

REDISEÑO DE UNA MÁQUINA DE PULTRUSIÓN PARA MATERIALES COMPUESTOS
TERMOESTABLES

PEDRO ANTONIO BELTRÁN ACOSTA
JUAN FELIPE PARRA SÁNCHEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DIVISION DE INGENIERIAS
BOGOTÁ D.C.
2014

REDISEÑO DE UNA MÁQUINA DE PULTRUSIÓN PARA MATERIALES COMPUESTOS
TERMOESTABLES

PEDRO ANTONIO BELTRÁN ACOSTA
JUAN FELIPE PARRA SÁNCHEZ

Trabajo de grado en la modalidad de solución a un problema de ingeniería mecánica

Director:
Ricardo Alberto Forero Rubiano
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DIVISION DE INGENIERIAS
BOGOTÁ D.C.
2014

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá (11/12/2014)

Dedicatoria

“Esta meta la dedico a mi Madre, a mis hermanas, mis sobrinos y mi cuñado ya que sin ellos no lo hubiera logrado alcanzar, son el motor que diariamente me impulsan a seguir y conquistar los objetivos cada día.

Al Ingeniero Ricardo Forero que fue la persona que nos guio por cada paso desde que emprendimos este camino, quien nos impartió su sabiduría y sus consejos.

A mi gran amigo del alma Juan Felipe Parra co-autor de esta tesis con quien después de arduo trabajo en el camino del saber superando innumerables retos, logramos llegar a cumplir este logro. También a toda su familia quienes siempre fueron un apoyo y un pilar en esta larga travesía.

Y por último a DIOS quien me permite vivir cada día para demostrar de lo que soy capaz. ”

Pedro Antonio Beltrán Acosta

Este gran logro va dedicado a mis padres quienes siempre me apoyaron en todo momento, a mis hermanos, a mi hermosa novia y a todos aquellos que siempre me apoyaron en todo el trascurso de esta gran labor.

A mi novia Alba Silva quien siempre me colaboro en todo momento sin importar la situación siempre me apoyo a salir adelante con mucho amor y responsabilidad hacia mis labores.

Al Ingeniero Ricardo Forero por la confianza que me brindo durante el trascurso 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 hermano de trabajo Pedro Beltrán por toda su dedicación, comprensión, trabajo y apoyo para finalizar este trabajo con mucho éxito, también a la familia Beltrán Acosta por su gran apoyo durante el trascurso de esta gran labor.

Juan Felipe Parra Sánchez

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	19
INTRODUCCIÓN.....	20
1. OBJETIVOS.....	21
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
2. MARCO REFERENCIAL.....	22
2.1 MARCO ESTADO ACTUAL.....	22
2.1.1 Sector plástico a nivel mundial	22
2.1.2 Sector plástico a nivel nacional	24
2.1.3 Pultrusión a nivel internacional	24
2.1.4 Pultrusión en Colombia	25
2.2 MARCO CIENTÍFICO	29
2.2.1 Otras investigaciones sobre pultrusión	29
2.3 MARCO CONCEPTUAL.....	30
2.3.1 Polímeros	30
2.3.2 Reacción de polimerización.....	31
2.3.3 Tipos de polimerización.....	31
2.3.4 Materiales compuestos.....	32
2.3.5 Materiales compuestos del proceso de pultrusión	35
2.3.6 Pultrusión	46
2.3.7 Usos del proceso de pultrusión	47
2.3.8 Diseño de piezas para el proceso de pultrusión	48

2.3.9	Elementos proceso de pultrusión.....	48
2.3.10	Producción de perfiles pultruidos.....	52
2.3.11	Ventajas e inconvenientes del proceso de pultrusión	53
2.3.12	Retos de pultrusión	57
2.3.13	Normativa.....	61
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	64
3.1	DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN CALIDAD	64
3.1.1	Identificación de clientes	64
3.1.2	Determinar las necesidades de los clientes.....	64
3.1.3	Importancia relativa de cada requerimiento	66
3.1.4	Identificar y evaluar la competencia.....	67
3.1.5	Especificaciones de ingeniería	74
3.1.6	Relación de los requisitos del cliente con las especificaciones de ingeniería	74
4.	GENERACIÓN DE CONCEPTOS.....	78
4.1	SUBSISTEMA 1: ALMACÉN DE FIBRA	79
4.2	SUBSISTEMA 2: PRE MOLDEO	81
4.3	SUBSISTEMA 3: RESERVORIO E IMPREGNACIÓN	83
4.4	SUBSISTEMA 4: DADO	85
4.5	SUBSISTEMA 5: DISPOSITIVO DE TIRO.....	86
4.6	SUBSISTEMA 6: CORTE Y ALMACENAMIENTO.....	88
4.7	SISTEMA DE PULTRUSIÓN ELEGIDO	92
5.	DISEÑO DETALLADO	94
5.1	DOSIFICACIÓN DE LA FIBRA	94
5.2	MUEBLE SOPORTE BOBINAS ROVING.....	97

5.3	RESERVORIO Y SISTEMA DE IMPREGNACIÓN	104
5.4	DADO, MOLDE Y SISTEMA DE CALEFACCIÓN.....	107
5.4.1	Transferencia de calor en el molde.....	111
5.4.2	Sistema de protección termo – aislante.....	116
5.4.3	Ejes de deslizamiento.....	116
5.5	SISTEMA DE HALADO	120
5.6	SISTEMA DE CORTE	123
5.7	SOLDADURA	126
5.7.1	Mueble soporte bobinas roving.....	126
5.7.2	Reservorio para la resina	131
5.8	UNIÓN DE SISTEMAS	134
5.8.1	Selección de anclaje de los sub-sistemas	134
5.8.2	Selección de unión al molde de la guía interna.....	135
5.8.3	Sujeción de carcazas de moldes	136
6.	IMPACTO AMBIENTAL.....	139
6.1	MATRIZ LEOPOLD	139
6.1.1	Paso 1.....	139
6.1.2	Paso 2.....	139
6.1.3	Paso 3.....	139
7.	ESTUDIO FINANCIERO	143
7.1	CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA.....	143
7.2	MANO DE OBRA DE LA MÁQUINA PULTRUSORA.....	144
7.3	COSTO TOTAL DE LA MÁQUINA PULTRUSORA.....	145
8.	PLANOS DE FABRICACIÓN	146

CONCLUSIONES.....	147
BIBLIOGRAFÍA.....	148

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Producción mundial de plásticos 2013 por zona geográfica.....	23
Figura 2. Producción mundial de plásticos 2013 por tipo de polímeros.....	23
Figura 3. Importaciones y exportaciones nacionales (FOB millones de dólares).....	27
Figura 4. Distribución de átomos de los polímeros.....	30
Figura 5. Polimerización del estireno en poli estireno	31
Figura 6. Fibra de Vidrio	32
Figura 7. Clasificación de los materiales compuestos reforzados por fibras.....	34
Figura 8. Materiales compuestos reforzados con fibras	35
Figura 9. Molécula de melanina	36
Figura 10. Moléculas resina poliéster.....	37
Figura 11. Moléculas resina fenólica.....	37
Figura 12. Moléculas resina Epoxi	38
Figura 13. Tipos de tejido	41
Figura 14. Mat en fibra de vidrio	42
Figura 15. Fibra Roving	43
Figura 16. Tela biaxial y multiaxial	43
Figura 17. Composición de un perfil.....	44
Figura 18. Proceso de pultrusión	46
Figura 19. Entrada de materia prima.....	49
Figura 20. Fibras impregnadas	49
Figura 21. Pre moldeo	50
Figura 22. Dado de pultrusión.....	50
Figura 23. Método de jalado del perfil pultruidos.....	51
Figura 24. Sistema de corte por sierra mecánica	52
Figura 25. Tipos de perfiles pultruidos	52

Figura 26. Prueba mecánica sobre perfil de pultrusión.	54
Figura 27. Propiedades de PRFV	55
Figura 28. Fibras Naturales de refuerzo: A) Hilo de cañamo, B) Matt tejido C) Yute-lino.	59
Figura 29. Perfiles curvos obtenidos mediante radio-pult.....	60
Figura 30. Molde en pendiente (con un ángulo) en la línea de pultrusión	60
Figura 31. Máquina de pultrusión DETEP-MA0306TL.....	67
Figura 32. Características de la máquina MPI7.....	70
Figura 33. Disposición de la máquina MPI7, fabricada por Machine Product Inc.	70
Figura 34. Máquina de pultrusión MPI 7.....	71
Figura 35. Casa de calidad QFD.....	77
Figura 36. Descomposición funcional	78
Figura 37. Sistema de almacenamiento y suministro vertical.....	79
Figura 38. Sistema de almacenamiento y suministro horizontal.....	80
Figura 39. Pre moldeo con guías a lo largo de su sección transversal.....	81
Figura 40. Pre moldeo cónico	82
Figura 41. Pre moldeo con ranuras combinadas.....	82
Figura 42. Esquema de un sistema de inyección de PU en una máquina de pultrusión ...	83
Figura 43. Impregnación por rodillos guías	84
Figura 44. Sistema de impregnación con bomba re circulante	84
Figura 45. Dado de pultrusión opción 1	85
Figura 46. Dado de pultrusión opción 2.....	86
Figura 47. Sistema de tiro por carros reciprocantes	87
Figura 48. Halador doble oruga modelo JDO-150.....	88
Figura 49. Pulidora en banco.....	90
Figura 50. Sierra circular ang comb de 12"	91
Figura 51. Sierra eléctrica para corte Portátil UE-712A.....	91
Figura 52. Perfil platina redonda	94

Figura 53. Perfil platina	94
Figura 54. Producto disponible de Roving P207	96
Figura 55. Mueble bobinas Roving.....	97
Figura 56. Cortante, momento y deflexión de vigas con apoyos simples: cargas idénticas.	98
Figura 57. Diagrama de cuerpo libre, cortante, momento de viga.	100
Figura 58. Diagrama de cuerpo libre, ángulo y deflexión máxima.	101
Figura 59. Tabla soporte bobinas	101
Figura 60. Tabla soporte superior	102
Figura 61. Propiedades de ángulos de acero estructural.	102
Figura 62. Mueble soporte bobinas roving	103
Figura 63. Resultados simulación por tensión.....	104
Figura 64. Reservorio para resina.....	105
Figura 65. Simulación paso de fibra.....	105
Figura 66. Curva de curado	110
Figura 67. Resistencias tipo abrazadera	114
Figura 68. Resistencia eléctrica tipo abrazadera.....	115
Figura 69. Temperatura de gelación	115
Figura 70. Recubrimiento en un tubo.	116
Figura 71. Características técnicas de la tela de asbesto	116
Figura 72. Ejes de deslizamiento en el conjunto	117
Figura 73. Eje de deslizamiento.....	117
Figura 74. Resultado simulación del eje.....	120
Figura 75. Fuerza de tracción Vs velocidad de tracción	122
Figura 76. Halador doble banda modelo belt pullers 320	123
Figura 77. Sistema de corte CTD Modelo M25R.....	125
Figura 78. Soldadura en el mueble soporte de bobinas roving.....	126
Figura 79. Propiedades mecánicas típicas del metal depositado	127

Figura 80. Propiedades torsionales de las soldaduras de filete.....	128
Figura 81. Cargas constantes permisibles y tamaños mínimos de soldadura de filete ...	128
Figura 82. Soldaduras en reservorio	131
Figura 83. Cargas de soldadura sobre paredes	132
Figura 84. Resultados de simulación de cálculo de soldaduras de empalme sobre las paredes	132
Figura 85. Cargas de soldadura sobre ejes	133
Figura 86. Resultados de simulación de cálculo de soldaduras de empalme posicionamiento de ejes	133
Figura 87. Chazo de manga.....	134
Figura 88. Sistema de unión al molde de la guía interna.....	135
Figura 89. Tornillo hexagonal grado 8.....	135
Figura 90. Sujeción por tornillo	137

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Participación por producto en el comercio mundial de plásticos desde el año 2007.	22
Tabla 2. Crecimiento de la industria plástica.....	25
Tabla 3. Catálogo de productos de Perfiglass Ltda.	28
Tabla 4. Usos y mercado de la pultrusión	47
Tabla 5. Propiedades mecánicas.....	54
Tabla 6. Propiedades Eléctricas Y Térmicas.....	55
Tabla 7. Propiedades en el tiempo.....	56
Tabla 8. Resistencia Química	56
Tabla 9. Normas aplicables en España.....	61
Tabla 10. Normas técnicas ASTM.....	61
Tabla 11. Requerimiento de Cliente.....	65
Tabla 12. Ponderación de los requerimientos	67
Tabla 13. Máquina de pultrusión Pulforce 0804-5000	68
Tabla 14. Análisis de competencia.....	72
Tabla 15. Especificaciones de Ingeniería.....	73
Tabla 16. Relación de los requisitos del cliente con las especificaciones de ingeniería ...	75
Tabla 17. Matriz de ponderación del subsistema 1: Mueble.....	80
Tabla 18. Matriz de ponderación del subsistema 2: Pre Moldeo	82
Tabla 19. Matriz de ponderación del subsistema 3: Reservorio E Impregnación.....	85
Tabla 20. Datos técnicos halador doble oruga modelo JDO-150	87
Tabla 21. Matriz de ponderación del subsistema 5: Dispositivo De Tiro.....	88
Tabla 22. Datos técnicos de la pulidora	89
Tabla 23. Datos técnicos soporte.....	89

Tabla 24. Matriz de ponderación del subsistema 6: Corte Y Almacenamiento	92
Tabla 25. Elección de subsistemas para una máquina de pultrusión.	93
Tabla 26. Propiedades técnicas resina PALATAL CO P4	95
Tabla 27. Simulación por tensión	103
Tabla 28. Moldeo fuerza de presión.....	107
Tabla 29. Componentes del dado de pultrusión	108
Tabla 30. Datos del comportamiento de curado de la fibra	111
Tabla 31. Diagramas de cuerpo libre del eje	119
Tabla 32. Simulación del eje	119
Tabla 33. Informe de cordón de soldadura mueble bobinas Roving	127
Tabla 34. Resultados de simulación de cálculo de soldaduras de empalme	130
Tabla 35. Informe de cordón de soldadura reservorio	132
Tabla 36. Simulación y resultados perno guía	136
Tabla 37. Simulación y resultados perno dado.....	137
Tabla 38. Calificación y grado de importancia.....	139
Tabla 39. Matriz Leopold	140
Tabla 40. Leyes del ministerio ambiente	141
Tabla 41. Impacto Ambiental	142
Tabla 42. Lista de precios de materiales.....	143
Tabla 43. Lista de precios de manufactura por pieza	144

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Calculo de peso relativo	71
Ecuación 2. Área circular	94
Ecuación 3. Área rectangular.....	94
Ecuación 4. Volumen según perfil.....	95
Ecuación 5. Calculo de masa de los perfiles.....	96
Ecuación 6. Masa correspondiente a las bobinas Roving	96
Ecuación 7. Cantidad bobinas de roving necesarias	97
Ecuación 8. Segundo momento de área con respecto al eje x.....	99
Ecuación 9. Segundo momento de área con respecto al eje y.....	99
Ecuación 10. Deflexión máxima para vigas de apoyos simples: cargas idénticas.	100
Ecuación 11. Esfuerzo normal	102
Ecuación 12. Volumen Resina	105
Ecuación 13. Volumen de la resina.....	105
Ecuación 14. Volumen efectivo de la resina.....	106
Ecuación 15. Longitud de material	106
Ecuación 16. Presión de un fluido.....	106
Ecuación 17. Conducción térmica.....	111
Ecuación 18. Resistencia por conducción.....	111
Ecuación 19. Convección	111
Ecuación 20. Resistencia conducción.....	112
Ecuación 21. Calentamiento molde.....	112
Ecuación 22. Transformación energía:	113
Ecuación 23. Balance de calor.....	113
Ecuación 24. Área de resistencia.....	114
Ecuación 25. Potencia usada [Watts].....	114

Ecuación 26. Peso carcasas.....	118
Ecuación 27. Peso moldes	118
Ecuación 28. Peso guía diámetro interno.....	118
Ecuación 29. Peso Total.....	118
Ecuación 30. Fuerza ejercida en cada eje	118
Ecuación 31. Momento flector.....	118
Ecuación 32. Volumen de sección del curado.....	120
Ecuación 33. Masa de la zona de curado	121
Ecuación 34. Peso de la sección	121
Ecuación 35. Calculo de fuerza de rozamiento	121
Ecuación 36. Calculo de potencia	121
Ecuación 37. Potencia teórica.....	122
Ecuación 38. Calcular número de dientes.....	123
Ecuación 39. Revoluciones de la sierra	123
Ecuación 40. Tiempo de corte para la sección transversal	124
Ecuación 41. Resistencia máxima a la tracción de la resina	124
Ecuación 42. Esfuerzo admisible a corte de la resina	124
Ecuación 43. Área de corte de la superficie de contacto de la sierra	124
Ecuación 44. Fuerza ejercida.....	124
Ecuación 45. Momento torsor	125
Ecuación 46. Potencia de operación.....	125
Ecuación 48. Distancia de avance	125
Ecuación 49. Área de la garganta	128
Ecuación 50. Resistencia del metal de aporte.....	129
Ecuación 51. Esfuerzo cortante permisible en la unión adyacente a la soldadura.....	129
Ecuación 52. Esfuerzo cortante en el metal base adyacente a la soldadura	129
Ecuación 53. Esfuerzo normal para cargas de tensión o compresión	130

Ecuación 54. Esfuerzo de tensión permisible..... 130
Ecuación 55. Momento generado 134
Ecuación 56. Esfuerzo de corte 134

ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS RESINA PALATAL CO P4	151
ANEXO B. FICHA TÉCNICA DE BOVINA ROVING P207 (2200)	152
ANEXO C. MANUALES.....	153
ANEXO D. SOLDADURA ACERO AL CARBON E6013	154
ANEXO E. SOLDADURA ACERO INOXIDABLE	155
ANEXO F. FICHA TÉCNICA DE ACERO 1-2738 PARA MOLDES	156
ANEXO G PLANOS DE FABRICACIÓN Y ENSAMBLE DE LA MÁQUINA PULTRUSORA	157
ANEXO H. AISLAMIENTO TÉRMICO	158

RESUMEN

El presente proyecto consistió en el diseño de una máquina de pultrusión con destino didáctico para los laboratorios de la Universidad Santo Tomás que elaborare principalmente dos clases de perfiles: de sección redondo de 12,7 mm [0,5 in] de diámetro y perfil de platina de 25,4 mm [1 in] de ancho por 5 mm de alto, en material compuesto en proporción de peso de 30% en resina Palatal CO40 y 70% en refuerzo en fibra de vidrio, abordando los temas básicos de la Ingeniería Mecánica desde la formulación de una propuesta hasta el diseño detallado del equipo comprobando mediante software de simulación las memorias de cálculos. Además se dio una visión sobre este proceso que es poco conocido a nivel nacional, pero que trae muchas ventajas en estructura de las piezas compuestas. Por último se realizó el estudio financiero de la máquina donde se comprueba que la fabricación a nivel nacional es más rentable versus la compra importada de un equipo de esta magnitud.

Palabras Claves: Materiales termoestables, perfilería, pultrusión, Materiales Compuestos, sistema de halado, resinas, fibra de vidrio.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de grado consiste en realizar un estudio del proceso de manufactura por pultrusión, a partir de la aplicación de materiales compuestos y principalmente los denominados PMC (polymer matrix composites – “compuesto de matriz polimérica) (1), ya que es un proceso técnico industrial que permite conformar elementos mecánicos como son perfiles que cuentan con propiedades y características elevadas para aplicaciones como vigas y columnas a costos admisibles. Este estudio dará los fundamentos necesarios para obtener el diseño más adecuado para una máquina que extraiga dos clases de perfiles: de sección redondo de 12,7 mm [0,5 in] de diámetro y perfil de platina de 25,4 mm [1 in] de ancho por 5 mm de alto, en material compuesto en proporción de peso de 30% en resina Palatal CO40 y 70% en refuerzo en fibra de vidrio.

Dicho proceso como sus productos no están muy difundidos en el país, debido al concepto tradicionalista del sector de construcción y por la falta de empresas que trabajen el proceso de pultrusión y la elaboración de materiales compuestos a partir de la fibra de vidrio de forma técnica y responsable. El sector de materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio se ha caracterizado por su bajo concepto técnico en la elaboración de piezas y productos gracias también a que no se cuentan con el soporte o la capacitación técnica oportuna.

De este modo, el origen principal de la problemática que se pretende abordar parte de la necesidad del sector industrial de contar con estudios suficientes para implementar maquinaria para la fabricación de piezas que tengan excelente propiedades, como por ejemplo: ser livianos, con buena resistencia mecánica, alta resistencia química, buen comportamiento ante al calor, alta resistencia a la fatiga, una excelente estabilidad dimensional y que permita reducir el número de componentes y elementos de unión, en la fabricación de piezas que conforman diferentes estructuras, máquinas y productos; por esto se ha buscado rediseñar una máquina de pultrusión con fines de laboratorio que sirva para generar los conocimientos necesarios que den bases confiables para la fabricación de productos pultruidos.

En términos generales, los perfiles estructurales se podrían fabricar a partir de diferentes procesos de transformación de materiales compuestos, sin embargo, las ventajas del pre-tensionado de la fibra durante el proceso de pultrusión garantiza una mejor resistencia mecánica a tensión, además de la producción de forma continua del perfil haciendo de este proceso el más ideal para la elaboración de este tipo de productos.

El alcance del proyecto es que permita que al término de esta investigación se tengan la suficiente información para la construcción de la máquina y la aplicación del proceso.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una máquina de pultrusión de materiales compuestos de Resina Poliéster/Fibra Vidrio para fabricar perfil redondo de 12,5 mm [0,5 in] de diámetro y platina de 25,4 mm [1 in] de ancho por 5 mm de alto.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Establecer las características del proceso de pultrusión y del curado de los materiales compuestos matriz polímero termoestable "MCMP" y sus aplicaciones.
2. Identificar y establecer los requisitos empresariales necesarios para el diseño de la máquina.
3. Elaborar el diseño conceptual de la máquina, evaluando las diferentes alternativas.
4. Realizar el diseño detallado y estandarización de la máquina.
5. Elaboración de los manuales de montaje, operación, mantenimiento, seguridad y riesgo profesional.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 MARCO ESTADO ACTUAL

2.1.1 Sector plástico a nivel mundial

El sector de plásticos y manufactura es uno de los sectores que ha presentado mayor incremento a nivel mundial al largo de los años, esto debido principalmente a que por medio de este material se pueden lograr múltiples artículos de uso cotidiano con grandes ventajas como por ejemplo su precio de construcción es relativamente muy bajo lo que redundaría en beneficios hacia los consumidores finales. Un estudio revelado por PLASTIC EUROPE¹ (2) muestra que este material se ha venido desarrollando por más o menos 100 años, de los cuales el mayor crecimiento lo ha tenido en los últimos 64 años ya que según los registros en el año 1950 se producía tan solo 1,5 millones de toneladas de plástico, mientras que hoy en día se llega a los 250 millones de toneladas; esto representa aproximadamente el 5% del consumo petrolífero global.

Los principales productores a lo largo del globo terráqueo son China que tiene más del 30% de la producción global, lo siguen Estados Unidos, Canadá y México que juntos concentran el 23% de la producción, y otros que se encuentran un poco más abajo pero con igual importancia son países como: Alemania, Japón, Brasil e India, entre otros.

Para entender mejor los datos antes mencionados se debe analizar la evolución del comercio mundial de plásticos que se ha venido dando desde el año 2007 hasta el año 2013, dividiéndolo en tres grupos principales así:

Tabla 1. Participación por producto en el comercio mundial de plásticos desde el año 2007.

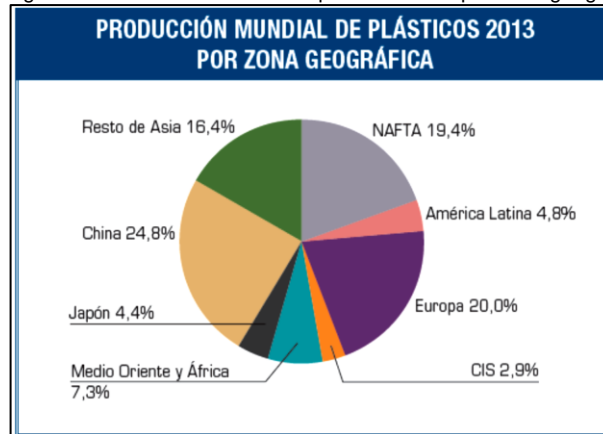
Agregados	Producto	Comercio mundial (millones de euros [€])	% Comercio	Crecimiento desde el 2007 hasta el 2013
Formas Primarias	Partidas 3901-3914 Polímeros de etileno, polímeros de propileno, polímeros de estireno, polímeros de cloruro de vinilo o de otras olefinas halogenadas, polímeros de acetato de vinilo, polímeros acrílicos, poli acetales, entre otros.	172,92	51,5%	21,3%
Manufacturas	Partidas 3916-3926 Monofilamentos, varillas y perfiles de plástico; tubos y accesorios para tubería; revestimientos para suelo, paredes o techos; placas, láminas, hojas, cintas, tiras y demás formas planas autoadhesivas; artículos sanitarios; artículos para el transporte o envasado; vajilla; artículos para la higiene; artículos para la construcción, entre otros.	159,16	47,4%	16,0%
Desechos, desperdicios y recortes	Partida 3915	3,44	1%	33,3%

Fuente: International Trade Statistics Database [En línea]. Disponible en: <<http://comtrade.un.org>>

1 Plastic Europe es una de las principales asociaciones comerciales de plástico, conformado por más de 100 empresas europeas que representan más del 90% de la producción de plásticos.

Ya en el año 2013, la misma asociación dio a conocer en su publicación de mayo de este año, donde asegura que este sector repunto en un 3,9% llegando a una producción de plásticos a nivel mundial de 299 millones de toneladas, se estima que este es un incremento modesto debido a las crisis económicas de los últimos años que ha hecho que países como China y Estados Unidos tengan una ganancia en relación al reparto geográfico de la producción mundial y en cambio Europa haya tenido pérdidas desde mediados del 2010. En la Figura 1 se observa la estratificación global para la producción de plásticos a 2013.

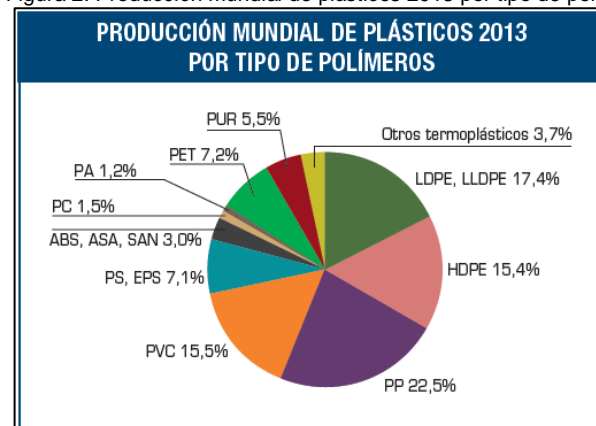
Figura 1. Producción mundial de plásticos 2013 por zona geográfica



Fuente: PlasticsEurope.

En este sentido también se observa el reparto de la producción mundial de plásticos por el tipo de polímero, viéndose para el año 2013 que el más producido era la familia de polietileno con un 32,8% como se observa en la Figura 2.

Figura 2. Producción mundial de plásticos 2013 por tipo de polímeros



Fuente: PlasticsEurope.

2.1.2 Sector plástico a nivel nacional

Debido a todo el crecimiento mundial, Colombia no podía quedarse a la vanguardia, a pesar de no ser un referente en este tema, ya se han comenzado a utilizar con más regularidad estos materiales. En sus diferentes formas logrando así un crecimiento en el 2011 del 7,8% y en el 2012 de un 5%, esto por la desaceleración de la industria y la tasa de cambio², también debido a que han aumentado las importaciones principalmente desde China, Ecuador y Perú, en presuntas condiciones desiguales de competencia, originadas por el bajo costo del dólar que facilita la compra de productos en el exterior y castiga a las exportaciones. En el 2013 se presentó caídas preocupantes del 0,2%, dejando cifras negativas en la Muestra Mensual de Manufactura (MMM)³ que es la encargada de identificar los cambios que se presentan mensualmente en el sector manufacturero, medidos a través del comportamiento de los índices de empleo, salarios, horas trabajadas, producción y ventas, en las diferentes clases de actividad industrial, la principal afectación para estas cifras es la entrada de importaciones una de manera legal y otra de manera ilegal a muy bajo costo.

El sector de plásticos procesa anualmente 980.000 toneladas de resinas, de las cuales la mitad son de origen nacional. Acoplásticos agrupa a 600 empresas de los sectores del plástico, químicos, petroquímicos, pinturas, tintas, caucho y fibras y, según el DANE, generan 40.000 empleos directos.

2.1.3 Pultrusión a nivel internacional

A nivel internacional la pultrusión ha logrado ubicarse en un buen puesto en la producción de plásticos, y se encuentran varias empresas que lo fabrican, lo comercializan y lo importan al resto del mundo donde este proceso aún no se ejecuta, dichas empresas como:

- ✓ FYPRE S.A. (FIBRAS Y PLASTICOS REFORZADOS): Esta empresa con ubicación en (México D.F).
- ✓ ARIES PULTRUSIÓN S.L: Empresa ubicada en Leioa Vizcaya (España).
- ✓ NIOGLAS S.L: Empresa ubicada en Barcelona. (España).
- ✓ TECNIPUL Composites: Empresa ubicada en Els Prats de Rei (España).
- ✓ Ashirvad Canarias Sociedad Limitada: Ubicada en Antigua, (Las palmas, Canarias)
- ✓ FALCON PULTRUSIÓN PRODUCTS: Empresa ubicada en Okanagan Valley of British Columbia (Canadá).
- ✓ FIBROLUX: Empresa ubicada en Frankfurt (Alemania).
- ✓ RESPLA LTDA: Empresa ubicada en Santiago (Chile).
- ✓ DCP PULTRUSIÓN: Empresa ubicada en Creil (Francia).
- ✓ EPOLYGLAS, S.A. de C.V.: Empresa ubicada en Anáhuac (México).
- ✓ ARIES PULTRUSION SL: Empresa ubicada en CANTABRIA (España).

² Datos tomados de Asociación Colombiana de Industrias Plásticas (Acoplásticos). [En línea]. Disponible en: <http://www.acoplásticos.org/index.php/component/content/article?id=2066>

³ [En línea]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/industria/muestra-mensual-manufacturera-mmm>

Estas son algunas de las empresas más representativas del mercado mundial que fabrican perfiles normal y especializada, para varias aplicaciones. En sus páginas web, se puede observar los diferentes tipos de resinas termoestables y demás materias primas que utilizan. Es así que el reparto mundial de la pultrusión se distribuye en: Estados Unidos con el 47% de los perfiles pultruidos, le sigue Europa alcanzando el 28% distribuyéndolo entre sus potencias así: Alemania (28%), Italia (18%), Francia (15%), España (8%), Reino Unido (8%), Holanda (7%), Asia con el 23% y por último se encuentra al conglomerado de Sur América con el 2% de la producción mundial, según la asociación de manufactura plástica PLASTICSEUROPE⁴ (3).

2.1.4 Pultrusión en Colombia

Mediante la búsqueda y la investigación de información, que se realizó para la caracterización del sector industrial del plástico, se encontró, que en Colombia el proceso de pultrusión es una actividad industrial que hasta el momento es casi desconocida y muestra de este hecho es que en Bogotá solo se reporta una empresa fabricante de productos por este proceso y según ellos mismos únicos en el país.⁵ Incluso se puede reseñar que la empresa Perfiglass lleva tan solo 5 años en el mercado y esta apenas en proceso de afianzar mercado en el campo de los perfiles pultruidos.

El código CIIU (Clasificación Industrial Internacional Uniforme, dada por las Naciones Unidas) que contiene, la producción de perfiles estructurales, a partir, del proceso de pultrusión, es el 2529, que lleva como título el nombre de “Fabricación de Artículos de Plástico NCP (No Clasificado Previamente)”, con el cual, se recopilaban diferentes datos estadísticos referentes a la situación de la industria plástica en los últimos 5 años en Colombia, donde, se puede observar en la Tabla 2 el crecimiento industrial de la producción de productos plásticos fue del 5.89% del 2006 al 2007, 9.34% del 2007 al 2008 y un déficit del 1.7% entre el periodo del 2008 al 2009⁶.

Tabla 2. Crecimiento de la industria plástica.

AÑO	DESCRIPCIÓN	NÚMERO DE ESTABLECIMIENTOS	TOTAL PERSONAL OCUPADO	PRODUCCIÓN BRUTA [\$]	TOTAL ACTIVOS [\$]	ENERGÍA ELÉCTRICA CONSUMIDA [KwH]
2006	Fabricación de productos de plástico	379	29.156	3.209.961.274	1.830.520.572	570.926.862
2007	Fabricación de productos de plástico	371	31.322	3.411.221.624	1.947.731.234	589.806.949

⁴ Datos tomados de la revista #38 del segundo trimestre 2014 de MundoPLast

⁵ Ing. Beltrán, Alfredo. Perfiglass Ltda. Bogotá. Colombia. observación inédita, 2014.

⁶ [En línea]: http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=96&Itemid=59

Tabla 1. (Continuación)

AÑO	DESCRIPCIÓN	NÚMERO DE ESTABLECIMIENTOS	TOTAL PERSONAL OCUPADO	PRODUCCIÓN BRUTA [\$]	TOTAL ACTIVOS [\$]	ENERGÍA ELÉCTRICA CONSUMIDA [Kwh]
2008	Fabricación de productos de plástico	414	31.851	3.763.030.675	2.024.048.856	649.545.230
2009	Fabricación de productos de plástico	487	32.864	3.700.063.954	2.217.771.539	650.723.310
2010	Fabricación de productos de plástico	528	34.958	4.105.350.691	2.655.013.860	724.435.863
2011	Fabricación de productos de plástico	650	35.203	4.201.120.004	2.972.765.098	754.540.846

Fuente: Clasificación Industrial Internacional Uniforme, dada por las Naciones Unidas

Los datos del año 2013 el DANE aún no los ha registrado, ya que, la encuesta anual manufacturera que el DANE realiza conlleva un alto análisis. Al revisar la producción de perfiles plásticos pultruidos en Colombia según el DANE y la empresa Perfiglass Ltda., se observa que en Colombia se importa este tipo de producto ya que el país no cuenta hoy en día con una industria avanzada en la producción de perfilera de plástico con materiales compuestos⁷.

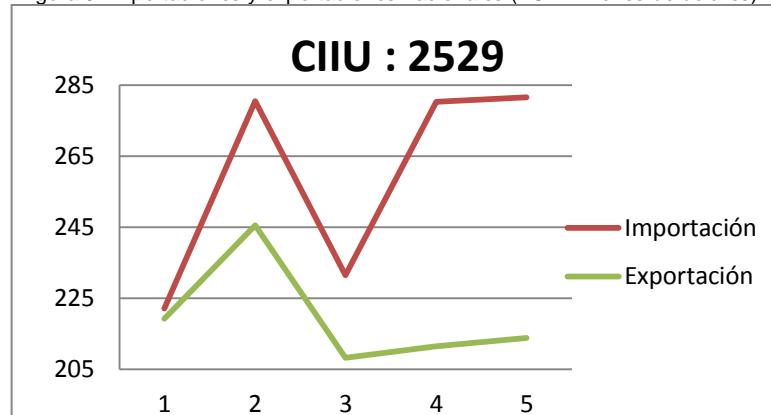
Al investigar en Acoplasticos (Asociación Colombiana de Industrias Plásticas) se encontró que el primer estudio lo realizó en 1980, sobre la industria plástica en Colombia y su desarrollo. Al transcurrir los años este sector en el país creció y pronto se establecieron plantas para la producción de polietileno de baja densidad, poliestileno y PVC suspensión, ya que eran las resinas de mayor consumo en los inicios de la industria, al transcurrir los años Acoplasticos agrega a su directorio industrial, no solo las empresas productoras de productos plásticos, sino también a los proveedores de materias primas, debido a que el sector se expandió aún más y Acoplasticos creció más en el país, reportando estadísticas más exactas sobre el desarrollo de esta industria en Colombia.

Acoplasticos realiza la publicación de sus estudios del desarrollo actual de la industria plástica en el mundo y específicamente en Colombia, y de los grandes beneficios que está trayendo este material en diferentes aplicaciones industriales. Al observar en las estadísticas de Acoplasticos con el código CIU, ya mencionado se puede observar el

⁷ Ing. Beltrán, Alfredo. Perfiglass Ltda. Bogotá. Colombia. observación inédita, 2014.

valor de las importaciones y exportaciones totales de la industria plástica del país con el valor “FOB” que es el valor del mercado en las fronteras aduaneras de un país como se puede observar en la Figura 3

Figura 3. Importaciones y exportaciones nacionales (FOB millones de dólares).



Fuente: Acoplasticos

Acoplasticos edita también el directorio empresarial del sector industrial plástico⁸ donde se ubicaron e investigaron algunas de las empresas sobre las materias primas y el proceso de pultrusión, identificando que no es conocido ni el proceso ni las materias primas que son necesitadas para desarrollar los productos en Colombia.

La investigación realizada mostro que en Colombia, la única empresa productora de perfiles pultruidos, es Perfiglass Ltda, que lleva en el comercio muy pocos años, al ser la única en producir este tipo de perfiles ha innovado en varias aplicaciones como la producción de rejillas y la fabricación de escaleras, ya que al ser un proceso nuevo e innovador para la industria plástica en el país, no se ha podido expandir a un mercado internacional porque hay países como Chile, Argentina, Brasil, Venezuela, México, Estados Unidos, España y Alemania donde la investigación y desarrollo de este proceso es más avanzado y de mayor aplicación para las diferentes industrias; por las eficientes propiedades físicas, mecánicas y químicas que brindan los materiales compuestos, se han comenzado a utilizar para remplazar materiales metálicos por estos, lo cual, ha llevado a mejorar cada vez los procesos de obtención de productos plásticos.

Los productos que ofrece Perfiglass Ltda se encuentran a continuación en la Tabla 3.

8 [En línea]: <https://www.acoplasticos.org/acoplasticos2/>

Tabla 3. Catálogo de productos de Perfiglass Ltda.

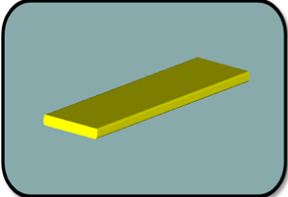
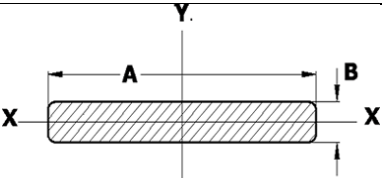
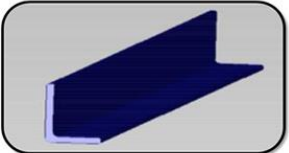
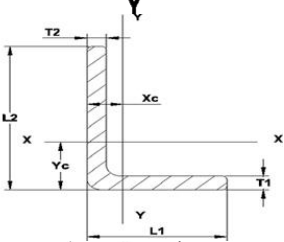
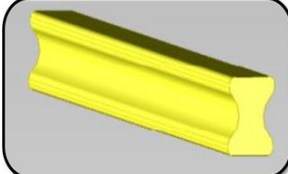
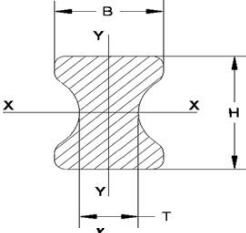
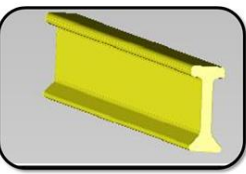
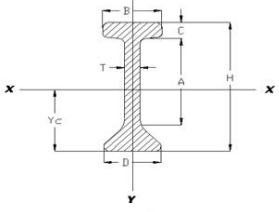

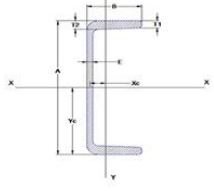
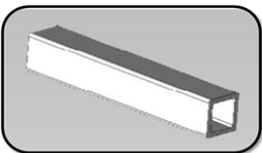
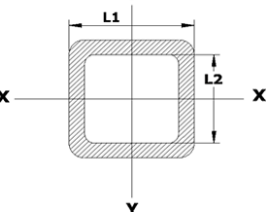
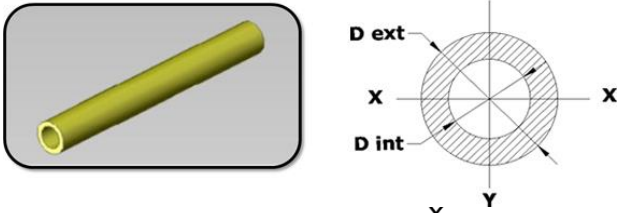
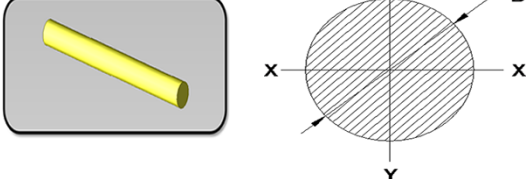
Tipo de Perfil	Descripción	Disponible en:
Platina	 	perfiglassltda.com/platina.php?image.x=105&image.y=81
Angulo	 	perfiglassltda.com/angulo.php?image23.x=34&image23.y=86
Hueso De Perro	 	perfiglassltda.com/huesop.php?image22.x=123&image22.y=49
Perfil I	 	perfiglassltda.com/perfi.php?image2.x=95&image2.y=55
Perfil U	 	perfiglassltda.com/perfu.php?image2.x=109&image2.y=32
Tubo Cuadrado	 	perfiglassltda.com/tuboc.php?image2.x=94&image2.y=39

Tabla 3. (Continuación)

Tipo de Perfil	Descripción	Disponible en:
Tubo Redondo		<p>perfiglassltda.com/tubor.php?image2.x=73&image2.y=23</p>
Varilla Maciza		<p>perfiglassltda.com/varilla.php?image5.x=77&image5.y=40</p>

Fuente: Perfiglass Ltda [En línea]: Disponible en: <www.perfiglassltda.com>

2.2 MARCO CIENTÍFICO

2.2.1 Otras investigaciones sobre pultrusión

Los textos, artículos y demás escritos que han servido de soporte para la guía en este trabajo han sido:

- ✓ DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA PULTRUSIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS, ESCALA LABORATORIO, PARA LA FABRICACIÓN DE PERFIL ESTRUCTURAL (4), Darwin Mauricio Fuentes Gómez, Jhoan Javier Pacheco Páez, Este documento muestra el desarrollo del diseño conceptual y detallado de una máquina pultrusora de materiales compuestos de escala laboratorio que sirve para la fabricación de perfil estructural; la cual se realizó con el fin de fortalecer la línea de investigación en materiales y procesos, además de servir de apoyo a las diferentes líneas de investigación de ingeniería mecánica.
- ✓ METODOLOGÍA PARA LA UTILIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS TIPO FIBRA CON MATRIZ POLIMÉRICA, EN APLICACIONES AERONÁUTICAS (5). Juan Carlos Fracica de la Hoz. Este trabajo busca ser un primer estudio exploratorio en Bogotá y específicamente en la Universidad Nacional de Colombia para conocer el efecto de algunas variables físicas y químicas que pueden presentarse en la manufactura de la resina epóxica reforzada con fibra de carbono ante cargas de tensión.
- ✓ APLICACIÓN DE NUEVOS MATERIALES A SOLUCIONES DE VIVIENDA EN COLOMBIA (6). Andrés Felipe Pérez Marín. 2005. En este trabajo de investigación se tiene como objeto aportar elementos que caractericen algunos nuevos materiales para así generar sistemas constructivos que empleando una adecuada relación costo – beneficio. Permitan generar soluciones de vivienda cuya

construcción a partir de sistemas no convencionales, disminuya las dificultades que generan los procesos constructivos tradicionales.

- ✓ En la Universidad de Mayaguez se encontró el artículo ELABORACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS (7). Puerto Rico. Christian Toller, Adolfo Rizzo. Este documento realiza la descripción de los métodos para la elaboración de materiales compuestos con un gran énfasis en materiales pultruidos.
- ✓ En la Universidad de Zaragoza (España), otro artículo sobre MATERIALES COMPUESTOS (8). Departamento de Ingeniería Mecánica. El presente artículo pretende mostrar el amplio abanico de posibilidades que ofrecen los materiales compuestos en el campo de la ingeniería y el diseño. Se presentan los diferentes tipos de fibras, orgánicas e inorgánicas, así como los diferentes tipos de matrices, haciendo énfasis en las orgánicas, que son las que dan nombre a los denominados materiales compuestos de matriz orgánica.

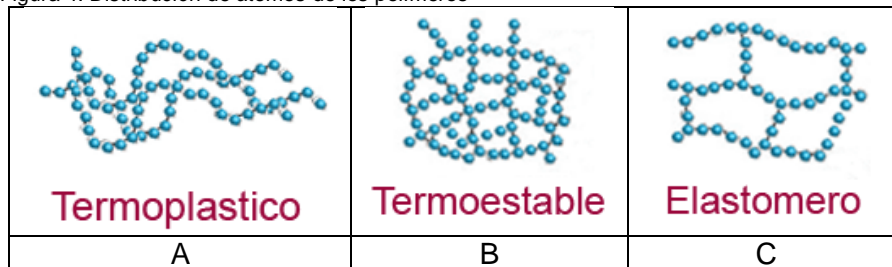
2.3 MARCO CONCEPTUAL

2.3.1 Polímeros

Los polímeros se definen como macromoléculas compuestas por una o varias unidades químicas (monómeros) que se repiten a lo largo de toda una cadena.

La parte básica de un polímero son los monómeros, los monómeros son las unidades químicas que se repiten a lo largo de toda la cadena de un polímero, por ejemplo el monómero del polietileno es el etileno, el cual se repite x veces a lo largo de toda la cadena⁹.

Figura 4. Distribución de átomos de los polímeros



Fuente: [En línea]. Disponible en: <<http://www.losadhesivos.com/termoplastico.html>>

Los termoplásticos hacen referencia al conjunto de materiales que están formados por polímeros que se encuentran unidos mediante fuerzas intermoleculares o fuerzas de Van der Waals, formando estructuras lineales o ramificadas como se ve en la Figura 4 inciso A.

Un material termoplástico se puede asemejar a un conjunto de cuerdas enredadas que se tiene encima de una mesa, cuanto mayor sea el grado de enredo de las cuerdas mayor

9 Texto extraído [losadhesivos.com](http://www.losadhesivos.com). [En línea]. Disponible en: <http://www.losadhesivos.com/definicion-de-polimero.html>

será el esfuerzo que se tiene que realizar para separar las mismas, unas de otras dado a que el rozamiento que se produce entre cada una de las cuerdas ofrece resistencia a separarlas.

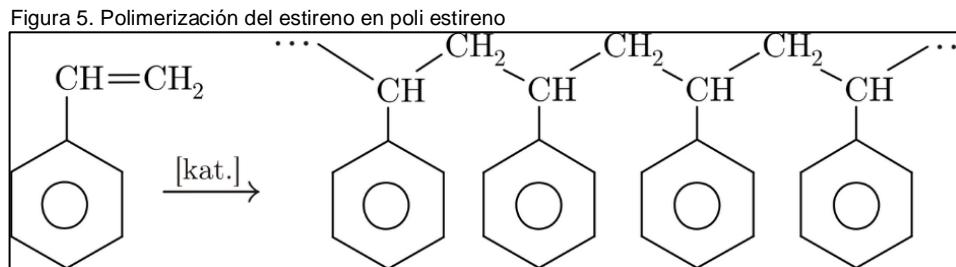
Los termoestables hacen referencia al conjunto de materiales formados por polímeros unidos mediante enlaces químicos adquiriendo una estructura final altamente reticulada como se evidencia en la Figura 4 inciso B.

La estructura altamente reticulada que poseen los materiales termoestables es la responsable directa de las altas resistencias mecánicas y físicas (esfuerzos o cargas, temperatura) que presentan dichos materiales comparados con los materiales termoplásticos y elastómeros. Por contra es dicha estructura altamente reticulada la que aporta una baja elasticidad, proporcionando a dichos materiales su característica fragilidad.

Los elastómeros suelen ser normalmente polímeros termoestables pero pueden ser también termoplásticos. Las largas cadenas poliméricas enlazan durante el curado como se observa en la Figura 4 inciso C. La estructura molecular de los elastómeros puede ser imaginada como una estructura de "espaguetis con albóndigas", en dónde las albóndigas serían los enlaces. La elasticidad proviene de la habilidad de las cadenas para cambiar su posición por sí mismas y así distribuir una cierta tensión aplicada. El enlace covalente asegura que el elastómero retornará a su posición original una vez deje de aplicarse la tensión.

2.3.2 Reacción de polimerización

El proceso de polimerización se hace por medio de enlaces covalentes, donde miles de moléculas conocidas como monómeros se enlazan entre sí, generando cadenas de moléculas muy largas, denominadas polímeros.



Fuente: [En línea]. Disponible en: <<http://es.wikipedia.org/wiki/Polimerizaci%C3%B3n>>

2.3.3 Tipos de polimerización

La polimerización puede producirse, generalmente, por adición y condensación.

Polímeros por adición: Se forman gracias a la unión sucesiva de monómeros que tienen uno o más enlaces dobles y triples. El proceso se divide en 3 etapas:

Iniciación: La molécula llamada iniciador actúa como reactivo

Propagación: La cadena comienza a alargarse por repetición del monómero

Terminación: Se interrumpe el proceso de propagación y la cadena termina de crecer porque se han agotado los monómeros.

Finalmente, los polímeros de adición se pueden obtener gracias a un proceso de polimerización catiónica, aniónica o radicalaria de acuerdo al reactivo iniciador que se utilice.

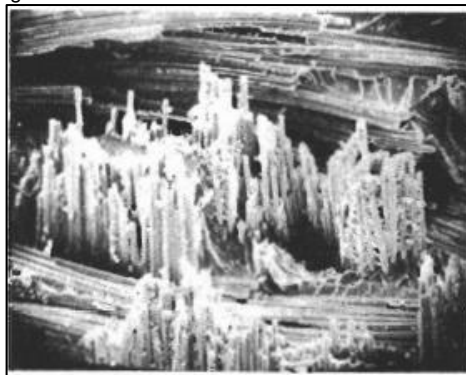
Polímeros por Condensación: Se forman por un mecanismo de reacción en etapas, es decir, a diferencia de la polimerización anterior, esta no depende de la reacción por la que es precedida: el polímero se forma dado que los monómeros que actúan aquí tienen más de un grupo funcional capaz de reaccionar con el grupo de otro monómero. Los grupos ácido carboxílico, amino y alcohol son los más utilizados en estos fines. Aquí, por cada nuevo enlace que se forma entre los monómeros, se libera una molécula pequeña.¹⁰

2.3.4 Materiales compuestos

Los compuestos se pueden clasificar en tres categorías: con partículas, con fibras y laminares, dependiendo de la forma de los materiales. El concreto, que es una mezcla de cemento y grava, es un compuesto particulado, la fibra de vidrio, que contiene fibras de vidrio incrustadas en un polímero, es un compuesto reforzado con fibras; y la madera contrachapada o tripley, que tiene capas alternas de chapa de madera, es un compuesto laminar. Si las partículas de refuerzo están distribuidas uniformemente, los compuestos particulado tendrán propiedades isotrópicas; los compuestos con fibras pueden ser isotrópicos o anisotrópicos; los laminares siempre tienen un comportamiento anisotrópicos¹¹ (9).

En estos compuestos al introducir las fibras resistentes y rígidas pero frágiles dan la factibilidad de poseer mayor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y una excelente relación resistencia – peso, esto porque la matriz transmite la fuerza a las fibras que son las encargadas de soportar la fuerza aplicada en su mayor porción. Un ejemplo se ve al observar en la fibra de vidrio que es un compuesto reforzado por fibra, que contiene largas fibras rígidas de vidrio en una matriz polimérica más blanda.

Figura 6. Fibra de Vidrio



Fuente: Askeland, Donal R, Ciencia E Ingeniería De Los Materiales, pg. 509

¹⁰ Texto extraído de Polímeros Químicos. [En línea]. Disponible en:

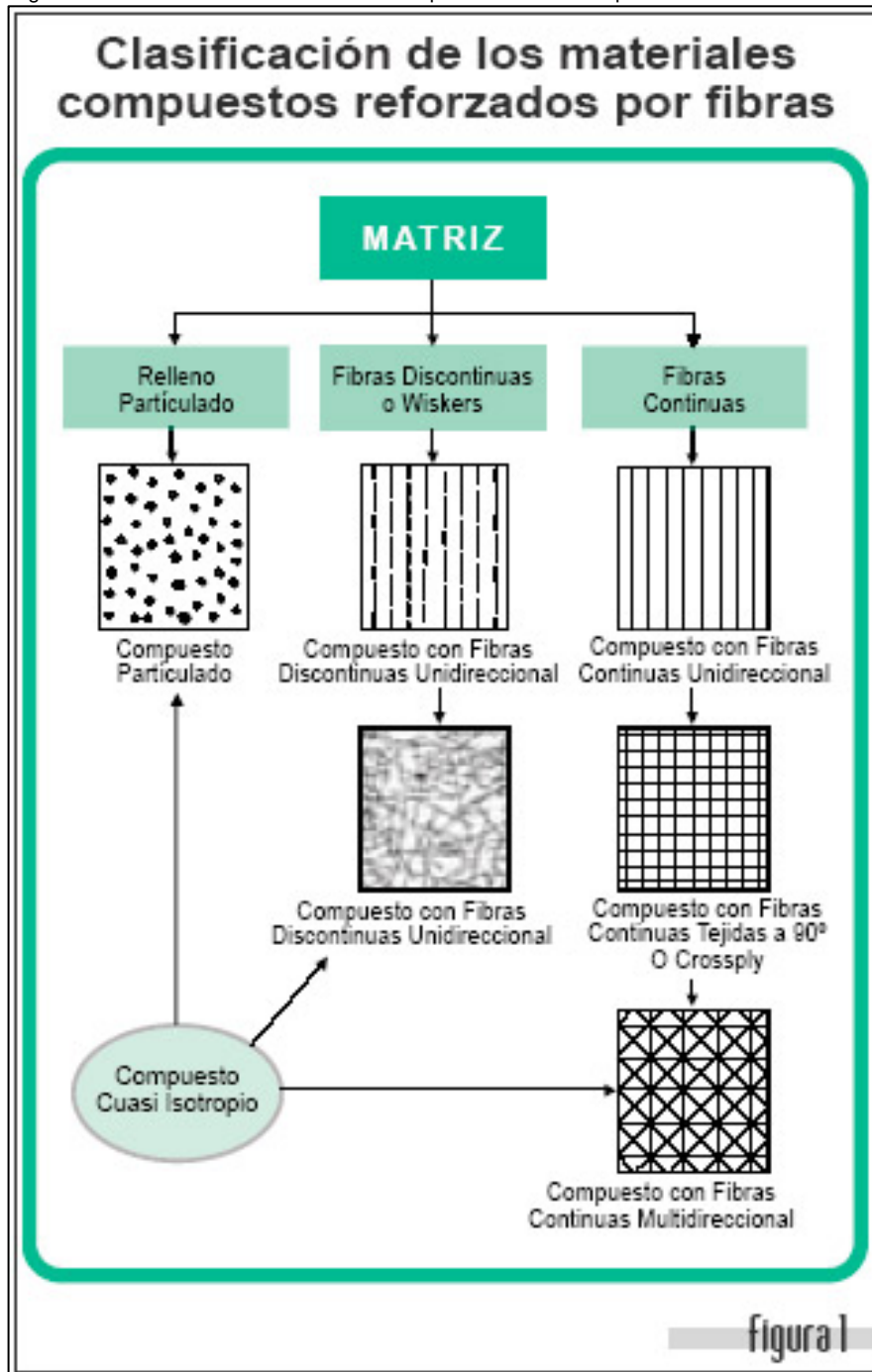
<http://polimerosquimicos.blogspot.com/2008/03/tipos-de-polimerizacin-tambin-puede-ser.html>

¹¹ Askeland, Donal R, Ciencia E Ingeniería De Los Materiales, pg. 508

Los materiales compuestos se encuentran conformados inicialmente por tres fases; la fase continua o matriz, formada por el polímero, que puede ser termoplástica, termoestable o elastómera, siendo en el proceso de pultrusión generalmente de tipo termoestable; una fase discontinua o refuerzo, constituida por materiales tipo fibra, que bien pueden ser fibras largas o fibras corta, tipo whisker u hojuelas $\frac{1}{2}$ por partículas¹²; adicionalmente, en ocasiones hay que hacer modificaciones al material de refuerzo, para fomentar su interacción con la matriz, estos materiales son conocidos como elementos de acople, cuyo aditivo permite mejorar la adhesión entre las fases, adicionalmente a este, se pueden necesitar otros tipos de aditivos, tales como son los antioxidantes, los protectores UV, entre otros. Dentro de los materiales que se pueden usar para la fase continua, se encuentra, que a nivel de los termoplásticos los más utilizados son: el Polipropileno (PP), el Polietileno(PE), el Polivinilcloruro (PVC), el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), entre otros; a nivel de los termoestables se encuentran: las resina de Poliéster Saturadas (SP), las Ortoftalicas, Vinilester y las Epóxica (EP); y a nivel de los Elastómeros, Poliisopreno (IR) y el Poliuretano (PUR). En la fase discontinua, las fibras, se pueden clasificar de la siguiente forma: de tipo natural, tipo sintética o de tipo mineral. Las fibras naturales pueden ser de dos fuentes: fibras de tipo animal o fibras de tipo vegetal, como son la lana y la fibra del bonote de coco, respectivamente. Las fibras de tipo sintética son las obtenidas a partir de polímeros termoplásticos, como son las fibras de Aramida, las fibras de Kevlar, las Fibras de Nylon, etc. y dentro de las fibras de tipo mineral, se encuentran las fibras de vidrio y las de carbono. Los aditivos de estos materiales proporcionan un rendimiento específico que pueden mejorar el método de manufactura o el producto terminado. (10)

¹²Texto extraído de: FORERO, Ricardo. Las fibras naturales en los materiales compuestos. En: *Tecnología de plásticos*. Agosto, 2007. Vol. 22, no. 6, p. 32

Figura 7. Clasificación de los materiales compuestos reforzados por fibras



Fuente: Plásticos13.

¹³ Plásticos. [En línea]. Disponible en: <<http://www.plastico.com/temas/Las-fibras-naturales-en-los-materiales-plasticos-compuestos+3057872?pagina=1>>

Figura 8. Materiales compuestos reforzados con fibras

Materiales compuestos reforzados con fibras	
Tipo de matriz polímero	
Matriz	Fibra
Termoestables: Epóxica Fenólica Poliamida Bismaleimida Poliéster	Fibras animales Seda Fibra de semilla Bonote del Coco Algodón Fibra de hojas Abacá Sisal Piña Fibra de la corteza del tallo Lino Cáñamo Yute Chiqui – Chiqui
Termoplásticos Polieterequetona "PEEK" Polisulfona "PSU" Polipropileno "PP" Polietileno de Alta Densidad "PEAD"	Fibras sintéticas Vidrio E Vidrio S Aramida (K49) Carbono Alto
Elastómeros Etc.	Esfuerzo Carbono Alto Módulo Boro

Fuente: Plásticos13.

En Colombia, estas materias primas son de escasa comercialización, por lo cual, solo se encuentran en algunas empresas, la gran mayoría de estas son empresas importadoras que traen la fibra de países productores, como lo son: Brasil, México, Chile, China y Estados Unidos.

Existen diferentes procesos de conformado para los materiales compuestos, ejemplo de esto es la pultrusión, el Filament Winding, el procesado en Autoclave, la Inyección y el RTM (Resin Transfer Moulding). Por lo cual el desarrollo de este trabajo se basará únicamente en el proceso de pultrusión para el conformado de materiales compuestos.

2.3.5 Materiales compuestos del proceso de pultrusión

La particularidad del proceso de pultrusión es su gran variedad de materiales que se pueden usar para adicionar en este proceso generando esto productos compuestos con una gran variedad de propiedades. Para elegir un material se deben tener en cuenta lo siguiente:

- ✓ Cumplir la exigencia mecánica del producto obtenido
- ✓ Observar las consecuencias de temperatura
- ✓ Observar las consecuencias ambientales
- ✓ Estar pendiente del tiempo del proceso de operación
- ✓ Evaluar el precio del material en el producto obtenido

Teniendo en cuenta lo anterior y más aún los materiales que actualmente se consiguen comercialmente se tiene que:

2.3.5.1 Resinas termoestables

Es importante hacer una selección adecuada de la resina, pues esta permite tener unión del refuerzo que transfiere tensiones entre fibras. Algunas de las propiedades que da las resinas en el proceso son:

- ✓ Resistencia a altas temperatura
- ✓ Resistencia a la corrosión
- ✓ Conductividad térmica
- ✓ Propiedades dieléctricas

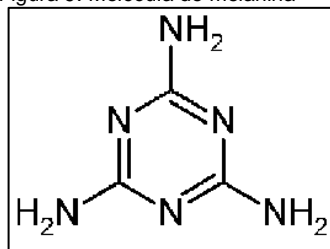
Existen múltiples y variados tipos de resinas entre los que se destacan:

a. Resina Melanina: Se elaboran por medio de derivados de calcio y formol. Esto genera plásticos de fraguado térmico, algunas de sus características son:

- ✓ Absorben menos humedad
- ✓ Menos tendencia al agrietamiento
- ✓ Alta dureza
- ✓ Resistente a impactos
- ✓ Resistente a químicos
- ✓ Alta resistencia al calor

Todas estas características se deben a sus equivalentes poliuretánicos. Se implementan en material electrónico en zonas húmedas, para altos requerimientos térmicos o dimensionales.

Figura 9. Molécula de melanina



Fuente: Em Sintese 14

b. Resina Poliéster: Los poliéster de tipo insaturado o no saturados son polímeros termoestables de fraguado térmico que oscila entre 150°C – 170°, estos se caracterizan por:

- ✓ Elevada estabilidad dimensional.
- ✓ Alta resistencia a fisuras.
- ✓ Alta resistencia al calor

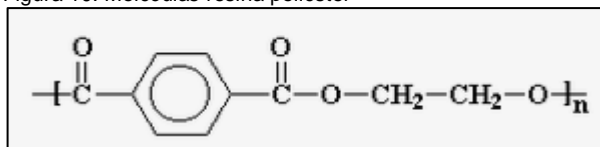
¹⁴Em Sintese. [En línea]. Disponible en:<<http://www.emsintese.com.br/2010/grafeno-com-acrilico-ou-acucar/>>

- ✓ Alta resistencia choque térmico
- ✓ Altas propiedades eléctricas

Se elaboran por medio de dos monómeros, el poliácido y un alcohol no saturad que actúa como catalizador, sus aplicaciones son (11):

- ✓ Fabricación del cuerpo de piscinas
- ✓ Cisternas
- ✓ Electrodomésticos
- ✓ Procesos de pultrusión
- ✓ Tuberías
- ✓ Contenedores

Figura 10. Moléculas resina poliéster

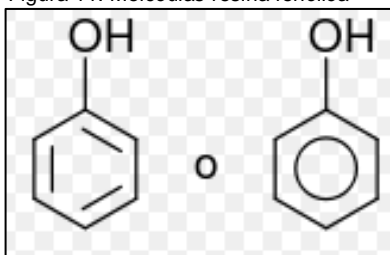


Fuente: Biblioteca Digital¹⁵

c. Resina Fenólica: Esta resina fenólica termoestable se fabrica por un proceso de condensación que genera varios tipos de fenoles que son:

- ✓ Laminar: Con esta resina laminar se encuentra la fabricación de tableros, donde participa como adhesivo entre las diferentes láminas que conforman el tablero. Las resinas laminares mejoran resistencia al impacto y mejor estabilidad dimensional.
- ✓ Fraguado en frío: Para este tipo de resina fenol se usan agentes ácidos que proporcionan la polimerización de la resina. Se usan en adhesivos con gran adhesión.
- ✓ Moldeo: Con el moldeo obtiene gran diversidad de características a muy bajos costos, además de mejorar sus propiedades como: Buena resistencia al envejecimiento, buena dureza, buena rigidez, buena estabilidad dimensional, buen aislante eléctrico y mal conductor de calor.

Figura 11. Moléculas resina fenólica



Fuente: Wikipedia¹⁶

¹⁵Biblioteca Digital, [En línea]. Disponible en:

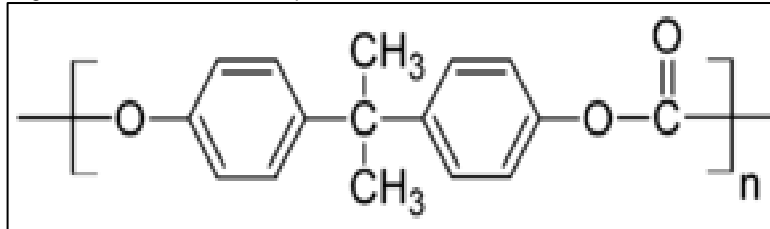
<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/072/htm/sec_7.htm>

¹⁶Wikipedia. [En línea]. Disponible en:

http://es.wikipedia.org/wiki/Fenol#mediaviewer/File:Phenol_chemical_structure_es.svg

- d. Resina Epoxi: Las resinas epoxi se usan porque sus propiedades físicas, eléctricas, anti-corrosivas y mecánicas son bastante altas, también poseen resistencia a cortante y flexión, además que todos sus propiedades son superiores de las resinas poliéster y vinil éster. Estas resinas generan un gasto más elevado en el proceso y en el material. Se debe tener en cuenta la composición química de esta resina pues la reacción de polimerización es muy lenta y es por esto que la velocidad del Halador al momento de realizar el proceso debe ser muy baja. También en el proceso de calentamiento se tiene que obtener una cantidad de calor al mismo puesto que la temperatura de curado en altas y sostenidas el mismo tiempo. Unos de los problemas más representativos de la resinas epoxi es su adherencia a la superficie del molde lo que puede generar algunas imperfecciones superficiales en el producto final.

Figura 12. Moléculas resina Epoxi



Fuente: Polymer Science Learning Center¹⁷

- e. Resina Vinil éster: La resina vinil éster se caracteriza por su alta resistencia a la corrosión, su alto desempeño a temperaturas altas, resistencia al impacto y resistencia ante esfuerzos inter-laminares. Sus únicas desventajas es su alto precio que puede valer un 75% más que la resina poliéster, además la obligación de usar velocidades inferiores a las que usa el proceso de pultrusión para generar la reacción de polimerización.

2.3.5.2 Fibras

La fibra y la matriz son elementos que conforman un material compuesto, estos dos materiales generan propiedades superiores que cuando están por separado. A parte de estos dos elementos también se pueden mejorar las propiedades agregando aditivos o cargas. La fibra aporta resistencia mecánica, dureza y rigidez. Actualmente las fibras se clasifican de la siguiente manera:

- a. Fibras de carbono: Este material proporciona aplicaciones de estructuras sometidas a cargas de fatiga o repetitivas. En la parte estática sus propiedades mecánicas son altas en resistencia y modulo. Otra característica es su baja

¹⁷ Polymer Science Learning Center. [En línea]. Disponible en:< <http://pslc.ws/spanish/epoxy.htm>>

densidad que proporciona propiedades específicas o por unidad de peso son elevadas.

- ✓ Clases de fibras de carbono: Actualmente se identifican tres clases de fibras de carbono, por medio de temperatura de tratamiento a calentamiento.
 - (HM): Fibra de carbono de alto modulo
 - (III): Fibra carbono III
 - (HR): Fibra de carbono de alta resistencia
- ✓ Propiedades fibra de carbono:
 - Alta rigidez especifica
 - Alta resistencia
 - Baja resistencia al roce
 - Bajo coeficiente de dilatación
 - Alta conductividad térmica
 - No tiene plasticidad
 - Alta estabilidad dimensional
 - Alto costo
- ✓ Proceso de fabricación de la fibra de carbono: El proceso de fabricación de la fibra de carbono se llama pirolisis controlada y ciclizacion de precursores de fibra orgánica, el más conocido es el PAN (poliacrilonitrilo), es una fibra sintética o el alquitrán que se obtiene por destilación destructiva del carbono. Los pasos para la fabricación del precursor PAN son:
 - Estabilización
 - Carbonización
 - Grafitización
 - Tratamiento de superficie

La fibra de carbono se compone de filamentos que oscilan en un diámetro de 5 a 8 μm y se combinan en mechas de 5.000 y 12.000 filamentos.

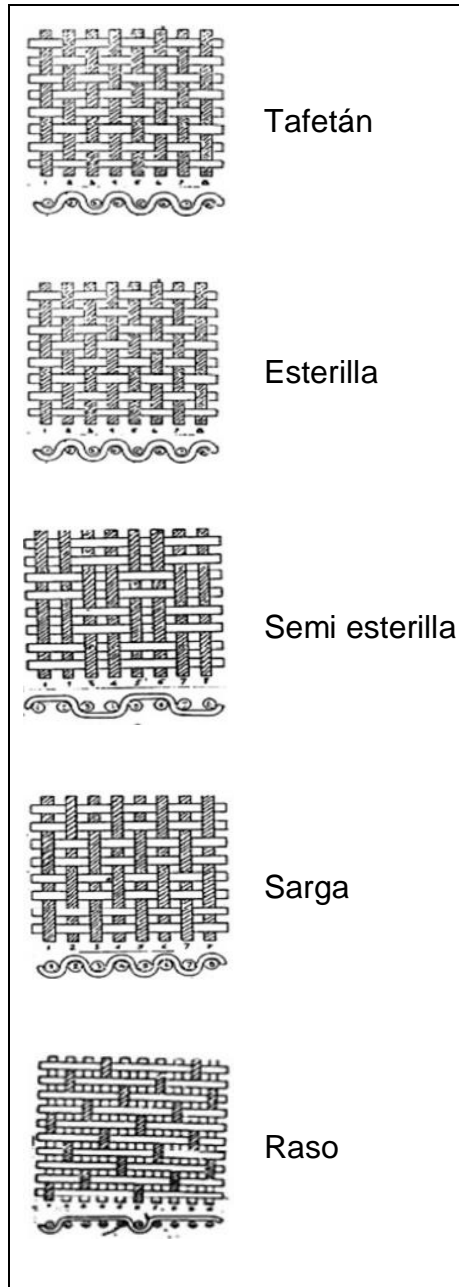
- b. Fibra de vidrio: La fibra de vidrio actualmente es la fibra más usada para el proceso de pultrusión, esto se debe por la facilidad de encontrar la fibra en el mercado además de su económico precio.
- ✓ Tipos de fibras de vidrio:
 - Vidrio E (eléctrico)
 - Vidrio A (Alto contenido en álcali)
 - Vidrio AR (Alcali resistente)
 - Vidrio C (Químico)
 - Vidrio R o S (Resistencia)
 - Vidrio D (Dieléctrico)
 - Vidrio ERC (Eléctrico y resistente químico)
 - Vidrio B (Boro)
 - Vidrio X
 - ✓ Propiedades fibra de vidrio:
 - Alta adherencia fibra-matriz
 - Resistencia mecánica
 - Incombustibilidad

- Estabilidad dimensional
 - Características eléctricas
 - Imputrescibilidad
 - Excesiva flexibilidad
 - Compatibilidad con materias orgánicas
 - Débil conductividad térmica
 - Bajo costo
- ✓ Fabricación de fibra de vidrio: Para fabricar de vidrio se debe hacer el estiramiento del material a muy alta temperatura, por tracción mecánica o por acción de fluidos en movimiento de una veta de vidrio fundido y su inmediata solidificación.
- c. Fibras orgánicas: Actualmente las fibras orgánicas se dividen en:
- ✓ Fibras de polímeros de líquido liotropico cristalino (Aramida)
 - ✓ Fibras de cadenas de polímeros flexibles alargadas (Polietileno)
 - ✓ Fibras de polímeros de líquido termo trópico cristalino (Ácido naftoico)
- d. Fibras aramida: Esta fibra se obtiene por hilado de poliamidas aromáticas, son de origen sintético y orgánico. Estas fibras son nuevas, además de su alta rigidez y resistencia se puede obtener fibra altamente alineadas.
- ✓ Tipos de fibras de aramida:
- Fibras de bajo modulo
 - Fibras de alto modulo
 - Propiedades fibra de aramida:
 - Elevada resistencia a la tracción
 - Sus moléculas son alineadas
 - 5 veces más resistente que el acero
 - Buena estabilidad mecánica
 - Alto módulo de elasticidad
 - Baja elongación de rotura
 - Alta tenacidad
 - No son frágiles
 - Alta resistencia impacto
 - Alta capacidad de absorción energía
 - Químicamente estable
- ✓ Fabricación de fibra de aramida: Primero se debe tener un solvente y se agrega una solución de polímero a una temperatura de 50 a 80° y después se lleva a extrusión de un cilindro caliente a temperatura de 200°. Esto genera una evaporación del solvente y el material resultante se enrolla en una bobina. Por último se hace un proceso de estiramiento para mejorar la resistencia y la rigidez del material obtenido. La fibra de aramida se encuentra en presentaciones de fibra continua y fibra discontinua.

2.3.5.3 Tipos de tejidos en refuerzos

En el mercado se encuentran los siguientes tipos de tejidos (12):

Figura 13. Tipos de tejido



Fuente: Fibra de Vidrio, carbono y Kevlar¹⁸

2.3.5.4 Materiales de refuerzo

Algunos de los refuerzos que se encuentran son:

¹⁸ Fibra de Vidrio, carbono y Kevlar, [En línea]. Disponible en: <<http://slideplayer.es/slide/2343203/#>>

- ✓ MAT: Las fibras Mat de pultrusión se identifican por sus fibras orientadas aleatoriamente en un plano. El Mat en el proceso de pultrusión ayuda a mejorar las propiedades mecánicas transversales del material. El Mat más usado es el fabricado con fibra de vidrio E con gramajes de 300, 400, 550 gr/m². Esta fibra es el refuerzo más económico de todas las demás, tiene una capacidad de absorción desde 2-3 veces su peso.
 - CARACTERÍSTICA DEL MAT: Diámetro de filamento: Cuando se tiene un diámetro de menor genera un mayor refuerzo, los Mats se mide por filamentos entre 11 y 13 um.
 - Tipo y cantidad de ligante: En el Mat el ligante influye en la velocidad de impregnación, deformabilidad, rigidez, resistencia a la tracción y compatibilidad con resinas.
 - Para usar Mats con dimensiones grandes donde se manejan rollos se usaran Mats de elevada resistencia a la tracción y cuando son aplicaciones de formas complejas se usan Mats de menor rigidez, menor resistencia pero más adaptables a las formas, para el tipo de aplicación a mano se usa Mat de ligante muy soluble.

Figura 14. Mat en fibra de vidrio



Fuente: [En línea]. Disponible en: <http://www.ingequimica.com/productos.html>

- ✓ ROVINGS: En el proceso de pultrusión el Roving es la fibra usada. Los Roving se presentan en tubo-soporte, donde el peso aproximado es de 20 Kg. Otra característica de la fibra roving es que viene en tamaños los cuales se especifican por el número de filamento por mecha. Algunos ejemplos: 3K, 6K Y 12K. También se encuentran los spun roving que sirven para rellenar ángulos y mejorar propiedades mecánicas transversales del producto.

Figura 15. Fibra Roving



Fuente: [En línea]. Disponible en:
<<http://br.cpicfiber.com/productos.asp?codigo=3&cat=Refor%C3%A7os>>

- ✓ **TEJIDO BIAxIAL:** Al momento de necesitar fibras en dirección transversal y longitudinal se debe recurrir a refuerzos de tejidos biaxiales. Este tipo de tejidos ocasiona inconvenientes con la impregnación de la estabilidad de fibras cocidas, para este problema se usan laminados biaxiales. Este refuerzo es fabricado en carbono y fibra de vidrio con gramajes de 200-500 gr/m². Estos tejidos se agregan en forma laminar interna junto al perfil pultruidos también agregando capas de Mat.
- ✓ **LAMINADOS BIAxIALES:** Este tipo de tejidos laminados son fabricados en fibra de vidrio y carbono, se distinguen por que van unidos mediante un cosido a lo largo del espesor generando la ventaja de usar una diversidad de orientaciones al refuerzo en el interior del producto pultruidos.

Figura 16. Tela biaxial y multiaxial

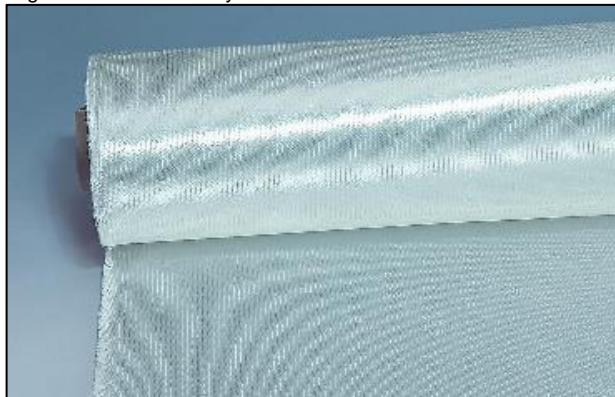
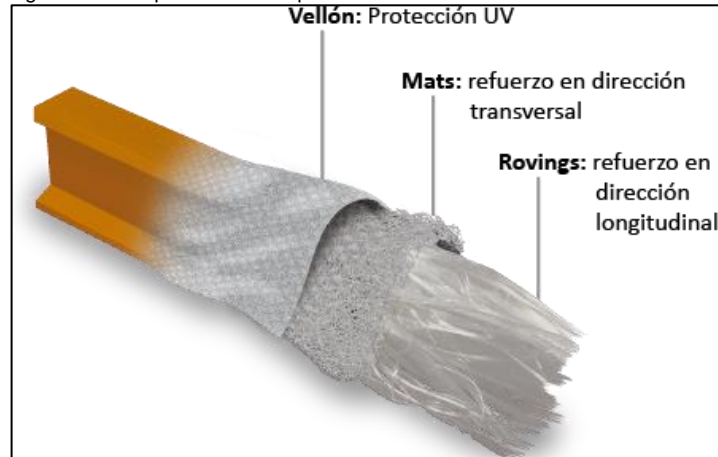


Figura 17. Composición de un perfil



Fuente: E.C.T. Edil Composites Technology S.r.l.

2.3.5.5 Aditivos y cargas

En el proceso de pultrusión se pueden usar materiales compuestos con una gran variedad de productos que son incorporados al material compuesto fibra-resina, donde generan propiedades particulares o reducir el costo del mismo.

- ✓ Propiedades De Cargas Y Aditivos:
 - Cargas ignifugas
 - Cargas reforzantes
 - Cargas de bajo coste con objeto de abaratar el producto final
 - Agentes anti-ultravioleta
 - Cargas conductoras
 - Cargas antiestáticas
 - Colorantes
 - Pigmentos
 - Agentes de anti-retracción

- ✓ Para mejorar la procesabilidad del material compuesto se debe agregar:
 - Lubricantes
 - Agentes de flujo
 - Agentes tixotrópicos
 - Agentes de moldeo
 - Se pueden generar efectos de las cargas en las resinas lo que generalmente disminuye resistencia a flexión y tracción:
 - Aumento de densidad

¹⁹ Jiangsu Jiuding New Material Co., Ltd.¹⁹ [En línea]. Disponible en: http://es.made-in-china.com/co_irwinshi/product_Biaxial-and-Multiaxial-Fabric_hururiuiy.html

- Aumento de modulo elasticidad
 - Aumento de dureza
 - Aumento viscosidad de la mezcla
 - Aumento estabilidad dimensional
- ✓ Para la selección de aditivo o carga se hace a función de:
- Propiedades químicas:
 - Neutralidad
 - Compatibilidad resina-fibra
 - Buena resistencia a agentes químicos
 - Buena ligazón con la resina
- ✓ Propiedades físicas
- Dimensión
 - Forma
 - Superficie
 - Densidad
 - Estabilidad térmica
 - No es abrasiva
 - Costo
 - Facilidad de manipulación
 - Disponibilidad

2.3.5.6 Cargas

Hay dos clases de cargas que son:

- ✓ Cargas reforzantes: Son las más utilizadas por evitar las concentraciones de tensión pues gracias a su geometría distribuye los esfuerzos en la pieza.
- ✓ Cargas no reforzantes: Las más usadas son de origen mineral y se incorporan a la resina en proporciones similares con las propiedades buscadas y el precio que es más barato.

2.3.5.7 Aditivos

Los aditivos son esenciales para conseguir el endurecimiento de las resinas termoestables, pero esto se agrega en menos cantidad que la carga.

- ✓ Pigmentos: Es un producto insoluble en forma sólida de origen material u orgánico.
- ✓ Lubrificantes: El lubricante externo aflora a la superficie de la resina para reducir su tendencia adherirse al molde. El lubricante interno modifica las fuerzas de cohesión intermoleculares disminuyendo la viscosidad de la resina y no modifica los moldes.
- ✓ Colorantes: Son compuestos solubles en disolvente orgánico o agua, no se usan mucho debido a su mala resistencia química y térmica.

- ✓ Las pastas colorantes son dispersiones de pigmentos en un soporte pastoso son de fácil incorporación y dispersión en la resina.

Para los colorantes y pigmentos se deben tener en cuenta ciertos criterios:

- Resistencia química
 - Propiedades ópticas
 - Resistencia a la migración
 - Facilidad de dispersión
 - Propiedades eléctricas
 - Toxicidad
 - Costos
 - Estabilidad térmica
 - Compatibilidad de la resina
- ✓ Agentes Anti retracción: Genera mejor calidad de acabado superficial en piezas moldeadas en caliente.
 - ✓ Aditivos Anti Ultravioleta: Protegen el material compuesto de acciones de rayos UV, son los más energéticos del espectro de los rayos solares.

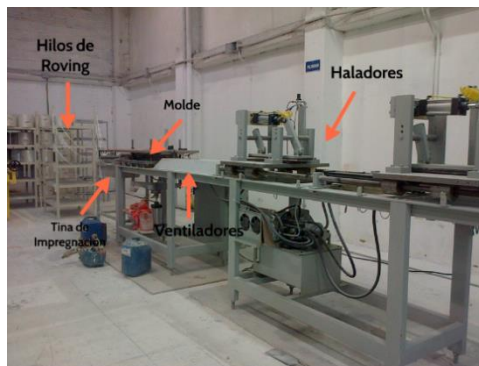
2.3.5.8 Agentes de curado

Cuando se habla de resinas poliéster y vinil éster el catalizador altera el tiempo de curado, pero no interfiere sustancialmente a la viscosidad de la resina o propiedades finales del polímero. En resinas epoxi la variedad de selección del catalizador es amplia, porque estos determinan propiedades mecánicas y térmicas. En cambio con resinas fenólicas la selección del catalizador es limitada, por esto se hace un sistema formulado completamente. Los tipos de agentes de curado son:

- ✓ Anhídridos
- ✓ Catalíticos
- ✓ Aminas

2.3.6 Pultrusión

Figura 18. Proceso de pultrusión



Fuente: [En línea]. Disponible en: <<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/pultrusion.html>>

El proceso de pultrusión es uno de los más viejos en el ámbito de fabricación de polímeros reforzados con fibra termoestable, también su proceso continuo es uno de los más viejos. Este proceso consiste en una producción de un producto de material compuesto automático, constante y cambiante. Con este tipo de proceso se obtiene secciones constantes tales como:

- ✓ Viga
- ✓ Placa
- ✓ Angular
- ✓ Tubo
- ✓ Barra

Este proceso se puede diferenciar muy fácilmente de la extrusión, en cambio de empujar el material mediante un tornillo sinfín por una sección determinada lo que busca la pultrusión es hacer un pull o jalado por medio de un Halador de oruga el cual permite librar de quebraduras y deslizamientos de las fibras. En la parte de costo del proceso se puede decir que la pultrusión es muy generosa, pues se pueden fabricar diversidad de formas y todo esto gracias a su automatización que se encuentra en la mayoría de la máquina. La pultrusión también da oportunidad de utilizar diversidad de fibras, refuerzos y resinas. (13)

2.3.7 Usos del proceso de pultrusión

Los perfiles de pultrusión tienen una gran variedad de usos en todos los campos de la industria por las ventajas y propiedades que dan. En la Tabla 4 se puede observar algunas aplicaciones industriales.

Tabla 4. Usos y mercado de la pultrusión

Mercado	Aplicaciones
Industria Eléctrica	Aisladores, bandejas aislantes, bielas de seccionadores, cuñas de ranura, escaleras y pasamanos, guías, postes y tirantes, rejillas, vallas perimetrales, catenarias, revestimiento de cables, pértigas, manipulación de cables.
Industria Química	Barras y varillas, enrejados, estructuras, soportes torres, refrigeración, torres refrigeración, vallas perimetrales, pasarelas, barandillas, estanterías, plataforma de trabajo, falsos suelos, instalaciones tratamientos de agua.
Transporte	Camiones isotérmicos, canales de aire acondicionado, autobuses, paneles ferrocarril, estructura cama camión, jaulas de transporte, señalizaciones de tráfico, catenarias.
Agricultura	Estructura invernaderos, tutores de plantas, vallas perimetrales, mamparas de separación, soportes y costillas túneles de film, corrales y cercados, barras para varear.
Industria Náutica	Sables vela, balizas, sables, stays y obenques, escaleras estructuras, barandillas, vergas de vela, boyas y balizas.

Tabla 4. (Continuación)

Deportes	Soporte redes, esquí, pértigas y listones, pesca, banderines de señalización, tacos de billar.
Construcción	Andamios, barandillas, pantalán portuario, cubiertas, varillas rea anticorrosión (cemento armado), estructuras, depuradoras, rejillas, tirantes.
Obras Publicas	Postes de alumbrado, soporte señales, semáforos, canalones, barredas, vallas perimetrales, escaleras, refuerzos del terreno.
Energías alternativas	Soportes de placas solares, estructura y componentes de palas eólicas
Aeronáutica	Vallas perimetrales, soportes canalizaciones.
Ganadería	Corrales y cercados, mamparas de separación, vallas perimetrales.
Otros Usos	Mangos de martillo, perfiles para carteleras, soportes flexibles, perfiles de refuerzos y cargas, carcasa y piezas de recubrimiento

Fuente: Autores.

2.3.8 Diseño de piezas para el proceso de pultrusión

El proceso de pultrusión permite producir cualquier forma de perfil que se puede extruir. La única condición para realizar el proceso de pultrusión es que el producto sea de una forma constante a lo largo de su longitud, no se pueden fabricar perfiles de sección variable. Cuando se producen perfiles de sección hueca de tamaños grandes obliga a fabricar un molde más grande incrementando los costos del mismo. Al tener máquinas grandes de pultrusión se debe aumentar el equipo de tracción, para no tener inconvenientes con el proceso continuo del perfil. Esta capacidad de tracción es importante al momento del curado al salir del molde. En máquinas de una exigencia de trabajo normal su tracción esta de 6 a 8 toneladas, mientras que para máquinas grandes llegan a tener una tracción de 20 toneladas.

2.3.9 Elementos proceso de pultrusión

Tal como se observa en la Figura 18, las etapas del proceso de pultrusión que se deben cumplir para generar un perfil de calidad son:

2.3.9.1 Etapa de alimentación del material

La materia prima para el proceso de pultrusión se encuentra en el mercado en forma de bobinas o rollos los cuales facilitan un movimiento constante durante el proceso de pultrusión. Un rollo de roving puede llegar a pesar entre 15 a 25 Kilogramos, esta materia prima debe ir ubicada en los catres sobre ejes con rodamientos ayudando esto a generar una tensión constante en la fibra. Después pasa por un pre moldeo o placa perforada dando un alineamiento a la fibra y así evitar roturas en la fibra, por ultimo delante de este pre moldeo se encuentra el Mat o tejidos que ayudan a reforzar la fibra, estos refuerzos vienen en rollos de diámetro exterior de 305 a 610 mm dependiendo de la necesidad del proceso de pultrusión.

Figura 19. Entrada de materia prima



Fuente: 5dcomposite, [En línea]. Disponible en: <[http://5dcomposite.com/index\(SPA\).html](http://5dcomposite.com/index(SPA).html)>

2.3.9.2 Etapa de impregnación del material

Esta parte del proceso se hace por medio de una batea llena de resina la cual va generar la impregnación de la fibra y refuerzo, esta batea está compuesta de tres rodillos por donde pasan las fibras produciendo que este se extienda y se impregne de resina. Este método frecuentemente se ven en productos elaborados con rovings, donde las formas del producto son sencillas de elaborar con las bandas planas que salen del baño

Figura 20. Fibras impregnadas



Fuente: [En línea]. Disponible en: <<http://compositeswiki.org/tag/pultrusion/>>

2.3.9.3 Etapa de pre-conformado del refuerzo

El pre conformado se encuentra anclado al molde del proceso de pultrusión el cual ayuda a generar una dirección correcta de la fibra y el tejido con la cavidad del molde, estas guías del pre conformado deben tener una tolerancia que no produzca excesiva tensión sobre el tejido ya impregnado, también ayuda a retirar el exceso de resina y del refuerzo para prevenir que se den fuerzas hidrostáticas en la entrada del molde.

Figura 21. Pre moldeo



Fuente: Martin Pultrusion Group, Inc., [En línea]. Disponible en: <<http://www.martinpultrusion.com/forming.html>>

2.3.9.4 Etapa de Dado y Moldes.

En esta parte del proceso, se encuentra el molde que va fabricado en acero y el cual va fijo por medio de pasadores. El dado y los moldes son el principal elemento del proceso de pultrusión, pues son los encargados de alinear las fibras y también de comprimir hasta la fracción en volumen deseada. El molde también se encarga de hacer el proceso de curado del material en un tiempo muy corto sin afectar el material.

Figura 22. Dado de pultrusión



Fuente: Reinforced, Bedford. Pultrusión Process. Youtube, 2012. <<https://www.youtube.com/watch?v=1sH9rIGWNvc>>

2.3.9.5 Método de calentamiento

Aquí van ubicadas las resistencias en la parte externa del molde generando tres fases:

- ✓ Fase 1: Esta fase genera el precalentamiento del material de refuerzo y fibra que ya vienen impregnados con la resina.
- ✓ Fase 2: Esta fase se encarga de elevar la temperatura a más de 75 C° produciendo que el catalizador de polimeración de la resina se active.
- ✓ Fase 3: En esta fase realiza el proceso de curado del material por completo.

2.3.9.6 Método de tracción continua

Este tipo de sistema se encarga de hacer una tracción continua sobre el material después de que este sale del molde ya en estado termoestable y con la respectiva forma que se halla empleado en el molde, este tipo de haladores tiene como característica que para realizar la tracción lo hacen por medio de cadena lo cual permite que la tracción pueda ser mayor. El sistema de tracción continua se usa principalmente para fabricar perfiles huecos, el halador va generar una velocidad entre 2 a 3 m/min.

Figura 23. Método de jalado del perfil pultruidos



Fuente: GENERAL DE EQUIPOS S.A – GECOLSA20.

2.3.9.7 Método de corte

El proceso acá es muy sencillo, deberá tener una sierra eléctrica radial la cual va automatizada para así evitar la mano de obra además de generar el corte adecuado del material, claro está a la longitud que se necesite el material. Para la pultrusión se usan discos de carburo de silicio o de canto diamantado por el carácter abrasivo de la fibra.

²⁰ GENERAL DE EQUIPOS S.A – GECOLSA. [En línea]. Disponible en: <<http://www.gecolsa.com.co/search/term/Haladores>>

Figura 24. Sistema de corte por sierra mecánica

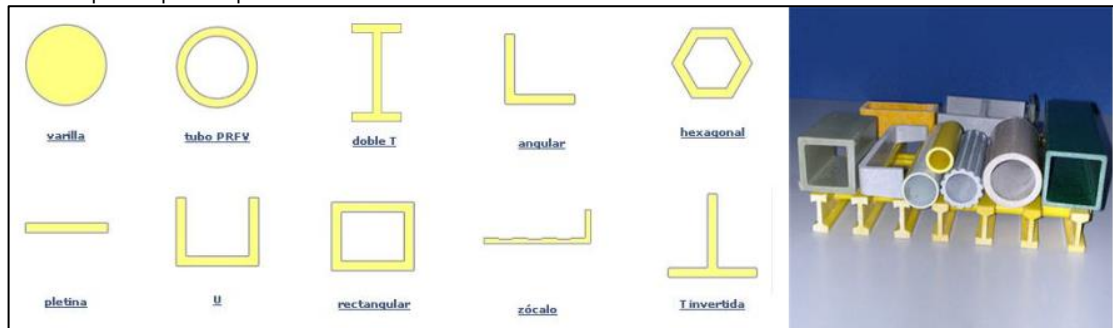


Fuente: Robert Bosch Ltda21.

2.3.10 Producción de perfiles pultruidos

En el proceso de pultrusión se pueden trabajar diferentes tipos de perfiles, para los cuales también se necesita la fabricación de un molde acorde de pultrusión y su respectivo montaje, para poder adquirir las propiedades y el acabado deseado; bajo la investigación que se realizó, se observó una gran variedad de perfiles que se pueden fabricar y que son comercialmente muy buscados como lo son: el perfil en U, perfil en I, tubo cuadrado, ángulos, varillas, tubo redondo, platinas, rejillas industriales y un producto conocido como hueso de perro que es un producto utilizado como aislante en los transformadores.

Figura 25. Tipos de perfiles pultruidos



Fuente: Respla ®, [En línea] Disponible en: <<http://www.resplachile.cl/2009/08/06/perfiles-estructurales/>>

Es importante aclarar, que estos productos pultruidos adquieren grandes características y propiedades mecánicas, químicas y físicas y son muy aceptadas debido a que utilizando materias primas como lo son: la fibra de vidrio, la fibra de carbono y diferentes resinas termoestables se adquieren grandes beneficios, principalmente a lo relacionado con el

²¹ Robert Bosch Ltda., Colombia, [En línea]. Disponible en: <<http://www.boschherramientas.com.co/co/es/professional/herramientas-el%C3%A9ctricas/c187226/tronzaora.html>>

peso – resistencia, lo que proporciona que el crecimiento en las aplicaciones de estos productos cada vez sea mayor, dentro del país como en el resto del mundo.

2.3.11 Ventajas e inconvenientes del proceso de pultrusión

En el proceso de pultrusión genera materiales compuestos mejorando las diferentes propiedades mecánicas de los materiales tales como:

- ✓ Alta relación entre resistencia y densidad
- ✓ Elevada resistencia a la corrosión
- ✓ Baja conductividad térmica
- ✓ Baja conductividad eléctrica
- ✓ Estabilidad dimensional
- ✓ Elevada resistencia mecánica
- ✓ Transparencia magnética
- ✓ Transparencia electromagnética

Los valores de estas propiedades se pueden evidenciar en: Tabla 5, Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8.

Además de toda esta serie de propiedades presentan una variedad de ventajas e inconvenientes al momento de realizar el proceso, estas son algunas de las ventajas del proceso:

- ✓ En el proceso de pultrusión se encuentra la versatilidad de formas sencillas hasta secciones complejas.
- ✓ Al momento de realizar el proceso de pultrusión que genera materiales compuestos donde se observan los bajos costos de producción.
- ✓ Se logra evidenciar que el proceso de pultrusión es constante lo que no genera pérdida en el tiempo de producción.
- ✓ El acabado del producto final genera un acabado superficial excelente.
- ✓ Este proceso también da la versatilidad de generar dimensiones longitudes así como pequeñas y largas.
- ✓ La flexibilidad del producto sin tener pérdida de resistencia
- ✓ Se una gran variedad de refuerzos y preformas con una amplia variedad de resinas tanto termoestables como termoplásticas que ayudan a mejorar las propiedades del producto final.
- ✓ Al momento del proceso de pultrusión se observa que este proceso no necesita gran cantidad de mano de obra sino al contrario su alta velocidad de producción se genera por la alta automatización y continuidad del proceso.
- ✓ La precisión dimensional del producto se debe a la alta calidad de la superficie del molde que genera un acabo casi perfecto.

Estos son algunos de los inconvenientes del proceso de pultrusión:

- ✓ Un inconveniente habitual en el proceso de pultrusión es su baja velocidad de 3 m/min que comparada con otros procesos es relativamente lenta.
- ✓ La necesidad de generar un molde con acabados dimensionales perfectos y finos para no impedir el avance de la pieza en el proceso.
- ✓ La necesidad de generar un sistema de calentamiento óptimo para proceso de pultrusión ocasiona un incremento en el costo del proceso.

- ✓ La dificultad de fabricar estructuras que no sean unidimensionales tales como barras o perfiles.
- ✓ La dificultad de orientar las fibras en ángulos óptimos.

Tabla 5. Propiedades mecánicas.

	Perfiles		Varillas Planchas
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal
Densidad	1,85 Kg / dm ³		1,9 Kg / dm ³
Resistencia Tracción	250 Mpa	60 Mpa	1.000 Mpa
Resistencia flexión	250 Mpa	60 Mpa	1.000 Mpa
Módulo E (tracción)	23.000 Mpa	8.000 Mpa	40.000 Mpa
Módulo E (flexión)	25.000 Mpa	9.000 Mpa	45.000 Mpa
Elongación en rotura	1,0 - 1,8 %		2%
Resistencia a la compresión	450 Mpa	90 Mpa	450 Mpa
Módulo de compresión	10.000 Mpa	4.000 Mpa	30.000 Mpa
Resistencia al impacto	1.600 J / m		2.000 J / m
Dureza brécol	40		50

Fuente: Nioglas S.L22

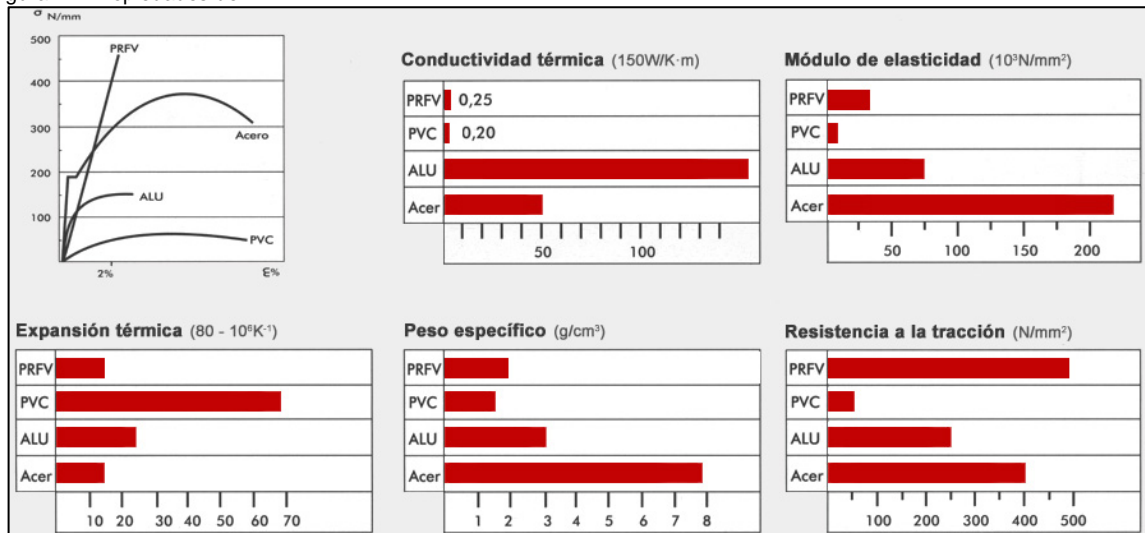
Figura 26. Prueba mecánica sobre perfil de pultrusión.



Fuente: Nioglas S.L22.

²² Nioglas S.L²², [En línea]. Disponible en: <<http://www.nioglas.com/propiedades.php#mecaniques>>

Figura 27. Propiedades de PRFV



Fuente: Nioglas S.L.²²

Tabla 6. Propiedades Eléctricas Y Térmicas

Resistencia inter laminar al corte	70 Mpa
Resistencia específica de aislamiento	10 ¹⁰ 10 ¹⁵ Ohm/cm
Resistencia de superficies	10 ¹⁰ 10 ¹³ Ohm
Resistencia dieléctrica	5-10 kV/mm
Índice CTI	KA 3c / KB 500 / KC 600
Constante dieléctrica	<5
Factor de disipación	0,01
Coefficiente de expansión térmica	12*10E6 I/K
Conductividad térmica	0,2 - 0,6 W/m*K
Capacidad de calentamiento	1,0 1,2 kJ/Kg*K
Temperatura continua máxima	-100 bis +155 (180) °C
Absorción de agua	0,15%
Temperatura crítica bajo carga	200°C
Resistencia a la incandescencia	Nivel 2b
Resistencia al fuego	B2 /UL94 V1, UL94 V0, DIN 5510 S4, SR2, ST2, A STM E84 / A STM D635

Fuente: Nioglas S.L.²²

Tabla 7. Propiedades en el tiempo.

	Corto Tiempo		Largo Tiempo	
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
Resistencia a la flexión	135 Mpa	25 Mpa	70 Mpa	20 Mpa
Resistencia a la tensión	135 Mpa	25 Mpa	70 Mpa	15 Mpa
Resistencia a la compresión	135 Mpa	25 Mpa	70 Mpa	20 Mpa
coeficiente de dilatación lineal longitudinal=transversal	17 Mpa		8 Mpa	

Fuente: Nioglas S.L.²²

Tabla 8. Resistencia Química

Entorno	% concentración	Máx. Temp °F / °C	% concentración	Máx. Temp °F / °C
Ácido acético	50	180 / 82	50	125 / 52
Hidróxido de aluminio	100	170 / 77	100	160 / 71
Cloruro amónico	ALL	190 / 88	ALL	170 / 77
Hidróxido de amonio	28	100 / 38	28	N / R
Bicarbonato de amonio	50	150 / 65	15	125 / 52
Entorno	% concentración	Máx. Temp °F / °C	% concentración	Máx. Temp °F / °C
Sulfato de Amonio	ALL	200 / 93	ALL	170 / 77
Benceno	N / R	N / R	N / R	N / R
Ácido benzoico	SAT	200 / 93	SAT	150 / 66
Bórax	SAT	200 / 93	SAT	170 / 77
Carbonato de calcio	ALL	180 / 82	SAT	170 / 77
Nitrato de calcio	ALL	200 / 93	ALL	180 / 82
Tetracloruro de carbono	100	75 / 24	N / R	N / R
Cloro gas seco	...	170 / 77	...	140 / 60
Cloro del agua	SAT	180 / 82	SAT	80 / 27
Ácido crómico	10	120 / 49	5	70 / 21
Ácido cítrico	ALL	200 / 93	ALL	170 / 77
Cloruro de cobre	ALL	200 / 93	ALL	170 / 77
Cianuro de cobre	ALL	200 / 93	ALL	170 / 77
Nitrato de cobre	ALL	200 / 93	ALL	170 / 77
Etanol	50	90 / 32	50	75 / 24
Etilenglicol	100	200 / 93	100	90 / 32
Cloruro férrico	ALL	200 / 93	ALL	170 / 77
Cloruro ferroso	ALL	200 / 93	ALL	170 / 77

Tabla 8. (Continuación)

Entorno	% concentración	Máx. Temp °F / °C	% concentración	Máx. Temp °F / °C
Formaldehído	ALL	100 / 38	50	75 / 24
Gasolina	100	150 / 65	100	80 / 27
Glucosa	100	200 / 93	100	170 / 77
Glicerina	100	200 / 93	100	150 / 66
Ácido Bromhídrico	50	120 / 49	50	120 / 49
Ácido clorhídrico	37	100 / 38	37	75 / 24
Peróxido de hidrógeno	30	100 / 38	5	100 / 38
Ácido láctico	ALL	200 / 93	ALL	170 / 77
Cloruro de litio	SAT	200 / 93	SAT	150 / 66
Cloruro de magnesio	ALL	200 / 93	ALL	170 / 77
Nitrato de magnesio	ALL	180 / 82	ALL	140 / 66
Sulfato de zinc	ALL	200 / 93	ALL	170 / 77

Donde sus convenciones son: *ALL (concentraciones),SAT (Soluciones Saturadas), N / R (No Recomendable), *** (Información No Disponible)

Fuente: Nioglas S.L.22

Debido a las propiedades que estos materiales generan, las desventajas son más encaminadas hacia lo tecnológico del proceso, es decir, los principales inconvenientes que se tienen son:

- a. Una desventaja habitual en el proceso de pultrusión es su baja velocidad de 3 m/min que comparada con otros procesos es relativamente lenta.
- b. La necesidad de generar un molde con acabados dimensionales perfectos y finos para no impedir el avance de la pieza en el proceso.
- c. La necesidad de generar un sistema de calentamiento óptimo para proceso de pultrusión ocasiona un incremento en el costo del proceso.
- d. La dificultad de fabricar estructuras que no sean unidimensionales tales como barras o perfiles.
- e. La dificultad de orientar las fibras en ángulos óptimos.

2.3.12 Retos de pultrusión

Actualmente el proceso de pultrusión busca acabar con aquellos inconvenientes que posee el proceso actualmente, para poder aumentar la producción y disminuir costos.

Hay que tener en cuenta que para obtener un proceso de pultrusión adecuado se debe mejorar la eficiencia de la línea de pultrusión, la impregnación de la fibra, la arquitectura de la fibra, las características finales del producto y los parámetros del proceso de pultrusión (velocidad de tracción, temperatura, molde y post procesado).

Se han obtenido grandes avances en el proceso de pultrusión por medio de nuevos materiales e innovación del proceso.

- ✓ Material innovador:
 - Poliuretanos: Este material es muy importante actualmente en el proceso de pultrusión, pues con este material se han realizado innovaciones en el proceso generando suprimir inconvenientes de las resinas tradicionales. El poliuretano posee mejores propiedades mecánicas y físicas que los vinil éster y poliéster, sus ventajas más conocidas al momento de humectar la fibra, el aumento de adhesión en fibras de refuerzo, su bajo contenido en zonas secas y su mínima contracción. Actualmente se han elaborado híbridos entre resina poliuretano y resina poliéster generando resultados óptimos para el proceso. El poliuretano posee mayor resistencia originando que los perfiles tradicionales con espesor grande cambien de una manera significativa en su peso siendo muy ligeros reemplazando zonas Mat por refuerzos unidireccionales. Los transformadores al tener el mismo grosor en los perfiles pueden generar rigidez sin pérdida de dureza y mayor resistencia. Otra gran propiedad de poliuretano es la disponibilidad para procesos mucho más veloces en la línea de producción y su casi perfecto acabado en las piezas pultruidos, generan menos desperdicios de resinas que los procesos tradicionales. Estas características mencionadas anteriormente son las causantes de que el proceso de pultrusión aumente su productividad y minimice los costos del producto.

- ✓ Fibras y Resinas naturales: Recientemente los fabricantes de fibras pultruidos han logrado que el proceso sea más competitivo usando materia prima de bajo costo, en este caso fibras y resinas naturales. Principalmente se han hecho investigaciones para reemplazar los refuerzos tradicionales de fibra inorgánicas por fibra natural demostrando su bajo costo y viable uso algunas de sus principales propiedades son:
 - Bajo costo
 - Baja densidad
 - Reducción de peso
 - No son abrasivas con el equipo
 - Son biodegradables
 - Son reciclables
 - Reducción de energía en un 80% para su obtención
 - Emisiones neutrales de CO2

En la literatura se han encontrado perfiles obtenidos y caracterizados por pultrusión con refuerzos como cáñamo en forma de hilo que se ve en la Figura 28 inciso A, matt o tejido representado en la Figura 28 inciso B y yute-lino con un polímero termoplástico como propileno que se puede observar en la Figura 28 inciso C. También se ha realizado un estudio con el objetivo de desarrollar nuevos tratamientos en las fibras naturales o aditivos para las resinas con el fin de mejorar la humectabilidad de la fibra natural durante el proceso de pultrusión.

Figura 28. Fibras Naturales de refuerzo: A) Hilo de cañamo, B) Matt tejido C) Yute-lino.



Fuente: Fibras naturales, [En Línea]. Disponible en: <<http://www.naturalfibres2009.org/es/fibras/>>

El estudio de resinas naturales también está en auge para el proceso de pultrusión, es decir, se pueden considerar como potenciales sustitutas de las resinas derivadas del petróleo. Estos nuevos sistemas son medioambientalmente favorables y permiten una reducción de costos sin comprometer propiedades mecánicas del producto final como resistencia a la flexión, módulo de Young y temperatura de transición vítrea. Además se puede obtener un buen acabado superficial y se mejora la resistencia al impacto y propiedades como la viscosidad y el tiempo de vida que son adecuadas para pultrusión. También se reduce la fuerza de tiro necesaria durante el proceso gracias a la acción lubricante del aceite de soja.

2.3.12.1 Innovaciones en el procesado

Aunque los elementos básicos de todas las máquinas de pultrusión son muy similares, se están realizando importantes avances para lograr mejorar el proceso y aumentar su competitividad en el mercado. Las principales innovaciones se centran en los siguientes aspectos:

- ✓ **Fabricación de perfiles curvos:** La firma alemana Thomas Techkin + Innovation, especialistas en el proceso de pultrusión, han desarrollado una tecnología innovadora que permite la producción en continuo de perfiles curvos, a partir de materiales reforzados con fibra de vidrio²³. En esta nueva tecnología, llamada radio pultrusión, el actual principio de la pultrusión se modifica, es decir, el material ya no es tirado a través del molde, sino que el molde es desplazado sobre el material. De esta manera se asegura que la forma del perfil queda definida por su sección.

23 Texto extraído principales-avances-en-pultrusión [En línea]. Disponible en:

<<https://col125.mail.live.com/mail/ViewOfficePreview.aspx?messageid=mgagMKoXVO5BGGn9idZ1x5NA2&folderid=flinbox&attindex=0&cp=-1&atdepth=0&n=6924025>>. Pag 12>

Figura 29. Perfiles curvos obtenidos mediante radio-pult



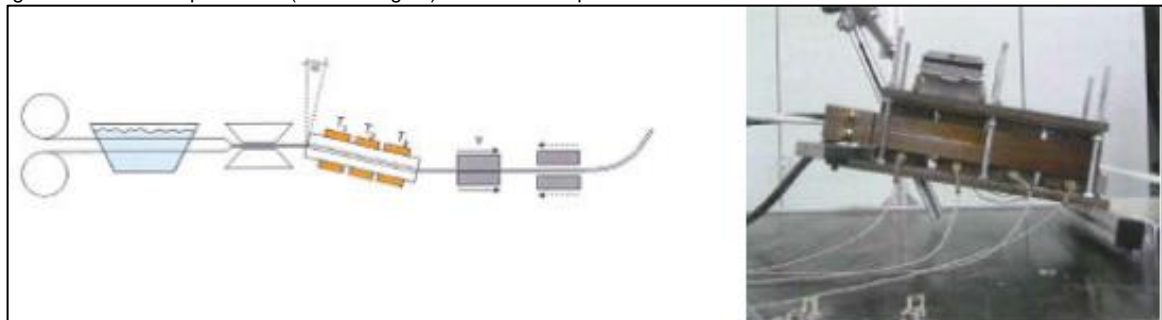
Fuente: Informe de vigilancia tecnológica: principales avances en pultrusión y smc (14)

Este tipo de perfiles curvos son muy valiosos para la construcción de aviones (cola, alas, etc.) ya que la mayoría de los perfiles en los aviones son curvados o esféricos, con un radio de curvatura entre 2 a 12 metros, y hasta ahora se fabrican con materiales metálicos.

El uso de CFRP (plástico reforzado con fibra de carbono) proporciona unas mejores propiedades comparados con los perfiles metálicos pero, actualmente, el proceso de producción (por ejemplo por RTM) hace que no sean competitivos con los perfiles metálicos. Por esto, el desarrollo de perfiles curvos en un proceso tan eficiente como es la pultrusión proporciona una alternativa muy interesante que se está estudiando actualmente.

En la 9th World Pultrusión Conference en Roma, la Universidad de Bremen presentó un trabajo sobre perfiles curvos. Lograron obtener perfiles curvos por pultrusión, de calidad constante, con un radio entre 3 y 10 metros. Para ello estudiaron diferentes variaciones en el proceso y ajustando la pendiente en la línea de pultrusión, la velocidad óptima y las temperaturas en el interior del molde, consiguieron obtener perfiles con curvaturas repetibles. El radio del perfil obtenido es una función del ángulo de la pendiente de la línea de pultrusión y de los parámetros elegidos (14).

Figura 30. Molde en pendiente (con un ángulo) en la línea de pultrusión



Fuente: Informe de vigilancia tecnológica: principales avances en pultrusión y smc (14)

2.3.13 Normativa

Al ser un proceso que en Colombia 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 (14):

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

Tabla 9. Normas aplicables en 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: AENOR – Asociación Española de Normalización y Certificación. [En línea]. Disponible en: <<http://www.aenor.es/aenor/aenor/perfil/perfil.asp#.VHVbhYuG-So>>

- b. En Japón

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

- c. 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 10. Normas técnicas ASTM

Tipo de Norma	Numero de Norma	Descripción
ANSI/ASTM	F 1092	Especificación estándar para la fibra de vidrio (GRP) pultrusión abierta - tiempo tormenta y guardia, sistemas de barandillas cuadrados. La revisión de la norma ANSI / ASTM F1092-1997 se aprobó el 01 de Marzo de 2004.

Tabla 10. (Continuación)

Tipo de Norma	Numero de Norma	Descripción
ASTM	C 581	Método de prueba para resistencia química de resinas termo-endurecibles usadas en estructuras reforzadas con fibra de vidrio.
ASTM	C 582	Especificación para laminados de plástico reforzados para estructuras auto portantes para uso en ambientes químicos.
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	D 2344	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 epóxica reforzada.
ASTM	D 2562	Práctica para clasificar defectos visuales en partes moldeadas de plásticos termo fijo reforzado.
ASTM	D 2563	Práctica 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 modulo y sus componentes.
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 en 2008.
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 reforzadas con fibra de vidrio fabricadas mediante la pultrusión.

Tabla 10. (Continuación)

Tipo de Norma	Numero de Norma	Descripción
ASTM	D 3918	Terminología de uso corriente en relación con plástico reforzado con productos pultruidos. Aprobado en 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 4350	Método de prueba de índice de corrosión de plásticos y complementos.
ASTM	D 4385	La práctica estándar para la clasificación de los defectos visuales en productos pultruidos termoestables reforzados de plástico.
ASTM	D 4475	Método de prueba estándar para la fuerza cortante horizontal aparente de pultrusión varillas de plástico reforzado por el método corto de la viga. Esta norma fue aprobada en 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. Esta norma tuvo un cambio editorial aprobado en 2003.
ASTM	D 5117	Método de prueba estándar para la penetración de tinte de fibra de vidrio sólida armado de stock pultruidos.
ASTM	E 1922	Método de prueba estándar para la resistencia a la fractura traslaminar de materiales compuestos de matriz polimérica laminados y pultruidos.
ASME/ANSI	RTP – 1	Norma nacional americana para equipos resistentes a la corrosión de plástico termo fijo reforzado
SAE	AMS 3811B AMS 3812B	Varillas de fibra de aramida, resina de poliéster recubierto, pultrusión. Aprobado en agosto de 1998.

Fuente: ASTM INTERNATIONAL [En línea]. Disponible en:< <http://www.astm.org/>>

3. DISEÑO METODOLÓGICO

Para llegar a plantear una solución acorde al problema nombrado, se seguirá una metodología de diseño adecuada que contenga los pasos necesarios para planear un diseño metodológico y conceptual conveniente que se atenga a los requerimientos que el portador de este equipo requiera. Es por esto que el método escogido es una de las técnicas que más aspectos valora y por lo tanto más bases brindan, ya que, se fundamenta en la gestión de calidad dando herramientas para lograr el correcto diseño; este método es conocido por sus siglas en inglés “QFD” (*Quality Function Deployment*)²⁴ (15). 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. A continuación se realiza este despliegue llegando al diseño conceptual final.

3.1 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN CALIDAD

Para realizar este despliegue los autores seguirán los pasos descritos en el libro “The Mechanical Design Process, David Ullman” que conduzcan a realizar la casa de calidad que se observar en la Figura 35, que da los parámetros para realizar el diseño conceptual.

3.1.1 Identificación de clientes

En este paso se busca identificar los usuarios de este equipo, para este caso se puede afirmar que el principal cliente son los estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomas. El principal cliente serán los ingenieros adscritos a la facultad de ingeniería mecánica que tendrán un equipo didáctico para el apoyo curricular, más exactamente el área de procesos de manufactura con el tema de materiales plásticos encabezada por el Ing. Ricardo Alberto Forero Rubiano quien actualmente se encuentra a cargo.

3.1.2 Determinar las necesidades de los clientes

Para cumplir con este paso se realizó una serie de observaciones y encuestas sobre los requerimientos de los clientes buscando cumplirlos al fabricar con este diseño del equipo; se tuvieron en cuenta, igualmente, la opinión de la persona que actualmente posee esta máquina como lo es el Ing. Alfredo Beltrán de Perfiglass Ltda., gracias a la experiencia que él posee al usarla continuamente, esto debido a que se está realizando un refinamiento de un equipo ya existente. Teniendo en cuenta que el conocimiento que actualmente se tiene de esta máquina por parte de los estudiantes de la universidad es muy poca, principalmente se han acogido las demandas realizadas por el Ing. Ricardo Forero y por el gerente de la empresa antes descrita:

²⁴ QFD: Despliegue de la función calidad, es un método de gestión de calidad basado en transformar las demandas del usuario en la calidad del diseño, implementar las funciones que aporten más calidad, e implementar métodos para lograr calidad del diseño en subsistemas y componentes, y en última instancia a los elementos específicos del proceso de fabricación.

Tabla 11. Requerimiento de Cliente

Requerimientos de Cliente	
1	Dispositivo Tipo Modular
2	Instalación y Remoción del Dado
3	Dispositivo de Laboratorio
4	Espacio Utilizado
5	Normas De Seguridad
6	Ensamblaje
7	Mantenimiento
8	Manipulación
9	Peso Moderado del Dado y sus Piezas
10	Estabilidad Del Mecanismo
11	Tiempo De Ajuste
12	Costos
13	Máquina Ergonómica
14	Tipo de Corriente Usada

Fuentes: Ing. Ricardo Forero; Ing. Alberto Beltrán; Autores

Cada uno de estos requerimientos busca cumplir cierta necesidad como lo es:

- ✓ Dispositivo Tipo Modular: Ya que su objetivo es que sea un equipo usado en laboratorio, es indispensable que sea modular para su transporte, mantenimiento y ensamble en el laboratorio que actualmente es nombrado como “Laboratorio de Tratamientos Térmicos” ubicado en el cuarto piso del edificio Calatayud de la Universidad Santo Tomás, sede Bogotá.
- ✓ Instalación y remoción del dado: Como es factible fabricar diferentes tipos de perfil, se hace necesario su facilidad en tema de establecimiento de este subsistema, y extracción para limpieza.
- ✓ Dispositivo de Laboratorio: Debido a que este equipo solo se tendrá como ayuda didáctica para enseñar a los estudiantes, el número de productos y el tiempo de uso es más restringido que si se diseñara un equipo para producción en masa.
- ✓ Espacio Utilizado: Este es un criterio muy importante a tener en cuenta, ya que al ser un equipo de laboratorio, este se debe acoplar al espacio ya existente que ha de ser compartido con la máquina “Banco de Pruebas para Biodiesel” que actualmente se encuentra en ese mismo laboratorio.
- ✓ Normas de seguridad: La máquina de pultrusión tiene la característica de emplear resistencias eléctricas para su proceso, es por esto que las normas de seguridad al estar cerca o manipulando este objeto deben ser extremadas para evitar accidentes.
- ✓ Ensamblaje: Otra de sus características principales es el poder acoplar todos los mecanismos y piezas en el menor tiempo posible de instalación, este parámetro

también indica la flexibilidad de la máquina para poder cambiar el tipo de perfil que se requiera para efectuar el proceso de pultrusión.

- ✓ **Mantenimiento:** Es de vital importancia este parámetro para asegurar la vida óptima, su funcionalidad y que el proceso se efectúe correctamente.
- ✓ **Manipulación:** Este requerimiento nace del hecho que es un equipo con fines académicos por este motivo su manipulación debe ser fácil y segura con supervisión.
- ✓ **Peso Moderado del Dado y sus Piezas:** Como se va a implementar la fabricación de varios tipos de perfiles, el peso de cada uno para su respectiva instalación debe ser acorde a la fuerza promedio de una persona que tenga una edad de 17 años hacia adelante hasta un máximo de 55 años.
- ✓ **Estabilidad Del Mecanismo:** De los subsistemas con que cuenta la máquina, hay uno de ellos que maneja fluidos y el otro maneja temperaturas elevadas, es por ello que se hace necesario tener este requerimiento evitando perjuicios a la máquina y a las personas cerca.
- ✓ **Tiempo De Ajuste:** Al realizar el montaje para producir la platina o el perfil, el dado se debe deslizar para quedar centrado en el mecanismo y no pre-tensar la fibra, de ahí parte este criterio que busca que el tiempo no sea excesivo.
- ✓ **Costos:** Al ser diseñado como ayuda didáctica de la universidad Santo Tomas, se hace indispensable que el costo de la fabricación y puesta en marcha no supere el valor de una máquina industrial de las mismas características.
- ✓ **Máquina Ergonómica:** Este ítem es importante para la comodidad de las personas que hagan uso del equipo.
- ✓ **Tipo de Corriente Usada:** Esta es una variable a tener en cuenta en el diseño de los subsistemas para realizar los cálculos de consumo que genera la máquina y por lo tanto lograr adecuar el equipo en el laboratorio respectivo.

3.1.3 Importancia relativa de cada requerimiento

El siguiente paso es asignar un valor de ponderación a cada uno de los requisitos del cliente, el cual dará un avistamiento o una idea de la cantidad de esfuerzo, tiempo y dinero que se deberá invertir en alcanzar la satisfacción en cada requerimiento. Además brinda una mejor claridad al momento de realizar la lluvia de ideas con el fin de hallar el diseño conceptual que ofrezca mejor calidad.

Para realizar esta clasificación se habló con los actores influyentes y se determinó que factores influían más para la calidad tanto del trabajo como de la máquina, dicha ponderación se ve reflejada en la Tabla 12. Ponderación de los requerimientos.

Tabla 12. Ponderación de los requerimientos

Numero de Fila	Requerimientos de Cliente	Peso / Importancia
1	Dispositivo Tipo Modular	5
2	Instalación y Remoción del Dado	8
3	Dispositivo de Laboratorio	6
4	Espacio Utilizado	9
5	Normas De Seguridad	9
6	Ensamblaje	9
7	Mantenimiento	9
8	Manipulación	9
9	Peso Moderado del Dado y sus Piezas	7
10	Estabilidad Del Mecanismo	9
11	Tiempo De Ajuste	4
12	Costos	9
13	Máquina Ergonómica	8
14	Tipo de Corriente Usada	9

Fuentes: Ing. Ricardo Forero; Ing. Alberto Beltrán; Autores

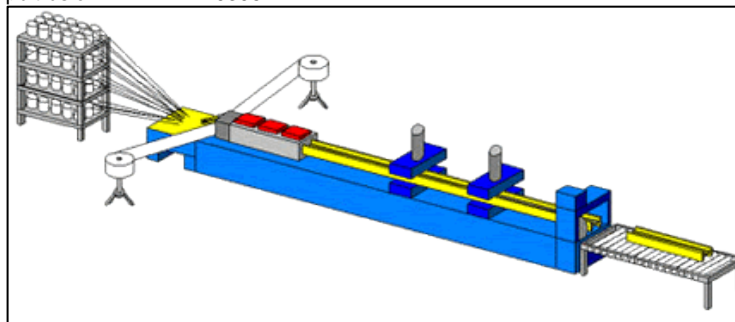
3.1.4 Identificar y evaluar la competencia.

En este punto se busca conocer cómo están posicionados actualmente los competidores que fabrican este tipo de máquinas, como estos cumplen los requerimientos que se tienen para esta investigación, cuales son los requerimientos de la industria y cuáles son las posibles oportunidades de mejora.

Para este caso se realiza la comparación entre tres de los más importantes fabricantes internacionales y que han logrado estandarizar sus máquinas, ya que esto es un referente para conseguir alcanzar y posiblemente mejorar localmente la calidad que proviene del exterior.

El primer competidor es elaborado por la empresa **TOP GLASS S.P.A.**²⁵, fabricante del equipo con referencia **DETEP-MA0306TL** la cual tiene como característica fundamental que es un equipo con el menor valor comercial, posee fácil ensamble y su tamaño es muy cómodo.

Figura 31. Máquina de pultrusión DETEP-MA0306TL



Fuente: En línea, disponible en: <http://www.topglass.net/es/materiali/materiali_mac.asp>

²⁵ TOP GLASS S.P.A. Pultrusión. [En línea]. Disponible en: <<http://www.topglass.net/es/Default.asp>>

El segundo competidor con el que se compara el diseño es producido por la empresa **LIBERTY PULTRUSIONES**²⁶, es un equipo que cuenta con características tales como:

- ✓ Ventana de trabajo nominal de 8 "de ancho x 4" de alta
- ✓ Línea de enfriamiento de 8/ft de largo
- ✓ Extractor automático de doble alternativa.
- ✓ Max Fuerza de tracción: 4 Ton.
- ✓ Velocidad máxima de tracción: 120 in/min
- ✓ Control de Velocidad Hidráulica Proporcional.
- ✓ Máxima fuerza de cierre: 4 Ton.
- ✓ Tipo de sierra: Cut - Flying para cortar el diseño
- ✓ Manual seleccionable Saw Cut-off
- ✓ Paquete de control del calentador integrado de tres zonas
- ✓ Suministro eléctrico: 460/480 3-Ph 60 Hz
- ✓ Hidráulico Sistema de refrigeración: Agua de calor Intercambiador
- ✓ Elementos de manejo: Todos en un controlador de gráficos





Dicho equipo tiene como referencia: **PULFORCE 0804-8000**, es una máquina americana y tiene como característica principal la gran variedad en la producción de tipos de perfiles y su facilidad de operar gracias a sus sistemas de control.

Tabla 13. Máquina de pultrusión Pulforce 0804-5000



²⁶ Liberty Pultrusions - a Fiberglass Reinforced Plastics (FRP) Pultrusion Manufacturing Company. [En línea]. Disponible en: < <http://www.libertypultrusions.com/> >

Tabla 13. (Continuación)

Sistema de jalado del perfil	
	
Sistema control	
	

Fuente: En línea, disponible en: <<http://www.libertypultrusions.com/new-pultrusion-machines.htm>>

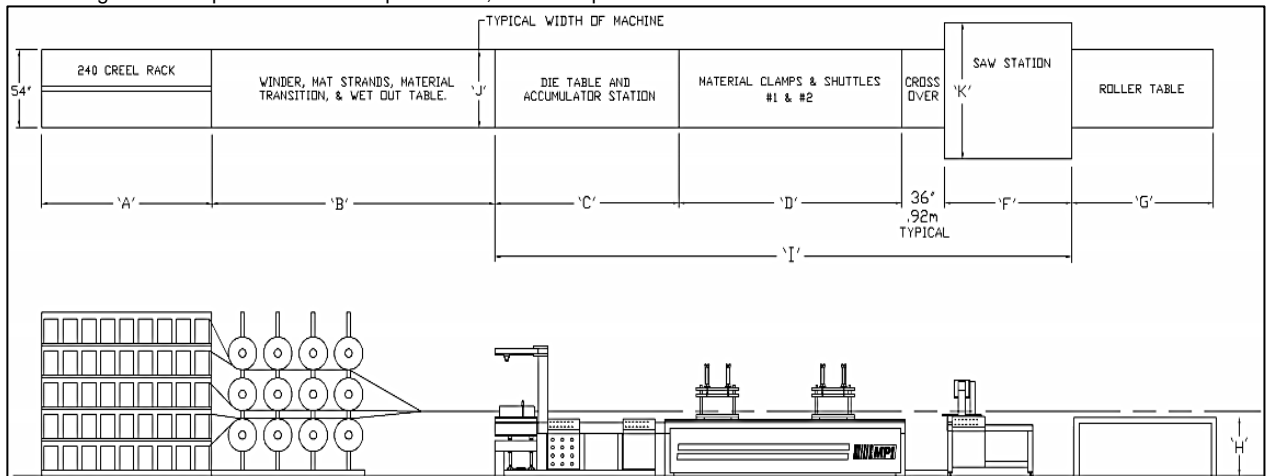
Por último, la tercera opción es diseñado por la empresa estadounidense con sede en Texas, **MACHINE PRODUCTS INC**²⁷, la cual es la que posee un mayor stock de posibilidades dependiendo de las necesidades del cliente, para este caso en especial se tomara el equipo con referencia **MPI 7** el cual es el más pequeño de su clase, esta máquina posee características en su mecanismo como:

Figura 32. Características de la máquina MPI7

MACHINE	ENVELOPE	PULL FORCE/ CLAMP PRESSURE	'A'	'B'	'C'	'D'	'E'
MPI 7	10' x 3-1/2' 250mm x 90mm	7,000 lbseoch	12' 3.67m	20' 6.1m	8' 2.44m	10' 3.00m	3' 0.92m
'F'	'G'	'H'	'I'	'J'	'K'	KVA	ZONES
5' 1.52m	10' 3.05m	3'6" 1.07m	26' 7.90m	21' 6.53m	3'6" 1.07m	40	4

Fuente: Disponible en línea: <<http://pultrusiononline.com/files/MPI-machine-layout.pdf>>

Figura 33. Disposición de la máquina MPI7, fabricada por Machine Product Inc.



Fuente: Disponible en línea: <<http://pultrusiononline.com/files/MPI-machine-layout.pdf>>

²⁷ Machine Products Inc, Pultrusion machines. [En línea]. Disponible en: <<http://pultrusiononline.com/>>

Figura 34. Máquina de pultrusión MPI 7



Fuente: Disponible en línea: <http://pultrusiononline.com/pultrusion/5-pultrusion-machines-photo.htm>

Una vez terminado de buscar los competidores con los cuales se hará la evaluación, se realiza una comparación de como ellos cumplen con los requisitos del cliente, dicha ponderación se realiza en una escala de 0 (siendo la más baja calificación dada al cumplir un 0% de objetivo) a 5 (siendo la calificación más alta dada al cumplir el 100% del objetivo).

En la Tabla 14. Análisis de competencia, se muestra:

- ✓ Numero de fila: Es el conteo de cada uno de los requerimientos.
- ✓ Requerimientos del Cliente: Los requerimientos que fueron nombrado en el numeral 3.1.2
- ✓ Peso/Importancia: Ponderación realizada en el numeral 3.1.3.
- ✓ Peso relativo: Es el valor en porcentaje de importancia de cada uno de los datos, al calcularlos la suma de todos ellos debe dar 100%, dicho cálculo se realiza dividiendo el termino entre la sumatorio de todos los términos de peso, así:

Ecuación 1. Calculo de peso relativo.

$$\text{Peso relativo} = \frac{\text{Peso/Importancia}}{\sum (\text{Peso/Importancia})}$$

Fuente: QFD Online. [En línea]. Disponible en: <http://www.qfdonline.com/templates/>

Tabla 14. Análisis de competencia

Número de Fila	Requerimientos de Cliente	Peso/Importancia	Peso Relativo	Análisis de Competencia (0=0%, 5=100%)			
				Producto	TOP GLASS S.P.A.	Liberty Pultrusions	Machine Products Inc.
1	Dispositivo Tipo Modular	5	4,55	4	1	2	2
2	Instalación y Remoción del Dado	8	7,27	5	3	3	3
3	Dispositivo de Laboratorio	6	5,45	5	2	2	2
4	Espacio Utilizado	9	8,18	4	4	3	2
5	Normas De Seguridad	9	8,18	4	5	5	5
6	Ensamblaje	9	8,18	4	4	2	3
7	Mantenimiento	9	8,18	3	5	4	1
8	Manipulación	9	8,18	4	4	3	2
9	Peso Moderado del Dado y sus Piezas	7	6,36	5	4	1	3
10	Estabilidad Del Mecanismo	9	8,18	5	5	5	5
11	Tiempo De Ajuste	4	3,64	4	1	3	5
12	Costos	9	8,18	4	3	2	1
13	Máquina Ergonómica	8	7,27	5	4	5	4
14	Tipo de Corriente Usada	9	8,18	5	2	2	3
RESULTADO				4,4	3,4	3,0	2,9

Fuente: Autores; Topglass S.P.A., Liberty Pultrusions, Machine Products Inc²⁸

²⁸ Topglass S.P.A., [En línea], disponible en: <<http://topglass.com/index.php/es/>>; Liberty Pultrusions. [En línea], disponible en: <<http://www.libertypultrusions.com/>>; Machine Products Inc. [En línea], disponible en: <<http://pultrusiononline.com/>>

Tabla 15. Especificaciones de Ingeniería

	Número de Columna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Número de Fila	Características de Calidad	Numero de Subsistemas [#]	Tiempo utilizado en hacer el montaje del dado [min]	Número de productos que produce [#]	Medidas del espacio donde se colocara el equipo en coordenadas (largo, ancho, alto) [m]	Puntos Calientes [#]	Número de piezas que compone la máquina [#]	Frecuencia entre Mitos basado en confiabilidad [# de fallas]	Controles de mando [#]	Peso moldes del dado [Kg]	Numero de Anclajes [#]	Tiempo de demora en mover el dado [sg]	Costos de fabricación [COP]	Altura ergonómica de trabajo [m]	Consumo eléctrico de la máquina [V]
1	Numero de Subsistemas [#]														
2	Tiempo utilizado en hacer el montaje del dado [min]	+													
3	Número de productos que produce [#]	+	+												
4	Medidas del espacio donde se colocara el equipo en coordenadas (largo, ancho, alto) [m]	+	-	-											
5	Puntos Calientes [#]	-	+	-	-										
6	Número de piezas que compone la máquina [#]	+	+	+	-	-									
7	Frecuencia entre Mtos basado en confiabilidad [# de fallas]	+	-	+	+	-	+								
8	Controles de mando [#]	+	-	-	-	-	+	+							
9	Peso moldes del dado [Kg]	-	+	-	-	-	-	-	-						
10	Numero de Anclajes [#]	+	-	-	-	-	+	+	-	-					
11	Tiempo de demora en mover el dado [sg]	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+				
12	Costos de fabricación [COP]	+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-			
13	Altura ergonómica de trabajo [m]	-	+	-	+	-	-	-	+	-	-	+	-		
14	Consumo eléctrico de la máquina [V]	+	-	+	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	

Fuente: Autores

3.1.5 Especificaciones de ingeniería

El objetivo en este numeral es desarrollar un conjunto de especificaciones ingenieriles para lograr cumplir cada uno de los requisitos de los clientes. Dichas especificaciones ingenieriles son parámetros meta de construcción que deben ser cuantificables y son la base para determinar, si el diseño conceptual generado cumple con los requisitos propuestos en el numeral 3.1.2, además se realiza una identificación de las relaciones que poseen las especificaciones del cliente, es decir, que tanto una categoría afecta otra en su diseño. Dicha afección se puede dar en dos sentidos, el primero sería el positivo, el cual coexistiría cuando la mejora de un requerimiento mejorará intrínsecamente la otra obligación, es decir, que intrínsecamente se mejorara el dispositivo y se denotara por el signo "+". El sentido negativo es cuando la mejora de un requerimiento puede dañar otro y se vería forzado a una modificación, este elemento se indicara con el signo "-" como se ve en la Tabla 15. Especificaciones de Ingeniería

3.1.6 Relación de los requisitos del cliente con las especificaciones de ingeniería

Para cumplir a cabalidad con el QFD, resta realizar una serie de paso como son:

- ✓ Realizar una ponderación entre cada uno de los requisitos del cliente y cada una de las especificaciones de ingeniería; esta calificación se realiza midiendo la correlación de cada ítem con el otro, dando una evaluación que se mide gracias a las siguientes relaciones: relación fuerte que se medirá por el número 9 o por el signo Θ ; relación media representada por el número 6 o el signo O y relación débil descrita por el número 3 o el signo \blacktriangle .
- ✓ Se debe colocar así mismo los límites objetivo, es decir los valores cuantificables con los que se medirá el cumplimiento de cada requerimiento de ingeniería.
- ✓ Se medirá también el grado de dificultad o esfuerzo necesario para cumplir cada uno de los límites objetivo y la posibilidad de minimizar (\blacktriangledown), maximizar (\blacktriangle) o mantener dicho objetivo (x).

Tabla 16. Relación de los requisitos del cliente con las especificaciones de ingeniería

Número de Columna				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Peso Relativo				9,3	10	5,0	7,7	7,4	9,0	6,8	5,4	7,2	4,8	8,8	8,1	6,6	4,0
Dificultad (0 = Fácil de lograr, 10 = Muy Difícil)				0	4	6	8	2	10	7	3	7	3	7	10	7	0
Minimizar (▼), Maximizar (▲), u Objetivo (x)				▼	▼	▲	▼	x	▼	▼	▲	▼	x	▼	▼	x	▼
Límites Objetivo				5	6	3	(7.7, 6.5, 3.5)	3	67	10	3	5	10	10	\$19'000.000	1.2	110
Número de Fila	Máxima Relación valor de la fila	Peso Relativo	Características de calidad	Requerimientos de Cliente													
				Numero de Subsistemas [#]	Tiempo utilizado en hacer el montaje del	Número de productos que produce [#]	Medidas del espacio donde se colocara el	Puntos Calientes [#]	Número de piezas que compone la	Frecuencia entre Mitos basado en	Controles de mando [#]	Peso moldes del dado [Kg]	Numero de Anclajes [#]	Tiempo de demora en mover el dado [sg]	Costos de fabricación [COP]	Altura ergonómica de trabajo [m]	Consumo eléctrico de la máquina [V]
1	9	4,5	Dispositivo Tipo Modular	9	9	1	1	1	3	3	3	1	1	1	3	1	1
2	9	7,3	Instalación y Remoción del Dado	1	9	1	1	3	3	1	3	9	1	9	3	1	1
3	9	5,5	Dispositivo de Laboratorio	9	3	9	9	1	9	1	1	1	1	3	3	3	3
4	9	8,2	Espacio Utilizado	3	9	1	9	1	3	1	1	1	3	1	1	3	1
5	9	8,2	Normas De Seguridad	1	1	1	3	9	1	9	3	1	3	9	3	1	1
6	9	8,2	Ensamblaje	9	9	3	1	1	9	1	1	3	1	3	1	1	1
7	9	8,2	Mantenimiento	9	1	3	3	1	9	9	1	3	3	1	9	3	1

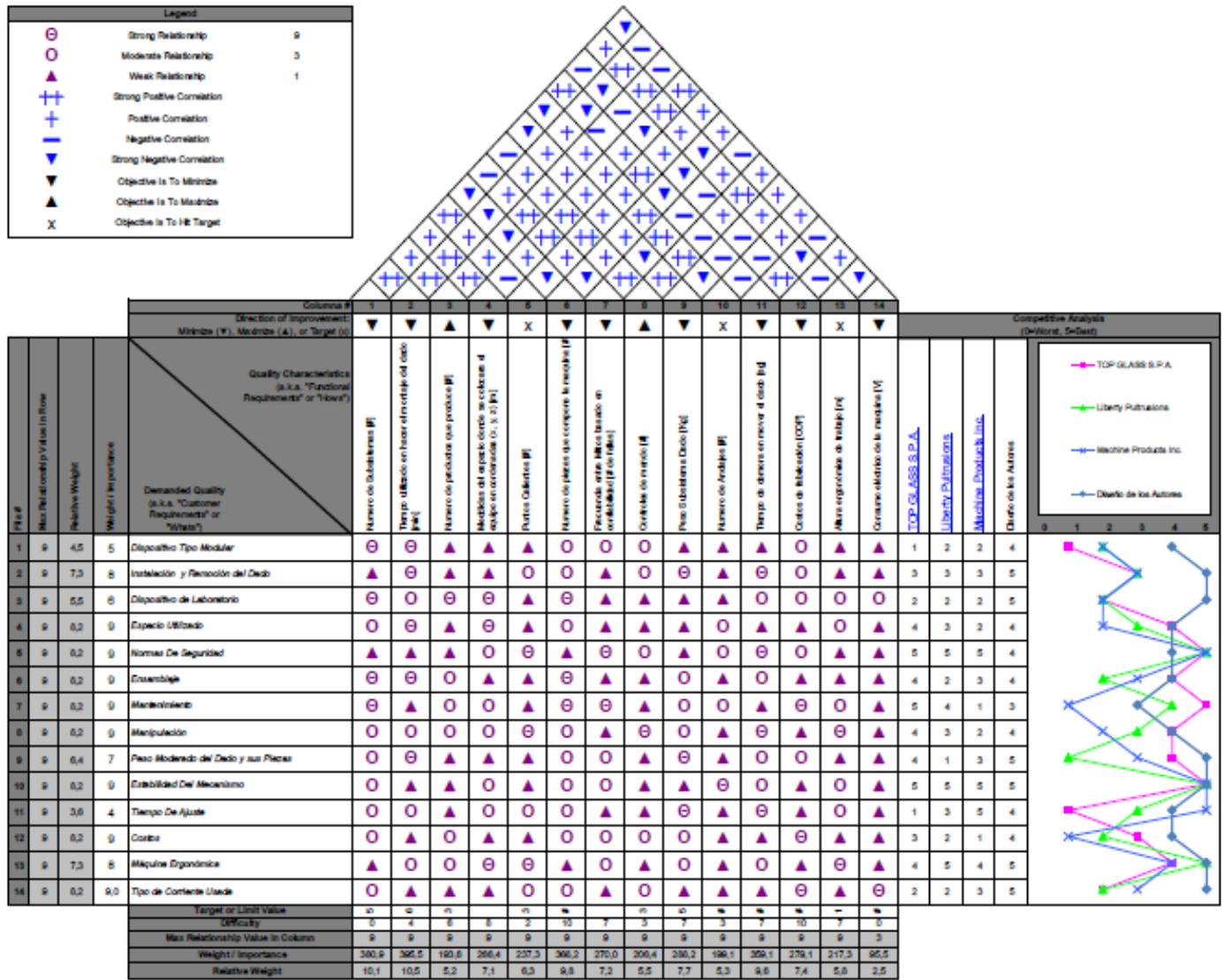
Tabla 16. (Continuación)

8	9	8,2	Manipulación	3	3	3	3	9	3	1	9	3	1	9	1	9	1
9	9	6,4	Peso Moderado del Dado y sus Piezas	3	9	1	1	1	3	3	1	9	1	3	3	1	1
10	9	8,2	Estabilidad Del Mecanismo	3	1	1	3	1	3	3	1	1	9	3	1	3	1
11	9	3,6	Tiempo De Ensamble	3	9	1	3	3	3	1	1	9	1	9	1	3	1
12	9	8,2	Costos	3	1	3	1	1	3	3	3	3	1	1	9	1	1
13	9	7,3	Máquina Ergonómica	1	3	3	9	9	1	3	1	3	1	3	1	9	1
14	9	8,2	Tipo de Corriente Usada	3	1	1	1	3	3	1	3	1	1	1	9	1	9

Fuente: Autores

Todo lo anteriormente descrito, lleva a ensamblar los pasos realizados al generar el despliegue de la función de calidad, buscando así realizar en conjunto la casa de la calidad y determinar los grados de importancia que se tendrán en cuenta con mayor prelación al momento de realizar la lluvia de ideas buscando el diseño conceptual que más se adecue a los requerimientos que los clientes buscan alcanzar. Dicho ensamble lo se ve reflejado en la Figura 35 con las ponderaciones necesarias.

Figura 35. Casa de calidad QFD

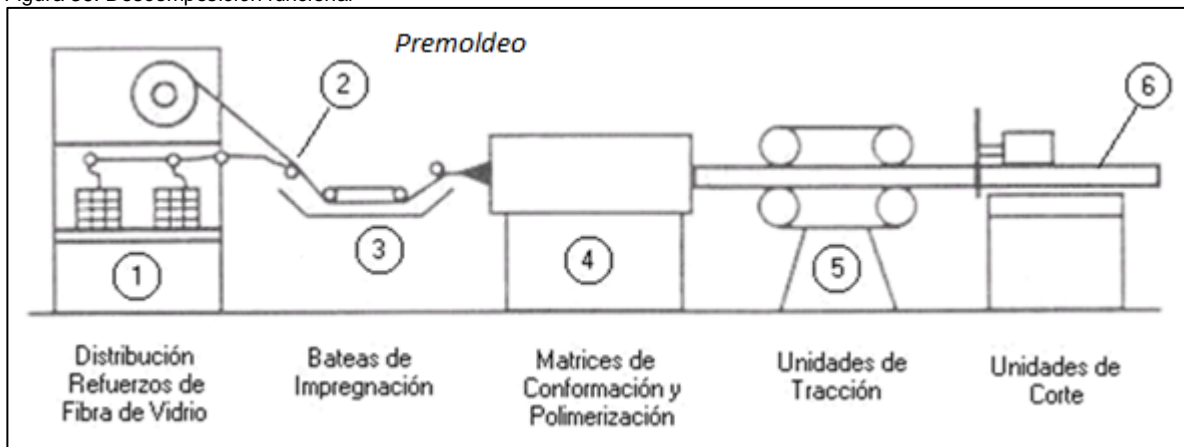


Fuente: Autores, casa disponible en qfdonline. [En línea]. Disponible en: <http://www.qfdonline.com/>

4. GENERACIÓN DE CONCEPTOS

Una vez realizado el análisis de calidad, se ejecuta la generación de conceptos con base en la funcionalidad que cada equipo requiere, las exigencias del cliente y las necesidades de ingeniería. Por ello se realiza una descomposición práctica del sistema que dependerá netamente del cometido que dicho elemento ejecute en el funcionamiento de la máquina, el cual se denotara como subsistema y estará dividido en 6 partes así como se expuso en el numeral 2.3.9:

Figura 36. Descomposición funcional



Fuente: PERFIGLASS LTDA, [En línea]. Disponible en: <<http://perfiglassltda.com/temp/wp-content/uploads/2013/10/pultricion.png>>

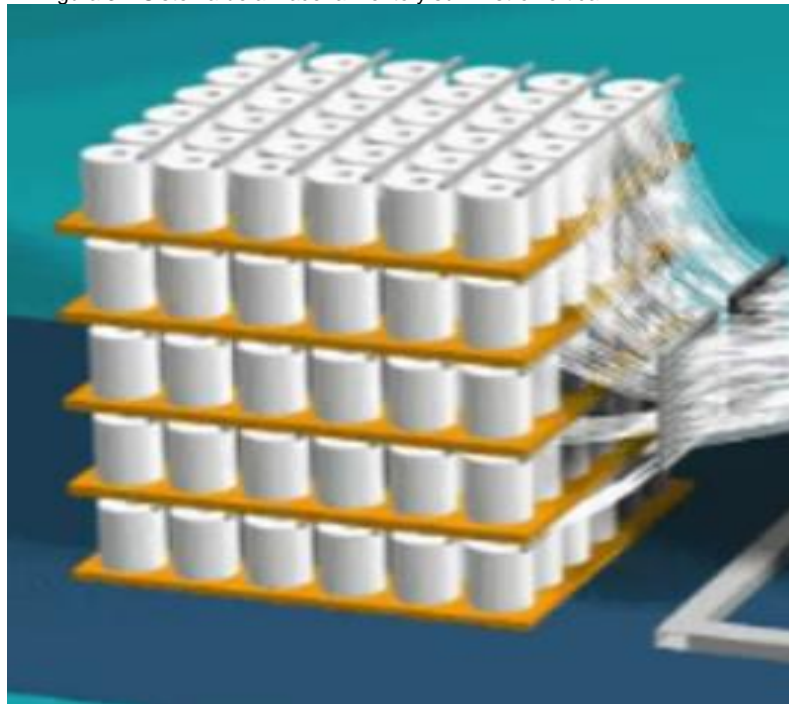
Además se realizara una tabla de ponderación de cero (0) siendo la calificación más baja y expresando que no cumple a cinco (5) siendo la más alta y por ende cumple al 100%, en cada uno de los ítem en la que se analizan los factores básicos al tener en cuenta a la hora de hacer la elección, realizando la salvedad que todas las piezas que acá se exponen cumplen con los requerimientos del cliente y de ingeniería. Dichos factores son tales como el costo en el que se evalúa el valor económico del subsistema; el indicador de manufactura en el que se toma en cuenta el proceso de fabricación de las diferentes piezas de la máquina, categorizándolo desde los más sencillos pero de calidad con el número de piezas a fabricar; el espacio que es un parámetro que se convierte en el principal objetivo a cumplir dentro de la realización de este proyecto, ya que, la Universidad cuenta con pocos espacios para este tipo de equipos; el mantenimiento que es básico tener en cuenta en un dispositivo de este tipo pues es fundamental para preservarlo y así alargar de esta manera su vida útil; la facilidad de operación para cualquier tipo de operario; el ensamble y la fiabilidad del dispositivo, van de la mano con el mantenimiento, puesto que un equipo fiable requiere en menor cantidad y a su vez si se hace de manera correcta y planeada previene fallas conservándolo en buen estado.

4.1 SUBSISTEMA 1: ALMACÉN DE FIBRA

Este es el primer equipo que se encuentra en la máquina pultrusora y es encargado del almacenamiento y suministro de la fibra de vidrio, debe ser diseñado rigurosamente para que soporte el peso de la cantidad de rollos que se van a utilizar dependiendo de la pieza que se va a fabricar; teniendo como premisa que el roving comercialmente lo venden por kilogramos y el rollo completo llega a pesar alrededor de 18 kilogramos.

Por esto se encuentra dos posibilidades que se adecuan al sistema, el primero es un sistema de almacenamiento y suministro vertical que se puede observar en la Figura 37 la cual cuenta con una estructura de dosificación más robusta, donde las bobinas de fibra de vidrio se sitúan de forma vertical y permiten la instalación de varios niveles para maximizar la cantidad de distribución de hilos y por otro lado se debe tener en cuenta que este tipo de almacenamiento es funcional para la fabricación de perfiles estructurales de grandes dimensiones. La segunda posibilidad a utilizar es un sistema de almacenamiento y suministro horizontal, en la que la estructura de dosificación ubica las bobinas de roving en forma plana de tal manera que la fibra es halada por la parte superior. Cuentan con su respectiva tuerca de sujeción para garantizar que la bobina de roving no se desplace y genere problemas durante el proceso como se evidencia en la Figura 38.

Figura 37. Sistema de almacenamiento y suministro vertical



Fuente: European Pultrusion Technology Association²⁹

²⁹ European Pultrusion Technology Association [En línea]. Disponible en: <<http://www.pultruders.com/en/pultrusion.html>>

Figura 38. Sistema de almacenamiento y suministro horizontal



Fuente: [En línea]. Disponible en: <<http://spanish.alibaba.com/product-gs-img/montado-spray-hasta-itinerante-de-fibra-de-vidrio-extremo-multi-pistola-itinerante-1371399750.html>>

Tabla 17. Matriz de ponderación del subsistema 1: Mueble

	Criterio y valoración							Total
	Manufactura	Operación	Ensamble	Espacio	Mantenimiento	Fiabilidad	Costo	
Opción 1	5	4	4	5	4	4	4	30
Opción 2	3	4	3	2	2	2	4	20

Fuente: Autores

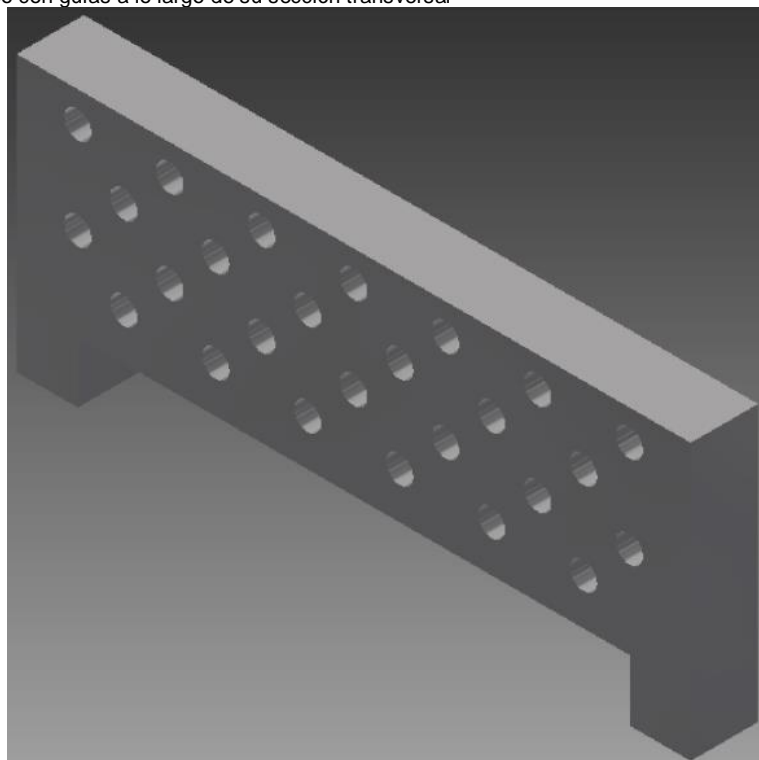
Según los requerimientos que por parte del cliente se tienen, como el de ser tipo modular, el espacio utilizado y la estabilidad del mecanismo conjugándolos con las necesidades de ingeniería, el sub-sistema que mejor cumple estos ítems es la opción 1 que se observa en la Figura 37 por que el rollo de fibra al ubicarse en posición horizontal genera que no rote sobre su eje permaneciendo estable. Además comercialmente los rollos de fibra que se consiguen no traen carrete y su desenvolvimiento es por la parte interna para evitar que se enrede, este sería la principal razón por la que se descarta la opción 2.

4.2 SUBSISTEMA 2: PRE MOLDEO

En el segundo subsistema se encuentra la platina de pre moldeo que es la encargada de generar la forma previa de la pieza que se fabricara con el fin de pasarla por el sistema de impregnación y ayudar a la eliminación del aire, humedad y para reducir la presión en la matriz principal consiguiendo así la homogeneidad de la pieza y del proceso.

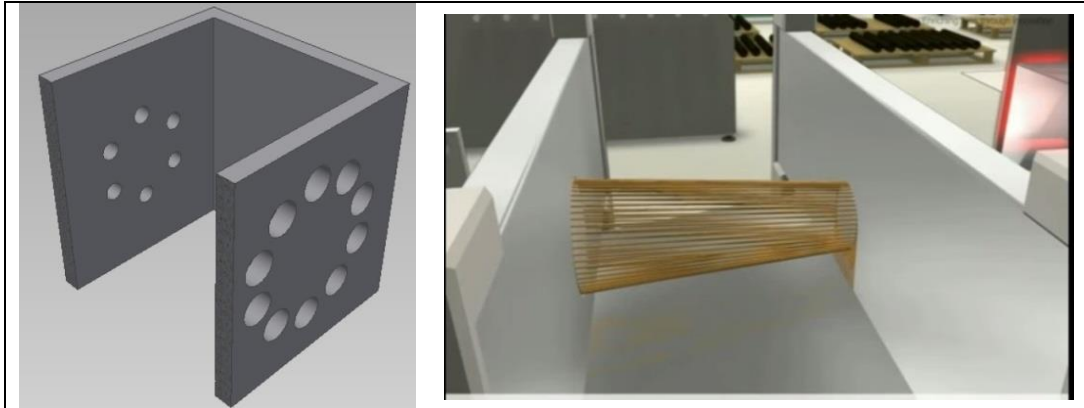
Se realiza la evaluación de los requerimientos a tres distintas opciones de este subsistema. La primera opción se conforma por una platina con orificios pasantes repartidos uniformemente a lo largo de su sección transversal tal como se ve en la Figura 39. La opción número 2 está conformada por una simetría cónica que está inmersa en un cubo la cual reduce el diámetro de paso del hilo y el diámetro de acción de la circunferencia que genera una preforma útil tal como se observa en la Figura 40 y en la Figura 41, y por último se tiene una platina en la cual aparecen combinadas una serie de guías circulares y otras rectangulares, que daría la geometría de las piezas a fabricar.

Figura 39. Pre moldeo con guías a lo largo de su sección transversal



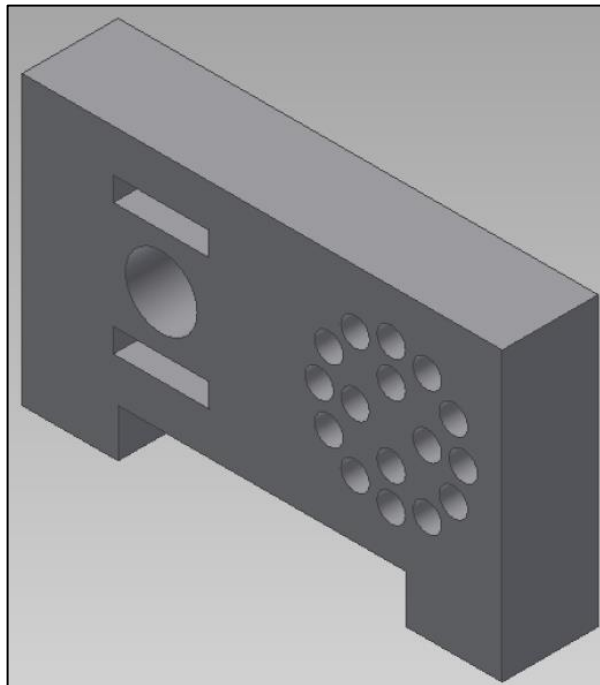
Fuente: Autores

Figura 40. Pre moldeo cónico



Fuente: Autores, Huntsman International LLC. [En línea]. Disponible en: <<https://www.youtube.com/watch?v=sxWtzlitq1A>>

Figura 41. Pre moldeo con ranuras combinadas



Fuente: Autores

Tabla 18. Matriz de ponderación del subsistema 2: Pre Moldeo

	Criterio y valoración							
	Manufactura	Operación	Ensamble	Espacio	Mantenimiento	Fiabilidad	Costo	Total
Opción 1	4	5	4	5	4	5	4	31
Opción 2	5	3	4	5	4	2	5	28
Opción 3	3	4	4	5	3	4	3	26

Fuente: Autores

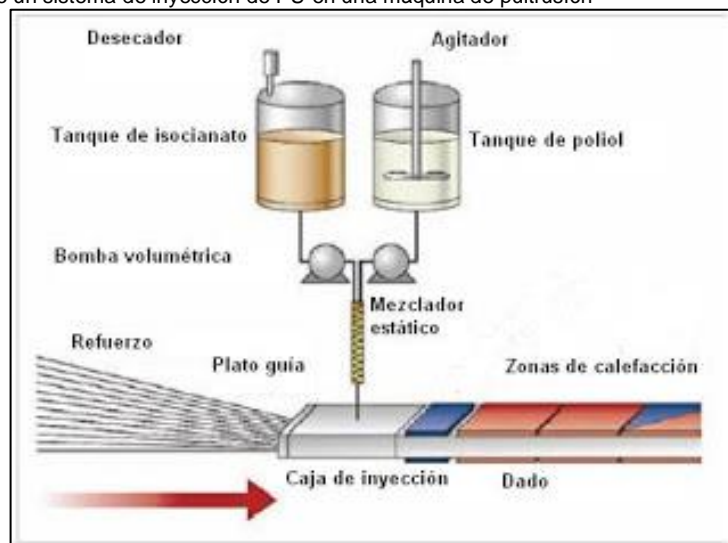
La versatilidad que brinda la opción número 1 permite cumplir los requerimientos del cliente y de ingeniería, ya que la distribución de agujeros diagonal genera que se pueda pre-formar la figura de la pieza que se piensa construir y no sesgarla a las formas de circunferencia y platina sino que se puede realizar casi cualquier perfil, como se menciona en el numeral 2.3.10 y la Figura 25. Tipos de perfiles pultruidos.

4.3 SUBSISTEMA 3: RESERVORIO E IMPREGNACIÓN

El tercer paso para el proceso de pultrusión se da cuando la mezcla de resina que se encuentra en estado líquido y el catalizador que acelera el proceso, humectan la fibra de tal forma que no tenga zonas secas para pasar por el dado y continuar con su proceso.

Al estudiar los requerimientos que ingeniería versus los aspectos dados por el cliente, se determinó idear tres opciones que cumplen con las expectativas planteadas para así determinar la mejor opción, dichas alternativas son: la primera se basa en una impregnación por inyección de resina, el cual cuenta con dos bombas, la primera inyecta la resina y la segunda los aditivos requeridos en el proceso; se inyecta de forma controlada de tal manera que no se generen desperdicios de resina y el sistema esta acoplado a la entrada del molde, tal como se observa en la Figura 42.

Figura 42. Esquema de un sistema de inyección de PU en una máquina de pultrusión



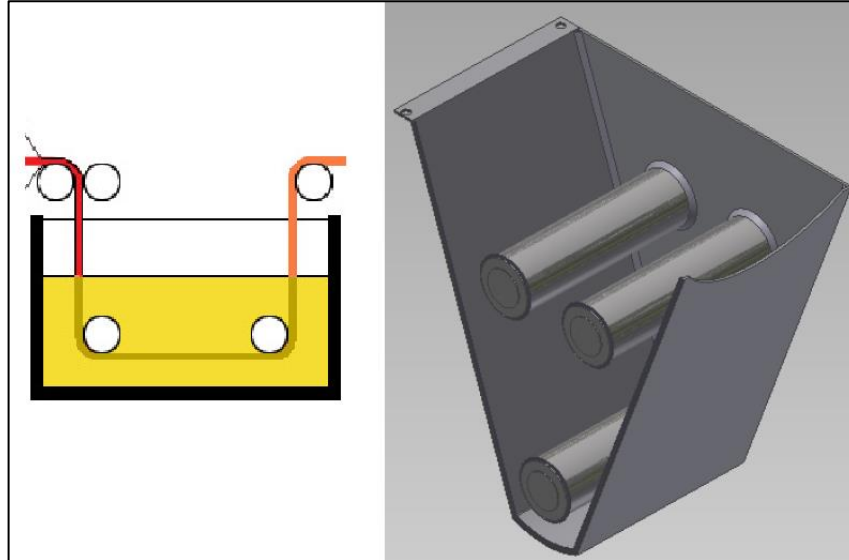
Fuente: Tecnología de los Plásticos³⁰

La segunda opción que se observa en Figura 43, se basa en el sistema de impregnación por rodillos guías, es un modelo que cuenta con rodillos que van rigiendo la inmersión de

³⁰ Tecnología de los Plásticos, [En línea]. Disponible en: <<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/pultrusion.html>>

la fibra en la resina, los aditivos y el catalizador que están en el tanque contenedor, la resina es suministrada de forma manual a un nivel determinado.

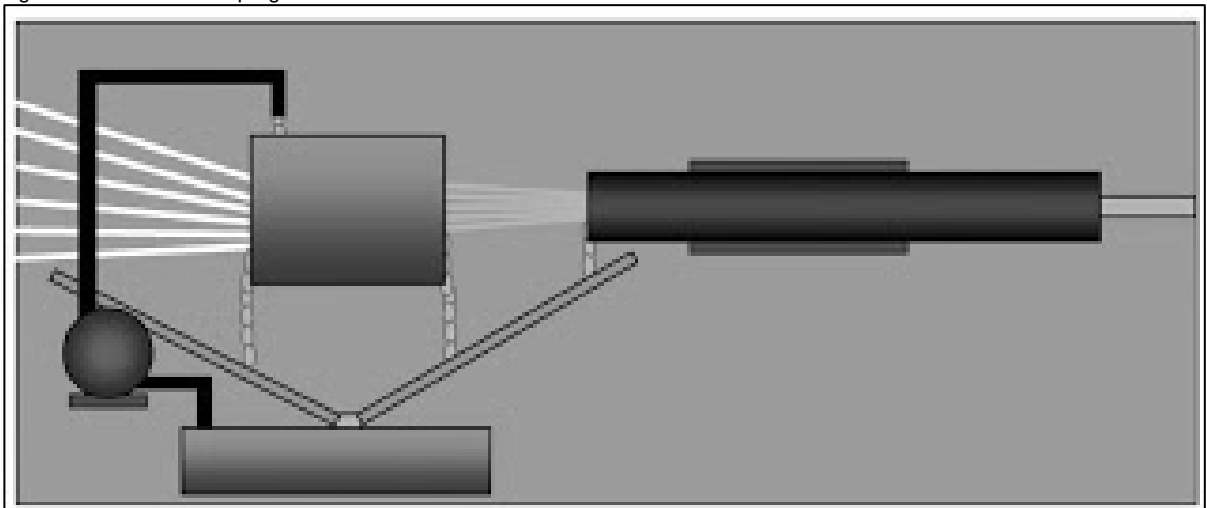
Figura 43. Impregnación por rodillos guías



Fuente: Autores

La última opción que se tuvo en cuenta, es un sistema de impregnación con bomba recirculante, el cual va suministrar la resina por la parte superior al tanque contenedor y adicional tiene un sistema de recolección de resina la cual va conectado a la entrada de la bomba tal como se aprecia en la Figura 44.

Figura 44. Sistema de impregnación con bomba recirculante



Fuente: Tecnología de los Plásticos, [En línea]. Disponible en: <<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/pultrusion.html>>

Tabla 19. Matriz de ponderación del subsistema 3: Reservorio E Impregnación

	Criterio y valoración							
	Manufactura	Operación	Ensamble	Espacio	Mantenimiento	Fiabilidad	Costo	Total
Opción 1	4	3	3	4	3	5	3	25
Opción 2	5	5	4	4	4	4	4	30
Opción 3	3	3	3	3	3	4	3	22

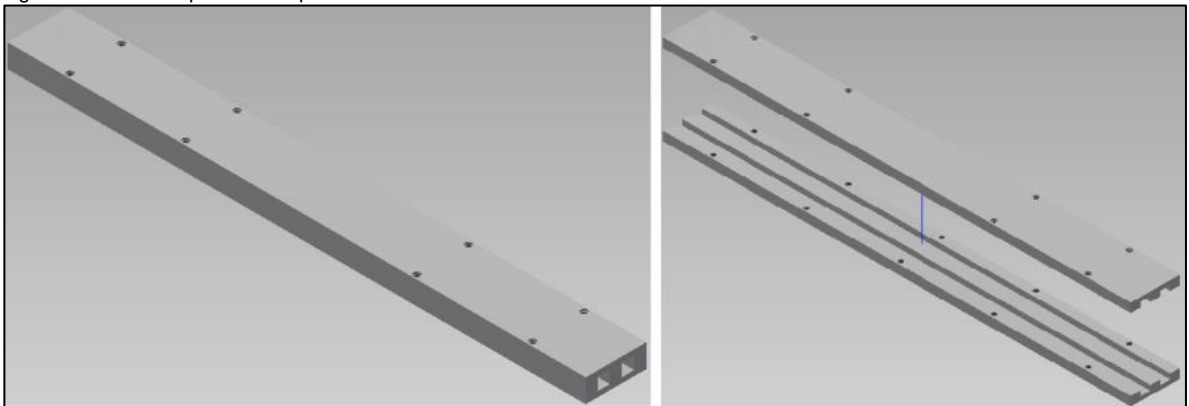
Fuente: Autores

En este caso las tres opciones tienen muy buenas prestaciones para el proceso que se llevara a cabo. Debido al requerimiento de costos, se adoptó la **opción dos**, ya que su manufactura es más acorde a lo que convencionalmente se consigue en el mercado y además se evita el sobre-costo de realizar la compra de bombas que con las características necesarias pueden generar un incremento considerable.

4.4 SUBSISTEMA 4: DADO

Este es uno de los subsistemas más importantes del proceso, ya que el dado junto con la resistencia genera el calor y el medio para el curado del perfil pultruido, por ello las opciones que se puedan diseñar son limitadas, sin embargo se tomaron dos modelos que son muy similares, la diferencia radica en la opción que se tenga para instalar diferentes clases de moldes de perfiles. Es así que en el primer modelo que se puede visualizar en Figura 45, el dado tendrá sus dos cavidades de igual tamaño; lo cual implica mayor cantidad de material y por consiguiente los costos se elevan, tanto del dado como del proyecto en general.

Figura 45. Dado de pultrusión opción 1

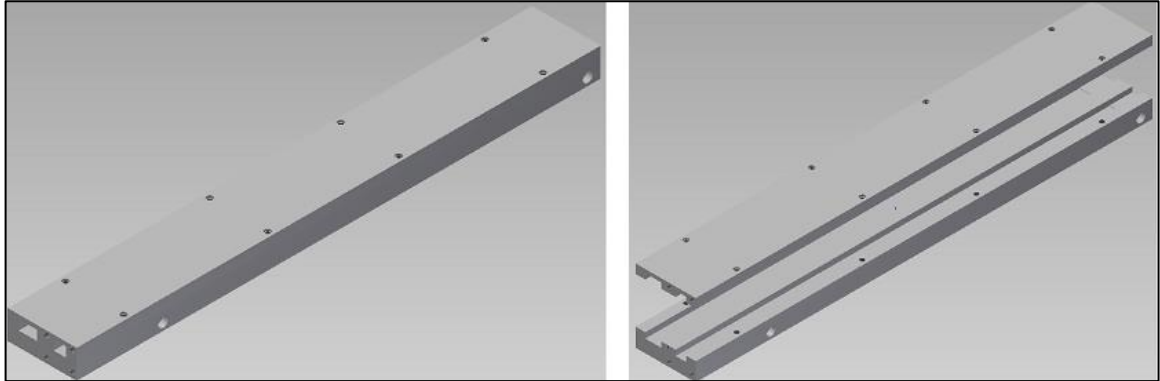


Fuente: Autores

Por todo lo anterior, se optó por un diseño más simple que cumpla con su función, es decir, el diseño del dado tendrá dos cavidades de diferente tamaño, así el vaciado derecho estará diseñado para los perfiles redondos mientras que al lado izquierdo su uso

estará definido a las platinas; en la parte trasera del dado tendrá un escalón que prevenga el deslizamiento del molde por motivo del paso de la fibra, por si los métodos de sujeción no se dejan con el apriete necesario; además tendrá un sistema de deslizamiento sobre unos ejes que aseguren la posición central tanto del perfil redondo como de la platina buscando no generen mayores tensiones sobre la fibra de vidrio.

Figura 46. Dado de pultrusión opción 2.



Fuente: Autores

4.5 SUBSISTEMA 5: DISPOSITIVO DE TIRO

Este subsistema es el alma de la máquina, pues es el encargado de generar el movimiento sobre el perfil para obligar a que la fibra pase por los demás componentes y realice los tratamientos necesarios que debe tener, además genera la velocidad necesaria que es restrictiva para el correcto curado del perfil. Cabe destacar que entre la salida del perfil y la entrada al halador o dispositivo de tiro debe haber una distancia mínima de 1 metro (aunque es recomendable que llegue a ser de 3 metros) para permitir la caída de temperatura y realice un enfriamiento progresivo y no dejar que se deforme el perfil, además debe tener el 100% de la curación y la correcta temperatura para que el dispositivo no genere aplastamiento sobre el perfil.

Las opciones que comercialmente existen son principalmente dos, la primera de carros reciprocantes el cual es un sistema de halado por carros que están conectados a un sistema hidráulico el cual le da movimiento de forma que se alternen en el halado del perfil y a su vez darle movimiento lineal, la presión que ejerce se puede controlar para no generar aplastamiento, se puede apreciar en la Figura 47.

Figura 47. Sistema de tiro por carros reciprocantes



Fuente: ASHIRVAD INDUSTRIES, [En línea]. Disponible en: < <https://www.youtube.com/watch?v=bRjU4na-ol8> >

La segunda opción para el dispositivo de tiro es un halador tipo doble oruga que se ve en la Figura 48, se adapta a la perfilería con dados de agarre en poliuretano de alta resistencia, tanto en la parte superior, como en la parte inferior, además de esto, cuenta con ejes centradores en Nylon tanto en la entrada como en la salida, para evitar que el perfil se salga de la línea y el cual tiene como características básicas que:

Tabla 20. Datos técnicos halador doble oruga modelo JDO-150

Halador Doble Oruga Modelo JDO-150	
Apertura máxima	100 mm
Ancho máximo	150 mm
Velocidad máxima	20 m/min.
Velocidad mínima	0.5 m/min.
Moto reductor	1 H.P. de CD.

Fuente: Beutelspacher, S.A. de C.V.³¹

³¹ Beutelspacher, S.A. de C.V. [En línea]. Disponible en: <<http://2905.mx.all.biz/halador-doble-oruga-g29321>>

Figura 48. Halador doble oruga modelo JDO-150



Fuente: Beutelspacher, S.A. de C.V.³²

Tabla 21. Matriz de ponderación del subsistema 5: Dispositivo De Tiro

	Criterio y valoración							
	Manufactura	Operación	Ensamble	Espacio	Mantenimiento	Fiabilidad	Costo	Total
Opción 1	4	3	3	3	3	3	3	22
Opción 2	4	4	4	4	4	4	4	28

Fuente: Autores

Al ser evaluadas estas dos opciones principalmente en el tema de costos y la posibilidad de variar la velocidad se selecciona **el número 2**, ya que, al ser por orugas su velocidad estará dada por la revolución del eje motriz y sumándole que es un sistema que no maneja bombas de presión ya que su apertura se realiza por medio de un tornillo de potencia, es más adecuada a las necesidades del cliente y así mismo cumple los requerimientos de diseño puntualmente.

4.6 SUBSISTEMA 6: CORTE Y ALMACENAMIENTO

Como la salida del perfil se realiza de manera continua a una velocidad determinada, se hace necesario un dispositivo para el corte de los perfiles que sea eficiente y no afecte el

³² Beutelspacher, S.A. de C.V. [En línea]. Disponible en: <<http://2905.mx.all.biz/halador-doble-oruga-g29321>>

movimiento del equipo ni el represamiento del material ni mucho menos las características mecánicas de dicho perfil. Por esto de todos los sistemas de corte existentes se preselecciona el sistema de corte por sierra mecánica. La opción número 1 es una pulidora convencional con soporte, que se puede apreciar en Figura 49 la cual, es manejada por el operario que debe estar atento al cumplirse la longitud deseada, las características de este producto son:

Tabla 22. Datos técnicos de la pulidora

Atributos	Detalle Pulidora
Garantía	3 años
Modelo	D28111S-B3
Largo cable	2,10 metros
Incluye	Guarda, flange para asegurar disco, disco abrasivo, manual de instrucciones
Potencia en amperios	7
Tipo de velocidad	Fija
Potencia en vatios	850 w
Uso	Pulir superficies de diferentes materiales mediante movimientos rotatorios
Velocidad	1000 RPM
Diámetro del disco	4-1/2 pulgadas (11,5 cm)
Tipo	Pulidora 4 1/2pg
Atributos	Detalle Pulidora
Tipo de trabajo	Profesional
Características	Pulidora con sistema anti-lock para los flanges, asegura el disco permitiendo que pueda cambiarse sin llave, escobillas con desconexión automática que apagan la herramienta cuando es necesario cambiarlas, interruptor con bloqueo.
Material	Fibra de vidrio
Voltaje	110 v
Recomendaciones	Utilizar elementos de protección personal para una segura manipulación, mantener fuera del alcance de los niños, leer el manual de instrucciones antes de usar

Fuente: Homecenter. [En línea]. Disponible en: <<http://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/102102/Pulidora-4-12-pulgadas-850w;jsessionid=50BC033525D2E6584D8F175DC57D1DB3.node6?color=&passedNavAction=>>>

Tabla 23. Datos técnicos soporte

Atributos	Detalle Soporte Bauker
Características	Soporte elaborado de material resistente para pulidora.
Material	Aluminio - acero
Uso	Para pulidoras de 4-1/2 pulgada
Diámetro del disco	4-1/2 pulgadas (11,5 cm)
Color	Los colores de las herramientas Bauker pueden ser verdes o grises por cambio de imagen de sus productos.

Fuente: Homecenter. [En línea]. Disponible en: <<http://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/147716/Soporte-para-pulidora-4-12-pulgada>>

Figura 49. Pulidora en banco.



Fuente: Homecenter.³³

La segunda opción que se observa en la Figura 50 es una sierra circular de corte que está diseñado para seccionar madera, aluminio, plástico y acero, por supuesto, con la hoja adecuada y condiciones necesarias, cuenta con aplicación manual del corte, un motor eléctrico de motor 3 H.P. (máxima salida) 120 V. 60 Hz, su diámetro de disco 304.8 mm (12"), su diámetro de eje 15.8 mm (5/8"), su velocidad es de 4,200 r.p.m, posee una mesa de trabajo giratoria 330.2 mm (13") diámetro, su capacidad de corte transversal 63.5 x 200 mm (2-1/2 x 7-7/8"), las dimensiones de la máquina 620 x 440 x 415 mm (24-3/8 x 17-5/16 x 16-3/8"), su peso neto/peso bruto 17.5 Kg/21 Kg y su capacidad de corte combinado a 45° 44.5 x 139.7 mm (1-3/4 x 5-1/2")³⁴.

³³ Homecenter. [En línea]. Disponible en: <<http://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/147716/Soporte-para-pulidora-4-12-pulgada>>

³⁴ Datos tomados de: Máquinas Herramientas del Bajío SA de CV, [En línea], Disponible en: <<http://www.maquinasherramientasdelbajio.com/index.php/knova/maquinas-herramienta/sierra-circular-ang-comb-de-12.html>>

Figura 50. Sierra circular ang comb de 12"



Fuente: Máquinas Herramientas del Bajío SA de CV35

La tercera opción es una sierra eléctrica para corte que son de actuación oleodinámica con ciclo de corte semiautomático y con amplia capacidad de corte. Recomendadas para el corte de perfiles de grandes dimensiones, con corte angular hasta 60° a derecha e izquierda. Ideales para talleres y carpinterías donde se requiere fiabilidad, productividad y facilidad de utilización, su ciclo de corte tiene cierre de mordaza, bajada rápida hasta el contacto del palpador con la pieza, accionamiento de la sierra con suministro de refrigeración líquida.

Figura 51. Sierra eléctrica para corte Portátil UE-712A



Fuente: Bulon Quilmes36

³⁵ Máquinas Herramientas del Bajío SA de CV, [En línea], Disponible en: <<http://www.maquinasherramientasdelbajio.com/index.php/knova/maquinas-herramienta/sierra-circular-ang-comb-de-12.html>>

Tabla 24. Matriz de ponderación del subsistema 6: Corte Y Almacenamiento

	Criterio y valoración							
	Manufactura	Operación	Ensamble	Espacio	Mantenimiento	Fiabilidad	Costo	Total
Opción 1	3	3	2	2	2	3	3	18
Opción 2	4	4	4	4	4	4	4	28
Opción 3	4	3	3	3	3	4	4	24

Fuente: Autores

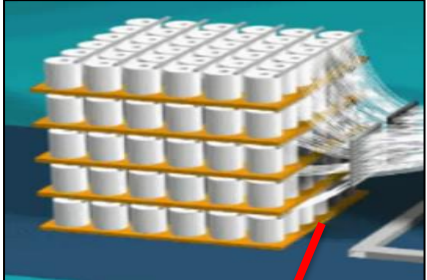

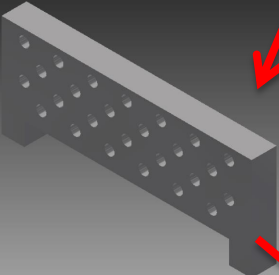
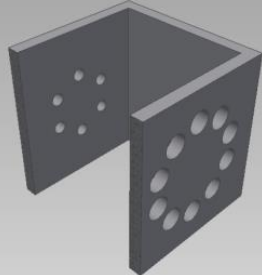
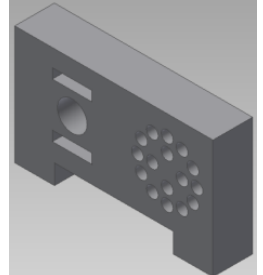
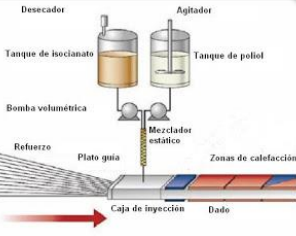
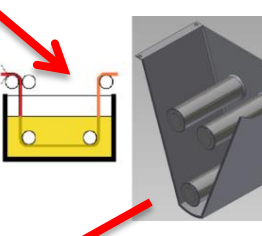
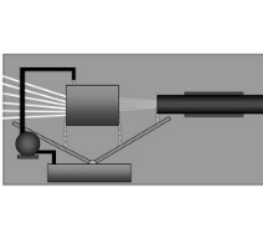
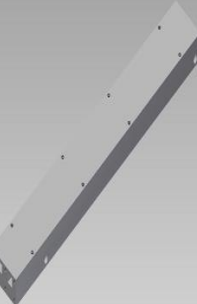

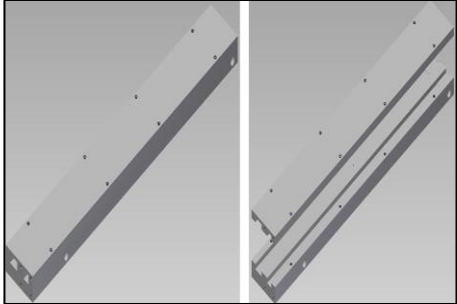





La **opción 2** es la que se escoge debido a las prestaciones que esta máquina da, al costo moderado que tiene referente a las otras opciones y a la opción de fácil mantenimiento. También se tuvo en cuenta los siguientes hechos: para el funcionamiento de este equipo se hace estrictamente necesaria la presencia de una persona que sepa operar la máquina y el corte se hace esporádicamente dependiendo de la longitud a la cual se quiera almacenar, por ello que este sub-sistema sea automatizado se toma como un sobrecosto al valor total de la máquina. Además cabe la posibilidad de acoplar una máquina de características similares que ya posee la Universidad Santo Tomas y reducir así los costos.

4.7 SISTEMA DE PULTRUSIÓN ELEGIDO

Debido a todas las consideraciones anteriores, se realizó un cuadro comparativo con todas las opciones planteadas y se resalta con una línea todas las elecciones que se escogieron. Véase la Tabla 25, con el fin de proceder con el diseño al detalle de cada uno de sus piezas y en consecuencia los subsistemas. Cabe resaltar que varias de las selecciones que se realizaron son equipos que comercialmente se consiguen en el mercado de partes de Colombia, por ello únicamente se darán las especificaciones de tales equipos.

³⁶ Bulon Quilmes, [En línea]. Disponible en:
 <http://www.bulonquilmes.com/_popup/print_producto.asp?funcion=mostrarproducto&id=3461>

Tabla 25. Elección de subsistemas para una máquina de pultrusión.

<p>MUEBLE</p>			
<p>PRE MOLDEO</p>			
<p>RESERVORIO E IMPREGNACIÓN</p>			
<p>DADO</p>			
<p>DISPOSITIVO DE TIRO</p>			
<p>CORTE</p>			

Fuente: Autores

5. DISEÑO DETALLADO

Como proceso de ingeniería, el diseño detallado transforma alternativas de conceptos, arquitecturas físicas preliminares, especificaciones de diseño 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.

5.1 DOSIFICACIÓN DE LA FIBRA

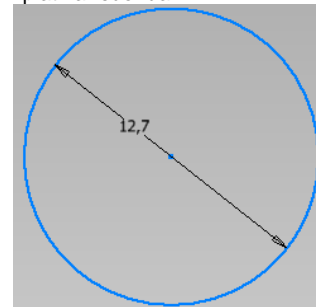
Este es un dato muy importante ya que dará las bases requeridas para el cálculo de la mayoría de piezas que componen el equipo. Se verificara el número de bobinas Roving que se requirieren tanto para la fabricación de la varilla redonda ya sea maciza o hueca, como para la platina. Para esto se parte de las áreas transversales de cada una tomando como base un perfil circular y un perfil rectangular, así:

Para efectos del cálculo se toma solo el perfil circular de la varilla redonda maciza de diámetro de 12,7 mm [$1/2$ in] y el perfil rectangular de la platina de 25,4 mm de ancho por 5 mm de espesor [1 in * $0,2$ in], pues son los que requieren la mayor cantidad de hilos Roving.

Ecuación 2. Área circular

$$\begin{aligned} \text{Área}_{\text{varilla}} &= \pi * (\text{radio}_{\text{circunferencia}})^2 \\ \text{Área}_{\text{varilla}} &= \pi * (6,35 \text{ mm})^2 \\ \text{Área}_{\text{varilla}} &= 126,68 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Figura 52. Perfil platina redonda

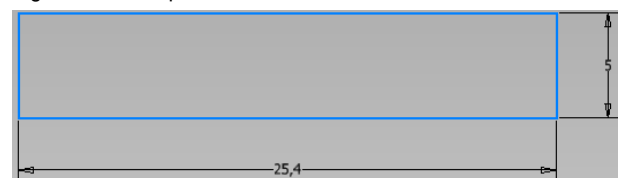


Fuente: Autores

Ecuación 3. Área rectangular

$$\begin{aligned} \text{Área}_{\text{platina}} &= \text{base} * \text{altura} \\ \text{Área}_{\text{platina}} &= 25,4 \text{ mm} * 5 \text{ mm} \\ \text{Área}_{\text{platina}} &= 127 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Figura 53. Perfil platina



Fuente: Autores

El paso a seguir es calcular el volumen que estos perfiles, para esto se emplea una unidad métrica de medida ya que el dado posee esta longitud.

Ecuación 4. Volumen según perfil

$$V [mm^3] = \text{Área}_{\text{Transversal}} [mm^2] * \text{Altura} [mm]$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen}_{\text{Varilla}} &= (126,68 \text{ mm}^2) * (1000\text{mm}) \\ \text{Volumen}_{\text{Varilla}} &= 126676,87 \text{ mm}^3 \cong 126,68\text{cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen}_{\text{Platina}} &= (127 \text{ mm}^2) * (1000\text{mm}) \\ \text{Volumen}_{\text{Platina}} &= 127000 \text{ mm}^3 \cong 127 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

En la producción de los perfiles pultruidos la configuración recomendable³⁷ para conseguir excelentes propiedades está definida por un porcentaje de peso para la pieza fabricada del 70% de su composición total por la fibra de vidrio que se encuentra en las bobinas de Roving y el 30% restante por la resina, el catalizador y los aditivos que sean necesarios. Estos datos dan base para calcular el número de bobinas que se necesitaran, pero se requiere conocer las propiedades de la resina endurecida PALATAL CO P4 que se observa en la Tabla 26 y el ANEXO A y el producto que comercialmente se encuentra en relación a la bovina Roving, (Véase la Figura 54 y ANEXO B)

Tabla 26. Propiedades técnicas resina PALATAL CO P4

PROPIEDADES DE LA RESINA ENDURECIDA SIN CARGA (VALORES TÍPICOS)			
Propiedades ¹⁾	Valor	Unidad	Método de Ensayo
Densidad (20°C)	1,21	g/cm^3	DIN 53 479
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	KJ/m^2	DIN 53 453
Temperatura de distorsión por calor (HDT)	66 ²⁾	°C	DIN EN ISO 75
	67 ³⁾	°C	ASTM D 648
Dureza Barcol GYZJ 934-1			ASTM D 2583
1) Propiedades medidas en especímenes de resina con un contenido de estireno de 36% 2) Espécimen $4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 3) Espécimen $1/4'' \times 1/2'' \times 5''$			

Fuente: BASF Chile S.A.³⁸.

³⁷ Dato compartido por el Ing. Alfredo Beltrán, gerente de Perfiglass Ltda. Bogotá, D.C. Agosto 2014

³⁸ BASF Chile S.A. [En línea]. Disponible en: <http://www.basf.cl/sac/web/chile/es_ES/>

Figura 54. Producto disponible de Roving P207

Productos Disponibles				
Producto	Características de la bobina			
	Diámetro (mm)		Altura Nominal	Peso Nominal (Kg)
	Interno	Externo		
EC 2400 / 3900 P207	75	270	255	17

Fuente: FiberGlass Colombia39

Cabe resaltar que esta bobina de roving tiene una longitud total de 1000 metros, de donde se deduce que el peso de la bobina por cada metro de longitud es de $0,018 \text{ Kg/m} \cong 18 \text{ gr/m}$.

Se hace la suposición que el perfil tiene el 100% de su estructura compuesta únicamente de resina endurecida, pues sería el escenario donde su peso sería el máximo, entonces se tiene que:

Ecuación 5. Calculo de masa de los perfiles.

$$masa [Kg] = densidad (\rho) \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * Volumen [cm^3]$$

$$masa_{Varilla} = 1,21 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 126,68 [cm^3] \quad masa_{Platina} = 1,21 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 127 cm^3$$

$$masa_{Varilla} = 153,28 gr \quad masa_{Varilla} = 153,67 gr$$

Una vez que se tienen este dato se procede a calcular el valor de la masa que corresponde a la fibra de vidrio, la cual corresponde solo al 70% del total de la fibra que se está calculando en 1 metro de longitud, es así que:

Ecuación 6. Masa correspondiente a las bobinas Roving

$$masa_{respectiva Roving} = masa_{perfil} * 70\%$$

$$masa_{Resp.Varilla} = 153,28 g * \left(\frac{70\%}{1m} \right) \quad masa_{Resp.Platina} = 153,67 g * \left(\frac{70\%}{1m} \right)$$

$$masa_{Resp.Varilla} = 107,3 \text{ g/m} \quad masa_{Resp. Platina} = 107,57 \text{ g/m}$$

Con el cálculo de la masa respectiva de fibra de vidrio de cada perfil, se halla la cantidad de bobinas que se necesitaran dividiendo el cálculo antes hecho entre el peso de la bobina por metro longitudinal así:

³⁹ FiberGlass Colombia. [En línea]. Disponible en: <<http://www.fiberglasscolombia.com/>>

Ecuación 7. Cantidad bobinas de roving necesarias

$$C_{rb} = \frac{m_{rv}}{\text{peso del roving por metro en gr}}$$

$$C_{rb-varilla} = \frac{m_{rv}}{\text{peso del roving por metro en gr}} \quad C_{rb-Platina} = \frac{m_{rv}}{\text{peso del roving por metro en gr}}$$

$$C_{rb-varilla} = \frac{107,3 \text{ g/m}}{18 \text{ gr/m}} \quad C_{rb-Platina} = \frac{107,57 \text{ g/m}}{18 \text{ gr/m}}$$

$$C_{rb-varilla} = 5,96 \cong 6 \text{ Bobinas} \quad C_{rb-Platina} = 5,98 \cong 6 \text{ Bobinas}$$

En conclusión se requiere una cantidad mínima de 6 bobinas de roving 2200 para mantener el equilibrio estático en el dosificador y lograr buenas propiedades mecánicas en las probetas, así que el mueble debe alojar mínimo 12 bobinas si se desean fabricar los perfiles de varilla y platina al mismo tiempo.

5.2 MUEBLE SOPORTE BOBINAS ROVING

El mueble de soporte de las bobinas roving es el primer elemento que se encuentra en la línea de fabricación de las piezas y está encargado de mantener los rollos de fibra en posición para que se puedan ir desenrollando adecuadamente.

Figura 55. Mueble bobinas Roving



Fuente: [En línea]. Disponible en: www.Google.com⁴⁰

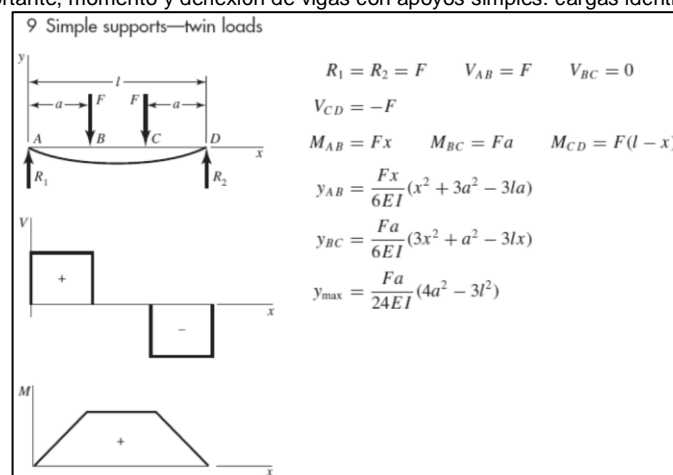
⁴⁰ Fuente: [En línea]. Disponible en:

https://www.google.com.co/search?q=soporte+bobinas+roving&rlz=1C1SNNT_enCO416CO418&es_sm=122&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=3Om_VIKTMcqmg

El primer parámetro a tener presente es el número de espacios con que debe contar la estructura que se diseñe, como se expuso en la conclusión del numeral 5.1 se requiere un mueble que logre soportar como mínimo 12 rollos de fibra de vidrio, además se tiene que conocer las dimensiones totales de las bobinas que comercialmente se consiguen, tal como se observa en la Figura 54 dicho elemento tiene un diámetro externo de 270 mm, un diámetro interno de 75 mm, una altura nominal de 255 mm y un peso total de 17 Kg aproximadamente. También se debe tener en cuenta los requerimientos del cliente en cuestión de espacio como se definió en el numeral 3.1.2 donde se habla del área utilizada ya que es una máquina de didáctica y se instalara en un laboratorio de la Universidad Santo Tomas que cuenta con un espacio total de 6,5 metros de ancho, 7,7 metros de largo y 3,5 metros de alto; y el espacio solo se restringe en su ancho debido a los demás componentes de este laboratorio a una distancia de 2,5 metros de ancho.

Con esto se deduce que el espacio donde se vaya a soportar las bobinas deben contener dichas medidas como mínimo y contando con el diseño escogido en numeral 4.1, se define un componente que consta de 6 tablas base de bobinas, una tabla superior y el armazón de este mueble. La tabla que soportara las bobinas se fabricará para que se coloquen en parejas generando que las fibras estén más cerca y no se generen mayores tensiones durante el proceso de pultrusión que se llevara a cabo; sus medidas serán de 79 cm de ancho, 39 cm de largo y un espesor de 4 cm, además se realizara una guía de 27 cm de diámetro para las bobinas evitando así que al desenrollarse internamente se mueva de su posición inicial, tal como se observa en la Figura 59. A este elemento se le realiza la comprobación de la resistencia mediante el estudio por deflexión ya que se comporta como viga con apoyos simples de cargas idénticas como se muestra en la Figura 56, la fuerza que cada bobina ejerce sobre la tabla está definida por el peso, por ello se tiene que $F = (17 \text{ Kg}) * (9,81 \text{ m/s}^2) = 166,77 \text{ N}$

Figura 56. Cortante, momento y deflexión de vigas con apoyos simples: cargas idénticas.



Fuente: Budynas G., Richard y Nisbett, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley

Conociendo la magnitud de la fuerza de 166,77 N y las distancias a la que están aplicadas que corresponden al valor de (a) en la Figura 56 y tienen un valor de 200 mm, se procede a revisar estáticamente el equilibrio de fuerzas haciendo un diagrama de cuerpo libre y extrayendo los esquemas del cortante, momento, como se observa en la Figura 57

Para resolver por completo todas las ecuaciones de vigas con apoyos simples: cargas idénticas, los únicos datos que hacen falta son los del módulo de elasticidad (E) que tiene por unidades [GPa] y los del segundo momento del área (I) con unidades de [mm⁴] de la viga que se está calculando. El dato para madera tipo roble del módulo de Young, corresponde⁴¹ a un $E = 11 \text{ GPa}$.

Por otro lado para calcular la inercia de la pieza se toma la ecuación dada por las propiedades de las secciones rectangulares que dice:

Ecuación 8. Segundo momento de área con respecto al eje x.

$$I_x = \frac{bh^3}{12}$$

$$I_x = \frac{(794 \text{ mm})(40 \text{ mm})^3}{12} = (4,23 * 10^6)[\text{mm}^4] \cong (4,235 * 10^{-6})[\text{m}^4]$$

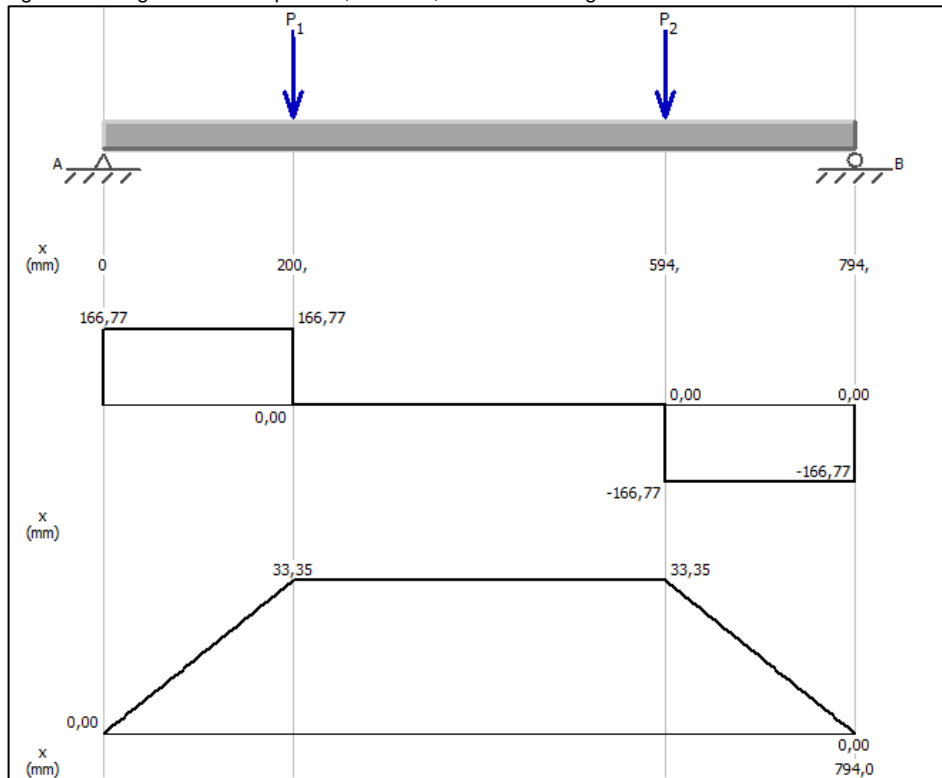
Ecuación 9. Segundo momento de área con respecto al eje y.

$$I_y = \frac{b^3h}{12}$$

$$I_y = \frac{(794 \text{ mm})^3(40 \text{ mm})}{12} = (1,67 * 10^9)[\text{mm}^4] \cong (1,67 * 10^3)[\text{m}^4]$$

⁴¹ Dato tomado de: Universidad Nacional de General San Martín, Introducción a la Elasticidad, Física I. [En línea]. Disponible en: http://www.fisicarecreativa.com/papers_sg/papers_sgil/Docencia/elasticidad1.pdf

Figura 57. Diagrama de cuerpo libre, cortante, momento de viga.



Fuente: Autores, Software MDSolid 4,0 (Licencia publica)

Al aplicar la ecuación para deflexión máxima que se observa en la Figura 56, pues sería la más crítica, se tiene que:

Ecuación 10. Deflexión máxima para vigas de apoyos simples: cargas idénticas.

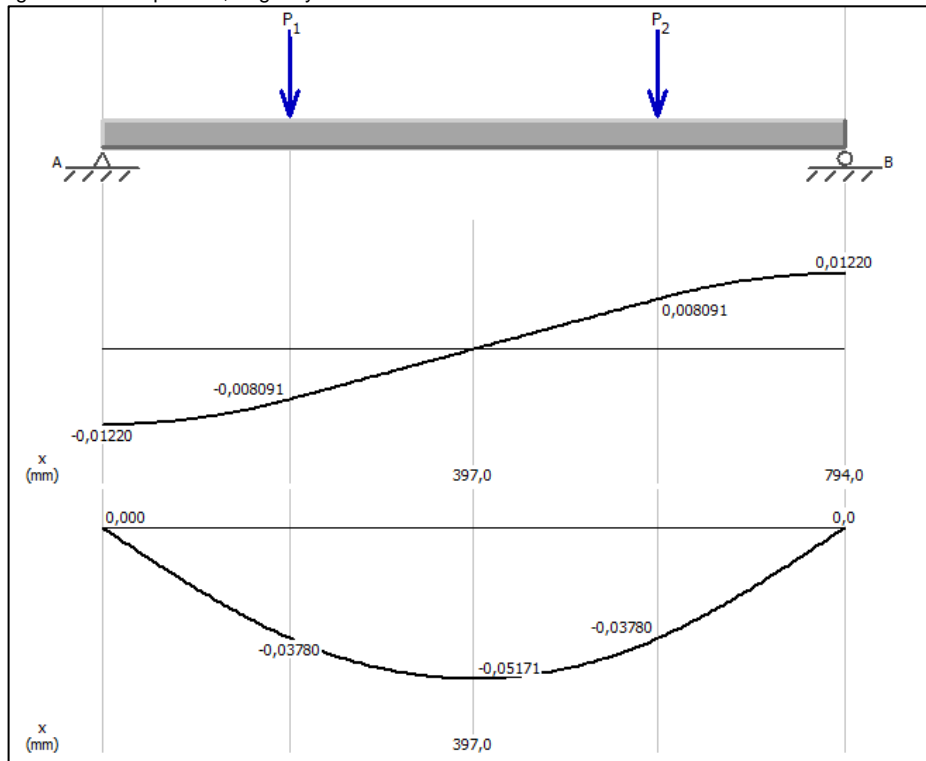
$$y_{m\acute{a}x} = \left(\frac{Fa}{24EI} \right) (4a^2 - 3l^2)$$

$$y_{m\acute{a}x} = \left(\frac{(166,77 \text{ N})(0,2 \text{ m})}{(24)(11\text{GPa})(4,235 * 10^{-16}\text{m}^4)} \right) (4 * (0,2 \text{ m})^2 - 3(0,794 \text{ m})^2)$$

$$y_{m\acute{a}x} = -5,17 * 10^{-5} \text{ m} \cong 0,052 \text{ mm}$$

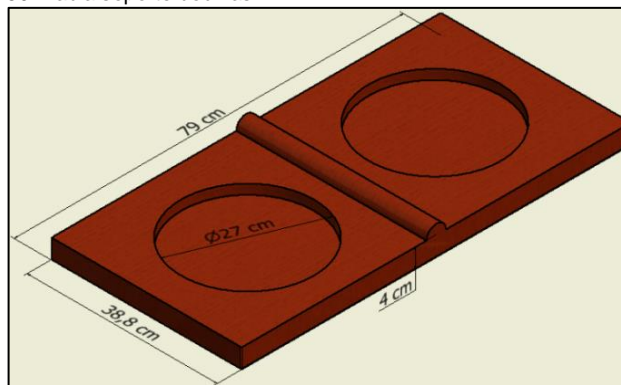
El cálculo anteriormente mostrado demuestra que esta deflexión que presenta es muy pequeña y por lo tanto se encuentra dentro de los valores permisibles de la máquina, la Figura 58 muestra más claramente al graficar el diagrama de cuerpo libre, el ángulo y su deflexión máxima la cual se ve que por el software fue calculada en 0,05 mm, ya que es un valor muy bajo para la geometría de la pieza que se está evaluando, se determina que es un valor permisible del diseño.

Figura 58. Diagrama de cuerpo libre, ángulo y deflexión máxima.



Fuente: Autores, Software MDSolid 4,0 (Licencia publica)

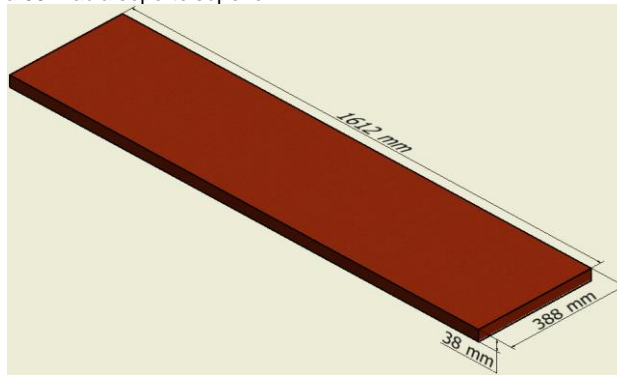
Figura 59. Tabla soporte bobinas



Fuente: Autores

De acuerdo al cálculo mostrado se confirma que la tabla base que se diseñó en madera tipo Roble si es efectiva para el soporte de 2 bobinas de Roving al mismo tiempo. Así que continuando con las demás piezas que componen este mueble, se encuentra que en la parte superior de la estructura se debe colocar una tabla en madera enteriza de 1612 mm de ancho por 388 mm de largo y 38 mm de espesor que se evidencia en la Figura 60 con el fin de almacenaje de bobinas Roving que no se estén usando en el proceso.

Figura 60. Tabla soporte superior



Fuente: Autores

Por último la estructura de este dispositivo que se observa en la Figura 62 estará compuesta por perfil de ángulos de acero estructural de tamaño 50x50x6 [mm] (16) y sus propiedades se pueden denotar en la Figura 61; esto debido que al realizar una matriz de selección en donde se tuvo en cuenta el precio, el esfuerzo normal de flexión calculado por la Ecuación 11. Esfuerzo normal Von-Mises, se llegó a la conclusión por medio del cálculo con el esfuerzo de fluencia del material que el más óptimo para soportar dichos elementos es este tipo de perfil estructural.

Ecuación 11. Esfuerzo normal

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{m\acute{a}x}C}{I} \leq FS\sigma_r$$

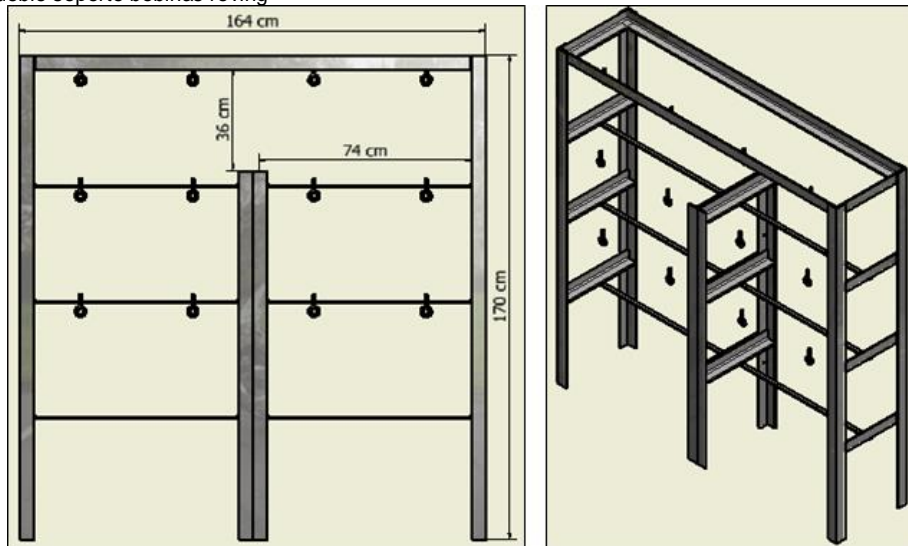
$$\frac{M_{m\acute{a}x}C}{I} - FS\sigma_r = 0$$

Figura 61. Propiedades de ángulos de acero estructural.

Size, mm	<i>m</i>	<i>A</i>	<i>I</i> ₁₋₁	<i>k</i> ₁₋₁	<i>Z</i> ₁₋₁	<i>y</i>	<i>k</i> ₃₋₃
25 × 25 × 3	1.11	1.42	0.80	0.75	0.45	0.72	0.48
× 4	1.45	1.85	1.01	0.74	0.58	0.76	0.48
× 5	1.77	2.26	1.20	0.73	0.71	0.80	0.48
40 × 40 × 4	2.42	3.08	4.47	1.21	1.55	1.12	0.78
× 5	2.97	3.79	5.43	1.20	1.91	1.16	0.77
× 6	3.52	4.48	6.31	1.19	2.26	1.20	0.77
50 × 50 × 5	3.77	4.80	11.0	1.51	3.05	1.40	0.97
× 6	4.47	5.59	12.8	1.50	3.61	1.45	0.97
× 8	5.82	7.41	16.3	1.48	4.68	1.52	0.96

Fuente: Budynas G., Richard y Nisbett, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley

Figura 62. Mueble soporte bobinas roving



Fuente: Autores

Como último luego de calcular todas las fuerzas y reacciones que sobre este componente se ejercen, se realizó un montaje en el software de modelado de CAD 3D Inventor® Professional con el fin de validar mediante una simulación de tensión el comportamiento que esta estructura va a tener al soportar las cargas propias de su sistema; esta simulación arroja datos muy importantes como los son la tensión máxima que soporta calculada por el esfuerzo de Von Mises que es de 21 MPa, el máximo desplazamiento es de 0,062 [mm]; estos datos validan los cálculos realizados donde se puede determinar que la estructura no fallara. Los resultados se pueden observar en la Tabla 27 donde se observan las características más relevantes al diseño.

Tabla 27. Simulación por tensión

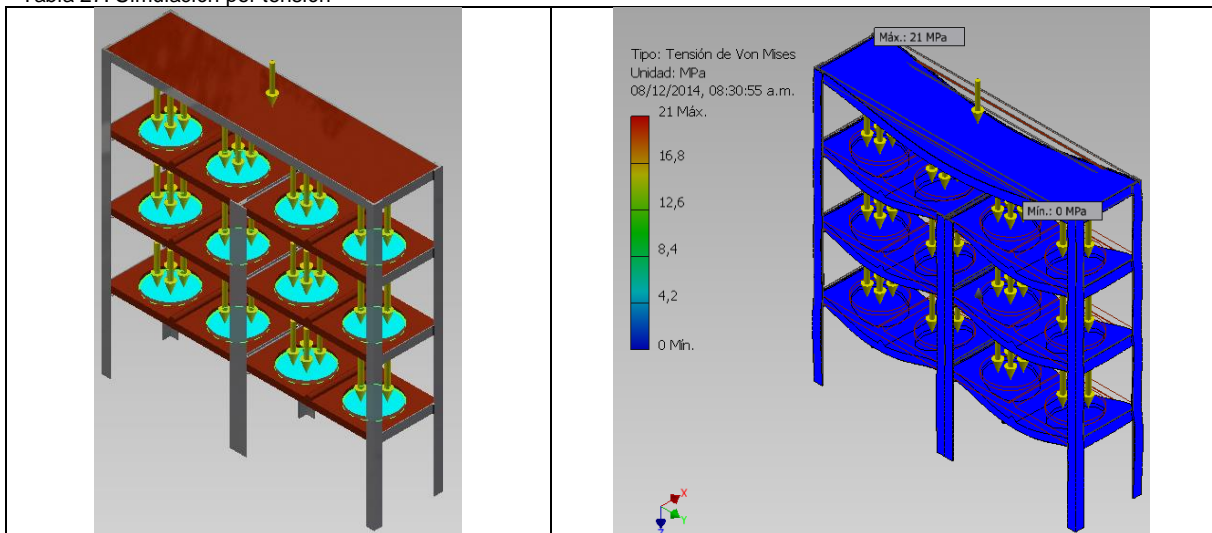
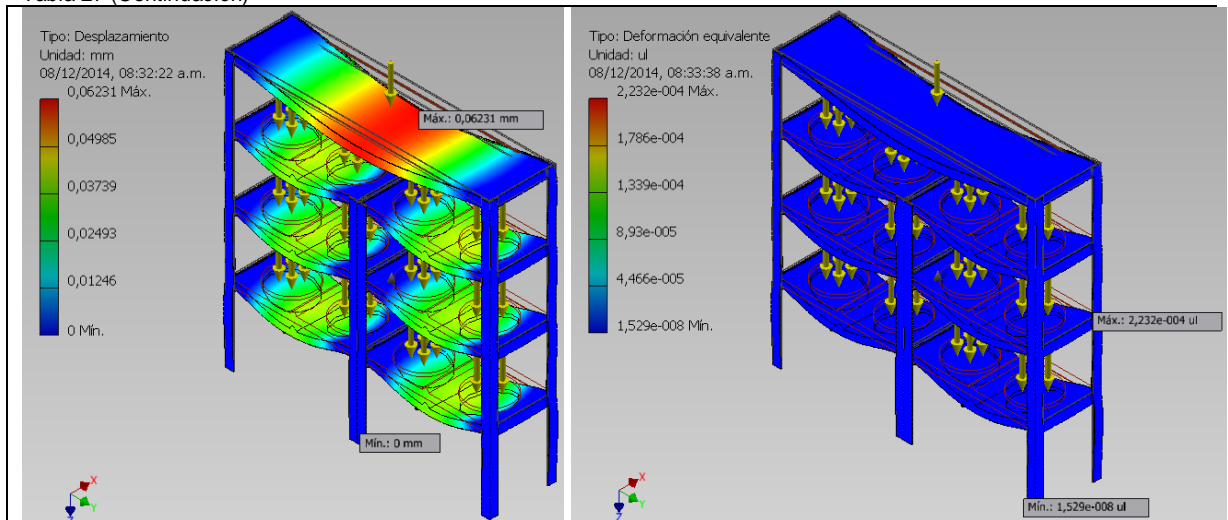


Tabla 27 (Continuación)



Fuente: Autores

Figura 63. Resultados simulación por tensión

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	98461000 mm ³	
Masa	158,496 kg	
Tensión de Von Mises	0,00100962 MPa	21,0035 MPa
Primera tensión principal	-2,03469 MPa	26,9219 MPa
Tercera tensión principal	-16,1961 MPa	4,48692 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,0623133 mm
Coefficiente de seguridad	9,85551 su	15 su
Deformación equivalente	0,0000000152926 su	0,000223235 su
Primera deformación principal	-0,000000575654 su	0,000246487 su
Tercera deformación principal	-0,00015373 su	0,000000637411 su
Presión de contacto	0 MPa	31,6291 MPa
Presión de contacto X	-12,0288 MPa	12,1925 MPa
Presión de contacto Y	-9,46588 MPa	12,7401 MPa
Presión de contacto Z	-16,4066 MPa	27,8202 MPa

Fuente: Autores

5.3 RESERVORIO Y SISTEMA DE IMPREGNACIÓN

Este es uno de los más importantes elementos en el proceso de la pultrusión, ya que, en este la fibra de vidrio se humecta con la resina y el catalizador propio del proceso (véase el numeral 2.3.9.2). Como antes se había mencionado en el numeral 5.1, los perfiles pultruidos están constituidos por un 30% de resina, por esto se retoma la Ecuación 4 donde se encontró el volumen de la varilla maciza que es de 126,8 cm³ y de la platina con 127 cm³ en un metro de longitud, por lo tanto:

Ecuación 12. Volumen Resina

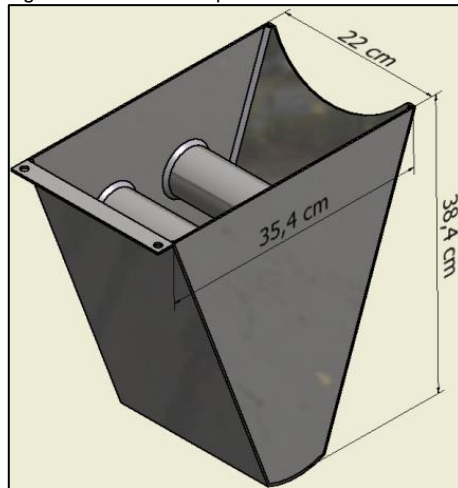
$$Volumen_{resina} = \frac{(Volumen_{metro\ varilla} * 30\%) + (Volumen_{metro\ platina} * 30\%)}{1\ m}$$

$$Volumen_{resina} = \frac{(126,8\ cm^3 * 30\%) + (127\ cm^3 * 30\%)}{1\ m}$$

$$Volumen_{resina} = \frac{76,14\ cm^3}{1\ m} \cong 0,08\ l/m$$

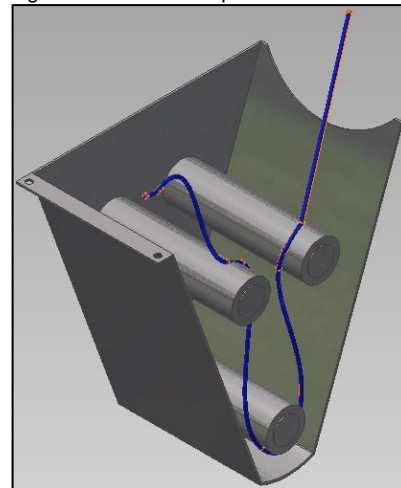
Teniendo en cuenta que esta es la mínima cantidad de volumen de resina que se requiere para fabricar un solo metro de perfil de cada pieza, se diseñó un contenedor en la cual su sección transversal es en forma triangular y su base no es plana sino semi – circular para un mantenimiento más eficaz a la hora de la limpieza.

Figura 64. Reservorio para resina



Fuente: Autores

Figura 65. Simulación paso de fibra.



Fuente: Autores

Se debe hallar el volumen total de resina y el volumen efectivo o disponible del reservorio, el primero para conocer el dato de la cantidad de materia prima que puede albergar, para esto se toma el área de la pared lateral y se multiplica por el ancho del reservorio (Ecuación 13); y el segundo para calcular el volumen efectivo del contenedor que es la materia prima que está por encima del punto más bajo de la fibra (Ecuación 14), con el fin de calcular la longitud de cuánto material se puede producir sin necesidad de realizar un relleno, al valor total se le debe quitar el 2% por posibles pérdidas.

Ecuación 13. Volumen de la resina

$$Volumen_{resina} = Area * ancho$$

$$Volumen_{resina} = (781,531 \text{ cm}^2)(21,5 \text{ cm})$$

$$Volumen_{resina} = 16802,9 \text{ cm}^3 \cong 16,8 \text{ l}$$

Ecuación 14. Volumen efectivo de la resina

$$Volumen_{resina} = Area * ancho$$

$$Volumen_{resina} = (749,957 \text{ cm}^2)(21,5 \text{ cm})$$

$$Volumen_{resina} = 16124,1 \text{ cm}^3 \cong 16 \text{ l}$$

Ecuación 15. Longitud de material

$$longitud = \frac{\text{volumen de resina en un metro}}{\text{volumen de resina en el contenedor}}$$

$$longitud = \frac{(16,8 \text{ l})}{(0,08 \text{ l/m})} = 210 \text{ m} - 4,2 \approx 205,8 \text{ m}$$

Cabe resaltar que este valor es calculado en condiciones ideales, donde se respete la proporción 70 : 30 y donde el contenedor sea llenado hasta su máximo tope; esta relación daría la máxima capacidad de producción por llenado de resina.

Ahora se debe conocer la fuerza que la resina ejerce sobre las paredes del contenedor (Ecuación 16) para lograr definir con mayores parámetros el grosor de la pared.

Ecuación 16. Presión de un fluido

$$P = \frac{F}{A}$$

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

$$P = \frac{\rho * v * g}{A}$$

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

$$P = \rho * h * g$$

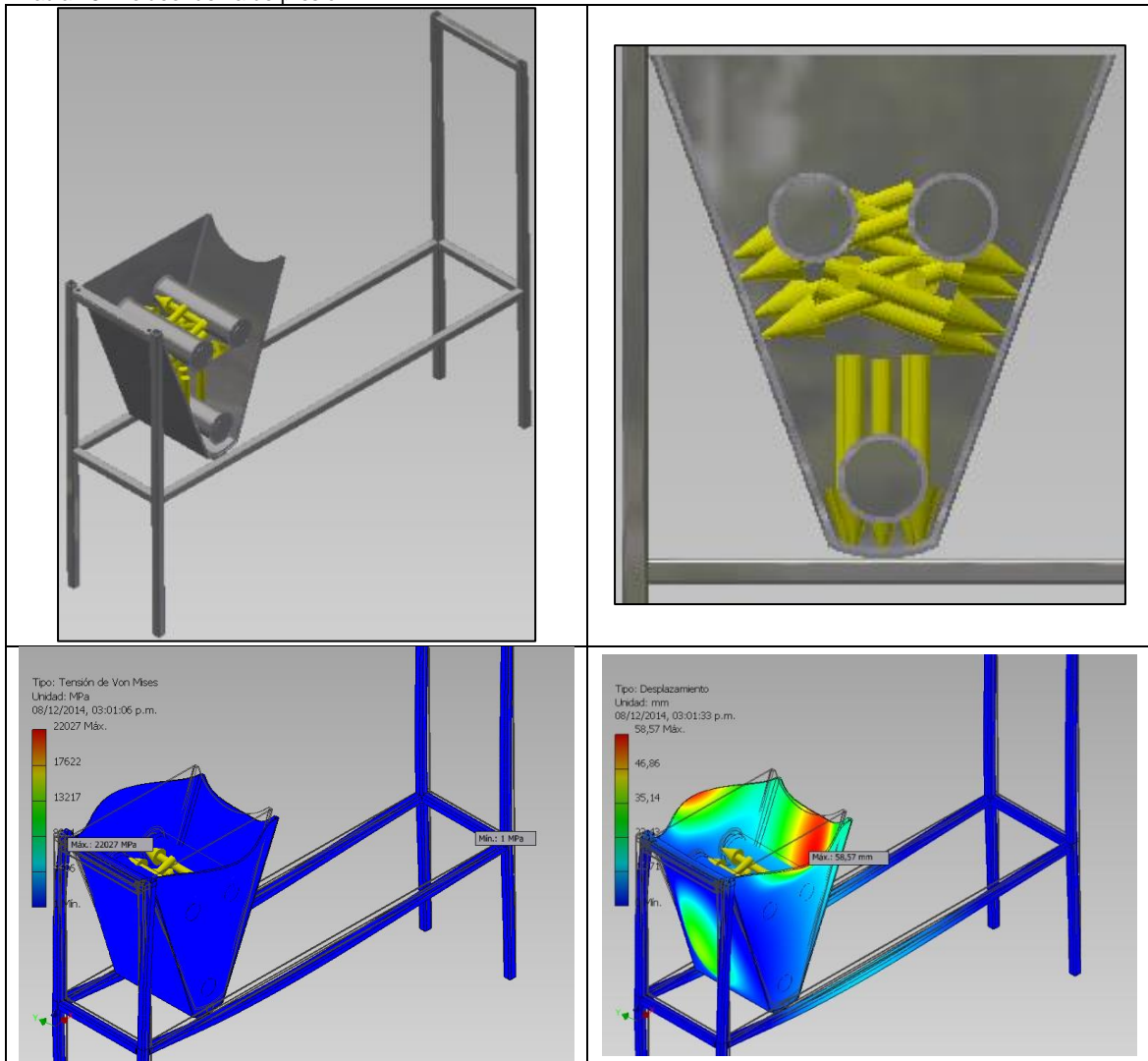
$$P = (1,21 \text{ gr/cm}^3) * (21,5 \text{ cm}) * (9,81 \text{ m/s}^2)$$

$$P = (1210 \text{ Kg/m}^3) * (0,215 \text{ m}) * (9,81 \text{ m/s}^2)$$

$$P = 2,55 \text{ MPa}$$

Con este cálculo se determina que la fuerza por presión no es muy relevante, pero se escoge una lámina de acero inoxidable calibre 14 que tiene un espesor de 2,67 mm para mantener un posible margen de error ya que se puede cambiar de resina sin necesidad de cambiar el tanque y por lo tanto los costos no variarían. En la Tabla 28 se observan las figuras del modelado y de la simulación del depósito del reservorio, donde en los resultados se puede evidenciar que el desplazamiento máximo que sufriría es de 55 mm con una tensión máxima de Von Mises de 22,027 MPa.

Tabla 28. Moldeo fuerza de presión



5.4 DADO, MOLDE Y SISTEMA DE CALEFACCIÓN

Esta es la segunda pieza en orden de importancia sobre una máquina de pultrusión, ya que en esta se llevara a cabo todo el proceso de reacciones químicas que darán lugar al

perfil de la pieza que se piense fabricar. Está compuesto principalmente de nueve diferentes partes como se observa en la Tabla 29, que en su conjunto aseguran que este dispositivo cumpla a cabalidad sus funciones.

Tabla 29. Componentes del dado de pultrusión

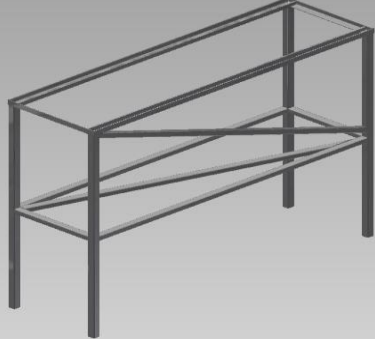
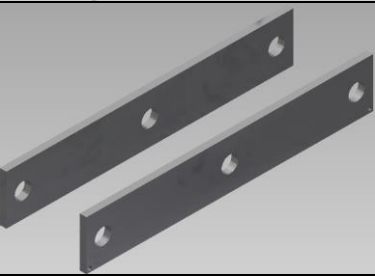
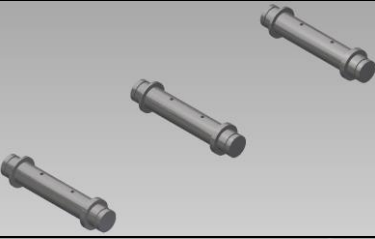
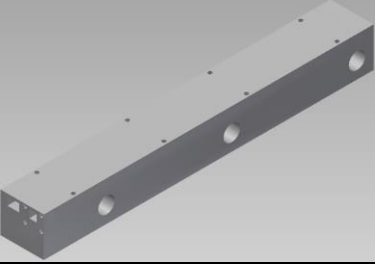
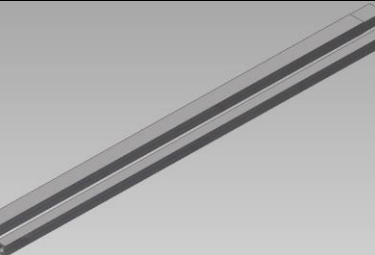
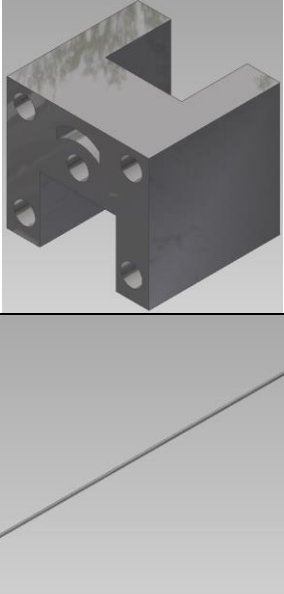
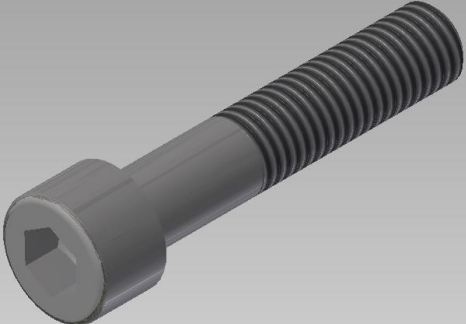
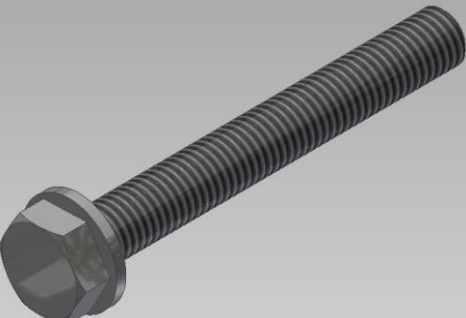
Pieza	Descripción	Material
Mueble Soporte		Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío Dimensiones: 20x20x2
Placas soporte eje deslizante		Acero SAE 8620 con cementado a 52 RC
Ejes de deslizamiento		
Carcaza exterior		Acero AISI P 20, comercialmente: Acero 1-2738: Acero grado herramientas para moldes
Moldes		Acero AISI P 20, comercialmente: Acero 1-2738: Acero grado herramientas para moldes

Tabla 29. (Continuación)

Pieza	Descripción	Material
Guía montaje de varilla hueca		<p>Acero AISI P 20, comercialmente: Acero 1-2738: Acero grado herramientas para moldes</p>
Perno de sujeción del dado		<p>Tornillo Grado 8 – M10</p>
Tornillos de sujeción dela guía		<p>Tornillo Grado 8 – M10</p>

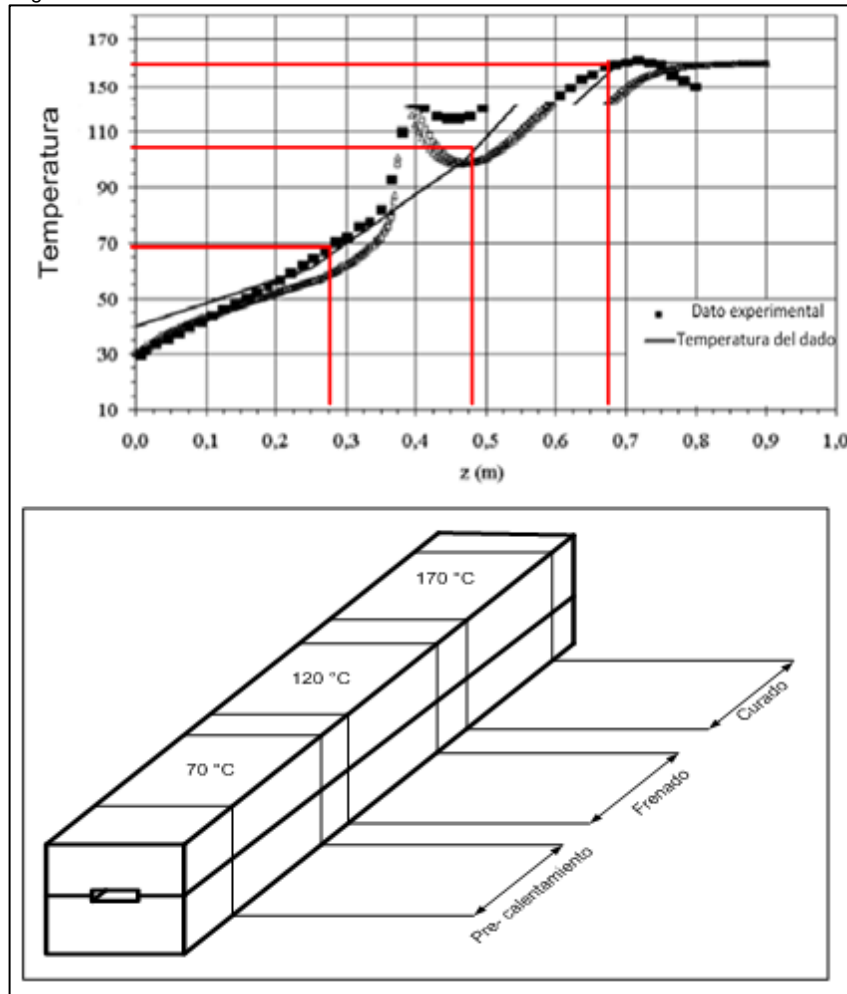
Fuente: Autores

Para elaborar un adecuado proceso de pultrusión es importante tener un excelente acabado superficial en los guías y moldes. Estos se fabricaran en material acero SAE 2738 especialmente diseñado para la fabricación de moldes que estén destinados al procesamiento de plásticos (Véase ANEXO F). Para calentar las 3 zonas del molde se colocaran 3 resistencias eléctricas en forma de abrazadera cuadrada equidistante sobre la superficie del molde. En cada zona se implementaran una temperatura adecuada para el

proceso y el curado adecuado de la fibra impregnada de la resina Palatal CO40 que reacciona a una temperatura de 170 °C como se menciona en el Anexo A.

En el artículo “Simulation of heat transfer and cure in pultrusión with a general-purpose finite element package”, se presenta un estudio detallado por medio de la optimización de una curva de curado del material que ayuda a elegir las temperaturas y dimensiones adecuadas de cada zona de calentamiento para generar un proceso de pultrusión adecuado, además se observa la estandarización de las dimensiones en el proceso de pultrusión (Véase Figura 66). (17)

Figura 66. Curva de curado



Fuente: L. Calabrese, A. Valenza. 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. Noviembre 2002. P 6

Observando la Figura 66 en ella se muestra el comportamiento de curado de la fibra en cada zona de calentamiento, en la siguiente tabla se especifican los datos.

Tabla 30. Datos del comportamiento de curado de la fibra

	FASE 1	FASE 2	FASE 3
Temperatura (°C)	70	105	170
Longitud (m)	0,28	0,22	0,2

Fuente: Autores

Al tener estos datos ya se puede estandarizar las dimensiones y temperaturas para asegurar la reacción de la resina Palatal CO40.

5.4.1 Transferencia de calor en el molde

Con base en la curva de temperatura que se observa en la Figura 66, para hallar la transferencia de calor del molde se calcula la potencia necesaria en resistencias y las temperaturas aplicadas que cumplan la exigencia de la resina al realizar su cambio de estado.

Ecuación 17. Conducción térmica

$$\text{Conducción térmica } (Q) = \frac{K * A * \Delta T}{L}$$

En donde se tiene que:

- ✓ A: Área de calentamiento
- ✓ K: Conductividad térmica
- ✓ L: Longitud calentada
- ✓ ΔT : Variación de temperatura en zona examinada

Las resistencias por conducción se obtienen de la siguiente manera:

Ecuación 18. Resistencia por conducción

$$R = \frac{\ln \frac{R2}{R1}}{2 * \pi * K_{acero} * L} = \frac{L}{K_{acero} * A}$$

Las resistencias por convección se obtienen de la siguiente manera;

Ecuación 19. Convección

$$Q = h * A * \Delta T$$

Las convecciones usadas son:

- ✓ A: Área de calentamiento
- ✓ h: Coeficiente de convección

✓ Q: Conducción térmica

Ecuación 20. Resistencia conducción

$$R = \frac{1}{h * 2 * \pi * R * L}$$

$$R = \frac{L}{h * A}$$

Entonces se puede afirmar que la conducción y convección de resistencias es igual a la sumatoria de ellas mismas. Donde se toma que R_1 : Radio interno molde y R_2 : Radio externo molde. Para el desarrollo del cálculo, que se ve en la Ecuación 21 se debe saber el coeficiente de convección del aire ($8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$) este es un flujo natural no forzado.

Ecuación 21. Calentamiento molde

$$Q_{\text{molde}} = \frac{\Delta T}{\Sigma(R_{\text{conveccion}} + R_{\text{conduccion}})} = \frac{T_{\text{zona}} - T_{\text{ambiente}}}{\frac{\text{Ln} \left(\frac{R_2}{R_1} \right)}{2 * \pi * K_{\text{acero}} * L_{\text{zona}}} + \frac{1}{h_{\text{aire}} * 2 * \pi * R_1 * L_{\text{zona}}}}$$

En la zona 1, se tiene que:

$$Q_{\text{molde}} = \frac{70^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{\frac{\text{Ln} \left(\frac{0,005 \text{ m}}{0,00635 \text{ m}} \right)}{2 * \pi * 42 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} * 0,275\text{m}} + \frac{1}{8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}} * 2 * \pi * 0,00635\text{m} * 0,275\text{m}}} = 4,3900\text{W}$$

En la zona 2, se tiene que:

$$Q_{\text{molde}} = \frac{120^\circ\text{C} - 70^\circ\text{C}}{\frac{\text{Ln} \left(\frac{0,005 \text{ m}}{0,00635 \text{ m}} \right)}{2 * \pi * 42 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} * 0,275\text{m}} + \frac{1}{8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}} * 2 * \pi * 0,00635\text{m} * 0,275\text{m}}} = 4,3936\text{W}$$

Y en la zona 3, se tiene que:

$$Q_{\text{molde}} = \frac{170^\circ\text{C} - 120^\circ\text{C}}{\frac{\text{Ln} \left(\frac{0,005 \text{ m}}{0,00635 \text{ m}} \right)}{2 * \pi * 42 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} * 0,275\text{m}} + \frac{1}{8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}} * 2 * \pi * 0,00635\text{m} * 0,275\text{m}}} = 4,3936\text{W}$$

Para calcular la transformación de energía se usa la Ecuación 22 donde las convenciones que se usan son: C_L = calor latente de fusión de resina, C_p = calor específico de resina, \dot{m} = Flujo másico y Δ_t = Variación de temperatura en zona examinada. Esto con el fin de saber el calor necesario para el cambio de estado de la resina.

Ecuación 22. Transformación energía:

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

Fase 1:

$$Q = \left[\left(1.500 \frac{\text{J}}{\text{Kg}} \text{°C} * (70 - 20) \right) + 100.000 \text{ J/Kg} \right] * 0,025 \frac{\text{kg}}{\text{seg}} = 4.375 \text{ W}$$

Fase 2:

$$Q = \left[\left(1.500 \frac{\text{J}}{\text{Kg}} \text{°C} * (120 - 70) \right) \right] * 0,025 \frac{\text{kg}}{\text{seg}} = 1.850 \text{ W}$$

Fase 3:

$$Q = \left[\left(1.500 \frac{\text{J}}{\text{Kg}} \text{°C} * (70 - 120) \right) \right] * 0,025 \frac{\text{kg}}{\text{seg}} = -1.875 \text{ W}$$

Se debe encontrar cuanto calor deben producir las resistencias en cada zona para calentar el molde y hacer el cambio de estado de la resina. Este dato se halla mediante el balance de calor:

Ecuación 23. Balance de calor

$$Q_{resistencia} = Q_{molde} + Q_{resina}$$

Fase 1:

$$Q_{resistencia} = 4375 \text{ W} + 4,390 \text{ W} = 4379,39 \text{ W}$$

Fase 2:

$$Q_{resistencia} = 1850 \text{ W} + 4,390 \text{ W} = 1854,39 \text{ W}$$

Fase 3:

$$Q_{resistencia} = -1850 \text{ W} + 4,390 \text{ W} = -1845,61 \text{ W}$$

Al seleccionar la resistencia se deben tener en cuenta criterios básicos como lo son:

- ✓ Geometría
- ✓ Potencia de calentamiento
- ✓ Dimensiones

Para realizar el cálculo y conocer el área de resistencia se debe conocer:

- ✓ D_o : Diámetro exterior molde
- ✓ n: Numero de resistencias

✓ L_w : Longitud zona de calentamiento

Ecuación 24. Área de resistencia

$$\begin{aligned} A &= \pi * D_o * L_w * n \\ A &= \pi * 0,1 \text{ m} * 0,25 \text{ m} * 1 \\ A &= 0,0785398 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

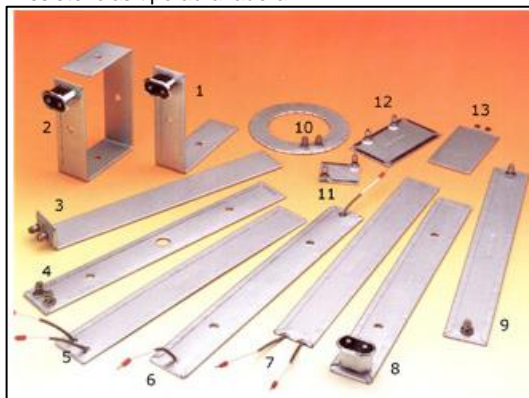
Con la obtención de este dato ya se sabe cuánto es el área usada por cada resistencia sobre la superficie del molde.

Ecuación 25. Potencia usada [Watts]

$$\begin{aligned} \text{Watts} &= \frac{Q_{\text{resistencia}}}{A} \\ \text{Watts} &= \frac{4.379,39 \text{ W}}{0,0785398 \text{ m}^2} = 55.760,13 \text{ W} \end{aligned}$$

Se desarrolla un cálculo referente a la cantidad de potencia usada [Watts] que se necesitan en las resistencias, este calor hallado es igual en cada zona porque el delta de temperatura es el mismo a lo largo de la pieza. Una vez se tienen estos resultados se sabe que resistencias se debe buscar en el mercado nacional, deben cumplir los requerimientos establecidos en el proceso. Por ello para este proyecto se utiliza resistencias tipo abrazadera cuadrada como se ve en la Figura 67 inciso 2 y en la Figura 68; dicha resistencia se acoplaría al molde y tendría las medidas de 15,8 cm de altura total, 13,9 cm de ancho y un espesor de 4 cm y estarán conectadas a un control de temperatura que permitirá generar varias temperaturas que se necesitan para el debido proceso por medio de termocuplas tipo J.

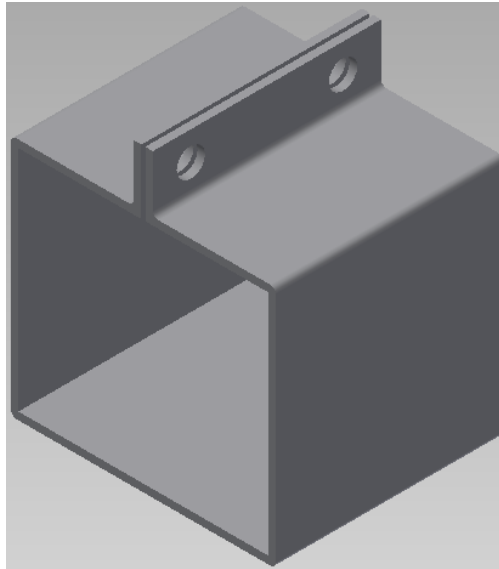
Figura 67. Resistencias tipo abrazadera



Fuente: Aloña, Resistencias Termoeléctricas⁴².

⁴² [En línea]. Disponible en: <<http://resistenciasalona.com/Anduaga/index.php/productos-2/resistencias-planas-acodadas-coronas-circulares/>>

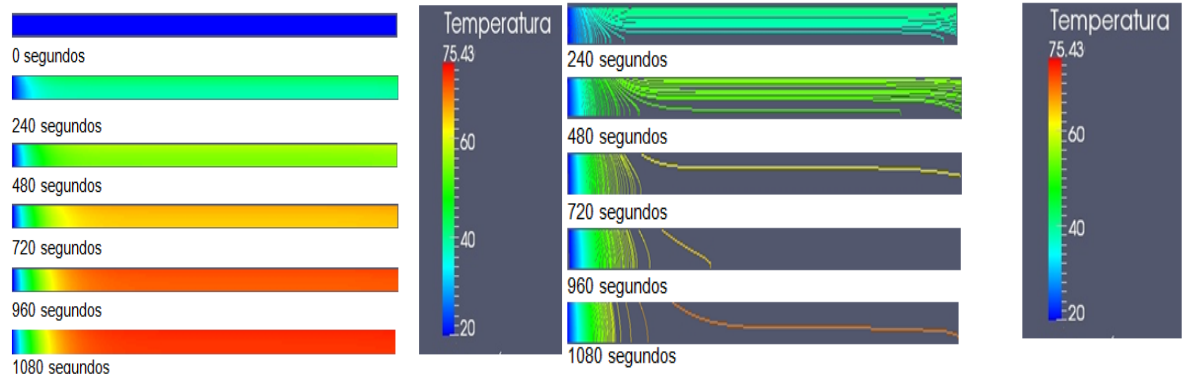
Figura 68. Resistencia eléctrica tipo abrazadera



Fuente: Autores

Por medio de un software gratuito se aplicó un análisis térmico del flujo de calor al interior del molde, este software da el dato de cuanto demora la primera etapa de curado en lograr la temperatura adecuada. Este software realiza el análisis por medio de ecuaciones diferenciales de balance de energía y balance de masa. Mediante un modelado se puede observar en la Figura 69 la zona caliente en 1080 segundos obtiene una temperatura que muestra cómo se realiza el precalentamiento del molde durante el tiempo de trabajo para no generar maltrato o quemadura en el curado del perfil. También se debe tener en cuenta que la velocidad es un factor muy importante para el proceso, al tener mayor valor de velocidades disminuye el tiempo de exposición que permite transferencia de calor.

Figura 69. Temperatura de gelación



Fuente: Fuentes Gómez, Darwin Mauricio and Pacheco Páez, Jhoan Javier. Diseño De Una Máquina Para Pultrusión De Materiales Compuestos, Escala Laboratorio, Para La Fabricación De Perfil Estructural

5.4.2 Sistema de protección termo – aislante

Se hace muy necesario un sistema de aislamiento térmico como protección para las personas que se encuentren cerca del equipo mientras esté en funcionamiento, debido a las altas temperaturas que maneja, pues una quemadura a 120° C puede ocasionar pérdida funcional y deformidad del sitio que se vea afectado. La solución más viable es realizar un recubrimiento en forma de pijama tal como se ve en la Figura 70; debido a que no se puede realizar un cerramiento completo por la estructura que la máquina posee.

Figura 70. Recubrimiento en un tubo.



Fuente: [En línea]. Disponible en: <<http://catalogo.aki.es/fontaneria/alimentacion-de-agua/coquillas-polietileno-1m/idp13366>>

Por lo anterior se decidió usar una tela de asbesto grado comercial debido a las aplicaciones que esta posee, pues es utilizada como medios aislantes para la protección de equipos y conservación del calor. Esta tela está especialmente diseñada para aislamiento térmico, no es recomendada para la fabricación de guantes, polainas o delantales. Las características técnicas de la fibra a usar se ven en la Figura 71

Figura 71. Características técnicas de la tela de asbesto

Thickness mm(inches)	Weight Kg/Mt ²	Width Mts	Meters / Roll	Temperature ° C
1.5 (1/16")	1.30	1.0	30.0	240 °C
3.0 (1/8")	1.60	1.0	30.0	240 °C

Fuente: SEALCO [En línea]. Disponible en: <<http://www.cisealco.com/index.php/productos/aislamiento-termico>>

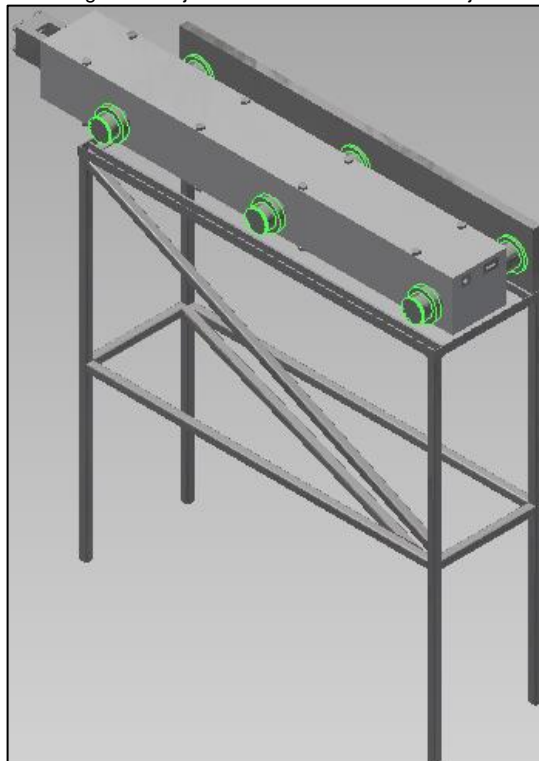
El catálogo completo sobre la Tela De Asbesto Grado Comercial Ref: 3002 se puede consultar en el ANEXO H

5.4.3 Ejes de deslizamiento

Estos ejes están diseñados para lograr deslizar el dado y sus componentes con el fin de centrar la boca de entrada de la fibra al momento de generar una de las dos (2) piezas

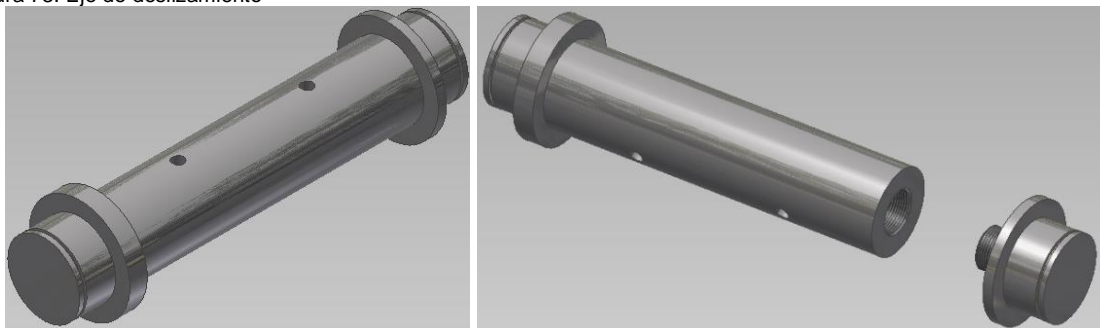
para las cuales se está diseñando este tipo de máquina, consiguiendo que la fibra roving no sufra tensiones al entrar en ángulo al dado. Para conocer si el diseño de dicho elemento es acorde al funcionamiento de este se realiza un estudio estático del mismo sabiendo que actuarán dos fuerzas principales, de las cuales la primera es efectuada debido al peso del material que se encuentra descansando sobre él y la segunda es un momento flector que se origina al obligar que la fibra pase por el dado. Para conocer el peso del dado y sus componentes se realiza por medio de la densidad del material como se observa a continuación.

Figura 72. Ejes de deslizamiento en el conjunto



Fuente: Autores

Figura 73. Eje de deslizamiento



Fuente: Autores

Ecuación 26. Peso carcasas

$$\rho = \frac{m [Kg]}{v [m^3]}$$
$$m [Kg] = \rho \left[\frac{Kg}{m^3} \right] * v [m^3]$$
$$m [Kg] = 7775 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] * (0,001986 m^3 + 0,0125 m^3) = 112,63 Kg$$

Ecuación 27. Peso moldes

$$m [Kg] = \rho \left[\frac{Kg}{m^3} \right] * (v_{molde\ varilla} [m^3] + v_{molde\ platina} [m^3])$$
$$m [Kg] = 7775 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] * (0,0004 m^3 + 0,0007 m^3) = 8,38 Kg$$

Ecuación 28. Peso guía diámetro interno

$$m [Kg] = \rho \left[\frac{Kg}{m^3} \right] * (v_{guía\ int.} [m^3])$$
$$m [Kg] = 7775 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] * (0,00236 [m^3]) = 18,33 Kg$$

Ecuación 29. Peso Total

$$m [Kg] = m_{carcasa} + m_{moldes} + m_{guía}$$
$$m [Kg] = 112,63 Kg + 8,38 Kg + 18,33 Kg = 139,34 Kg$$

Ecuación 30. Fuerza ejercida en cada eje

$$F [N] = \frac{m [Kg] * g \left[\frac{m}{s^2} \right]}{3}$$
$$F [N] = \frac{139,34 [Kg] * 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]}{3} = 455,64 N$$

Para calcular el momento flector producido, se toma como base que la fuerza de halado es de 981 N⁴³ que se traslada por una distancia de 2,5 cm que es la separación que poseen.

Ecuación 31. Momento flector

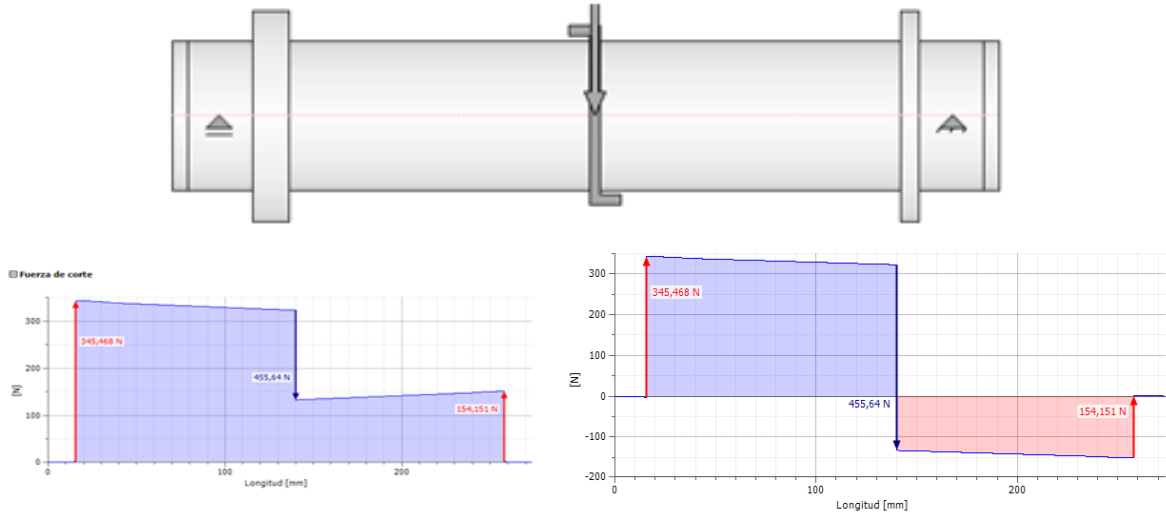
$$M = F * d = 981 N * 0,025 m = 24,53 N * m$$

Mediante la simulación efectuada para comprobar el diámetro del diseño y el comportamiento completo de la pieza se pudo evidenciar como se muestra en la Tabla 31

⁴³ Ing. Beltrán, Alfredo. Perfiglass Ltda. Bogotá. observación inédita, 2014.

que los resultados son admisibles en el diseño de este tipo de máquinas, pues tiene una deformación equivalente de 0,00000000649943 mm y una tensión por Von Mises de 0,00151053 MPa lo cual hace que la pieza resista el comportamiento total de la máquina y asegura que no vaya a fallar por ningún factor.

Tabla 31. Diagramas de cuerpo libre del eje



Fuente: Autores

Tabla 32. Simulación del eje

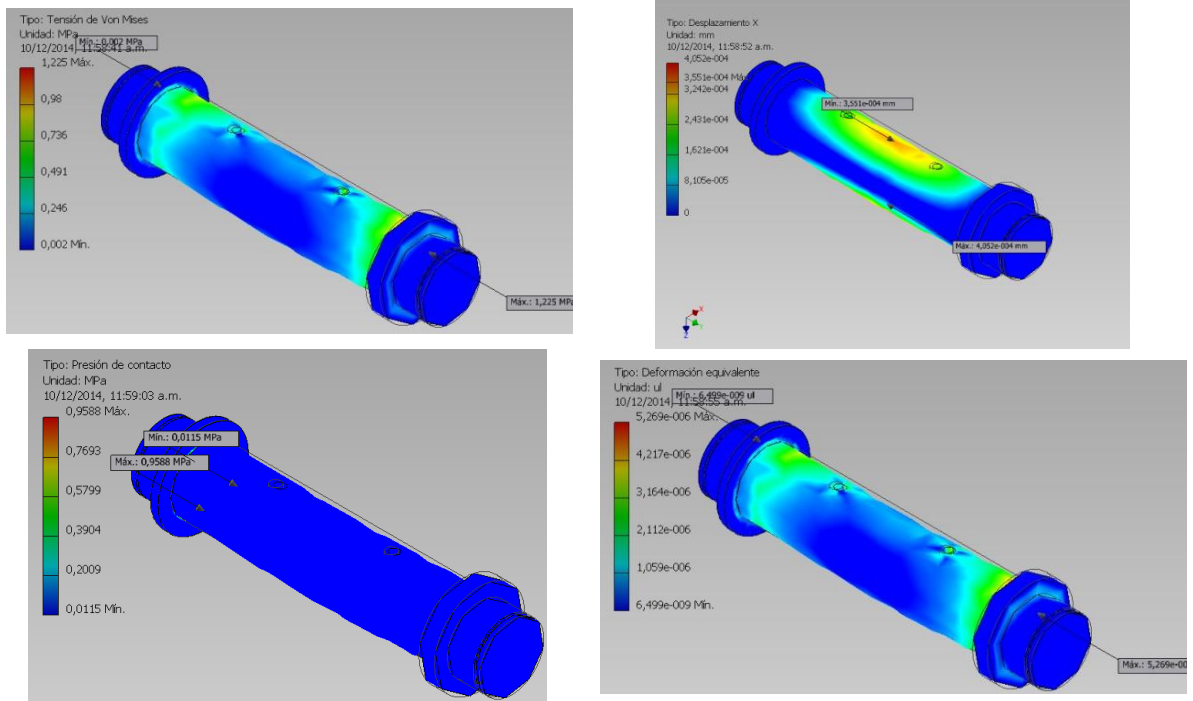


Figura 74. Resultado simulación del eje

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	557641 mm ³	
Masa	4,37748 kg	
Tensión de Von Mises	0,00151053 MPa	1,22516 MPa
Primera tensión principal	-0,117638 MPa	1,00339 MPa
Tercera tensión principal	-0,934934 MPa	0,124263 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,000733458 mm
Coefficiente de seguridad	15 su	15 su
Deformación equivalente	0,00000000649943 su	0,0000052694 su
Presión de contacto	0 MPa	0,958805 MPa
Presión de contacto X	-0,540521 MPa	0,587224 MPa
Presión de contacto Y	-0,723935 MPa	0,758722 MPa
Presión de contacto Z	-0,641793 MPa	0,376844 MPa

Fuente: Autores

5.5 SISTEMA DE HALADO

Durante el diseño de la máquina de pultrusión, el requerimiento más importante es el sistema de halado de la misma. El halador debe generar una velocidad de entre 0.2 a 0.4 m/min por medio de un moto reductor. 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.

Se debe tener en cuenta que la fuerza necesaria producida en el molde al hacer cruzar la fibra impregnada de la resina es la misma fuerza producida por el halador para jalar el perfil, teniendo muy presente que las propiedades física del material van a ir variando con respecto a la temperatura, por lo cual se toma como base los datos de la investigación realizada por Hwan Kim, Woo Lee, en su artículo "A model for a thermoplastic pultrusion process using commingled yarns" (18).

Los pasos a seguir es primero calcular el volumen de sección del curado teniendo el área del perfil que se va producir como se observa en la Ecuación 32, luego se calcula la masa de la zona de curado usando la Ecuación 33. Una vez teniendo este dato es muy fácil calcular el peso del sistema al multiplicarlo por la gravedad como se ve en la Ecuación 34.

Ecuación 32. Volumen de sección del curado

$$V = A * (\text{Longitud de zona})$$

$$V = 150 \text{ mm}^2 * 275 \text{ mm}$$

$$V = 41,250 \text{ mm}^3$$

Ecuación 33. Masa de la zona de curado

$$m = 2 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} * 41,250 \text{cm}^3$$
$$m = 82,5 \text{ gr} = 0,0825 \text{ kg}$$

Ecuación 34. Peso de la sección

$$p = m * g$$
$$p = 0,0825 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}$$
$$p = 0,809 \text{ N}$$

Cuando se hayan calculado las incógnitas que anteriormente se solucionaron, se procede a hallar la fuerza de rozamiento ya que solo se requiere el peso que es igual a la fuerza normal; un dato muy importante es que el coeficiente de fricción entre acero y plástico es igual a 0,5⁴⁴.

Ecuación 35. Calculo de fuerza de rozamiento

$$F_r = \mu * N$$
$$F_r = 0,5 * 0,809 \text{ N}$$
$$F_r = 0,404 \text{ N}$$

Al tener la fricción se calcula la potencia necesaria teniendo como base la velocidad del proceso (V) y la fuerza de rozamiento hallada en la Ecuación 36.

Ecuación 36. Calculo de potencia

$$P = F_r * V$$
$$P = 0,404 \text{ N} * 0,0066 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$
$$P = 0,00267 \text{ Watt}$$

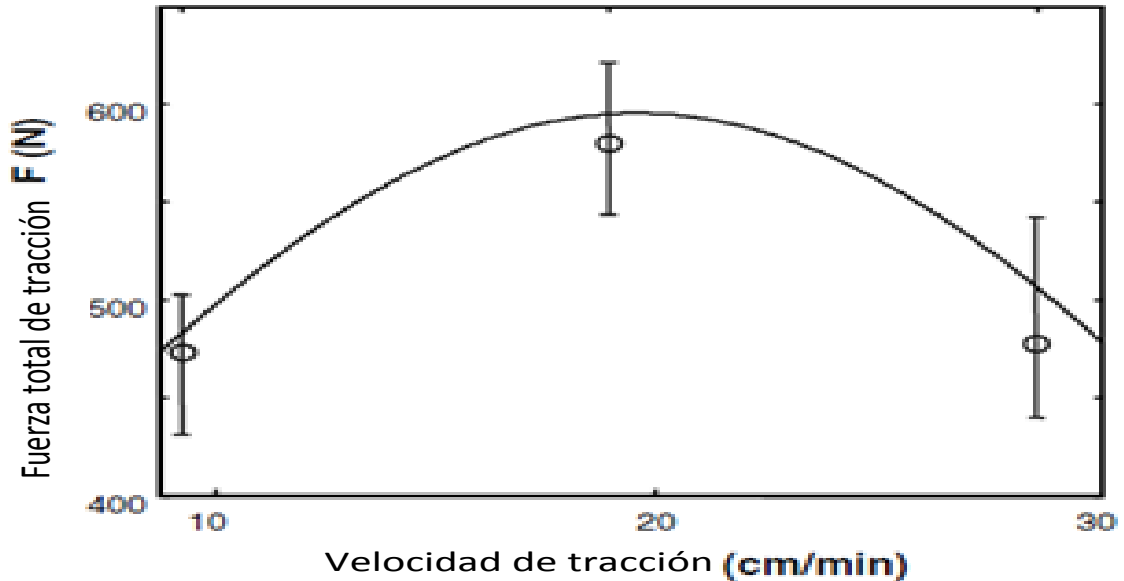
El dato que arroja la Ecuación 36 muestra el comportamiento en la última sección dentro del dado de pultrusión, que es encargado del curado de la pieza. Dicha potencia debe dar muy baja por lo que se toma como base el estudio realizado denominado "Simulation of heat transfer and cure in pultrusión with a general-purpose finite element package"⁴⁵ ya que las limitaciones en este campo de investigación y la no disposición de una máquina

⁴⁴ Dato tomado de Budynas G., Richard y Nisbett, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley

⁴⁵ Xiao Lin Liua, I.G. Crouch, Y.C. Lam. Simulation of heat transfer and cure in pultrusión with a general-purpose finite element package.

para generar los estudios adecuados y acondicionados al tipo de perfil obliga a usar lo poco y único que se consigue; dicho estudio es una parametrización del proceso de pultrusión, la cual relaciona la velocidad con la fuerza total de tracción y se puede observar en la Figura 75 y de la que se puede extraer la Ecuación 37.

Figura 75. Fuerza de tracción Vs velocidad de tracción



Fuente: Xiao Lin Liua, I.G. Crouch, Y.C. Lam. Simulation of heat transfer and cure in pultrusión with a general-purpose finite element package.

Ecuación 37. Potencia teórica

$$P = (400N) * (0,4 \text{ m}/\text{min}) = 160 \text{ W} \cong 0,22 \text{ hp} \cong \frac{1}{4} \text{ hp}$$

Teniendo este resultado y validando los datos de las referencias que comercialmente se consiguen de moto reductores, es evidente que el jalador estará sobredimensionado pero esto no afectara las características ni el trabajo que desempeñara. En la selección que se realizó da características básicas como la apertura máxima que es de 100 mm, ancho máximo banda siendo de 76 mm, la velocidad máxima de 10 m/min , la velocidad mínima de 0,35 m/min y su motor de 1 HP. (Véase ANEXO H)

Figura 76. Halador doble banda modelo belt pullers 320



Fuente: CONAIR [En línea] Disponible en: <<http://www.conairgroup.com/silverstripe/index.php/products/#page=tab-1>>

5.6 SISTEMA DE CORTE

La sierra de corte está compuesta de un disco de 30 dientes con un diámetro de 100 mm y un espesor de 1,5 mm, también tiene un motor que genera un giro de corte 0,02 mm por diente. Lo primero es calcular el número de dientes para hacer corte de perfil redondo macizo con la Ecuación 38, para luego calcular las revoluciones necesarias de la sierra con la Ecuación 39

Ecuación 38. Calcular número de dientes

$$\begin{aligned} \text{numero dientes de corte} &= \frac{\text{longitud de corte}}{\text{avance por diente}} \\ \text{numero dientes de corte} &= \frac{12,7 \text{ mm}}{0,02 \text{ mm /diente}} \\ \text{numero dientes de corte} &= 635 \text{ dientes} \end{aligned}$$

El anterior dato hallado representa que se requiere que el disco de corte en su rotación toque 635 veces con sus dientes el perfil para poder cortar toda su área transversal.

Ecuación 39. Revoluciones de la sierra

$$\begin{aligned} \text{revoluciones} &= \frac{\# \text{dientes de corte}}{\text{numero de dientes}} \\ \text{revoluciones} &= \frac{635 \text{ dientes}}{30 \text{ dientes}} \end{aligned}$$

$$\text{revoluciones} = 21,16 \text{ rev}$$

Con base en la Tabla 22, donde se define la pulidora a usar, se conoce que la velocidad que esta tendrá será de 1000 rpm, por lo anterior en la Ecuación 40 se calcula el tiempo que se demorará en cortar toda la sección transversal de la pieza ya que conocemos las revoluciones necesarias halladas en la Ecuación 39.

Ecuación 40. Tiempo de corte para la sección transversal

$$t = \frac{21,16 \text{ rev} * 1 \text{ min}}{1000 \text{ rev}}$$
$$t = 0,021 \text{ min} \cong 1,27 \text{ seg.}$$

Después se calcula la potencia requerida del motor de la porta sierra que genera el corte del perfil con el cálculo de la resistencia máxima a la tracción de la fibra que compone el 70% del material a cortar como se aprecia en la Ecuación 41 y luego aplica la Ecuación 42 para calcular el esfuerzo admisible a corte de la resina, Una vez se tengan estos dos valores se calcula el área de corte de la superficie de contacto de la sierra con la Ecuación 43.

Así se logra hallar la fuerza ejercida con ayuda de la Ecuación 44 para lograr calcular el momento torsor con ayuda de la Ecuación 45.

Ecuación 41. Resistencia máxima a la tracción de la resina

$$\sigma_r = 70 \text{ MPa}$$

Ecuación 42. Esfuerzo admisible a corte de la resina

$$\tau = 0,25 * \sigma_r$$
$$\tau = 0,25 * 70 \text{ MPa}$$
$$\tau = 17,5 \text{ MPa}$$

Ecuación 43. Área de corte de la superficie de contacto de la sierra

$$A = \text{Area de contacto} * \text{espesor de la sierra}$$
$$A = 12,7\text{mm} * 1,5\text{mm}$$
$$A = 19,05\text{mm}^2 = 1,905 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

Ecuación 44. Fuerza ejercida

$$F = A * \tau \text{ (Esfuerzo admisible de corte)}$$

$$F = 1,905 \times 10^{-5} \text{ m}^2 * 17.500.000 \text{ Pa}$$

$$F = 333,37 \text{ N}$$

Ecuación 45. Momento torsor

$$M = F * r$$

$$M = 333,37 \text{ N} * 0,05 \text{ m}$$

$$M = 16,6 \text{ Nm}$$

Una vez se tienen todos estos datos se hace necesario calcular con la Ecuación 46 la potencia de operación y así poder buscar un motor con 3 HP como mínimo para tener un proceso adecuado del sistema. Se debe calcular el tiempo de corte al perfil con la

Ecuación 46. Potencia de operación

$$P = \frac{M * w}{9550}$$

$$P = \frac{16,6 \text{ Nm} * 1800 \text{ rpm}}{9550}$$

$$P = 3,12 \text{ W} \cong 2,92 \text{ HP}$$

Al tener el tiempo de corte del perfil se debe calcular la distancia q avanza el perfil mientras se hace el corte.

Ecuación 47. Distancia de avance

$$d = 0,00667 \frac{\text{m}}{\text{seg}} * 0,70 \text{ seg}$$

$$d = 0,00467 \text{ m} \cong 4,67 \text{ mm}$$

Al observar los datos hallados se determina que no es necesario hacer un desplazamiento de la sierra pues el tiempo de corte no interfiere con el proceso y tampoco con la velocidad del proceso demostrando que no genera consecuencias drásticas para la máquina. Con el diseño ya hecho y los cálculos se realiza la selección del sistema de corte **CTD Model M25R Quick Index 12"** de la empresa CTD MACHINES ya que cumple con las características necesarias para el diseño de la máquina cuanto a dimensiones y propiedades mecánicas que se observan en el ANEXO I.

Figura 77. Sistema de corte CTD Modelo M25R



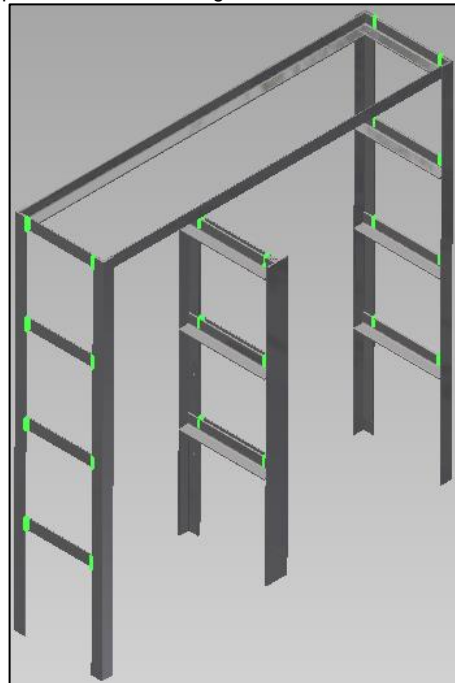
Fuente: CTD MACHINES, [En línea]. Disponible: <http://www.ctdsaw.com/mitre-cut-off-saws/ctd-model-m25r-quick-index-12.html>

Esta máquina tiene grandes prestaciones hacia el equipo de pultrusión, dando ciertas características principales como lo son la apertura máxima 305 mm, las 3450 rpm y el motor de 3 HP, adicionalmente es posible conseguir los accesorios necesarios de guía para lograr desplazar la sierra y no generar represamiento al perfil.

5.7 SOLDADURA

5.7.1 Mueble soporte bobinas roving

Figura 78. Soldadura en el mueble soporte de bobinas roving



Fuente: Autores

Para soldar los perfiles L utilizados en la fabricación del mueble que soportará las bobinas con la fibra como se observa en la Figura 78, se escogió realizarla con soldadura de arco y usar un electrodo con clasificación AWS E6013 (Véase Anexo C y ANEXO D). En la página web de esta empresa se encuentra las características básicas y las recomendaciones que en este caso se puede utilizar en corriente alterna o continua, polaridad negativa (-) o positiva (+). Lleve el arco corto y una velocidad de avance adecuada el tipo de junta y al diámetro que emplee. Al soldar en filete horizontal mantenga el electrodo con un ángulo de elevación de 50 a 70° con relación a la platina inferior y una inclinación de 10 a 20° en la dirección de avance. Entre más delgada la platina y mayor corriente, se debe usar un ángulo de elevación mayor para evitar recalentamiento de la platina vertical. Además sus aplicaciones son: carrocerías, muebles metálicos, ductos de aire acondicionado, rejas, ventanas y ornamentación en general.⁴⁶ (19). También se logra extraer las propiedades mecánicas de dicha soldadura que se puede observar en la Figura 79

Figura 79. Propiedades mecánicas típicas del metal depositado

Resistencia a la tracción:	42 - 52 Kg/mm ² (60 - 74 Ksi)
Límite de fluencia:	34 - 45 Kg/mm ² (48 - 65 Ksi)
Elongación:	22 - 29%
Resistencia al impacto Charpy en V a 20 °C: 50-110 joules.	

Fuente: West Arco. [En línea]⁴⁶

Para realizar el análisis de los elementos soldados se retoma la Figura 57 donde se conoce que la fuerza de reacción es la fuerza que soportara cada uno de los componentes, por lo tanto, la $F = 166,77 N$ y la garganta de la soldadura es $h = 6 mm$. Con estos datos se deberá calculara el área de la garganta teniendo como base la Figura 80, donde se encuentran las ecuaciones para el cálculo de la garganta, la ubicación del centro de gravedad y el segundo momento polar unitario del área. Realizando un análisis por medio del software de modelado de CAD 3D Inventor® Professional, se pueden determinar las medidas básicas que servirán a la hora de realizar todos los cálculos pertinentes para concluir si la unión resulta o no satisfactoria; en la Tabla 33 se pueden observar dichas medidas.

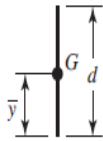
Tabla 33. Informe de cordón de soldadura mueble bobinas Roving

Tipo	Longitud	Unidad de medida	Masa	Unidad de medida	Área	Unidad de medida	Volumen	Unidad de medida
Empalme	11034,01	mm	0,2	kg	29687,39	mm ²	25200	mm ³

Fuente: Autores

⁴⁶ Texto extraído de: ELECTRODOS PARA SOLDAR ACEROS AL CARBONO (AWS A5.1), pg12; West Arco

Figura 80. Propiedades torsionales de las soldaduras de filete.

Weld	Throat Area	Location of G	Unit Second Moment of Area
	$A = 0.707hd$	$\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^3}{12}$

Fuente: Budynas G., Richard y Nisbett, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley

Ecuación 48. Área de la garganta

$$A_g = 0,707 hd$$

$$A_g = 0,707 * 6 mm * 50 mm$$

$$A_g = 212,1 mm^2 \cong 0,0002121 m^2$$

Figura 81. Cargas constantes permisibles y tamaños mínimos de soldadura de filete

Schedule A: Allowable Load for Various Sizes of Fillet Welds							
Strength Level of Weld Metal (EXX)							
	60*	70*	80	90*	100	110*	120
Allowable shear stress on throat, ksi (1000 psi) of fillet weld or partial penetration groove weld							
$\tau =$	18.0	21.0	24.0	27.0	30.0	33.0	36.0
Allowable Unit Force on Fillet Weld, kip/linear in							
$\dagger f =$	12.73h	14.85h	16.97h	19.09h	21.21h	23.33h	25.45h
Leg Size h, in	Allowable Unit Force for Various Sizes of Fillet Welds kip/linear in						
1	12.73	14.85	16.97	19.09	21.21	23.33	25.45
7/8	11.14	12.99	14.85	16.70	18.57	20.41	22.27
3/4	9.55	11.14	12.73	14.32	15.92	17.50	19.09
5/8	7.96	9.28	10.61	11.93	13.27	14.58	15.91
1/2	6.37	7.42	8.48	9.54	10.61	11.67	12.73
7/16	5.57	6.50	7.42	8.35	9.28	10.21	11.14
3/8	4.77	5.57	6.36	7.16	7.95	8.75	9.54
5/16	3.98	4.64	5.30	5.97	6.63	7.29	7.95
1/4	3.18	3.71	4.24	4.77	5.30	5.83	6.36
3/16	2.39	2.78	3.18	3.58	3.98	4.38	4.77
1/8	1.59	1.86	2.12	2.39	2.65	2.92	3.18
1/16	0.795	0.930	1.06	1.19	1.33	1.46	1.59

Fuente: Budynas G., Richard y Nisbett, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley

Tomando los datos de la tabla de las cargas constantes permisibles y tamaños mínimos de soldadura de filete que se observan en la Figura 81, la fuerza permisible por longitud unitaria de un electrodo de metal E60 se calcula así:

Ecuación 49. Resistencia del metal de aporte.

$$F = f * Long.$$

$$F = 3,18 \text{ kip/in} * [50 \text{ mm}]$$

$$F = 3,18 \text{ kip/in} * 1,97 \text{ in}$$

$$F = 6,2646 \text{ kip} * \frac{4448,2216 \text{ N}}{1 \text{ kip}}$$

$$F = 27,86 \text{ kN}$$

Ya que la fuerza permisible por longitud unitaria es mayor a la fuerza que la placa soporta ($27,86 \text{ kN} > 166,77 \text{ N}$), la resistencia del metal de aporte es muy satisfactoria. Ahora se evaluara el cortante en la unión adyacente a la soldadura, cabe destacar que una restricción que se encuentra en un tipo de carga a cortante y que la soldadura sea a tope o de filete es que el esfuerzo cortante en el metal base no debe exceder de $0,40 S_y$ del metal base⁴⁷. Para este caso los perfiles son secciones de acero ASTM A 36 laminadas en caliente, donde su resistencia a la fluencia $S_y = 250 \text{ MPa} \cong 36 \text{ kpsi}$.⁴⁸

Dicho cortante se debe comparar con el esfuerzo cortante en el metal base adyacente a la soldadura, este cálculo se realiza en la Ecuación 51

Ecuación 50. Esfuerzo cortante permisible en la unión adyacente a la soldadura

$$\tau_{perm} = 0,4S_y = 0,4 * 250 \text{ Mpa} = 100 \text{ MPa}$$

Ecuación 51. Esfuerzo cortante en el metal base adyacente a la soldadura

$$\tau = \frac{F}{2hl} = \frac{166,77 \text{ N}}{2 * (0,006 \text{ m})(0,05 \text{ m})} = 0,28 \text{ MPa}$$

⁴⁷ Texto extraído de: Budynas G., Richard y Nisbett, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Novena edición. Tabla 9-4, página 468

⁴⁸ Dato tomado de: Ferrocortes S.A.S, [En línea]. Disponible en: <http://www.ferrocortes.com.co/laminas/lamina-calidad-estructural-astm-a36>

Como $\tau_{perm} \geq \tau$, la unión resulta satisfactoria cerca de los cordones de soldadura. A continuación se hará la misma comprobación para el esfuerzo de tensión en el cuerpo de la unión contra el esfuerzo de tensión permisible que para este caso es de $0,6S_y$ y conserva el nivel de seguridad del código de soldadura. Véase la Ecuación 52

Ecuación 52. Esfuerzo normal para cargas de tensión o compresión

$$\sigma = \frac{F}{tl} = \frac{166,77 \text{ N}}{(0,006 \text{ m})(0,05 \text{ m})} = 555,9 \text{ kPa}$$

Ecuación 53. Esfuerzo de tensión permisible

$$\sigma_{perm} = 0,6S_y = (0,6)(250 \text{ MPa}) = 150 \text{ MPa}$$

Nuevamente se comprueba que $\sigma_{perm} \leq \sigma$, con lo que se concluye que el esfuerzo de tensión en el cuerpo es satisfactorio. Otra forma de poder verificar lo antes expuesto es mediante el software de diseño Inventor® Professional, donde se hizo la simulación y los resultados se pueden apreciar en la Tabla 34.

Tabla 34. Resultados de simulación de cálculo de soldaduras de empalme

Guía

Tipo y estilo de la unión por soldadura	Soldaduras de empalme cargadas en el plano de conexión
Método de cálculo utilizado	Procedimiento de cálculo estándar
Diagrama de la carga	Carga estática

Cálculo estático

Cargas

Fuerza de plegado F_y	166,77 N
Brazo de fuerza e	200,00 mm

Cotas

Altura de soldadura a	5,00 mm
Longitud de soldadura L	100,00 mm

Material y propiedades de la junta

Acero para construcciones A36		
Límite de elasticidad S_y		250 MPa
Resistencia máxima a tracción S_u		580 MPa
Coef. de seguridad n_s		2,50 su
Tensión admitida S_{al}		100,00 MPa

Resultados

Tensión admitida T_A		100,00 MPa
Altura mín. de soldadura a_{min}		0,18 mm
Longitud de soldadura mínima L_{min}		19,69 mm
Tensión de corte de soldadura máx. τ		3,34 MPa
Fuerza de plegado máxima F_{ymax}		5000,00 N
Comprobar cálculo		Positivo

Resumen de mensajes

Cálculo: El cálculo indica la compatibilidad del diseño.

Fuente: Software de modelado de CAD 3D Inventor® Professional

En conclusión después de verificar tanto analíticamente como prácticamente se puede afirmar que la soldadura no se va a ver afectada en ningún caso asegurando que la pieza no falle debido al peso de las bobinas Roving.

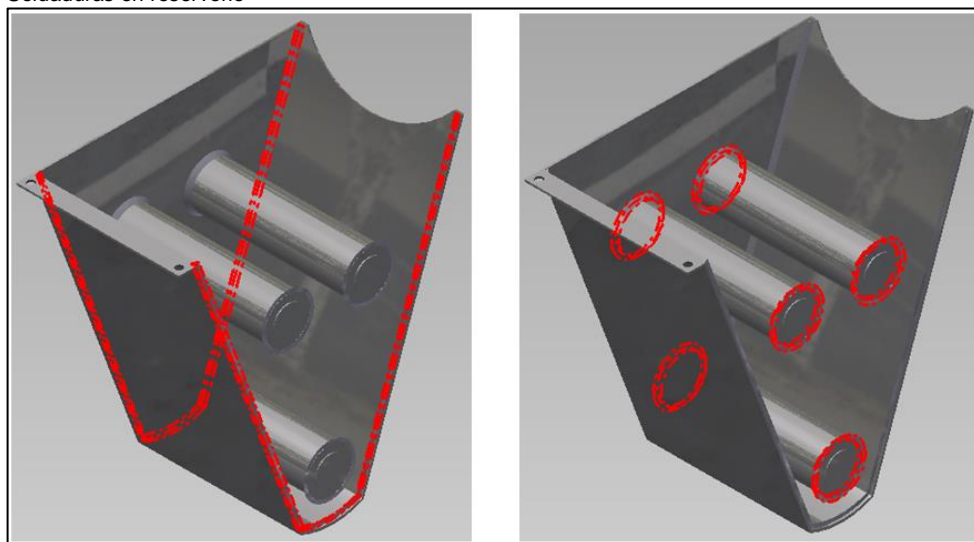
5.7.2 Reservorio para la resina

Para el reservorio se usara un electrodo con una identificación de west arco E318-16 y su clasificación es AWS E318-16, debido a que este tipo de soldadura es muy eficaz para soldar aceros inoxidable a otros de las mismas características, también porque su escoria es de fácil remoción, la apariencia del depósito es muy buena, ya que los cordones de soldadura presentan un contorno suave y relativamente plano. Además de ser una aleación muy útil en la industria química que es el principal componente que se depositara allí. (Véase anexo E).

Tal como se trató en el numeral 5.3 y la Ecuación 16 la presión que el fluido ejerce sobre las paredes del contenedor no es de una magnitud considerable por lo que se puede despreciar y los ejes al no tener rotación tampoco genera cargas y las que se generan es por el deslizamiento de la fibra que al estar en un fluido no son nada importantes, por ello es evidente que el material no va a ver afectado en ningún caso, ni va a fallar; pero si es de vital importancia seguir los protocolos que dicta el ANEXO E ya que si no se hace una buena progresión con la soldadura pueden hacer burbujas que a futuro generen filtraciones (Véase Figura 82).

Para efectos de comprobar mediante un software de simulación se tomó una carga estática de 150 N y se realizó los simulacros para conocer si posiblemente hubiera una falla, la primera de la soldadura sobre las paredes del reservorio y la segunda sobre el posicionamiento de los ejes; las medidas se especifican en la Tabla 35.

Figura 82. Soldaduras en reservorio



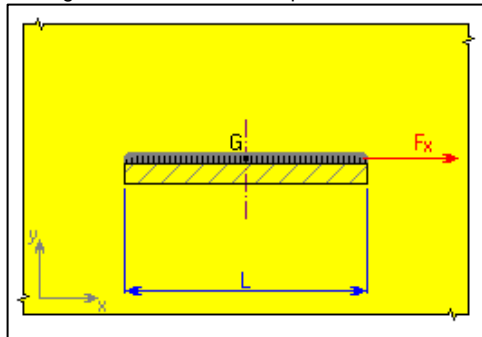
Fuente: Autores

Tabla 35. Informe de cordón de soldadura reservorio

ID	Tipo	Longitud	Masa	Área	Volumen
Soldadura de empalme 1	Empalme	1971,01 mm	0,06 Kg	29900,71 mm ²	21825,05 mm ³
Soldadura de empalme 2	Empalme	1130,97 mm	0,04 Kg	20444,59 mm ²	14922,57 mm ³

Fuente: Autores

Figura 83. Cargas de soldadura sobre paredes



Fuente: Software de modelado de CAD 3D Inventor® Professional

Figura 84. Resultados de simulación de cálculo de soldaduras de empalme sobre las paredes

Guía	
Tipo y estilo de la unión por soldadura	Soldaduras de empalme cargadas en el plano de conexión
Método de cálculo utilizado	Procedimiento de cálculo estándar
Diagrama de la carga	Carga estática

Cálculo estático

Cargas		Cotas	
Fuerza axial F_x	1500,000 N	Altura de soldadura a	5,000 mm
		Longitud de soldadura L	100,000 mm

Material y propiedades de la junta

Material de usuario	
Límite de elasticidad S_y	195 MPa
Resistencia máxima a tracción S_u	300 MPa
Coef. de seguridad n_s	2,500 su
Tensión admitida S_{al}	78,000 MPa

Resultados

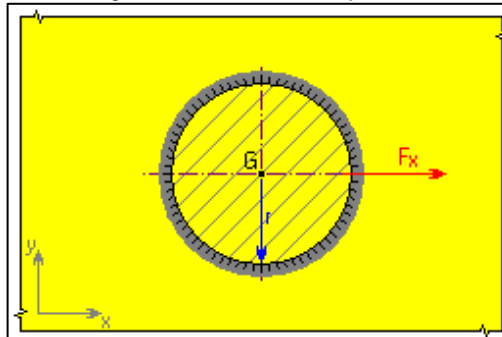
Tensión admitida T_A	78,000 MPa
Altura mín. de soldadura a_{min}	0,200 mm
Longitud de soldadura mínima L_{min}	5,000 mm
Tensión de corte de soldadura máx. τ	3,000 MPa
Fuerza axial máxima F_{xmax}	38999,900 N
Comprobar cálculo	Positivo

Resumen de mensajes

Cálculo: El cálculo indica la compatibilidad del diseño.

Fuente: Software de modelado de CAD 3D Inventor® Professional

Figura 85. Cargas de soldadura sobre ejes



Fuente: Software de modelado de CAD 3D Inventor® Professional

Figura 86. Resultados de simulación de cálculo de soldaduras de empalme posicionamiento de ejes

Guía		
Tipo y estilo de la unión por soldadura	Soldaduras de empalme cargadas en el plano de conexión	
Método de cálculo utilizado	Procedimiento de cálculo estándar	
Diagrama de la carga	Carga estática	
Cálculo estático		
Cargas		Cotas
Fuerza axial F_x	1500,000 N	Altura de soldadura a
		Radio de soldadura r
		5,000 mm
		75,000 mm
Material y propiedades de la junta		
Material de usuario		
Límite de elasticidad	S_y	195 MPa
Resistencia máxima a tracción	S_u	300 MPa
Coef. de seguridad	n_s	2,500 su
Tensión admitida	S_{al}	78,000 MPa
Resultados		
Tensión admitida	T_A	78,000 MPa
Altura mín. de soldadura	a_{min}	0,100 mm
Tensión de corte de soldadura máx.	τ	0,616 MPa
Radio de soldadura mínimo	r_{min}	5,000 mm
Fuerza axial máxima	F_{xmax}	189909,200 N
Comprobar cálculo		Positivo
Resumen de mensajes		
Cálculo: El cálculo indica la compatibilidad del diseño.		

Fuente: Software de modelado de CAD 3D Inventor® Professional

5.8 UNIÓN DE SISTEMAS

5.8.1 Selección de anclaje de los sub-sistemas

Se hace necesario en este tipo de máquinas un anclaje al piso de la mayoría de las partes para evitar el movimiento indeseado por cualquier motivo, por esto al tener la fuerza máxima horizontal se puede calcular el momento generado, y se multiplica esta fuerza generada con la distancia que es el total de la línea del proceso. El resultado es el esfuerzo de corte dado por esta fuerza multiplicado por el área transversal del perno de sujeción.

Ecuación 54. Momento generado

$$\begin{aligned}M &= F * d \\M &= 0,404N * 1.5m \\M &= 0,808 Nm\end{aligned}$$

Ecuación 55. Esfuerzo de corte

$$\begin{aligned}\sigma_{corte} &= \frac{F}{A} \\ \sigma_{corte} &= \frac{0,404N}{\frac{\pi * 12.7mm}{4}} \\ \sigma_{corte} &= 0,040 Mpa\end{aligned}$$

Se observa que el momento generado y el esfuerzo de corte son un valor mínimo y es permisible por lo cual no se generara inconvenientes en la selección del perno. Los sub – sistemas se van anclar por medio de chazo expansivo de ½ x3” de diámetro y longitud respectivamente.

Figura 87. Chazo de manga

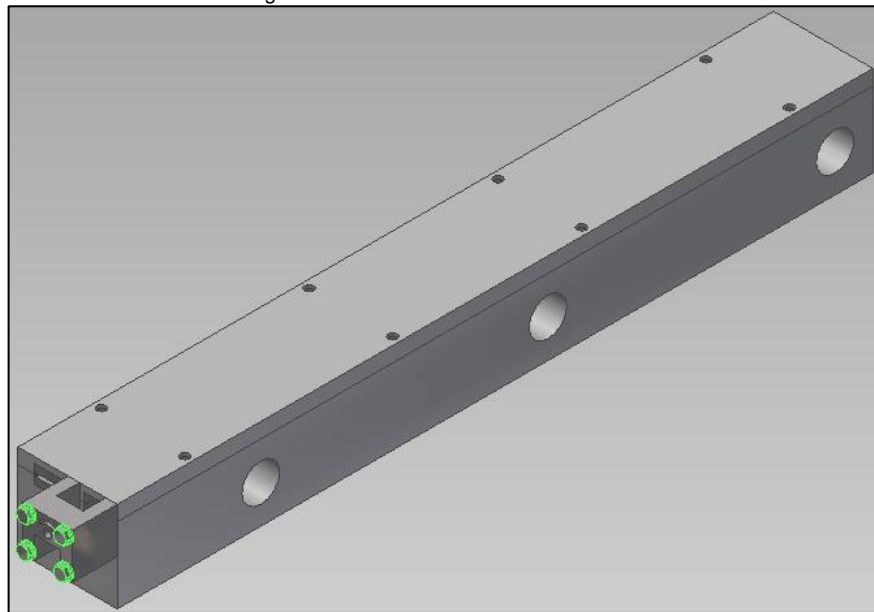


Fuente: Camejia. [En línea]. Disponible en: <http://www.camejia.com/chazos-expansivos-tipo-camisa-zincado/84>

5.8.2 Selección de unión al molde de la guía interna.

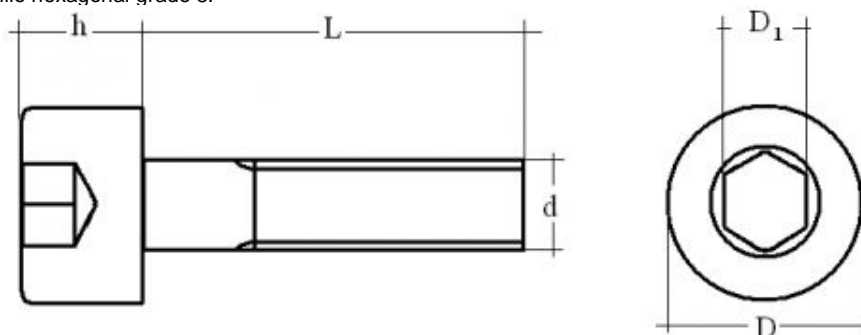
Tal como se observa en la Figura 88 se consideran el sistema de sujeción que llevara, y al hacer esta selección se encuentra que las fuerzas axiales en el ensamble son muy pequeñas y la presión interna no es considerable para que afecte el sellamiento de este, por lo que la única función que manejan estos elementos en el dispositivo es la de posicionamiento y fijación, es decir, se desea generar una unión permanente más que un sellamiento, por ello se seleccionaron pernos de rosca M10x71 con un diámetro de cabeza hexagonal de 18mm de grado 8.

Figura 88. Sistema de unión al molde de la guía interna



Fuente: Autores

Figura 89. Tornillo hexagonal grado 8.



Fuente: Tornillos especializados. [En línea]. Disponible en: <http://www.tornillosespecializados.com/tornillos.php>

Al realizar la comprobación mediante un modelamiento del diseño donde se toman en cuenta las fuerzas presentes en el ensamble se determino

Tabla 36. Simulación y resultados perno guía

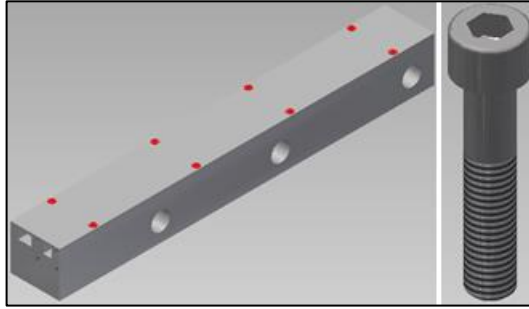
Cálculo estático			Cargas			Cálculo de fatiga		
Factor de apriete	k	1,50 su	Cargas			Carga cíclica superior		
Fuerza axial máxima	F _a	750 N				Fuerza normal máxima	F _{nh}	0,100 N
Factor de entrada de fuerza	n	0,50 su				Carga cíclica inferior		
Fuerza tangencial máxima	F _t	0 N				Fuerza normal mínima	F _{nn}	-0,050 N
Coefficiente de fricción de junta	f	0,40 su						
Resultados								
Fuerza de pretensión	F _v	266,717 N	Límite de resistencia corregida	σ _e	224,000 MPa			
Fuerza de trabajo	F _{max}	281,250 N	Resistencia media a la fatiga de la junta	σ _M	71,111 MPa			
Momento de apriete requerido	M _u	0,818 N m	Amplitud de resistencia a la fatiga de la junta	σ _A	213,333 MPa			
Tensión de tracción	σ _t	5,101 MPa	Tensión cíclica media de la junta	σ _m	0,000 MPa			
Tensión de torsión	τ _k	7,667 MPa	Amplitud de tensión cíclica	σ _a	0,001 MPa			
Tensión reducida	σ _{red}	14,226 MPa	Grado de seguridad calculado	n _c	181991,538 su			
Tensión a partir de fuerza máxima	σ _{max}	5,378 MPa						
Presión de rosca	p _c	2,250 MPa						
Comprobación de resistencia		Positivo						
Método de tensión media virtual								
Factor de recorrido dinámico requerido	η	1,000 su						
Vida útil de unión en miles de flexiones	N	1000,000 su						
Grado de seguridad requerido	n _f	2,500 su						
Factor de estrechamiento del diagrama de Haigh para tensión media virtual	ψ	0,150 su						
						<p>Cálculo: El cálculo indica la compatibilidad del diseño.</p> <p>Cálculo de fatiga: El cálculo indica la compatibilidad del diseño.</p>		

Fuente: Autores

5.8.3 Sujeción de carcasas de moldes

En este numeral se evaluara el sistema de sujeción que tiene las carcasas exteriores del dado de pultrusión como se denotó Figura 90. Sujeción por tornillo, que estarán acompañadas del sistema de calentamiento por resistencias eléctricas.

Figura 90. Sujeción por tornillo



Fuente: Los autores

Tomando las fuerzas calculadas en el numeral 5.4 y sabiendo que es muy importante el sellamiento entre las dos placas para que en el perfil pultruido no salga con venas de acumulación de material y que se pueda producir tensiones internas innecesarias que conlleve a una posible fractura, se realizando el modelo estructural y analizándolo mediante el software que realiza una comprobación de cálculo por resistencia y por fatiga al tornillo seleccionado que se designa como TLLO HEX G8 UNC 3/8 X ¾ en la empresa Mundial de Tornillos⁴⁹ como se observa en la Tabla 37. Simulación y resultados, los cálculos arrojados son acorde a los del diseño lo que constata que no va a fallar por ningún criterio.

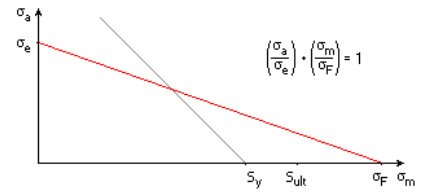
Tabla 37. Simulación y resultados perno dado

Cálculo estático			Cálculo de fatiga		
			Cargas		
Factor de apriete	k	1,50 su	Carga cíclica superior		
Fuerza axial máxima	F _a	139 N	Fuerza normal máxima	F _{nh}	0,100 N
Factor de entrada de fuerza	n	0,50 su	Carga cíclica inferior		
Fuerza tangencial máxima	F _t	981 N	Fuerza normal mínima	F _{nn}	-0,050 N
Coefficiente de fricción de junta	f	0,40 su			
			Resultados		
Fuerza de pretensión	F _v	485,083 N	Límite de resistencia corregida	σ _e	224,000 MPa
Fuerza de trabajo	F _{max}	485,970 N	Resistencia media a la fatiga de la junta	σ _M	71,111 MPa
Momento de apriete requerido	M _u	1,487 N m	Amplitud de resistencia a la fatiga de la junta	σ _A	213,333 MPa
Tensión de tracción	σ _t	9,276 MPa	Tensión cíclica media de la junta	σ _m	0,000 MPa
Tensión de torsión	τ _k	13,945 MPa	Amplitud de tensión cíclica	σ _a	0,001 MPa
Tensión reducida	σ _{red}	25,873 MPa	Grado de seguridad calculado	n _c	181991,538 su
Tensión a partir de fuerza máxima	σ _{max}	9,293 MPa			
Presión de rosca	p _c	3,888 MPa			
Comprobación de resistencia		Positivo			

⁴⁹ Mundial de Tornillos. [En Línea]. Disponible en: <<http://www.mundialdetornillos.com/Tornillos-Hexagonales-Grado-8>>

Tabla 37. (Continuación)

Método de tensión media virtual		
Factor de recorrido dinámico requerido	η	1,000 su
Vida útil de unión en miles de flexiones	N	1000,000 su
Grado de seguridad requerido	η_f	2,500 su
Factor de estrechamiento del diagrama de Haigh para tensión media virtual	ψ	0,150 su



Cálculo: El cálculo indica la compatibilidad del diseño.
 Cálculo de fatiga: El cálculo indica la compatibilidad del diseño.

Fuente: Autores

6. IMPACTO AMBIENTAL

Con respecto al impacto ambiental en el proceso que se llevará a cabo, se deben tener presentes las diferentes labores desarrolladas en el proceso de pultrusión para la fabricación de perfiles, estas piezas pueden variar de acuerdo al funcionamiento inadecuado de la máquina. El impacto ambiental solo se puede realizar con respecto a donde esté ubicada la máquina, en donde se realice el proceso y como el ambiente y los factores naturales pueden interferir. Este estudio se aplica por medio de la matriz Leopold (20).

6.1 MATRIZ LEOPOLD

Esta matriz Leopold se usa para determinar la valoración del impacto ambiental en el proceso que realice la máquina estudiada. Es un método que aplica una matriz simple que valora las actividades y factores ambientales. Pasos para realizar una matriz Leopold.⁵⁰

6.1.1 Paso 1

La matriz se basa en la elección de interacciones existentes durante el proceso, donde las actividades principales en el proceso pueden generar un impacto ambiental.

6.1.2 Paso 2

Después hay que examinar los principales factores ambientales que estén vinculados con estas actividades.

6.1.3 Paso 3

Se deben relacionar los dos primeros pasos entre ellos generando una calificación según su magnitud e importancia. En la Tabla 38 se muestra la calificación de la magnitud y la importancia para una matriz Leopold.

Tabla 38. Calificación y grado de importancia

IMPORTANCIA	CALIFICACION	MAGNITUD	CALIFICACION
Bajo	0	Bastante bajo	0
Intermedio	1	Bajo	1
Alto	2	Intermedio	2
Bastante Alto	3	Alto	3

Fuente: Autores

⁵⁰ Toro Calderón, José Javier and Sabogal Forero, Norma Piedad. *Modulo 3: metodología para la identificación y valoración de impactos ambientales*. Universidad Nacional de Colombia. Bogota, [En línea]. Disponible en: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/IDEA/mtria_amb/2019519/und_3/html/contenido_06.html

En la Tabla 39 se observa la matriz Leopold, mostrando como se implementan las actividades críticas del proceso y poder reconocer las actividades indispensables para la protección del medio ambiente.

Tabla 39. Matriz Leopold

Ambiente Actividad		BIÓTICO			AMBIÓTICO			ANTRÓPICO			CALIFICACIÓN
		PLANTAS	ANIMALES	HUMANOS	RÍOS	SUELOS	CALIDAD DEL AIRE	RUIDO	BASURAS	CONSUMO DE ENERGÍA	
FABRICACIÓN	CORTE DEL MATERIAL	0 1	2 1	2 1	0 1	0 1	1 1	3 1	1 1	1 1	9
	TALADRO	0 2	0 2	2 2	0 2	1 2	1 2	1 2	1 2	2 2	18
	FRESADO	2 1	0 1	2 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	2 1	9
	PULIDO	0 3	0 3	3 3	1 3	1 3	1 3	1 3	1 3	2 3	27
	SOLDADURA	0 3	0 3	2 3	0 3	1 3	1 3	1 3	1 3	2 3	27
	ENSAMBLE	0 1	0 1	2 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	2 1	9
	PINTURA	2 3	2 3	3 3	3 3	1 3	1 3	1 3	1 3	2 3	27
INSTALACIÓN	TRANSPORTE	0 1	0 1	2 1	0 1	1 1	1 1	1 1	0 1	0 1	9
	ANCLAJE	0 1	0 1	2 1	0 1	1 1	1 1	1 1	0 1	0 1	9
	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	1 3	0 3	3 3	0 3	1 3	1 3	1 3	1 3	2 3	27
OPERACIÓN	ALIMENTACIÓN	2 3	0 3	2 3	1 3	1 3	1 3	1 3	2 3	0 3	27
	RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	0 2	2 2	3 2	0 2	1 2	1 2	1 2	0 2	2 2	18
	MOTOR REDUCTOR	1 1	0 1	2 1	1 1	1 1	1 1	1 1	0 1	2 1	9
	CORTE	0 3	0 3	3 3	0 3	1 3	2 3	3 3	2 3	3 3	27
	HALADO	0 1	0 1	3 1	0 1	1 1	1 1	3 1	2 1	3 1	9
MANTENIMIENTO	LIMPIEZA	2 2	0 2	2 2	2 2	1 2	1 2	1 2	1 2	0 2	18
	LUBRICACIÓN	2 3	2 3	2 3	3 3	1 3	1 3	1 3	1 3	1 3	27
	REVISIÓN ELÉCTRICA	1 2	0 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	2 2	18
	REVISIÓN MECÁNICA	1 2	0 2	2 2	3 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	18
	FUGA DE RESINA	1 3	2 3	2 3	0 3	1 3	1 3	1 3	1 3	1 3	27
CALIFICACIÓN DEL FACTOR AFECTADO		15	10	45	18	20	21	27	20	31	

Fuente: Autores

Al observar la matriz anterior se puede evidenciar que el impacto ambiental es bastante bajo por que los recursos naturales aplicados en el proceso son escasos. Los puntos del proceso que si se puede ver afectado son los de consumo de energía, el ruido y el trabajo humano aplicado para el proceso

Como cualquier máquina va generar algún tipo de desperdicio mediante el proceso generando residuos no reciclables produciendo un impacto ambiental. En esta máquina se encuentran sistemas que necesitan grasas o aceites para su adecuado funcionamiento generando un alto impacto ambiental lo cual obliga a generar medidas de control al momento de realizar los diferentes mantenimientos de la máquina.

Este tipo de máquina genera impactos directos e indirectos sobre el trabajador que se encuentran en el sistema de corte y el sistema de halado, porque generan polvo, ruido y consumo de energía.

En las siguientes Tabla 40 y Tabla 41 se observa la mitigación y el control que se deben establecer a las actividades según las leyes del ministerio ambiente, vivienda y desarrollo territorial.

Tabla 40. Leyes del ministerio ambiente

ACTIVIDAD	ASPECTO AMBIENTAL	IMPACTO AMBIENTAL	MEDIDA DE CONTROL
Manipulación de resinas	Derrames o fugas de resina	Las altas concentraciones son tóxicas a fauna, flora y humanos	Sistemas de retención de productos tóxicos
Fabricación de perfiles termoestables	Emisión de solvente en aplicación resina poliéster	Contaminación atmosférica	Extractores de aire. Productos supresor de emisión de solvente
	Obtención de desperdicios sólidos cuando se usa fibra de vidrio por aspersión	Contaminación suelo	Capacitación en técnicas de empleo para reducir desperdicios. Aplicar técnicas de moldeo cerrado
	Emisión de solventes en curado de fibra	Contaminación atmosférica	Extractores de aire Control al usar solvente
	Obtención de desperdicios sólidos en el corte y pulido de fibras	Contaminación suelo	Métodos de recuperación y reutilización de desperdicios sólidos. Capacitación en técnicas de empleo para reducir desperdicios

Tabla 40. (Continuación)

ACTIVIDAD	ASPECTO AMBIENTAL	IMPACTO AMBIENTAL	MEDIDA DE CONTROL
Mantenimiento de maquinaria y equipos	Obtención de residuos líquidos en mantenimiento de limpieza con solvente a los sistemas de la máquina.	Contaminación de suelo y agua	Cerrar sistemas para reutilización de solventes y evitar contaminación de vertederos

Fuente: Sector plástico- ministerio de medio ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo. Julio de 2004.

Tabla 41. Impacto Ambiental

ETAPA	RECURSO AFECTADO	IMPACTO AMBIENTAL	MEDIDAS PREVENTIVAS	MEDIDAS DE CONTROL	MEDIDAS DE MITIGACIÓN
Pultrusión	AGUA	No hay impacto ambiental alto	-----	-----	-----
	AIRE	Emisión de olores Alto nivel de ruido	Zonas con buena ventilación Uso de extractores	Determinar nivel de presión sonora Uso de equipamiento de protección respiratoria y auditiva	Instalación de sistemas de tratamiento de ruido (barreras acústicas, absorción y/o aislamiento acústico) Reducción de la jornada de trabajo en ambientes ruidosos mediante la rotación de operarios a otras áreas con menos ruido y olor
	SUELO	No hay impacto ambiental alto	-----	-----	-----
	FLORA Y FAUNA	No hay impacto ambiental alto	-----	-----	-----
	SALUD	Alto nivel de presión sonora	Aislamiento de la zona de aglutinado	Definir la afectación de la comunidad por ruido generado	Montaje de sistema de tratamiento de ruido (barreras acústicas, absorción o aislamiento acústico)

Fuente: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Sector plástico. Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo. Julio de 2004.

7. ESTUDIO FINANCIERO

7.1 CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA

En esta máquina se usan perfiles y estructuras normalizadas que comercialmente se consiguen en el mercado nacional, los principales proveedores de las cotizaciones que se usaron para realizar este cálculo son:

- ✓ ACEFER Y CIA LTDA
- ✓ GENERAL DE ACEROS S.A.
- ✓ REYCLO LTDA
- ✓ ACEROS BOLER DE COLOMBIA S.A.
- ✓ MADECENTRO SA.A
- ✓ MADECOL S.A.S
- ✓ INDUSTRIAL DE CONTACTORES Y CABLES LTDA
- ✓ COLOMBIANA ELECTRO-INDUSTRIAL
- ✓ ELECTRO SILVANA

Cabe destacar que las empresas antes mencionadas tienen la oficina principal en la ciudad de Bogotá, Colombia donde generaron las cotizaciones de compra con sostenimiento de precio por 30 días calendario a partir de su expedición que fue aproximadamente del 01 de Noviembre de 2014 y se puede apreciar el la

Tabla 42. Lista de precios de materiales

Parte	Pieza	Material	PRECIO
Mueble Rollos	Sección acero estructural L50*50*6	CR	\$ 296.536
	Lamina Soporte Rollos	Madera	\$ 520.346
Reservorio	Ejes (x3)	Acero Inoxidable	\$ 160.000
	Batea (x1)	Acero Inoxidable	\$ 120.000
	Bandeja (x1)	Acero Inoxidable	\$ 120.000
	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío	ISO 4019 - 20x20x2 - 384,678	\$ 50.000
Pre moldeo 1	(x1)	Acero Inoxidable	\$ 150.000
Guía Diámetro Int.	(x1)	Acero Inoxidable	\$ 160.000
Guía Int.	(x1)	P20	\$ 130.000

Tabla 42. Lista de precios de materiales

Parte	Pieza	Material	PRECIO
Dado	Carcaza Superior molde		\$ 250.000
	Carcaza Inferior molde		\$ 300.000
	Molde varilla		\$ 100.000
	Molde platina		\$ 90.000
	Placa lateral		\$ 100.000
	Ejes de deslizamiento		\$ 300.000
	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío	ISO 4019 - 20x20x2 - 384,678	\$ 260.000
Jalador	Según especificaciones técnicas	CAMBER	\$ 8.000.000
Sistema de Corte	Según especificaciones técnicas	Homecenter	\$ 1.200.000
Anexos e imprevistos			\$ 615.344
TOTAL			\$ 12.306.882

7.2 MANO DE OBRA DE LA MÁQUINA PULTRUSORA

Para la manufactura de esta máquina se cotizaron la piezas a fabricar empresas que conforman el sector productivo de la metalmecánica que han tenido un muy buen balance en temas de calidad mediante encuesta realizada a la cámara de comercio de Bogotá⁵¹

Entre ellas están:

- ✓ TECNOFRESA CIA LTDA
- ✓ TECNOPLES S.A.S
- ✓ INDUMECANICA GV S.A.S.
- ✓ METALITEC S.A.

Cabe resaltar que las piezas se pueden fabricar fácilmente en los laboratorios de la Universidad Santo Tomas que están equipados para manufacturar piezas en torno convencional y de control numérico CNC. En la

Tabla 43. Lista de precios de manufactura por pieza

Parte	Pieza	Material	Manufactura
Mueble Rollos	Sección acero estructural L50*50*6	CR	\$ 200.000
	Lamina Soporte Rollos	Madera	\$ 80.000

⁵¹ Cámara de Comercio de Bogotá. [en línea]. Disponible en: < camara.ccb.org.c>

Tabla 43. (Continuación)

Parte	Pieza	Material	Manufactura
Reservorio	Ejes (x3)	Acero Inoxidable	\$ 50.000
	Batea (x1)	Acero Inoxidable	\$ 200.000
	Bandeja (x1)	Acero Inoxidable	\$ 130.000
	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío	ISO 4019 - 20x20x2 - 384,678	\$ 50.000
Pre moldeo	(x1)	Acero Inoxidable	\$ 300.000
Guía Diámetro Int.	(x1)	Acero Inoxidable	\$ 200.000
Guía Int.	(x1)	P20	\$ 90.000
Dado	Carcaza Superior molde		\$ 400.000
	Carcaza Inferior molde		\$ 450.000
	Molde varilla		\$ 230.000
	Molde platina		\$ 180.000
	Placa lateral		\$ 170.000
	Ejes de deslizamiento		\$ 510.000
	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío	ISO 4019 - 20x20x2 - 384,678	\$ 100.000
Anexos e imprevistos			\$ 167.000
Total			\$ 3.340.000

7.3 COSTO TOTAL DE LA MÁQUINA PULTRUSORA

La ejecución del presente proyecto se calcula un precio aproximado a los \$17'000.000,⁰⁰ pesos; esto da la información necesaria para determinar que si se cumplen uno de los parámetros del cliente que no habla del costo que debe ser menor al de comprar directamente la máquina sin contar con los costos de envío y demás impuestos tributarios que se acarrean.

8. PLANOS DE FABRICACIÓN

Una vez todos los pasos anteriores se hayan cumplido a cabalidad el último recurso es generar los planos de fabricación de cada una de las piezas que intervendrán de una u otra forma en el montaje de la máquina pultrusora.

Se retratan las piezas con base en las normas de dibujo y las de fabricación (21) necesarias para la manufactura precisa, cabe anotar que las piezas normalizadas que se consiguen comercialmente se designan sin necesidad de realizar plano de fabricación.

Los planos completos se pueden observar en el ANEXO G.

CONCLUSIONES

El diseño final planteado en este documento para la línea de producción mediante el proceso de pultrusión responde asertivamente a las necesidades para la fabricar los perfiles de varilla, varilla hueca y platina.

Una vez verificado el diseño metodológico con los requerimientos del cliente y los parámetros de ingeniería previstos se pudo establecer que se cumplen a cabalidad cada uno de los ítems propuestos y a su vez se mantiene por debajo los objetivos límite.

Al implementar el QFD se pudo conocer la exigencia integral de la máquina a diseñar, este método facilita la determinación, la evaluación de alternativas, la organización, el documentar del proceso de diseño.

Mediante el análisis estático de cada una de las piezas y en su conjunto se logró determinar que es un ensamble rígido lo que produce que el proceso se cumpla con las especificaciones técnicas deseadas.

Los manuales que se plantean son acordes al proceso de mantenimiento, operación y manejo seguro del equipo de pultrusión.

Se realizó el diseño conceptual de la máquina y se comprobó mediante las memorias de cálculos matemáticos

Al realizar un estudio financiero de la máquina pultrusora en su conjunto se determinó que su valor real está un 20% por debajo del valor con que comercialmente se conseguiría una máquina de este estilo.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Gerdeen, James C., Lord, Harold W. and L. Rorrer, Ronald A.** *Engineering Desing with Polyymers and Composites*. Boca Raton, London, New York : Taylor & Francis Group, 2006. p. 349. 0-82472379-1.
2. **PlasticsEurope**. Association of Plastic Manufacturers. [Online] www.plasticseurope.org, www.plasticsconverters.eu, www.euromap.org.
3. *La producción mundial de plásticos. Plast, Mundo*. 38, España : BMS, 2014, MundoPlast, Vol. 2° Trimestre 2014, p. 60. <http://www.mundoplast.com/>.
4. **Fuentes Gómez, Darwin Mauricio and Pacheco Páez, Jhoan Javier** . *DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA PULTRUSIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS, ESCALA LABORATORIO, PARA LA FABRICACIÓN DE PERFIL ESTRUCTURAL*. Departamento de Ingeniería, Universidad America. Bogotá : s.n., 2012. p. 124, Tesis.
5. **Hoz, Juan Carlos Fracica de la**. Metodología para la utilización de materiales compuestos tipo fibra con matriz polimérica, en aplicaciones aeronáuticas [CD-ROM] Juan Carlos Fracica de la Hoz. [En línea] 1978. http://168.176.5.96/F/329116SFQACBHICL4L1YU7HC5QD98R3K8X2M7LGJ7P6EYFD2U9-17569?func=full-set-set&set_number=713469&set_entry=000001&format=999.
6. **Marín, Andrés FelipePérez**. Aplicación de nuevos materiales a soluciones de vivienda en Colombia viabilidad para generar sistemas constructivos Andrés Felipe Pérez Marín. [Online] 1964. http://168.176.5.96/F/329116SFQACBHICL4L1YU7HC5QD98R3K8X2M7LGJ7P6EYFD2U9-20922?func=full-set-set&set_number=713501&set_entry=000001&format=040.
7. **Christian Toller, Adolfo Rizzo**. ELABORACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS. [En línea] www.sociedadpolimerica.mx/memorias/2010.pdf.
8. **Mirevate, Antonio**. *Materiales Compuestos I*. España : s.n., 2007. pág. 754. Vol. 1, Disponible en: <http://ehis.ebscohost.com/eds/detail?vid=2&sid=2e9113d8-ec4d-469e-9f29-528f2ec8c4a4%40sessionmgr113&hid=116&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2I0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3d%3d#db=cat00574a&AN=cbzara.b1198968>. ISBN 13: 978-84-921349-8-4.
9. **Askeland, Donald R**. *Ciencia E Ingeniería De Los Materiales*. Tercera Edición. México : International Thomson Editores, 1998. ISBN 968-7529-36-9.
10. **Forero R., Ricardo A**. *Las fibras naturales en los materiales compuestos. En Tecnología de plásticos*. Bogotá : s.n., 2007. p. 32. Vol. 22.
11. Biblioteca Digital. [Online] [Cited: Noviembre 20, 2014.] http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/072/htm/sec_7.htm.
12. **Ponciano, Saulo**. Materiales Compuestos. *SlidePlayer*. [En línea] Julio de 2011. [Citado el: 15 de 09 de 2014.] <http://slideplayer.es/slide/2343203/>.

13. **European Pultrusion Technology Association (EPTA)**. EPTA. [Online] [Cited: Mayo 29, 2014.] <http://www.pultruders.com/en/>.
14. **Nora, Lardiés Miazza**. *INFORME DE VIGILANCIA TECNOLÓGICA: PRINCIPALES AVANCES EN PULTRUSIÓN Y SMC*. Generalitat Valenciana. España : AIMPLAS Instituto Tecnológico del Plástico, 2010. p. 48. <http://www.aimplas.es>.
15. **Ullman, David G**. *The Mechanical Design Process*. New York : McGraw-Hill, 2003. ISBN 978-0-07-297574-1.
16. **Budynas G., Richard y Nisbett, J. Keith**. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. [ed.] Pablo E. Roig Vázquez. [trad.] Jesús Elmer Murrieta Murrieta. Novena. New York : McGraw-Hill, 2012. pág. 1041. 978-607-15-0771-6.
17. **X Lin Liu, IG Crouch, YC Lam**. *Composites Science and technology*. 2000. p. 864. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026635389900189X>. 10.1016/S0266-3538(99)00189-X.
18. **DH Kim, WI Lee, K Friedrich**. *A model for a thermoplastic pultrusion process using commingled yarns*. s.l. : Composites science and technology, 2001. p. 1077. 10.1016/S0266-3538(00)00234-7.
19. **Arco, West**. *ELECTRODOS PARA SOLDAR ACEROS AL CARBONO (AWS A5.1)*. 2014. p. 22. Disponible en: <http://www.westarco.com/westarco/sp/productos/consumibles/electrodos/upload/1-Electrodos-para-soldar-Aceros-al-Carbono.pdf>.
20. **Toro Calderón, José Javier and Sabogal Forero, Norma Piedad**. *Modulo 3: metodología para la identificación y valoración de impactos ambientales*. Universidad Nacional de Colombia. Bogota, Colombia : s.n. Maestría en medio ambiental y desarrollo. Disponible en: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/IDEA/mtria_amb/2019519/und_3/html/contenido_06.html.
21. **ICONTEC**. *Normas técnicas colombianas dibujo técnico*. s.l. : Instituto Colombiano de Normas Técnicas, 1976.
22. **William, Callister**. *Materials Science and Engineering An Introduction*. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1976. ISBN-13: 978-0-471-73696-7 .
23. **Mott, Robert L**. *Diseño de Elementos de Maquinas*. Mexico : Pearson Education, 2006. ISBN: 970-226-0812.0.
24. *Mechanical Properties of Jute Spun Yarn/PLA Tubular Braided Composite by Pultrusion Molding*. **Procedia, Energy**. 818 – 829 , 2013, Vol. 34. 10.1016/j.egypro.2013.06.818 .
25. **Grupo Flemoglas S.A**. *Plastiquímica*. [En línea] [Citado el: 29 de Mayo de 2014.] http://www.plastiquimica.cl/pdf/Procesos_de_Produccion.pdf.
26. **Nioglas, S.L**. *Nioglas Perfiles*. [Online] Nioglas, S.L., 1991. <http://www.nioglas.com/>.

27. **PERFIGLASS LTDA.** Perfilera Estructural en Reisna Poliester con Fibra de Vidrio. [En línea] Abril de 2008. <http://www.perfiglassltda.com/>.

28. **REFORPLAS S.A.S.** REFORPLAS. [Online] 1979. <http://www.reforplas.com/wordpress/>.

29. **Ministerio de Ambiente de la Republica de Colombia.** Banco de Documentos. *Normativa Ambiental*. [En línea] 2013. [Citado el: 15 de Noviembre de 2013.] <http://www.minambiente.gov.co/descarga/descarga.aspx>.

30. **Miravete, Antonio.** *Materiales Compuestos II*. España : Editorial Reverté, S.A., 2007. p. 1486. Vol. 2. ISBN 13: 978-84-921349-9-1.

31. **Reinforced, Bedford .** *Pultrusion Process*. Youtube, 2012. <https://www.youtube.com/watch?v=1sH9rIGWNvc>.

32. **Generalitat Valenciana (IMPIVA).** Uinión Europea. *Fondo Europeo de Desarrollo Regional*. [Online] 2008. [Cited: Mayo 29, 2014.] <http://www.avep.es/uploads/noticias/guia%202.pdf>. IMPCND/2008/11.

[

ANEXO A. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
RESINA PALATAL CO P4

ANEXO B. FICHA TÉCNICA DE BOVINA
ROVING P207 (2200)

ANEXO C. MANUALES

ANEXO D. SOLDADURA ACERO AL CARBON
E6013

ANEXO E. SOLDADURA ACERO INOXIDABLE

ANEXO F. FICHA TÉCNICA DE ACERO 1-2738
PARA MOLDES

ANEXO G PLANOS DE FABRICACIÓN Y ENSAMBLE DE LA MÁQUINA PULTRUSORA

ANEXO H. AISLAMIENTO TÉRMICO

1