

**DISEÑO DE UN MOLDE PARA EL FORMADO CONTINUO DEL PERFIL
UTILIZADO EN LA ELABORACIÓN DE TABLAS DE MADERA PLÁSTICA
EN LA EMPRESA PLASMACO**

JORGE FEDERICO CASTRO ZULUAGA

Proyecto de grado

**Asesor
Luis Alberto García
Ingeniero Industrial**

**UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO
MEDELLÍN
2010**

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Medellín. 20, Octubre, 2010.

Este trabajo lo dedico a mi madre, pues mi formación y todo lo que soy lo he conseguido gracias a su esfuerzo, amor y perseverancia.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios hoy culmino esta meta y que sea el momento para compartir este logro con aquellas personas que aportaron desinteresadamente enriqueciendo mis conocimientos, motivándome para que esta profesión se refleje en bien de muchos y el mío propio.

Gracias entonces, a mi familia y a mi novia por el apoyo incondicional en mis decisiones y por permitir que este trabajo robara un poco del tiempo que dedico a compartir con ellos.

A mi asesor Luis Alberto y al equipo de trabajo, por ser siempre una voz de aliento en los momentos más difíciles del proyecto.

A la Universidad EAFIT, al departamento de ingeniería de diseño y a sus profesores por brindarme los conocimientos necesarios para emprender un nuevo camino en el mundo laboral.

A la empresa Plasmaco y al departamento de Investigación y docencia de la universidad, por apoyar la realización de este proyecto.

CONTENIDO

| | pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN | 12 |
| 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO | 14 |
| 1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA | 14 |
| 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN | 15 |
| 1.3. JUSTIFICACIÓN | 15 |
| 1.4. OBJETIVO GENERAL | 16 |
| 1.4.1. Objetivos específicos | 16 |
| 1.5. ALCANCE | 17 |
| 2. RECICLAJE DE MATERIALES PLÁSTICOS | 18 |
| 2.1. MADERA PLÁSTICA, UNA OPCIÓN DE RECICLAJE | 20 |
| 2.2.1. Situación actual de la tecnología utilizada en la elaboración de la madera plástica. | 21 |
| 3. POLÍMEROS | 25 |
| 3.1 PROPIEDADES DE LOS TERMOPLÁSTICOS EN ESTADO SÓLIDO | 26 |
| 3.1.1 Densidad de empaque | 26 |
| 3.1.2 Forma de partícula | 26 |
| 3.2. PROPIEDADES DE LOS POLÍMEROS PLASTIFICADOS | 27 |
| 3.2.1. Rata de cizalladura | 27 |
| 3.2.2. Viscosidad y funciones de flujo | 28 |
| 3.3. PROPIEDADES TÉRMICAS | 29 |
| 3.3.1. Conductividad térmica | 29 |
| 3.3.2. Calor específico | 30 |
| 3.3.3. Difusividad térmica | 30 |
| 3.3.4. Entalpía específica | 30 |
| 3.3.5. Temperatura de fusión (T _m) | 31 |
| 3.3.6. Temperatura de transición vítrea (T _g) | 31 |
| 3.3.7. Temperatura de degradación (T _d) | 31 |
| 3.3.8. Estabilidad térmica y tiempo de inducción | 32 |
| 3.3.9. Perfil de temperatura | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 3.3.10. Densidad (ρ) | 32 |
| 3.4 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE TERMOPLÁSTICOS | 32 |
| 3.4.1. DSC | 32 |
| 3.4.2. TGA | 33 |
| 4. EXTRUSIÓN DE TERMOPLÁSTICOS | 34 |
| 4.1. PARTES PRINCIPALES DE UNA MAQUINA EXTRUSORA | 34 |
| 4.1.1. El motor extrusor | 34 |
| 4.1.2. Tolva de alimentación: | 35 |
| 4.1.3. Husillo de extrusión | 35 |
| 4.1.4. Cilindro extrusor | 37 |
| 4.1.5. Dispositivos de calefacción | 37 |
| 4.2. LÍNEAS DE EXTRUSIÓN | 38 |
| 4.3. CABEZAL DE EXTRUSIÓN | 39 |
| 4.3.1. Defectos por diseño del cabezal | 41 |
| 4.3.1.1. Hinchamiento | 41 |
| 4.3.1.2. Causas de la expansión del cabezal | 41 |
| 4.3.1.3. Cambio de forma | 42 |
| 4.3.1.4. Degradación | 42 |
| 4.3.1.5. Acabado Superficial | 42 |
| 4.3.1.6. Contrapresión | 43 |
| 4.4 PRODUCCIÓN DE BARRAS SÓLIDAS | 43 |
| 5. METODOLOGÍA | 44 |
| 6. DESARROLLO DEL PROYECTO | 51 |
| 6.1. FASE 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y FUNDAMENTOS | 51 |
| 6.1.1. Proceso productivo de tablas de madera plástica en la empresa Plasmaco | 51 |
| 6.1.2. Materias primas utilizadas por Plasmaco | 55 |
| 6.1.2.1. Perfiles de temperatura y temperaturas de transición | 58 |
| 6.1.2.2. Perfiles de temperatura de la empresa Plasmaco | 58 |
| 6.1.2.3. Perfil de temperatura según referencias bibliográficas | 59 |
| 6.1.2.4. Caracterización de materiales según los resultados de los ensayos TGA y DSC | 60 |
| 6.1.2.5. Propiedades térmicas de las resinas que componen la mezcla | 64 |

| | |
|--|------------|
| 6.1.3. Caracterización de la extrusora asignada para la implementación del nuevo sistema | 65 |
| 6.1.4. Definición de los objetivos del proyecto | 67 |
| 6.1.5. Especificaciones de diseño del producto (PDS) | 69 |
| 6.2. FASE 2: DISEÑO CONCEPTUAL | 73 |
| 6.2.1 Análisis funcional | 73 |
| 6.2.2. Búsqueda de la solución | 75 |
| 6.2.2.1. Matriz morfológica | 75 |
| 6.3.2.2. Evaluación portadores | 78 |
| 6.3.2.3. Generación de alternativas | 87 |
| 6.3.2.4. Evaluación y selección de alternativas | 93 |
| 6.3. DISEÑO PRELIMINAR | 95 |
| 6.3.1. Corporificación | 95 |
| 6.3.2. Cálculos del sistema | 98 |
| 6.3.2.1. Diseño y cálculo del canal de flujo | 98 |
| 6.3.2.2. Cálculos de esfuerzos del cuerpo del cabezal | 103 |
| 6.3.2.3. Cálculos térmicos | 106 |
| 9. DISEÑO DE DETALLE | 110 |
| BIBLIOGRAFÍA | 120 |

LISTA DE ILUSTRACIONES

| | pág. |
|--|------|
| Ilustración 1. Planta de producción de la empresa Plasmaco. | 14 |
| Ilustración 2. Esquema de reciclado mecánico | 19 |
| Ilustración 3. Usos de la madera plástica. | 21 |
| Ilustración 4. Maquinaria para la producción de tablas para madera plástica en Colombia | 22 |
| Ilustración 5. Cabezal utilizado en la elaboración actual de tablas de madera plástica | 22 |
| Ilustración 6. Cabezales para extrusión de perfiles. | 23 |
| Ilustración 7. Tinas de enfriamiento para extrusión. | 23 |
| Ilustración 8. Clasificación de los Polímeros | 25 |
| Ilustración 9. Representación de la dependencia de la viscosidad de la rata de Cizalladura | 28 |
| Ilustración 10. Representación de la dependencia de la rata de cizalladura sobre el esfuerzo, por una curva de flujo | 29 |
| Ilustración 12. Entalpia específica en diferentes Polímeros | 31 |
| Ilustración 13. Esquema de las partes principales de una maquina extrusora | 34 |
| Ilustración 14. Zonas de una extrusora | 36 |
| Ilustración 15. Zona de Dosificación de tornillo o Husillo Extrusor | 37 |
| Ilustración 16. Diagrama de una línea de Extrusión de perfiles | 39 |
| Ilustración 17. Secciones funcionales de un dado de extrusión y de calibración | 39 |
| Ilustración 18. Esquema de zonas de formado para la extrusión de barras solidas | 44 |
| Ilustración 19. Modelo Dym y Litte | 45 |
| Ilustración 20. Fase 1: Definiciones del problema y fundamentos | 46 |
| Ilustración 21. Fase 2: Diseño Conceptual | 47 |
| Ilustración 22. Fase 3: Diseño preliminar | 48 |
| Ilustración 23. Fase 4: Diseño de detalle | 49 |
| Ilustración 24. Fase 5: Comunicación del diseño | 49 |
| Ilustración 25. Diagrama de flujo del desarrollo de un dado de extrusión | 50 |
| Ilustración 26. Llenado del molde para tablas de 12 x 3 cm. | 51 |
| Ilustración 27. Operación de corte de tablas | 52 |
| Ilustración 27. Proceso de consecución de materia prima en la empresa Plasmaco | 55 |
| Ilustración 28. Distribución de las termocuplas en la extrusora asignada para el proyecto por la empresa Plasmaco (situación actual) | 59 |
| Ilustración 29. Calorimetría Diferencia de Barrido (DSC) para el remolido | 61 |
| Ilustración 30. Calorimetría Diferencia de Barrido (DSC) para el 50/50 | 62 |
| Ilustración 31. Análisis Termogravimétrico (TGA) para el remolido | 63 |
| Ilustración 32. Análisis Termogravimétrico (TGA) para 50/50 | 64 |
| Ilustración 33. Perfil de temperaturas | 65 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 34. Árbol de objetivos del proyecto cofinanciado entre la universidad EAFIT y la empresa Plasmaco- Diseño e implementación de un sistema de moldeo continuo de tablas de madera plástica | 68 |
| Ilustración 35. Árbol de funciones del cabezal de extrusión y de calibración de la línea de extrusión continua de tablas de madera plástica | 69 |
| Ilustración 36. Caja negra del sistema para el formado continuo del perfil utilizado en la elaboración de tablas de madera plástica en la empresa Plasmaco | 74 |
| Ilustración 37. Estructura funcional del sistema para el conformado continuo del perfil utilizado en la elaboración de tablas de madera plástica en la empresa Plasmaco | 74 |
| Ilustración 38. Matriz morfológica para la selección de materiales del dado de extrusión de calibración | 75 |
| Ilustración 39. Matriz morfológica para la función conducir masa fundida | 76 |
| Ilustración 40. Matriz morfológica para la función formar perfil | 77 |
| Ilustración 41. Matriz morfológica para la función solidificar perfil | 77 |
| Ilustración 42. Matriz de evaluación de portadores para la función convertir energía eléctrica a calórica | 78 |
| Ilustración 43. Matriz de evaluación de portadores para la selección del material del cabezal de extrusión | 79 |
| Ilustración 44. Matriz de evaluación de portadores para la selección de la forma del bloque del cabezal de extrusión | 80 |
| Ilustración 45. Matriz de evaluación de portadores para la función de inhibir calor | 81 |
| Ilustración 46. Matriz de evaluación de portadores para el sistema de variación del espesor del perfil | 82 |
| Ilustración 47. Matriz de evaluación de portadores para la selección del sistema de refrigeración | 83 |
| Ilustración 48. Matriz de evaluación de portadores para la selección del material del cabezal de calibración | 84 |
| Ilustración 49. Matriz de evaluación de portadores para la selección del material para separar del perfil/conducir refrigerante | 85 |
| Ilustración 50. Matriz morfológica simplificada y rutas de solución | 86 |
| Ilustración 51. Alternativa 1 | 87 |
| Ilustración 52. Detalle alternativa 1 | 88 |
| Ilustración 53. Alternativa 2 | 90 |
| Ilustración 54. Sistema de enfriamiento y cambio de espesor alternativa 2 | 91 |
| Ilustración 55. Alternativa para la función de solidificar perfil | 92 |
| Ilustración 56. Corporificación de la alternativa seleccionada | 95 |
| Ilustración 57. Corporificación del cabezal de extrusión (Conducir masa fundida) | 96 |
| Ilustración 58. Corporificación del cabezal de calibración. (Formar perfil) | 97 |
| Ilustración 59. Volumen del canal de flujo del cabezal de extrusión de la corporificación | 98 |
| Ilustración 60. Presión y flujo del cabezal de extrusión de la Corporificación | 99 |
| Ilustración 61. Velocidad del frente de flujo a 400 y 800 mm de distancia de la salida del cabezal de extrusión propuesto en la corporificación | 99 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 62. Rediseño (3) de canal de flujo que arrojó mejores resultados en las simulaciones con Flow simulation | 100 |
| Ilustración 63. Presión y trayectorias de flujo de la masa fundida del rediseño (3) | 101 |
| Ilustración 64. Velocidades de frente de flujo a distancias de 20, 30, 40, 50, 100, 200, 200 inferior, 200 superior y 800mm de la salida del cabezal de extrusión del rediseño 3 | 102 |
| Ilustración 65. Velocidades de frente de flujo a distancias de 30, 50, 100, 200, 400 inferior, 400 superior, 600 y 800mm de la salida del cabezal de extrusión del rediseño 3 | 102 |
| Ilustración 66. Esfuerzos y deformaciones en diferentes momentos del calentamiento del cabezal | 104 |
| Ilustración 67. Puntos críticos de esfuerzos y deformaciones en el cabezal de extrusión | 105 |
| Ilustración 68. Esfuerzos y deformación en el cabezal de extrusión | 105 |
| Ilustración 69. Esfuerzos y deformaciones de la optimización de cabezal de calibración | 106 |
| Ilustración 70. Condiciones térmicas iniciales del proceso | 106 |
| Ilustración 71. Esquema de distribución de los canales de enfriamiento | 108 |
| Ilustración 72. Disposición final de los componentes del sistema | 110 |
| Ilustración 73. Modificación en la entrada de la tina de enfriamiento | 110 |
| Ilustración 74. Componentes del cabezal de extrusión | 111 |
| Ilustración 75. Uniones del cabezal de extrusión | 112 |
| Ilustración 76. Componentes del cabezal de calibración | 113 |
| Ilustración 77. Sujeción de los diferentes componentes del cabezal de extrusión | 114 |
| Ilustración 78. Componentes del chasis de calibración | 115 |
| Ilustración 79. Ensamble y disposición de las boquillas de aspersion. | 115 |
| Ilustración 80. Componentes tina de enfriamiento | 116 |
| Ilustración 81. Detalle cuba. | 116 |
| Ilustración 82. Detalle de sistemas de la tina de enfriamiento | 117 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Línea de productos de Plasmaco | 14 |
| Tabla 2. Desperdicios del proceso de producción de tablas de madera plástica | 53 |
| Tabla 3. Tiempo reproceso molino | 54 |
| Tabla 4. Tiempos de proceso de fabricación de las tablas | 54 |
| Tabla 5. Composición de las materias primas provenientes de Microplast. | 56 |
| Tabla 6. Proporción de materias utilizadas en la mezcla | 57 |
| Tabla 7. Relación de la proporción en cocas con el peso y el volumen | 57 |
| Tabla 8. Participación por resina | 58 |
| Tabla 9. Perfil de temperaturas de cada una de las resinas que componen la mezcla, según GILES, WAGNER y MOUNT | 59 |
| Tabla 10. Perfil de Temperaturas mínimas y máximas para la materia prima de madera plástica | 60 |
| Tabla 11. Temperatura de transición según BALART, LOPEZ, GARCIA, y PARRES | 60 |
| Tabla 12. Propiedades térmicas de la mezcla, según el ponderado de las propiedades de cada resina referencias en la bibliografía | 65 |
| Tabla 13. Dimensiones del tornillo de la extrusora elegida para el proyecto por parte de la empresa Plasmaco | 66 |
| Tabla 14. PDS aspectos funcionales | 70 |
| Tabla 15. PDS aspectos de manufactura | 70 |
| Tabla 16. PDS aspectos de mantenimiento y ensamble | 71 |
| Tabla 17. PDS aspectos de materiales | 71 |
| Tabla 18. PDS aspectos de ergonomía y seguridad | 72 |
| Tabla 19. PDS aspectos de medidas | 72 |
| Tabla 20. PDS aspectos de mercado | 72 |
| Tabla 21. PDS aspectos de productividad | 72 |
| Tabla 22. PDS aspectos del desarrollo del proyecto | 73 |
| Tabla 23. PDS aspectos del medio ambiente | 73 |
| Tabla 24. Matriz de evaluación de alternativas | 93 |
| Tabla 25. . Escala de valores según la norma VDI 2222 y sus criterios de evaluación | 94 |

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de grado hace parte la investigación cofinanciada entre la universidad EAFIT y la empresa Plasmaco, el cual surge a partir de la necesidad de cubrir las carencias, tanto en las herramientas, como en el uso eficiente de los recursos involucrados en los procesos productivos de las empresas dedicadas a la elaboración de tablas de madera plástica en Colombia.

Como es bien sabido por todos, en la actualidad, es indispensable que todas las empresas, en pro de alcanzar el éxito, cumplan con las actuales exigencias del mercado en la fabricación de productos, por lo que es necesario que a la hora de manufacturar un bien, se cuente con unos tiempos reducidos de producción y entrega y una calidad continua en todos y cada uno de ellos.

La empresa Plasmaco no se encuentra ajena a dichas exigencias ni a dichas carencias, por lo que con este estudio, se plantea la posibilidad de diseñar un sistema de moldeo continuo de tablas de madera plástica que se adapte a su sistema productivo, con el fin de lograr un aumento en la productividad de la fábrica y un mejor aprovechamiento en el uso de materias primas, mano de obra y máquinas, reduciendo la generación de desperdicios, todo esto por medio de una integración y adaptación de tecnologías utilizadas en líneas de extrusión de perfiles, tubos, y lámina. El diseño de un molde para el formado continuo de tablas de madera plástica hace un recorrido desde el proceso de investigación sobre el moldeo de polímeros a través del proceso de extrusión continua, pasando por la identificación de propiedades del material y las especificaciones de los dispositivos utilizados en su fabricación, como lo son la máquina extrusora, su cabezal, los moldes empleados y las herramientas de corte. Adicionalmente, el proyecto incluye una evaluación de los procesos, herramientas y métodos de fabricación de tablas de madera plástica que emplea Plasmaco en la actualidad para poder establecer las oportunidades de mejora que se le puedan implementar. Además contiene una exploración de los posibles elementos adaptables, tanto de la misma industria del plástico, como de otras industrias, con el fin de aportar a la consecución de una mayor eficiencia en el uso de los recursos para que conjugando esto con el uso de las metodologías de diseño, se puedan generar alternativas de solución a los problemas actuales de la empresa.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

PLASMACO es una empresa ubicada en el Valle de Aburrá, en el municipio de Itagüí, constituida desde el 4 de marzo de 1999, que se dedica a la fabricación de productos elaborados a partir de plástico reciclado proveniente principalmente de la industria de empaques e insumos asociados. Estos productos son generalmente producidos en madera, por esta razón los denotan dentro del medio del reciclaje como “madera plástica”.

Dentro del portafolio de productos que ofrece se encuentran las siguientes líneas de acuerdo a la Tabla 1. Línea de productos de Plasmaco. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Tabla 1. Línea de productos de Plasmaco

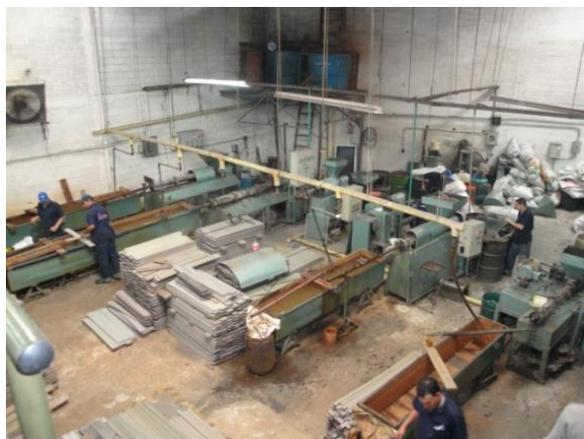
| Línea de productos | Referencias |
|--------------------|---|
| Estacones | Cuadrados 2", 2 ½" , 3 y 3 ½" Redondos 2" hasta 3" de diámetro |
| Estibas | Para montacargas Para estibador Tipo telera (para piso) |

(Elaboración propia)

La empresa cuenta en total con un personal compuesto por dieciséis empleados directos y tres empleados indirectos; para temporadas de alta demanda el número de operarios puede aumentar según los requerimientos.

En la Ilustración 1, se muestra la planta de producción de la empresa Plasmaco.

Ilustración 1. Planta de producción de la empresa Plasmaco.



1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La madera plástica es un producto que día tras día adquiere un mejor posicionamiento en el campo de la construcción de muebles y artefactos rústicos que estarán sometidos a los factores climáticos asociados al estar expuestos al aire libre. Presenta grandes atractivos tanto para los constructores o fabricantes, como para los ambientalistas puesto que, para los primeros, se convierte en una oferta novedosa y más resistente que la madera natural, y para los segundos, se contribuye a la disminución de la tala de bosques.

El proceso de fabricación de tablas de madera plástica en la empresa Plasmco, consiste en extruir el plástico fundido por la extrusora en un molde de acero, que posteriormente es llevado a la tina de enfriamiento, donde permanece sumergido entre cuatro y cinco minutos, tiempo durante el cual el operario conecta el siguiente molde a la máquina para su llenado. Una vez transcurrido este tiempo, el molde es retirado de la tina y se procede al desmolde de la tabla por medio de golpes, haciendo uso de un cincel y un mazo.

Mediante las visitas realizadas a la empresa Plasmaco y la investigación sobre las distintas empresas del sector, se ha logrado identificar que el método de manufactura empleado en el presente, genera una gran cantidad de desperdicio de material en las fases de: cambio y llenado del molde y el post proceso de corte que se requiere para obtener el producto final, a tal punto que con los residuos generados en la fabricación de dos tablas se obtiene el peso equivalente a una de ellas. Adicionalmente, el tiempo total del proceso, es mayor de nueve minutos, el cual es considerablemente alto, dado que se está hablando de la elaboración de solamente una tabla¹.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Con el diseño e implementación de un sistema de moldeo continuo de tablas de madera plástica se desea replantear y mejorar los métodos, herramientas y procesos que emplea hoy en día la empresa Plasmaco, en la elaboración de tablas, buscando aprovechar de una manera más eficiente el uso de los recursos, y así lograr disminuir los grandes desperdicios de material que se generan durante su fabricación y reducir los tiempos que se emplean actualmente para ello.

Si se observa este proyecto desde la perspectiva ambiental, su desarrollo aborda el aprovechamiento de los desperdicios plásticos evitando que estos lleguen a los rellenos sanitarios y además aportará al fortalecimiento de las líneas estratégicas planteadas en el plan de gestión integral de residuos sólidos regional 2.005 - 2.020, donde se plantea en la línea estratégica número 5: "Investigación y desarrollo tecnológico regional para la gestión de residuos

¹ Los datos de tiempos y desperdicios fueron tomados del resultado del seguimiento que se le hizo a una tabla tipo estiba de 12 x 3 x 100 cm. Estos serán presentados en detalle en la fase 1: Planteamiento del problema, numeral 6.2.1.

sólidos [4], que promueve la investigación aplicada, tema que se comprende con el diseño de un molde para el formado continuo del perfil utilizado en la elaboración de tablas de madera plástica, el cual puede ser de gran utilidad, no solamente para Plasmaco, sino para todas las empresas del área metropolitana y de Colombia, dedicadas a la fabricación de este tipo de productos en este material.

Desde el ámbito académico, el proyecto presenta grandes retos para el estudiante de Ingeniería de Diseño de Producto, dado que le exige aplicar, reforzar y aprender temas como: metodologías de diseño, materiales, procesos de manufactura, comunicación del diseño, sistemas y cálculos de ingeniería, los cuales hacen parte esencial de su formación profesional. Además con la realización de este proyecto se refuerzan competencias y habilidades propias de la naturaleza del ingeniero de diseño, como lo es el trabajo en equipo, reflejado en el proceso conjunto realizado con la empresa (Gerente, jefe de producción y operarios) y el equipo de trabajo de la Universidad, además que representa un acercamiento al proceso de investigación aplicado al día a día de la industria.

1.4. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un molde para el formado continuo del perfil utilizado en la elaboración de tablas de madera plástica en la empresa Plasmaco.

1.4.1. Objetivos específicos

- Conocer los métodos, herramientas y procesos empleados actualmente en la empresa Plasmaco en la elaboración de tablas de madera plástica con el propósito de identificar oportunidades de mejora.
- Implementar herramientas de diseño conceptual, que permitan obtener una alternativa a desarrollar
- Realizar la modelación geométrica de los componentes mecánicos del sistema en el software CAD Solidworks, con el fin de realizar simulaciones y análisis CAE al modelo virtual.
- Realizar el diseño de detalle como herramienta base para la evaluación de la viabilidad técnica del sistema.
- Elaborar los planos de taller, para la posterior fabricación de los componentes del molde.

1.5. ALCANCE

Al culmen exitoso del proyecto: diseño de un molde para el formado continuo del perfil utilizado en la elaboración de tablas de madera plástica, se pretenden obtener los siguientes resultados:

- Informe y documentación de todo el proceso investigativo y de desarrollo del sistema.
- Modelación geométrica de los componentes mecánicos del sistema, simulaciones y análisis CAE.
- Planos técnicos del sistema aprobados por los talleres que fabricarán los componentes.

Este diseño se construirá en etapas posteriores al culmen del presente estudio, las cuales pertenecen al proyecto de investigación cofinanciado entre la Universidad EAFIT y la empresa Plasmaco.

2. RECICLAJE DE MATERIALES PLÁSTICOS

Un problema latente en estos tiempos, es el crecimiento continuo de residuos sólidos en todo el planeta, debido a diversos factores como el crecimiento poblacional, la sociedad de consumo y el diseño de productos sin pensar en su disposición final. Esto ha llevado a las sociedades a buscar soluciones como el reciclaje, que contribuye con la auto-sostenibilidad y al buen uso de sus recursos y desechos.

El reciclaje es el proceso mediante el cual se aprovechan y transforman los residuos sólidos recuperados y se devuelve a los materiales su potencialidad de reincorporación como materia prima para la fabricación de nuevos productos. [4]

En el 2003 el plástico tenía una participación en la composición de los residuos del 7% al 17% en Europa y los principales países de Suramérica, proveniente de dos grandes fuentes. [16]

- a) Los residuos plásticos domiciliarios (post-consumo). Son los que integran la corriente de residuos sólidos urbanos bajo la forma de bolsas de leche, botellas de gaseosa, agua mineral, envases de alimentos sólidos, botellas de productos de limpieza del hogar, etc.
- b) Los residuos industriales denominados scrap, provenientes del proceso de producción de la materia prima o del sector transformador. El scrap, en general, es más fácil de reciclar porque está limpio y es homogéneo en su composición, ya que no está mezclado con otros tipos de plásticos.

Sin embargo, los plásticos a diferencia de otros materiales tienen la propiedad de ser reutilizables, por lo tanto pueden ser reinsertados nuevamente al mercado como recursos por medio de los siguientes métodos de reciclado.

- a) **RECICLADO QUÍMICO:** Implica despolimerizar los plásticos y reducirlos hasta sustancias químicas sencillas. El objetivo es recuperar esos componentes químicos individuales para reusarlos como químicos o producir nuevos plásticos con las mismas características y propiedades de los materiales vírgenes. Hay distintos procesos desarrollados y en permanente optimización: Metanólisis, Glicólisis, Hidrólisis, Pirólisis, Crackeo Térmico. [16]
- b) **RECUPERACIÓN DE ENERGÍA:** Implica aprovechar el alto poder calórico de los plásticos recuperando su energía a través de la incineración en hornos especialmente diseñados a tal fin con la máxima tecnología y regulación internacional. Este proceso no implica mayor contaminación ya que se obtienen como residuos gaseosos exclusivamente dióxido de carbono y vapor de agua, tratándose además los residuos líquidos en plantas de tratamiento de efluentes. [16]

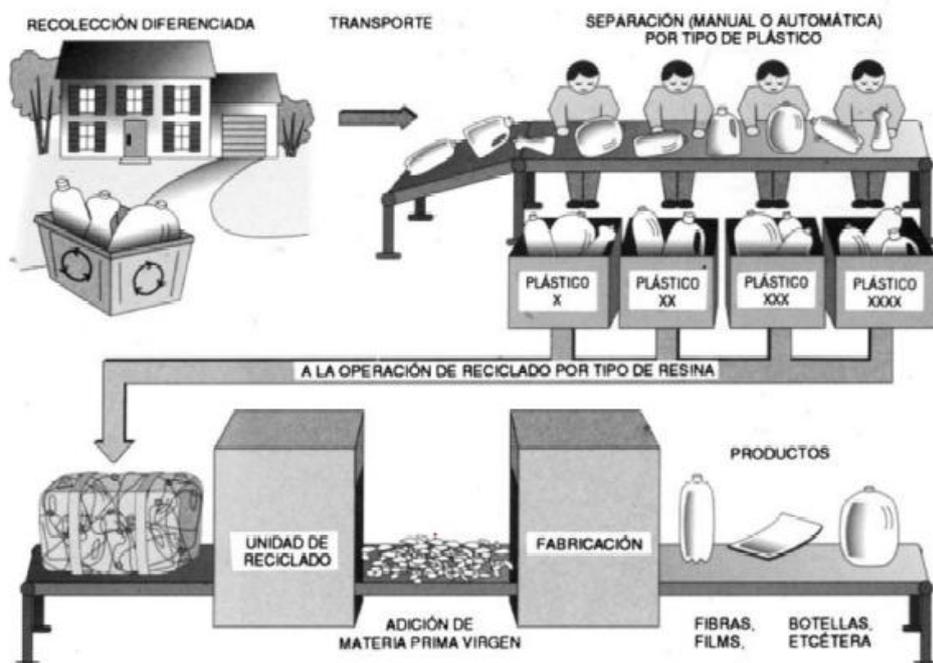
c) **RECICLADO MECÁNICO:** El reciclado mecánico es un proceso físico-mecánico mediante el cual el plástico post-consumo o el industrial (scrap) es recuperado, permitiendo su posterior utilización.

Para lograr este objetivo se requiere seguir los siguientes pasos:

- Recolección de los residuos plásticos.
- Separación por tipos de plásticos individuales.
- Limpieza para retirar etiquetas, suciedad y residuos.
- Reducción de tamaño por medio de molido o picado.
- Aglutinación o densificación del material en forma de gránulos o escamas.
- Extrusión del material aglutinado en forma de pellets.
- Manufactura del producto final.

Y se muestran gráficamente en la Ilustración 2.

Ilustración 2. Esquema de reciclado mecánico



Fuente: ecoplas@, 2006.

El área metropolitana de Medellín crece exponencialmente en la actividad del reciclaje, y con mucha mayor fuerza en el reciclaje de plástico, comenzando a crear estándares de competitividad entre los comercializadores de las resinas recicladas. Estas actividades se han desarrollado de forma empírica durante los últimos 30 años y la comparación global de estas actividades con otros

países, muestra como desventaja los procesos aquí instalados, por falta de tecnología, recursos y estandarización de procesos.

2.1. MADERA PLÁSTICA, UNA OPCIÓN DE RECICLAJE

La presencia de productos compuestos como los laminados, coextruidos, y otras mezclas de diferentes materiales como plástico/metál, plástico/madera, etc. complica el reciclaje. Mientras que a veces ofrecen ventajas de uso (en términos de eficiencia funcional y de recursos), estos productos más complejos no pueden ser reciclados con facilidad haciendo uso de las técnicas convencionales a causa de las dificultades para separar los diferentes componentes.

Una opción para reciclar estos residuos compuestos es la madera plástica, que es un producto que día tras día adquiere un mejor posicionamiento en el campo de la construcción de muebles y artefactos rústicos que estarán sometidos a los factores climáticos asociados al estar expuestos al aire libre. Presenta grandes atractivos tanto para los constructores o fabricantes, como para los ambientalistas puesto que, para los primeros, se convierte en una oferta novedosa y más resistente que la madera natural, y para los segundos, gracias a que con ella se contribuye a la disminución de la tala de bosques.

En la actualidad, existen dos tipos de madera plástica: una es la que se obtiene a partir de la mezcla de aserrín de madera natural con algunos plásticos y la otra, es la que se elabora a partir de residuos plásticos, que por lo general se tratan de polipropileno o polietileno de alta o de baja densidad. Este último tipo es el más conocido como madera plástica, pero en realidad no se encuentra conformado por ningún componente relacionado con la madera que se obtiene de los árboles y es sobre el cual el presente proyecto se pretende enfocar debido a que los productos que fabrica la empresa Plasmaco son elaborados con este material.

La madera plástica es elaborada a partir de plástico reciclado, el cual se obtiene del proceso de recuperar los residuos plásticos limpios, tales como bolsas, empaques, costales y pañales que son llevados a un centro de acopio, y que, una vez seleccionados y separados, son triturados hasta obtener un pellet, material aglutinado o molido, que son los que la empresa Plasmaco obtiene directamente de sus proveedores y a partir del cual elabora sus productos.

Las tablas de madera plástica tienen una gran cantidad de usos y aplicaciones. Se presentan como el principal insumo de una gran variedad de productos, casi que en todos en los que se utilizan las tablas de madera natural. Algunos de ellos son: muebles tales como bancas, sillas y mesas, basureros, maceteros, cercas, barandas, cerramientos, decks, muelles, puentes, senderos, avisos, cajones, comederos y casas para animales, parques infantiles y muebles para

la industria entre muchos otros². Plasmaco actualmente utiliza las tablas de madera plástica que fabrica para elaborar otros productos que también ofrece dentro de su portafolio: estibas y tarimas.

Ilustración 3. Usos de la madera plástica.



Fuente. POLICOG@, 2010

Dentro de los mayores beneficios que se pueden obtener con el uso de tablas de madera plástica, como ya se mencionó con anterioridad, es posible encontrar: la gran contribución que se hace a reducir el impacto ambiental y que se pueden diseñar con mezclas y geometrías que presenten unas mayores propiedades mecánicas que una tabla de madera natural. Otras ventajas con respecto a las tablas tradicionales es que no presentan porosidad por lo que no presentan daños a la intemperie ni al contacto con el agua, flotan, no absorben bacterias, no presentan corrosión ni tampoco sufren el ataque de animales como ratones e insectos sin tener necesidad de pintarlas, barnizarlas o aplicarles impermeabilizantes. Adicionalmente se pueden fabricar del color y tamaño que se desee y se trabajan y manipulan de manera similar a la madera natural: pueden cortarse con serrucho, segueta o sierra eléctrica, y pueden ser torneadas, cepilladas o perforadas.

2.2.1. Situación actual de la tecnología utilizada en la elaboración de la madera plástica.

La madera plástica en Colombia tiene sus inicios a principio de la década de los noventa, cuando algunos empresarios vieron en este producto una oportunidad de crear empresa. Sin embargo los métodos y la tecnología que implementaron para realizar este proceso, fueron diseñados de manera empírica, en muchos casos se tienen maquinas hechizas, construidas a partir de chatarra o componentes de maquinas averiadas.

Por medio de visitas y consultas a diferentes empresas dentro del área metropolitana de Medellín y de otras regiones del país, se ha encontrado que para la producción de tablas de madera plástica se utiliza actualmente el mismo sistema de extrusión discontinua de esa época, acompañado de grandes problemas de desperdicios, tiempos y salud ocupacional, como se

² Incluso existen en la actualidad vehículos de transporte de carga que tienen estacas y pisos hechos en madera plástica.

explica en el numeral 6.1.1. En la Ilustración 4, se observa la maquina extrusora, el molde, el llenado y la herramienta para la expulsión de la tabla.

Ilustración 4. Maquinaria para la producción de tablas para madera plástica en Colombia



Los cabezales de extrusión son construidos con un disco de 5/8" para fijar el cabezal a la extrusora, y un desarrollo en platina de 1/4", que es el que cambia la forma circular del cañón de la extrusora, a la rectangular del molde. Estos presentan grandes problemas de puntos muertos y cambios de geometría.

Ilustración 5. Cabezal utilizado en la elaboración actual de tablas de madera plástica



Adicionalmente se realizó una serie de investigaciones y consultas en diferentes fuentes como libros, páginas web de constructores de maquinaria para extrusión continua, videos online y bases de datos de patentes nacionales e internacionales, donde se han encontrado una serie de tecnologías aplicables a la fabricación de tablas de madera plástica y que pueden aportar de manera

significativa al desarrollo del proyecto. En la Ilustración 6 y Ilustración 7, se muestra un collage con productos de empresas como Cincinnati Milacron, Hubei Gaoxin, LC Extrusion.

Ilustración 6. Cabezales para extrusión de perfiles.

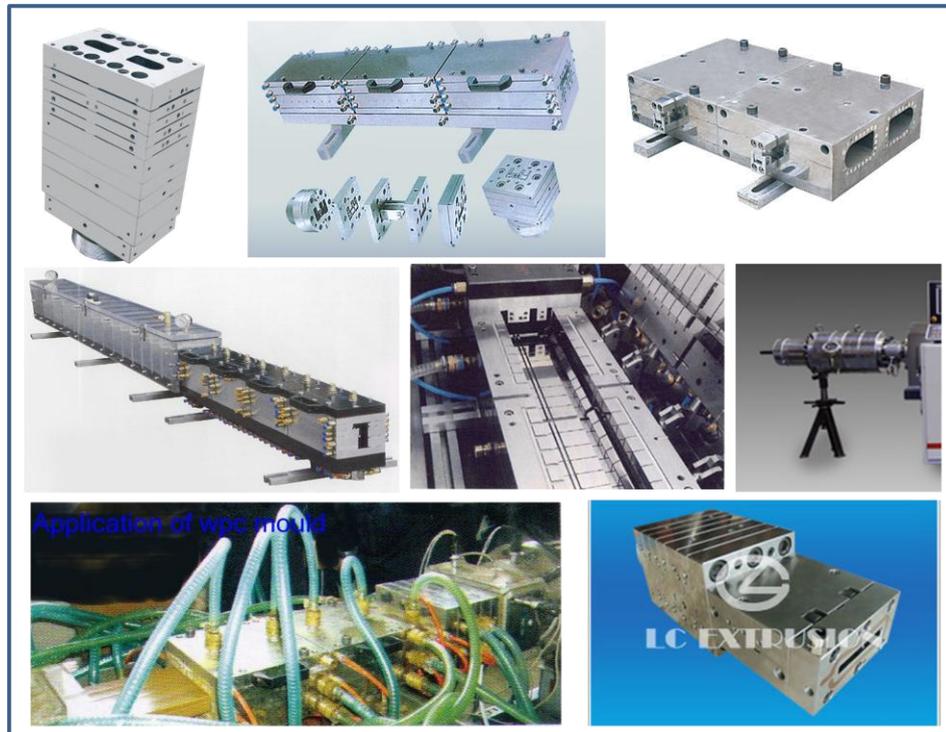


Ilustración 7. Tinas de enfriamiento para extrusión.



Es de destacar que se realizaron continuas búsquedas en bases de datos nacionales, como la de la Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia, y otras internacionales especializadas como Esp@cenet (European

Patent Office) y USPTO (United States Patent and Trademark Office). En estos estudios se encontró que existen varias patentes relacionadas con dispositivos que incluiría el sistema a diseñar u otras que describen procesos de extrusión continua pero para la fabricación de tubería. A continuación se procederá a exponer lo encontrado en dichas búsquedas:

Existe una patente titulada: “Boquilla modificada de extrusión continua para la obtención de compuesto madera-plástico”. Esta patente puede servir como fuente de consulta para el presente proyecto debido a que describe todo lo relacionado con el rediseño de este dispositivo empleado en una línea de extrusión continua, pero es importante aclarar que el material sobre el que se desarrolla la patente, no es el mismo sobre el que se desarrolla el proyecto, así que es posible que las tecnologías allí descritas no sean del todo aplicables en este proyecto.

La patente: “Proceso industrial para la conversión de la basura plástica, sin ningún tipo de clasificación o separación, en productos útiles a la comunidad”. Aquí se presentan varias opciones de reutilización y recuperación de los residuos plásticos, dentro de los cuales es posible encontrar la elaboración de tablas de madera plástica, pero igualmente no se refiere específicamente a la elaboración de ellas por un proceso de extrusión continua, sino por moldes que es lo que se desea cambiar con el proyecto aquí presentado.

Se encontró también una patente llamada: “PP and PE wood-plastic circled water cooling extrusion die”, la cual describe el proceso de desarrollo de un sistema de enfriamiento para un dado empleado en la extrusión de un material compuesto por madera y plástico, que también puede aportar algunos criterios en el diseño del sistema de enfriamiento para el sistema de extrusión continua del cual es objeto este proyecto.

Finalmente, la patente “Extrusion line for plastic tubes”, también será utilizada como fuente de consulta para intentar homologar tecnologías ya existentes en la elaboración de tubería hacia la manera como se desea llegar a producir las tablas de madera plástica en este proyecto, debido a que ambas se obtendrían a través de un proceso de extrusión continua.

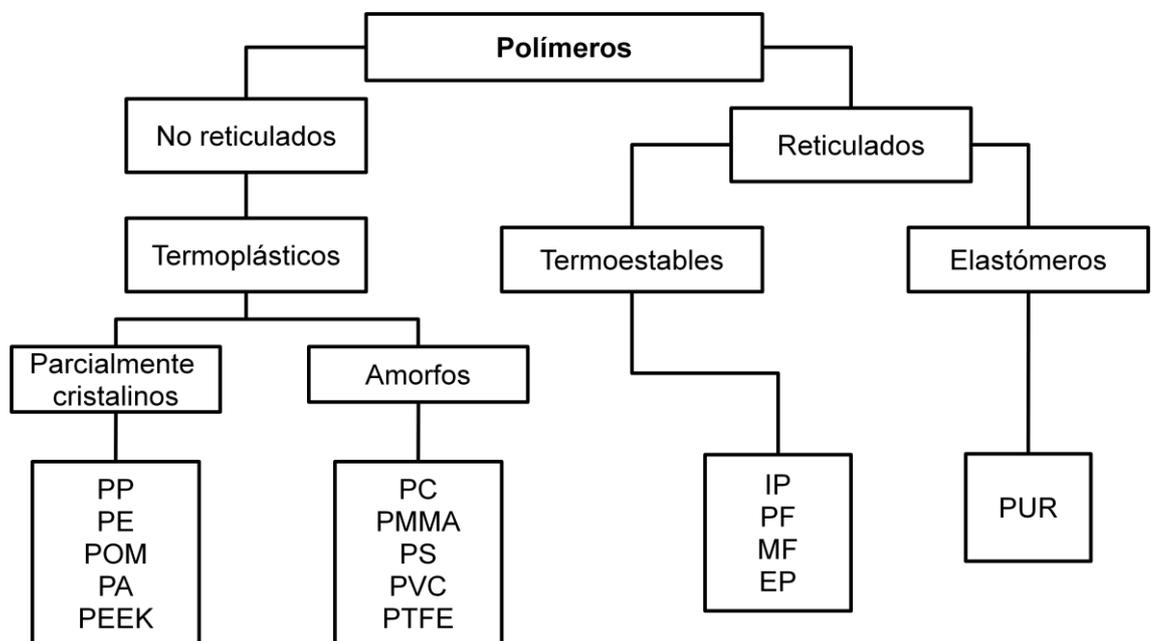
Se ha podido constatar que empresas en Brasil como Cogumelo, con su producto Policog y empresas en China, manejan líneas de extrusión continua para fabricar perfiles de WPC (Wood Polimer Composite), el cual es un material compuesto a partir de madera y plástico, el cual difiere del empleado en este proyecto, debido a que este último está solamente compuesto por plástico reciclado, así que la idea es lograr identificar qué procesos y herramientas son susceptibles de implementación dentro del sistema a diseñar y a fabricar.

3. POLÍMEROS

Los polímeros son materiales cuyos componentes están formados por sustancias orgánicas macromoleculares que se originan mediante síntesis o por transformación de productos naturales [12].

Los polímeros se clasifican de varias formas (Ilustración 8. Clasificación de los Polímeros): primero, según la manera en que son sintetizados; segundo, en función de su estructura molecular y tercero, por su familia química; sin embargo, el método más usado para describir los polímeros, es en función de su comportamiento mecánico y térmico [1].

Ilustración 8. Clasificación de los Polímeros



Los polímeros termoplásticos están compuestos por largas cadenas producidas al unir moléculas pequeñas o monómeros y típicamente se comportan de una manera plástica y dúctil, permitiendo así ser calentados, fundidos, moldeados y enfriados varias veces, por lo que se pueden reciclar con facilidad.

Los polímeros termoestables están compuestos por largas cadenas con fuertes enlaces cruzados para formar estructuras de redes tridimensionales, generalmente son más resistentes aunque más frágiles que los termoplásticos y es difícil reprocesarlos. Los elastómeros tienen una estructura intermedia en la cual se permite que ocurra una ligera formación de enlaces cruzados en las cadenas, tienen la capacidad de deformarse elásticamente en grandes cantidades sin cambiar de forma permanente [1]

Los elastómeros, incluyendo el caucho, tienen una estructura intermedia, en la cual permite que ocurra una ligera formación de enlaces cruzados entre las

cadena. Los elastómeros tienen la capacidad de deformarse elásticamente en grandes cantidades sin cambiar de forma permanentemente.

Para la producción de madera plástica se trabaja normalmente con polímeros termoplásticos, debido a la facilidad de reciclaje que presentan estos materiales.

En el proceso de extrusión el polímero pasa por varios estados, pues ingresa en estado sólido, es plastificado por la extrusora, y es enfriado nuevamente para mantener la forma dada por el cabezal. Por esto es importante el conocimiento de sus propiedades en cada momento del proceso.

3.1 PROPIEDADES DE LOS TERMOPLÁSTICOS EN ESTADO SÓLIDO

3.1.1 Densidad de empaque

La importancia de esta propiedad en el proceso de extrusión radica en su gran influencia en el funcionamiento de la zona de alimentación de la extrusora. Los materiales de baja densidad de empaque tienden a causar problemas en el transporte del sólido, tanto en la tolva, como en la zona de alimentación de la extrusora. Los materiales de baja densidad tienen normalmente una forma irregular, como por ejemplo, material polimérico reciclado, material en forma de escamas, recorte de fibra o película polimérica, entre otros.

Para el caso de la extrusión, si la densidad de empaque es baja, el flujo másico de la extrusora será bajo, ya que la zona de alimentación no puede suministrar material suficiente a las zonas posteriores, tales como la zona de plastificación y dosificación. [14]

En general los termoplásticos semicristalinos tienen una compresibilidad en un rango de bajo a moderado. Para evitar este problema se deben proveer buenos diseños de husillo y cilindro.

$\rho < 0.2 \text{ g/cm}^3 >$ Mal transporte
 $\rho > 0.2 \text{ g/cm}^3 >$ Buen transporte

3.1.2 Forma de partícula

El deslizamiento, entrada en el tornillo y plastificación de la masa en el extrusor es influenciado por la forma y tamaño de la partícula. La máquina de extrusión puede ser alimentada con resinas o compuestos en varias formas: la alimentación puede ser en polvo fino, material granulado o peletizado. Si el material es obtenible en más de una forma, los problemas de alimentación pueden ser solucionados mezclando diferentes tipos. En términos de eficiencia de salida (Kg/h), los gránulos esféricos de aproximadamente 3 mm. de diámetro son los más eficientes. El polvo fino es usualmente el peor,

seguido por, los gránulos cortados en cubo y por último los gránulos cortados de cordón. [20]

3.2. PROPIEDADES DE LOS POLÍMEROS PLASTIFICADOS

El conocimiento de las propiedades de flujo de la masa fundida es muy importante en el análisis del proceso de extrusión, los primeros rastros de fusión generalmente aparecen a unos pocos diámetros de la zona de alimentación. La zona de dosificación en la mayoría de los casos está completamente llena con material fundido. Las propiedades de flujo del material fundido determinan en gran parte las características del proceso de extrusión. Si las propiedades del flujo del material fundido no son conocidas, la selección del husillo de extrusión y la determinación de las condiciones de operación se convierte en un proceso de prueba y error. [20]

3.2.1. Rata de cizalladura

Durante el proceso de flujo, como ocurre en el cabezal de extrusión, el fundido es sometido a una deformación por cizalladura. Este flujo cortante es causado porque el material plastificado se adhiere a las paredes del dado, dando como resultado un cambio en la velocidad de flujo a través del área del canal.

Esta es la rata de cizalladura, que es la diferencia en velocidad por unidad normal por cada unidad de distancia normal a la dirección del flujo.

$$\gamma = \frac{\partial V_x}{\partial y}$$

[12]

Donde:

V = velocidad del flujo

y = dirección de la cizalladura

Esta es esencial para conocer la viscosidad del material en las diferentes zonas en el tornillo y el cabezal, y se puede calcular de la siguiente forma.

$$\gamma = \frac{\pi * \phi * N}{h}$$

[7]

Donde:

ϕ = Diámetro del tornillo.

N = Revoluciones del tornillo.

h = Altura del filete.

$$\gamma = \frac{6 * Q}{W * h^2}$$

[7]

Donde:

ϕ = Diámetro del tornillo.

N = Revoluciones del tornillo.

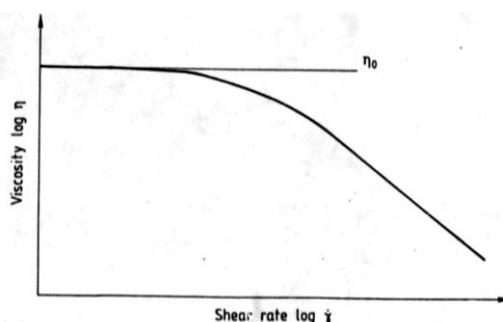
h = Altura del filete.

W = Ancho canal del dado.

3.2.2. Viscosidad y funciones de flujo

Cuando se grafica la viscosidad, dependiente de la tasa de cizalladura en medida logarítmica, se obtiene la siguiente función, válida para polímeros a temperatura constante. Se puede observar que para bajos esfuerzos de cizalladura, la viscosidad permanece constante, pero con el incremento de la tasa de cizalladura en un cierto punto, esta cambia linealmente sobre relativamente un rango amplio de tasas de cizalladura (Ver Ilustración 9. Representación de la dependencia de la viscosidad de la tasa de Cizalladura).

Ilustración 9. Representación de la dependencia de la viscosidad de la tasa de Cizalladura



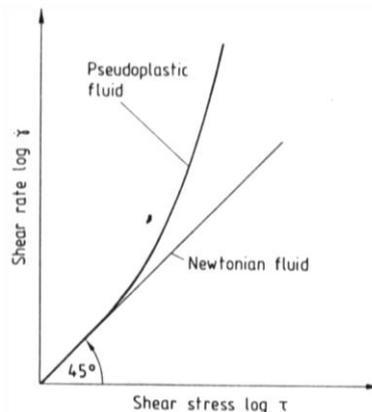
Fuente. MICHAELI, 1992, pág. 20.

La reducción de la viscosidad con el incremento de la tasa de cizalladura, es referido como un comportamiento pseudoplástico.

Para fluidos newtonianos, la tasa de cizalladura es directamente proporcional al esfuerzo de cizalladura, por lo tanto, en una grafica log-log seria una línea recta con pendiente 1, ósea un ángulo de 45°. Cualquier desviación de esta pendiente, indica directamente un fluido no newtoniano. (MICHAELI, 1992, pág.19)

Cuando un plástico tiene alta viscosidad, más torque es requerido en la extrusora y más presión es necesaria para forzar al plástico a través del cabezal. La viscosidad de un plástico es altamente dependiente del peso molecular; entre más alto peso molecular, más alta viscosidad (Ver Ilustración 10. Representación de la dependencia de la tasa de cizalladura sobre el esfuerzo, por una curva de flujo).

Ilustración 10. Representación de la dependencia de la tasa de cizalladura sobre el esfuerzo, por una curva de flujo



Fuente. MICHAELI, 1992, pág.21.

El hecho de que la viscosidad del material fundido se reduzca con la tasa de temperatura es de gran importancia en el proceso de extrusión. Por lo tanto es importante saber que tanto cambio ocurre en un polímero en particular. La viscosidad a una muy baja tasa de cizalladura es esencialmente independiente de esta, por lo tanto el fluido se comporta como un newtoniano a bajas tasas de cizalladura. El rango de tasas de cizalladura encontradas en la mayoría de las operaciones de procesos poliméricos, es aproximadamente de 1 a 10000s⁻¹ en este rango la curva de viscosidad vs tasa de cizalladura puede ser aproximada mediante una relación lineal para la mayoría de los polímeros. Los datos deben ser graficados en escala logarítmica. [12]

3.3. PROPIEDADES TÉRMICAS

Las propiedades térmicas de los plásticos son importantes para entender como un material en particular se comporta durante el proceso de extrusión. Conocer estas propiedades permite hacer la selección apropiada de la máquina, programar las condiciones de procesamiento correctas y analizar problemas en el proceso. [20]

En el proceso de extrusión, el material se transporta y se lleva a la temperatura de fusión, luego por calentamiento y fricción alcanza una temperatura por encima de la temperatura de fusión, y finalmente el polímero debe alcanzar un estado de homogeneidad térmica. Cuando el extruido abandona el cabezal de extrusión debe ser enfriado a temperatura ambiente. Lo anterior muestra que las propiedades térmicas son esenciales para describir y analizar el proceso de extrusión [14]

3.3.1. Conductividad térmica

La conductividad térmica λ es la habilidad de un material de conducir calor. La λ de los plásticos es muy baja. Estos valores son de alrededor de 0.12

W/mK. La conductividad térmica se incrementa con la temperatura, especialmente en los semicristalinos. El incremento es aproximadamente 5% a presiones usuales durante la extrusión (menos de 300 bar). [12]

3.3.2. Calor específico

La capacidad de calor específico, C_p , llamada calor específico, es la cantidad de calor necesaria para incrementar la temperatura de 1 gramo de sustancia un 1 K ° a presión constante. Los valores de C_p para los plásticos a temperatura ambiente, está alrededor de 1.5 J/g.K, por lo tanto es tres veces más alta que la del acero, pero solo ligeramente por encima de un tercio de la del agua que es 4.18 J/g.K a una temperatura de 20°C. [12].

3.3.3. Difusividad térmica

La difusividad térmica (α), es calculada con la conductividad térmica, la densidad y el calor específico. Es definida en la siguiente ecuación.

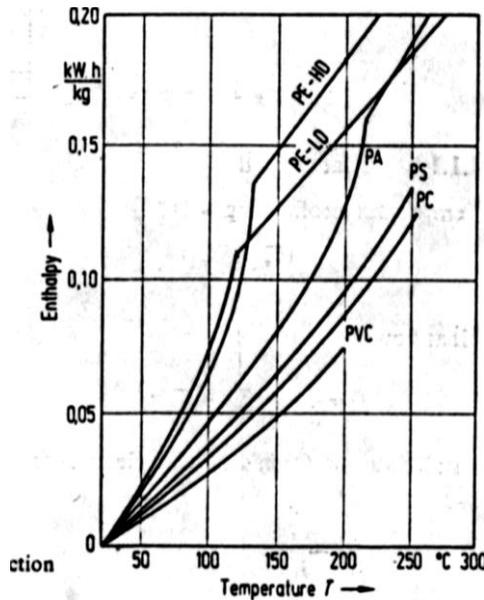
$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$$

[11]

3.3.4. Entalpía específica

La entalpía es definida como la energía total aplicada al polímero, dividida por la cantidad de polímero extruido. Es un parámetro muy útil para el diseño en extrusión y equipos, como en el caso del husillo. Esta da la cantidad teórica de energía requerida para traer a la temperatura de proceso el polímero utilizado (Ver Ilustración 11. Entalpía específica en diferentes Polímeros). [12]

Ilustración 11. Entalpia especifica en diferentes Polímeros



Fuente. RAO, 1991, pág.38.

3.3.5. Temperatura de fusión (T_m)

Esta temperatura está relacionada con la rotura de la estructura firmemente empaquetada de las zonas cristalinas en polímeros semicristalinos. Las zonas cristalinas de un polímero son zonas con un gran empaquetamiento de cadenas, de tal manera que se hace necesario la aportación de un calor adicional para romper esta estructura compacta y llevar al material al estado líquido. Los plásticos semicristalinos son usualmente procesados a 50 grados por encima de su punto de fusión. [2]

3.3.6. Temperatura de transición vítrea (T_g)

De forma general la temperatura de transición vítrea depende de la movilidad de las cadenas. La transición vítrea de un material implica cambios en las características de éste, puesto que pasa de tener un comportamiento dúctil a un comportamiento frágil debido a la restricción de la movilidad de las cadenas. La temperatura de transición vítrea de muchos polímeros es aproximadamente dos tercios del punto de fusión. [2]

3.3.7. Temperatura de degradación (T_d)

A temperaturas muy altas, los enlaces covalentes entre los átomos de la cadena pueden destruirse y el polímero puede quemarse o carbonizarse. La exposición al oxígeno, a las radiaciones ultravioleta y al ataque de bacterias también hace que un polímero se degrade, incluso a bajas temperaturas. [1]

3.3.8. Estabilidad térmica y tiempo de inducción

El tiempo de inducción es una medida de la estabilidad térmica de los plásticos; es el tiempo en que un plástico puede sobrevivir sin degradarse a elevadas temperaturas. Un alto tiempo de inducción representa una gran estabilidad térmica del plástico. Este tiempo puede ser medido utilizando varios instrumentos como el TGA (thermogravimetric analyzer). [21]

3.3.9. Perfil de temperatura

El perfil de temperatura, se refiere a la temperatura que se debe tener en cada una de las zonas de la extrusora para garantizar una buena plastificación del polímero dentro de la extrusora. Cada resina tiene una configuración recomendada por el fabricante o por datos experimentales que da la literatura.

3.3.10. Densidad (ρ)

Las densidades de los polímeros se encuentran considerablemente por debajo de las de los metales. Están alrededor de 1 g/cm^3 a temperatura ambiente y a presiones normales. [11]

La densidad del polímero ρ es una función de la presión, temperatura y velocidad de enfriamiento. El volumen específico es el recíproco de la densidad, $V = 1 / \rho$. Para analizar esta propiedad correctamente se dispone de los denominados diagramas P.V.T.

3.4 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE TERMOPLÁSTICOS

3.4.1. DSC

Entre todas las técnicas de análisis térmico, la calorimetría diferencial de barrido (DSC) es la más versátil ya que son muchos los aspectos cubiertos por esta, tales como la identificación cualitativa y cuantitativa de materiales, estudios de degradación, estudio de los procesos térmicos previos acumulados por el material.

En esta técnica se registran los cambios de energía que experimenta una muestra en relación a un material inerte de referencia. Cuando ocurre una transición térmica en la muestra, se añade energía térmica a ambas células, muestra y referencia, con el fin de mantener ambas a la misma temperatura.

Así pues, si la muestra de material no experimenta ninguna transición. Debido a que la energía requerida es exactamente igual a la absorbida o envuelta en la transición, el balance de energía supone una medida calorimétrica directa de la energía de dicha transición.

El análisis DSC, permite identificar varios tipos de transiciones:

- Transiciones de 2° orden en las que se detectan un cambio de fase.
 - Picos endotérmicos puntiagudos, consecuencia de una fusión.
 - Picos endotérmicos redondeados, consecuencia de reacciones de descomposición o disociación.
 - Picos exotérmicos causados por un cambio de fase cristalina.
 - Picos exotérmicos ocasionados por reacciones químicas.
- [2]

3.4.2. TGA

De forma general, la termo-gravimetría aporta información sobre las temperaturas y el curso de las reacciones de descomposición en atmosferas inertes. Se emplea en gran medida para estudiar los procesos de degradación y estabilidad a altas temperaturas de los materiales plásticos. Esta técnica se basa en la determinación de la pérdida de masa que experimenta una muestra al ser sometida a un programa térmico. [2]

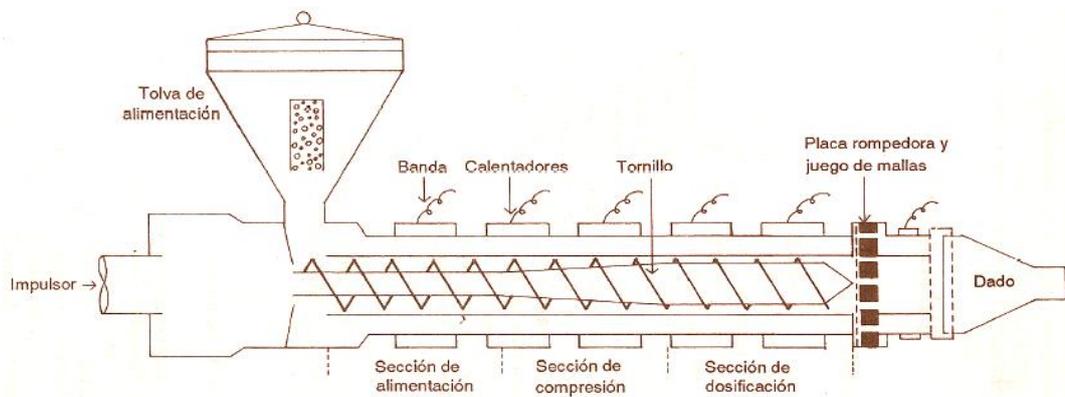
4. EXTRUSIÓN DE TERMOPLÁSTICOS

La operación o procedimiento de extrusión es la acción de forzar, por medio de presión, a pasar a través de un “dado” o “boquilla” un plástico o material fundido. [13]

El proceso de extrusión es uno de los más importantes en la industria de transformación de plásticos. Entre los productos que se pueden manufacturar se encuentran: tubería, manguera, película, fibras y un número ilimitado de perfiles. [18]

Para extruir un material termoplástico primero hay que ablandarlo, para que pueda ser formado; esto normalmente es hecho por calor. Este calor de ablandamiento es llamado de varias formas, por ejemplo, plastificación y ablandamiento termal. Este proceso es hecho por una máquina de extrusión, que es, una extrusora. Muchas máquinas son mono husillo y este es quien fuerza al material hacia delante, y después a través del cabezal. La forma es impartida por el cabezal, y/o por distorsión post-extrusión, y entonces el producto es ajustado en su forma por enfriamiento mientras que esta se mantiene. El equipo que hace esto es llamado equipo de post-extrusión y todo el sistema es llamado una línea de extrusión. [24] Ver Ilustración 12. Esquema de las partes principales de una maquina extrusora:

Ilustración 12. Esquema de las partes principales de una maquina extrusora



Fuente. MORTON, 2007, p.96.

4.1. PARTES PRINCIPALES DE UNA MAQUINA EXTRUSORA

4.1.1. El motor extrusor

El motor del husillo es usualmente un motor eléctrico que provee de energía para hacer girar el husillo. La velocidad nominal del motor es típicamente cerca de 1800 rpm, mientras que la velocidad típica de un husillo es de 100 rpm. Como resultado, es necesario un reductor de velocidad entre el motor y el husillo. Algunos motores pueden ser usados para las extrusoras. Los motores DC son los más usados, aunque los motores AC son ahora utilizados más frecuentemente. Las extrusoras antiguas usan un motor DC de escobilla con

tacómetro. Este procura una velocidad regulada cerca del 1% de exactitud respecto a la velocidad máxima. El 1% puede ser aceptable para algunos productos, puede no puede serlo para operaciones de gran precisión, como tubería medica, particularmente cuando la extrusora se opera a baja velocidad. [21]

4.1.2. Tolva de alimentación:

La garganta de alimentación está conectada con la tolva de alimentación y el cilindro de extrusión. La tolva de alimentación mantiene los pellets o polvos de polímero y descarga el material dentro de la garganta de alimentación. La tolva debe estar diseñada para alojar un flujo constante de material a través de la misma. El flujo constante se consigue mejor con una tolva circular con una transición gradual en la sección cónica de la tolva. [9]

4.1.3. Husillo de extrusión

El husillo tiene como misión transportar, fundir, levantar presión y homogenizar la masa fundida. Es decir, es el encargado de entregar el polímero fundido al cabezal con la presión necesaria para lograr que este fluya a través de él.

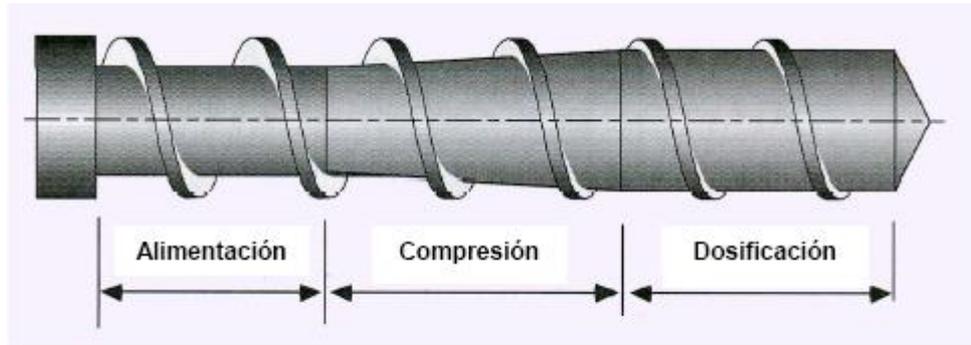
Hay una serie de condiciones que deben cumplir todos los husillos, y por ende todas las extrusoras:

- Permitir un transporte constante sin grandes pulsaciones.
- Producir una masa fundida térmica y mecánicamente homogénea.
- Permitir la transformación del material por debajo de su límite de degradación térmica, química y mecánica.

La homogenización de la masa fundida en extrusión se debe entender como la dispersión de aglomerados, es decir, fusión final de las partículas de sólido, distribución y mezcla homogénea de los componentes tales como, pigmentos, aditivos, etc., y la unificación de la temperatura del extruído.

El husillo comprende las siguientes zonas (Ver Ilustración 13. **Zonas de una extrusora**):

Ilustración 13. Zonas de una extrusora



FUENTE: Rauwendaal, 1998. p. 6

a) Zona de alimentación

El material se encuentra en grano sin fundir, por lo tanto ocupa mucho volumen, la profundidad del tornillo es constante y en esta zona se recibe, se transporta y se comprime el material que viene de la tolva, además se eliminan el aire y gases. En esta zona se presenta poca presión. [8]

La función de esta zona es recibir, transportar, comprimir y precalentar el material, para ser entregado a la zona siguiente de plastificación. [14]

b) Zona de transición o compresión.

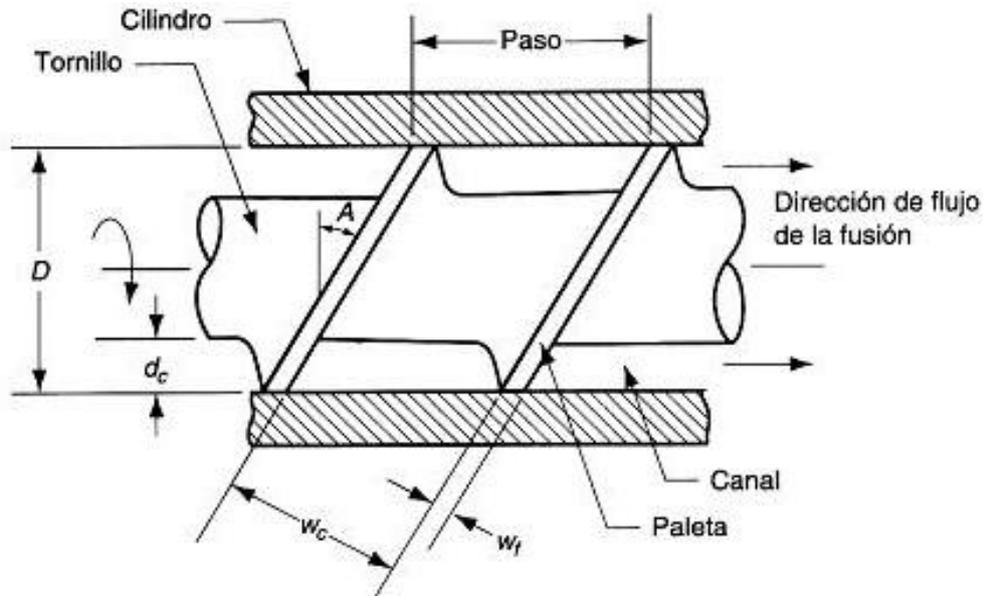
Esta zona tiene una profundidad de canal decreciente. En esta zona el material es fundido y compacto gracias a la variabilidad en la profundidad del filete.

c) Zona de dosificación

Esta zona debe homogenizar la masa fundida y debe extruir el material con la presión necesaria a través del cabezal de extrusión. [20]

La zona de homogenización del husillo (Ver Ilustración 14. Zona de Dosificación de tornillo o Husillo Extrusor) es de una profundidad de canal constante y cuando es adecuadamente diseñada, esta zona es la que controla el flujo másico o producción de la extrusora y es la responsable de mantener constante la producción en la punta del husillo, exactamente, antes del cabezal. [8]

Ilustración 14. Zona de Dosificación de tornillo o Husillo Extrusor



La presión generada hasta el final del cilindro (P) depende de la resistencia del cabezal de extrusión (W), el flujo másico y de la viscosidad de la plastificación. Esta presión se incrementa proporcional al flujo másico en los materiales pseudoplásticos o de su estructura viscosa. [8]

Los valores usuales de la presión final de extrusión (antes del cabezal de extrusión) oscilan entre 100 y 300 bares; valores por debajo de 50 bares y por encima de 600 bares no son típicos en las líneas de extrusión de operación continua.

4.1.4. Cilindro extrusor

El husillo y el cilindro, interactúan para transportar, fundir y generar presión dentro del material plástico. Esto es esencial y está hecho de una forma controlada para tener un material uniformemente plastificado, con composición constante, y a tasa controlable y constante. Para conseguir esto, el cilindro debe ser hecho exactamente, el total del error de alineamiento, después de ser maquinado, debe ser de menos de la mitad del espacio libre entre el husillo y el barril [25]

4.1.5. Dispositivos de calefacción

Para un fácil control, el cilindro de extrusión, es dividido en zonas o regiones. Cada zona se adapta con su propio sistema de calentamiento o, con su propio sistema de calentamiento/enfriamiento (Dynisco); las temperaturas se deben ajustar a la variedad de funciones y requerimientos para facilitar la operación de la extrusora (Coextrusión). La máquina más pequeña tendrá tres zonas y la más grande tendrá doce. Cada una de estas zonas es controlada por un sensor de temperatura y un equipo asociado. Por ejemplo, un

microprocesador o un controlador PID. Se debe notar que es la temperatura de fusión la que es importante y que la temperatura del cilindro de extrusión se considera solo como líneas guía. Si no se tiene experiencia de procesamiento de un material de grado particular, entonces se inicia con los ajustes recomendados más bajos. Para una determinada máquina, los ajustes reales del cilindro para alcanzar la temperatura de fusión, dependerán de, por ejemplo, la velocidad rotacional del husillo y la presión de vuelta. [25]

Las longitudes de las zonas de calefacción y/o enfriamiento oscilan entre 4D y 6D, de tal forma que dependiendo de la longitud total del cilindro se consideran de 3 a 7 zonas. La calefacción más utilizada es por resistencias eléctricas, otras variantes como la inducción o utilización de fluido térmico son escasas. En algunas aplicaciones para materiales muy sensibles a la temperatura, se prevé el enfriamiento del husillo a través de una perforación a lo largo de este.

4.2. LÍNEAS DE EXTRUSIÓN

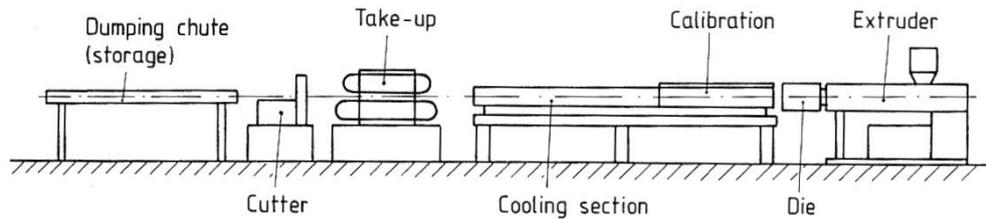
Las tablas de madera plástica en la empresa Plasmaco se producen por medio de un proceso discontinuo, que genera una gran cantidad de desperdicio, por lo que se pretende implementar una línea de extrusión completa que ayude a hacer más eficiente esta labor.

Los componentes básicos de una línea de extrusión convencional son los siguientes:

- Soporte estructural de la máquina
- Sistema de accionamiento (motor, reductor, rodamientos, etc.)
- Unidad de plastificación (Husillo, Cilindro, Sistemas de atemperado)
- Panel (Control, sistemas de regulación, suministro de energía)
- Cabezal de extrusión según el semielaborado
- Unidad de postextrusión:

En una línea de extrusión la unidad de postextrusión varía según el tipo de producto que se va a manufacturar, tren de tubería, perfilería, película plana, película soplada, lámina, etc. Por lo tanto, para una buena calidad del producto final y una adecuada eficiencia de producción, se debe seleccionar un layout óptimo para las líneas de extrusión, que incluirá una gran variedad de equipos, entre los cuales podemos mencionar los siguientes: cabezal, unidad de calibración, unidad de enfriamiento, unidad de halado y de corte, unidades de descarga y unidades de control (Ver Ilustración 15. Diagrama de una línea de Extrusión de perfiles) [9]

Ilustración 15. Diagrama de una línea de Extrusión de perfiles

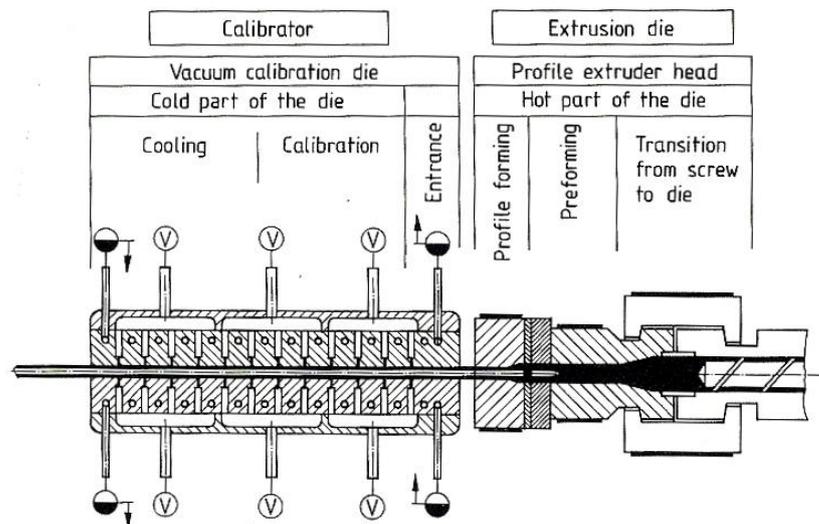


Fuente. MICHAELI, 1992 p.13

4.3. CABEZAL DE EXTRUSIÓN

En una línea de extrusión de termoplásticos dos unidades ocupan una posición central. El dado de extrusión, que es el que da la forma deseada de producto extruído a la masa fundida, y el dado de calibración, cuya función es guiar el perfil semi-terminado, mantener las dimensiones deseadas y dar el grado de enfriamiento requerido. Estos dos componentes se pueden diferenciar por su temperatura: se considera como la parte caliente los insertos y el dado, y por otro lado la parte fría se considera la parte de calibración (Ver Ilustración 16. Secciones funcionales de un dado de extrusión y de calibración).

Ilustración 16. Secciones funcionales de un dado de extrusión y de calibración



Fuente. MICHAELI, 1992 p.13.

El dado de extrusión no debe ser usado para cambiar la temperatura del fundido y es ideal que sus paredes presenten la misma temperatura que la masa fundida, para esto se utilizan elementos de calentamiento eléctrico acompañados con termocuplas y sensores. Generalmente el cabezal es dividido en más de una zona con el fin de permitir un mejor control de temperatura especialmente durante el paso de calentamiento a enfriamiento.

Las funciones que mínimas de un cabezal son [15]:

- Minimizar los tiempos de residencia del polímero en el cabezal, lo cual resulta muy importante sobre todo cuando se pretende extruir un material susceptible a la degradación térmica.
- Minimizar el incremento de la temperatura por el flujo del polímero a través del cabezal. El flujo del polímero ocasiona disipación térmica y ésta a su vez, genera un incremento de la temperatura de la masa fundida. En la medida en que el polímero es sometido a mayores esfuerzos de cizalladura, la disipación térmica se incrementa y los problemas de degradación pueden ser más comunes y el alabeo del producto por diferencias locales de temperatura se puede observar.
- Mantener el polímero fluyendo dentro de los rangos establecidos para evitar las anomalías de flujo. En general, cuando se sobrepasan ciertos límites de esfuerzo de cizalladura o velocidad de cizalladura, se generan problemas en la calidad del extruido ocasionados principalmente por efectos de Slip-Stick o pegue y despegue del polímero a la superficie metálica del cabezal. Este problema se evidencia en defectos en la apariencia superficial del producto.
- Consumir una presión que este dentro de los límites de construcción de presión del husillo, para asegurar el flujo de material a unas velocidades de producción adecuada para el mercado y el producto. Si el diseño del cabezal no considera su contraparte (el husillo), podría generar producciones que no resulten rentables o peor aún, podría no obtener ningún flujo con la capacidad instalada de generación de presión.
- Mantener la estabilidad dimensional del extruido controlando el Die-Swell o hinchamiento de la pieza, producto del efecto de relajación del polímero. Para tal fin deben considerarse zonas de preforma y relajación al interior del cabezal, al igual que longitudes de las diferentes zonas adecuadas y transiciones suaves que reduzcan los efectos propios del flujo del material.

La base de diseño de un cabezal de extrusión es asegurar que la velocidad lineal de desplazamiento del polímero a la salida de este, es igual en cualquier punto de su sección transversal. Esto con el fin de lograr un extruido uniforme desde el punto de vista dimensional y una distribución equitativa de las tensiones al interior del polímero.

Cuando el fundido deja el cilindro de extrusión, este tiene una forma redonda y debe ser cambiado a la forma del extruido deseado por medio del adaptador del cabezal, que lo hace por aerodinamización o por cambios graduales en la dirección de flujo: entre más alta sea la viscosidad del fundido, más gradual debe ser el cambio de sección transversal, por lo tanto el ángulo de entrada debe ser menor, para obtener un flujo suave y constante. [19]

La unidad de calibración se encarga de estabilizar la forma y las dimensiones del perfil. La operación consiste en ir secuencialmente obligando al perfil a

adoptar la forma con una serie de unidades de calibración, teniendo en cuenta el encogimiento experimentado por los perfiles.

Se debe diseñar la unidad de calibración y enfriamiento sobre bases muy sólidas. Por ejemplo, las unidades auxiliares como las bombas de vacío, las bombas de circulación y enfriamiento, deben estar libres de vibraciones. De otro lado, la versatilidad de tales unidades debe ser tal que se pueda ajustar a la multiplicidad de geometrías y tamaños de los perfiles. Adicionalmente se debe proveer de canales de enfriamiento, baños de agua y aspersores para el enfriamiento. [9]

4.3.1. Defectos por diseño del cabezal

A causa de algunas variables que afectan el tamaño y la forma de plástico extruído, es difícil predecir como exactamente la forma y el tamaño cambiaran cuando salgan del cabezal. Como resultado, es también difícil de predecir como el canal de flujo del cabezal debe ser formado para mantener la forma deseada en el producto extruído. Esta es una importante razón de por qué el diseño de cabezales es algunas veces basado más en la experiencia que en los cálculos de ingeniería. Con la llegada de técnicas numéricas más exactas y software comerciales de análisis de flujo del cabezal, esta situación cambia. Sin embargo, el diseño de cabezales es todavía un proceso de ensayo y error. [22]

4.3.1.1. Hinchamiento

Las moléculas de los polímeros termoplásticos consisten en largas cadenas las cuales están enrolladas, o aleatoriamente configuradas cuantas veces sea posible. Cuando el material fundido fluye, a través de un dado, las largas cadenas llegan a ser parcialmente alargadas u orientadas en dirección del flujo, esto es, no están más aleatoriamente orientadas. Cuando la resina emerge del cabezal, las moléculas tratan de enrollarse otra vez; esto causa que el extruído se contraiga en dirección de la extrusión (o máquina) y se expanda en la sección transversal. Este fenómeno es conocido como expansión del cabezal y significa que a menos que el extruído sea halado lo más rápido posible, esta expansión será excesiva, entonces ocurrirá fractura de fundido: la superficie del extruído será rugosa y el producto será inutilizable. [25]

Bajo circunstancias normales el hinchamiento del cabezal puede reducirse de la siguiente forma [19]:

- a) Disminuyendo la velocidad de extrusión.
- b) Aumentando la temperatura del plástico fundido.
- c) Aumentando la longitud paralela del dado.
- d) Aumentando la velocidad de jalado del extruído.

4.3.1.2. Causas de la expansión del cabezal

El plástico fundido conocido como material viscoelástico, en presencia de presión, la cual debe ser aplicada para hacer que fluya, se almacena como fundido fluyente dentro del cabezal, el cual acumula energía que es liberada como expansión del cabezal. Esta expansión también es causada por la alta fricción entre las paredes del cabezal y el fundido. Si la fricción es alta, entonces el fundido en contra de las paredes, fluye más lentamente que el que está lejos de ellas. Esto puede resultar en un cambio de forma del extruído. [25]

Para un material dado, la expansión del cabezal es reducida por el incremento de la tasa de extrusión, incrementando la temperatura del fundido, incrementando la longitud de los cabezales paralelos o tierras, aerodinamizando o reduciendo el ángulo de entrada al cabezal e incrementando la rata de halado. Normalmente la adición de lubricantes reduce la expansión.

4.3.1.3. Cambio de forma

El tamaño y la forma de la región de franja no son exactamente el mismo como es el producto extruído. Hay muchas razones para esto: halado, enfriado, hinchamiento, y relajación. Además la velocidad de flujo es máxima en el centro del tubo, y es prácticamente igual a cero, en los puntos adyacentes a las paredes de dicho tubo (La velocidad de flujo en un determinado punto será mayor entre mayor sea la distancia entre ese punto y las paredes del tubo). [19] Por lo tanto en muchos casos construcción del cabezal debe ser cambiada, por ejemplo para un cuadrado la sección transversal del centro del cabezal debe ser reducida.

4.3.1.4. Degradación

La degradación en el cabezal debe ser evitada. Esto implica un flujo suave sin cambio de tamaño en el paso. Los pasos en el canal de flujo proveen lugares donde el fundido puede mantenerse por largos periodos. Este se degrada y aparecen puntos negros (degradado del polímero), que son llevados dentro del fundido y al extruído final.

Cualquier abertura del cabezal también proveerá un destino para que el aire entre y degrade el fundido rápidamente el tiempo del fundido en el cabezal también determina que tanta degradación puede ocurrir. El tiempo promedio en el cabezal es la relación del peso del polímero fundido mantenido en el cabezal a la velocidad de cizalladura.

4.3.1.5. Acabado Superficial

El acabado superficial del extruído es afectado por el diseño del cabezal. Para un mejor acabado superficial la longitud de la región debe ser razonablemente larga y el ángulo principal de la región debe ser bajo, sin embargo que éste es muy bajo, la longitud del cabezal es incrementada lo cual no es una ventaja.

4.3.1.6. Contrapresión

La contrapresión de la resistencia del cabezal al flujo es una importante consideración. Si la presión necesaria para forzar al material a través del cabezal a una tasa de salida correcta es muy alta, entonces este tendera a estirar y a distorsionar los pernos del cabezal, causando fugas en las juntas, incrementando los requerimientos de potencia de la extrusora posiblemente causando atascamiento, incrementando el trabajo y la cantidad de calor cizallante generado en la resina e incrementando el desgaste del husillo y la extrusora. De otro lado una muy baja presión puede dar una pobre distribución del espesor, efectos de soldadura en el extruído y una pobre mezcla del material en el husillo. Los cálculos de posibles caídas de presión en un cabezal es una etapa muy útil en el diseño y evaluación de procedimientos.

4.4 PRODUCCIÓN DE BARRAS SÓLIDAS

Sería muy difícil imaginar el mundo moderno sin la presencia de los perfiles plásticos, ya que estos se han arraigado en ciertos sectores como la construcción, reemplazando algunos de los materiales tradicionales. Es destacable la gran diversidad de formas y diseños para atender las múltiples exigencias de confort y funcionalidad de la arquitectura moderna. Aunque la industria de la construcción ocupa el primer lugar en la utilización de perfiles, algunos otros sectores están empezando a representar usos significativos de perfiles, como por ejemplo la industria de muebles, la industria automotriz, la electrónica, la industria de las comunicaciones y los empaques especiales. [9]

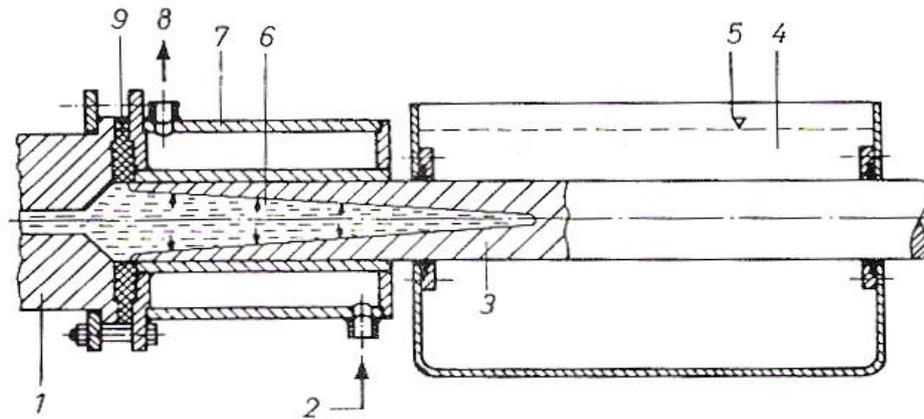
La forma del perfil en buena medida determina el cabezal y las unidades de calibración, en tanto que el tipo de material o compuesto determinarán el tipo de extrusora a utilizar. [9]

Para producir barras sólidas, como es el caso de las tablas de madera plástica, se requiere de un diseño particular de herramienta de formado, que consiste en un dado de calibración, el cual está unido directamente al cabezal de formado y es enfriado de manera intensiva. Para lograr esto es importante una unión sólida y una buena separación térmica entre las dos partes. Además es necesario conducir el flujo de masa fundida a través de un orificio con un diámetro relativamente pequeño (8 a 10mm) y después aumentar la sección con un ángulo de 45° hasta llegar al perfil deseado. Esto se hace con el fin de aumentar la presión.

Las superficies en contacto con el “molde” son las primeras en solidificarse y aumentan su espesor en la dirección de extrusión, mientras que el interior es un núcleo fundido formado en forma de cono, que puede llegar lejos en la zona de calibración. Como se puede ver en la Ilustración 17. **Esquema de zonas de formado para la extrusión de barras solidas**, donde se enumeran los componentes de un cabezal para barras solidas de la siguiente manera: 1 Aislante térmico, 2 Salida de agua de enfriamiento, 3 Dado de calibración, 4

masa fundida, 6 Bañera de agua, 7 Capa solidificada, 8 Entrada de agua, 9 Dado de extrusión.

Ilustración 17. Esquema de zonas de formado para la extrusión de barras solidas



Fuente. MICHAELI, 1992, p. 124

La presión del fundido actúa sobre la superficie inclinada del cono solidificado, incrementando así la fuerza de fricción en el dado calibrador. Por esta razón es importante construir la zona de calibración a la longitud en las paredes solidificadas estén lo suficientemente gruesas, para resistir la presión del núcleo fundido y la tensión ejercida por el jalador.

La contracción volumétrica causada por el enfriamiento puede producir vacíos en la barra extruida, por eso la extrusora debe trabajar a la presión requerida, que es calculada con la restricción que se genera en la zona de calibración. Sin embargo, los límites de presión pueden ser alterados bajo algunas circunstancias, como con la aplicación de recubrimientos superficiales a la zona de calibración, o la implementación de lubricantes entre la superficie del extruido y la de calibración. [12]

5. METODOLOGÍA

Las metodologías de diseño son una herramienta relevante para la formalización de ciertos procedimientos de diseño, además ayudan a evitar aspectos omitidos, a ampliar el enfoque para la búsqueda de soluciones y a disminuir errores de retraso en re-procesos, dando como resultado menores tiempos y costos de desarrollo.

Durante el proyecto se tomará como base el proceso de diseño propuesto por Dym y Little (Ilustración 18. **Modelo Dym y Litte**), que consta de cinco fases: Definición del problema, diseño conceptual, diseño preliminar, diseño de detalle y comunicación del diseño, como se muestra en la Figura 1, en las que se utilizarán a la vez herramientas de otros autores como Nigel Cross [5], Pahl y Beitz [16] y Ulrich y Eppinger [23], que facilitarán el logro de los objetivos en cada etapa.

Ilustración 18. Modelo Dym y Litte



Durante el transcurso del anteproyecto se desarrolló la fase del planteamiento del problema del cliente. La fase de la definición del problema en la que el objetivo principal es establecer la métrica de los objetivos e identificar los límites del proyecto, se trabajó con el formato de especificaciones objetivo, propuesto por Ulrich y Eppinger, sin embargo en la primera fase del proyecto se hará un énfasis en fundamentos teóricos y prácticos que permitirán refinar la especificaciones de diseño del sistema que aportarán las bases para las fases posteriores de diseño conceptual, diseño preliminar y diseño de detalle. A continuación se presenta en detalle la metodología a desarrollar:

Ilustración 19. Fase 1: Definiciones del problema y fundamentos

| NOMBRE DE FASE 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y FUNDAMENTOS |
|--|
| OBJETIVOS |
| <ul style="list-style-type: none">• Recopilar información acerca de los polímeros y su procesamiento, especialmente del proceso de extrusión continua.• Considerar la arquitectura de los cabezales actuales de extrusión.• Reconocer las especificaciones del material, la extrusora, el cabezal, y el molde actual, para definir sus deficiencias y los requerimientos necesarios en la adaptación del nuevo sistema.• Jerarquizar los objetivos que debe cumplir el sistema.• Definir las especificaciones de diseño del sistema• Comprender y enmarcar el planteamiento del problema. |
| HERRAMIENTAS |
| <ul style="list-style-type: none">• Búsqueda de información secundaria en: libros, revistas, patentes, internet, proyectos de grado, y apoyo en las asignaturas de la línea de énfasis en plásticos.• Búsqueda de información primaria: Documentos de la empresa, ensayos y pruebas, entrevista a expertos, <i>Brainstorming</i>, etnografía.• Formato de especificaciones del producto. (Ulrich, Eppinger. 2004. p. 84). |
| RESULTADOS ESPERADOS |
| <ul style="list-style-type: none">• Obtención de fundamentos teóricos que faciliten el desarrollo del proyecto.• Registro del estado del arte de los cabezales de extrusión continua actuales.• Información que permita definir los requerimientos necesarios para la adaptación del nuevo sistema• Especificaciones de diseño y objetivos finales. |

Ilustración 20. Fase 2: Diseño Conceptual

| |
|--|
| NOMBRE DE FASE 2: DISEÑO CONCEPTUAL |
| OBJETIVOS |
| <ul style="list-style-type: none">• Facilitar el proceso de búsqueda de la solución por medio de herramientas de diseño conceptual y sistémico.• Crear una disposición geométrica simple, partiendo de la agrupación de los componentes del diagrama esquemático del sistema.• Definir los componentes físicos del sistema.• Generar alternativas de diseño del sistema con base al análisis conceptual.• Seleccionar la alternativa final, con base en la evaluación de las alternativas generadas anteriormente. |
| HERRAMIENTAS |
| <ul style="list-style-type: none">• Fase de diseño conceptual propuesta en el libro Engineering Design. (Pahl y Beitz. 1977. p. 59). Abarca el establecimiento de la función principal del sistema y la división en sub-funciones para crear la estructura funcional.• Matriz morfológica. (Cross.1999).• Matriz de evaluación (Pahl and Beitz. 1977. p. 123)• Generación de alternativas partiendo de los resultados de las herramientas mencionadas anteriormente. |
| RESULTADOS ESPERADOS |
| <ul style="list-style-type: none">• Definición de lo que debe lograr el sistema, independientemente de cómo lo va a lograr.• Definición y aclaración de las prioridades de acuerdo a su porcentaje de importancia y sus dependencias.• Variedad de alternativas de diseño que den la solución óptima del problema.• Evaluación cuantitativa y cualitativa de las alternativas de diseño fundamentada en los objetivos del proyecto.• Alternativa final de diseño.• Informe preliminar de presupuesto de costos del prototipo. |

Ilustración 21. Fase 3: Diseño preliminar

| |
|--|
| NOMBRE DE FASE 3: DISEÑO PRELIMINAR |
| OBJETIVOS |
| <ul style="list-style-type: none">• Especificar la geometría, los materiales y tolerancias de todas las partes especiales.• Identificar todas las partes estándar que se van a adquirir.• Especificar el ensamblaje de las partes del sistema.• Implementar modelos computacionales que permitan realizar análisis y pruebas al diseño elegido.• Evaluar finalmente el diseño elegido.• Realizar los análisis necesarios, que permitan sustentar la viabilidad técnica del sistema. |
| HERRAMIENTAS |
| <ul style="list-style-type: none">• Software CAD (Solidworks 2010). Permite obtener modelos computacionales necesarios para fases posteriores como la realización de planos y simulaciones.• Análisis de elementos finitos (FEA).• Ensayos de materiales.• Cálculos teóricos.• Consulta a expertos |
| RESULTADOS ESPERADOS |
| <ul style="list-style-type: none">• Diseño analizado, evaluado y probado.• Informe de cambios realizados al diseño elegido.• Informe de costos presupuestados del prototipo. |

Ilustración 22. Fase 4: Diseño de detalle

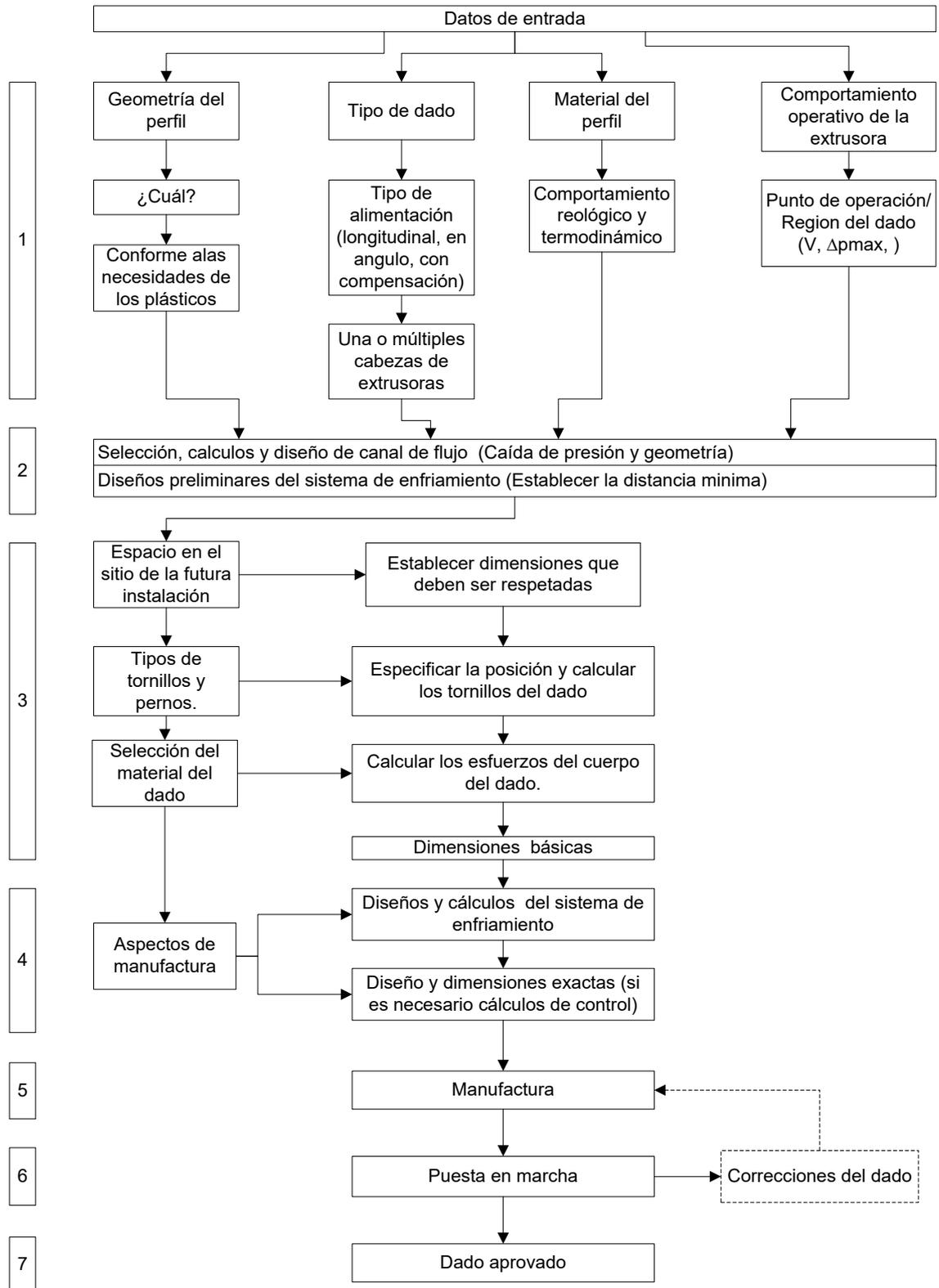
| |
|--|
| NOMBRE DE FASE 4: DISEÑO DE DETALLE |
| OBJETIVOS |
| <ul style="list-style-type: none">• Refinar y optimizar el diseño elegido.• Finalizar los detalles de diseño. |
| HERRAMIENTAS |
| <ul style="list-style-type: none">• Software CAD (Solid Works 2009) para la modelación de los cambios en el diseño. |
| RESULTADOS ESPERADOS |
| <ul style="list-style-type: none">• Informe de ingeniería que muestre la viabilidad técnica del sistema. |

Ilustración 23. Fase 5: Comunicación del diseño

| |
|---|
| NOMBRE DE FASE 5: COMUNICACIÓN DEL DISEÑO |
| OBJETIVOS |
| <ul style="list-style-type: none">• El objetivo general de esta fase es la documentar el diseño final.• Dibujar los planos de producción y elaborar la lista de partes.• Realizar imágenes 3D de la disposición final del diseño.• Realizar el informe de producción con los procesos de manufactura, el ensamble y la instalación del sistema.• Realizar el informe escrito y oral del proyecto. |
| HERRAMIENTAS |
| <ul style="list-style-type: none">• Análisis del producto (Pahl y Beitz. 1977. p.364)• Software CAD (Solid Works 2009) para la realización de planos. |
| RESULTADOS ESPERADOS |
| <ul style="list-style-type: none">• Informe oral y escrito.• Planos de producción. |

Adicionalmente se tomará como referencia el diagrama de flujo para el diseño y desarrollo de cabezales de extrusión propuesto por Michaeli (**Ilustración 24**), al que se le aplicaran las herramientas mencionadas anteriormente para ayudar con la toma de decisiones. En general esta metodología se utilizará como una lista de chequeo que se debe cumplir para el diseño de todo el sistema de moldeo.

Ilustración 24. Diagrama de flujo del desarrollo de un dado de extrusión



Fuente. MICHAELI, 1992, p. 16.

6. DESARROLLO DEL PROYECTO

6.1. FASE 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y FUNDAMENTOS

6.1.1. Proceso productivo de tablas de madera plástica en la empresa Plasmaco

El proceso productivo de las tablas de madera plástica en Plasmaco, empieza entonces con el vaciado de los bultos de plástico triturado, que le distribuyen sus proveedores, en la tolva de la extrusora hasta llenarla, de donde es transportado a lo largo de las distintas zonas de la máquina, hasta que finalmente se funde gracias a la fricción que genera el husillo al ir girando y al aumento de temperatura al que se somete. Esta mezcla fundida es obligada a pasar a través de un cabezal que se encuentra acoplado a un molde, que es elaborado en acero a partir de tubería estándar y/o platina de $\frac{1}{4}$ ", y que varía según las dimensiones y forma final que se le desee dar al producto como muestra la Ilustración 25 .

Ilustración 25. Llenado del molde para tablas de 12 x 3 cm.



(Elaboración propia)

Una vez el operario percibe que el molde se encuentra lleno, procede a retirarlo manualmente y a sumergirlo en una tina de agua que se encuentra entre 34°C y 37°C. La manera como el trabajador observa que éste se encuentra lleno es por medio de la introducción de una estaca por el extremo que no va unido a la extrusora; cuando la estaca empieza a ser desplazada por el material que se encuentra dentro del molde, el operario se prepara para retirarlo. Es en este punto donde se produce más del 90% del total de desperdicio de todo el proceso, debido a que mientras el operario retira el molde, lo sumerge en la tina y toma y coloca el siguiente molde para su llenado, el cabezal de la extrusora sigue expulsando material, pero como no hay molde que lo reciba, lo único que puede hacer el trabajador es retirar el material expulsado con las manos y arrojarlo al suelo para después de ello sí proceder a ubicar el nuevo molde. Cabe destacar que esta operación de retiro del material expulsado la

efectúa el operario sin guantes ni ningún tipo de protección para ello, cosa que puede producirle algún tipo de quemaduras o lesiones debido a que el material se encuentra a una temperatura aproximada de 180° C. Adicionalmente se debe mencionar que la persona que retira el molde, lo hace sin ningún tipo de protección, y lo hace sujetándolo de unas manijas que presenta en su parte superior, pero que están elaboradas en el mismo acero del que se encuentra hecho, lo cual no genera ningún aislamiento del calor, y como si fuera poco el operario mientras sumerge el molde en la tina también sumerge sus manos, estando expuesto a un gran choque térmico que puede resultar perjudicial para su salud.

El proceso continúa entonces con la extracción del molde de la tina de enfriamiento para proceder a retirarle de su interior la tabla moldeada, la cual es separada de éste, por medio de sucesivos golpes haciendo uso de un martillo y un cincel, y una vez fuera, es colocada en un arrume que se va haciendo cerca de la tina y la máquina extrusora, donde termina su etapa de solidificación. Esta acción de retiro de la tabla, se hace mientras se va llenando uno de los moldes que están acoplados a la máquina. Es importante hacer mención a que no se tienen unos tiempos fijos establecidos de cuándo retirar el molde de la tina para extraerle la tabla, sino que simplemente cuando se está llenando el tercer o cuarto molde después de sumergido el primero, se procede a realizar las operaciones mencionadas sobre éste.

Finalmente la última operación que se realiza después de terminada la producción de tablas, es el corte de ellas para darles el acabado final, debido a que sus extremos presentan irregularidades que se pulen con esta acción. Es aquí donde se genera el desperdicio restante del total que arroja el proceso.

Esta operación se muestra en la Ilustración 26.

Ilustración 26. Operación de corte de tablas



(Elaboración propia)

Según estudios realizados en la empresa Plasmaco, se encontró que el producto que presenta una mayor demanda, es la tabla que se emplea en la fabricación de estibas y tarimas. Esta tabla presenta unas medidas estándar de 100cm de largo por 11cm de ancho, y su espesor puede variar entre 2 y 3 cm.

Por lo tanto el diseño del sistema del cual es motivo este proyecto, se hará con base en la tabla de este tipo de mayor espesor, gracias a que con ello, se garantizará para las que son más delgadas, un moldeo exitoso.

Se realizó entonces un seguimiento a la tabla tipo estiba, 100cm de largo por 12cm de ancho y 3 cm de espesor, a lo largo de todo su proceso de producción, con el fin de centrarse en las herramientas y métodos que se emplean en él, con el propósito de identificar sus principales falencias u oportunidades de mejora. La información obtenida se presenta en la tabla a continuación:

Tabla 2. Desperdicios del proceso de producción de tablas de madera plástica

| TABLA TIPO ESTIBA | |
|---------------------------------------|--------------|
| Medidas (cm) | 100 x 12 x 3 |
| Peso total/tabla (Kg) | 2,4 |
| Desperdicio/tabla proceso moldeo (Kg) | 1,1 |
| Desperdicio/tabla proceso moldeo (%) | 47,4% |
| Desperdicio/tabla proceso corte (Kg) | 0,09 |
| Desperdicio/tabla proceso corte (%) | 3,8% |
| Total desperdicio/tabla (Kg) | 1,2 |
| Total desperdicio/tabla (%) | 51,2% |

(Detalle Anexo A)

Esta referencia de tabla presenta un peso final total de 2,4 Kg. El total de desperdicio que se obtuvo a lo largo del proceso de intrusión del material en el molde y el desmolde fue de 1,1 Kg, dando como resultado aproximadamente un 47,4% de desperdicio con respecto al peso total del producto. Durante los post-procesos de corte y pulido, se obtuvieron 90 g de desperdicio adicionales, equivalentes a un 3,8%.

Estos desperdicios que se generan durante el proceso de fabricación de las tablas pueden ser reutilizados después de ser sometidos a un proceso de remolido, que consiste en que una vez el desperdicio sea ha enfriado y solidificado completamente se hace pasar por un molino que lo tritura y lo deja con un tamaño apto para volver a procesarlo e introducirlo nuevamente en la tolva de la extrusora. Pero de todas maneras es muy importante mencionar que este reproceso que se debe hacer con los desperdicios generados, involucra recursos tales como mano de obra, máquinas y tiempo lo cual genera un costo adicional a la fabricación de las tablas y que debe asumir la empresa Plasmaco, y además es otro tratamiento térmico que va en detrimento de las propiedades mecánicas. A continuación se presenta el resultado del seguimiento hecho al tiempo de reprocesamiento en el molino mencionado anteriormente:

Tabla 3. Tiempo reproceso molino

| TIEMPO REPROCESO MOLINO | |
|-------------------------------------|-------|
| Cantidad molida/min (Kg) | 1,42 |
| Tiempo molido desperdicio/tabla (s) | 51,81 |

(Detalle Anexo A)

Como se puede observar en la Tabla 3 el molino presenta una capacidad de moler desperdicios de 1,42 Kg por minuto, con lo cual se puede deducir que sabiendo que el desperdicio total por cada tabla es de 1,2 Kg, se requieren 52 s adicionales de reprocesamiento por la fabricación de cada una de ellas, eso sin mencionar todos los tiempos asociados a la recolección de los desperdicios y el transporte de ellos hasta la zona donde se encuentra ubicado el molino y la persona necesaria para efectuar dicha operación.

En el estudio realizado, también se efectuó la medición de tiempos del proceso. A continuación se muestra la tabla resumen de los datos obtenidos:

Tabla 4. Tiempos de proceso de fabricación de las tablas

| TIEMPOS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE TABLAS DE 100cm x 12cm x 3cm | |
|---|---------------|
| OPERACIÓN | TIEMPO |
| Llenado del molde | 194 |
| Retiro y montaje del molde | 14 |
| Enfriado del molde al aire libre | 54 |
| Enfriado del molde en la tina | 278 |
| Desmoldado de la tabla | 20 |
| Corte de la tabla | 26 |
| Tiempo total (s) | 586 |
| Tiempo total (min) | 9,8 |

(Detalle Anexo A)

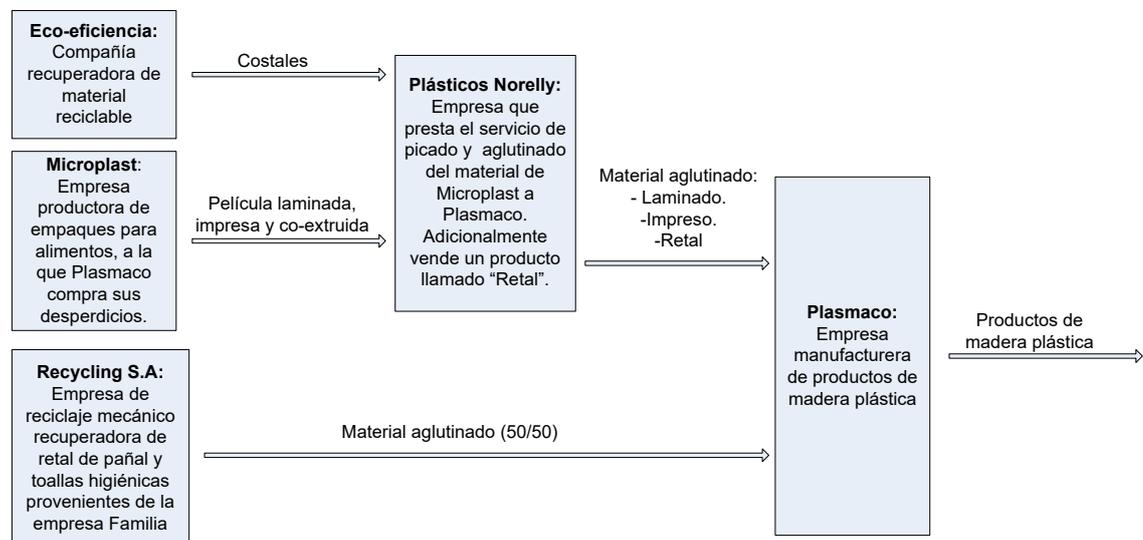
Con respecto a los tiempos de producción actuales, es posible mencionar que pueden ser considerados como altos dado que se identificaron desperdicios de ellos, asociados a la falta de control en el proceso y a la gran manipulación de los operarios con los moldes, tanto en el montaje, como en el desmolde de las piezas. Es necesario hacer mención a que este tiempo de 9,8 min, mostrado anteriormente, es el tiempo que se demoran las operaciones para elaborar una sola tabla, pero que dadas las condiciones del proceso, donde se pueden realizar operaciones paralelas debido a que mientras un molde se está llenando, otro se puede estar enfriando y el otro se puede estar desmoldando, se tiene un tiempo de ciclo para el proceso del moldeado de la tabla de 209 s lo que equivale a 3,5 min, lo cual quiere decir que una vez se ha moldeado la primera tabla, aproximadamente cada que se cumpla este tiempo se habrá producido una nueva.

6.1.2. Materias primas utilizadas por Plasmaco

Plasmaco trabaja con residuos post-industriales provenientes de Microplast y Familia. La primera se dedica a la producción de empaques para alimentos, por lo tanto utiliza diferentes películas laminadas y coextruidas que le ayudan a cumplir con las especificaciones de conservación y protección de los productos a empacar. La segunda produce pañales y toallas higiénicas, para esto utilizan algodón y fibras no tejidas de polipropileno y polietileno de baja densidad (Ver Ilustración 27. Proceso de consecución de materia prima en la empresa Plasmaco).

Estas industrias se caracterizan por tener gran cantidad de desperdicios en el proceso, debido a la gran cantidad de referencias de empaques, dificultando así la estandarización de los rollos de plástico utilizados por las empresas, por lo tanto se generan muchos sobrantes o refiles por cada lote de producción que se realiza. Esta cantidad de desechos industriales le permite a Plasmaco comprar un promedio de 10 toneladas semanales de residuos a Microplast y Recycling, 20 toneladas semanales de la referencia 50/50 (50% de PP y 50% de PEBD) a Recycling, que es la empresa encargada de separar, lavar y aglutinar los desperdicios de Familia.

Ilustración 27. Proceso de consecución de materia prima en la empresa Plasmaco



Fuente: (Elaboración propia)

Además de estos proveedores Plasmaco cuenta con Plásticos Norelly, quien le presta el servicio de selección, picado y aglutinado del material de Microplast. Adicionalmente le vende un material que es cien por ciento polipropileno aglutinado llamado "retal", proveniente de los costales dañados de otras empresas, y que es recuperado por la compañía Eco-eficiencia.

A continuación se presenta la composición de las materias primas que Plasmaco compra a la empresa Microplast. Las tres primeras referencias

componen el llamado “Laminado”, ya que son mezclas de varios materiales, sin embargo es muy difícil saber qué porcentaje de cada resina compone la mezcla final, debido a que no se tiene una separación de estos residuos cuando se recogen y empaican en Microplast. Por otra parte se encuentra la referencia “Monocapa”, que tiene el nombre de “Impreso” para Plasmaco (Ver Tabla 5.)

Tabla 5. Composición de las materias primas provenientes de Microplast.

| Referencia Microplast | Proveedor | Componentes | Espesor (µm) | Densidad superficial (g/m ²) | Densidad (g/cm ³) |
|-----------------------|------------|-----------------|--------------|--|-------------------------------|
| Tricapa sin PET | Microplast | BOPP | 20,0 | 18,0 | 0,900 |
| | | Tinta | 1,5 | 3,0 | 2,000 |
| | | Adhesivo 2 | 1,0 | 2,0 | 2,000 |
| | | Aluminio | 9,0 | 24,3 | 2,700 |
| | | Adhesivo 2 | 1,0 | 2,0 | 2,000 |
| | | PEBD (CPM02) | 63,5 | 58,4 | 0,920 |
| Bicapa | Microplast | BOPP | 15,0 | 13,5 | 0,900 |
| | | Tinta | 1,0 | 2,0 | 2,000 |
| | | Adhesivo 2 | 1,0 | 2,0 | 2,000 |
| | | BOPP metalizado | 17,2 | 15,5 | 0,901 |
| Tricapa con PET | Microplast | PET | 12,0 | 16,2 | 1,350 |
| | | Adhesivo 2 | 1,8 | 3,5 | 1,944 |
| | | Aluminio | 7,0 | 18,9 | 2,700 |
| | | Adhesivo 2 | 1,8 | 3,5 | 1,944 |
| | | PEBD (CPM07) | 100,0 | 92,0 | 0,920 |
| Monocapa | Microplast | BOPP | 27,0 | 24,3 | 0,900 |
| | | Tinta | 1,0 | 2,0 | 2,000 |

Fuente. Elaboración propia.

Los bultos llegan a Plasmaco y son separados en barriles de 35 galones, con el nombre de: Laminado, Impreso, Retal, 50/50, como se ha mencionado anteriormente. Adicionalmente se tiene un barril con material remolido, proveniente de los desperdicios generados por el corte y el proceso como tal. Después el operario procede a realizar la mezcla final, juntando los materiales en proporciones medidas por cocas de 11391 cm³. En la Tabla 6 se observan las proporciones de materiales utilizados, donde se presentan tres mezclas con diferentes proporciones utilizadas para la elaboración de tablas según los requerimientos del cliente, producción o flujo de materia prima.

Tabla 6. Proporción de materias utilizadas en la mezcla

| | Mezcla A (cocas) | Mezcla B(cocas) | Mezcla C (cocas) |
|-------------------|------------------|-----------------|------------------|
| Impreso | 2 | 2 | 0 |
| Laminado | 1 | 2 | 2 |
| 50/50 (PP y PEBD) | 1 | 1 | 1 |
| Remolido | 2 | 2 | 2 |
| Retal | 1 | 0 | 0 |
| Total | 7 | 7 | 5 |

El cabezal se diseñara con las propiedades de la “Mezcla A”, la cual fue elegida con la ayuda del jefe de producción y el gerente de Plasmaco, ya que ellos conocen cual es la que más se adecua a las necesidades y requerimientos del cliente y la empresa. Partiendo de esta composición se procedió a relacionar la proporción en cocas, con las proporciones en peso y volumen de cada material, mostradas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Midiendo el peso de la cada referencia de materia prima en una coca con un volumen de 11.391 cm³.

Tabla 7. Relación de la proporción en cocas con el peso y el volumen

| | Cocas | Volumen (cm ³) | Volumen (%) | Peso de una coca (Kg) | Peso (Kg) | Peso (%) | Densidad empaque (g/cm ³) |
|--------------|----------|----------------------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|---------------------------------------|
| Impreso | 2 | 22.783 | 29% | 3,62 | 7,2 | 28% | 0,32 |
| Laminado | 1 | 11.391 | 14% | 2,7 | 2,7 | 10% | 0,24 |
| 50/50 | 1 | 11.391 | 14% | 4,5 | 4,5 | 18% | 0,40 |
| Retal | 1 | 11.391 | 14% | 4,7 | 4,7 | 18% | 0,29 |
| Remolido | 2 | 22.783 | 29% | 3,3 | 6,6 | 26% | 0,41 |
| Total | 7 | 79.740 | 100% | - | 25,7 | 100% | 0,32 |

Posteriormente se calculo la participación de cada material que compone cada referencia de materia prima de la mezcla. Para esto se tomo como hipótesis que el laminado está compuesto por la misma cantidad de cada una de las resinas (20% de cada una de las resinas), debido a que no se puede controlar la cantidad de desperdicio de las diferentes referencias que Plasmaco compra a Microplast. La composición de los otros materiales se tomo en base a las proporciones que garantizan los proveedores. Adicionalmente se tiene en cuenta el remolido que tiene una participación del 25,7%, y está compuesto por todas las resinas de la mezcla final para la producción de tablas, ya que éste es el producto de moler los desperdicios generados en el proceso de extrusión y corte.

Como se puede observar las resinas que más participación tienen en la mezclas son el polipropileno con el 76,9%, y el polietileno de baja densidad con el 14,6% del total de la mezcla. Las otras resinas tienen una participación del 2,8% cada una, partiendo de la suposición de la composición de las referencias de Microplast que se expuso anteriormente (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Tabla 8. Participación por resina

| Material | Peso (%) | Componentes | Composición | Participación (%) |
|-----------------|----------|------------------------------|-------------|-------------------|
| Impreso | 28,1% | Polipropileno | 100,0% | 28,1% |
| Laminado | 10,5% | Polietileno de baja densidad | 20,0% | 2,1% |
| | | Polipropileno | 20,0% | 2,1% |
| | | PET | 20,0% | 2,1% |
| | | Poliamida | 20,0% | 2,1% |
| | | Aluminio | 20,0% | 2,1% |
| 50/50 | 17,6% | Polipropileno | 50,0% | 8,8% |
| | | Polietileno de baja densidad | 50,0% | 8,8% |
| Retal | 18,1% | Polipropileno | 100,0% | 18,1% |
| Remolido | 25,7% | Polipropileno | 77% | 19,7% |
| | | Polietileno de baja densidad | 14,6% | 3,8% |
| | | PET | 2,8% | 0,7% |
| | | Poliamida | 2,8% | 0,7% |
| | | Aluminio | 2,8% | 0,7% |

6.1.2.1. Perfiles de temperatura y temperaturas de transición

Para garantizar el buen comportamiento de la mezcla dentro de los componentes de moldeo (cabezal de extrusión y calibración), se deben conocer y controlar las variables de la maquina extrusora, que es la encargada de plastificar y entregar la masa fundida al sistema. Para eso es importante determinar los perfiles de temperatura del proceso, teniendo en cuenta que la mezcla tiene diferentes materiales, por lo tanto diferentes temperaturas de transición, que se deben trabajar bajo unas condiciones adecuadas que garanticen la plastificación del material, y por otro lado eviten la degradación del mismo.

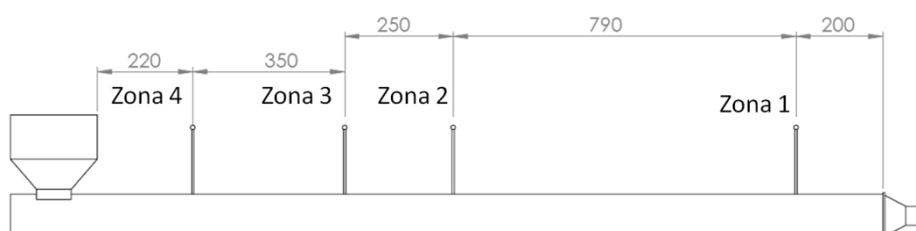
Para esto se tendrá como referencia tres diferentes fuentes: la experiencia que tiene la empresa Plasmaco con el proceso y los materiales, referencias bibliográficas que entregan datos teóricos y experimentales, y por último los ensayos DSC y que ayudan a determinar las temperaturas de transición.

6.1.2.2. Perfiles de temperatura de la empresa Plasmaco

La extrusora en la que se implementará el sistema de moldeo continuo para la producción de tablas de madera plástica, tiene 15 resistencias distribuidas a lo largo del barril, que son controladas por contactores (on/off) que reciben la

señal de 4 termocuplas ubicadas en cuatro puntos como se muestra en la Ilustración 28. **Distribución de las termocuplas en la extrusora asignada para el proyecto por la empresa Plasmaco (situación actual)** donde se muestra la distribución. La zona uno que es la más cerca al cabezal se programa a una temperatura de 270°C, la zona dos a 225°C, la zona tres a 180°C y la cuatro a 115°C.

Ilustración 28. Distribución de las termocuplas en la extrusora asignada para el proyecto por la empresa Plasmaco (situación actual)



Fuente. Elaboración propia.

Este perfil no tiene ningún soporte técnico, se basa en la experiencia y trayectoria de la empresa Plasmaco durante sus 11 años de operación.

6.1.2.3. Perfil de temperatura según referencias bibliográficas

En el estudio de los polímeros es muy común basarse en la experiencia de autores que han realizado ensayos e investigaciones para recomendar parámetros en el procesamiento de plásticos. Para el proyecto se tomó como referencia el libro *Extrusion-The Definitive Processing Guide and Handbook*, el cual dedica el capítulo 22 a dar recomendaciones de proceso para diferentes resinas termoplásticas. Estas fueron documentadas en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Perfil de temperaturas de cada una de las resinas que componen la mezcla, según GILES, WAGNER y MOUNT

| Resina | Perfil de temperaturas de procesamiento Tf (°C) | | | | | |
|-------------|---|---------|---------|---------|---------|--------------------------|
| | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4 | Dado | Temperatura masa fundida |
| PP | 160-182 | 171-193 | 193-216 | 193-216 | 193-199 | 193-216 |
| PEBD | 149-171 | 171-185 | 182-199 | 182-199 | 182-199 | 210-232 |
| PA Nylon 12 | 154-171 | 177-199 | 188-210 | 188-211 | 188-213 | 188-210 |
| PET | 249-271 | 271-288 | 288-300 | 288-300 | 288-300 | 282-300 |
| Aluminio | - | - | - | - | - | - |

Posteriormente, estos rangos de temperatura en cada zona fueron ponderados según el porcentaje de participación de cada resina dentro de la mezcla, con el

fin de obtener un valor del perfil de temperaturas recomendado para el material (Ver Tabla 10

Tabla 10. Perfil de Temperaturas mínimas y máximas para la materia prima de madera plástica

).

Tabla 10. Perfil de Temperaturas mínimas y máximas para la materia prima de madera plástica

| Zonas de temperatura | Ponderado temperatura mínima °C | Ponderado temperatura máxima °C |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Zona 1 | 156,2182 | 177,4568 |
| Zona 2 | 169,167 | 189,2344 |
| Zona 3 | 188,485 | 209,6196 |
| Zona 4 | 188,485 | 209,6478 |
| Cabecal | 188,485 | 196,6312 |
| Masa fundida | 192,415 | 214,5354 |

Adicionalmente se buscaron las temperaturas de transición: transición vítrea (Tg), Temperatura de fusión (Tm) y Temperatura de degradación (Tz) de cada una de las resinas, con el fin de compararlas más adelante con los datos de los ensayos DSC y TGA. Para esto se tomo como referencia el libro *Técnicas experimentales de análisis térmico de polímeros*, y son presentadas en la siguiente tabla.

Tabla 11. Temperatura de transición según BALART, LOPEZ, GARCIA, y PARRÉS

| Resina | Participación en la mezcla (%) | Temperatura de transición vítrea Tg (°C) | | Temperatura de fusión Tm (°C) | | Densidad (Kg/m ³) | | |
|---------------|--------------------------------|--|-----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------|----------------|
| | | Valor | Ponderado | Valor | Ponderado | Rango | Promedio | Ponderado |
| PP | 76,90% | -30 | -23,07 | 165 | 126,885 | 890 - 920 | 905 | 695,945 |
| PEBD | 14,64% | -100 | -14,64 | 120 | 17,568 | 910 - 925 | 917,5 | 134,322 |
| PA Nylon 12 | 2,82% | 40 | 1,128 | 180 | 5,076 | 1000 - 1420 | 1210 | 34,122 |
| PET | 2,82% | 73 | 2,0586 | 265 | 7,473 | 1190 - 1810 | 1500 | 42,3 |
| Aluminio | 2,82% | - | - | 933,15 | - | 2500 - 2950 | 2725 | 76,845 |
| Mezcla | 100,00% | | -34,5234 | | 157,002 | | | 983,534 |

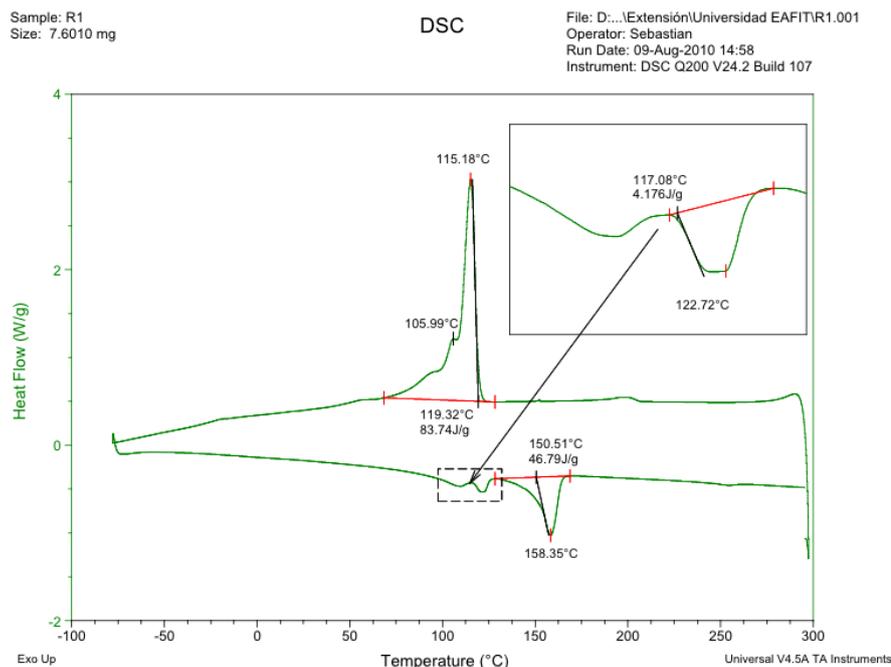
6.1.2.4. Caracterización de materiales según los resultados de los ensayos TGA y DSC

Los ensayos se realizaron en las instalaciones de la universidad de Antioquia, para los materiales tipo remolido y 50/50, ya que estos tienen un tamaño de partícula permitido por los instrumentos del laboratorio y pueden entregar resultados comparables con los teóricos y los prácticos.

6.1.2.4.1. Análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC)

En el caso de los polímeros semicristalinos se presenta un proceso de fusión de cristales en el calentamiento y formación en el enfriamiento. Los cuales se pueden distinguir en las graficas por medio de los picos endotérmicos y exotérmicos, que muestran las temperaturas a la que ocurre este fenómeno en el material.

Ilustración 29. Calorimetría Diferencia de Barrido (DSC) para el remolido



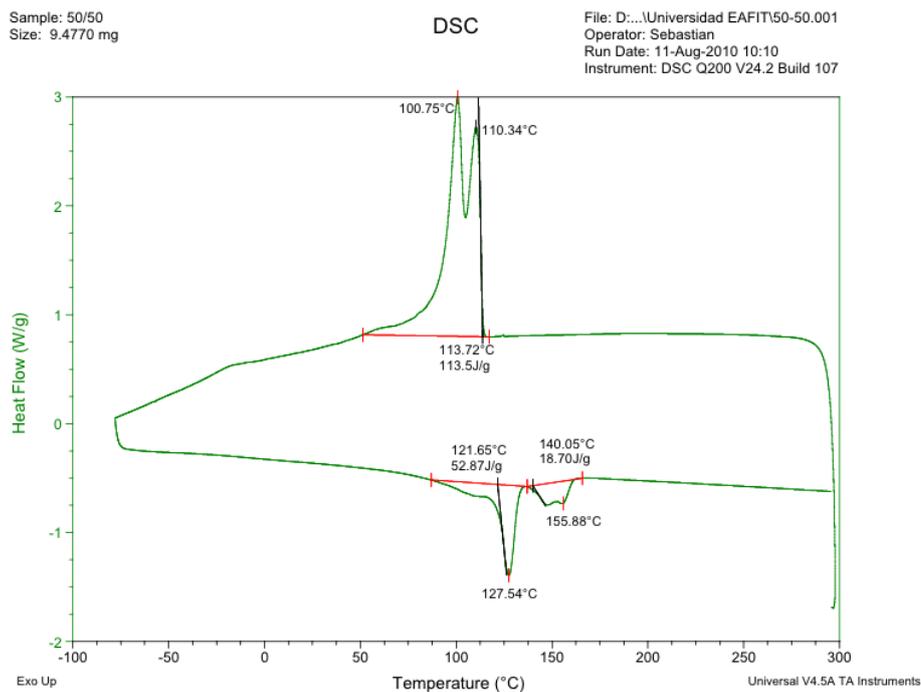
En la Ilustración 29. Calorimetría Diferencia de Barrido (DSC) para el remolido, aparecen dos picos endotérmicos lo cual muestra que el material está formado por una mezcla de dos termoplásticos semicristalinos, uno de los cuales presenta un pico de fusión alrededor de los 158,35°C y el otro en torno a los 122,72°C si comparamos estos valores con los obtenidos teóricamente se puede deducir que el pico de 158,35°C corresponde a un polipropileno (PP) y el pico de 122,72°C corresponde a un polietileno de baja densidad (PEBD), que son los dos materiales de mayor participación en la mezcla. Adicionalmente la grafica también muestra dos picos exotérmicos, que comparados con los datos

teóricos se confirma que corresponde a los dos materiales anteriores, que tienen una temperatura de formación de cristales de 105,99°C y 115,18°C respectivamente.

Hay que recordar que el remolido se contiene los cinco materiales utilizados en Plasmaco para la producción de tablas, sin embargo no se muestran en la gráfica por no ser materiales poliméricos o no tener una participación considerable en la mezcla como es el caso del PET y el PA que tienen solo un 2.8% de participación.

Al igual que el remolido, la Ilustración 30. Calorimetría Diferencia de Barrido (DSC) para el 50/50, muestra dos picos endotérmicos uno a 155,88°C y el otro a los 127,54°C, y dos exotérmicos uno a 110°C y el otro a 100,75°C, temperaturas muy cercanas a los puntos de fusión y cristalización de cristales del PP y el PEBD. Comprobando que la referencia 50/50 de la empresa Recycling si tiene estos materiales.

Ilustración 30. Calorimetría Diferencia de Barrido (DSC) para el 50/50



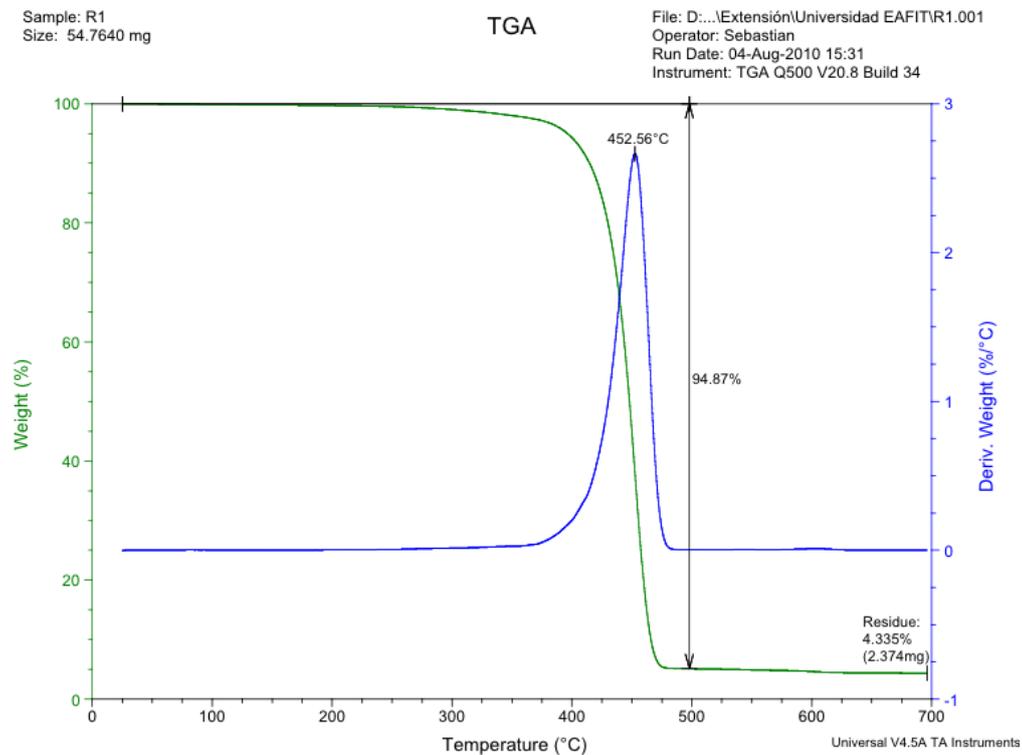
6.1.2.4.2. Análisis Termogravimétrico (TGA)

La curva de color verde muestra como el material va perdiendo masa a medida que la temperatura aumenta ver Ilustración 31. Análisis Termogravimétrico (TGA) para el remolido. La masa empieza a descender a una temperatura de 175°C que es el punto donde hay un pequeño cambio en la pendiente de la

curva, y a los 270°C que es la temperatura más alta a la que se trabaja en Plasmaco el remolido se degradada un 2%.

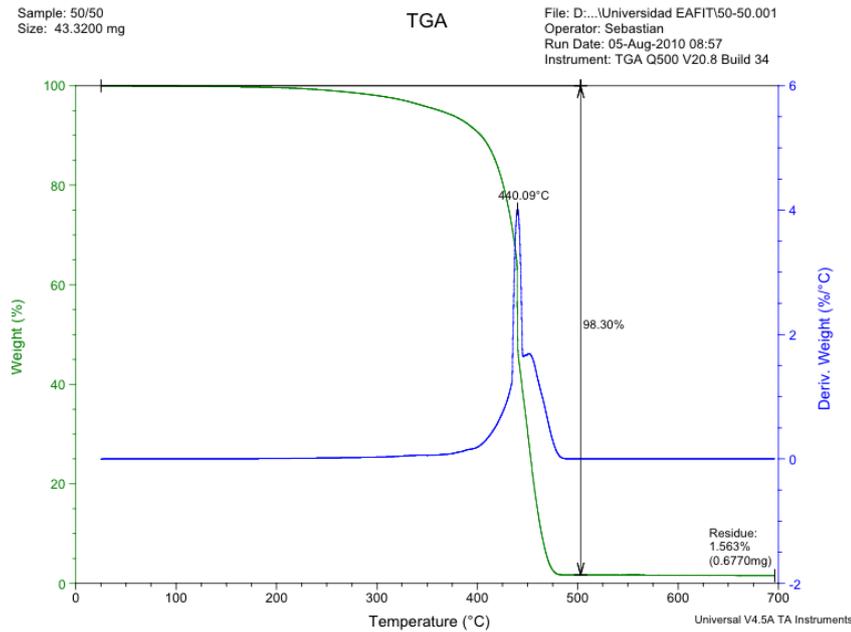
Las cargas de naturaleza inorgánica quedan como residuos después del proceso de degradación del plástico, ya que por lo general resisten temperaturas más altas, y se pueden observar en la curva de color azul proveniente de la derivada de la curva verde, la cual indica que a 452,56°C el material se ha degradado en un 94,87% y el porcentaje restante está compuesto por cargas de naturaleza inorgánica.

Ilustración 31. Análisis Termogravimétrico (TGA) para el remolido



Al igual que el remolido, en la Ilustración 32. **Análisis Termogravimétrico (TGA) para 50/50**, referente al TGA del 50/50, la curva verde indica que a los 170°C el material se empieza a degradar, y a los 270°C ha sufrido una degradación de un 2%. Por otro lado, la curva azul indica que a 440,09°C el material se ha degradado un 98,30% y el porcentaje restante está compuesto por cargas de naturaleza inorgánica.

Ilustración 32. Análisis Termogravimétrico (TGA) para 50/50



6.1.2.5. Propiedades térmicas de las resinas que componen la mezcla

Como se describió anteriormente el principio básico del moldeo de termoplásticos, es el ablandamiento termal del material para poder ser moldeado y posteriormente se enfría nuevamente para que mantenga la forma deseada. En el proceso de extrusión, la extrusora es la encargada de realizar la labor de plastificación, y el cabezal de extrusión y de calibración realiza la labor de formar y enfriar el perfil extruido, por lo tanto debe tener un sistema de refrigeración que funciona siempre bajo el principio de transferencia de calor entre un fluido a baja temperatura y el molde que se encuentra caliente. El sistema debe ser diseñado de tal forma que pueda evacuar rápidamente todo el calor generado en el molde manteniendo una temperatura lo más constante posible en todo el volumen del molde.

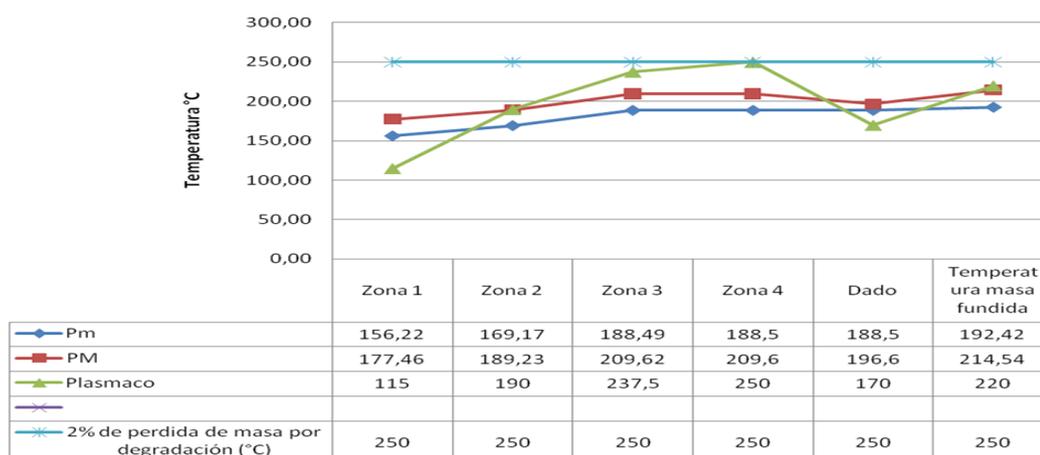
Para garantizar esto se debe tener conocimiento de las propiedades térmicas del material polimérico que se va a procesar, sin embargo por cuestiones de alcance y presupuesto del proyecto no se pueden realizar pruebas y ensayos que determinen las propiedades de la mezcla utilizada por la empresa, entonces se tomaron los datos de las propiedades de cada uno de los componentes según el libro *Physical Properties of Polymers Handbook* y *moldeo por inyección de termoplásticos*, se ponderaron según el porcentaje de participación dentro de la mezcla (Ver Tabla 12. Propiedades térmicas de la mezcla, según el ponderado de las propiedades de cada resina referencias en la bibliografía).

Tabla 12. Propiedades térmicas de la mezcla, según el ponderado de las propiedades de cada resina referencias en la bibliografía

| Resina | Participación en la mezcla (%) | Conductividad térmica λ (W/m.K) (293 °K) | | | Calor específico J / (kg.K) | | | Difusividad térmica (cm ² /s) | | Entalpia H (kJ/mol) | |
|---------------|--------------------------------|--|----------|-------------|-----------------------------|----------|----------------|--|-----------------|---------------------|-----------------|
| | | Rango | Promedio | Ponderado | Rango | Promedio | Ponderado | Valor | Ponderado | Valor | Ponderado |
| PP | 76,90% | 0,12 - 0,2 | 0,16 | 0,12 | 1622-2099 | 1860,5 | 1430,72 | 8,50E-04 | 6,54E-04 | 8,7 | 6,6903 |
| PEBD | 14,64% | 0,33 | 0,33 | 0,05 | 1555-2202 | 1878 | 274,94 | 1,50E-04 | 2,20E-05 | 8,22 | 1,203408 |
| Nylon 12 | 2,82% | 0,19-0,25 | 0,22 | 0,01 | 2470,9 | 2470,9 | 69,68 | 9,80E-04 | 2,76E-05 | 24 | 0,6768 |
| PET | 2,82% | 0,15 | 0,15 | 0,00 | 1555-1820,3 | 1687 | 47,57 | 1,50E-03 | 4,23E-05 | 26,9 | 0,75858 |
| Aluminio | 2,82% | 76 - 235 | 155,5 | 4,39 | 857 - 990 | 923,5 | 26,04 | - | - | - | - |
| Mezcla | 100% | | | 0,18 | | | 1848,96 | | 7,46E-04 | | 9,329088 |

De acuerdo a las diferentes propiedades térmicas, se reconoce los perfiles de temperatura, que utiliza la empresa Plasmaco color verde, el perfil teórico y los perfiles propuestos de acuerdo a análisis térmico ver Ilustración 33. Perfil de temperaturas.

Ilustración 33. Perfil de temperaturas



Partiendo de estos resultados se encontró que el perfil que mejor define el comportamiento de la mezcla a través del proceso de extrusión, corresponde al Perfil ponderado máximo, exceptuando el último tramo del proceso de extrusión, en el cual se tomo la temperatura de material fundido, como el valor correspondiente al perfil ponderado mínimo, con el fin de reducir la diferencia entre la temperatura de entrada y la de salida del sistema y así disminuir los requerimientos de transferencia de calor.

6.1.3. Caracterización de la extrusora asignada para la implementación del nuevo sistema

Después de estudiar las propiedades de la materia prima, es necesario caracterizar y analizar la extrusora asignada para el proyecto, que fue seleccionada entre las seis extrusoras que tiene Plasmaco para la producción de sus productos de madera plástica por ser la de mayor capacidad de producción. A continuación se muestra la Tabla 13. Dimensiones del tornillo de

la extrusora elegida para el **proyecto por parte de la empresa Plasmaco**;Error! No se encuentra el origen de la referencia.. El detalle de todas las dimensiones se encuentra en el anexo B.

Tabla 13. Dimensiones del tornillo de la extrusora elegida para el proyecto por parte de la empresa Plasmaco

| Geometría del tornillo | |
|--------------------------------------|----------|
| H: Altura del filete (mm) | 5,60 |
| S: Paso (cm) | 44,80 |
| b: Ancho del canal (cm) | 33,60 |
| a: Angulo (°) | 17,50 |
| e: espesor filete (cm) | 9,2 |
| D: Diametro husillo | 89,750 |
| L: Longitud total | 2045,00 |
| N: Velocidad de rotación del husillo | 0,66 rps |

Con estos datos y el análisis de las propiedades de los materiales de la mezcla se realizaron los cálculos de caudal y presión, detallados en el anexo C, y se concluyo que con los parámetros que actualmente cuenta la extrusora en husillo y el cabezal, los calculo de Q máximo son muy similares al Q de operación. La presión estática es muy inferior a la presión máxima, debido a que la máxima presión se da cuando se monta el cabezal. El rango de operación de la maquina es muy reducido debido a que el parámetro Q se encuentra en el punto máximo y no varía para cada una de las condiciones del espesor de la tabla en el cabezal.

Adicionalmente se realizo un diagnostico inicial para conocer el estado y los componentes de la extrusora, y es presentado a continuación

- La maquina es una extrusora mono-husillo de fabricación nacional.
- Se verificaron los sistemas de calefacción (Controladores y Termoelementos) correspondientes al control de temperatura del proceso, y se encontró que los controladores se encuentran bien, pero se deben cambiar los termoelementos ya que se encuentran desfasados por causas de interrupciones en el alambrado.
- La extrusora solo cuenta con cuatro elementos de monitoreo, que toman la señal de cuatro termocuplas tipo J distribuidas como se muestra en la Ilustración 28. Distribución de las termocuplas en la extrusora asignada para el proyecto por la empresa Plasmaco (situación actual), en la que se puede observar que están a distancias diferentes y a una profundidad no adecuada.
- La maquina cuenta con un motor de 25 HP y trabaja con una eficiencia del 25%.
- El motor cuenta con una caja mecánica que cuenta con primera, segunda y reversa, sin embargo solo se puede trabajar en primera ya que esta se encuentra averiada.
- La extrusora está trabajando con un flujo másico de 50 - 70 kg/h, este no es constante.

- Se levantaron las dimensiones del husillo se encontró que las paredes del filete están porosas y tiene algunas abolladuras.

Para garantizar el buen funcionamiento del sistema de post extrusión es esencial que el flujo de la masa fundida entregada por la extrusora sea uniforme y que se pueda controlar de forma precisa su temperatura y presión. Por esta razón se le propuso a la empresa realizar los siguientes cambios.

- Instalar 5 termocuplas tipo J y ubicarlas en una misma distancia y a una profundidad determinada por el 75% del espesor de pared del cilindro, para obtener datos de temperatura más precisos y tener un mejor control en la plastificación y la masa fundida.
- Cambiar la caja mecánica e instalar un variador de velocidad, con el fin de controlar la velocidad del tornillo de extrusión.
- Cambiar el sistema de control manual a un PLC que controle las condiciones de la extrusora y garantizar estabilidad en el proceso
- Cambiar el motor por uno de alta eficiencia.
- Adecuar la apariencia de la extrusora para que quede acorde con el diseño de toda la línea de pos-extrusión.
- Cambiar el sistema de control actual por relés de estado sólido, ya que los contactores actuales tienen un desfase hasta de +/- 20°C.

6.1.4. Definición de los objetivos del proyecto

Para establecer las prioridades del proyecto se utilizó la herramienta de árbol de objetivos propuesta por Cross, con el fin de entender y aclarar dentro del equipo de trabajo los objetivos principales que quiere alcanzar el cliente.

En primera instancia se utilizó la herramienta del *brainstorming*, en un grupo compuesto por: el gerente y el jefe de producción de la empresa Plasmaco, el asesor del proyecto, un estudiante de ingeniería de producción y el moderador, con la cual se buscó obtener la mayor cantidad de objetivos del proyecto global³ desde diferentes perspectivas. Después se procedió a la evaluación y jerarquización de estos, y se plasmaron en la

Ilustración 34. Árbol de objetivos del proyecto cofinanciado entre la universidad EAFIT y la empresa Plasmaco- Diseño e implementación de un sistema de moldeo continuo de tablas de madera plástica.

³ El proyecto global se refiere al proyecto cofinanciado entre la Universidad EAFIT y la empresa Plasmaco, en el que se propone la implementación de toda una línea de postextrusión para el perfil utilizado en la producción de tablas de madera plástica.

Como se puede observar, el objetivo principal que quiere lograr la empresa con el proyecto es obtener una verdadera ventaja competitiva en el sector productivo de la madera plástica, que le permita: disminuir los costos totales, aumentar su capacidad de producción y garantizar una buena calidad en las tablas.

Por otra parte, para definir y entender las funciones que debe cumplir el objeto del proyecto de grado (cabezal de extrusión y de calibración), se implemento la herramienta del árbol de funciones, la cual parte también de un grupo de *brainstorming*, donde se listan todas las funciones que debe realizar para ayudar al alcance de los objetivos globales expuestos anteriormente. Después se determina la función principal y se procede organizar las sub-funciones de forma jerárquica respondiendo a las preguntas, como se puede ver en la Ilustración 35. Árbol de funciones del cabezal de extrusión y de calibración de la línea de extrusión continua de tablas de madera plástica.

Ilustración 34. Árbol de objetivos del proyecto cofinanciado entre la universidad EAFIT y la empresa Plasmaco- Diseño e implementación de un sistema de moldeo continuo de tablas de madera plástica

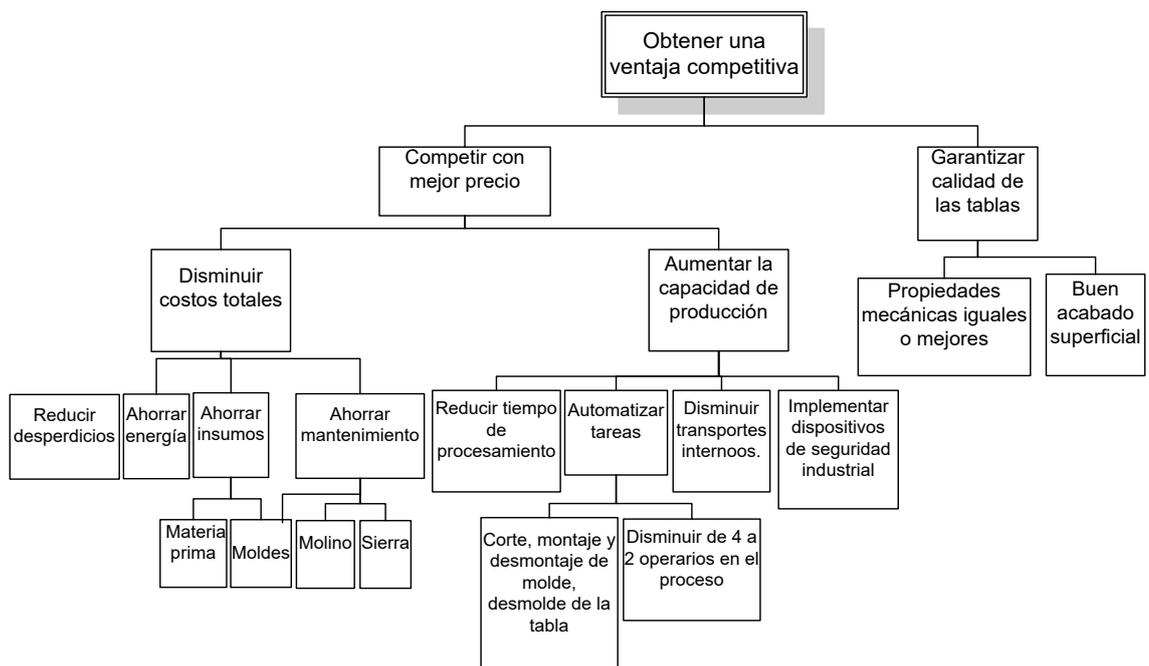
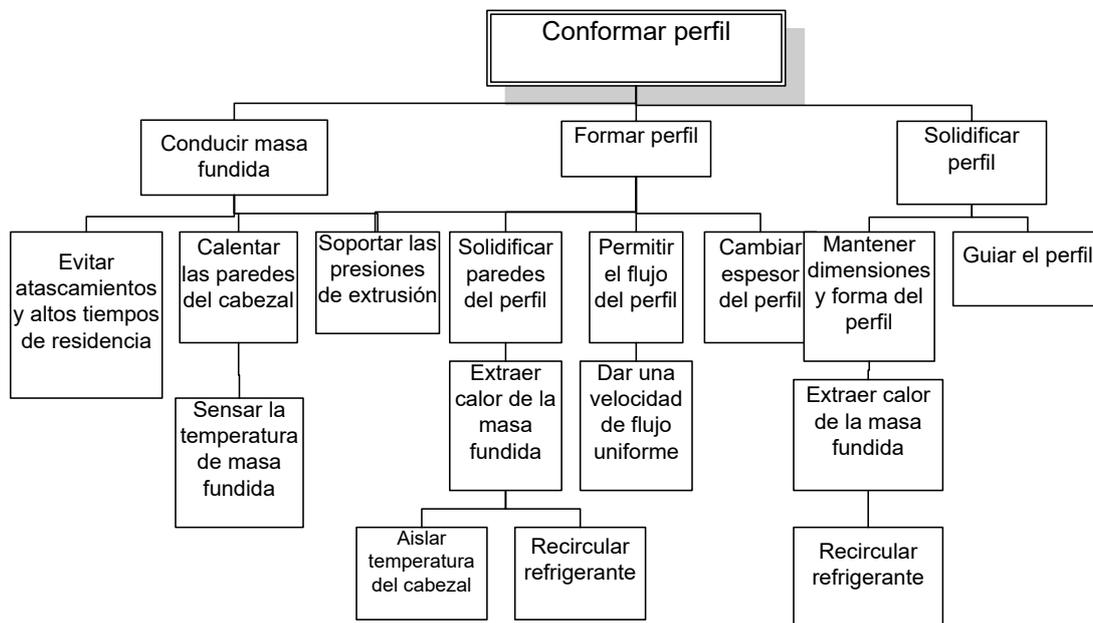


Ilustración 35. Árbol de funciones del cabezal de extrusión y de calibración de la línea de extrusión continua de tablas de madera plástica



6.1.5. Especificaciones de diseño del producto (PDS)

El PDS es una herramienta en la que se traduce la investigación bibliográfica y experimental ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, las necesidades y los deseos del cliente en términos de especificaciones y requerimientos de diseño, con el fin de tener un documento guía en todo el proceso del desarrollo del cabezal. Para esto se organizó la información tomando como referencia el modelo propuesto por Pugh donde se describen treinta y dos aspectos que se deben tener en cuenta en el diseño de productos, de los cuales se tomaron los once más importantes de acuerdo a las necesidades y objetivos del proyecto. Adicionalmente se diferenciaron los requerimientos en términos de demandas (D) y deseos (d), con el fin de darle un grado de importancia a cada uno. Finalmente es importante hacer énfasis que este documento es el resumen de la primera fase y son los datos de entrada a la fase 2: Diseño conceptual.

Tabla 14. PDS aspectos funcionales

| ASPECTOS DE DESEMPEÑO | | | | | |
|--|---|-----------|---|-----|----------------------------|
| REQUERIMIENTO | METRICA | UNIDADES | VALOR | D/d | Referencia |
| La extrusora plastifica el material a las condiciones requeridas para el llenado del molde. | Temperatura de masa fundida | °C | +/- 215 | D | Estudio de curvas térmicas |
| El dado de extrusión recibe al flujo a la misma temperatura de la salida de la boquilla | Temperatura de paredes del dado | °C | +/- 200 | | MICHAELI, p.13 |
| El cabezal permite el flujo del material | Flujo de presión | m³/s | < Flujo de arrastre | D | JONES p.111 |
| El cabezal garantiza la geometría final del perfil requerido | Variación en las dimensiones finales | mm | +/- 1 | D | Ramos p.78 |
| El cabezal tiene en cuenta la contracción volumétrica del material | % de contracción del material | % | 1,72% | D | BODINI p.19 |
| El cabezal garantiza el flujo suave y constante del plástico fundido. | Angulo de entrada del dado (α) | Grados | < 45° | D | Ramos p.77 |
| El cabezal reduce el tiempo de residencia del plástico fundido | Acabado superficial | Rugosidad | $\geq 0,2\mu\text{m}$ | | Michaeli p.300 |
| | Radio de redondeos en las esquinas | mm | ≥ 3 | | Michaeli p.299 |
| El cabezal evita regiones de acumulación de material o altos tiempos de residencia, ya que en dichos puntos el polímero corre el riesgo de degradarse y generar problemas de puntos negros o roturas del extruido. | # de zonas muertas | # | 0 | D | Whelan, Dunning, p. 59 |
| | # de cambios bruscos de geometría | # | 0 | D | |
| El cabezal mantiene una presión alta en su interior para consolidar el plástico fundido antes de que salga del dado | Radio de compresión del cabezal | Relación | $\geq 2 : 1$ | D | Ramos p.77 |
| La zona de enfriamiento permite que se solidifique el plástico formado por el cabezal | Temperatura de solidificación | °C | +/-40 | D | Michaeli p.335 |
| | Lapso de tiempo en la zona de enfriamiento | s | +/- 6200 | D | Michaeli p. 326 |
| La zona de enfriamiento se mantiene a una temperatura óptima para el enfriamiento del perfil | Temperatura de zona de enfriamiento | °C | +/- 10 | D | Michaeli p. 336 |
| El sistema moldea la referencia de tablas de más demanda de la empresa Plasmaco | Medidas del perfil | cm | Perfil rectangular de 11 x (2 hasta 3 cm) | D | Gerente de Plasmaco |
| La longitud del perfil extruido se puede variar según las necesidades del cliente | Rango de variación la longitud | cm | 50 a 200 | D | Gerente de Plasmaco |
| El molde está diseñado para conformar el material utilizado para la producción de tablas en la empresa Plasmaco | Propiedades de la mezcla utilizada en Plasmaco. | Lista | Mirar el capítulo de caracterización de material. | D | Gerente de Plasmaco |

Tabla 15. PDS aspectos de manufactura

| ASPECTOS DE MANUFACTURA | | | | | |
|---|-------------------------------------|------------------|---|-----|-----------------|
| REQUERIMIENTO | METRICA | UNIDADES | VALOR | D/d | Referencia |
| Los componentes del dado son construidos teniendo en cuenta su expansión térmica durante el proceso de extrusión. | Expansión térmica de los materiales | °C ⁻¹ | $\vartheta = \alpha \cdot \Delta t \cdot L_i$ | D | Michaeli p. 299 |
| La complejidad en los procesos de fabricación es baja o media | Tipo de máquinas | Lista | Torno, taladro, fresadora, máquinas CNC, trabajo de chapa metálica. | d | |
| Los procesos de manufactura son de fácil acceso | Área máxima de consecución | Territorio | Colombiano | D | |

Tabla 16. PDS aspectos de mantenimiento y ensamble

| ASPECTOS DE MANTENIMIENTO Y ENSAMBLE | | | | | |
|--|---|--------------|--------------------------------------|-----|------------------------|
| REQUERIMIENTO | METRICA | UNIDADES | VALOR | D/d | Referencia |
| El sistema posee componentes comerciales y de fácil consecución | % de componentes comerciales del sistema | % | 60 | d | |
| Las piezas especiales del sistema son reproducibles y de fácil repetitividad | Complejidad de procesos de fabricación | Calificación | Baja ó media | D | |
| El mantenimiento del sistema se puede realizar con herramientas convencionales | % de herramientas convencionales utilizadas | % | 95 | d | |
| El acople entre los diferentes componentes es de fácil ejecución | Tiempo de ensamble entre componentes | s | <180 | d | |
| El mantenimiento del cabezal | material de las herramientas de limpieza del dado | Lista | -Cobre -Bronce -Aluminio suave | D | Michaeli p. 307 |
| El mantenimiento del cabezal es de fácil ejecución | Mínimo de partes posibles | # de partes | +/- 8 | | Michaeli p. 299 |
| | Acceso a las piezas | Calificación | Fácil | | Whelan, Dunning, p. 59 |
| El cabezal se acopla fácilmente a la extrusora | Tiempo de instalación en la extrusora | s | 300 | d | Jefe de producción |
| Para el acceso a los tornillos y pernos del cabezal, no requiere desmontar otros componentes como las resistencias de calefacción. | Grado de dificultad e acceso a los tornillos | Calificación | Fácil | D | Michaeli p. 299 |

Tabla 17. PDS aspectos de materiales

| ASPECTOS DE MATERIALES | | | | | |
|--|---|-----------|---|-----|----------------|
| REQUERIMIENTO | METRICA | UNIDADES | VALOR | D/d | Referencia |
| Los materiales del cabezal son resistentes a las presiones, temperaturas y al desgaste, del proceso de extrusión. | Lista de materiales | Lista | -Aceros de cementación -Aceros nitrurados. - Acero endurecido totalmente -Aceros templados y revenidos | D | Michaeli p.300 |
| Los materiales del cabezal permiten ser maquinados fácilmente | Procesos de manufactura que permite el material | Procesos | - Arranque de viruta - Erosión | D | Michaeli p.300 |
| Los materiales del cabezal permiten ser maquinados hasta dar una superficie satisfactoria para el proceso | Acabado superficial | Rugosidad | ≥0,2µm | D | Michaeli p.300 |
| Los materiales del cabezal son resistentes a la corrosión por ataques químicos | Lista de materiales | Lista | - Aceros resistentes a la corrosión. - Cromado. - Nickelado - Recubrimientos de carburo de titanio | D | Michaeli p.300 |
| Los materiales del cabezal pueden ser sometidos a tratamientos térmicos, con un cambio mínimo en sus dimensiones | Lista de materiales | Lista | Se evaluarán en el proyecto | D | Michaeli p.300 |
| Los materiales del cabezal permiten tratamientos superficiales | Lista de materiales | Lista | Cromado, nitruración | D | Michaeli p.300 |
| Los materiales de la zona fría del cabezal (calibración) tienen una buena conductividad térmica, soportan las presiones, el desgaste y la corrosión, generadas en el proceso de extrusión. | Lista de materiales | Lista | -Bronce -Aluminio anodizado. -Acero -Cobre berilio | D | Michaeli p.300 |
| El cabezal garantiza un comportamiento térmico uniforme. | Conductividad térmica del material del cabezal | W/m.K | >60 | D | |

Tabla 18. PDS aspectos de ergonomía y seguridad

| ASPECTOS DE ERGONOMÍA Y SEGURIDAD | | | | | |
|---|---|--------------------|-------------------|-----|-----------------------|
| REQUERIMIENTO | METRICA | UNIDADES | VALOR | D/d | Referencia |
| El sistema es de fácil manejo | 1. N° de operarios por turno | Número | ≤ 2 | d | |
| | 2. Calificación mano de obra | Nivel de educación | Bachiller técnico | d | |
| El sistema protege al operario del contacto con altas temperatura y corrientes eléctricas | % de partes a altas temperatura y corrientes eléctricas expuestas | % | 0 | D | |
| El sistema reduce los problemas de salud ocupacional en el proceso en comparación al sistema actual | N° de problemas de salud ocupacional en el proceso | Número | 0 | D | |
| La piezas diseñadas son seguras para el operario | Factor de seguridad | Calificación | > 1.5 | D | |
| El sistema señala el estado de los factores críticos de operación (presión, temperatura) | Relación de factores críticos de operación/señales | Número | 1:1 | d | |
| El diseño del cabezal evita esfuerzos excesivos del operario para manipularlo. | Peso máximo levantado por el operario | Kg | Su propio peso | D | Dra. Angela Restrepo. |

Tabla 19. PDS aspectos de medidas

| ASPECTOS DE MEDIDAS | | | | | |
|---|-------------------------------|----------|-------------------|-----|------------|
| REQUERIMIENTO | METRICA | UNIDADES | VALOR | D/d | Referencia |
| El espacio requerido por el sistema está disponible en la empresa Plasmaco | Área utilizada | m² | ≤ 24 | D | |
| La altura total del sistema le permite ser instalada en la empresa Plasmaco | Altura total | m | ≤ 3 | D | |
| La zona de enfriamiento permite la solidificación del perfil | Longitud zona de enfriamiento | m | ≤ 4 | D | |
| El cabezal evita lesiones del operario por esfuerzos excesivos. | Peso máximo de levantamiento | Kg | < Su propio peso. | D | |

Tabla 20. PDS aspectos de mercado

| ASPECTOS DE MERCADO | | | | | |
|--|--|----------|--------|-----|----------------|
| REQUERIMIENTO | METRICA | UNIDADES | VALOR | D/d | Referencia |
| El sistema se puede aplicar en otras empresas | Empresas del sector a las que se puede aplicar. | Lista | Viable | d | EAFIT-Gerente. |
| El sistema ayuda al aumento de los clientes de tablas de madera plástica para la empresa Plasmaco. | Aumento de la participación en el mercado de tablas de madera plástica | % | 5 | d | Gerente. |

Tabla 21. PDS aspectos de productividad

| ASPECTOS DE PRODUCTIVIDAD | | | | | |
|--|---|----------|-------|-----|--|
| REQUERIMIENTO | METRICA | UNIDADES | VALOR | D/d | Referencia |
| El sistema reduce el porcentaje de desperdicios de material generados por el proceso actual. | Porcentaje de desperdicio | % | << 51 | D | Estudio de tiempos y desperdicios Plasmaco |
| El sistema disminuye el re-proceso de remolido | Porcentaje de utilización del molino respecto a la utilización actual | % | 70 | D | |
| El sistema reduce el tiempo de ciclo | tiempo de ciclo | seg. | < 209 | D | |
| El sistema permite reducir los 4 operarios necesarios para la producción de las tablas | Numero de operarios | Numero | 2 | d | Gerente Plasmaco |
| El sistema ayuda al aumento de las utilidades de la empresa Plasmaco | Costos de fabricación de un metro lineal de tabla de madera tabla | \$ | <3900 | D | Gerente Plasmaco |

Tabla 22. PDS aspectos del desarrollo del proyecto

| ASPECTOS DEL TIEMPO DE DESARROLLO DEL PRODUCTO | | | | | |
|--|--------------------|----------------|-------------------|-----|---|
| REQUERIMIENTO | METRICA | UNIDADES | VALOR | D/d | Referencia |
| El sistema se debe desarrollar en su totalidad en el tiempo estipulado por la universidad para | Fecha inicio | Fecha | Inicio:01/03/2010 | D | Calendario proyectos de grado departamento de |
| | Fecha fin | Fecha | Fin: 01/10/2010 | D | |
| El costo de fabricación del sistema es el mínimo | Costo del producto | Millones de \$ | $6 \leq x \leq 9$ | d | Presupuesto proyecto |

Tabla 23. PDS aspectos del medio ambiente

| ASPECTOS DEL MEDIO AMBIENTE | | | | | |
|--|---|-----------------|--|-----|----------------------------|
| REQUERIMIENTO | METRICA | UNIDADES | VALOR | D/d | Referencia |
| El sistema permite la recirculación de aguas. | Volumen de agua/periodos de cambio | lt/mes | $\leq 3000 /3$ | D | Proceso actual de plasmaco |
| El sistema utiliza productos comerciales amigables con el medio ambiente | Productos amigables con el medio ambiente | Características | Son certificados por entidades ambientales | d | |
| | | | Bajo consumo de energía | d | |
| | | | Son reciclables | d | |

6.2. FASE 2: DISEÑO CONCEPTUAL

6.2.1 Análisis funcional

La estructura funcional se utilizó como herramienta para hacer el análisis funcional del cabezal, con el fin de entender y enmarcar el funcionamiento de este, dividir el problema de diseño en subproblemas que se pueden solucionar más fácilmente, y así poder generar diferentes alternativas de solución.

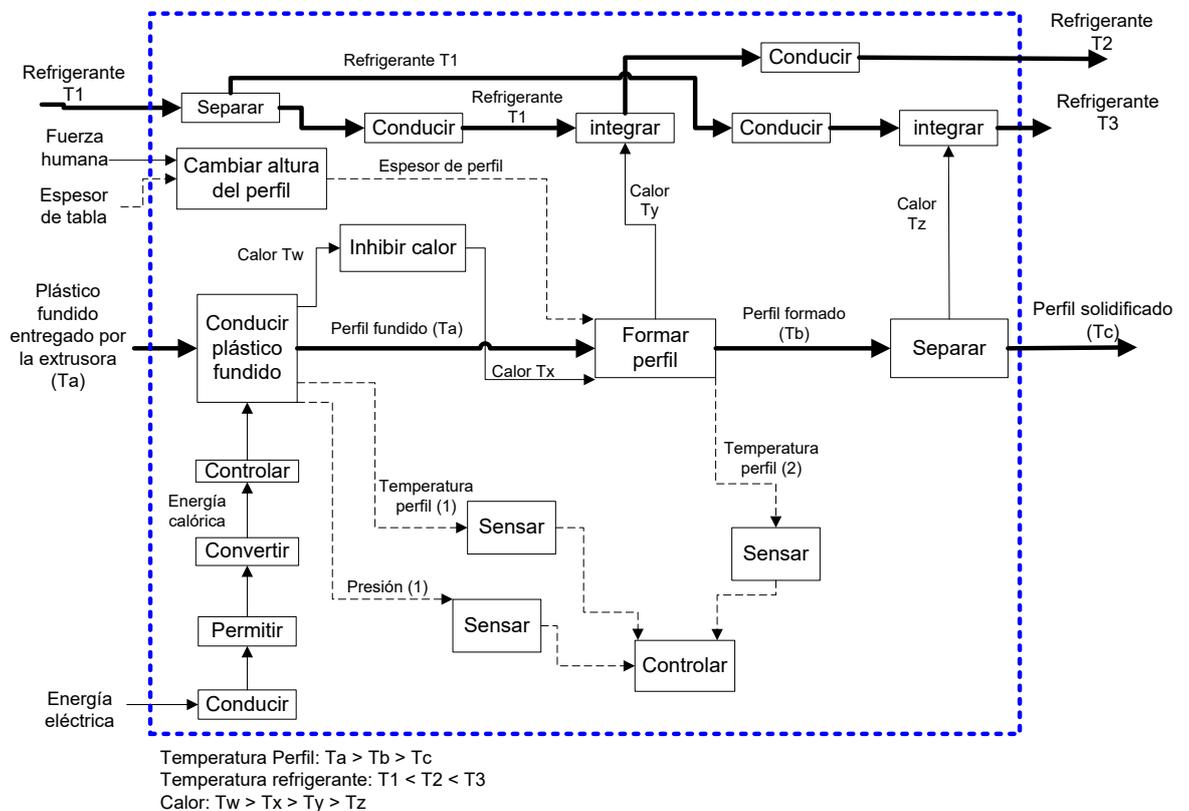
Para esto se tomó la función principal definida en el árbol de funciones Ilustración 35. Árbol de funciones del cabezal de extrusión y de calibración de la línea de extrusión continua de tablas de madera plástica, y se represento en forma de caja negra, donde se determinan cual es el estado inicial y final de los flujos de materia, energía e información que interactúan dentro del aparato, con el propósito de realizar una formulación abstracta de la tarea independiente de cualquier solución particular de la misma.

Posteriormente teniendo un conocimiento de flujos y la función principal se realizo un seguimiento al estado de cada flujo dentro del sistema y las funciones específicas que actúan sobre él, para conseguir finalmente la división del problema de diseño en subsunciones que se pueden solucionar por separado, como se presenta en la estructura funcional Ilustración 37. Estructura funcional del sistema para el conformado continuo del perfil utilizado en la elaboración de tablas de madera plástica en la empresa Plasmaco.

Ilustración 36. Caja negra del sistema para el formado continuo del perfil utilizado en la elaboración de tablas de madera plástica en la empresa Plasmaco



Ilustración 37. Estructura funcional del sistema para el conformado continuo del perfil utilizado en la elaboración de tablas de madera plástica en la empresa Plasmaco



6.2.2. Búsqueda de la solución

6.2.2.1. Matriz morfológica

Esta herramienta se utiliza para facilitar la generación de alternativas por medio de la búsqueda de diferentes soluciones a las funciones particulares encontradas en la fase de análisis funcional. En la cual por medio de la estructura funcional y el árbol de funciones se lograron identificar tres funciones fundamentales: conducir la masa fundida, formar perfil y solidificar perfil, que son funciones que debe cumplir cualquier sistema de moldeo de perfiles por la técnica de extrusión.

Usualmente según lo estudiado y documentado en el marco teórico, estas tres funciones son realizadas por el cabezal de extrusión (conducir masa fundida), el cabezal de calibración (formar perfil), y calibrador o baño de enfriamiento (solidificar perfil). Por lo tanto se utilizaron estos mismos portadores para el proyecto, y dentro de la herramienta de la matriz morfológica se trabajaron otras sub-funciones importantes que hacen parte de cada una de estas funciones globales.

Adicionalmente se implementó esta herramienta para la selección del material del cabezal de extrusión y calibración, ya que el buen funcionamiento del sistema depende en gran medida de la elección de un material que cumpla con todos los requerimientos del PDS.

Ilustración 38. Matriz morfológica para la selección de materiales del dado de extrusión de calibración

| MATERIALES COMPONENTES | | | | |
|---|---------------------|------------|---------------|------------|
| Función\Solución | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 | Solución 4 |
| Material del dado de extrusión | SAE 4140 | SAE 4340 | P20 | DIN 1.2367 |
| Material del dado de calibración | Aluminio anodizado. | P20 | Cobre berilio | |

Ilustración 39. Matriz morfológica para la función conducir masa fundida

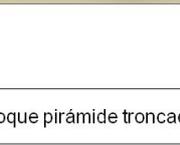
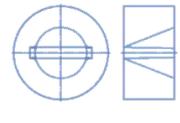
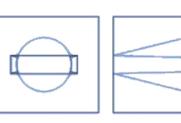
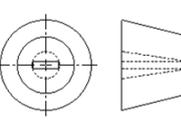
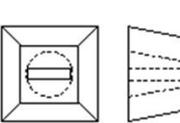
| CONDUCIR MASA FUNDIDA | | | | |
|--|---|---|--|--|
| Funcion\Solución | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 | Solución 4 |
| Convertir energía eléctrica en energía calórica | Cartuchos calefactores | Calefactores de banda y chapas (Abrasadera) | Calefactores de banda y chapas (Planas) | Resistencias tubulares blindadas |
| |  |  |  |  |
| Sensar temperatura de masa fundida | Sensores RTD | Termocuplas | Termistores | Sensor especial para la industria del plástico Dynisco, que permite la medición de presión y temperatura de masa fundida |
| |  |  |  |  |
| Sensar presión | Presión diferencial: Sitrans serie DSIII de Siemens | Presión absoluta: Sitrans P serie ZD de Siemens | Presión relativa: Sitrans P serie Z de Siemens. |  |
| |  |  |  | |
| Geometría del dado | Bloque cilíndrico | Bloque cúbico | Bloque cono truncado | Bloque pirámide truncada |
| |  |  |  |  |

Ilustración 40. Matriz morfológica para la función formar perfil

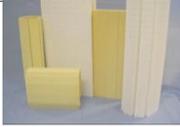
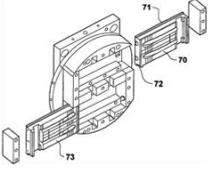
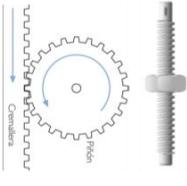
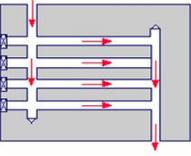
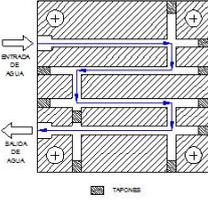
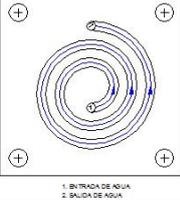
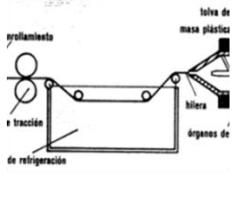
| FORMAR PERFIL | | | | |
|-------------------------------|---|--|--|--|
| Funcion\Solución | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 | Solución 4 |
| Inhibir calor | Resina fenólica con carga cerámica  | Baquelita  | Teflon  | Placa térmica Calorcol  |
| | Insertos  | Sistema mecánico de movimiento lineal  | Sistema neumático o hidráulico de movimiento lineal  | Variación de las cavidades.  |
| Cambiar altura del perfil | Canales de enfriamiento paralelo  | Canales seriales  | Canales de refrigeración en espiral  | Aspersión.  |
| | Sensores RTD  | Termocupla tipo k  | Termocupla tipo J  | Termisores  |
| Conducir refrigerante | | | | |
| Sensar temperatura del perfil | | | | |

Ilustración 41. Matriz morfológica para la función solidificar perfil

| Solidificar perfil | | | | |
|---------------------------|---|---|---|--|
| Funcion\Solución | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 | Solución 4 |
| Separar calor del perfil. | Convección conducción: Duchas de aspersión  | Convección: Enfriamiento por aire.  | Conducción: Tina de inmersión  | Convección -conducción: Híbrido aspersión inmersión  |
| | Conducir refrigerante | | | |

6.3.2.2. Evaluación portadores

Después de tener la matriz con los portadores de función se procedió a realizar una evaluación de cada uno de los portadores de función según el formato propuesto por Pahl y Beitz, [16] con algunas variaciones en los criterios de selección dependiendo de la función a evaluar.

Ilustración 42. Matriz de evaluación de portadores para la función convertir energía eléctrica a calórica

| CONVERTIR ENERGÍA ELÉCTRICA A CALÓRICA | | | | | | | | |
|---|--|---|---|---|---|---|---|---|
| VARIANTE SOLUCIÓN | Variante solución (vs) evaluada por: CRITERIO DE SELECCIÓN (+) Si (-) No (?) Falta información (!) Revisar especificaciones | | | | | | DECISION | |
| | Facilidad de instalación | | | | | | Marcar variante solución (VS) (+) Continuar la solución (-) Eliminar la solución (?) Colectar información (re-evaluar solución) (!) Revisar especificaciones para posible cambio | |
| | Consumo de energía | | | | | | | |
| | Tiene seguridad intrínseca | | | | | | | |
| | Dentro de los costos permisibles | | | | | | | |
| | Preferida por el equipo de trabajo | | | | | | | |
| | Eficiencia | | | | | | | |
| | OBSERVACIONES (INDICADORES, RAZONES) | | | | | | | |
| | A | B | C | D | E | F | G | |
| | Cartuchos calefactores | - | + | + | - | - | - | Para su montaje es necesario perforar el bloque, son de bajo consumo de energía, pero son menos eficientes en la transferencia de calor, son mas seguros ya que se instalan internamente, son las mas costosas. |
| Calefactores de banda y chapas (abrazadera) | + | + | - | + | + | + | Su montaje es muy simple porque es externo al bloque del cabezal, solo es necesaria una resistencia para todo el bloque, es muy eficiente. | + |
| Calefactores de banda y chapas (Planas) | - | + | - | + | - | - | Para su montaje es necesario perforar el bloque, se necesita mínimo una resistencia en cada cara, requiere de platinas externas, su vida útil es corta. | - |
| Resistencias tubular blindadas | - | + | + | + | + | + | Para su montaje es necesario maquinarse ranuras en el bloque según la forma de la resistencia, su vida útil es superior a la de los demás, son mas seguros ya que se instalan al mismo nivel de la superficie del bloque, son muy eficientes. | + |

Ilustración 43. Matriz de evaluación de portadores para la selección del material del cabezal de extrusión⁴

| MATERIAL DEL CABEZAL | | | | | | | | | |
|----------------------|--|---|---|---|---|---|---|--|----------|
| VARIANTE SOLUCIÓN | Variante solución (vs) evaluada por: CRITERIO DE SELECCIÓN (+) Si (-) No (?) Falta información (!) Revisar especificaciones | | | | | | | DECISION | |
| | Maquinabilidad y acabado superficial | | | | | | | Marcar variante solución (VS) (+) Continuar la solución (-) Eliminar la solución (?) Colectar información (re-evaluar solución) (!) Revisar especificaciones para posible cambio | Decisión |
| | Resistencia mecánica | | | | | | | | |
| | Compatibilidad con tratamientos superficiales | | | | | | | | |
| | Compatibilidad con tratamientos térmicos | | | | | | | | |
| | Preferida por el equipo de trabajo | | | | | | | | |
| | Dentro de los costos permisibles | | | | | | | | |
| | Fácil consecución | | | | | | | | |
| | OBSERVACIONES (INDICADORES, RAZONES) | | | | | | | | |
| | A | B | C | D | E | F | G | | |
| 4140 | + | + | + | + | + | + | + | Son aceros que cumplen con las propiedades en general, sin embargo el P20 permite un mejor acabado superficial, tiene mayor resistencia a la corrosión y es diseñado especialmente para esta aplicación. | - |
| 4340 | + | + | + | + | - | + | + | Este acero está diseñado especialmente para el procesamiento de plásticos, permite un acabado espejo, tiene resistencia media a la corrosión y esta en el rango de precios del 4140 y el 4340 | - |
| P20 | + | + | + | + | + | + | + | El costo es el doble del 4140, es especial para trabajo en caliente, sin embargo las temperaturas de extrusión llegan a 250°C máximo, por lo que no justifica su uso. | + |
| 1,2367 (H13) | + | + | + | + | - | - | + | | - |

⁴ Las especificaciones de las fichas técnicas de los materiales estudiados fueron suministrados por la Compañía General de Aceros S.A.

Ilustración 44. Matriz de evaluación de portadores para la selección de la forma del bloque del cabezal de extrusión

| FORMA DEL BLOQUE | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--|---|---|---|---|---|---|--|--|---|
| VARIANTE SOLUCIÓN | Variante solución (vs) evaluada por: CRITERIO DE SELECCIÓN (+) Si (-) No (?) Falta información (!) Revisar especificaciones | | | | | | | DECISION | | |
| | Facilidad de manufactura | | | | | | | Marcar variante solución (VS) (+) Continuar la solución (-) Eliminar la solución (?) Colectar información (re-evaluar solución) (!) Revisar especificaciones para posible cambio | Decisión | |
| | Volumen mínimo | | | | | | | | | |
| | Ensamble | | | | | | | | | |
| | Preferida por el equipo de trabajo | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | OBSERVACIONES (INDICADORES, RAZONES) | | | | | | | | | |
| | A | B | C | D | E | F | G | | | |
| | Bloque cilíndrico | + | - | + | + | | | | Hay que tener cuidado con las medidas y las tolerancias en el maquinado de las dos placas. | + |
| | Bloque cúbico | + | - | + | + | | | | Fácil manufactura. | + |
| Bloque cono truncado | - | + | + | - | | | | Se requieren altos tiempos de maquinado. | - | |
| Bloque pirámide truncada | - | + | - | - | | | | Se requieren altos tiempos de maquinado. | - | |

Ilustración 45. Matriz de evaluación de portadores para la función de inhibir calor

| INHIBIR CALOR | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|---|---|---|---|---|----------|---|---|
| VARIANTE SOLUCIÓN | Variante solución (vs) evaluada por: CRITERIO DE SELECCIÓN (+) Si (-) No (?) Falta información (!) Revisar especificaciones | | | | | | | DECISION | |
| | Resistencia térmica | | | | | | | Marcar variante solución (VS) (+) Continuar la solución (-) Eliminar la solución (?) Colectar información (re-evaluar solución) (!) Revisar especificaciones para posible cambio | |
| | Maquinabilidad | | | | | | | | |
| | Resistencia mecánica. | | | | | | | | |
| | Preferida por el equipo de trabajo | | | | | | | | |
| | Dentro de los costos permisible | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| OBSERVACIONES (INDICADORES, RAZONES) | | | | | | | Decisión | | |
| A | B | C | D | E | F | G | | | |
| Espuma poliuretano | - | - | - | - | + | | | | - |
| Baquelita | - | + | + | + | + | | | Resistencia térmica de 120°C, Espesores de 0,30 a 50 mm, resistencia a la flexión y tracción de 80 a 135MPa, Resistencia a la compresión de 120 MPa. | - |
| Teflón | + | + | - | + | + | | | Resistencia térmica de 327°C, bloques con espesor hasta de 6", resistencia mecánica esfuerzo a tensión de 14 MPa a 250°C. | + |
| Placa térmica de lana de roca. | + | + | ? | - | + | | | Producto de la empresa Calorcol, gran resistencia térmica, permite ser maquinado, pero hay que realizar pruebas de su resistencia mecánica. | + |

Ilustración 46. Matriz de evaluación de portadores para el sistema de variación del espesor del perfil

| VARIACION DEL ESPESOR DEL PERFIL | | | | | | | | | |
|---|--|---|---|---|---|---|---|---|---|
| VARIANTE SOLUCIÓN | Variante solución (vs) evaluada por: CRITERIO DE SELECCIÓN (+) Si (-) No (?) Falta información (!) Revisar especificaciones | | | | | | | DECISION | |
| | Complejidad del sistema | | | | | | | Marcar variante solución (VS) (+) Continuar la solución (-) Eliminar la solución (?) Colectar información (re-evaluar solución) (!) Revisar especificaciones para posible cambio | Decisión |
| | Facilidad de manufactura | | | | | | | | |
| | Mantenimiento | | | | | | | | |
| | Practicidad en a operación | | | | | | | | |
| | Dentro de los costos permisibles | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | A | B | C | D | E | F | G | OBSERVACIONES (INDICADORES, RAZONES) | |
| | Insertos | + | + | + | - | + | | | La geometría de las tablas permite la utilización de insertos de fácil manufactura, ensamble y mantenimiento. |
| Sistema mecánico de movimiento lineal | - | - | - | + | + | | | Aunque puede ser mas compleja su construcción, es el mas practico para realizar la tarea, sin embargo hay que tener cuidado con el mantenimiento. | + |
| Sistema neumático o hidráulico de movimiento lineal | - | - | - | + | - | | | Requiere de circuitos y accesorios especiales. | - |
| Variación de las cavidades | + | - | + | - | + | | | Es muy costoso, ya que hay que fabricar un molde para cada espesor de perfil. | - |

Ilustración 47. Matriz de evaluación de portadores para la selección del sistema de refrigeración

| SISTEMA DE REFRIGERACIÓN | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--|---|---|---|---|---|---|---|----------|
| VARIANTE SOLUCIÓN | Variante solución (vs) evaluada por: CRITERIO DE SELECCIÓN (+) Si (-) No (?) Falta información (!) Revisar especificaciones | | | | | | | DECISION | |
| | Eficiencia en el enfriamiento | | | | | | | Marcar variante solución (VS) (+) Continuar la solución (-) Eliminar la solución (?) Colectar información (re-evaluar solución) (!) Revisar especificaciones para posible cambio | Decisión |
| | Facilidad de manufactura | | | | | | | | |
| | Mantenimiento | | | | | | | | |
| | Espacio requerido en el bloque | | | | | | | | |
| | Dentro de los costos permisibles | | | | | | | | |
| | Preferida por el equipo de trabajo | | | | | | | | |
| | OBSERVACIONES (INDICADORES, RAZONES) | | | | | | | | |
| | A | B | C | D | E | F | G | | |
| | Canales de enfriamiento paralelo | + | - | + | - | + | + | La manufactura de estos canales puede ser compleja debido al tamaño del molde, implicando así el acople de mas placas. | + |
| Canales seriales | + | + | + | - | + | + | Los canales seriales son los mas fáciles de manufacturar, además el cambio en las temperaturas de cada canal puede ayudar a tener un perfil de enfriamiento mas suave. | + | |
| Canales de refrigeración en espiral | + | - | - | - | + | - | La geometría del molde y de la pieza no justifican maquinar canales de refrigeración complejos como este. | - | |
| Aspersión. | + | - | - | + | + | - | Este sistema suprime el maquinado de los canales de enfriamiento del molde, ya que este es refrigerado externamente. Esto puede mermar la complejidad y tamaño del cabezal. | - | |

Ilustración 48. Matriz de evaluación de portadores para la selección del material del cabezal de calibración⁵

| MATERIAL BLOQUE DE CALIBRACIÓN | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|---|---|---|---|---|---|----------|
| VARIANTE SOLUCIÓN | Variante solución (vs) evaluada por: CRITERIO DE SELECCIÓN (+) Si (-) No (?) Falta información (!) Revisar especificaciones | | | | | | DECISION | |
| | Dentro de los costos permisibles | | | | | | Marcar variante solución (VS) (+) Continuar la solución (-) Eliminar la solución (?) Colectar información (re-evaluar solución) (!) Revisar especificaciones para posible cambio | |
| | Conductividad térmica | | | | | | | |
| | Maquinabilidad | | | | | | | |
| | Resistencia mecánica | | | | | | | |
| | Acabado superficial 2µm | | | | | | | |
| | Preferida por el equipo de trabajo | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| A | B | C | D | E | F | G | OBSERVACIONES (INDICADORES, RAZONES) | Decisión |
| Aluminio aleado (Duraluminio) | + | + | + | + | + | - | La conductividad térmica y la difusividad térmica de las aleaciones de aluminio responden a la principal función del molde, enfriar o calentar de manera más rápida y eficiente que el acero. Sin embargo, no tiene muy buena resistencia al desgaste, y el material de las tablas es muy viscoso y abrasivo. | - |
| P20 | + | - | + | + | + | + | Este acero presenta una conductividad térmica baja en comparación con el cobre y el aluminio, tiene buena resistencia al desgaste, permite un acabado espejo, y tiene una resistencia media a la corrosión. | + |
| Cobre berilio | - | + | + | + | + | - | Puede ser la referencia la ELMEDUR HA de la compañía general de aceros. Tiene excelente conductividad térmica y propiedades mecánicas, sin embargo su precio es 8 veces el del P20 y 4 del duraluminio. | - |

⁵ Las especificaciones de las fichas técnicas de los materiales estudiados fueron suministrados por la Compañía General de Aceros S.A.

Ilustración 49. Matriz de evaluación de portadores para la selección del materia para separar del perfil/conducir refrigerante

| SEPARAR CALOR DEL PERFIL/CONducIR REFRIGERANTE | | | | | | | | | |
|--|--|---|---|---|---|---|--|---|----------|
| VARIANTE SOLUCIÓN | Variante solución (vs) evaluada por: CRITERIO DE SELECCIÓN (+) Si (-) No (?) Falta información (!) Revisar especificaciones | | | | | | | DECISION | |
| | Eficiencia en el enfriamiento | | | | | | | Marcar variante solución (VS) (+) Continuar la solución (-) Eliminar la solución (?) Colectar información (re-evaluar solución) (!) Revisar especificaciones para posible cambio | Decisión |
| | Facilidad de manufactura | | | | | | | | |
| | Mantenimiento | | | | | | | | |
| | Dentro de los costos permisible | | | | | | | | |
| | Preferida por el equipo de trabajo | | | | | | | | |
| | OBSERVACIONES (INDICADORES, RAZONES) | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| A | B | C | D | E | F | G | | | |
| Duchas de aspersión | + | + | - | + | - | | | | - |
| Ventilador | - | + | - | - | - | | | La temperatura ambiente en la planta de producción es de aproximadamente 27°C, por lo tanto se requiere de un sistema de enfriamiento del aire para lograr el objetivo, además se requiere de todo un circuito neumático. | - |
| Tina de inmersión | + | + | + | + | - | | | | - |
| Hibrido aspersión inmersión | + | + | - | + | + | | | La conductividad del agua es mayor que la del aire, por eso es ideal una tina de inmersión, sin embargo el flujo turbulento de las tinas de aspersión ayudan a tener una transferencia de calor mas eficiente | + |

Con esta evaluación se busca depurar la matriz, con el propósito de solo dejar los portadores de función que mejor cumplen y se adecuan a los requerimientos del proyecto, con el fin de obtener en una etapa temprana del diseño, soluciones con mayor probabilidad de éxito. Como resultado de esto, se presenta en la Ilustración 50. Matriz morfológica simplificada y rutas de solución, la matriz simplificada con dos rutas solución posibles, que se utilizaran para configurar las alternativas solución, basándose en la arquitectura de los cabezales para extrusión de barras solidas, como se describe en el numeral 4.4 del marco teórico.

Ilustración 50. Matriz morfológica simplificada y rutas de solución

| MATRIZ MORFOLÓGICA SIMPLIFICADA | | |
|---|--|---|
| Función\Solución | Solución 1 | Solución 2 |
| Convertir energía eléctrica en energía calórica | ▲ Calefactores de banda y chapas (abrazadera) | ■ Resistencias tubulares blindadas. |
| Sensar temperatura de masa fundida | ▲ ■ Sensor especial para la industria del plástico Dynisco, que permite la medición de presión y temperatura de masa fundida | |
| Sensar presión | | |
| Geometría del dado | ▲ Bloque cilíndrico | ■ Bloque cúbico |
| Inhibir calor | Teflón | |
| Cambiar altura del perfil | ■ Insertos | ▲ Sistema mecánico de movimiento lineal |
| Conducir refrigerante para formar el perfil. | ▲ Canales de enfriamiento paralelo | ■ Canales seriales |
| Sensar temperatura del perfil | ▲ ■ Termocupla tipo J | |
| Separar calor del perfil. | ▲ ■ Híbrido aspersión inmersión | |
| Conducir refrigerante | | |
| Material del dado de extrusión | ▲ ■ P20 | |
| Material del cabezal de calibración | ■ Aleación de aluminio | ▲ P20 |

6.3.2.3. Generación de alternativas

Ilustración 51. Alternativa 1

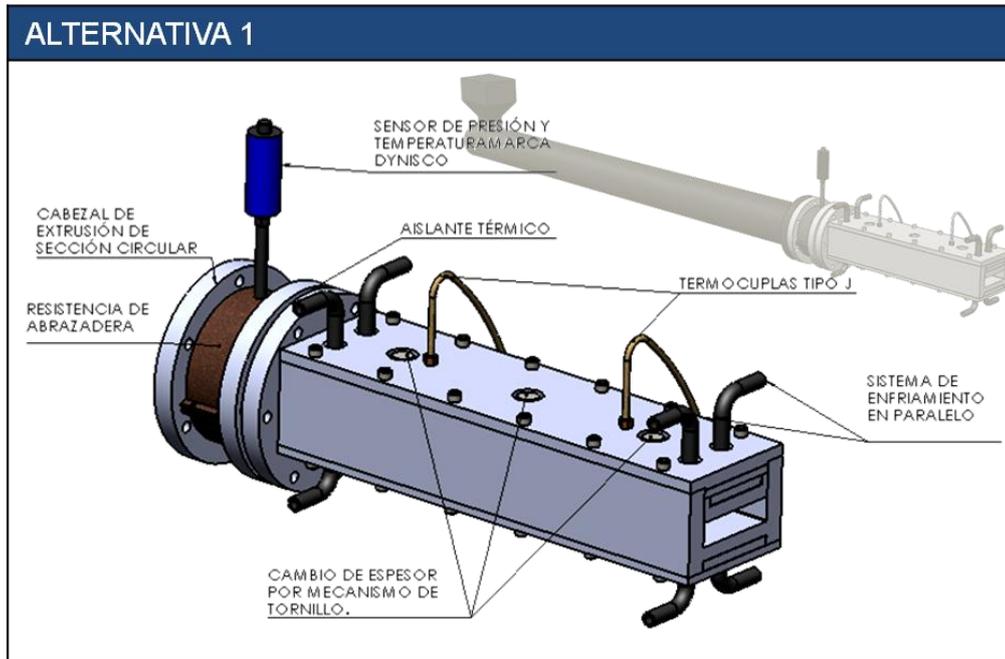
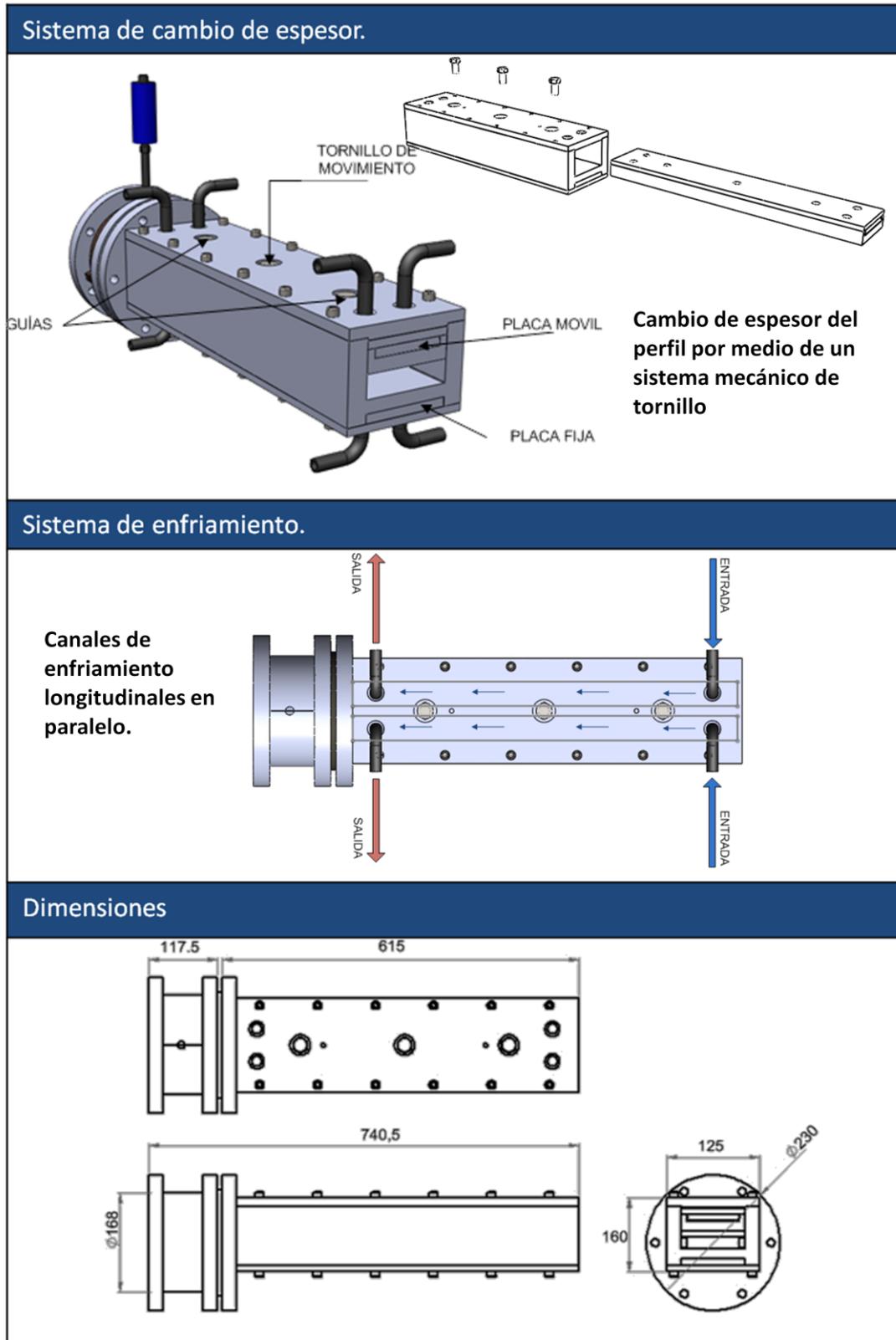


Ilustración 52. Detalle alternativa 1



Por medio del análisis morfológico se generaron dos alternativas, que son el resultado de la configuración de los diferentes portadores de forma que cumplan la función principal.

La alternativa numero 1, tiene la geometría del bloque del cabezal de extrusión de forma cilíndrica, lo que facilita la utilización de una resistencia tipo abrazadera, además ésta utiliza un sistema mecánico de avance por husillo para realizar el cambio del espesor del perfil, de esta manera el operario simplemente gira el tornillo un determinado número de revoluciones hasta llegar a la distancia requerida para garantizar el espesor deseado. El sistema de enfriamiento es realizado por medio de cuatro canales en paralelo, que atraviesan el cabezal de manera longitudinal. A diferencia de ésta, el bloque de la alternativa dos es en forma de cubo, por esta razón es necesario implementar resistencias tubulares. El cambio de espesor del perfil es realizado por insertos, similar al cambio de referencias en los moldes de inyección. Otra diferencia fundamental, es que el sistema de enfriamiento de esta alternativa es por medio de canales transversales que se conectan en serie por medio de acoples y mangueras externas.

Los demás elementos como el teflón aislante, las termocuplas tipo J y el transductor de presión, son los mismos para las dos alternativas. Lo mismo pasa con el sistema para terminar de solidificar el perfil, que consta de una tina abastecida de agua por medio de dos tubos perforados que hacen el efecto de regadera, y es recirculada constantemente con el fin de garantizar una temperatura ideal para el formado del perfil. Al interior de la tina hay cinco rodillos de Nylon que se encargan de guiar y facilitar el paso del perfil.

Ilustración 53. Alternativa 2

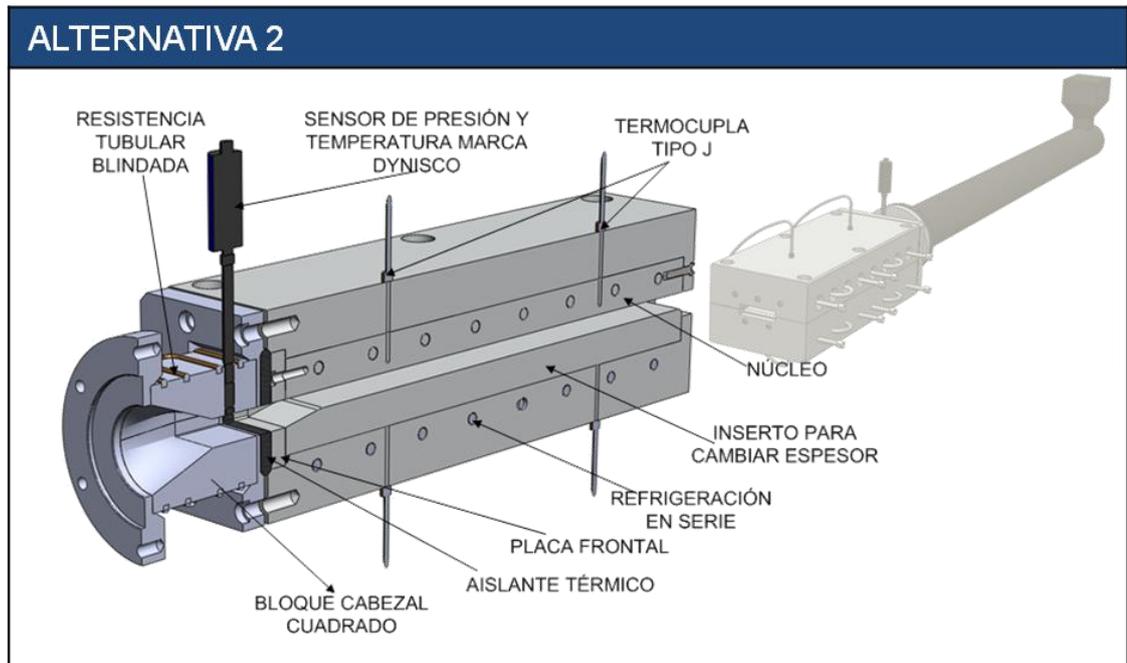


Ilustración 54. Sistema de enfriamiento y cambio de espesor alternativa 2

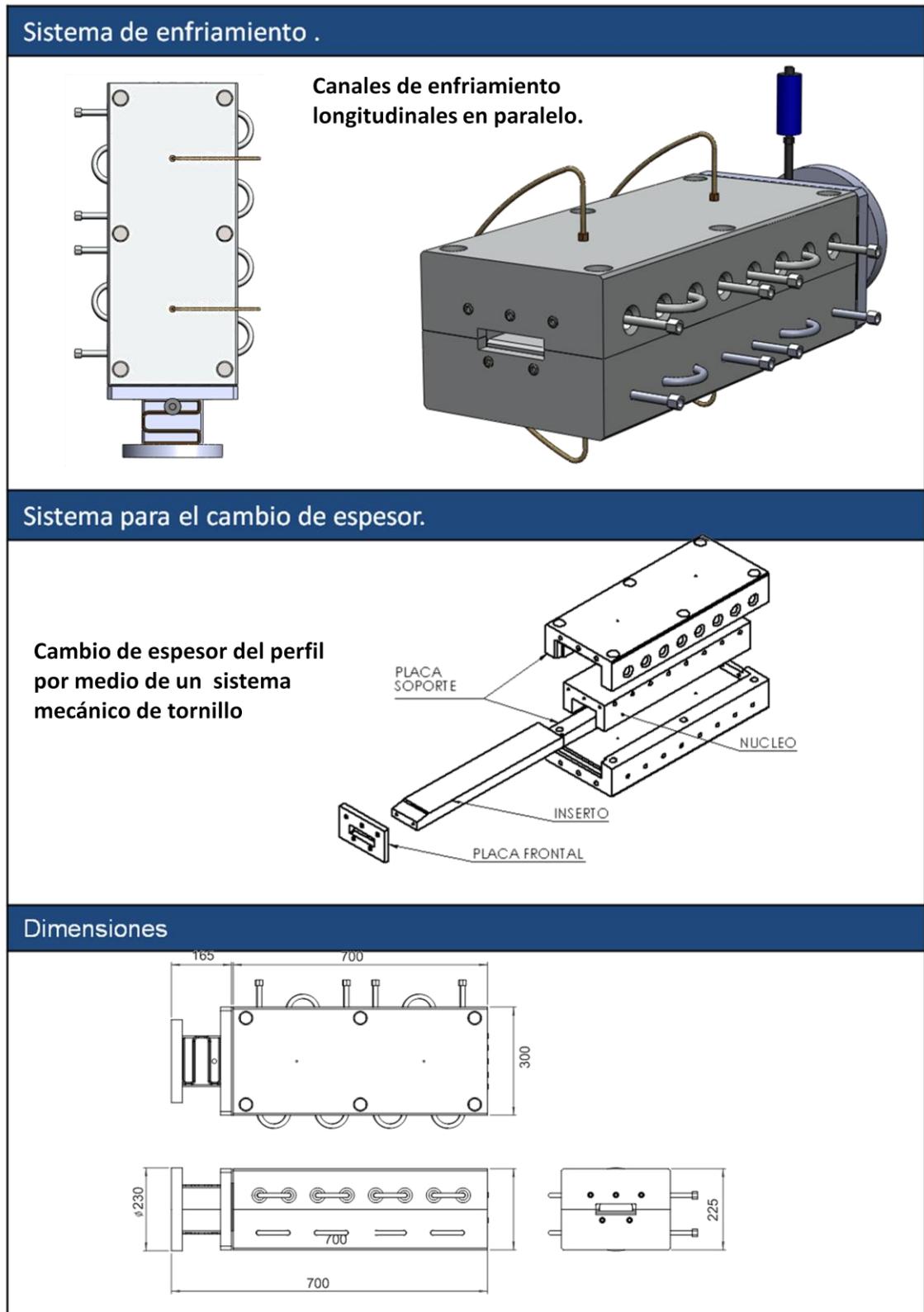
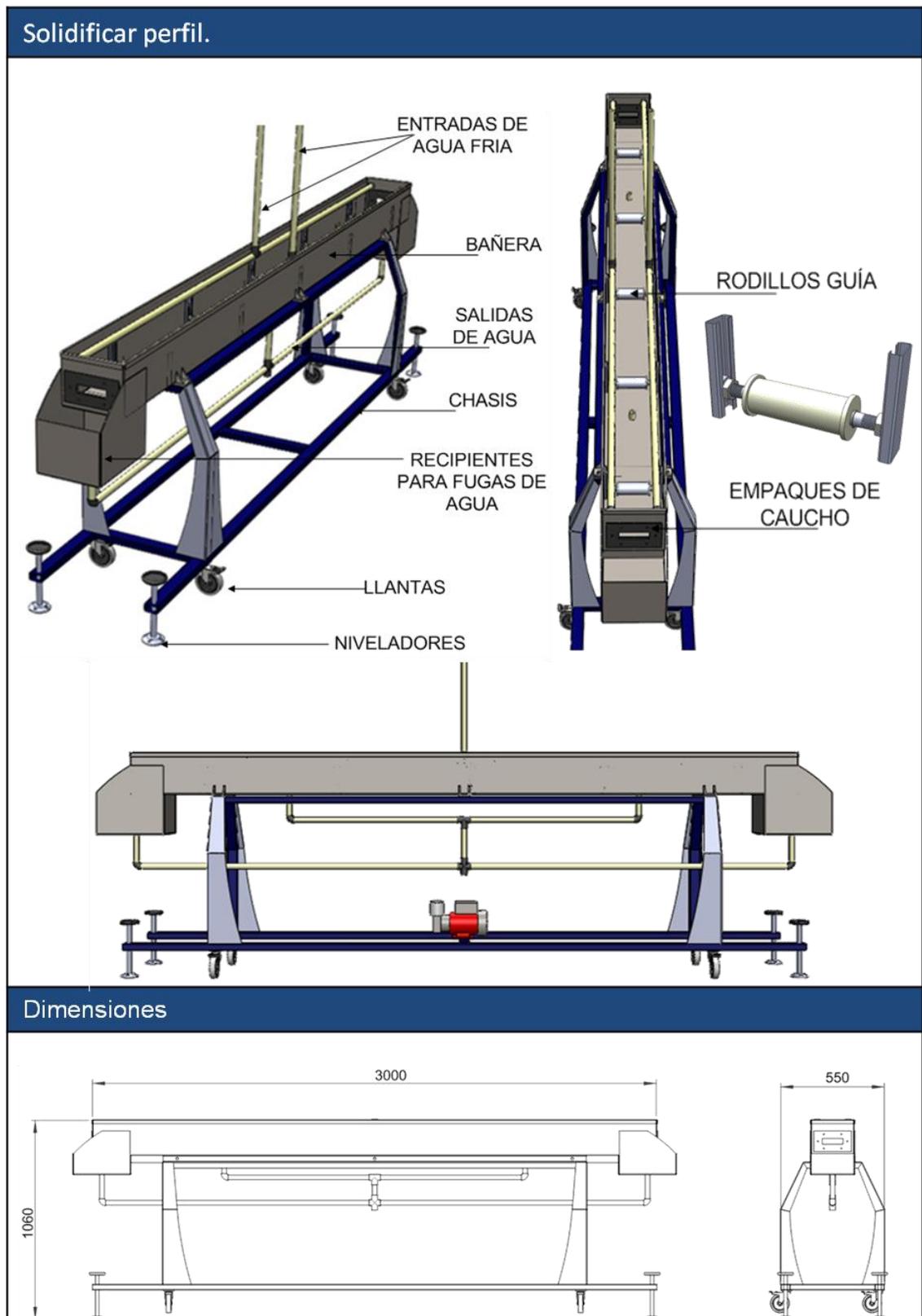


Ilustración 55. Alternativa para la función de solidificar perfil



6.3.2.4. Evaluación y selección de alternativas

Para la selección de la alternativa a desarrollar se utilizó una matriz de evaluación de ponderados, con el fin de darle más peso a los criterios de evaluación de mayor importancia de acuerdo a los requerimientos del PDS y a los objetivos del proyecto.

Tabla 24. Matriz de evaluación de alternativas

| No | Criterios de evaluación | Peso | Métrica | Alternativa 1 | | | Alternativa 2 | | | Ideal | |
|--------------|--|-------------|--|---------------|--------------|-------------|---------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | | | | Magnitud | Valor | Pond. | Magnitud | Valor | Pond. | Valor | Pond. |
| 1 | Complejidad del cambio de espesor del | 20% | Complejidad | Más sencillo | 4 | 0,80 | Sencillo | 3 | 0,6 | 4 | 0,8 |
| 2 | Complejidad y efectividad del sistema de enfriamiento. | 15% | Complejidad | Sencillo | 3 | 0,45 | Sencillo | 4 | 0,6 | 4 | 0,6 |
| 3 | Complejidad en el proceso de ensamble | 10% | Número de partes | 52 | 2 | 0,20 | 58 | 2 | 0,2 | 4 | 0,4 |
| 4 | Complejidad de manufactura del sistema. | 15% | Número de partes manufacturadas | 16 | 1 | 0,15 | 12 | 4 | 0,6 | 4 | 0,6 |
| 5 | El sistema posee componentes comerciales | 10% | % de componentes comerciales | 69,23% | 2 | 0,20 | 79,31% | 3 | 0,3 | 4 | 0,4 |
| 6 | Los costos de los dispositivos no excede lo presupuestado para el sistema. | 15% | Costos | \$ 8.098.935 | 1 | 0,15 | \$ 9.458.304 | 0 | 0 | 4 | 0,6 |
| 7 | La alternativa es preferida por el equipo de trabajo | 15% | Simplicidad en el diseño y el funcionamiento | Sencillo | 3 | 0,45 | Muy sencillo | 4 | 0,6 | 4 | 0,6 |
| Total | | 100% | | | TOTAL | 2,40 | | TOTAL | 2,90 | TOTAL | 4,00 |

Tabla 25. . Escala de valores según la norma VDI 2222 y sus criterios de evaluación

| Criterio | Complejidad del cambio de espesor del perfil. | Complejidad y efectividad del sistema de enfriamiento | Complejidad en el proceso de ensamble | Complejidad de manufactura del sistema | El sistema posee componentes comerciales | Los costos no exceden los presupuestados para el sistema de formado | Simplicidad en el diseño y el funcionamiento |
|----------------|---|---|---------------------------------------|--|--|---|--|
| Pts. \ Métrica | Complejidad | Complejidad | Numero de partes | Numero de partes a manufacturar | % de componentes comerciales | Pesos colombianos \$ | Complejidad |
| 0 | Más complicado | Más complicado | >70 | >20 | 0 29 | >\$ 9'000.000 | Más complicado |
| 1 | Complicado | Complicado | 60 | 16 | 30 | \$ 8.000.000 | Complicado |
| | | | 69 | 19 | 49 | \$ 8.900.000 | |
| 2 | Promedio | Promedio | 50 | 12 | 50 | \$ 6.600.000 | Promedio |
| | | | 59 | 15 | 69 | \$ 7.900.000 | |
| 3 | Sencillo | Sencillo | 40 | 8 | 70 | \$ 5.000.000 | Sencillo |
| | | | 49 | 11 | 89 | \$ 6.500.000 | |
| 4 | Más sencillo | Más sencillo | <40 | <8 | >90 | <\$5'000.000 | Más sencillo |

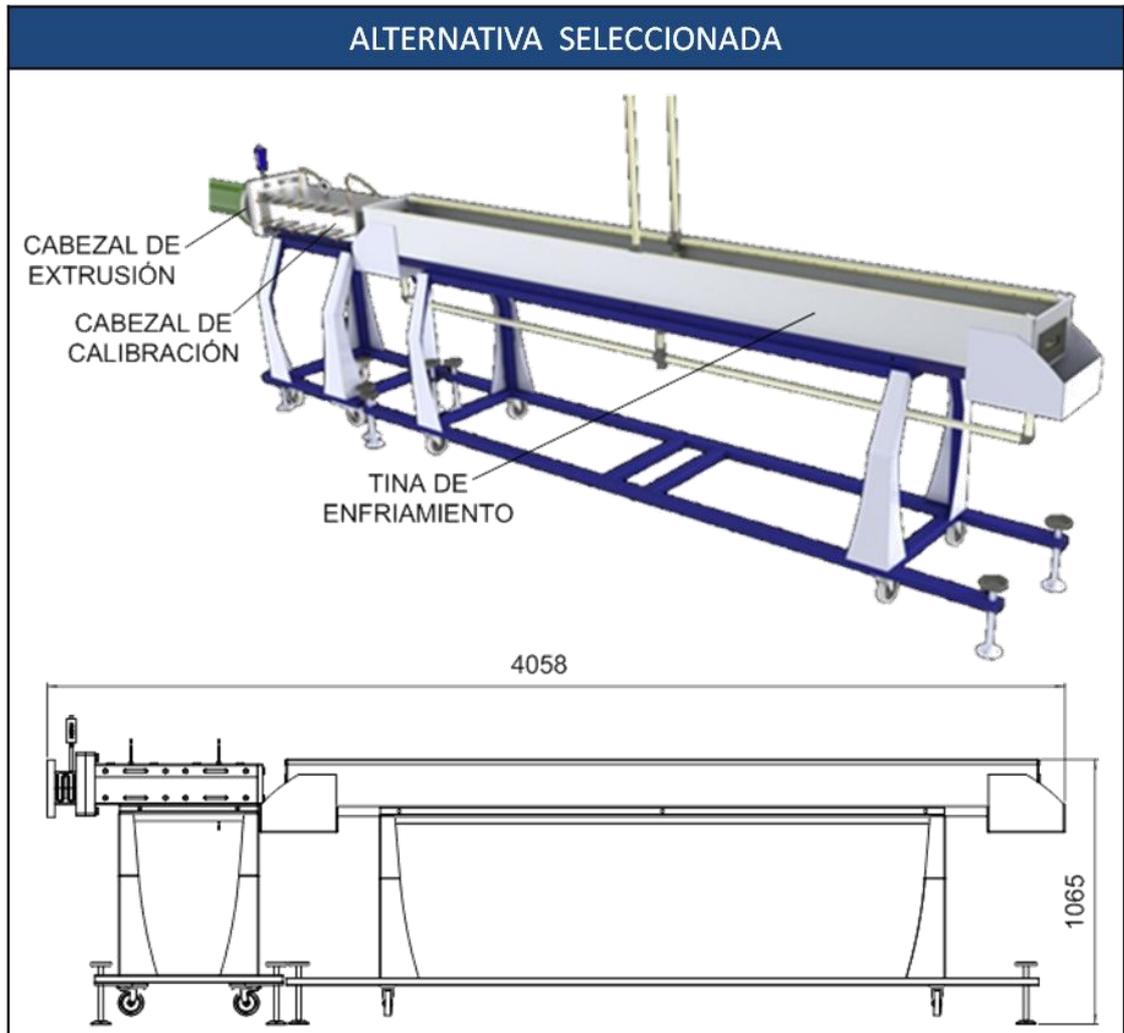
Los resultados de esta ponderación son comparados con una alternativa ideal a la que se le da un puntaje de 4 en todos los criterios, con el fin de verificar la efectividad del diseño. Esta efectividad, en el diseño de maquinaria para la industria del reciclaje es aceptable por encima de un 70%, por lo tanto la alternativa uno que tiene un 60%, está por fuera del porcentaje de efectividad, pero la alternativa dos con un 73% es aceptable para el proyecto, sin embargo debe ser optimizada sobre todo en el costo de los materiales y equipos, ya que en este criterio obtuvo una calificación de cero.

La calificación de cada criterio se hizo de acuerdo a la escala de valores de la norma VDI 2222, que propone una puntuación de 0 hasta 4, siendo 0 la peor calificación, como se muestra en la Tabla 25. . **Escala de valores según la norma VDI 2222 y sus criterios de evaluación**

6.3. DISEÑO PRELIMINAR

6.3.1. Corporificación

Ilustración 56. Corporificación de la alternativa seleccionada



A partir de la configuración de la alternativa número dos, se realizó una optimización del tamaño de los bloques de material y de la cantidad de material a remover en la manufactura de las placas y cavidades, consiguiendo reducir los costos a \$8.838.608, una cifra que está por debajo de los \$9.000.000, subiendo la efectividad del diseño a un 76% del ideal.

Con el fin de ayudar a la manipulación del cabezal de calibración por parte del operario, fue necesario adaptar un soporte que le permitiera adecuar la altura respecto al cabezal de extrusión, y además le ayudara a su transporte. Esto lo realiza por medio de cuatro niveladores y cuatro ruedas, como se había planteado antes en la alternativa de la tina de enfriamiento, la cual tuvo cambios menores en los soportes de la tina y en los mecanismos de los rodillos

guía, como se puede apreciar en la Ilustración 56. Corporificación de la alternativa seleccionada.

Ilustración 57. Corporificación del cabezal de extrusión (Conducir masa fundida)

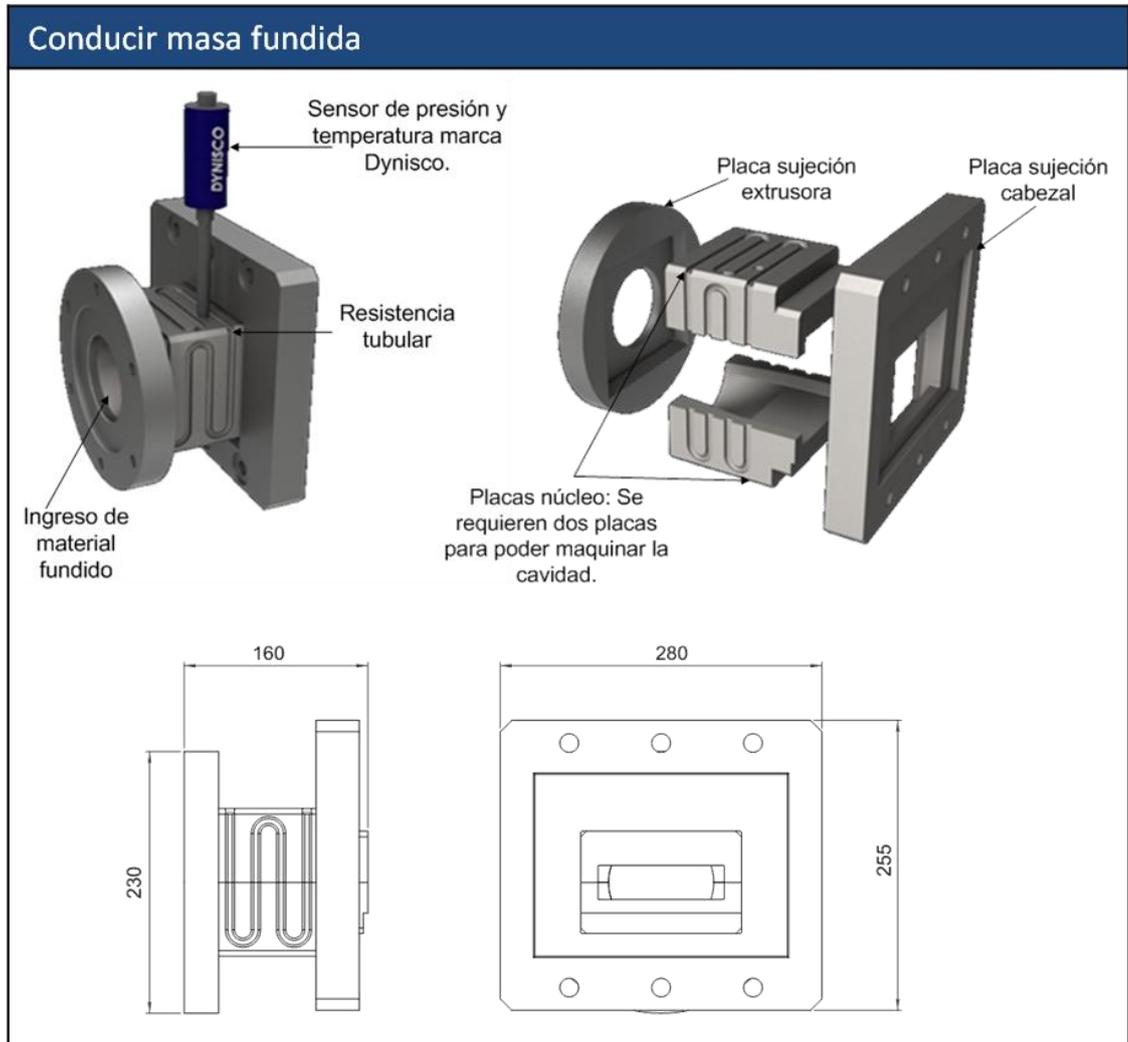
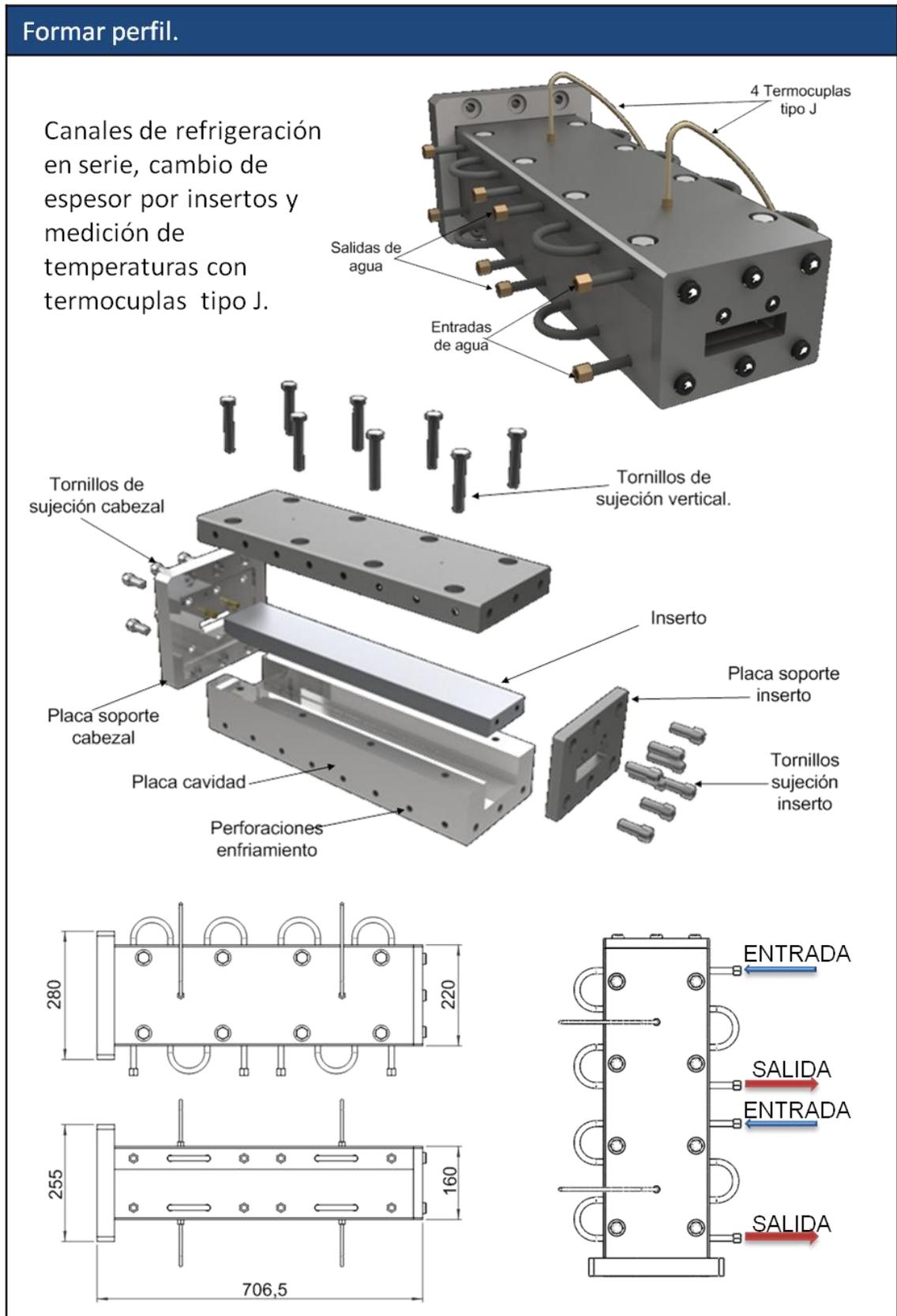


Ilustración 58. Corporificación del cabezal de calibración. (Formar perfil)



6.3.2. Cálculos del sistema

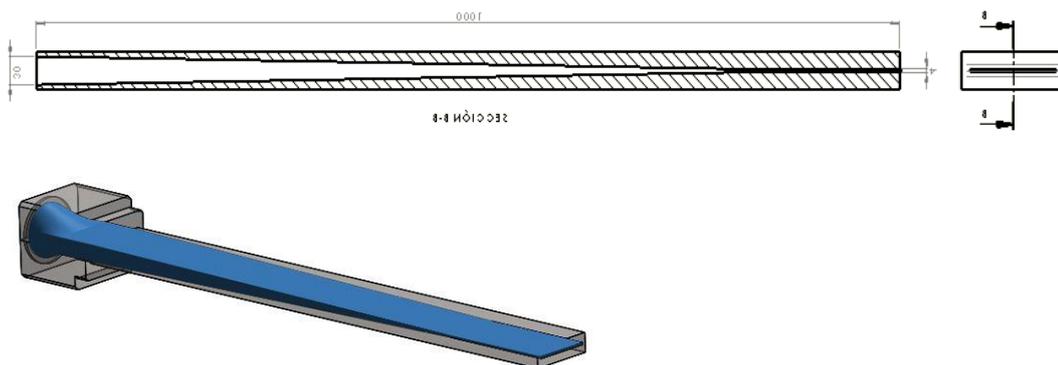
En el diagrama de flujo propuesto por Michaeli [12], se plantean los siguientes pasos para realizar los cálculos de un cabezal de extrusión: hacer los cálculos y diseño del canal de flujo, calcular los esfuerzos del cuerpo del cabezal y realizar los cálculos del sistema de enfriamiento. Los cuales se desarrollarán en este capítulo con ayuda de algunas herramientas computacionales y modelos matemáticos expuestos por Menges [14], Hensen [9], y el mismo Michaeli.

6.3.2.1. Diseño y cálculo del canal de flujo

Para la simulación del canal de flujo se utilizó el software FLOW SIMULATION, del cual se obtuvieron datos de presión, velocidad del frente flujo y el comportamiento de las trayectorias de flujo de la masa fundida.

A diferencia de otras técnicas, en el proceso de extrusión de perfiles de “gran espesor”, el canal de flujo se extiende hasta el canal interior del perfil formado por las paredes solidificadas, por lo tanto para realizar la simulación, se trabajó con la modelación del canal del cabezal de extrusión y se le añadió de un metro de largo con un canal interior en forma de pirámide troncada, simulando así la solidificación sus paredes en el cabezal de calibración como se muestra en la Ilustración 59. **Volumen del canal de flujo del cabezal de extrusión de la corporificación**, teniendo en cuenta que el cono tiene una longitud de 800mm y cambia a una zona uniforme de 4 x 95 mm.

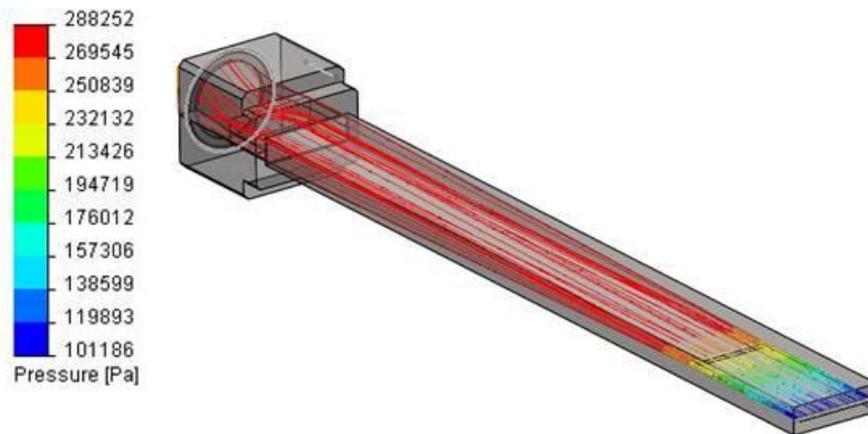
Ilustración 59. Volumen del canal de flujo del cabezal de extrusión de la corporificación



Con el fin de evitar errores en la simulación causados por la caracterización de la mezcla de materiales que utiliza estudiada en el proyecto, se corrió el análisis usando un PP copolímero predeterminado en la base de datos de ingeniería que está incluida en el software, a una temperatura de 200°C, un flujo másico de entrada de 70Kg/h (flujo entregado por la extrusora de

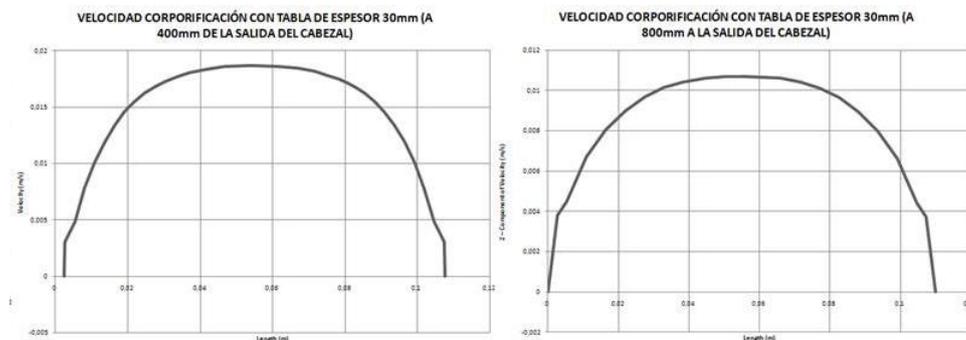
Plasmaco) y un presión a la salida igual a la presión atmosférica a la misma temperatura de entrada. Adicionalmente, se colocaron como objetivos de convergencia criterios de presión promedio en cada una de las tapas y una ecuación donde se define como criterio de convergencia el delta de presión entre ambas caras (entrada-salida). Los resultados se observan en la Ilustración 60. Presión y flujo del cabezal de extrusión de la Corporificación

Ilustración 60. Presión y flujo del cabezal de extrusión de la Corporificación



Si se toma como referencia el orden de presión que sugiere la literatura (10 MPa), el cabezal solo está consumiendo un 2% de la presión requerida, esta situación puede ocasionar defectos en el perfil como vacios por la contracción térmica, bajas propiedades mecánicas y mala calidad de las tablas. Adicionalmente, la Ilustración 61, muestra que el cabezal esta desbalanceado, debido a que la velocidad del frente de flujo no es constante, produciendo así grandes problemas en el proceso y alabeos en el producto final.

Ilustración 61. Velocidad del frente de flujo a 400 y 800 mm de distancia de la salida del cabezal de extrusión propuesto en la corporificación



De acuerdo a estos resultados, se desarrollaron otros diseños y simulaciones de cabezal basándose en los consejos que dan Michaeli (p.334) y Hensen (p.80), que dicen que para diseñar el canal de flujo de un cabezal de extrusión de barras solidas, se debe conducir la masa fundida desde el diámetro del cilindro hasta un orificio relativamente pequeño (entre 8 y 10mm de diámetro independiente de la geometría del producto final), con el fin de aumentar la relación de compresión y por ende la caída de presión, después de esto se debe abrir hasta llegar al cabezal de calibración con un ángulo mayor a 45° . Esto no se había tenido en cuenta ya que el material de Plasmaco, se encuentra en un estado muy viscoso y tiene muchas impurezas, por lo tanto se tenía la hipótesis de dejar canal de flujo lo menos restringido posible para no ocasionar atascamientos y una posible degradación del material.

En la siguiente Ilustración 62. Rediseño (3) de canal de flujo que arrojó mejores resultados en las simulaciones con Flow simulation, se presenta el diseño que arrojó mejores resultados en las simulaciones de Flow Simulation, con el mismo material, las mismas condiciones de frontera y los mismos objetivos de convergencia.

Ilustración 62. Rediseño (3) de canal de flujo que arrojó mejores resultados en las simulaciones con Flow simulation

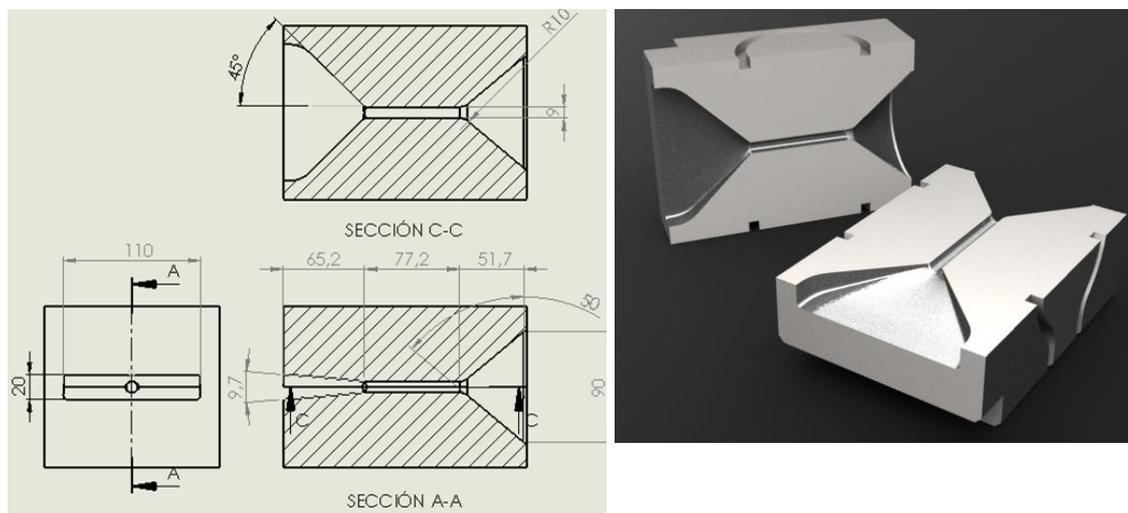
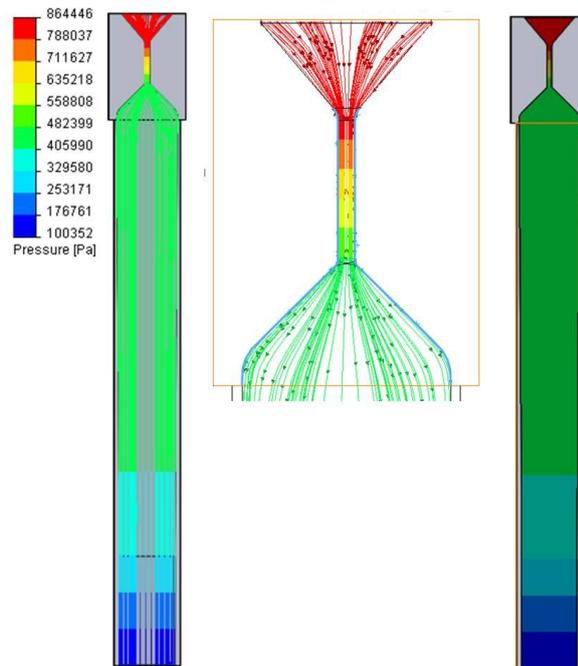
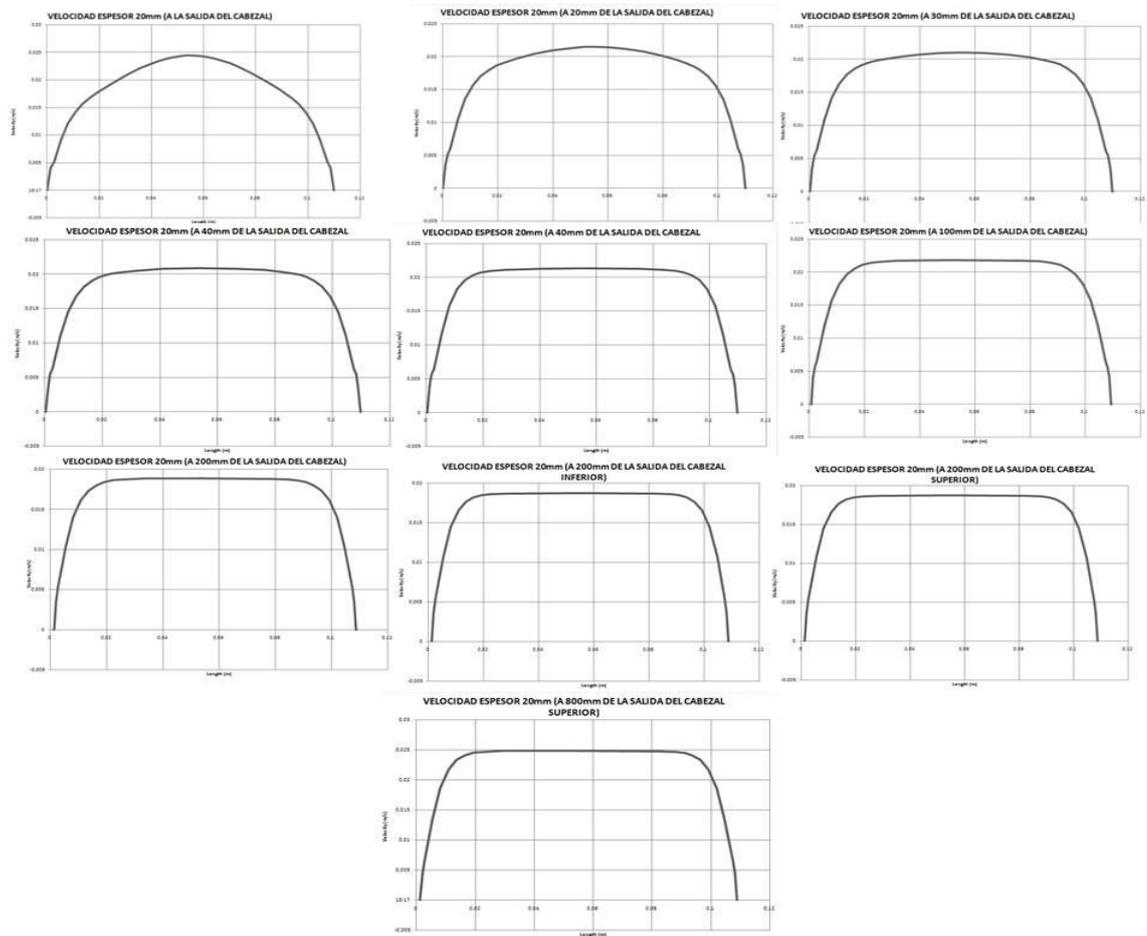


Ilustración 63. Presión y trayectorias de flujo de la masa fundida del rediseño (3)



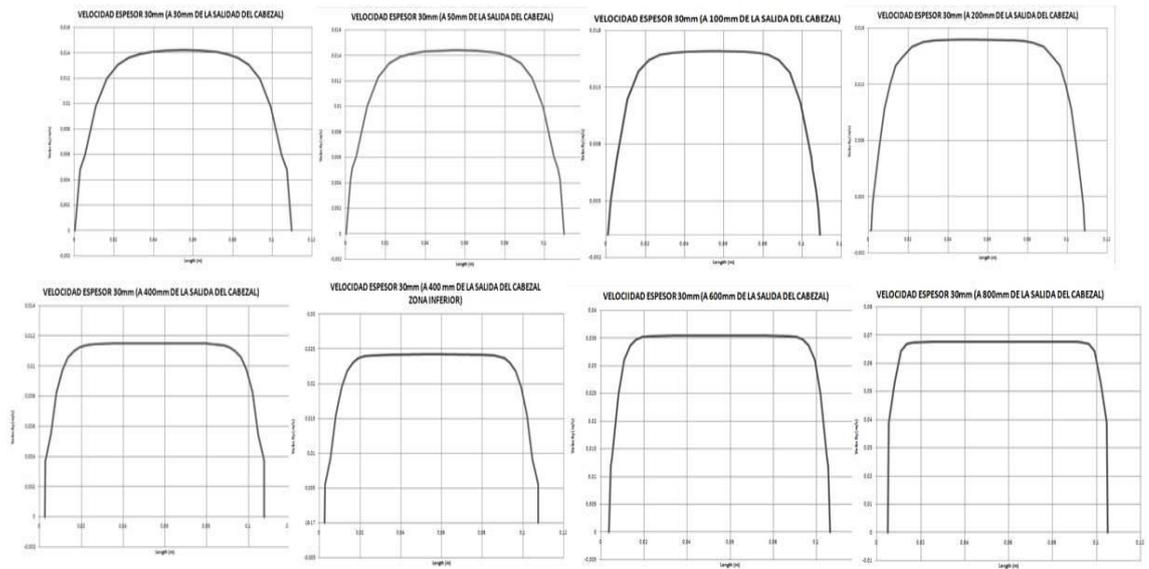
Después de realizar varios rediseños y simulaciones presentados en el Anexo E, los resultados arrojados por el rediseño 3 fueron los mejores haciendo un balance entre velocidad del frente de flujo y la presión. En la Ilustración 63; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra que el cabezal consume una presión de tan solo el 8,64% de lo que sugiere Michaeli [12], sin embargo tiene una velocidad de frente de flujo mucho más pareja que el cabezal de extrusión propuesto en la corporificación, la cual se estabiliza a una distancia de 200mm, como se observa en la Ilustración 64. **Velocidades de frente de flujo a distancias de 20, 30, 40, 50, 100, 200, 200 inferior, 200 superior y 800mm de la salida del cabezal de extrusión del rediseño 3**, donde se realizaron mediciones de velocidad a distancias de 20, 30, 40, 50, 100, 200, 200 inferior, 200 superior y 800mm de la salida del cabezal de extrusión.

Ilustración 64. Velocidades de frente de flujo a distancias de 20, 30, 40, 50, 100, 200, 200 inferior, 200 superior y 800mm de la salida del cabezal de extrusión del rediseño 3



Este mismo ejercicio se realizó con el cabezal de 30mm, y al igual que la anterior presenta una velocidad de frente de flujo muy pareja, con la diferencia de que se demora el doble (mas o menos 400mm) para lograr estabilizarse, sin embargo la homogeneidad del resultado a la salida da garantías de el buen funcionamiento flujo de la masa dentro del canal, las variaciones en velocidad en los extremos se debe a la condición de adherencia del polimero fundido a las paredes del cabezal. Esta evolución del frente se puede observar en la Ilustración 65. **Velocidades de frente de flujo a distancias de 30, 50, 100, 200, 400 inferior, 400 superior, 600 y 800mm de la salida del cabezal de extrusión del rediseño 3**

Ilustración 65. Velocidades de frente de flujo a distancias de 30, 50, 100, 200, 400 inferior, 400 superior, 600 y 800mm de la salida del cabezal de extrusión del rediseño 3



Algunas simulaciones utilizando el material de la mezcla de plasmaco son presentadas en el Anexo E y arrojan resultados prometedores respecto a la presión, pero con velocidades de frente de flujo no homogéneas, en algunos casos creando vórtices a la salida del cabezal.

6.3.2.2. Cálculos de esfuerzos del cuerpo del cabezal

En base a la modelación del rediseño del canal de flujo se realizaron los cálculos de los esfuerzos del cuerpo del cabezal, utilizando el software Solidworks Simulation 2010. El cual fue utilizado también, para calcular los esfuerzos del cuerpo del cabezal de calibración, con el fin de optimizar su diseño y lograr una reducción de costos de los materiales.

Teniendo en cuenta que las presiones arrojadas por la simulación del canal de flujo son muy pequeñas, se utilizó una presión al interior del canal de 3500psi, ya que esta sería una de las presiones más críticas dentro de un proceso de extrusión, y adicionalmente se definieron cargas de temperatura de 200°C en las paredes externas e internas del molde.

Según los resultados mostrados de la

Ilustración 66. Esfuerzos y deformaciones en diferentes momentos del calentamiento del cabezal e Ilustración 67. Puntos críticos de esfuerzos y deformaciones en el cabezal de extrusión, se observa que el esfuerzo máximo que sufre el cabezal cuando es sometido a las presiones y temperaturas mencionadas anteriormente es de 702 MPa, por lo tanto no superan el límite elástico del AISI P20 ni del SAE 1045, garantizando así que el material solo presenta deformaciones temporales de 0,03mm y vuelve a su forma inicial, según la ley de ley de Hooke. Por otro lado hay que tener en cuenta que se

tiene gran factor de seguridad, ya que las presiones que se definieron en el estudio son 1,4 veces mayores a las que sugiere la teoría de cabezales de barras solidas, y mucho mayores a los datos que arrojó la simulación del canal de flujo.

Ilustración 66. Esfuerzos y deformaciones en diferentes momentos del calentamiento del cabezal

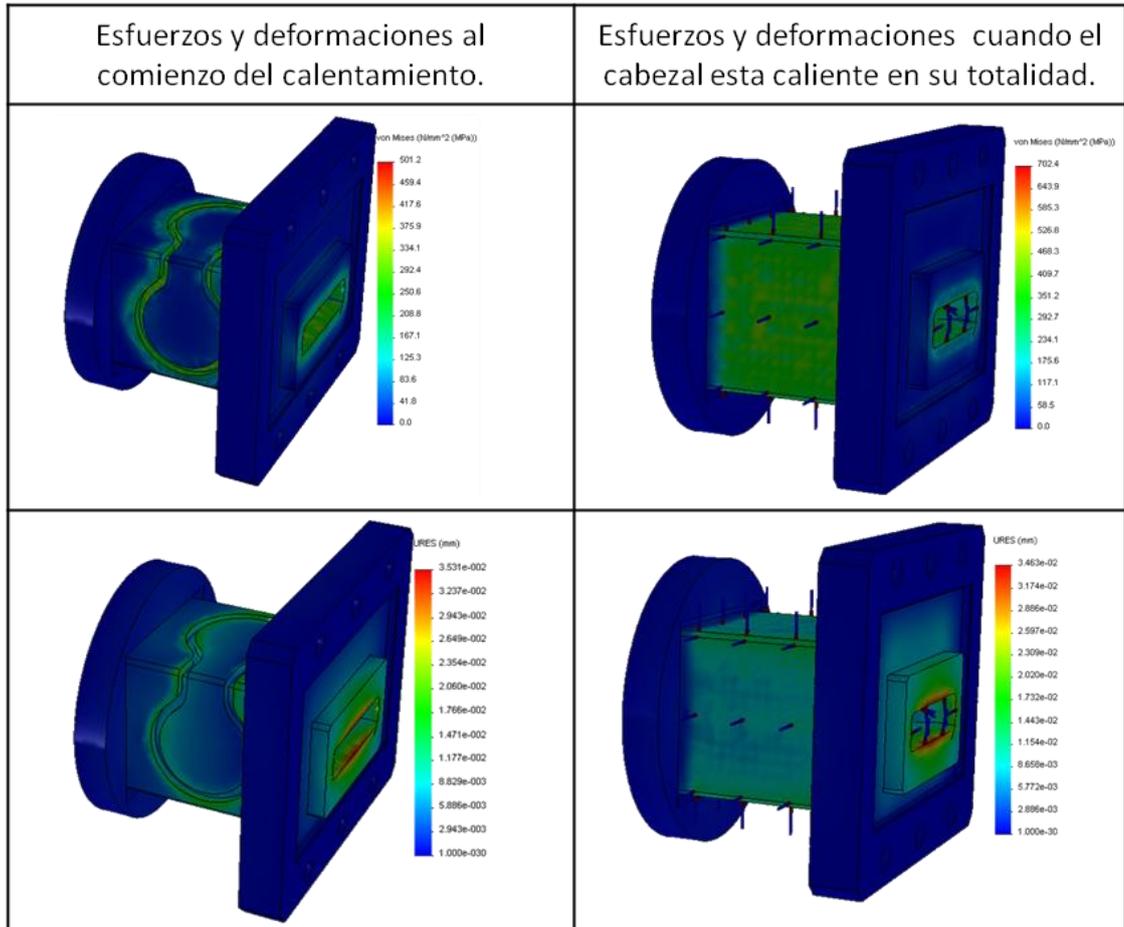
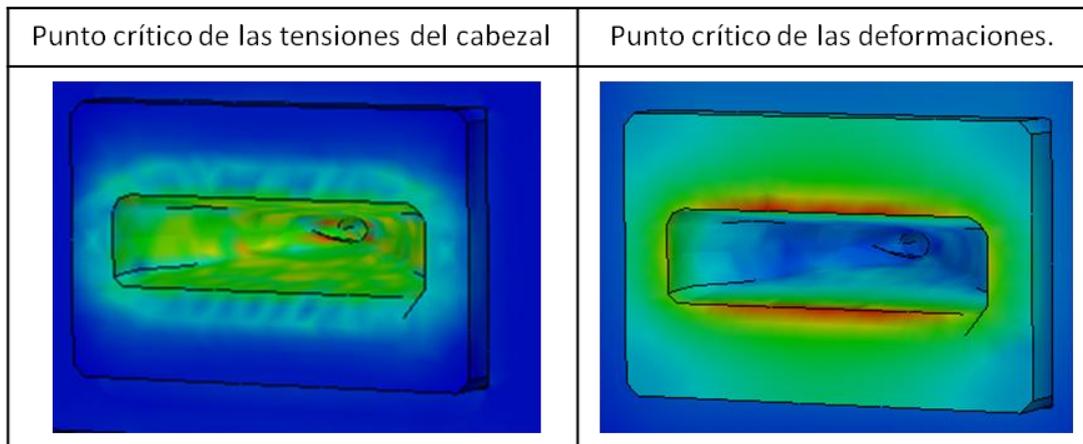


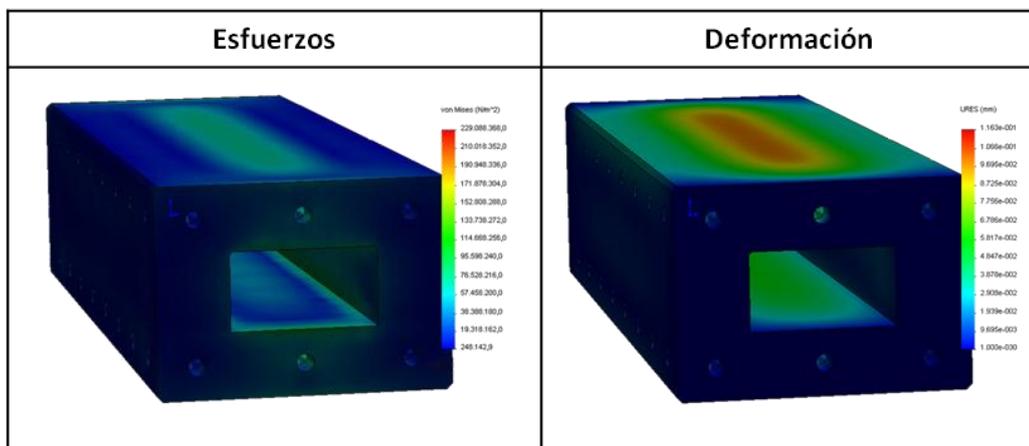
Ilustración 67. Puntos críticos de esfuerzos y deformaciones en el cabezal de extrusión



En la fase de corporificación se le dan dimensiones predeterminadas a los componentes con el fin de aterrizar un poco la alternativa seleccionada del diseño conceptual, sin embargo estas medidas se dan desde la experiencia y no tienen ningún estudio previo. Por esta razón se utilizó el mismo programa de simulación para realizar un estudio estático al cabezal de calibración y obtener criterios que permitan optimizar el diseño. Partiendo de la idea de simular una situación crítica en el proceso al igual que en el cabezal de extrusión, se definió una presión de 3500 psi.

Los resultados de este estudio son presentados en la Ilustración 68. Esfuerzos y deformación en el cabezal de extrusión, y muestran que el cuerpo de la sección de calibración esta sobre dimensionado, ya que la tensión máxima es del orden de 229 MPa, por ende la deformación máxima que se da en el centro del bloque solo es una deformación temporal.

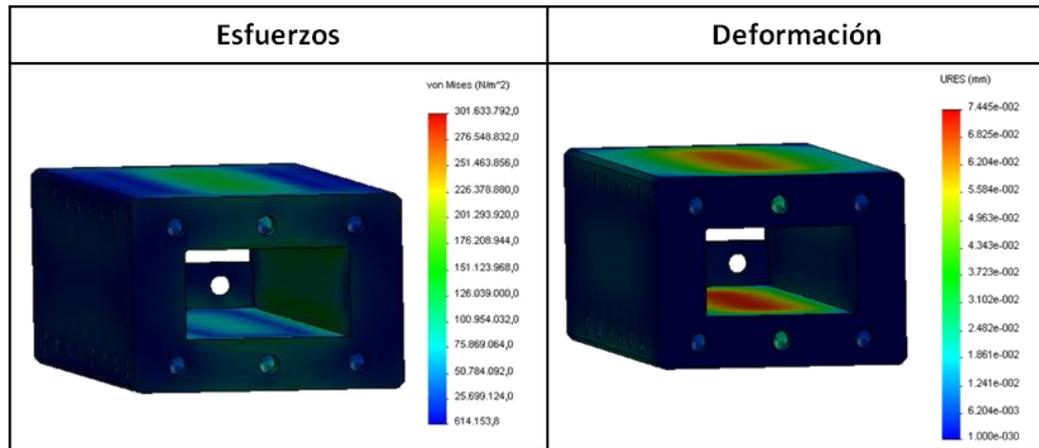
Ilustración 68. Esfuerzos y deformación en el cabezal de extrusión



De acuerdo a los resultados anteriores, se realizó una disminución gradual del espesor hasta llegar a un espesor de pared de 35mm, medida en la que

presenta un esfuerzo máximo de 301 MPa y una deformación de 0,074MPa, pero que no se puede reducir más porque afecta la disposición de los tornillos de sujeción y los canales de refrigeración. Los pasos de esta optimización se encuentran en el Anexo F Y se puede observar el resultado final en la Ilustración 69. Esfuerzos y deformaciones de la optimización de cabezal de calibración .

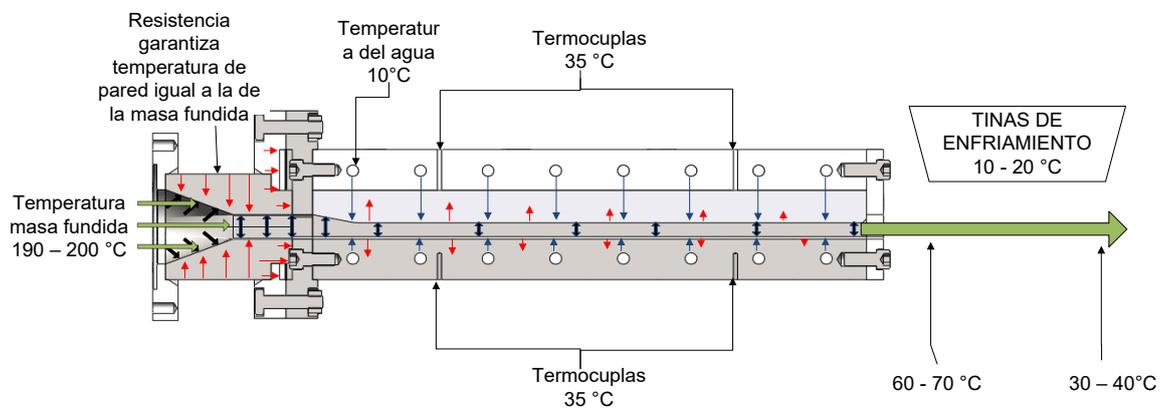
Ilustración 69. Esfuerzos y deformaciones de la optimización de cabezal de calibración



6.3.2.3. Cálculos térmicos

Para la realización de los cálculos térmicos del cabezal del sistema se partió de unas condiciones preliminares del proceso que se muestran en las cuales se plantearon en base a los resultados del perfil de temperatura de la mezcla y a ensayos prácticos realizados en la empresa Plasmaco, expuestas en el Anexo G, que se realizaron con el objetivo de determinar la temperatura de solidificación y desmolde del perfil.

Ilustración 70. Condiciones térmicas iniciales del proceso



- Cálculos sistema de calefacción:

El flujo de calor entregado al sistema para mantener las paredes del cabezal de extrusión a la temperatura indicada para que la masa fundida pueda ser conducida suavemente, es generado por cuatro resistencias tubulares que van alojadas en una ranura que se maquinará en los bloques del cabezal, según los resultados del análisis realizado en el diseño conceptual.

Para realizar el diseño y el cálculo de las resistencias, se pidió asesoría a la empresa Resiluz, ya que ésta ha sido proveedora de Plasmaco hace varios años y se tiene plena confianza en la calidad y eficiencia de sus productos. El señor Edgar Henao, representante de ventas de la compañía, acompañó y asesoró personalmente esta fase del proyecto definiendo para las caras superiores una potencia de 590W y para las laterales una potencia de 570W, debido a la diferencia en la longitud total del perímetro de cada resistencia.

Ya que se tomo un factor de potencia por centímetro lineal de 16 W/cm, valor que está en el rango (15 a 18W/cml) para resistencias empotradas, y que la potencias en (W) es igual a la longitud por el factor de potencia por centímetro lineal.

Por lo tanto se tiene que:

Potencia de la Resistencia A = 37 cm x 16 W/cm = 592 W

Potencia de la Resistencia B = 35.5 cm x 16 W/cm = 570 W

- Cálculos del sistema de enfriamiento.

Existen varios modelos matemáticos para realizar el cálculo de la transferencia de calor que ocurre en un cabezal de extrusión, los cuales fueron implementados para realizar los cálculos de la longitud del canal de calibración y se presentan en el Anexo H. En primera medida, se trabajó con el modelo propuesto por Michaeli, tomando como referencia algunos valores que sugiere el libro, por ejemplo el $\delta = Biot. \cot(\delta)$ se tomo igual a pi medios, sin embargo este arroja datos que no son coherentes. Por lo que se intento trabajar un modelo para moldes de inyección que propone Menges, que solo toma el término conductivo, y así calcular el tiempo de enfriamiento, pero por el gran espesor del perfil y la baja difusividad térmica de los componentes de la mezcla, da como resultado una longitud hasta de 10m.

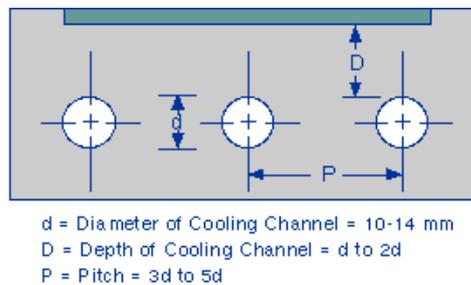
Por lo tanto se recomienda determinar el largo de la zona de calibración por medio de métodos experimentales. Un acercamiento a esto se puede ver en el Anexo G, en el que se presentan los datos de dos ensayos que miden la temperatura de desmolde del perfil, dando como resultado que en dos minutos

la tabla puede ser desmoldada y que en más o menos tres minutos y medio se tiene el perfil a una temperatura aceptable de solidificación de 70°C.

Para el cálculo del diámetro del canal de enfriamiento se trabajó con la fórmula presentada en el Anexo H, la cual relaciona la presión el flujo el diámetro y las pérdidas de todo el circuito, esta dio como resultado un diámetro de canal de 15,88mm.

Para la distribución de los canales a lo largo del perfil, se trabajo con la regla del pulgar **Ilustración 71. Esquema de distribución de los canales de enfriamiento**, que aconseja que para el acero se debe dejar un diámetro de profundidad del canal, y se trabajó con el paso máximo del canal igual a cinco diámetros.

Ilustración 71. Esquema de distribución de los canales de enfriamiento



Para dimensionar tina de enfriamiento se tuvo el apoyo de la empresa especialista en sistemas de aspersión y enfriamiento, *Spraying de Colombia S.A*, la cual por medio de su software interno y basándose en las propiedades de la mezcla sugiere que la tina tenga una longitud mínima de cuatro metros para cumplir con las condiciones de temperatura de entrada y salida del material.

Como recomendación, en base a los resultados obtenidos y las sentencias dadas por Rawendal y Gils⁶, se recomienda utilizar los resultados obtenidos en esta fase como datos de entrada a métodos prácticos de ensayo y error que los puedan avalar. Ya que dadas las condiciones de la mezcla de materiales y la fabricación de madera plástica en la empresa Plasmaco, se refuerza la idea de

⁶ “Un buen diseñador de cabezales, puede maquinar la forma correcta del dado para producir el perfil deseado, en tres o cuatro cortes o modificaciones, mientras que un diseñador de cabezales inexperto, deberá maquinar siete u ocho cabezales para obtener el perfil deseado.” (Gils, 2005 p. 476)

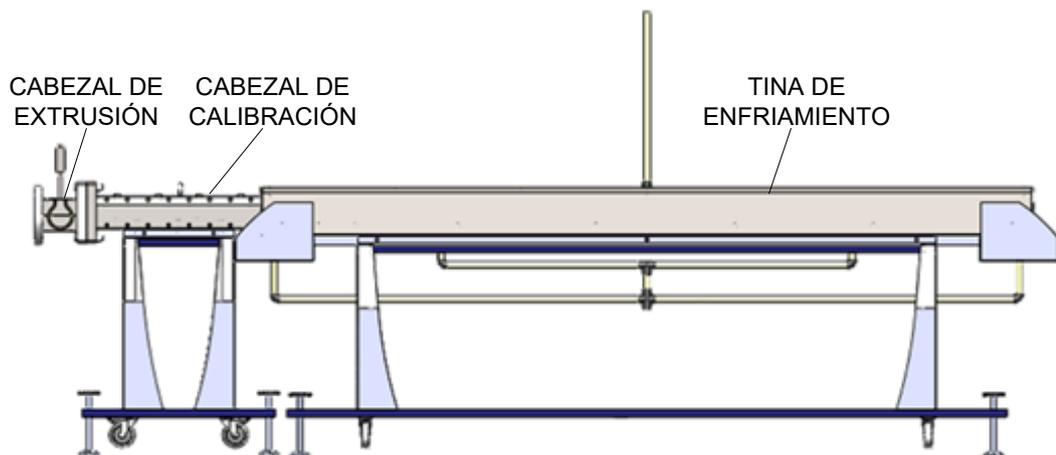
“Es difícil de predecir como el canal de flujo del cabezal debe ser formado para mantener la forma deseada en el producto extruido. Esta es una importante razón porque el diseño de cabezales es algunas veces basado más en la experiencia que en los cálculos de ingeniería. Con la llegada de técnicas numéricas más exactas y software de análisis de flujo del cabezal comerciales, esta situación cambia: sin embargo, el diseño de cabezales es todavía un proceso de ensayo y error”. (Rauwendaal, 1998. p. 15)

que el diseño de un cabezal de extrusión va muy ligado a la experiencia del diseñador, dado que la tecnología y programas computacionales disponibles hoy en día no permiten llegar a realizar todos los cálculos de ingeniería requeridos en el proceso, por lo que los conocimientos de quien lo realiza resultan determinantes.

9. DISEÑO DE DETALLE

Según los análisis y resultados arrojados en la fase de diseño preliminar el diseño sufrió las siguientes modificaciones: Cambio de la geometría del canal de flujo, reducción de materiales en el cabezal de extrusión, disposición de los componentes del sistema de enfriamiento, los cuales se detallan en el desarrollo de esta fase.

Ilustración 72. Disposición final de los componentes del sistema



En la Ilustración 73. **Modificación en la entrada de la tina de enfriamiento** Se muestra la disposición final de los componentes del sistema, donde se observa una modificación a la configuración que se tenía en la corporificación, ya que la punta del cabezal de calibración se introdujo en la tina de enfriamiento, con el objetivo de no tener interrupciones en el proceso de enfriamiento del perfil, como se muestra en la siguiente figura.

Ilustración 73. Modificación en la entrada de la tina de enfriamiento

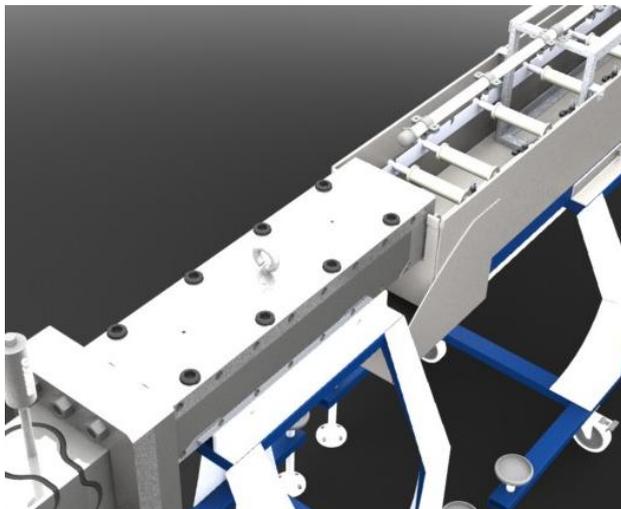
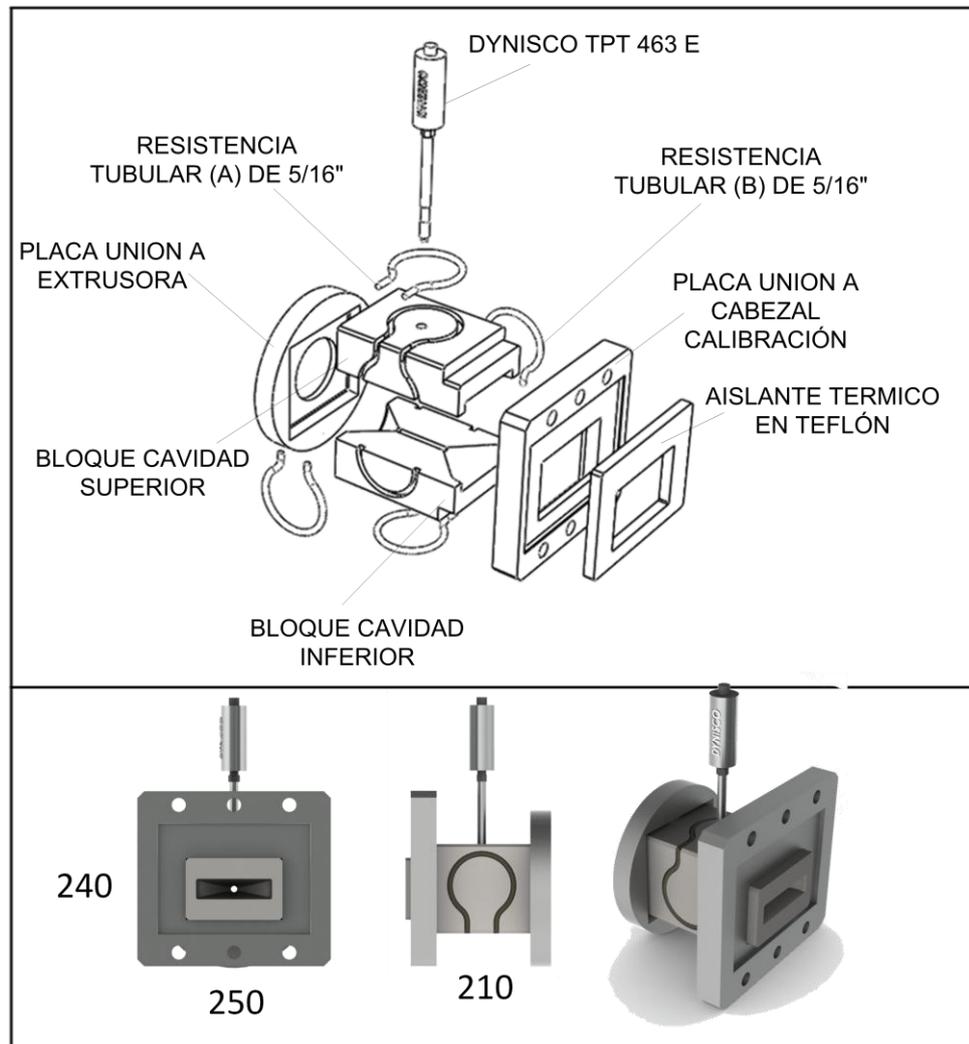


Ilustración 74. Componentes del cabezal de extrusión

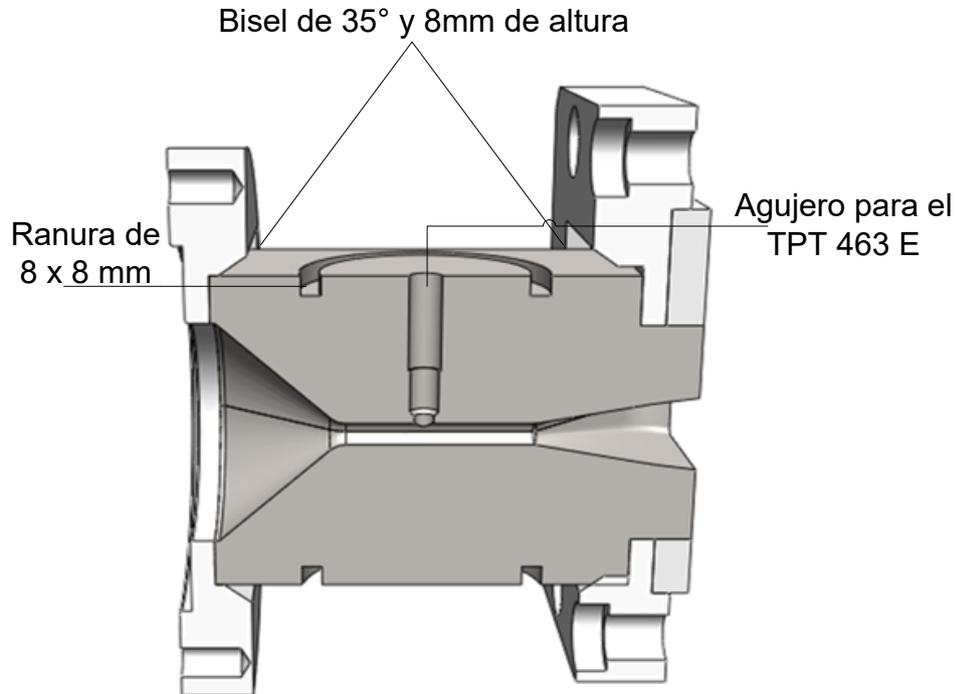


En la Ilustración 74. Componentes del cabezal de extrusión se muestra la configuración final del cabezal de extrusión, que está compuesto por cuatro bloques principales, dos bloques con el mecanizado del canal de flujo en AISI P20, y dos placas para las uniones con la extrusora y el cabezal de calibración en SAE 1045. Tiene como accesorios cuatro resistencias tubulares de diámetro 5/16", que se alojan en las ranuras especialmente maquinadas en los bloques de las cavidades y un transductor de presión y temperatura marca DYNISCO, referencia TPT 463 E, que fue recomendado por la empresa Coldedcon quien se encargara de la automatización y control del proyecto.

Los bloques de cabezal están unidos por soldadura TIG, ya que por este método de soldado se obtienen cordones más resistentes, más dúctiles y menos sensibles a la corrosión que en el resto de procedimientos, esta se aloja en un bisel con un ángulo de 35° y una altura de 8mm, preparación recomendada para garantizar una buena unión entre los componentes. Las resistencias requieren un mecanizado de una ranura de 8mm de ancho por 8mm de profundidad según su forma, para que queden totalmente incrustadas,

y para el montaje del transductor de presión se tomo como referencia el manual de instalación, como se muestra en la Ilustración 75. Uniones del cabezal de extrusión.

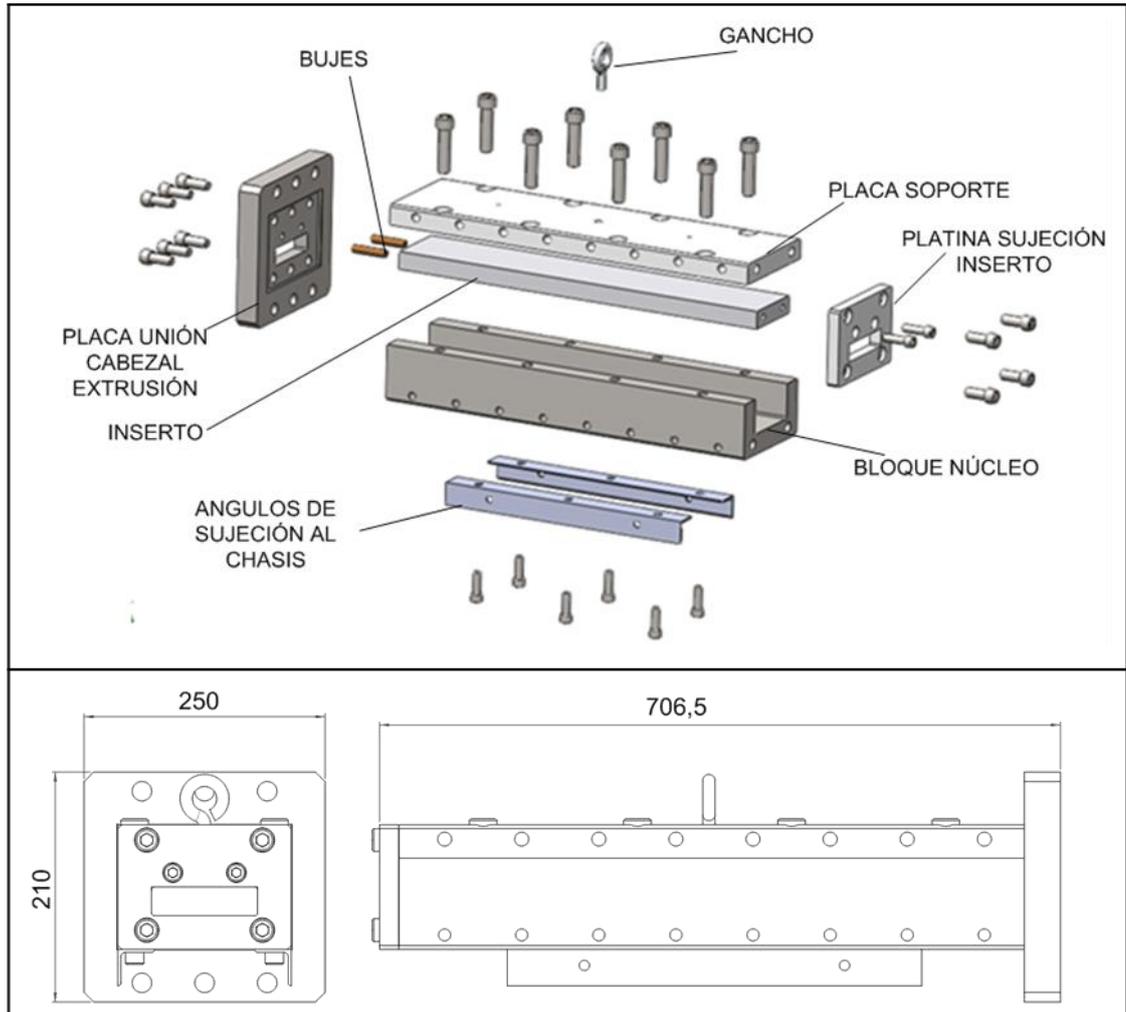
Ilustración 75. Uniones del cabezal de extrusión



El cabezal de calibración está compuesto por cinco bloques: núcleo (AISI P20), placa soporte (SAE 1045), placa de unión con el cabezal extrusión (SAE 1045), inserto (Alumold) y platina de sujeción del inserto (SAE 1045). Adicionalmente tiene 4 termocuplas bayoneta tipo J, dos ángulos de sujeción al chasis, 32 racores OD que conectan las mangueras de los canales de refrigeración, y un gancho para el levantamiento del molde, ya que su peso aproximado es de 93Kg.

Esta configuración se muestra en la Ilustración 76. Componentes del cabezal de calibración.

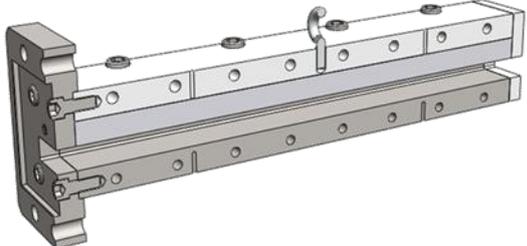
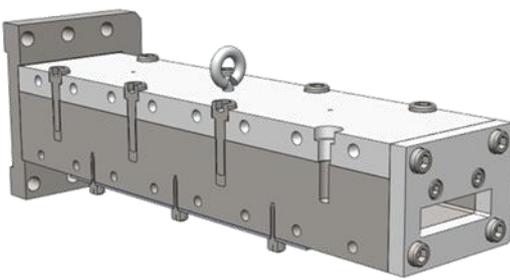
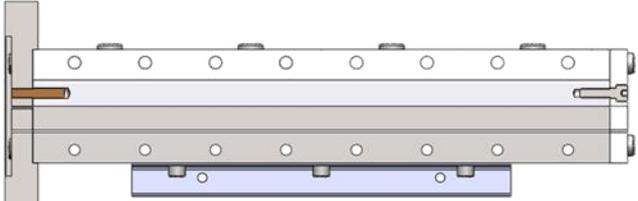
Ilustración 76. Componentes del cabezal de calibración



Los análisis mecánicos del cuerpo del cabezal permitieron definir un espesor de 35mm en las paredes del núcleo y la placa soporte, logrando reducir los costos del material, estos resultados son presentados en el Anexo D.

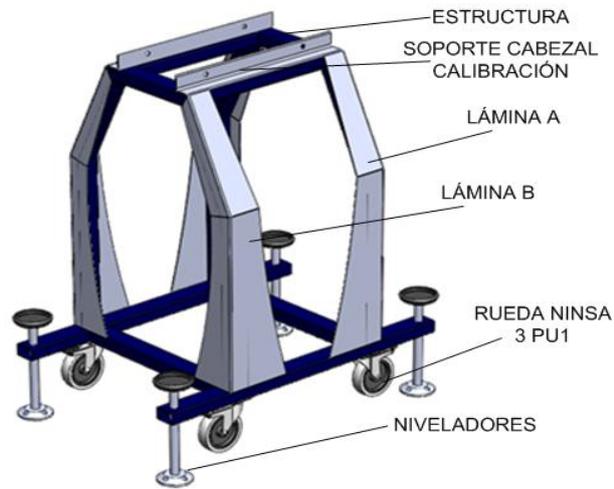
La sujeción de los diferentes componentes del cabezal de extrusión se presenta en la Ilustración 77. Sujeción de los diferentes componentes del cabezal de extrusión.

Ilustración 77. Sujeción de los diferentes componentes del cabezal de extrusión

| | |
|--|--|
|  | <p>Los tornillos de sujeción de todo el cuerpo de calibracon la placa que une el cabezal de calibración con el de extrusión , son tornillos de 5/8" x 2"</p> |
|  | <p>Los tornillos que unen el núcleo con la placa soporte son de 3/4" x 2, los de la placa inserto de 5/8" x 1 1/2 y los de los ángulos de 1/2" x 1 1/2"</p> |
|  | <p>El inserto dentro del cabezal es recibido por dos bujes de bronce y se asegura con la placa con tornillos de 1/2"</p> |

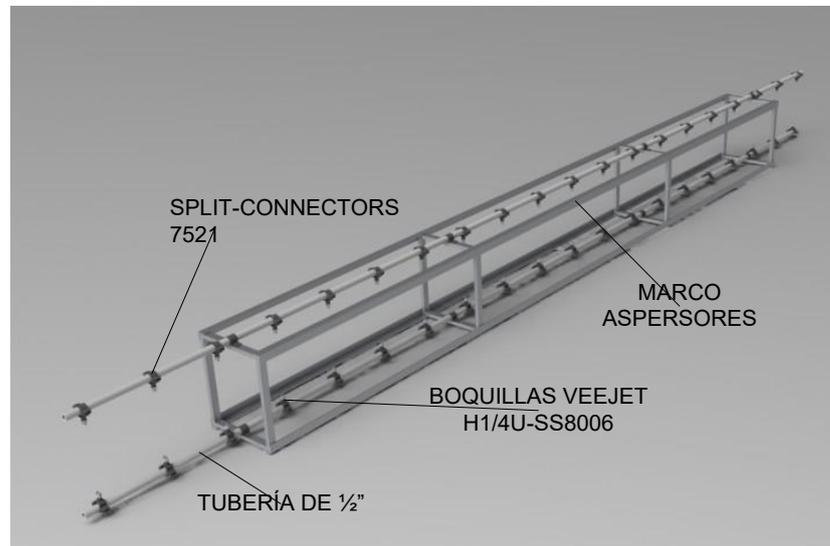
El cabezal esta soportado en un chasis fabricado en tubería negra rectangular de 30 x 50 cl. 14, dos laminas tipo A y dos tipo B, en lamina CR calibre 18, cuatro niveladores de 3/4" x 230mm para fijar la altura del cabezal, dos ruedas giratorias y dos fijas, marca INSA referencia 3PU1 con capacidad de carga de 75 kg cada una y dos ángulos de 1 1/2" que aseguran el chasis al cabezal de calibración por medio de cuatro tornillos de 1/2". Toda la estructura del chasis y las láminas son soldadas con soldadura tipo MIG y son pintadas con dos capas de 20μ de pintura Pintucod gris y azul, como se muestra en la Ilustración 78. Componentes del chasis de calibración.

Ilustración 78. Componentes del chasis de calibración



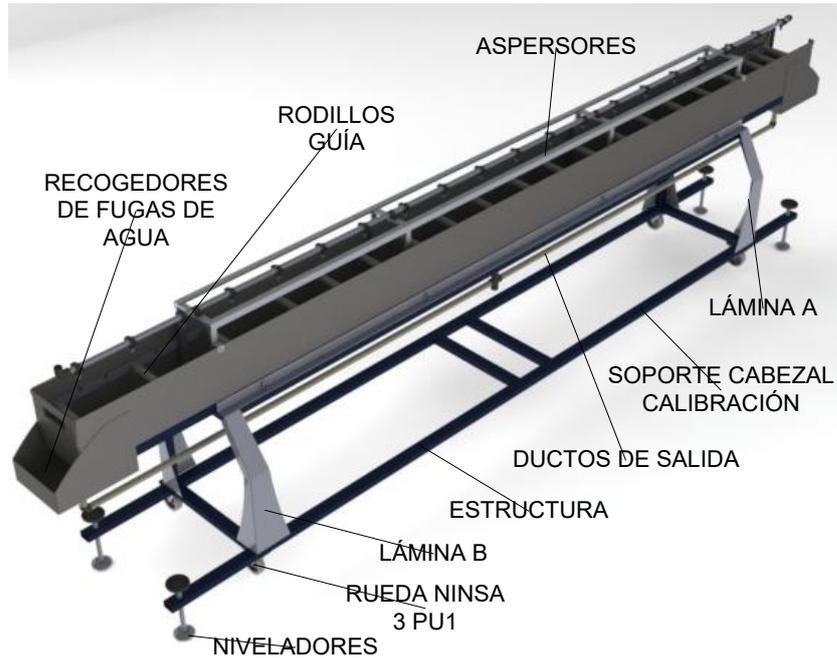
Después de que el perfil sale del cabezal de calibración tiene una temperatura promedio de 100°C, por lo tanto es necesario continuar con el enfriamiento de éste en una tina, que está equipada con 40 boquillas tipo VEEJET H1/4U-SS8006 con un ángulo de aspersión de 80 grados, marca Spraying System, que se ensamblan por medio de el sistema Split-Eyelet Connectors 7521 de la misma marca, en dos tubos de 1/2" uno en la parte inferior y otro en la superior del perfil, fijados por medio de ocho abrazaderas de 1/2" a una estructura construida en perfilería de aluminio, como se muestra en la **Ilustración 79**

Ilustración 79. Ensamble y disposición de las boquillas de aspersión.



La estructura se fija por medio de cuatro chapetas, a una cuba encargada de recibir el agua de los aspersores, la cual se evacua por cuatro tubos de 3/4", dos en adentro de la cuba, y dos en los recipientes ubicados en los extremos para recoger posibles fugas de agua. Todo este conjunto se soporta en un chasis que posee los mismos componentes del chasis del cabezal de calibración como se muestra en la Ilustración 80. Componentes tina de enfriamiento.

Ilustración 80. Componentes tina de enfriamiento



En la **Ilustración 81** se muestran los componentes que van soldados a la cuba, que básicamente son: cuatro herrajes con canales con un paso de de 100 mm para soportar los rodillos; dos recogedores de agua y un marco base en perfilería de 1 ½" x 1/8".

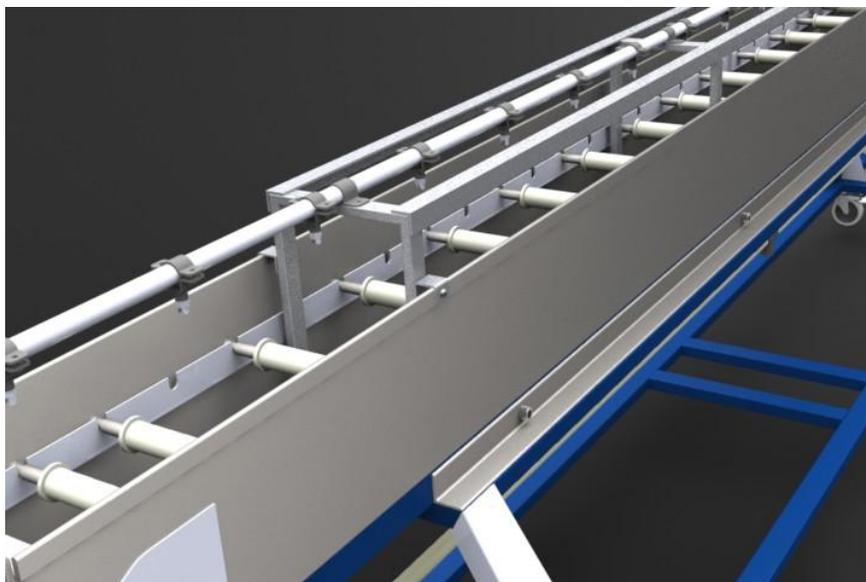
Ilustración 81. Detalle cuba.



Cuando el perfil entra a la tina es recibido por veinte rodillos de Prolón, como se muestra en la **Ilustración 82**, que se encargan de guiarlo y brindarle un flujo

suave dentro de la tina hasta llegar a un empaque de neopreno ubicado en el extremo de la salida para evitar fugas de agua

Ilustración 82. Detalle de sistemas de la tina de enfriamiento



Las dimensiones y el ensamble de los componentes se especifican en los planos de producción, ubicados en el anexo J.

10. CONCLUSIONES

Se reconoce que la madera plástica se elabora a través de procesos empíricos, que generan desperdicio de materia prima y sobrecostos en los procesos productivos, lo cual permite aplicar conceptos de ingeniería en el desarrollo de un sistema de extrusión continua para la producción de tablas en ese material.

Se identificó la aplicabilidad de herramientas de diseño conceptual en el desarrollo de cabezales de extrusión, que facilitan la generación y búsqueda de diferentes alternativas de solución.

Se desarrolló un modelo CAD y posteriormente un análisis CAE, que permitió simular las condiciones reales a las que está sometido el sistema.

Se realizó un diseño final de cabezal con base a los resultados obtenidos durante desarrollo del proyecto, el cual representa una solución técnica al proceso de fabricación de madera plástica.

Se elaboraron planos de taller que describen cada uno de los componentes del sistema (cabezal de extrusión, calibración y tina de enfriamiento), para su posterior fabricación.

11. RECOMENDACIONES

Realizar investigaciones en caracterización, propiedades reológicas y térmicas de materiales plásticos reciclados empleados en la fabricación de madera plástica.

Promover la aplicación de herramientas y software para la simulación de procesos de extrusión que empleen mezcla de materiales reciclables.

Realizar ensayos experimentales que permitan confrontar los resultados computacionales arrojados por las herramientas de software y simulación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASKELAND R Donald CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES. CHILE: Internacional Thomson, 1998. ISBN 0-534-93423-4
- [2] BALART, Rafael, LOPEZ, Juan, GARCIA, David y PARRES, Francisco. Técnicas experimentales de análisis térmico de polímeros. Universidad Politécnica de Valencia. 2003
- [3] BODINI, Gianni y CACCHI, Pessani. Moldes y máquinas de inyección para la transformación de termoplásticos. Tomo1. México, Segunda edición, Ed. McGRAW-HILL, 1992.
- [4] CORANTIOQUIA Y AREA METROPOLITANA. Plan de gestión integral de residuos sólidos regional. Resumen ejecutivo. 2005-2020
- [5] CROSS, Nigel. Métodos de diseño. Estrategias para el diseño de producto. Ed. Limusa wiley, 1999.
- [6] DYM, Clive y LITTLE, Patrick. Engineering Design. A project-based introduction. Tercera edición. Estados Unidos de América. John Wiley and sons. 2009.
- [7] GILES, Harold F. Jr.; WAGNER, John R. Jr. y MOUNT, Eldridge. Extrusion - The Definitive Processing Guide and Handbook. William Andrew Publishing/Plastics Design Library. 2005.
- [8] GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Editorial Pearson. México. 1997
- [9] HENSEN, Friedhelm. Plastics extrusion technology. Alemania, Hanser Publisher, 1988.
- [10] KALPAKJIAN, Smith. Manufactura, ingeniería y tecnología. México, Cuarta edición, Editorial Pearson education, 2002.
- [11] MARK, James E. Physical Properties of Polymers Handbook. Segunda edición, Ed. Springer, Cincinnati. 2007
- [12] MICHAELI, Walter. Extrusion dies for plastics and rubber. Alemania, Hanser Publisher, 1992.
- [13] MORTON, Jones. Procesamiento de plásticos. México, Editorial Limusa, 2007.
- [14] MENGES, Georg, MICHAELI, Walter y MOHREN, Paul. How to make injection molds. Cincinnati, tercera edición, Ed. Hanser, 1999.

- [15] NORIEGA, María del Pilar. Curso de Introducción a la Extrusión de Termoplásticos. Edición del ICIPC Medellín, Colombia, 1996.
- [16] PAHL, Gerhard y BEITZ, Wolfgang. Engineering Design. Berlin. 1977.
- [17] PLASTIVIDA (2006). Manual de valorización de los residuos plásticos. <http://www.ecoplas.org.ar/pdf/11.pdf> (20 mayo, 2010)
- [18] PRODUCOL S.A. MADERA PLÁSTICA. Productos. Costa Rica. (Citada: 24 oct. 2009) < <http://www.producol.net/productos/> >.
- [19] RAMOS, Luis Francisco. Extrusión de plásticos principios básicos. México, Editorial Limusa, 1993.
- [20] RAO, Natti S. Design Formulas for Plastics engineers. Ed. Hender Munich. 1991
- [21] RAUWENDAL, Chris. Polymer Extrusion. Tercera edición. Alemania, Hanser Publisher, 1994.
- [22] ----- . Understanding Extrusion. Estados Unidos, Tercera edición, Hanser Publisher, 1998.
- [23] ULRICH, Karl T. y EPPINGER, Steven D. Product Design and Development, Tercera edición, McGraw-Hill, 2004.
- [24] VARGAS M., Alejandra. En el país se fabrica „madera“ a partir de desechos plásticos. En: La nación, San José, Costa Rica, 01, septiembre, 2009, p. 16.
- [25] WHELAN, Tony. y DUNNING, David. Dynisco extrusion processors handbook. Dynisco Inc, 1988.