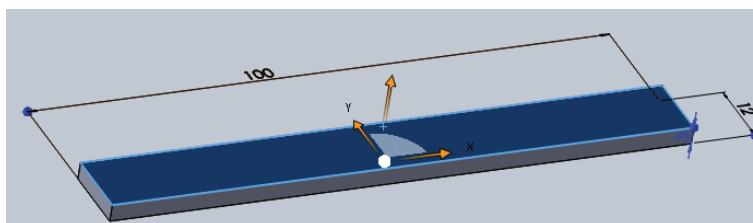
**Figura 93.** Probetas para el ensayo de tracción.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

### 3.5.2. Ensayo de flexión

La geometría que se utilizó para el ensayo de flexión tiene una forma prismática, la cual fue obtenida de la norma ASTM D 7264 (Método de prueba para las propiedades flectoras de materiales compuestos).

Esta norma permite caracterizar plásticos reforzados y no reforzados. Según esta norma si la probeta tiene un espesor mayor a 1,6 mm debe colocarse centrada sobre un par de apoyos. La distancia entre apoyos debe ser 16 veces el espesor de la probeta. Sin embargo, también se deben cumplir otros requisitos como que la probeta a ensayarse no debe exceder más de un cuarto de la distancia entre apoyos y debe sobresalir por lo menos 10 % de la distancia existente entre los mismos. Las probetas obtenidas para la flexión tuvieron las dimensiones que se indican en la figura 94.



**Figura 94.** Probeta flexión.

(Fuente: Adaptado de norma ASTM D7264).

La norma ASTM D7264-15, establece que mínimo se debe utilizar 5 probetas para determinar el ensayo de flexión, en la figura 95 se muestra las probetas utilizadas para el ensayo.



**Figura 95.** Probetas para el ensayo de flexión.

(Fuente: Adaptado de norma ASTM D7264).

### **3.6. Caracterización mecánica de las probetas de pultrusión**

En los ensayos mecánicos se usó la máquina marca Tinius Olsen, que es una máquina universal de ensayos modelo H25KS, en la cual se va a realizar los ensayos de tracción y flexión.

#### **3.6.1. Máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25KS**

Este equipo fue utilizado para realizar ensayos de tracción y flexión de las probetas de pultrusión hechas de material compuesto. La máquina Tinius Olsen H25KS es un equipo de mediana capacidad que puede llegar a los 25 kN, posee un cabezal fijo y un cabezal móvil, este último funciona por un sistema electrónico que permite que se desplace hasta 1100 mm con una velocidad de hasta 1000 mm/s. Esta máquina dispone de ciertos dispositivos que permiten realizar los ensayos de tracción y flexión. Para los ensayos de tracción, se dispone de dos mordazas planas y un extensómetro, las mordazas planas tienen una forma de cuña que evita que la probeta se resbale durante el ensayo, mientras que el extensómetro, es un elemento que permite medir la deformación con una precisión de 0,01 mm. (Castro & Fajardo Cristian, 2014) En la figura 96 se muestra la máquina descrita.



**Figura 96.** Máquina Tinius Olsen H25KS.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

En los ensayos de flexión se cuenta con un dispositivo que permite regular la distancia entre apoyos y de un punzón. Los apoyos se colocan en el cabezal fijo, y el punzón en el cabezal móvil. Para medir la deflexión se toma como referencia el desplazamiento del cabezal móvil respecto al fijo. En la figura 97 se muestra una probeta sometida al ensayo de flexión.



**Figura 97.** Probeta sometida a flexión.

(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Este equipo dispone de un software incorporado por el fabricante denominado Horizon que permite obtener con gran facilidad las curvas de Esfuerzo vs. Deformación de los diferentes ensayos.

### 3.6.2. Ensayo tracción

En una viga de dimensiones L (longitud), b (ancho) y h (espesor), existe una deformación constante a lo largo de la longitud de la viga y del espesor del laminado; y su ecuación 32.

$$\varepsilon = \frac{P}{bhE} \quad (32)$$

El desplazamiento entre extremos de la viga toma el siguiente valor:

$$\delta = \frac{PL}{bhE} \quad (33)$$

Para laminado multidireccional, la tensión media a lo largo del espesor del laminado sigue siendo  $\frac{P}{bh}$ , pero la tensión a lo largo del espesor varía lámina a lámina, siendo proporcional a la rigidez longitudinal de cada lámina.

$$\sigma = \frac{PhE}{bh^2E} \quad (34)$$

### 3.6.3. Ensayo flexión

Los ensayos de flexión fueron realizados bajo norma ASTM D7264-15. Según la geometría descrita en la parte anterior se ensayaron (5) probetas según lo indicado en la norma. Se midió el ancho y espesor de cada probeta con una precisión de 0.01mm, se colocaron los apoyos los apoyos a una distancia de 16 veces el espesor y se montaron las probetas en la máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25KS, conjuntamente con el punzón central que aplico la carga. La velocidad del ensayo se calculó haciendo uso de la ecuación 35 que se encuentra en la norma.

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \left( \frac{mm}{min} \right) \quad (35)$$

Donde R es la velocidad del cabezal móvil, Z es una constante relacionada con el esfuerzo en las capas externas del material con un valor de 1 mm/min, L es la distancia entre los apoyos y d es el espesor del material.

Con las dimensiones de la figura 94 se calculó una velocidad de 1,28 mm/min. Los parámetros de velocidad, distancia entre apoyos y las dimensiones de las probetas fueron ingresados en el programa Horizon. Se colocó la probeta sobre los dos apoyos y se inició el ensayo.

El esfuerzo de flexión en cada instante fue calculado automáticamente por el programa mediante la ecuación 36.

$$\sigma_B(MPa) = \frac{3P_B(N)L(mm)}{2bd^2(mm^3)} \quad (36)$$

Donde  $\sigma_B$  es el esfuerzo en la capa más externa,  $P_B$  es la carga a flexión soportada por el material en ese instante, L es la distancia entre apoyos, b y d son el ancho y el espesor de la probeta, respectivamente.

Para el cálculo de la deformación unitaria a flexión en cada instante se utilizó la ecuación 37.

$$\varepsilon_B \left( \frac{mm}{mm} \right) = \frac{6D(mm)d(mm)}{L^2(mm^2)} \quad (37)$$

Donde  $\varepsilon_B$  es la deformación unitaria a flexión en cada instante, D es la deformación en el centro de la probeta y L es la distancia entre apoyos.

El módulo de elasticidad tangente fue calculado a partir de la porción inicial (parte lineal) de la curva esfuerzo vs. porcentaje de deformación. Para ello se utilizó la ecuación 38.

$$E = \frac{\sigma_{2B} - \sigma_{1B} (MPa)}{\varepsilon_{2B} - \varepsilon_{1B} \left( \frac{mm}{mm} \right)} \quad (38)$$

Donde E es el módulo de elasticidad,  $\sigma_{2B}$  y  $\sigma_{1B}$  son dos esfuerzos a flexión dentro de la zona elástica de la curva. Además,  $\varepsilon_{2B}$  y  $\varepsilon_{1B}$  son las deformaciones porcentuales del material correspondiente a los esfuerzos,  $\sigma_{2B}$  y  $\sigma_{1B}$ .

Una vez obtenidos estos valores se calculó la media aritmética de cada grupo de probetas y su desviación estándar de acuerdo a la ecuación 39.

$$s = \sqrt{\frac{(\sum x^2 - n\bar{x}^2)}{n - 1}} \quad (39)$$

Donde s es la desviación estándar, x es el valor de una observación, n el número de observaciones y  $\bar{x}$  la media aritmética del conjunto de observaciones.

### 3.7. Análisis y discusión de resultados

En este punto se presentan los resultados obtenidos durante los ensayos realizados de tracción y flexión según las normas descritas en la parte anterior. Estos resultados de los ensayos se presentan en gráficos y tablas.



### 3.7.1. Resultados del ensayo de tracción

Los resultados obtenidos del ensayo de tracción según la norma ASTM D3039 - 10, se resumen en la tabla 71. Se pueden observar los datos de las probetas, valor del esfuerzo máximo, carga última, deformación última y módulo de elasticidad. Las condiciones del ensayo según la norma establecen lo siguiente.

- Número de muestras: Al menos 5 especímenes.
- Velocidad de ensayo: 2 mm/min.
- El extensómetro debe ser colocado con una separación de 50 mm entre marcas.
- Ancho nominal de las muestras: 25 mm.
- Espesor nominal de las muestras: 2 mm.

**Tabla 71.** Ensayo de tracción según la norma ASTM D3039-10 realizado en las muestras de material compuesto.

Ensayo de tracción ASTM D3039-10							
Muestra Nro.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Módulo Tangente (MPa)	Deformación a la rotura (%)
1	24,58	3,50	86,03	5055,83	58,77	9060,57	0,68
2	24,91	3,91	97,04	4126,19	42,36	12037,20	0,31
3	24,36	4,59	111,81	7554,69	67,57	13916,60	0,73
4	24,24	3,27	79,26	6238,87	78,71	11425,18	0,60
5	25,02	3,91	97,83	4304,49	44,00	11373,13	0,36
Promedio $\bar{X}$				5456,01	58,28	11562,54	0,54
Desviación estándar $S_{n-1}$				1438,04	15,50	1737,92	0,19
Coeficiente de variación $CV$				26,36	26,60	15,03	35,46

(Fuente: Adaptado de laboratorio de LANUM).

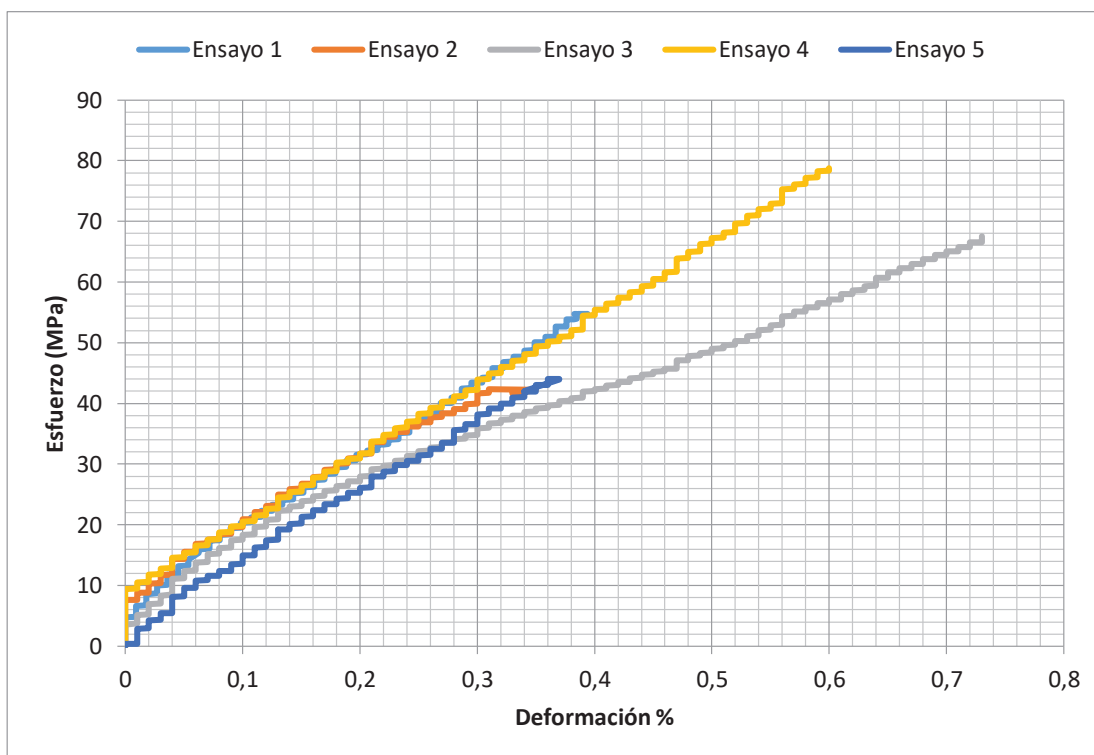
En la figura 98 se puede observar las condiciones de las probetas de material compuesto después de los ensayos de tracción.





**Figura 98.** Probetas después de ser sometida a tracción.  
(Fuente: Adaptado de laboratorio de LANUM).

En la figura 99 se muestra las curvas de esfuerzo vs. deformación de los ensayos realizados, del material compuesto de resina poliéster Isoftálica con hilo rovings.



**Figura 99.** Curva Esfuerzo vs. Deformación de los ensayos a tracción.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Como se puede observar las curvas según los ensayos realizados muestra una dispersión aceptable para las probetas ensayadas, con un valor máximo de esfuerzo a la tracción de 78,71 MPa y una deformación máxima de 0,73 %, cabe resaltar que este tipo de material compuesto no posee zona plástica; solo posee una zona elástica ò lineal, debido a que tiene una matriz termoestable y el curado de la resina con el refuerzo es sometido a calor y sus moléculas tienden a incrementarse y posteriormente se cura y reticula, al contrario de los termoplásticos no se reticulan y posee zona plástica. En el anexo I, se muestran a detalle los ensayos realizados.

### 3.7.2. Resultados del ensayo de flexión

El ensayo de flexión se realizó según la norma ASTM D7264 - 15, se resume en la tabla 72. Se pueden observar los datos de las probetas, valor del esfuerzo máximo, carga última, deformación última y módulo de elasticidad. Las condiciones del ensayo según la norma establecen lo siguiente.

- Número de muestras: Al menos 5 especímenes.
- Velocidad de ensayo: 1 mm/min.
- Método: Flexión por tres puntos.
- La relación espesor distancia entre apoyos que se considera es 1:16
- Ancho nominal de las muestras: 13 mm.
- Espesor nominal de las muestras: 2 mm.

**Tabla 72.** Ensayo de flexión según la norma ASTM D7264-15 realizado en las muestras de material compuesto.

Ensayo de tracción ASTM D7264-15							
Muestra Nro.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Módulo Tangente (MPa)	Deformación última (%)
1	12,57	3,69	46,38	88,33	45,77	2148,93	2,55
2	12,30	3,80	46,74	81,67	42,01	2500,94	1,91
3	11,99	3,75	44,96	96,67	51,69	2380,17	2,66
4	12,55	3,91	49,07	110,83	54,28	1880,77	3,99
5	12,20	4,74	57,83	90,00	37,39	1811,77	2,41
Promedio $\bar{X}$				93,50	46,23	2144,39	2,70
Desviación estándar $S_{n-1}$				11,06	6,91	301,33	0,77
Coeficiente de variación $CV$				11,83	14,94	14,05	26,62

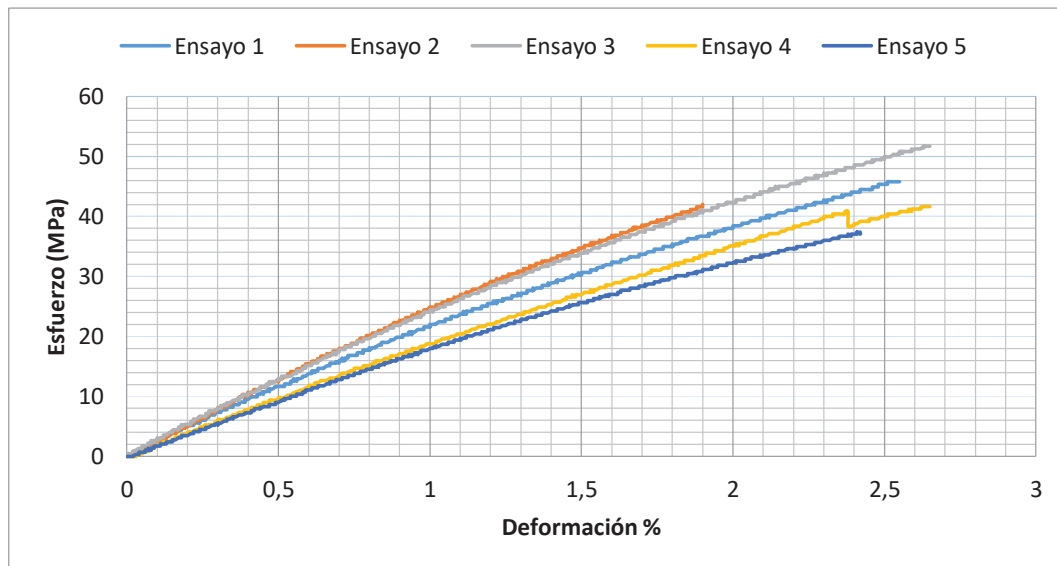
(Fuente: Adaptado de laboratorio de LANUM).

En la figura 100 se puede observar las condiciones de las probetas de material compuesto después de los ensayos a flexión.



**Figura 100.** Probetas después de ser sometida a flexión.  
(Fuente: Adaptado de laboratorio de LANUM).

En la figura 101 se muestra las curvas de esfuerzo vs. deformación de los ensayos realizados a 3p, del material compuesto de resina poliéster Isoftálica con hilo rovings.



**Figura 101.** Curva Esfuerzo vs. Deformación de los ensayos a flexión.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Como se puede observar las curvas según los ensayos a flexión realizados muestra una dispersión aceptable para las probetas ensayadas, con un valor máximo de esfuerzo a la flexión de 54,28 MPa y una deformación máxima de 3,99 %. El módulo de elasticidad fue calculado por medio de la tangente y dando un valor promedio de 2,14 GPa. El ensayo de

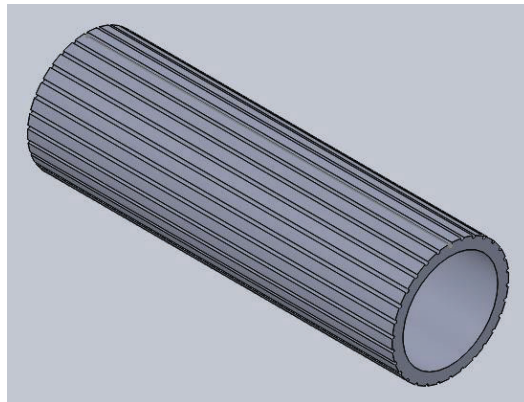
flexión con respecto a la de tracción es menor, esto es debido a la orientación de las fibras roving, resaltando que este tipo de material compuesto es anisotrópico.

En el anexo I, se muestran a detalle los ensayos realizados a cada una de las probetas.

### **3.8. Comparación de propiedades con otros perfiles con procesos similares**

La resistencia de un material compuesto reforzados con fibra de vidrio depende sobre todo del contenido de vidrio del material (roving) y del arreglo de las fibras de vidrio. En general, mientras más alto es el porcentaje en peso de vidrio en el compuesto, tanto más resistente es el material reforzado. (Suherman, 2007) Cuando hay hilos de vidrio en dirección paralela, como puede ocurrir en el caso del embobinado de los filamentos, el contenido de fibra de vidrio puede ser hasta de 80 % en peso, lo cual conduce a valores de resistencia muy altos para el material compuesto. (Smith & Hashevi, 2006)

La presente tesis realizada se obtuvo un perfil tipo “O”, con fibras continuas de roving que están a lo largo del perfil como se muestra en la figura 102.



**Figura 102.** Disposición de los hilos roving en el perfil “O”.

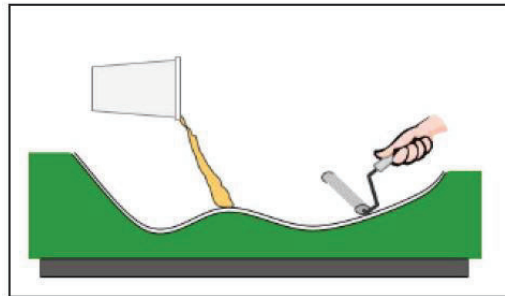
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Cabe resaltar que el material del perfil es de tipo “anisotrópico”, esto significa que la resistencia no es la misma en todas sus direcciones, ya que es un perfil laminado que está compuesto de fibra unidireccional y resina poliéster. La resistencia del material a lo largo de las fibras es más resistente que de manera transversal.

Se detalla a continuación los diferentes procesos de fabricación de materiales compuestos, como ya se mencionó en la tabla 7 y se hará hincapié en sus respectivas propiedades mecánicas.

- Método de contacto a mano (Hand lay-up)

El más simple y antiguo de los procesos de fabricación de FRP / Composites, hand-lay-up, se utiliza en la producción de bajo volumen de componentes grandes, tales como cascos de barcos y partes asociadas. Una capa de gel pigmentada se pulveriza primero sobre el molde para obtener una superficie de alta calidad. Cuando la capa de gel ha curado, la esterilla de refuerzo de vidrio y / o la mecha tejida se coloca en el molde, y la resina catalizada se vierte, cepilla o se rocía. La laminación manual elimina el aire atrapado, densifica el FRP / Compuesto y moja a fondo el refuerzo con la resina. Se añaden capas adicionales de estera mat o tejido de rovings y resina para el grosor. Un catalizador o acelerador inicia el curado en el sistema de resina, el cual endurece el FRP / Composite sin calor externo. La disposición de mano ofrece herramientas de bajo costo, procesamiento simple y una amplia gama de potencial de tamaño de parte. Los cambios de diseño se hacen fácilmente. Las piezas tienen una superficie acabada y requieren recorte secundario. (Companies, 2012)



**Figura 103.** Proceso Hand lay-up.

(Fuente: Adaptado de Companies, 2012).

En la tabla 73 se muestra las propiedades mecánicas del proceso Hand lay-up:

**Tabla 73.** Especificaciones del proceso Hand lay-up.

<b>Hand lay-up</b>	
Glass fiber %	30
Densidad	$1,35 \frac{gr}{cm^3}$
Esfuerzo a la tracción ASTM D638	86,18(MPa)
Módulo a la tracción ASTM D790	6,89 (GPa)
Elongación %	1,3
Esfuerzo a la flexión ASTM D638	193,05 (MPa)
Módulo a la flexión ASTM D790	5,17 (GPa)

(Fuente: Adaptado de Companies, 2012).

- Inyección

Los compuestos de moldeo termoendurecibles reforzados pueden ser moldeados por inyección en equipos similares comúnmente usados para resinas termoplásticas. La principal diferencia radica en las temperaturas mantenidas en diversas áreas del sistema. Con los termoplásticos, el tornillo de inyección y la cámara se mantienen a una temperatura relativamente alta, y la matriz se enfría de modo que la pieza moldeada se establece. Por el contrario, para un FRP / Compuesto termoestable, el tornillo y la cámara se enfrían para que la resina no se reticule y se gelifique, y la matriz se calienta para reticular y curar. El moldeo por inyección ofrece alta velocidad de producción y bajos costos de mano de obra directa. (Companies, 2012)

En la tabla 74, se muestra las propiedades mecánicas del proceso.

**Tabla 74.** Especificaciones del proceso Inyección.

<b>Inyección</b>	
Glass fiber %	22
Densidad	0,18 $\frac{gr}{cm^3}$
Esfuerzo a la tracción ASTM D638	33,78 (MPa)
Módulo a la tracción ASTM D790	10,55 (GPa)
Elongación %	< 0,5
Esfuerzo a la flexión ASTM D638	87,56 (MPa)
Módulo a la flexión ASTM D790	9,92 (GPa)

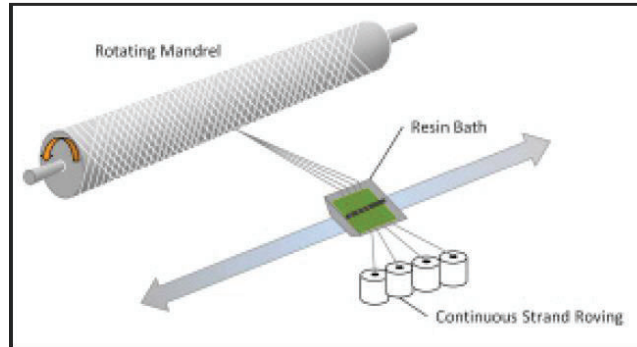
(Fuente: Adaptado de Companies, 2012).

- Enrollamiento en húmedo de filamentos (Filament winding)

Las fibras o mechas continuas impregnadas de resina (epoxi) se enrollan sobre un mandril giratorio en un patrón predeterminado, proporcionando un control máximo sobre la colocación de las fibras y la uniformidad de la estructura. En el método por vía húmeda, la fibra capta la resina de baja viscosidad pasando a través de un canal o de un sistema de aplicación medido. En el método en seco, el refuerzo se impregna con resina antes del bobinado, en la figura 98 se muestra el proceso.

Los accesorios integrales y los cierres de los buques pueden enrollarse en la estructura. Cuando se han aplicado suficientes capas, el FRP / Compuesto se endurece sobre el mandril y se retira el mandril. El bobinado de filamentos se utiliza tradicionalmente para producir productos FRP / Compuesto cilíndricos y esféricos, tales como tanques de almacenamiento de productos químicos y de combustible y tubos, recipientes a presión y cajas de motores de cohetes. Sin embargo, la tecnología se ha ampliado, y con máquinas

de liquidación controladas por ordenador, ahora se están haciendo otras formas. Ejemplos de ello son los brazos de cola de helicópteros y palas de rotor, palas de aerogeneradores y capós de motores de aviones. En la tabla 75 se muestra las propiedades mecánicas. (Companies, 2012)



**Figura 104.** Proceso Filament wound.  
(Fuente: Adaptado de Companies, 2012).

**Tabla 75.** Propiedades mecánicas del proceso Filament Wound.

<b>Filament wound</b>	
Glass fiber %	80
Densidad	$2,07 \frac{gr}{cm^3}$
Esfuerzo a la tracción ASTM D638	551,58 (MPa)
Módulo a la tracción ASTM D790	27,57 (GPa)
Elongación %	1,6
Esfuerzo a la flexión ASTM D638	689,47 (MPa)
Módulo a la flexión ASTM D790	34,47 (GPa)

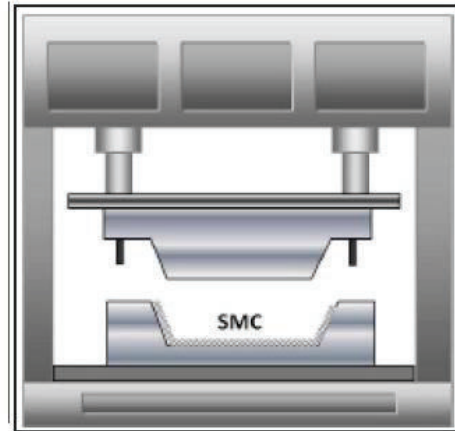
(Fuente: Adaptado de Companies, 2012).

- Moldeo por Compresión

El moldeo por compresión es la elección principal para la mayoría de las piezas de alto volumen de FRP / Compuesto. El proceso de moldeo a alta presión produce piezas de alta resistencia y complejas en una amplia variedad de tamaños. Los moldes metálicos combinados se montan en una prensa de moldeo hidráulica o mecánica. La carga de material se coloca en el molde abierto.

Las mitades de molde calentadas se cierran y se aplica presión. El tiempo de moldeo, dependiendo del tamaño y grosor de la pieza, oscila entre aproximadamente uno y cinco minutos. Los insertos y los accesorios se pueden moldear adentro.

Los FRP / Composites moldeados por compresión se caracterizan por su tamaño y forma neta, dos excelentes superficies acabadas y una excelente repetición de parte a parte. Los costos de recorte y acabado son mínimos. (Companies, 2012)



**Figura 105.** Proceso moldeo por compresión.  
(Fuente: Adaptado de Companies, 2012).

En la tabla 76, se dan las propiedades mecánicas de este proceso.

**Tabla 76.** Propiedades mecánicas del proceso moldeo por compresión.

<b>Moldeo por compresión</b>	
Glass fiber %	22
Densidad	$1,82 \frac{gr}{cm^3}$
Esfuerzo a la tracción ASTM D638	41,36 (MPa)
Módulo a la tracción ASTM D790	12,06 (GPa)
Elongación %	< 0,5
Esfuerzo a la flexión ASTM D638	88,25 (MPa)
Módulo a la flexión ASTM D790	10,89 (GPa)

(Fuente: Adaptado de Companies, 2012).

- Pultrusión

Proceso desarrollado en el presente trabajo de tesis, se muestra en la tabla 77, los valores de las propiedades mecánicas de los ensayos realizados en el LANUM. También se muestra en la tabla 78, datos de propiedades mecánicas de este proceso según ensayos realizados en "Molded fiber glass Companies".



**Tabla 77.** Propiedades mecánicas del proceso pultrusión según ensayos.

<b>Pultrusión</b>	
Glass fiber %	70
Densidad	$1,68 \frac{gr}{cm^3}$
Esfuerzo a la tracción ASTM D3039	58,28 (MPa)
Módulo a la tracción ASTM D3039	11,56 (GPa)
Elongación %	0,54
Esfuerzo a la flexión ASTM D7264	46,23 (MPa)
Módulo a la flexión ASTM D7264	2,14 (GPa)

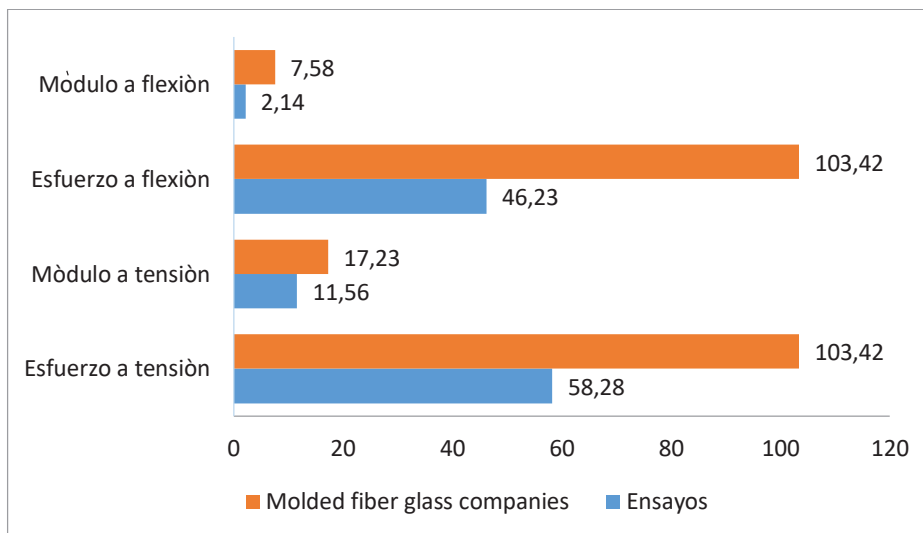
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

**Tabla 78.** Propiedades mecánicas del proceso pultrusión según Molded fiber glass companies.

<b>Pultrusión</b>	
Glass fiber %	55
Densidad	$1,68 \frac{gr}{cm^3}$
Esfuerzo a la tracción ASTM D638	103,42 (MPa)
Módulo a la tracción ASTM D790	17,23 (GPa)
Elongación %	0,2
Esfuerzo a la flexión ASTM D638	103,42 (MPa)
Módulo a la flexión ASTM D790	7,58 (GPa)

(Fuente: Adaptado de Companies, 2012).

En la figura 106, se muestra la comparación de valores de los esfuerzos a tracción y flexión como también los módulos a tracción y flexión, según valores desarrollados en los ensayos en la LANUM con la “Molded fiber glass companies”.



**Figura 106.** Comparación de resultados según ensayos LANUM y Molded fiber glass companies.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Los valores mostrados en la figura anterior muestra que la compañía “Molded fiber glass companies” tiene unos valores altos respecto a nuestros ensayos, esto se debe a los refuerzos que utilizan (rovings, mat) y obviamente a la resina empleada, esta industria realiza varios trabajos en varios campos y tiene distintos procesos de producción de materiales compuestos.

En la tabla 79, se muestra los valores referentes a tracción y flexión de cada proceso descrito anteriormente.

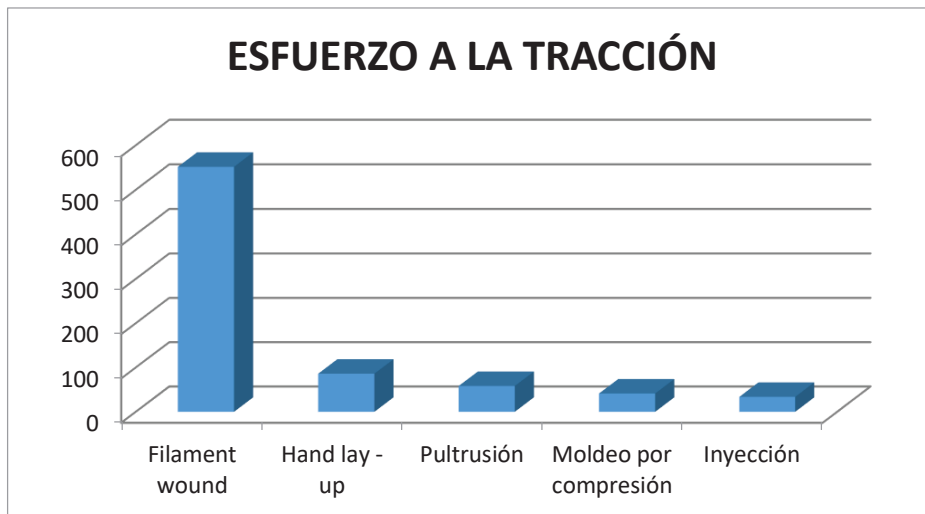
**Tabla 79.** Propiedades mecánicas de varios procesos.

Proceso	Glass fiber %	Densidad $\frac{gr}{cm^3}$	Esfuerzo tracción (MPa)	Módulo tracción (GPa)	Elong %	Esfuerzo flexión (MPa)	Módulo flexión (GPa)
Filament wound	80	2,07	551,58	27,57	1,6	689,47	34,47
Moldeo por compresión	22	1,82	41,36	12,06	<0,5	88,25	10,89
Pultrusión	70	1,68	58,28	11,56	0,54	-	-
Inyección	22	0,18	33,78	10,55	<0,5	87,56	9,92
Hand lay-up	30	1,35	86,18	6,89	1,3	193,05	5,17

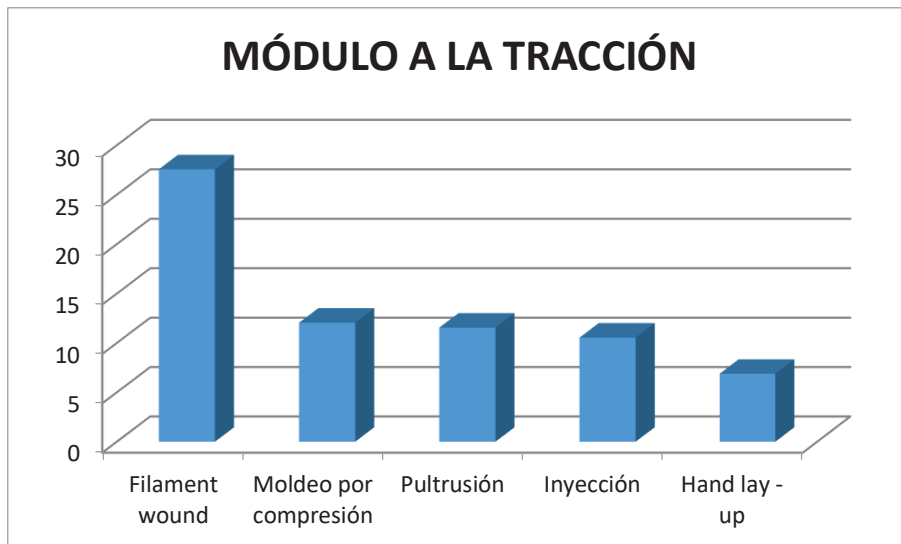
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

Como se puede observar en la tabla 79, los diferentes procesos para la obtención de un perfil de material compuesto. Se puede ver que el proceso de pultrusión en tracción es más resistente que otros procesos, el proceso de Filament wound es desarrollado con resina epoxi y esto da resultados mejores a las propiedades mecánicas. En flexión el proceso de pultrusión es ligeramente menor de todos estos procesos descritos aunque no por mucho.

En las figuras 107 y 108 se muestra la comparación de los procesos para obtención de un perfil en base a material compuesto con el ensayo de pultrusión realizado en la LANUM. En estas figuras se muestra el esfuerzo y el módulo en tracción. Además se puede apreciar que el proceso de pultrusión está al mismo nivel de otros procesos e incluso superando en propiedades mecánicas.

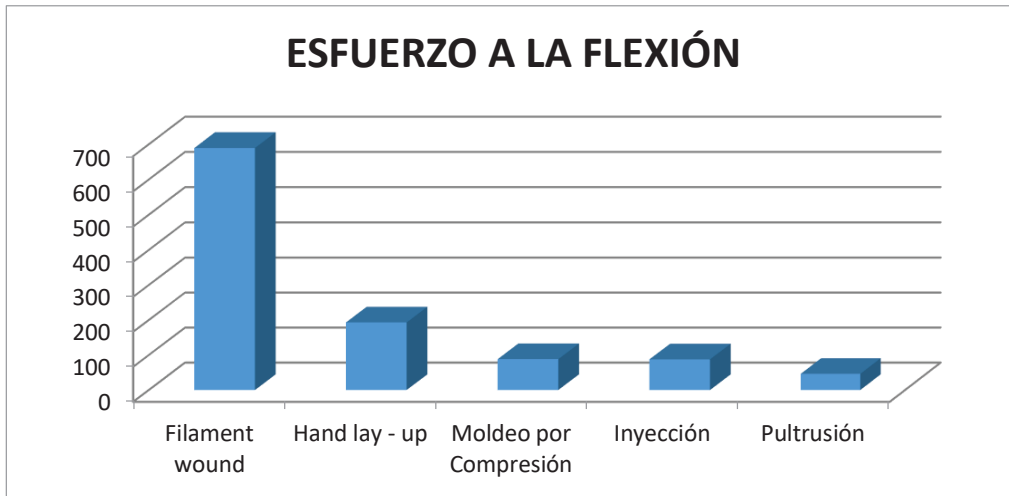


**Figura 107.** Comparación de esfuerzo a la tracción con otros procesos.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

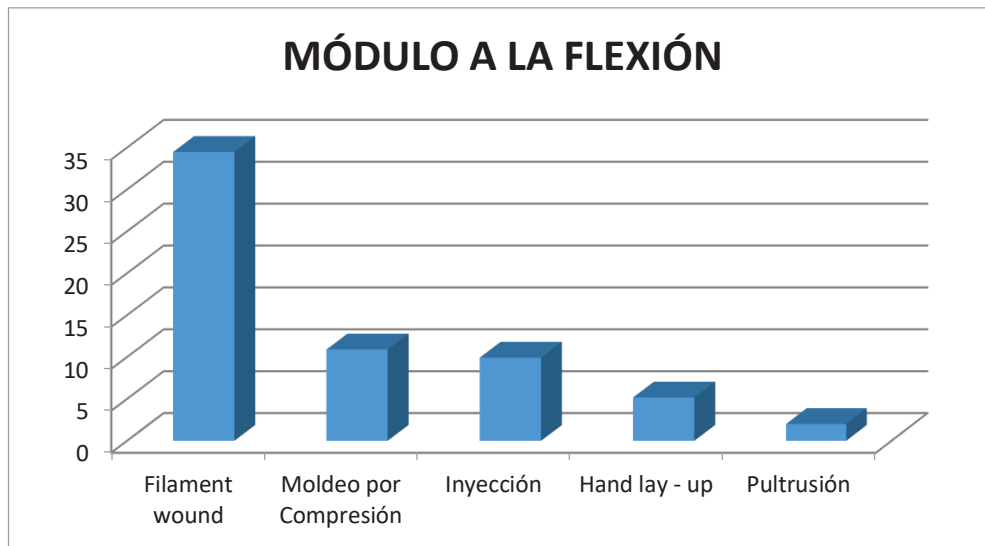


**Figura 108.** Comparación del módulo a la tracción con otros procesos.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

En las figuras 109 y 110, se muestra la comparación del esfuerzo y módulo a flexión, y se aprecia que el proceso de pultrusión está por debajo de los demás procesos aunque no por mucho. Esto se debe a la orientación de las fibras en el perfil.



**Figura 109.** Comparación de esfuerzo a la flexión con otros procesos.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).



**Figura 110.** Comparación del módulo a la flexión con otros procesos.  
(Fuente: Adaptado de fuente propia).

## **CAPÍTULO 4**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En el presente capítulo se muestran las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el presente trabajo. Las conclusiones fueron obtenidas conforme el desarrollo de los objetivos específicos, además se incluyen las recomendaciones para posteriores estudios sobre el tema de pultrusión.

#### **4.1. Conclusiones**

##### **Diseño y construcción de la máquina de pultrusión**

- En base al objetivo general planteado en el presente trabajo de tesis, se puede concluir que se cumplió a cabalidad, es decir, se diseñó y construyó un prototipo de máquina de pultrusión con el cual se determinó las variables del proceso de pultrusión, logrando el control óptimo de las diferentes etapas de fabricación.
- Al implementar la QFD se pudo conocer la exigencia integral de la máquina a diseñar y construir, este método nos facilitó la determinación, la evaluación de alternativas, la organización para la documentación del proceso diseñado.
- Los procedimientos de uso de la máquina que se plantearon en el presente trabajo son acordes a la operación y manejo seguro del equipo de pultrusión.
- El diseño final planteado en el presente proyecto para la línea de producción mediante el proceso de pultrusión indica asertivamente a las necesidades para la fabricación del perfil tipo "O".
- Se tiene que las variables del proceso de pultrusión como es la disposición de los hilos, concentración de resina, las temperaturas en el molde, y la velocidad de arrastre del proceso son determinantes en la obtención del proceso. Una mezcla incorrecta de resina tendría repercusiones en la viscosidad tanto como en la polimerización prematura de la resina, es por ello que se concluye que las variables antes mencionadas tienen que ser ajustadas para que el perfil tenga las propiedades deseadas.
- El diseño de la máquina de pultrusión es necesario tener en cuenta las necesidades respectivas de cada una de las zonas mencionadas en el punto anterior. Es por ello que el volumen en el tanque de resina se estipuló en 56 litros con lo cual podemos tener un aproximado de 60 metros de perfil pultruido tipo "O". Para tener una transferencia de calor adecuada se pudo observar que es necesario tener una potencia eléctrica en promedio de 4.5 kW las cuales se controlan por un sistema PID para mantener óptima esta variable. Para el sistema de tirado es necesario

tener una velocidad variable que nos permita mantener las 6 Ton a una velocidad adecuada para que el perfil pultruido no posea características no esperadas.

- Los costos de la máquina de pultrusión para este modelo de 6T están por debajo de las máquinas extranjeras con el adicional que la máquina en este proyecto es de fabricación nacional con el mínimo de piezas importadas.
- Se identificó las variables del proceso de pultrusión que afectan directamente al perfil y se logró el control adecuado para la obtención del perfil tipo "O", las variables del proceso son la concentración de resina, zonas de calor del molde y la velocidad de los pullers.
- La obtención del perfil tipo "O", se utilizó como refuerzo hilos rovings de fibra de vidrio obviamente se usó resina poliéster Isoftálica, aparte de eso se utilizó en la mezcla de la resina un carbonato de calcio para que de mejor contextura al perfil.
- Al realizar un estudio financiero de la máquina pultrusora en su conjunto total se determinó que su valor real está un 10% por debajo del valor con que comercialmente se conseguiría una máquina de este estilo.

### **Pruebas mecánicas al perfil de pultrusión**

- Se cumplió con las pruebas mecánicas y físicas del perfil de pultrusión, obteniendo valores aceptables dentro una comparación de valores con una empresa que trabaja en dicho proceso.
- Se define el perfil obtenido como un material compuesto tipo anisotrópico, esto hace que el perfil no tenga valores iguales cuando sus fibras trabajan longitudinalmente y transversalmente, si el perfil es sometido a trabajo de flexión no es lo mismo que hacerlo trabajar en tracción, debido a tipo de material y su unidireccionalidad de los hilos rovings.
- Los ensayos de flexión y tracción desarrollados en la LANUM, presentan una dispersión de datos aceptable como se muestra en la figura 96 y 98, dando confiabilidad en los ensayos.
- Las curvas de esfuerzo vs deformación, tanto como en tracción como en flexión son las esperadas y confirmadas según la literatura mostradas en la figura 16 del presente trabajo, éstas curvas presentan una tendencia lineal evidenciando un comportamiento netamente frágil de los materiales, este tipo de MC se caracteriza por tener una alta resistencia y un bajo porcentaje de deformación.
- Las propiedades mecánicas del perfil llegan a ser iguales o ligeramente superar a otros procesos para la obtención de materiales compuestos, teniendo valores máximos en tracción de 13,91GPa en el módulo de Young de y un 78,71MPa

esfuerzo, estos valores incluso llega a superar a algunos termoplásticos comunes en la industria como el Tereftalato de polietileno (PET) con valores de 2,8GPa de módulo de elasticidad y esfuerzo de 55MPa, el polipropileno con valores de 1,40GPa de módulo de elasticidad y un esfuerzo de 28MPa.

- Las propiedades mecánicas en flexión, son superadas ligeramente a los demás procesos, esto se debe a que el perfil obtenido tiene una sola dirección de los hilos rovings haciendo muy resistente de manera longitudinal y más débil transversalmente.

## **4.2. Recomendaciones**

- Se recomienda para futuros estudios, obtener un perfil de pultrusión tipo platina, para poder realizar los ensayos mecánicos sin tener problemas con la obtención de las probetas.
- Se recomienda para futuros proyectos la obtención de un perfil con distintos tipos de resinas y con aditamentos, para mejorar las propiedades mecánicas del perfil a obtener.
- Se recomienda que para próximos trabajos en pultrusión añadir al perfil pultruido un elemento más que es el mat o estera, dando mejores propiedades mecánicas en todas sus direcciones.
- Se recomienda reemplazar los hilos roving con fibras de origen natural ecuatoriana tales como la cabuya. Así como con nuevas resinas de origen híbrido (resina poliéster y poliuretano) que están presentes en el mercado, como también resinas de origen natural.
- Se recomienda hacer un modelo matemático del proceso para simular el proceso computacionalmente con diferentes tipos de resina y de hilos roving.
- Se recomienda un estudio ambiental de los impactos del proceso de pultrusión así como también de los elementos pultruidos.
- Adicionar al perfil pultruido los diferentes tipos de nano compuestos para mejorar sus propiedades.
- Realizar las adaptaciones a la máquina para generar perfiles curvos de pultrusión de una calidad estable.
- Se recomienda a nivel nacional tener normas de perfiles pultruidos para la norma INEN.

## **ANEXO A CASA DE LA CALIDAD**



**ANEXO B ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA MÁQUINA DE  
PULTRUSIÓN**

## **ANEXO C ESQUEMA ELÉCTRICO FUERZA Y CONTROL**

## **ANEXO D PROGRAMA LADDER DEL PLC**

## **ANEXO E ESQUEMA HIDRÁULICO Y NEUMÁTICO**

**ANEXO F    PROTOCOLO DE PRUEBAS EN VACÍO Y CON CARGA DE  
LA MÁQUINA DE PULTRUSIÓN**

**ANEXO G    ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL HILO ROVING Y  
RESINA ISOFTÁLICA**

## **ANEXO H PREPARACIÓN DE PROBETAS**

## **ANEXO I INFORME DE ENSAYOS DE TRACCIÓN Y FLEXIÓN**



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Libros

- Akovali, G. (2001). *Handbook of composites fabrication*. Shawbury, United Kingdom: Rapra Technology.
- Akseland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. Mexico: Thomson.
- Engineered materials handbook*. (1987). Ohio, EEUU: ASM International.
- Guerrero, V., Dávila, J., & Galéas, S. (2011). *Nuevos materiales. Aplicaciones estructurales e industria*. Quito, Ecuador: ImpreFepp.
- Hollaway, L. C. (2010). A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. En *Construction and building materials* (págs. 24(12): 2419-2445).
- Hsu, C. P. (1993a). Free-radical crosslinking copolymerization of styrene/unsaturated polyester resins: 1 Phase separation and microgel formation. En *Polymer* (págs. 34(21): 4516-4505).
- Hsu, C. P. (1993b). Free-radical crosslinking copolymerization of styrene/unsaturated polyester resins: 3 Phase kinetics gelation mechanism. En *Polymer* (págs. 34(21): 4516-4523).
- Lopez, J. (1987). *Materiales Metrología I*. Madrid: Thema 1era edicion.
- Mazumdar, S. (2003). *Composites Manufacturing: materials, product and process engineering*. EEUU: CRC press.
- McConnell, V. P. (2010). Vinyl esters get radical in composite markets. En *Reinforced plastics* (págs. 54(6): 34-38).
- Michaeli, W. W. (1989). *Tecnología de los composites/plasticos reforzados*. Ed. Hanser.
- Miravete, A. (2000). *Materiales compuestos*. Zaragoza
- Raymond W. Meyer, B. (1985). *Handbook of pultrusión technology*. New York: Chapman and Hall.
- Riba, C. (2010). *Diseño Concurrente*. Barcelona: Escuela Politécnica de Catalunya.
- Shull, P. J. (2000). Spatial and temporal control of the degree of cure in polymer composite structures. En *Polymer engineering and science* (págs. 40(5): 1157-1164).
- Smith, W., & Hashevi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*. Mexico: 4ta Edicion.
- Suherman, H. W. (2007). Comparative studies of tensile strength on polyester resin matrix composites with planar and random orientation fibers. En *Mechanical Behavior of materials X* (págs. 1-2, 345-346, 1503-1506.).
- Torres, E., Sanz, V., Guerrero, C., & Juárez, D. (2014). *Ingeniería concurrente aplicada al modelo de diseño de producto*. Valencia: Editorial 3 Ciencias.

### Artículos publicados en anales de conferencias

- Chung, C. A. (2004). *Simulation Modeling Handbook* (1 ed.). Washington: CRC Press.

- Chung, D. (2010). *Composite materials, science and applications*. New York, EEUU: Springer.
- Hepola, P., Advani, S., & Pipes R. B. (1993). *Presented at the 25th international SAMPE technical conference*. Philadelphia.
- Hsieh , T., & Su, A. (1992). *Journal of applied polymer science*.
- K. Gonsalves, C., Halberstadt, C., Laurencin, C., & Nair, L. (2008). *Biomedical Nanostructures*. New Jersey, EEUU: Willey.
- Lane, J., & Khattak , R. (1987). *Presented at the 45th annual SPE conference*. LA, EEUU: ANTEC87.
- Lee, W., Springer, G., & Smith, F. (1996). *Presented at the 36th international SAMPE symposium*. San Diego, EEUU.
- Martin, G., Tungare, A., Fuller, B., & Gotro, J. (1989). *Presented at the 47th annual SPE conference*. New York, EEUU: ANTEC89.
- Walsh , S., & Charamchi, M. (1988). *Presented at the ASME 25th National heat transfer conference*. CA, EEUU: Anaheim.

## Reportes

- AENOR. (s.f.). *Asociacion Española de normalizacion y certificacion*. Obtenido de <http://www.aenor.es/aenor/aenor/perfil/perfil.asp#.VHVbhYug-So>.
- Bottcher, A. a. (1997). Phenolic resins for FRP systems. En *Sample Journal* (págs. 33(3): 35-40).
- Calabrese L., Valenza. A. (Noviembre, 2002). The effect of a liquid CTBN rubber modifier on the thermo-kinetic parameters of an epoxy resin during a pultrusión process. *Composites science and technology*, P11.
- Callister, W. (2007). *Materials science and engineering: an introduction*. EEUU: John Wiley & Sons Inc.
- Campbell, F. (2010). *Structural Composite Materials*. EEUU: ASM International.
- Gorthala, R., Roux, J., & Vaughan, J. (1994). *Journal of composite materials*.
- Herakovich, C. (1998). *Mechanics of fibrous composites*. New York, EEUU: J. Wiley and sons inc.
- Jang, B. Z. (1994). *Advanced polymer composites: Principles and applications*. ASM International.
- Miracle, , D. (2001). ASM International Handbook Committee. En *ASM International Composites* (pág. Vol. 21). Materials Park. ASM International.
- Ryan, M. (1984). *Polymer engineering and science*.
- Selley, J. a. (1991). Build a durable fgd system with frp. En *Chemical engineering Progress* (págs. 87(9): 86-92).
- Swain, R. E.-Z. (1990). Interface/interphase concepts in composite materials systems. En *Journal of thermoplastic composite materials* (págs. 3(1): 13-23).

Visco, A. M. (2008). modification of polyester resin based composites induced by seawater absorption.

### **Tesis de magíster o disertación doctoral**

Bello, A. I. (2007). Estabilidad global de elementos estructurales de polímero reforzado con fibra de vidrio. En A. I. Bello. Navarra: Universidad de Navarra.

Bendezù Reyes, J. (2002). *Los plasticos reforzdos en fibra de vidrio (PRFV), sus aplicaciones y desarrollo en la industria nacional*. Lima- Peru: Universidad nacional Mayor de San Marcos.

Castro, J., & Fajardo Cristian. (2014). Obtencion y caracterizacion de compuesto de polipropileno reforzado con nanoarcillas mediante extrusion e inyección. Quito: EPN.

Insausti Bello, A. (2007). *Estabilidad global de elementos estructurales de polímero reforzado con fribra de vidrio*. Donostia: Universidad de Navarra.

Sahuquillo Navarro, O. (2012). *Estudio de la degradación de materiales compuestos base poliéster reforzados con fibra de vidrio en medios neutros y alcalinos*. Valencia: Tesis doctoral - UPV.

### **Catálogo**

Resina Isoftálica (21 de 05 de 2017).

Schneider. (s.f.). Obtenido de [https://issuu.com/schneidermx/docs/compendiado\\_33\\_2013/106](https://issuu.com/schneidermx/docs/compendiado_33_2013/106)

TRACCIÓN, A. (2010). *Norma de ensayo de tracción para materiales compuestos*. ATSM.

FLEXIÓN, ASTM (2010). Norma de ensayo de flexión para materiales compuestos.

Termokew. (2008). *Termokew XMTG - 808*. México: México.

### **Páginas web**

alibaba. (s.f.). <<http://spanish.alibaba.com/product-gs-img/montado-spray-hasta-itinerante-de-fibra-de-vidrio-extremo-multi-pistola-itinerante-1371399750.html>>. Obtenido de <<http://spanish.alibaba.com/product-gs-img/montado-spray-hasta-itinerante-de-fibra-de-vidrio-extremo-multi-pistola-itinerante-1371399750.html>>: <<http://spanish.alibaba.com/product-gs-img/montado-spray-hasta-itinerante-de-fibra-de-vidrio-extremo-multi-pistola-itinerante-1371399750.html>>

ALIBABA. (s.f.). *Alibaba*. Obtenido de Alibaba: <https://spanish.alibaba.com/g/frp-die.html>

CPicfiber. (2016). *CPicfiber*. Recuperado el 1 de 10 de 2016, de CPicfiber: <http://www.cpicfiber.com/>

CPicfiber. (1 de 10 de 2016). *CPicfiber*. Recuperado el 1 de 10 de 2016, de CPicfiber: <http://www.cpicfiber.com/fhcl/chanpinzhantai/chanpinmingxi/2016/0216/180.html>

diytrade. (2016). *Diytrade*. Recuperado el 20 de 05 de 2016, de diytrade: [http://www.diytrade.com/china/pd/9845992/Fiberglass\\_Woven\\_Roving.html](http://www.diytrade.com/china/pd/9845992/Fiberglass_Woven_Roving.html)

Ehowenespanol. (2016). *ehowenespanol*. Recuperado el 15 de marzo de 2016, de [http://www.ehowenespanol.com/fibra-vidrio-densidad-resistencia-info\\_209045/](http://www.ehowenespanol.com/fibra-vidrio-densidad-resistencia-info_209045/)

Google, B. (s.f.). Obtenido de [https://www.google.com.ec/search?q=selectores+3+posiciones+siemens&biw=1366&bih=667&source=Inms&tbm=isch&tbs=qdr:w&sa=X&ved=0ahUKEwi9-bm4\\_JjOAhUGHR4KHUgsAKcQ\\_AUIBigB#tbn=isch&q=luz+indicador+verde+h1+&imgc=ECqStC7aXCDxZM%3a](https://www.google.com.ec/search?q=selectores+3+posiciones+siemens&biw=1366&bih=667&source=Inms&tbm=isch&tbs=qdr:w&sa=X&ved=0ahUKEwi9-bm4_JjOAhUGHR4KHUgsAKcQ_AUIBigB#tbn=isch&q=luz+indicador+verde+h1+&imgc=ECqStC7aXCDxZM%3a)

hbswjyfrp. (s.f.). *hbswjyfrp*. Recuperado el 18 de 05 de 2016, de hbswjyfrp: <http://hbswjyfrp.en.made-in-china.com/product/ZSdECQAVnmrw/China-Fiberglass-Chopped-Strand-Mat-for-Pultrusión-Process.html>

Ingemecánica. (2016). *Ingemecánica*. Recuperado el 2016, de Ingeniería, Consultoría y Formación: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html#seccion34>

International, A. (s.f.). <http://www.astm.org/>.

ladrilleraautomatizadablog. (s.f.). Obtenido de <https://ladrilleraautomatizadablog.wordpress.com/category/uncategorized/>

lybrary, S. p. (2011). Science photo lybrary. *Science photo lybrary*.

plasticos, T. d. (julio de 2011). Obtenido de <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/pultrusión.html>

plasticos, T. d. (11 de julio de 2011). *Tecnología de plasticos*. Recuperado el 01 de diciembre de 2015, de Tecnología de plasticos: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/materiales-compuestos.html>

Poliformas. (s.f.). *www.poliformas.mx*. Obtenido de Poliformas y suministros: <http://www.poliformas.mx/Queretaro/>

Stanleyworks. (s.f.). Obtenido de <http://www.stanleyworks.es/>

Svshydraulics. (s.f.). Obtenido de <http://www.svshydraulics.com/>

Unicomposite. (s.f.). Obtenido de <http://www.unicomposite.com/products/pultrusión-machine.html>

Wikipedia. (2016). *Wikipedia*. Recuperado el 2016 de marzo de 15, de [http://es.wikipedia.org/wiki/Fibra\\_de\\_vidrio](http://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_de_vidrio)

www.sciencephoto.com. (Noviembre de 2011). *Science Photo Library*. Recuperado el 2011, de [http://www.sciencephoto.com/image/10002/530wm/A8500256-Reinforced\\_plastic,\\_SEM-SPL.jpg](http://www.sciencephoto.com/image/10002/530wm/A8500256-Reinforced_plastic,_SEM-SPL.jpg)

youtube. (s.f.). Obtenido de [www.youtube.com/watch?v=1sH9rlGWNvc](http://www.youtube.com/watch?v=1sH9rlGWNvc)