

**TERMOFORMADORA AL VACIO ALIMENTADA POR
RODILLO. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN**

JAIRO ERNESTO ESPAÑA JURADO

JUAN CARLOS DELGADO SANABRIA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2005**

**TERMOFORMADORA AL VACIO ALIMENTADA POR
RODILLO. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN**

JAIRO ERNESTO ESPAÑA JURADO

JUAN CARLOS DELGADO SANABRIA

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
OMAR A. GÉLVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2005**

Nota de Aceptación:

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, 22 de Agosto de 2005

DEDICATORIA

A mis padres por su apoyo incondicional y paciencia durante todo este tiempo.

A mis amigos por todos los buenos momentos.

A Marly por creer siempre en mi.

A Juan Carlos por su esfuerzo y ayuda en este proyecto.

A todos aquellos que de alguna forma han hecho posible que esto se haga realidad.

Jairo E.

DEDICATORIA

A mis padres José del Carmen y
Araminta por su apoyo y
comprensión incondicional.

A mis grandes amores Cristian y
Lucy, por ser la luz que me guía.

A mis hermanos Constantino,
Jairo, Zenaida, Saturio y Luz
Stella, que con sus esfuerzos y
apoyo fue posible la realización de
este proyecto.

A Jairo por su ayuda
incondicional.

A todos aquellos quienes
colaboraron en la construcción.

Juan Carlos.

AGRADECIMIENTOS

A Carlos Forero por sus invaluable consejos y ayuda en la construcción de la máquina. A nuestro director Omar Gélvez por su colaboración. Al profesor Expedito Lozano por su ayuda incondicional. A Constantino Delgado por su apoyo económico. A la Universidad y especialmente a los profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica por compartir su conocimiento a lo largo de estos años.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
1. INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES PLÁSTICOS	3
1.1. POLIMEROS	3
1.2. RESINAS BASE TERMOPLÁSTICA	3
1.3. TÉCNICAS DE MOLDEO DE LOS PLÁSTICOS	7
1.3.1 Moldeo a alta presión	8
1.3.2 Moldeo a baja presión	10
2. EL TERMOFORMADO	12
2.1. RESEÑA HISTORICA DEL PROCESO DE TERMOFORMADO	12
2.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL TERMOFORMADO	13
2.3. PIEZAS FABRICADAS POR TERMOFORMADO	14
3. DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL PROCESO DE TERMOFORMADO	19
3.1. LAMINAS	19
3.1.1 Tamaño de láminas y materiales	21
3.1.2 Propiedades de los materiales y como se relacionan con el termoformado	21
3.1.3 Materiales termoplásticos y tipo de láminas termoplásticas	23
3.2. MECANISMOS DE SUJECIÓN	24
3.3. SISTEMAS DE CALENTAMIENTO	25
3.4. TÉCNICAS DE FORMADO	29
3.4.1 Termoformado por Igualación de Molde Macho-Hembra	29
3.4.2 Formación Posterior	30
3.4.3 Termoformado por Soplado con Aire	30
3.4.4 Termoformado por vacío	31
3.4.4.1 Formación directa al vacío	32
3.4.4.1.1 Formación directa al vacío en moldes hembra	32
3.4.4.1.2 Formación directa al vacío sobre moldes macho	33
3.4.4.2 Termoformado libre al vacío	33
3.4.4.3 Forma Macho Forzado sobre la lámina	34
3.4.4.4 Termoformado al vacío por revestimiento	35
3.4.4.5 Formado al vacío con embutido auxilia	37
3.4.4.6 Termoformado al vacío con aire atrapado	38
3.4.4.7 Formado al vacío con amortiguamiento de aire	40
3.5. MOLDES	41

3.5.1 Elección del tipo de técnica de formado	41
3.5.2 Criterios para el diseño de productos termoformados	42
3.5.3 Consideraciones en el diseño de moldes de termoformado	43
3.5.4 Tipos de moldes	44
3.5.4.1 Molde hembra	44
3.5.4.2 Molde macho	45
3.5.4.3 Molde machi-hembra	46
3.5.5 Adelgazamiento del espesor del material	46
3.5.6 Encogimiento y tolerancias dimensionales	47
3.5.7 Apariencia del molde	48
3.5.8 Orificios de vacío	48
3.5.9 Temperatura del molde	49
3.5.10 Materiales empleados en la fabricación de moldes de termoformado	50
4. MAQUINAS DE TERMOFORMADO	54
4.1. TERMOFORMADORA ALIMENTADA POR LAMINA	54
4.2. TERMOFORMADORA ALIMENTADA POR RODILLO	55
5. PASOS DEL PROCESO DE TERMOFORMADO	56
5.1. SUJECIÓN DE LA LÁMINA	56
5.2. CALENTAMIENTO DE LA LAMINA	56
5.3. FORMADO	59
5.4. ENFRIAMIENTO	60
5.5. CORTE	61
6. CALCULO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS	62
6.1. SISTEMA DE CALENTAMIENTO	63
6.1.1 Elección del modo de calentamiento	63
6.1.2 Tipo de lámina	64
6.1.3 Área del calentador	65
6.1.4 Temperatura de la superficie radiante	65
6.1.5 Características del calentador	72
6.2. SISTEMA DE VACIO	72
6.2.1 Selección de la bomba de vacío	74
6.2.2 Cálculo del tanque de vacío	76
6.3. SISTEMA DE TRANSPORTE	78
6.3.1 Selección de la cadena	78
6.3.2 Selección del motor	79
6.4. SISTEMA DE SUJECIÓN Y CORTE	80
6.4.1 Selección de los actuadores neumáticos	82
6.4.2 Corte	83
6.5. MOLDE	84
6.6. SISTEMA DE CONTROL	85

6.6.1	Tablero de control	86
6.6.2	Control de avance de lámina	86
6.6.3	Control de temperatura	87
6.6.4	Control de presión de vacío	87
6.6.5	Control de prensado y corte	88
6.6.6	Control de formado	88
7.	DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DE LA TERMOFORMADORA	89
7.1.	MANUAL	
7.2.	AUTOMATICO	89
8.	PIEZAS FORMADAS	94
9.	ANÁLISIS ECONOMICO	96
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
	BIBLIOGRAFIA	102
	ANEXOS	103

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Nombres de termoplásticos analizados en las figura 1, 2 y 3	5
Tabla 2. Tipo de láminas termoplásticas usadas para termoformado	23
Tabla 3. Tipos de calentadores radiantes	26
Tabla 4. Temperaturas de procesamiento de algunos termoplásticos para termoformado (°F)	28
Tabla 5. Diferencias básicas entre el proceso de inyección y el de termoformado	42
Tabla 6. Materiales empleados en moldes de termoformado	51
Tabla 7. Propiedades de algunos termoplásticos usados en termoformado	64
Tabla 8. Factores de visión a diferentes distancias	68
Tabla 9. Variación de la temperatura con el tiempo para una distancia entre lámina y calentador de 10 cm	71
Tabla 10. Presupuesto de inversión	96
Tabla 11. Presupuesto de operación	98
Tabla 12. Presupuesto de ingresos	99

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curvas de esfuerzo vs. Elongación correspondientes a diversos termoplásticos	6
Figura 2. Curvas de resistencia a la tensión vs. Temperatura de algunos termoplásticos	6
Figura 3. Módulo de elasticidad E en función de la temperatura de algunos termoplásticos	7
Figura 4. Máquina inyectora	9
Figura 5. Máquina extrusora de plástico	9
Figura 6. Algunos productos de la extrusión	9
Figura 7. Empaques y productos conformados por termoformado	10
Figura 8. Termoformadora de línea	10
Figura 9. Aislamiento termo acústico para una construcción	11
Figura 10. Muestra de rodillos que se usan en el proceso de calandrado	11
Figura 11. Diferentes tipos de empaque en la industria del termoformado	14
Figura 12. Portacomidas	15
Figura 13. Diferentes tipos de empaques para alimentos	15
Figura 14. Guarda barras para tractor y Parachoques	16
Figura 15. Gabinete de televisor	17
Figura 16. Vasos	17
Figura 17. Recipientes utilizados en la industria medica y cubierta de un equipo de rayos x	17
Figura 18. Termoformado por igualación de molde macho hembra	30
Figura 19. Formación posterior	30
Figura 20. Soplado con aire	31
Figura 21. Termoformado por vacío	31
Figura 22. Formación directa al vacío sobre molde hembra	32
Figura 23. Formación directa al vacío sobre molde macho	33
Figura 24. Termoformado libre al vacío	34
Figura 25. Forma macho forzado sobre la lámina	35
Figura 26. Forma macho forzado sobre la lámina con vacío en el molde	35
Figura 27. Termoformado al vacío por revestimiento	36
Figura 28. Formado al vacío con embutido auxiliar	38
Figura 29. Termoformado al vacío con aire atrapado	39
Figura 30. Formado al vacío con amortiguamiento de aire	41
Figura 31. Molde hembra básico y distribución de material para una pieza moldeada con molde hembra	45

Figura 32. Molde macho básico y distribución de material para piezas con molde macho	45
Figura 33. Moldeo con molde machi-hembra	46
Figura 34. Ejemplo de adelgazamiento del espesor del material	47
Figura 35. Superficies de molde en el termoformado	48
Figura 36. Orificios de vacío y mesa de vacío rellena con pelotas	49
Figura 37. Algunos sistemas de refrigeración del molde	50
Figura 38. Máquina termoformadora de plataforma de estación simple	54
Figura 39. Termoformadora manual	55
Figura 40. Ejemplo de termoformadoras alimentadas por rodillo	55
Figura 41. Ejemplo del perfil de calentamiento de una lámina	57
Figura 42. Ejemplo de perfil de calentamiento de lámina: gradiente de temperatura a través del espesor	58
Figura 43. Subsistemas de la termoformadora	62
Figura 44. Representación del horno	63
Figura 45. Circuito análogo para radiación en un recinto cerrado compuesto de dos superficies grises conectadas por una superficie reirradiante	66
Figura 46. Factor de forma de rectángulos directamente opuestos	67
Figura 47. Factor de forma de rectángulos adyacentes en planos perpendiculares que comparten un borde común	68
Figura 48. Calentamiento de la lamina para un instante de tiempo	68
Figura 49. Vista exterior e interior del horno	72
Figura 50. Sistema de vacío	73
Figura 51. Bomba de vacío, filtros y tanque de vacío	73
Figura 52. Válvulas estranguladora y direccional	74
Figura 53. Conexión de la manguera principal a las mangueras que conectan a la mesa	74
Figura 54. Mangueras de vacío conectadas a la mesa	74
Figura 55. Mesa de vacío	74
Figura 56. Tanque de vacío	76
Figura 57. Dimensiones del tanque	76
Figura 58. Valores del factor A que se usan en las fórmulas de recipientes sometidos a presión externa	77
Figura 59. Valores del factor B que se emplea en las fórmulas para recipientes sujetos a presión externa	78
Figura 60. Cadena de transporte con púas	79
Figura 61. Motor y transmisión de cadena	79
Figura 62. Alimentación de plástico	80
Figura 63. Pisadores y tensor de lámina	80
Figura 64. Circuito neumático de sujeción y corte	81
Figura 65. Prensa	83
Figura 66. Esquema del corte	83

Figura 67. Módulo de doble marco para el corte	83
Figura 68. Molde hembra para la fabricación de platos y vasos	84
Figura 69. Detalle del molde con los agujeros	85
Figura 70. PLC	85
Figura 71. Tablero de control	86
Figura 72. Variador de velocidades	87
Figura 73. Display del pirómetro	87
Figura 74. Termocupla	87
Figura 75. Vacuóstato	87
Figura 76. Actuador y Sensores de posición	88
Figura 77. Tablero del circuito neumático	88
Figura 78. Válvula 2/2 para control del vacío	88
Figura 79. Posición inicial de la lámina	90
Figura 80. Lámina en la primera zona de calentamiento	91
Figura 81. Lámina en la segunda zona de calentamiento	91
Figura 82. Lámina en la tercera zona de calentamiento	91
Figura 83. Prensado de la lámina	92
Figura 84. Formado de la lámina	92
Figura 85. Despresado de la pieza formada	93
Figura 86. Piezas fabricadas con molde macho con altura mayores a 3cm	94
Figura 87. Piezas fabricadas con molde macho de alturas bajas y radios Grandes	94
Figura 88. Piezas fabricadas con molde hembra	95
Figura 89. Punto de equilibrio	99

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Bomba de vacío	103
ANEXO B. Tabla de capacidad, cadena estándar sencilla de rodillos N° 40 paso ½"	105
ANEXO C. Grafcet y GEMMA del funcionamiento de la máquina	106
ANEXO D. Programa termoformadora	109
ANEXO E. Planos eléctricos termoformado	110
ANEXO F. Planos generales termoformadora	114

TITULO:

TERMOFORMADORA AL VACIO ALIMENTADA POR RODILLO, DISEÑO Y CONSTRUCCION.*

AUTORES: JAIRO ERNESTO ESPAÑA JURADO.
JUAN CARLOS DELGADO SANABRIA. **

PALABRAS CLAVES:

Temoformado, temoconformado, vacío, plásticos, formado plásticos, control automático.

CONTENIDO:

Este trabajo surge de la necesidad de construir una máquina económica y versátil, con un nivel de producción aceptable, destinada a los microempresarios de la industria del procesamiento del plástico. El diseño fue dividido en varios sistemas dependiendo de los pasos del proceso, como son la sujeción de la lámina, calentamiento, prensado, formado y corte. Para cada uno de estos se hizo la selección y diseño de cada una de sus partes.

Este tipo de termoformadora es de alimentación continua, siendo empleada en medianas y grandes producciones de artículos plásticos. Para el transporte de la lámina son utilizadas cadenas con púas que la sujetan por los costados durante su calentamiento, para luego llevarla a la estación donde es formada y cortada. La máquina cuenta con un calentador de resistencias eléctricas, dividido en tres zonas de calentamiento que proporcionan al momento de calentar la lámina un mayor tiempo y menor intensidad. La fuerza de formado es ejercida por una bomba de vacío que actúa sobre un tanque de almacenamiento permitiendo trabajar con una bomba más pequeña. El prensado y corte de la lámina es efectuado por medio de actuadores neumáticos que sujetan la lámina firmemente mientras esta es formada.

La máquina cuenta con un sistema de control que permite su operación en dos modos de funcionamiento, como son manual y automático; el manual es utilizado para probar el funcionamiento de los diferentes sistemas y el automático es ejercido por un PLC, en donde dependiendo de los tiempos de ciclo y material utilizado es programada la secuencia de trabajo. Para las pruebas de funcionamiento de la máquina el plástico utilizado fue el PET y se fabricó un molde de platos para torta y vasos coperos en resina poliéster, obteniéndose piezas de buena calidad.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. OMAR GELVEZ A.

TITLE:

VACUUM THERMOFORMER ROLL FED, DESIGN AND CONSTRUCTION *

AUTHORS: JAIRO ERNESTO ESPAÑA JURADO.
JUAN CARLOS DELGADO SANABRIA. **

KEY WORDS:

Thermoforming, vacuum, plastics, plastics forming, automatic control.

CONTENT:

This work rise of the necessity to make a cheap and versatile machine, with a acceptable production level, destined to the small impresarios from the industry of plastic processing. The design was divide in various systems in some systems depending to the process steps, like are the sheet clamping, heating, pressing, forming and cutting. For each one of this was do the selection and design of each ones of its parts.

This kind of thermoformer is of continuum fed, it is used in average and big production of plastic parts. To the sheet transport are used chains with spikes that clamp it to the sides during his heating, to then take it to the station where it is form an cut. The machine has a resistance electric heater, divide in three heater zones that provide to the moment of heat the sheet a bigger time and smaller power. The forming force is did for a smaller vacuum pump. The pressing and the cut of the sheet is do it for mean of pneumatic cylinders that clamp the sheet firmly while this is forming.

The machine has a control system that led it operation in two modes of work, like are manual and automatic; the manual is used to probe the operation to the different systems and the automatic is do it for a PLC, in which depending of the time cycled and material used is program the work sequence. To the tests of working to the machine, the plastic used was the PET and was elaborate a plate to cake molds and small glasses in polyester resin, obtaining good quality parts.

* Degree Project.

** Faculty of Physical – Mechanical Engineering, Mechanical Engineering School, Engineer. OMAR GELVEZ A.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los productos plásticos son ampliamente utilizados por todos los sectores de la industria, es difícil encontrar un lugar en donde de alguna forma no se estén presentes. Debido a sus grandes cualidades, este material ha ido reemplazando en muchas aplicaciones a materiales antes comúnmente usados como son la madera o los metales. El plástico es ideal para la producción de muchos productos, como por ejemplo: empaques, tinas, tanque de agua, juguetes, moldes, partes de maquinaria, contenedores de alimentos, etc. En nuestro país el mercado de estos y nuevos productos va cada día en aumento, presentándose como una buena alternativa de inversión para los empresarios.

En la industria de la transformación del plástico podemos encontrar diferentes métodos como son: la inyección, rotomoldeo, extrusión y termoformado entre otros. Este último método es en el que hemos decidido investigar y trabajar, por presentarse como el proceso más sencillo y económico de todos. En el termoformado se puede encontrar una amplia variedad en maquinaria y métodos de formado, siendo las más utilizadas las termoformadoras alimentadas por lámina. En este tipo de máquina se presenta el problema de baja producción y demasiada intervención del operario en el proceso, la calidad final de la pieza dependen en gran parte de su habilidad. Las termoformadoras alimentadas por rodillo son una solución a este problema pero tienen el inconveniente de ser máquinas de difícil consecución y de un costo muy elevado para la pequeña industria.

Con la elaboración de este proyecto se pone en práctica los conocimientos adquiridos en la universidad a lo largo de estos años de estudio, confrontando la teoría con la práctica, diseñando y construyendo una máquina relativamente económica con un nivel aceptable de producción que nos permita contribuir de alguna forma en el desarrollo de un medio de producción para el empresario que decida incursionar en el mundo del termoformado.

1. INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES PLÁSTICOS

1.1. POLÍMEROS

La American Society for Testing Materials (ASTM) define como plástico a cualquier material de un extenso y variado grupo que contiene como elemento esencial una sustancia orgánica de gran peso molecular y el cual, es sólido en su estado final, ha tenido o puede haber tenido en alguna etapa de su manufactura (fundido, cilindrado, prensado, estirado, moldeado, etc.) diferentes formas de fluidificación, mediante la aplicación, junta o separada, de presión o calor.

Los plásticos son producidos mediante un proceso conocido como polimerización, es decir, creando grandes estructuras moleculares a partir de moléculas orgánicas; los polímeros incluyen el hule, los plásticos y muchos tipos de adhesivos. Los polímeros tienen baja conductividad eléctrica y térmica, reducida resistencia y no son adecuados para utilizarse a temperaturas elevadas. Los polímeros se pueden clasificar en tres grandes grupos como son los termoestables, termoplásticos y elastómeros. Los **termoplásticos**, poseen grandes cadenas moleculares que no están conectadas de manera rígida, poseen gran ductilidad y conformidad al ser calentados; los polímeros **termoestables** son más resistentes pero a su vez son frágiles ya que poseen cadenas moleculares rígidas fuertemente enlazadas. **Elastómero** es una elegante palabra que significa simplemente "caucho". Entre los polímeros que son elastómeros se encuentran el poliisopreno o caucho natural, el polibutadieno, el poliisobutileno, y los poliuretanos. Lo particular de los elastómeros es que pueden ser estirados hasta muchas veces su propia longitud, para luego recuperar su forma original sin una deformación permanente.

1.2. RESINAS BASE TERMOPLASTICAS

Las resinas termoplásticas son fácilmente conformables al aplicárseles temperatura y presión, los métodos más usados para su manufactura es la inyección, extrusión, soplado y termoformado.

A los materiales típicos para inyección se puede agregar materiales con carga o refuerzos (Ej.: fibra de vidrio), o diversos aditivos (Material que se agrega al plástico para cambiar las propiedades del material).

En general los materiales termoplásticos se pueden clasificar en dos grupos en referencia a su acomodo molecular, los cuales influyen en su proceso de fusión, solidificación, y puede determinar las propiedades físicas y mecánicas.

- Polímeros con estructura amorfa
- Polímeros con estructura parcialmente cristalina

Los polímeros con estructura amorfa presentan las siguientes características:

- La fusión se realiza en un intervalo de temperatura, no existe un punto de fusión preciso.
- A medida que la temperatura aumenta el material pasa de un estado sólido a uno viscoso, hasta convertirse finalmente en un fluido.
- En el intervalo de fusión pueden ser manufacturados por inyección, extrusión, soplado, etc.
- Sin carga tienen una contracción en el moldeo de 0.3 % a 0.9%, con carga este valor es menor.

Los polímeros con estructura parcialmente cristalina presentan:

- Un punto característico de fusión que corresponden a la transición del estado sólido al estado fluido.
- El intervalo útil de transformación está por lo tanto limitado a pocos grados centígrados, ya que un poco abajo del punto de fusión, el material esta todavía sólido y no se puede moldear ni extruir. Por otra parte no es prudente superar mucho la temperatura de fusión porque puede intervenir el fenómeno de degradación térmica.
- Tienen elevada contracción en el moldeo. La contracción para un polímero no reforzado varía de 1 al 5 %. Además después del moldeo se verifican en diferente medida, fenómenos de una posterior contracción. Todos los refuerzos fibrosos y las cargas inertes (fibra de vidrio, fibra de asbesto, mica, etc.) ayudan a mejorar las características mecánicas, térmicas o eléctricas y contribuyen a reducir tanto la contracción en el moldeo como la contracción posterior.
- Son más resistentes a los agentes químicos (solventes, sustancias ácidas o básicas, etc.)
- Tiene menor sensibilidad a los aumentos de temperatura en cuanto mantienen las características de resistencia mecánica y de rigidez hasta la proximidad del punto de fusión.

La temperatura máxima de trabajo para los productos moldeados son, para cualquier material, bastante más bajas que la temperatura de ablandamiento

o de fusión. Las temperaturas de trabajo o servicio son usualmente alrededor de la mitad de la temperatura de fusión correspondiente. Sin embargo variaciones de los esfuerzos mecánicos o condiciones ambientales pueden reducir los márgenes de resistencia del material. Otra característica de estos materiales es su tendencia a adsorber agua, ya sea del ambiente o por inmersión directa.

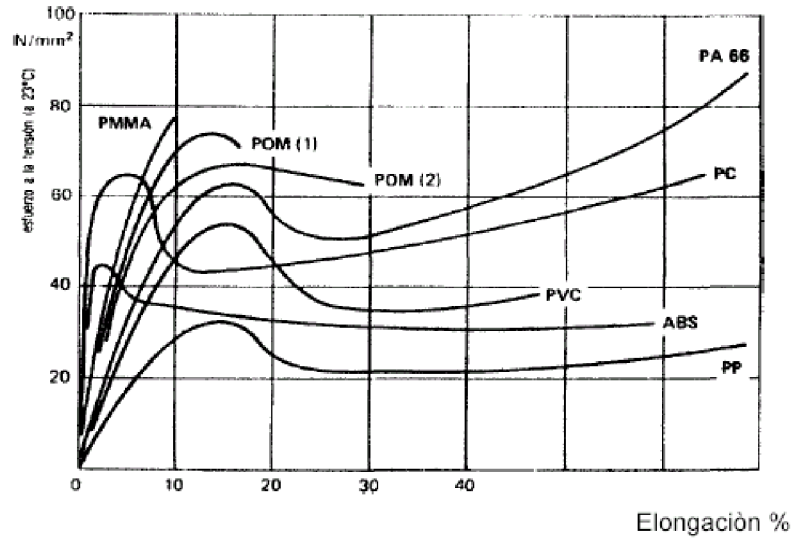
Los materiales plásticos sometidos a esfuerzos mecánicos se comportan en forma diferente a los metales, ya que su capacidad de resistencia a los esfuerzos mecánicos que son influidos negativamente con el aumento de la temperatura y la duración de los mismos.

A continuación se muestra un diagrama (figura 1) para mostrar las características físico – mecánicas de los plásticos de ingeniería más conocidos, se adjunta la tabla 1 con los nombres de los plásticos analizados en las gráficas.

Tabla 1. Nombres de termoplásticos analizados en las figura 1, 2 y 3

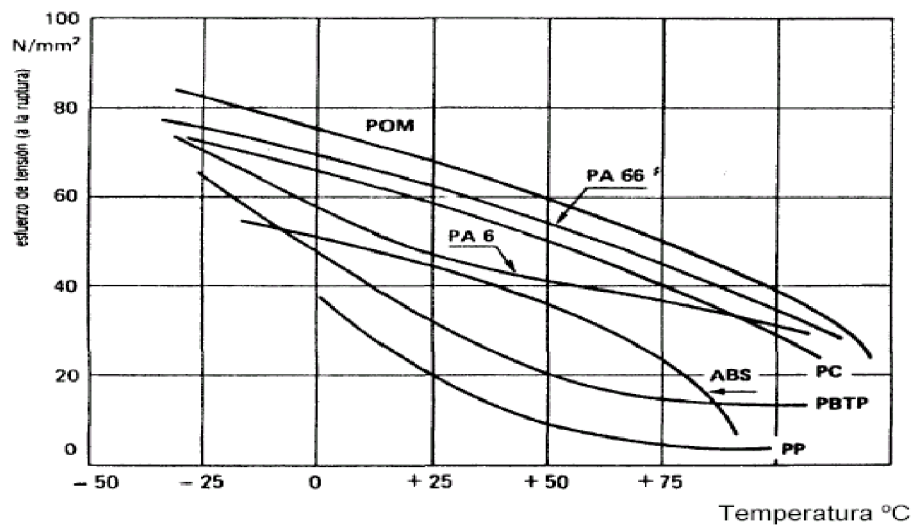
SÍMBOLO ISO	NOMBRE COMPLETO DEL TERMOPLASTICO
PMMA	Polimetacrilato
POM	Poliacetal (Homopolímero, copolímero)
PA66	Poliamida 66 (Semicristalino)
PA6	Poliamida 6 (Semicristalino)
PC	Policarbonato
PVC	Cloruro de polivinilo
ABS	Copolímero compuesto por Acilonitrilo Butadieno-estireno
PP	Polipropileno
PBTP	Polibutilén-tereftalato
PPO	Polioxido de fenileno

Figura 1. Curvas de esfuerzo vs. elongación correspondientes a diversos termoplásticos (sin refuerzos fibrosos) (esfuerzo a la tensión a 23°C – 50% humedad relativa.) (Tomado de la Enciclopedia Materie Plastiche).



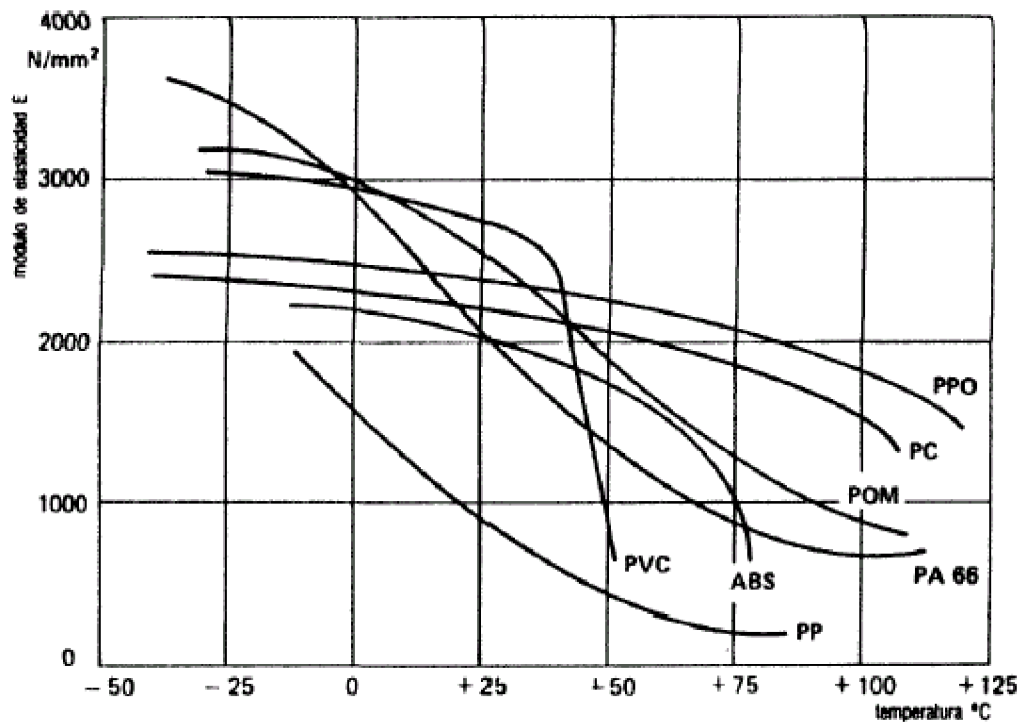
El comportamiento a la tensión en función a la temperatura se muestra en la figura 2 donde se nota una progresiva disminución de la resistencia a la tensión, a medida que la temperatura aumenta.

Figura 2. Curvas de resistencia a la tensión vs. temperatura de algunos termoplásticos (sin esfuerzos fibrosos). (Tomado de la enciclopedia Materie Plastiche)



En la figura 3 se analiza la variación del módulo de elasticidad en función de la temperatura en diversos termoplásticos. El módulo de elasticidad expresado en N/mm^2 , se define como la relación entre el esfuerzo unitario a tensión y la correspondiente deformación unitaria, dentro de los límites de proporcionalidad. Mientras en los metales el módulo de elasticidad es constante a temperaturas ordinarias en el caso de los materiales termoplásticos el módulo de elasticidad se ve influenciado por la temperatura de trabajo, tiempo de aplicación de la carga, absorción de humedad y envejecimiento o degradación del material.

Figura 3. Módulo de elasticidad E en función de la temperatura de algunos termoplásticos (sin esfuerzos fibrosos). (Tomado de la enciclopedia Materie Plastique)



Existen otros fenómenos que afectan el comportamiento de los termoplásticos, como pueden ser la deformación plástica, que se define como el aumento de la deformación en función del tiempo de la aplicación de la carga, o el ablandamiento, que es la disminución de la resistencia mecánica en función del tiempo de aplicación de la carga.

1.3. TÉCNICAS DE MOLDEO DE LOS PLÁSTICOS

El moldeo de los plásticos consiste en dar las formas y medidas deseadas a un plástico por medio de un molde. El molde es una pieza hueca en la que se

vierte el plástico fundido para que adquiera su forma. Para ello los plásticos se introducen a presión en los moldes. En función del tipo de presión, se encuentran estos dos tipos:

1.3.1 Moldeo a alta presión

Se realiza mediante máquinas hidráulicas que ejercen la presión suficiente para el moldeo de las piezas. Básicamente existen tres tipos: compresión, inyección y extrusión.

- **Compresión:** En este proceso, el plástico en polvo es calentado y comprimido entre las dos partes de un molde mediante la acción de una prensa hidráulica, ya que la presión requerida en este proceso es muy grande.

Este proceso se usa para obtener piezas no muy grandes ya que las presiones necesarias son altas, por ejemplo se puede hacer los mangos aislantes del calor de los recipientes y utensilios de cocina.

- **Moldeo por transferencia :** Se usa generalmente para cauchos y elastómeros (Termoestables) generando pequeñas piezas , ya que se necesitan grandes presiones para la producción de una sola pieza. Este proceso consiste en calentar el plástico en una cámara llamada cámara de transferencia, y luego por medio de un embolo aplicar presión para transportar el plástico a través de unos pequeños orificios hacia la matriz del molde.
- **Inyección:** Consiste en introducir el plástico granulado dentro de un cilindro, donde se calienta. En el interior del cilindro hay un tornillo sinfín que actúa de igual manera que el émbolo de una jeringa. Cuando el plástico se reblandece lo suficiente, el tornillo sinfín lo inyecta a alta presión en el interior de un molde de acero para darle forma. El molde y el plástico inyectado se enfrían mediante unos canales interiores por los que circula agua. Por su economía y rapidez, el moldeo por inyección resulta muy indicado para la producción de grandes series de piezas. Por este procedimiento se fabrican palanganas, cubos, carcasas, componentes del automóvil, etc.



Figura 4. Máquina inyectora

- **Extrusión:** Consiste en moldear productos de manera continua, ya que el material es empujado por un tornillo sinfín a través de un cilindro que acaba en una boquilla, lo que produce una tira de longitud indefinida. Cambiando la forma de la boquilla se pueden obtener barras de distintos perfiles. También se emplea este procedimiento para la fabricación de tuberías, inyectando aire a presión a través de un orificio en la punta del cabezal. Regulando la presión del aire se pueden conseguir tubos de distintos espesores.

Figura 5. Máquina extrusora de plástico



Figura 6. Algunos productos de la extrusión



1.3.2 Moldeo a baja presión

- **Termoformado:** Se emplea para dar forma a láminas de plástico mediante la aplicación de calor y presión hasta adaptarlas a un molde. Se emplean, básicamente, dos procedimientos: El primero consiste en efectuar el vacío absorbiendo el aire que hay entre la lámina y el molde, de manera que ésta se adapte a la forma del molde. El segundo procedimiento consiste en aplicar aire a presión contra la lámina de plástico hasta adaptarla al molde. Este procedimiento se denomina moldeo por soplado, como el caso de la extrusión, aunque se trata de dos técnicas totalmente diferentes. Se emplea para la fabricación de cúpulas, piezas huecas, cierto tipo de empaques para productos usan este sistema llamado empaque tipo Skin.

Figura 7. Empaques y productos conformados por termoformado



Figura 8. Termoformadora de línea



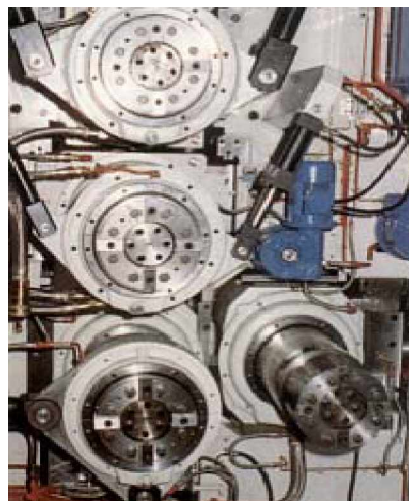
- **Colada:** La colada consiste en el vertido del material plástico en estado líquido dentro de un molde, donde fragua y se solidifica. La colada es útil para fabricar pocas piezas o cuando emplean moldes de materiales baratos de poca duración, como escayola (yeso) o madera. Debido a su lentitud, este procedimiento no resulta útil para la fabricación de grandes series de piezas.
- **Espumado:** Consiste en introducir aire u otro gas en el interior de la masa de plástico de manera que se formen burbujas permanentes. Por este procedimiento se obtiene la espuma de poliestireno, la espuma de poliuretano (PUR), etc. Con estos materiales se fabrican colchones, aislantes termo-acústicos, esponjas, embalajes, cascos de ciclismo y patinaje, plafones ligeros y otros.

Figura 9. Aislamiento termo acústico para una construcción.



Calandrado: Consiste en hacer pasar el material plástico a través de unos rodillos que producen, mediante presión, láminas de plástico flexibles de diferente espesor. Estas láminas se utilizan para fabricar hules, impermeables o planchas de plástico de poco grosor.

Figura10. Muestra de rodillos que se usan en el proceso de calandrado



2. EL TERMOFORMADO

2.1. RESEÑA HISTORICA DEL TERMOFORMADO

Termoformado es un término genérico usado para categorizar la gran variedad de técnicas para producir un artículo útil desde una lámina plana de un termoplástico. El nombre de termoformado sugiere la aplicación de calor. Aunque esto es generalmente verdad, hay técnicas especializadas de formado que no requieren calor. La idea detrás del proceso de termoformado no es nueva. Incluso el hombre primitivo usaba calor para formar varios materiales orgánicos en herramientas útiles. Sin embargo, la verdadera raíz del termoformado viene con el desarrollo del caucho sintético durante la segunda guerra mundial. Varios materiales termoplásticos pronto siguieron y posteriormente nació la industria del termoformado. El éxito comercial del termoformado comenzó a finales de los 40s y principios de los 50s con el desarrollo del embalaje industrial. Por los 60s el empaque blister se desarrolló dentro de un alto volumen de mercado. Los 60s además vieron nuevos avances y tendencias en la industria así como el establecimiento de sectores separados, de láminas gruesa y delgadas. Durante este tiempo la resina manufacturada llegó a ser más compleja y ofreció soporte técnico y conocimiento experto de las propiedades de los materiales a termoformar. Por los 70s las máquinas termoformadoras fabricadas también comenzaron a respaldar los avances de la tecnología del termoformado. La demanda tuvo un aumento significativo en unos pocos años, lo que impulso máquinas fabricadas para desarrollar un alto desempeño de los equipos. Como el volumen de producción se incrementó en muchas operaciones de termoformado, los deseos de reducir costos impulsaron máquinas fabricadas para hacer avances en producción y control de calidad los cuales condujeron a más operaciones automáticas. El deseo de permanecer competitivo y reducir costos también impulsó avances en el manejo de desechos. La minimización del costo del material y el reciclaje, repentinamente llegaron a ser factores importantes. Los 80s vieron una aun mayor demanda, para mayor economía se automatizaron las operaciones. Esto llevo a más avances en la tecnología del termoformado y permitió introducir nuevas líneas de productos termoformados que antes no eran posibles. Los 80s vieron además la introducción de nuevos equipos para la producción de pellet así como mayores adelantos en el control de los procesos. Los avances de la tecnología del termoformado sin embargo no han sido continuos. La industria vio una significativa desaceleración en los comienzos de los 90s como un resultado de la desaceleración económica en Norte América así como las repercusiones del aumento de preocupaciones

medioambientales, las cuales encaminaron a muchas organizaciones de comida rápida a discontinuar el uso de ciertos tipos de recipientes para llevar la comida. Como resultado, algunas líneas de productos fueron discontinuadas y muchas operaciones de termoformado fueron dejadas perecer y un buen número tuvo que desaparecer completamente.

Hoy, la industria del termoformado esta viendo un crecimiento una vez más. El relativo bajo costo de capital asociado con el proceso de termoformado ha incitado interés en la posibilidad que adelantos en la tecnología puedan permitir nuevas técnicas de termoformado para producir muchas piezas comunes tradicionalmente fabricadas por otros procesos más costosos.

Aunque se han hecho muchos avances desde los comienzos del termoformado, la industria, en conjunto, ha sido relativamente conservativa en términos de aplicaciones de nuevas tecnologías cuando se compara con otros procesos industriales de procesamiento de polímeros. Por ejemplo, la industria del moldeo por inyección ha usado ampliamente software de simulación para el diseño y producción de nuevas piezas. Debido a que el termoformado es considerado aun ser un proceso de alta mano de obra y experiencia, es considerado como el área del procesamiento de polímeros con el más alto potencial de crecimiento. Avances en materiales y control de procesos (específicamente para el calentamiento de la lámina) permitirán que sean elaboradas piezas más complejas.

2.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL TERMOFORMADO

Mientras se introduce un nuevo proceso de fabricación es útil tener en cuenta las ventajas y desventajas comparado con otros procesos. Obviamente algunos productos pueden solamente ser producidos por un método particular pero hay muchos productos en la industria del procesamiento de polímeros que pueden ser manufacturados por un diferente número de procesos. El termoformado tiene numerosas ventajas competitivas. La más importante es que el costo de la herramientas y equipos es mucho más bajo comparado con otros procesos. En particular, los moldes usados para termoformado son relativamente simples, y por eso, no son excesivamente costosos. Otra ventaja es que el termoformado puede manipular múltiples capas de materiales, espumas, impresos, y materiales revestidos los cuales pueden reducir la cantidad de tiempo en el proceso de post-formado. Finalmente, el termoformado puede permitir la producción de piezas mucho más grandes que por muchos otros procesos. El termoformado tiene además distintas desventajas. En primer lugar, la complejidad de una pieza termoformada es limitada. Segundo, el proceso de termoformado es un proceso con grandes desperdicios, lo cual significa un mayor costo en los

costos del material. Afortunadamente, alguno, pero no todo, el desperdicio pueden ser reciclado. Finalmente, otra de las mayores desventajas es el hecho que solamente ciertos materiales puedan ser usados con el proceso del termoformado.

2.3 PIEZAS FABRICADAS POR TERMOFORMADO

Al comienzo, la industria del termoformado fue dominada por la producción de piezas muy simples en forma de cubo para la industria del empaque. Hoy, numerosas piezas diferentes de variada complejidad son producidas usando la técnica de termoformado. Muchas piezas termoformadas que están en uso hoy han sido hechas para reemplazar anteriores formas de los mismos productos que fueron hechos de diferentes materiales. Generalmente, el plástico es mucho más durable, o tiene otras características de material deseables (térmicas, eléctricas, químicas, etc)

El listado que se muestra a continuación, inicia con el producto de mayor número de piezas termoformadas producidas y va en orden descendente hasta el de menor producción.

a. Industria del empaque

Desde el inicio del proceso de termoformado, la industria del empaque ha sido la más beneficiada debido a la alta productividad y las bondades que ofrece por costo-beneficio. Actualmente, la mayor parte de los equipos de empackado (blister) son de alimentación automática de alta velocidad. Estos equipos se denominan "forma-llena-sella" y sirven para el empackado de cosméticos, carnes frías, refrescos, dulces, artículos de papelería, etc.

Figura 11. Diferentes tipos de empaque en la industria del termoformado



b. Industria de la comida para llevar

En la creciente industria de la "comida para llevar", existe una gran cantidad de productos termoformados utilizados, que abarca desde contenedores de comida completa (contenedores con divisiones) hasta los empaques para hamburguesas, sánduches, refrescos, etc. Generalmente, la industria mencionada requiere una impresión en los paquetes termoformados. Esta impresión podría realizarse antes o después del termoformado; ejemplos de estos productos son charolas, vasos, contenedores de sánduches, hamburguesas, perros calientes, etc.

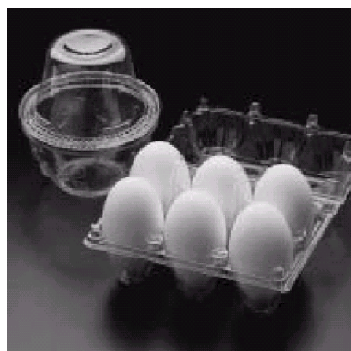
Figura 12. Portacomidas



c. Industria del empaque para alimentos

Los supermercados son los grandes usuarios de contenedores termoformados. Los materiales utilizados son termoplásticos de bajo costo. Estos contenedores están diseñados para ser apilados o acomodados en diferentes formas. Ejemplos: contenedores para carne, frutas, huevos, verduras.

Figura 13. Diferentes tipos de empaques para alimentos



d. Transporte

El transporte público y privado como el camión, tren, metro, avión, automóvil, etc., cuenta dentro de su equipo con numerosas partes de plásticos termoformados; la mayoría de estos son usados para el acabado de interiores o partes externas que no sean estructurales. Entre otros: asientos, respaldos, descansa brazos, vistas de puertas, mesas de servicio, parabrisas, protectores de instrumentación, guardas, spoilers, etc.

Figura 14. Guarda barro para tractor y Parachoques



e. Señalización y anuncios

Son fabricados generalmente en acrílico y pueden ser de una sola pieza y de grandes dimensiones. En estos anuncios o señalizaciones, usualmente se emplea acrílico transparente (cristal) y el color es pintado por el interior con pinturas base acrílica. El uso del acrílico en exteriores hace que los anuncios sean resistentes a la intemperie y virtualmente libres de mantenimiento, además de soportar condiciones extremas de frío o calor. Como ejemplos de éstos se tienen los anuncios luminosos exteriores, interiores, señalamientos en lugares públicos, oficinas, etc.

f. Artículos para el hogar

Existe una gran cantidad de artículos para el hogar que tienen partes termoformadas; de hecho, son producciones de alto volumen. Se encuentran, por ejemplo, en gabinetes, lavadoras, lavaplatos, secadoras de ropa, refrigeradores, ventanillas de aire acondicionado, humidificadores, gabinetes de televisión y radio, etc.



Figura 15. Gabinete de televisor

g. Industria alimenticia

Uno de los más antiguos y mayores consumidores de productos termoformados, es la industria alimenticia. El uso de charolas y otros accesorios tienen un potencial de consumo mayor puesto que, además de los grandes usuarios como son hospitales, guarderías, escuelas, ferias y otros, se agregan el sector militar y organizaciones de ayuda internacional. Ejemplos: charolas, vasos y platos.



Figura 16. Vasos

h. Industria médica

La industria médica requiere de una gran variedad de productos y empaques esterilizados para hospitales, clínicas y consultorios. Las especificaciones de estos productos suelen ser muy estrictas y el uso del reciclado de materiales, es inaceptable. El uso del acrílico, por ser un material fisiológicamente inocuo, se está incrementando día a día. Ejemplos: equipo quirúrgico, jeringas y agujas, mesas quirúrgicas, gabinetes, incubadoras, sillones dentales y plataformas de ejercicio, etc.

Figura 17. Recipientes utilizados en la industria medica y cubierta de un equipo de rayos x



i. Agricultura y horticultura

La comercialización de plantas de ornamentación en supermercados y tiendas especializadas ha generado, desde hace tiempo, la necesidad de fabricar macetas y pequeños contenedores, inclusive hasta de múltiples cavidades para la exposición y venta. Este tipo de contenedores son fabricados con plásticos reciclados y a bajo costo. Como ejemplos se pueden citar: macetas, contenedores de diferentes tamaños de una o varias cavidades, pequeños invernaderos, charolas para crecimiento de semillas, contenedores para siembra, etc.

j. Construcción y vivienda

La industria de la construcción ha empleado productos termoformados desde hace varios años, acelerándose rápidamente la popularidad de éstos. Hay una gran cantidad de productos que fácilmente se han sustituido por piezas termoformadas; de hecho, hay productos que no se podrían fabricar de otra forma, como los domos o arcos cañón. El acrílico en este sector se ve ampliamente utilizado por sus propiedades de resistencia a la intemperie y termoformabilidad. Ejemplos de estos son: domos, arcos cañón, tinas de hidromasaje, módulos de baño, lavabos, cancelería para baños, mesas, sillas, bases para lámparas, artículos de cocina, relojes, fachadas, escaleras, divisiones, ventanería, acuarios, etc.

k. Equipaje

Algunas empresas fabricantes de equipaje, están optando por usar el proceso de termoformado puesto que presenta ventajas sobre los productos por inyección, ya que por ser un moldeo libre de esfuerzos, se reducen las posibilidades de fracturas en los equipos de las piezas termoformadas. Ejemplos: maletas de todo tipo, portafolios, etc.

m. Equipo fotográfico

Uno de los productos más antiguos en el termoformado, son las charolas para revelado, además de los cubos para flash (el reflector metálico) y el magazine para cámaras de piso, aún cuando su producción requiere una técnica de termoformado de precisión.

3. DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL PROCESO DE TERMOFORMADO

Cuando es visto desde la distancia el proceso de termoformado parece ser simple, además un proceso primitivo. En general se involucran 5 pasos: sujeción, calentamiento, formado, enfriamiento y corte. Actualmente, la sujeción no es considerada como un paso individual. Simplemente se refiere a el mecanismo usado para asegurar la lámina durante el calentamiento, formado y corte. La etapa de calentamiento involucra calentar la lámina en un horno a una temperatura específica conocida como temperatura de formado. Una vez la lámina es calentada se procede a formarla en un molde usando la fuerza de presión y/o vacío. Después, la lámina formada se dejada hasta que se enfríe y esté suficientemente rígida para ser removida del molde. La lámina formada es entonces trasladada a la estación de corte para remover algún exceso de material.

3.1. LAMINAS

La lámina termoplástica es el componente más importante de todo el proceso de termoformado. Su rol es obvio. En el momento de formar, la lámina es transformada en un artículo útil. La composición molecular de la lámina es un factor determinante en los pasos del proceso y la calidad final de la pieza. El nombre poly-mero indica que la lámina esta compuesta de muchas (poli) unidades interconectadas (mero) que forman estructuras encadenadas de carbono-hidrogeno. La longitud y enmarañamiento de esas cadenas es un factor clave en el proceso de termoformado. Largas cadenas moleculares tendrán un peso molecular grande, y por lo tanto serán más fuerte que los polímeros que consisten de cadenas moleculares cortas, las cuales tienden a ser más frágiles. De hecho, uno de los requerimientos más básicos de una lámina termoplástica formable es que esta tenga una alta resistencia a la fusión (alto peso molecular), lo cual significa que en el momento de ablandarse, el material es capaz de soportar su propio peso. En contraste, un material con una baja resistencia a la fusión (bajo peso molecular), se ablandará una vez la temperatura de transición vítrea sea alcanzada y fácilmente se desgarrará del mecanismo de sujeción a medida que la lámina sucumbe a la gravedad.

Los materiales termoplásticos pueden ser además amorfos o parcialmente cristalinos. Al igual que con el peso molecular, el grado de cristalinidad es un factor determinante en el proceso del termoformado. Generalmente, un material con un alto grado de cristalinidad requiere de una más alta temperatura de formado que para un termoplástico amorfo. Por otro lado, los

materiales amorfos son usualmente cristales claros lo cual puede ser un factor importante dependiendo del mecanismo de calentamiento usado.

La resina termoplástica, la cual es primordialmente derivada del petróleo crudo, carbón, y gas natural, son producidas en forma de aglomerado. Las láminas termoplásticas son fabricadas de esos pequeños aglomerados. Hay diferentes formas con las cuales se puede producir láminas, sin embargo, los tres métodos dominantes son:

- **Calandrado:** Es un método similar a hacer papel. Primero, los pequeños aglomerados son alimentados dentro de unos grandes rollos alimentadores. Los aglomerados son entonces fundidos y forzados en forma de lámina al pasar el material a través de un grupo de rodillos consecutivos. Este método de fabricar láminas no genera orientación molecular en la lámina, lo cual resulta en láminas un poco débiles que estarán sujetas a incrementar el pandeo durante el proceso de calentamiento. El calandrado está sujeto además a los problemas de pequeños agujeros, los cuales son diminutos vacíos en la lamina causados por un suministro insuficiente de alimentación de aglomerado. Los pequeños agujeros permiten al aire escapar a través de la lámina, lo cual complica el formado y puede además volver la lámina inservible. Afortunadamente, los nuevos equipos de manufactura han reducido los casos de pequeños agujeros. Sin embargo, esto es aun un problema que puede aparecer de vez en cuando
- **Fundición:** La fundición involucra verter plástico líquido en un molde y entonces permitir al material enfriarse y endurecerse hasta formar una lámina plástica sólida. Para algunos materiales la fundición es el único método utilizable para formar una lámina plástica sólida. Al igual que con el calandrado, la fundición no produce ninguna orientación molecular. Las láminas fabricadas por el método de fundición están normalmente libres de pequeños agujeros. Estas además no tienen ocultos esfuerzos residuales y tienen igual resistencia en todas las direcciones. El método de fundición puede producir burbujas diminutas de aire, atrapado dentro de la lámina. Esto puede además incidir favoreciendo el procesamiento de la lámina así como la apariencia de láminas que son diseñadas para ser completamente transparentes.
- **Extrusión:** La extrusión es el método más popular para fabricar láminas termoplásticas. Los aglomerados entran al barril extrusor a través de una tolva alimentadora. Los aglomerados fundidos y el líquido es entonces estrujado a través de un dado en forma de lámina.

La lámina es entonces comprimida a través de una serie de rodillos que están espaciados para dar a lámina su espesor apropiado. A diferencia de los dos métodos anteriores, de la extrusión resulta una lámina que puede contener orientación biaxial como un resultado de la extrusión a través del dado y estiramiento entre los rodillos. Esta orientación repercute en una lámina más fuerte y más resistente al pandeo durante el calentamiento.

3.1.1 Tamaño de láminas y materiales

Cada uno de los tres métodos de producir láminas plásticas es capaz de producir un amplio rango de tamaños de lámina. Como las operaciones de calandrado y extrusión producen rollos de materiales termoplásticos, el espesor de la lámina para esas operaciones es limitado. La fundición en cambio puede producir láminas mucho más gruesas. Generalmente el espesor de lámina puede estar de 0.05 mm a 15 mm y por encima de 60 mm para algunas espumas. El tamaño de lámina para las operaciones de termoformado tienen un rango desde láminas pequeñas ($< 30 \text{ cm}^2$) a tamaños de láminas en el rango de 3 m x 3 m y mayores. Es importante notar que el tamaño de la pieza y de este modo el tamaño de la lámina son solamente limitados por el tamaño de la máquina, en vista de que la pieza sea mayor, se requerirá una mayor fuerza de formado.

En la actualidad hay gran cantidad de diferentes tipos de materiales que son usados con el termoformado. Todos los materiales poseen sus propias cualidades características y se comportan diferente en todo el proceso de termoformado. La selección de materiales termoformables ahora es tan variada que la selección del material de la pieza se ha convertido en uno de los pasos más importantes del diseño del termoformado. Algunos de los materiales más comunes incluyen: Poliestireno (PS), Poliestireno de alto impacto (HIPS), Poliacrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS), Polietileno de baja y alta densidad (LDPE y HDPE), Polipropileno (PP), Policarbonato (PC), Politereftalato de Etileno (PET) y Policloruro de Vinilo (PVC).

3.1.2 Propiedades de los materiales y como se relacionan con el termoformado

Como se mencionó anteriormente, las propiedades de los materiales tiene un efecto directo en la capacidad para ser moldeados así como la calidad final de la pieza. A continuación se muestran algunas de las propiedades más importantes.

- **Absorción de humedad:** Algunos materiales termoplásticos son hidrosfílicos. La humedad es en su mayoría retenida en la superficie de la lámina, y cuando un material húmedo es calentado, se forman pequeñas burbujas en la superficie. Al final, la retención de humedad afectará el tiempo de calentamiento. En casos más graves la humedad puede dañar la apariencia de la pieza o aun afectar las propiedades estructurales de esta. En esos casos la pieza es frecuentemente rechazada. Es fácil darse cuenta porque algunas operaciones de termoformado incluyen el secado de la lámina como un paso importante de pre-procesamiento
- **Comportamiento a la Fricción:** Las propiedades de fricción de una lámina son importantes solamente cuando se usa ayudas mecánicas para mejorar el estiramiento en ciertas áreas de la lámina. El comportamiento a la fricción depende de la lámina, material de la herramienta y acabado de la superficie. Si la fricción no es suficiente la herramienta tenderá a querer empujar directamente a través de la lámina, lo cual producirá una desigual distribución del espesor. Al contrario, mucha fricción provocará que la lámina se pegue a la herramienta al momento del contacto, lo cual resultará además en una distribución del espesor desigual. Es muy difícil obtener la cantidad apropiada de fuerza de fricción. Pequeños cambios en la superficie de la herramienta así como la temperatura en la lámina y herramienta son necesarios para obtener los resultados deseados.
- **Contracción:** La contracción del material polimérico es un factor importante en todas las operaciones de procesamiento de polímeros. La contracción y particularmente el pandeo, es importante porque la integridad de la pieza se afecta directamente (son deseadas una estricta repetición de la tolerancia de las dimensiones de la pieza). En casos graves, la pieza puede ser rechazada debido a la contracción y pandeo. En el termoformado, la contracción puede afectar el funcionamiento de procesos posteriores tales como la operación de corte. Generalmente algún grado de contracción es inevitable en operaciones de procesamiento de polímeros y esto es considerado en la parte del diseño.
- **Orientación:** Como se menciona anteriormente la orientación molecular afecta la resistencia de un material. El nivel de orientación es determinado por el material, y el modo con el cual fue producido. Si un material fue estirado en una dirección este generalmente se vuelve más fuerte en esa dirección y más débil en la dirección opuesta. La resistencia del material no solamente entra en juego durante el calentamiento (resistencia al pandeo), es además

importante para la formación final de la pieza. El proceso de formado estira el material y eso causa un mayor grado de orientación el cual afectará la resistencia de la pieza final. Todo esto debe ser considerado en el diseño en conjunto de la pieza.

- **Carga Estática:** Excepto por la conductividad eléctrica de los materiales, las láminas termoplásticas llegan a cargarse electrostáticamente durante la sujeción y procesamiento del material. Como consecuencia, pequeñas partículas tales como pedacitos de plástico cortado puede llegar a pegarse a la superficie y más tarde incrustarse en la superficie durante el formado resultando en piezas de baja calidad estética. Se debe asegurar un medio ambiente limpio.

3.1.3. Materiales termoplásticos y tipo de láminas termoplásticas

Como se menciona antes, una de las ventajas del termoformado es el número de diferentes tipos de láminas que pueden ser usadas. En la tabla 2 se listan algunas láminas termoplásticas que están disponibles.

Tabla 2. Tipo de láminas termoplásticas usadas para termoformado

TIPO DE LAMINA	COMENTARIO
Natural	<ul style="list-style-type: none"> - hecha de resina sin agregar aditivos - usualmente cristales claros - pueden transmitir la energía de calentamiento infrarroja
Orientada	<ul style="list-style-type: none"> - muy sensible al calor mientras pierde la orientación esta muy cerca de la temperatura de ablandamiento - requiere calentamiento preciso y rápido
Teñida	<ul style="list-style-type: none"> - láminas con aditivos colorantes - algunas veces un leve mejoramiento en la absorción de calor
Pigmentada	<ul style="list-style-type: none"> - láminas de color uniforme
Con Aditivos	<ul style="list-style-type: none"> - aditivos adicionados a la lámina para proporcionar una reducción de costos o un mejoramiento en las características físicas

Espumosa	<ul style="list-style-type: none"> - material mucho más ligero - cuando se desea colorear la espuma solamente son posibles colores claros
Con Textura	<ul style="list-style-type: none"> - láminas con plantillas impresas
Laminada	<ul style="list-style-type: none"> - láminas con múltiples capas usualmente por razones económicas
Co-extruida	<ul style="list-style-type: none"> - láminas con múltiples capas - usualmente rápidas y fáciles de fabricar
Impresas	<ul style="list-style-type: none"> - láminas con textos o imágenes preimpresos
Agrupadas	<ul style="list-style-type: none"> - láminas con superficie suave como acabado en un lado
Metalizadas	<ul style="list-style-type: none"> - se pueden hacer láminas con recubrimiento metálico pero no son populares
Especiales	<ul style="list-style-type: none"> - son posibles muchas otras clases de láminas especiales

3.2. MECANISMOS DE SUJECIÓN

Los mecanismos de sujeción proporcionan las siguientes funciones: 1) soportar la lámina durante el calentamiento; 2) transportar la lámina caliente al área de formado; 3) agarrar firmemente la lámina durante el formado y enfriamiento; 4) implementación de piezas removibles; 5) trasladar de la estación de formado a la de corte. Hay dos tipos básicos de mecanismos de sujeción: 1) marco de sujeción, y 2) mecanismo de cadena transportadora.

El marco de sujeción es capaz de sujetar una sola lámina al tiempo. La lámina es sujeta entre dos marcos machos. Usualmente un marco es estacionario (inferior) mientras el otro marco (superior) es móvil para permitir la inserción de la lámina. El marco puede ser operado manual o automáticamente para máquinas con altos volúmenes de producción. Una consideración importante es el agarre que tiene el marco a la lámina. Es vital que la lámina no se deslice durante el calentamiento o formado. Frecuentemente se requiere emparejar agujeros y algunos pines para mantener la lámina en su lugar.

El otro tipo de mecanismo de sujeción es la cadena transportadora, la cual es usada para máquinas de alimentación continua. La cadena transportadora funciona como los lados paralelos de un marco de sujeción y lleva la lámina

a través del horno y después a la estación de formado. Otra vez es importante que la lámina sea asegurada correctamente con el uso de altas fuerzas de presión y también algunos pines.

Una consideración importante para ambos tipos de sujeciones es el calentamiento del mecanismo de sujeción. En operaciones donde la rata de producción es alta, los mecanismos de sujeción entrarán continuamente al horno y eventualmente se calentaran con el paso del tiempo. Si este calentamiento es significativo, el calentamiento de la lámina se afectará debido a que el mecanismo de sujeción transfiere calor a la lámina. Además, se debe tener cuidado de asegurarse que el aumento de calor del mecanismo de sujeción no sea excesivo porque podría derretir la lámina. El calor excesivo pues ser evitado algunas veces en los hornos de radiación aplicando pintura reflectiva a los componentes de la sujeción.

3.3. SISTEMAS DE CALENTAMIENTO

El sistema de calentamiento es un elemento crucial en el proceso de termoformado. Independientemente de la fuente calor, la aplicación del calor debe ser relativamente precisa y repetible para tener resultados predecibles ciclo a ciclo. El sistema de calentamiento es además un factor clave cuando se analiza la economía de la operación de termoformado porque este es un proceso intensivo de energía y el calentamiento de la lámina se considera por encima del 80% del consumo de energía. Dos tipos básicos de fuentes de energía están disponibles para el calentamiento de láminas: gas y electricidad. El gas es mucho más barato que la electricidad pero esta última ofrece un control de temperatura mucho mejor. Aunque hay una amplia variedad de métodos de calentamiento específicos y tipos de calentadores disponibles, solamente hay tres métodos básicos de calentamiento aplicado a termoformado.

Los primeros son los hornos de gas por convección. Esos hornos usualmente son muy grandes para el calentamiento de láminas grandes y muy gruesas. Los ciclos de tiempo para esas láminas grandes tienden a ser medidos en horas; por lo tanto, es obvio que un calentador eléctrico no es económicamente factible. La lámina es calentada por aire caliente que es forzado sobre la superficie por grandes ventiladores. Aunque los hornos de gas ofrecen menos control sobre el calentamiento, el tamaño y espesor de esas láminas grandes no justifica un control tan preciso de la temperatura.

El segundo método es calentamiento por contacto. Esta configuración consiste de placas de metal que hacen contacto directamente con la lámina para calentarla. Las placas de metal pueden ser calentadas por ya sea una

llama de gas o por resistencias eléctricas incrustadas o montadas en la superficie opuesta de la placa. En este tipo de calentadores es importante asegurar un contacto apropiado con la lámina. Un contacto poco uniforme puede atrapar aire entre la placa y la lámina y causar un calentamiento desigual. Este método está limitado a calentamiento uniforme (no zonificado) de láminas termoplásticas delgadas. Debido a que este método de calentamiento es muy lento, la lámina es algunas veces precalentada con otros métodos de calentamiento para incrementar la velocidad de producción.

El último método de calentamiento es por radiación. El calentamiento por radiación es definitivamente el más popular por su facilidad para el control y eficiencia. No se necesita contacto en este método. La superficie de la lámina absorbe energía infrarroja de los calentadores, y el calor es entonces conducido desde la superficie hasta el interior de la lámina. Algunas veces se usan calentadores de gas radiantes pero los calentadores eléctricos radiantes son mucho más comunes. Los calentadores radiantes pueden ser operados sobre un amplio rango de temperaturas; sin embargo, la conversión más eficiente de electricidad a radiación ocurre cuando los calentadores operan a una temperatura que produce energía infrarroja concentrada en una longitud de onda entre 3 a 3.5 μm . En la tabla 3 se muestran los diferentes tipos de calentadores eléctricos.

Tabla 3. Tipos de calentadores radiantes

Tipo de Calentador	Comentarios
Tubular o barra	<ul style="list-style-type: none"> - similar a los elementos calentadores encontrados en hornos eléctricos y estufas - bajo costo - distribución de la temperatura muy desigual - requiere reflectores ya que la energía es radiada en todas las direcciones
Bandas planas	<ul style="list-style-type: none"> - similar a los calentadores de barra pero formados por una banda plana - pueden ser colocado de muchas formas diferentes - ineficientes debido a la pérdida de calor a través de su respaldo
Cerámicos	<ul style="list-style-type: none"> - consiste en un conductor

	<p>eléctrico incrustado en un material cerámico</p> <ul style="list-style-type: none"> - muy populares - más costosos pero buen control de temperatura - temperatura de la superficie uniforme - requieren periodos de limpieza - dinámica lenta
Pirex	<ul style="list-style-type: none"> - conductor eléctrico cubierto por vidrio pirex - usualmente vienen en forma de panel - altamente eficientes - proveen un calentamiento uniforme sobre toda la superficie - dinámica lenta y muy frágiles
Cuarzo	<ul style="list-style-type: none"> - consiste de un elemento conductor cubierto con cuarzo - pueden ser tubulares o en forma de panel plano - dinámica muy rápida, el cuarzo transmite fácilmente la energía infrarroja - requieren reflectores pero pueden ser integrados
Panel plano	<ul style="list-style-type: none"> - están disponibles calentadores de panel plano con muchos recubrimientos diferentes - temperatura de la superficie uniforme
Lámpara infrarroja	<ul style="list-style-type: none"> - rara vez usadas en aplicaciones de termoformado

El área de calentamiento debe exceder en 25mm cada lado del marco de sujeción, para poder garantizar un calentamiento uniforme en la superficie a formar. Igualmente se recomienda ubicar la parrilla de calentadores a una distancia entre 5 y 30 cm con respecto a la lámina, para el caso de espesores delgados. Las láminas gruesas a excepción del polietileno, deben calentarse a una menor intensidad de calor, debido a la baja conductividad de los termoplásticos.

Básicamente hay disponible dos tipos de control de temperatura. El primer tipo usa interruptores, o control on-off, para regular la temperatura del calentador. En este tipo de control, toda la potencia es enviada intermitentemente al calentador. El segundo tipo de control es un poco más sofisticado, usa un dispositivo electrónico de potencia para suministrar diversos niveles de potencia al calentador con el propósito de mantener el setpoint. En ambos tipos de control resultan oscilaciones sobre el setpoint, pero con el control on-off es más notable.

El tiempo del ciclo es controlado por el calentamiento y las tasas de enfriamiento, los cuales a su vez dependen de los siguientes factores: la temperatura de los calentadores y el medio de enfriamiento, la temperatura inicial de la lámina, el coeficiente de transferencia de calor efectivo, el espesor de lámina, y las propiedades térmicas del material de la lámina. Diferentes materiales absorben calor radiante más eficientemente a diferentes longitudes de onda, las cuales a su vez son afectadas por la temperatura del calentador radiante. La longitud de onda más conveniente para los termoplásticos cae dentro del espectro infrarrojo de $6\mu\text{m}$ ($204\text{ }^\circ\text{C}$) a $3.2\mu\text{m}$ ($649\text{ }^\circ\text{C}$). Por ejemplo el ABS, PE, y HIPS absorben calor radiante más eficientemente cuando el calentador emite de 3.5 a $3.3\mu\text{m}$, mientras que el PC requiere $3.4\mu\text{m}$.

En la tabla 4 se dan las temperaturas de proceso para materiales típicos usados en termoformado. La temperatura normal de formado debería ser alcanzada a través de la lámina, y debería ser medida solo antes que el molde y la lámina se junten. Piezas de poca profundidad formadas con vacío rápido y/o presión de formado permiten un temperaturas de lámina un poco más bajas y de este modo un ciclo más rápido. Puede ser requerida una temperatura ligeramente alta para radios profundos, pre-estiramiento y moldes con detalles complejos.

Tabla 4. Temperaturas de procesamiento de algunos termoplásticos para termoformado ($^\circ\text{F}$)

Plástico	Temperatura del molde a	Límite inferior de procesamiento b	Temperatura normal de formado c	Límite superior d	Temperatura fija e
HDPE	160	260	295	330	180
ABS	180	260	325	380	200
PMMA	190	300	350	380	200
PS	185	260	295	360	200
PC	265	335	375	400	280
PVC	140	210	275	300	160
PSU	320	390	475	575	360

- a. La temperatura del molde es importante en el proceso de formado. Alta temperatura en el molde proporciona piezas de gran calidad con alta resistencia al impacto, pequeñas tensiones internas, y buenos detalles, distribución de material y óptica (transparencia y ausencia de distorsiones). Sin embargo, los materiales de espesor delgado pueden ser frecuentemente termoformados en moldes a temperaturas más bajas, como 35 a 90 °F, porque las tensiones adicionales producidas no son pronunciadas en los espesores delgados y no intervienen con la calidad del producto.
- b. El límite inferior de procesamiento representa la temperatura más baja a la cual la lámina puede ser formada sin tensiones indebidas. Esto significa que la lámina debería tocar cada esquina del molde antes de alcanzar su límite inferior; de otra manera los problemas desarrollados tales como tensiones y torceduras pueden causar deformación, fragilidad y otros cambios físicos en la pieza.
- c. La temperatura normal de formado es la temperatura a la cual la lámina debe ser formada bajo operación normal. Su temperatura debería ser alcanzada a través de la lámina.
- d. El límite superior es el punto de calentamiento donde la lámina comienza a degradarse o se vuelve muy fluida y flexible para ser formada. Esas temperaturas pueden normalmente ser superadas con un deterioro de las propiedades físicas del plástico
- e. La temperatura fija es la temperatura a la cual la pieza puede ser removida del molde sin deformarse

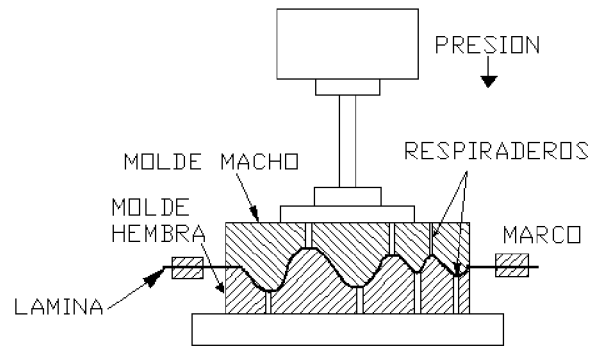
3.4. TÉCNICAS DE FORMADO

3.4.1 Termoformado por Igualación de Molde Macho-Hembra (Matched mold forming)

Es el proceso en el cual una lámina se calienta hasta su punto de ablandamiento y se forma entre un molde de secciones apareadas macho y hembra. La pieza se obtiene en una prensa hidráulica o neumática con una presión de 5 a 150 psi. Este es el método más costoso para el moldeo de láminas, porque necesita moldes de secciones macho y hembra. Los moldes están hechos de acero o aluminio reforzado provisto de orificios para el escape de aire.

Este método originalmente se utilizó en la industria del estampado de metales. La industria plástica ha reemplazado el metal por poliestireno de alto impacto y otros tipos de plásticos para muchas aplicaciones industriales.

Figura 18. Termoformado por igualación de molde macho hembra

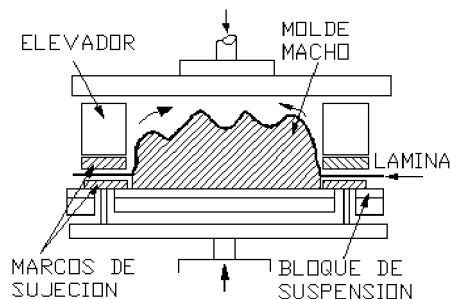


3.4.2 Formación Posterior (Slip Forming)

En este proceso una lámina termoplástica caliente es formada mecánicamente alrededor de un molde macho. Para el cierre del molde contra la lámina se requiere usar una prensa neumática o hidráulica.

Inicialmente la lámina se sujeta fuertemente en los topes del marco de sujeción y luego es calentada a la temperatura de formado. A continuación se retira el calentador y se cierra la prensa.

Figura 19. Formación posterior

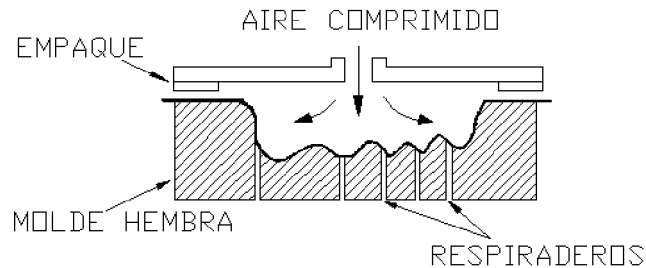


3.4.3 Termoformado por Soplado con Aire (Air Blowing)

Es el proceso por el cual una lámina termoplástica precalentada se sopla contra un molde hembra. En el procedimiento básico la lámina se fija como

tapa del molde hueco y se calienta hasta que se pandea ligeramente. Se aplica luego aire precalentado y comprimido hasta 150 psi, forzando la lámina contra el molde hembra para dar la forma requerida. El molde hembra debe tener orificios para permitir el escape del aire atrapado bajo la lámina. Este proceso puede combinarse con métodos de moldeo mecánico o al vacío.

Figura 20. Soplado con aire

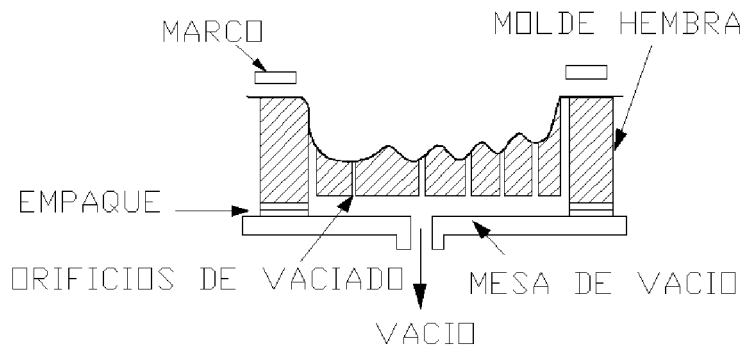


3.4.4 Termoformado por Vacío (Vacuum forming)

El método básico de formado al vacío tiene la siguiente secuencia:

- Se fija la lámina sobre el molde.
- Se colocan calentadores radiantes sobre la lámina plástica hasta que la lámina esté blanda y flexible.
- Se hace el vacío en la cavidad cerrada del molde, la lámina en estado elástico es empujada por la presión atmosférica contra los contornos del molde en el espacio vacío.
- Después de un corto periodo de enfriamiento la lámina tiene la forma deseada y puede ser retirada del molde.

Figura 21. Termoformado por vacío



A continuación se muestran algunas técnicas modificadas de formado al vacío:

3.4.4.1 Formación Directa al Vacío (Straight Vacuum Forming)

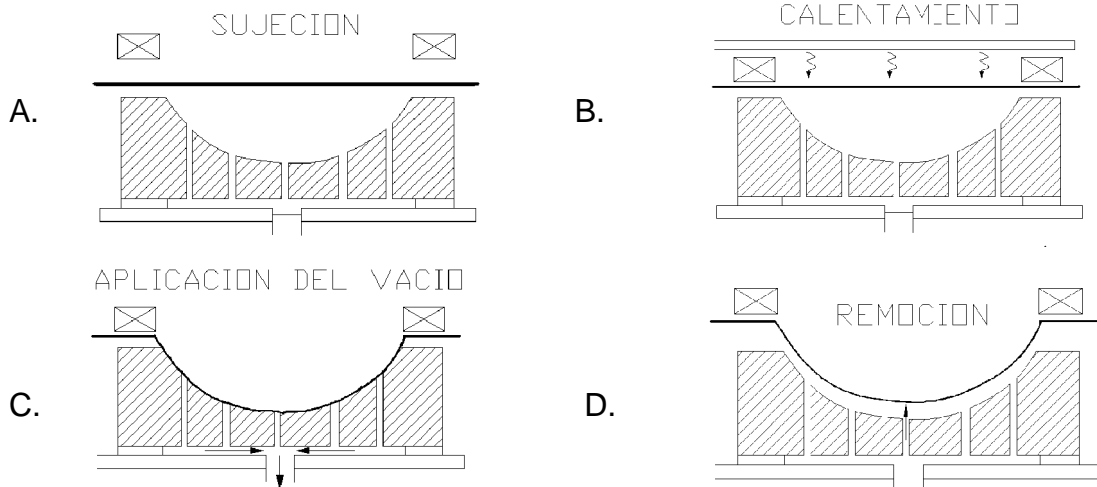
Esta es la técnica más fácil y antigua de termoformado al vacío. En una máquina de formado directo al vacío, la lámina termoplástica se sujeta sobre la caja molde, entre el marco de cierre y el molde para prevenir le entrada de aire.

Se coloca un elemento calentador por encima de la lámina, y se aplica calor por un tiempo suficiente para ablandarla completamente. Se retira el calentador y se succiona la lámina hacia abajo por la aplicación de vacío en el molde.

3.4.4.1.1 Formación directa al vacío en moldes hembra

Del formado al vacío en moldes hembra resultan excelentes réplicas de finos detalles y grabados en relieve sobre la superficie exterior de los artículos moldeados. En artículos de poco profundidad, la formación directa al vacío resulta excelente, sin embargo con pequeños radios y dimensiones profundas, las esquinas y el fondo quedan por lo general excesivamente delgados. Si se emplean moldes hembra múltiples (más de un elemento por molde) se reducen costos.

Figura 22. Formación directa al vacío sobre molde hembra

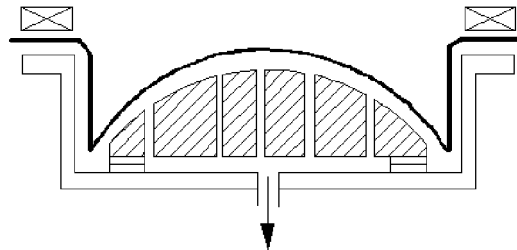


3.4.4.1.2. Formación directa al vacío sobre moldes macho

Una variación de la formación directa al vacío, es la formación sobre un molde macho colocado en una caja. Este proceso produce piezas con la sección superior más gruesa. Sin embargo se aumenta el retal (material sobrante) cuando la lámina debe ser moldeada a mucha profundidad sobre los lados de la caja, para evitar exceso de adelgazamiento en la fase del molde macho. En esta técnica la lámina se calienta mientras se sostiene entre dos marcos de sujeción, a cierta distancia por encima del molde y se mueve hacia abajo manual o neumáticamente presionando contra el molde para producir el formado. Esta técnica es preferida con láminas que se abomban durante el calentamiento, desde que se evite el contacto prematuro de la lámina caliente con la cara superior del molde frío, lo cual puede influir en el cerrado de la lámina sobre la base del molde, dando como resultado un sobre – espesor de esta parte de la pieza.

El formado directo al vacío de lámina delgadas sobre un molde macho se usa para la producción en tres dimensiones de mapas geográficos, puesto que se obtiene una gran precisión de los registros debido a lo restringido de la contracción que ocurre cuando el moldeado se hace en un molde macho.

Figura 23. Formación directa al vacío sobre molde macho

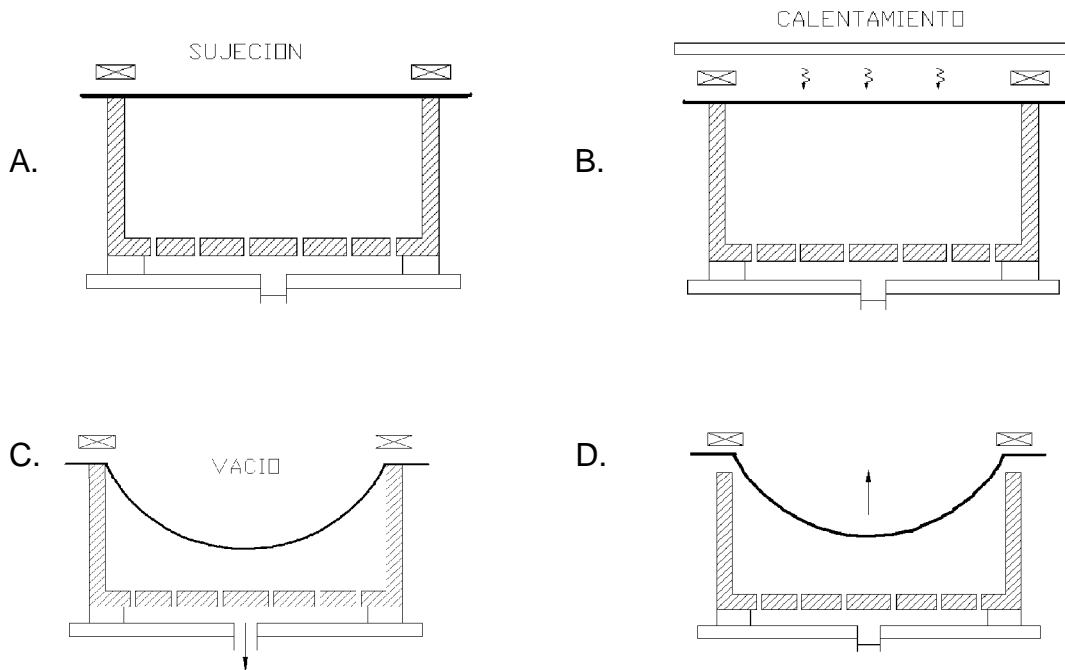


3.4.4.2. Termoformado libre al vacío (free vacuum forming)

La lámina se sujeta como en el método anterior sobre una caja de vacío, con la diferencia de que en esta técnica no se utiliza molde. Se calienta la lámina a la temperatura adecuada, luego se aplica el vacío, formando la lámina dentro de la caja de vacío sin tocar las paredes. Cuando el hemisferio formado tiene la profundidad correcta, se reduce el vacío y se mantiene hasta que el hemisferio se enfríe. El vacío generalmente es controlado por una fotocelda accionada por el hemisferio formado. Esta técnica es similar a la técnica de soplado con aire y se emplea para producir lentes plásticas.

Frecuentemente los acrílicos se moldean por este método. Este procedimiento se utiliza para producir cuerpos curvos de revolución.

Figura 24. Termoformado libre al vacío



3.4.4.3 Forma macho forzado sobre la lámina (vacuum snap-back forming)

El formado directo al vacío se adapta bien para materiales termoplásticos rígidos. Sin embargo aparecen dificultades para moldear láminas que poseen características plásticas y elásticas en un rango de temperaturas grande. En estos casos se prefiere la técnica aquí propuesta para láminas de materiales como polímeros, injertos de ABS (acrilonitrilo – butadieno – estireno) con alto contenido de goma, o una lámina acrílica plastificada

- Las láminas calientes se abomban hacia adentro de la caja de vacío como en la técnica de formado libre.
- Cuando la lámina a alcanzado una profundidad suficiente el molde macho se introduce por presión en la caja de vacío.
- Luego de que los topes sellan la caja de vacío se aplica aire a presión. La lámina caliente y elástica se forma contra las paredes del molde macho, luego se enfría los contornos del molde. Esta técnica es también empleada para moldear láminas de acrílico. En algunos tipos de máquina se aplica vacío al molde macho, lo cual trae como

resultado un mejor moldeado o sea, contornos más claros y definidos (figura 26).

Figura 25. Forma macho forzado sobre la lámina

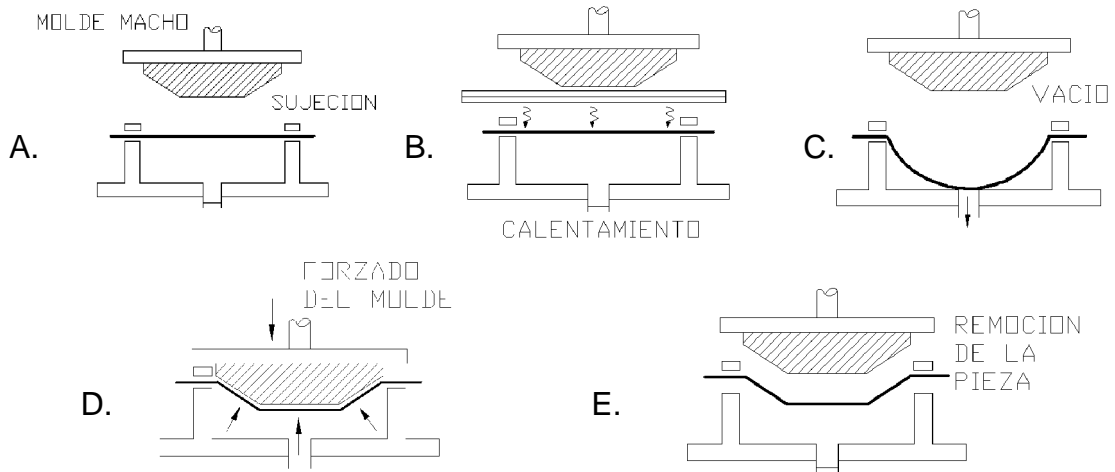
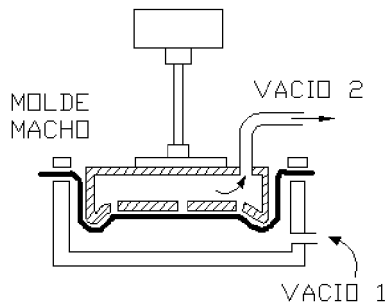


Figura 26. Forma macho forzado sobre la lámina con vacío en el molde



3.4.4.4 Termoformado al vacío por revestimiento (vacuum drape forming)

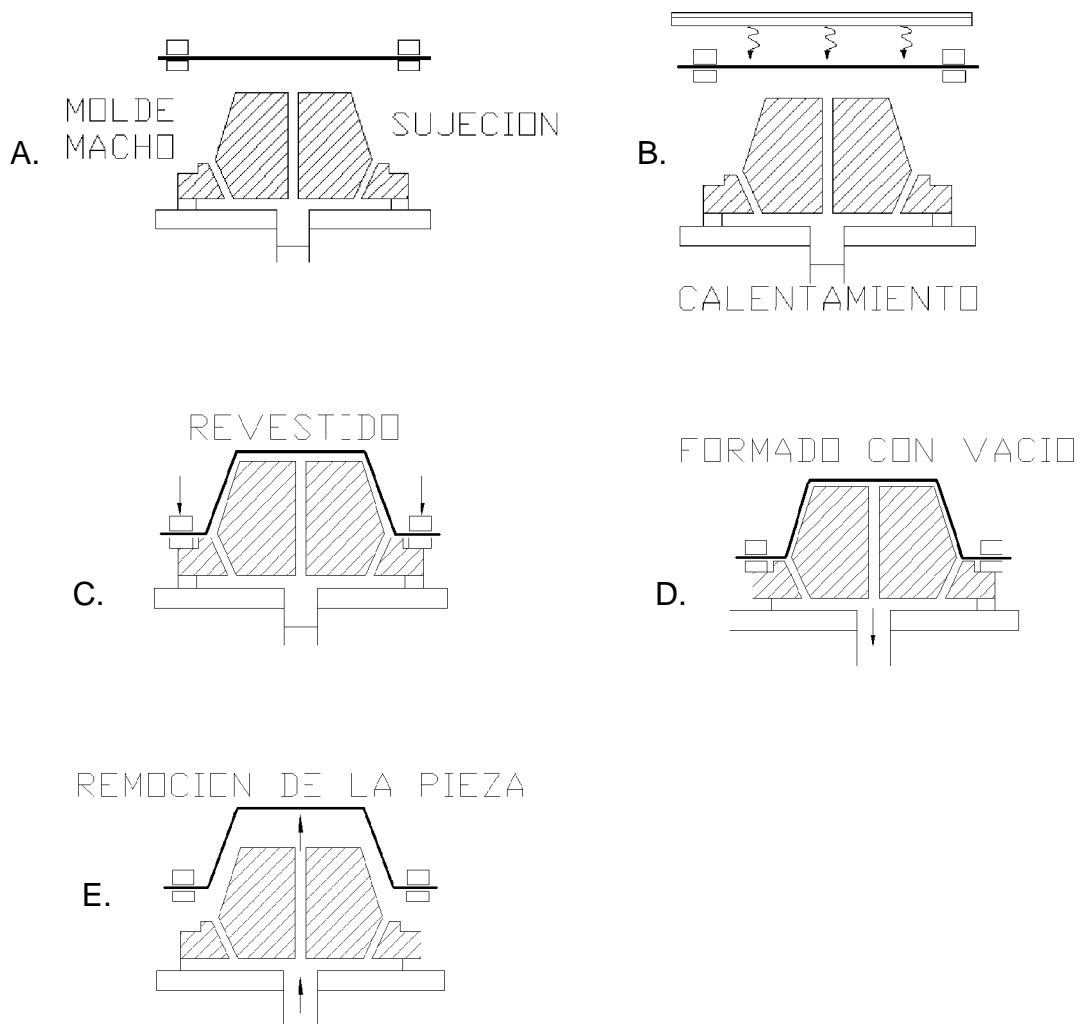
Es una técnica por la cual se obtienen diseños profundos.

- La lámina termoplástica se sujeta en un marco molde sobre un molde macho.
- Se calienta la lámina bajo calentadores radiantes.
- Cuando se alcanza la temperatura de formado la lámina se baja sobre el molde.

- Luego de que la lámina ha cubierto totalmente el molde, se aplica el vacío y la lámina recoge los detalles del contorno del molde.
- La lámina se enfría tan pronto alcanza la superficie del molde y se retira el artículo formado.

Controlar el espesor en diseños profundos es un problema bastante difícil. Los acrílicos y estirenos se deslizan sobre el molde frío sin dificultad, mientras las láminas de polietileno tienden a quedarse pegadas a molde. En estas condiciones la sección sobre la parte superior del molde es aproximadamente tan gruesa como la lámina original, mientras que los lados son más delgados y las arcas en las proximidades de la unión de la base horizontal y las paredes verticales son usualmente más delgadas.

Figura 27. Termoformado al vacío por revestimiento



3.4.4.5 Formado al vacío con embutido auxiliar (vacuum plug-assist forming)

Para resolver el problema del adelgazamiento se ha desarrollado una modificación del termoformado al vacío en un molde hembra y se le ha denominado formado al vacío con embutido auxiliar. Para esta técnica las secuencias de operaciones como lo indica la figura 28 es la siguiente:

- Se sujeta la lámina contra el molde hembra.
- Se calienta bajo la acción del calentador.
- Se forza la lámina caliente en el molde hembra, usando un bloque auxiliar antes de aplicar el vacío. El bloque tiene una forma aproximadamente a la cavidad y preforma la lámina durante su movimiento de descenso.
- Inmediatamente después que el bloque se apoya en el fondo, se aplica el vacío y se deforma aun más la lámina con el fin de reproducir los detalles de la superficie del molde. Esta técnica puede ser considerada como contraria a la técnica de forzar un molde macho sobre la lámina (Snap-back).

Durante el descenso del bloque, el aire encerrado en la cavidad del molde es comprimido.

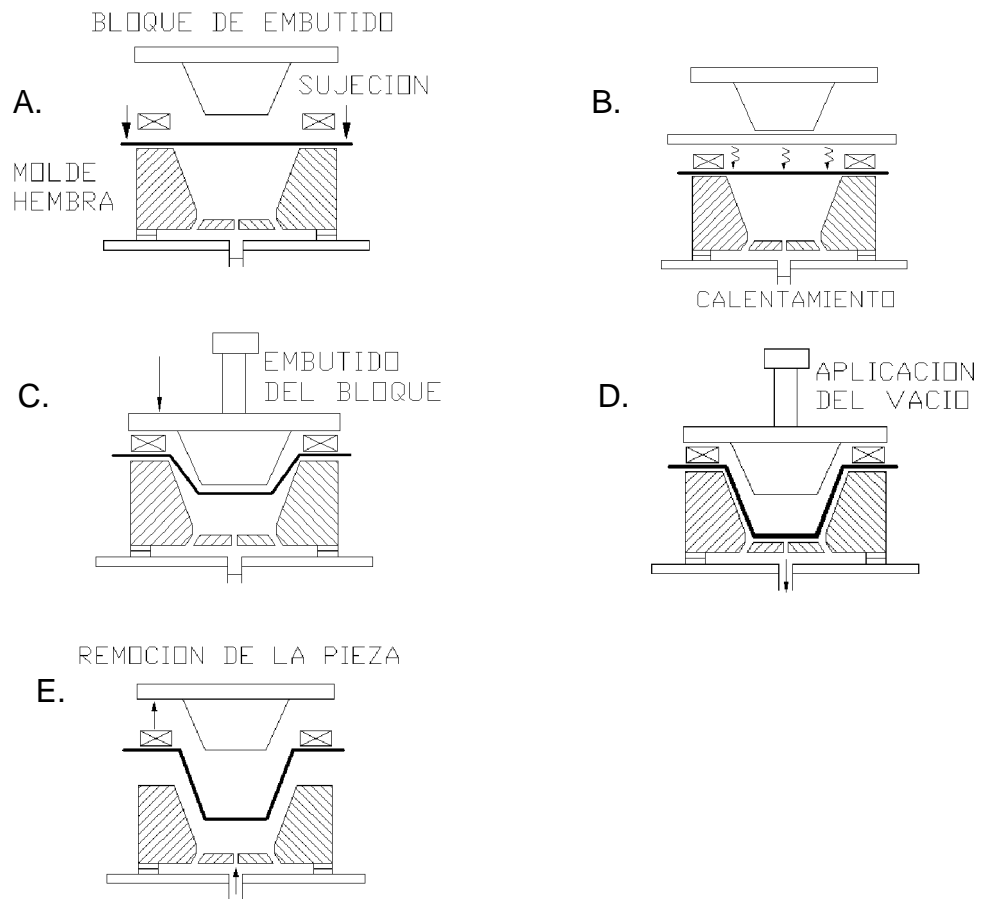
Esto da origen a que la lámina blanda se sople hacia arriba y se aleje de los contornos del molde y se presione estrechamente alrededor del bloque. La lámina no se enfría ni se endurece por el contacto con los contornos del molde y se forma o se modela uniformemente sobre la parte inferior de la cavidad. El bloque puede ser calentado para evitar que halla enfriamiento brusco en la lámina. El molde hembra se mantiene generalmente frío para permitir un enfriamiento rápido. Se obtienen unas piezas de diseño profundo, con espesor uniforme en las paredes y sin señales defectuosas.

- Se retira el artículo formado.

Puesto que el bloque ocupa una gran porción del volumen del molde, se requiere un control de la presión interna del aire en la cavidad ya sea mediante un orificio de escape o mediante una válvula de descarga.

Pueden producirse artículos de pared doble, tales como cabinas de refrigeradoras, manteniendo el marco de sujeción estacionario. Y moviendo el bloque hacia abajo y el molde hacia arriba.

Figura 28. Formado al vacío con embutido auxiliar



3.4.4.6 Termoformado al vacío con aire atrapado (vacuum air-slip forming)

Esta técnica es una modificación del formado por revestimiento sobre un molde macho y se usa para reducir el adelgazamiento en piezas de mucha profundidad. Consiste en preformar la lámina antes del formado por revestimiento, tal como lo hace el bloque del método anterior. Los pasos a seguir en este método son:

- La lámina termoplástica se calienta a la temperatura correcta en un marco de sujeción estacionario.

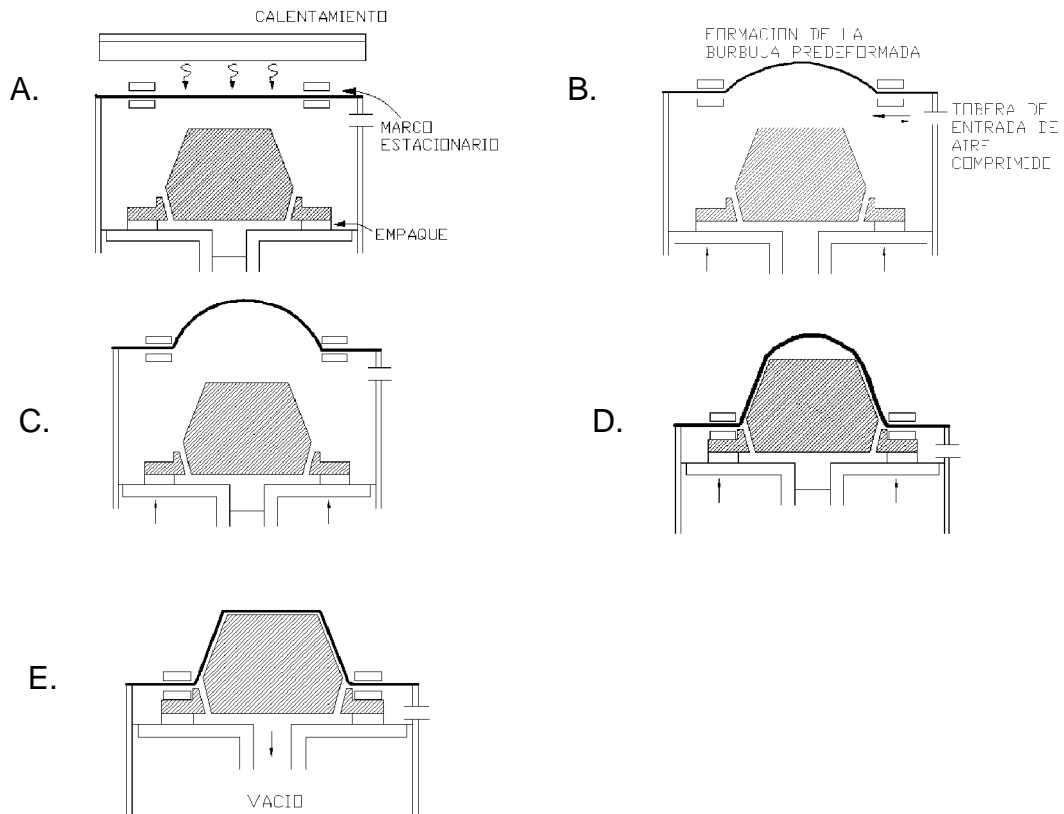
La porción de la máquina debajo del marco de sujeción es hermética. El molde macho se monta en una mesa que tiene empaques en todo su perímetro y se mueve como un pistón en la posición hermética.

- Cuando la mesa se levanta se forma una bomba de aire puesto que se oprime al aire existente entre la lámina caliente y el molde.
- El aire comprimido preforma la lámina uniformemente, y el tamaño de la burbuja se controla automáticamente por válvulas de escape colocadas al frente de la cavidad, hasta que la mesa porta molde hace contacto y sella con el marco de sujeción.
- Aplicando vacío la lámina caliente y preformada se adhiere al molde, tomando así la forma requerida.

Con esta técnica se obtiene una distribución muy uniforme de las medidas, porque la lámina se desliza sobre las esquinas y contorno del molde. Esta y la técnica de macho forzada en la lámina (snap-back forming) dan la más uniforme orientación biaxial de la lámina y reducen los costos, ya que se requiere menor acabado en los contornos.

Generalmente, el aire atrapado bajo la lámina caliente es suficiente para formar la burbuja. Sin embargo, si se desea, es posible introducir aire comprimido y precalentado adicional para aumentar el tamaño de la burbuja y obtener mayor ensanchamiento. Si la presión es muy elevada, puede ser reducida utilizando válvulas de escape.

Figura 29. Termoformado al vacío con aire atrapado

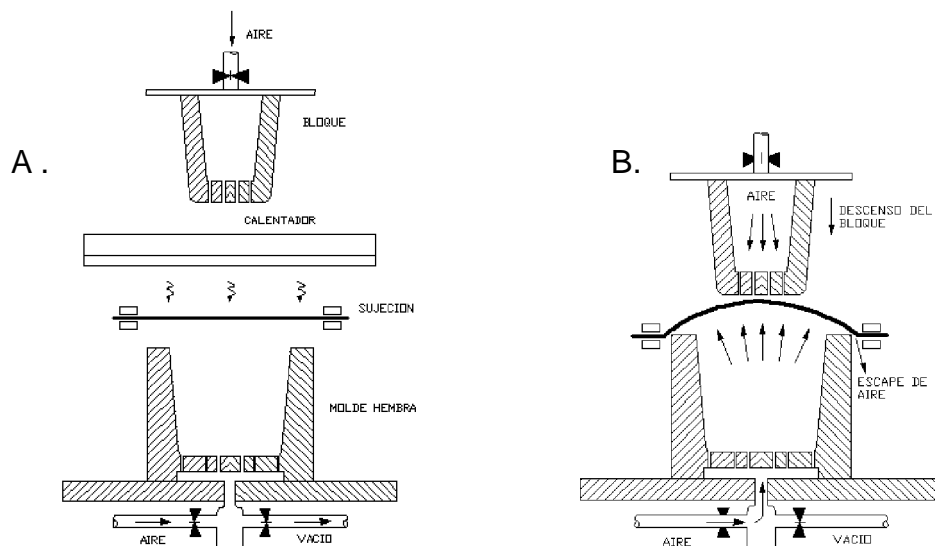


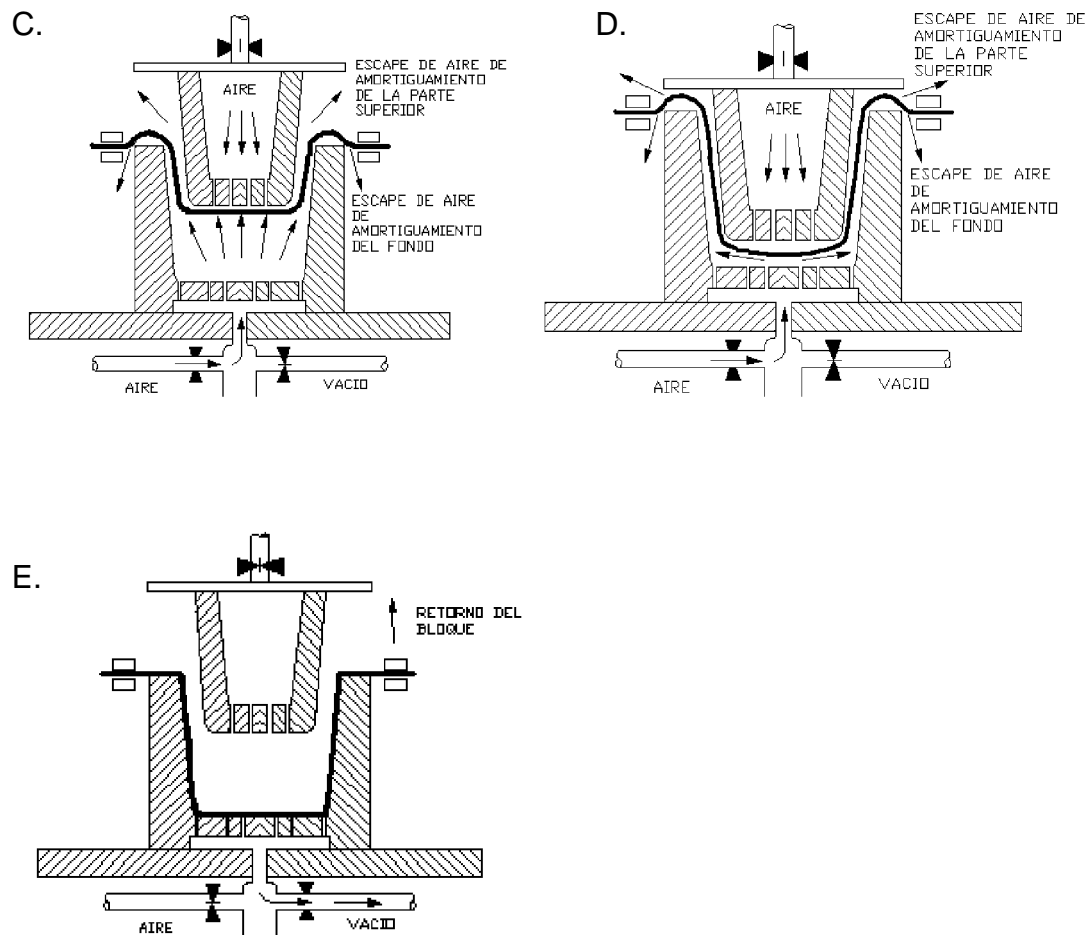
3.4.4.7 Formado al vacío con amortiguamiento de aire (vacuum air cushion forming)

Esta técnica es una modificación del termoformado con bloque auxiliar, como también del formado por aire. Se requiere de sistema de vacío, de presión y un bloque con orificios para el aire. Su principio consiste en preformar por embutido y con aire la lámina caliente.

- Se coloca la lámina en el marco de sujeción y se calienta a temperatura adecuada de formado.
- Se baja el dispositivo de sujeción hasta que la lámina cubre totalmente el molde hembra.
- Se introduce aire en el molde que forma una burbuja en la lámina, el exceso de aire escapa por los bordes del molde.
- Se introduce el bloque en la burbuja plástica. Se sopla aire a través de los huecos del bloque formando una cámara de amortiguamiento por aire y deformando la lámina a su forma final, manteniendo sin embargo la uniformidad en el espesor de las paredes. La lámina caliente se soporta entre el bloque y el molde hembra por el aire en movimiento.
- Se suspende la introducción de aire y se aplica vacío y la lámina caliente se acomoda a los contornos del molde. Se retira el bloque, se enfría la pieza en el molde y puede removerse de inmediato con la ayuda de la acción del levantamiento del marco y con la introducción de aire a través de las toberas. Se sigue circulando aire para enfriar el molde y asegurar el comienzo de un nuevo ciclo.

Figura 30. Formado al vacío con amortiguamiento de aire





3.5. MOLDES

Ocasionalmente no se requieren moldes para formar la lámina, como es el caso con el método de formado de soplado libre usado para hacer claraboyas de ventana para casas pero la gran mayoría de operaciones de formado requieren molde para darle forma a la lámina. La principal función del molde es darle forma a la lámina plana caliente. La lámina es forzada a pegarse a la superficie del molde.

3.5.1 Elección del tipo de técnica de formado

Uno de los aspectos más importantes que se deben tomar en cuenta para el termoformado de piezas, es la técnica de termoformado a emplear, ya que si

por las características del producto se utiliza una técnica inadecuada, lo más probable es que se presenten problemas antes de obtener una pieza con las especificaciones que se determinaron desde un principio y en muchos de los casos se puede tener un fracaso con las consecuentes pérdidas de tiempo, dinero y recursos. Por eso, antes de proceder a fabricar un molde debemos considerar lo siguiente:

- La forma y dimensiones de la pieza.
- La apariencia deseada.
- La técnica de termoformado.

Con base en estos factores, se podrá planear y anticipar posibles defectos de las piezas.

3.5.2 Criterios para el diseño de productos termoformados

Hay que mencionar que la técnica de termoformado aunque versátil y flexible, difiere en cuanto a apariencia y características en comparación a los productos fabricados por moldeo en inyección. En la siguiente tabla comparativa se podrán analizar sus diferencias básicas. En conclusión, para el diseño de piezas termoformadas es necesario establecer los siguientes criterios:

- Deberá considerarse un adelgazamiento en el espesor del material, esto dependerá más que nada de la forma, tamaño y técnica utilizada. En términos generales se puede considerar que el adelgazamiento en el espesor del material es directamente proporcional a la altura de la pieza.
- Deberá considerarse un ángulo de salida de moldeo entre 3° y 5°.
- Deberá tomarse en cuenta una contracción en la pieza del 0.6 al 1% al enfriar.
- Por lo general, la superficie de la pieza termoformada será lisa, aunque es posible obtener algunas texturas.
- En el diseño de la pieza es conveniente incluir radios grandes; es posible obtener aristas, pero podrán causar rasgaduras en el material.

Tabla 5. Diferencias Básicas entre el Proceso de Inyección y el de Termoformado

VARIABLES	PROCESO	
	INYECCIÓN	TERMOFORMADO
Espesor	Constante	Variable
Ángulos de salida del molde	0.5° - 1°	3° a 5°

Temperatura de moldeo	200° - 240°	160° a 180°
Tolerancia dimensional	Excelente	Relativamente buena, no para piezas de precisión.
Insertos	Es posible la inserción de elementos en otros materiales	Se puede preparar la superficie del molde para admitir insertos
Acabado superficial	Se pueden lograr superficies lisas o con cualquier textura	Solo superficies lisas y algunas texturas no muy profundas
Producción	Alta producción, cientos o miles de piezas diarias	Media producción algunas decenas de piezas diarias
Molde	De acero con aleaciones o tratados alto costo, diseño complejo, molde macho hembra	Variedad de materiales, costo relativamente bajo, diseño sencillo, se puede utilizar molde hembra o macho
Posibilidad de hacer nervaduras, agujeros del tipo, roscas, etc.	Si	No
Desperdicio de material	Muy poco Es recuperable	Depende de la forma de la pieza, aproximadamente un 25% de desperdicio y es recuperable
Radios	Es necesario redondear las aristas, aproximadamente 1.5 del espesor del material	Se requieren radios comparativamente más grandes, desde 1cm a 5 cm, depende de la forma y profundidad
Tiempo de desarrollo de la pieza	De 3 a 6 meses	1 mes máximo
Tratamientos y acabados posteriores	Se pueden aplicar cualquier tratamiento o acabado (pintado, hot-stamping, metalizado, serigrafía, etc).	Se puede aplicar cualquier tratamiento o acabado (pintado, hot-stamping, metalizado, serigrafía, etc.)

3.5.3 Consideraciones en el diseño de moldes de termoformado

Una de las grandes ventajas del proceso de termoformado es la diversidad y tipo de moldes que se pueden fabricar a un costo muy bajo y en tiempos

relativamente cortos, teniendo una gran aceptación en varias aplicaciones sobre otros procesos.

Generalmente y a diferencia de los moldes para inyección, sólo se necesita la mitad del molde y depende de la forma del producto, la apariencia deseada y la técnica seleccionada (puede ser molde macho o hembra).

La elección de cual es la indicada se vuelve más importante cuando la parte a termoformar es más profunda. Cuando son piezas poco profundas, perfiles pequeños o cuando el adelgazamiento en el espesor del material es despreciable, entonces la elección dependerá de la apariencia de la pieza. Si el detalle del molde es importante, entonces el lado de la lámina de plástico que toca la superficie del molde, deberá ser la vista de la pieza.

Algunas veces un radio mayor o apariencia suave es deseable o si la lámina presenta una superficie agradable, entonces en estos casos la cara que no toca la superficie del molde será la vista de la pieza, además de que se puede obtener un control dimensional más cerrado con la superficie del molde.

3.5.4 Tipos de moldes

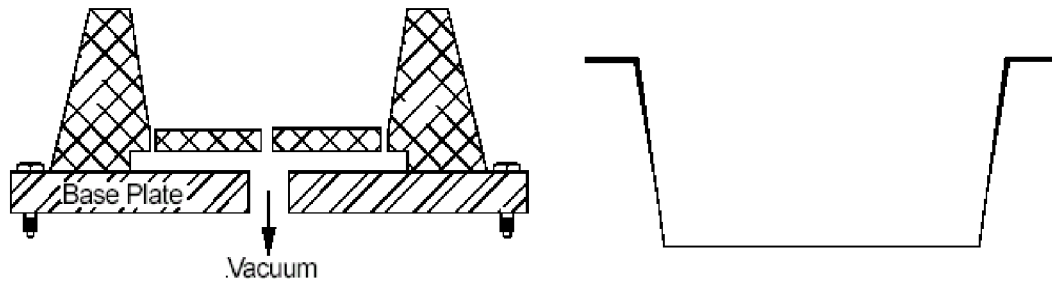
Existen tres tipos moldes (hembra, macho y machi-hembra), todos tienen diferentes cualidades y dejarán sus características distintivas sobre la pieza formada. Todos los tres moldes se pueden encontrar en formas simples o compuestos. Un molde simple usa una lámina simple para formar una pieza individual. Son importantes varias consideraciones para todos los tipos de moldes, por ejemplo, consideraciones de contracción de la pieza y ventilación del molde son factores importantes de diseño.

3.5.4.1 Molde hembra

Para el molde hembra mostrado en la figura 31 la lámina caliente toma la forma de la cavidad del molde ya sea por la fuerza de presión o vacío, o una combinación de ambas. De un molde hembra resultan menos características del molde en la pieza, lo cual significa que los moldes hembra con frecuencia no se usan donde se requieren detalles intrincados en la superficie de la pieza. Puesto que la pieza se encogerá durante su enfriamiento, resulta muy fácil sacarla del molde, como se puede ver en la figura 31, la mayoría de los esfuerzos ocurren en la parte inferior de la lámina mientras que el área de los bordes continúa con un espesor muy similar al inicial. Esto sugiere que una

igual distribución de material antes del formado no dan como resultado una pieza con paredes de un igual espesor.

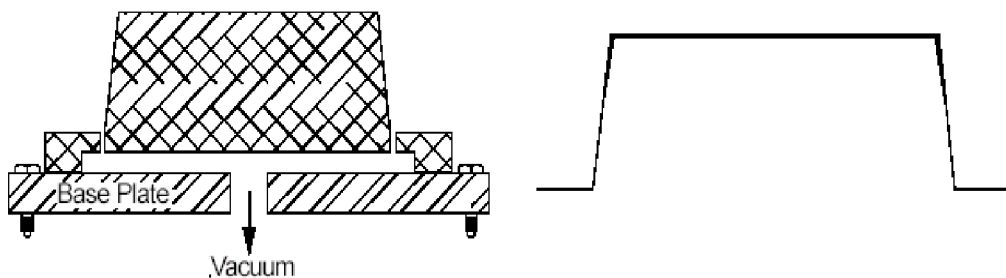
Figura 31. Molde hembra básico y distribución de material para una pieza moldeada con molde hembra



3.5.4.2 Molde macho

El molde macho es básicamente el inverso del molde hembra. El formado se realiza con el cubrimiento de lámina sobre el molde y luego al aplicar la fuerza de presión y/o vacío toma la forma del molde. El molde macho resulta todo lo contrario del molde hembra en cuanto a distribución del material. La parte superior de la pieza hace primero contacto; por lo tanto, esta se enfría primero y los esfuerzos son menores. Una ventaja del molde macho es que es mucho menos costoso de fabricar que el molde hembra. El molde macho además tiene desventajas. Para comenzar, extraer la pieza se convierte en un problema porque el encogimiento provoca que la pieza se superponga y apriete el molde. A menudo se usa aire a presión para remover la pieza. Otra desventaja es que es mucho más difícil implementar ayudas mecánicas. El espaciamiento es mucho más crítico que con el molde hembra ya que la mayoría de los esfuerzos y adelgazamiento del material ocurre entre los moldes y no sobre el área de moldeo. La figura 32 muestra un molde macho básico.

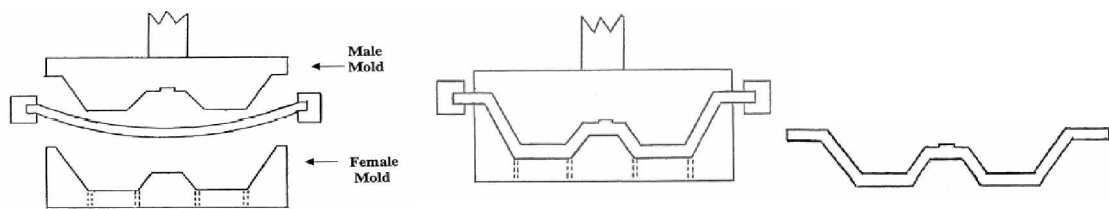
Figura 32. Molde macho básico y distribución de material para piezas con molde macho



3.5.4.3 Molde machi-hembra

La lámina es forzada dentro de un molde hembra por un molde macho. También existen variaciones donde se usa aire a presión y/o la fuerza de vacío. La alineación de los moldes es un factor muy importante en este tipo de moldes. Una pequeña desalineación resultara en una pieza rechazada. Una ventaja de los moldes machi-hembra es que es posible obtener diferentes características de superficie en los lados opuestos de la pieza.

Figura 33. Moldeo con molde machi-hembra



3.5.5 Adelgazamiento del espesor del material

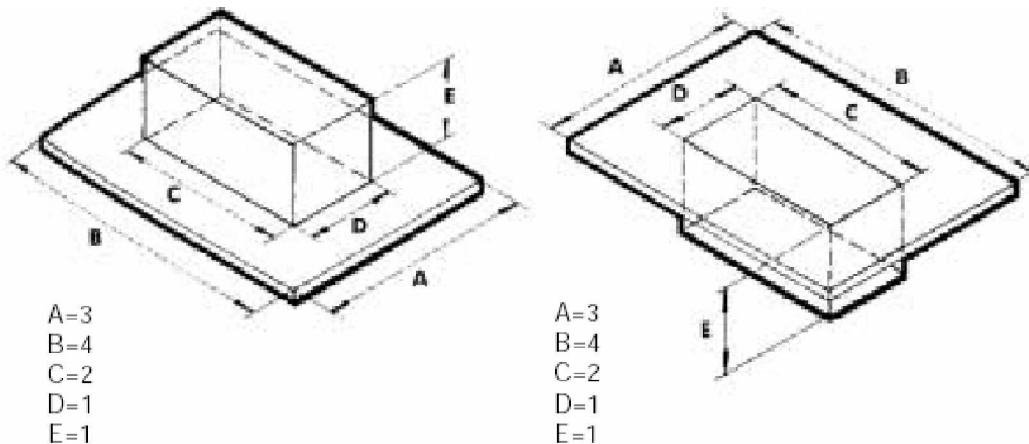
Bajo todas las condiciones de termoformado donde las piezas son formadas por lámina de plástico, el área de la superficie se volverá más larga, habrá un estiramiento y por lo tanto el espesor del material se volverá más delgado.

Uno de los factores decisivos para este adelgazamiento es el radio, definido generalmente como el radio máximo de profundidad o altura con el mínimo espacio a través de la abertura. Para estimar este adelgazamiento, uno deberá determinar el área de la hoja disponible para el termoformado y dividirla entre el área de la pieza final, incluyendo el desperdicio. Siempre es deseable que los moldes y las piezas termoformadas tengan radios de curvatura grandes. Teóricamente existe una fórmula para determinar el porcentaje de adelgazamiento del material, considerando que el material es uniformemente revenido y estirado.

$$\% \text{ de adelgazamiento} = \frac{\text{espesor final de material}}{\text{espesor original del material}} = \frac{\text{área disponible de la hoja}}{\text{área total de la pieza formada}} =$$

$$\frac{A \times B}{A \times B \times E (2C + 2D)}$$

Figura 34. Ejemplo de adelgazamiento del espesor del material



3.5.6 Encogimiento y tolerancias dimensionales

El encogimiento y tolerancias dimensionales en el termoformado son diferentes para piezas formadas en molde macho y aquellas formados en molde hembra. En un molde macho el encogimiento puede disminuir si la pieza se enfría el mayor tiempo en el molde. Si el enfriamiento se produce hasta la temperatura ambiente en el molde, el encogimiento será mínimo. Esto tendrá por resultado que la dimensión interna de la pieza será muy cercana a la dimensión del molde, pero con un ciclo de operación bastante improductivo.

El hecho es, sin embargo, que en los moldes machos la pieza deberá desmoldarse todavía cuando esté caliente, de lo contrario será difícil el desmolde. A esto precisamente se refiere el encogimiento térmico, que es la diferencia proporcional entre la temperatura ambiente y la temperatura al momento de desmoldar. De esta manera, para conservar la dimensión especificada de la pieza, será necesario que el modelo sea ligeramente más grande.

En comparación, con el molde hembra la pieza formada empezará a encogerse tan pronto como la temperatura del material esté por debajo de la temperatura de moldeo. Para mantener una tolerancia cerrada continuamente, la dimensión del molde deberá ser considerablemente incrementada y mantenida la presión de vacío durante todo el tiempo de operación.

3.5.7 Apariencia del molde

Es necesario aclarar que las superficies obtenidas por los procesos de inyección y extrusión, no podrán reproducirse en las técnicas convencionales de termoformado. Inclusive los materiales altamente brillantes, pueden perder su brillo durante el proceso, además de que tienden a enfatizar marcas y ondulaciones por contacto de un molde frío y cambios en el espesor del material. El cambio en espesor del material será causa de pequeñas distorsiones, de esta manera la limpieza en el área de trabajo es indispensable. Se recomienda que todos los contornos estén bien redondeados, de hecho un molde con radios grandes beneficiará la operación de termoformado ya que el material, tenderá a estirarse mejor.

Si se requiere que la hoja copie detalles del molde, como por ejemplo texturas antideslizantes u otras similares, éstos por lo menos deberán ser tres veces mayor que el espesor del material, de hecho es mejor contar con una superficie de moldeo no tan lisa, ya que así no copiará la pieza los errores del molde. Inclusive se puede sandblastear con micro-esferas de vidrio o materiales abrasivos. Con esto se puede eliminar el aire atrapado permitiendo el movimiento del aire entre el molde y la pieza. A veces es conveniente rallar la superficie del molde con una lija burda, esto ayuda en la etapa de desmoldeo para romper el vacío que existe entre el molde y la pieza.

Figura 35. Superficies de molde en el termoformado

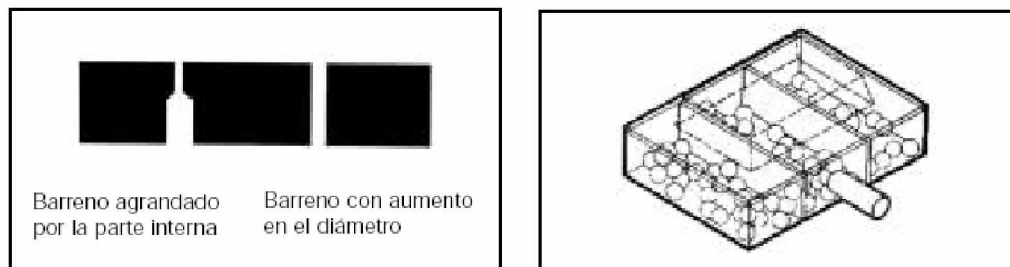


3.5.8 Orificios de vacío

Cuando se utilizan técnicas de termoformado con vacío o presión de aire, es muy importante desplazar el mayor volumen de aire entre el molde y la lámina en un mínimo de tiempo. Dependiendo del tipo de molde, se puede utilizar desde un orificio de 1/2" o 1", como en el caso del termoformado de domos, hasta una distribución homogénea en todos los vértices del molde. En general, el diámetro de los orificios o barrenos de vacío deberán ser ligeramente menores al espesor de material. Como punto de partida, los orificios de vacío tendrán un diámetro equivalente al espesor final de la pieza

termoformada, para aquellos casos en que el material sea muy delgado o grueso, o que no importe si se marcan estos orificios, entonces esta regla no aplica. Podemos considerar que un rango apropiado está entre 1/32" hasta 1/8" de diámetro. En caso necesario, para desplazar un volumen de aire grande, se pueden taladrar algunos orificios de 1/8" ó 1/4" de diámetro. Dependiendo de la construcción del molde, los orificios podrán ampliarse en la parte interna del molde como se muestra en la figura 6. Para reducir el tiempo de desplazamiento del volumen de aire en la periferia de la lámina reblandecida y en la caja de vacío, se podrá rellenar el espacio con pelotas de espuma de poliestireno o pedazos de poliuretano.

Figura 36. Orificios de vacío y mesa de vacío rellena con pelotas



3.5.9 Temperatura del molde

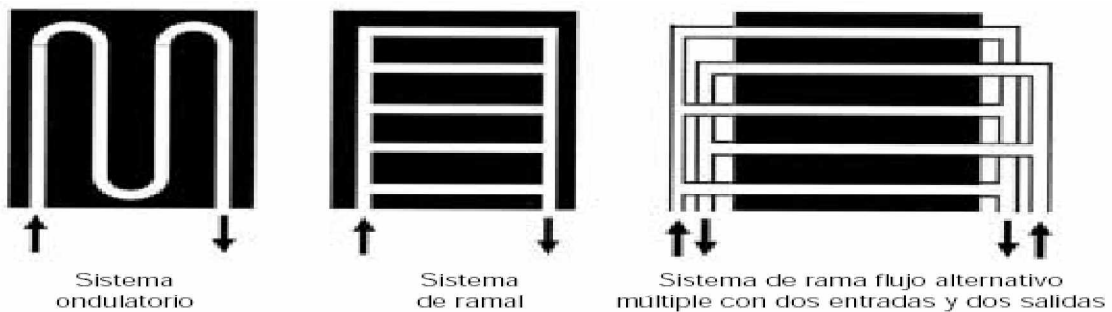
La segunda, e igualmente importante, función del molde es absorber el calor de la lámina. Para grandes volúmenes de producción el molde se calentará a un punto donde su temperatura se igualará con la de la lámina; por lo tanto se requiere alguna forma de enfriamiento. Los moldes de termoformado pueden ser enfriados simplemente por un flujo de aire sobre su superficie o interno por medio de líquido refrigerante por canales, generalmente se emplea tubo de cobre y éste deberá estar localizado adecuadamente y con capacidad suficiente para transportar un volumen considerable de agua o refrigerante. Es conveniente establecer una relación entre la temperatura de la hoja y el molde para que no se enfríe en exceso el material y no se termoforme por debajo del límite inferior de la temperatura del moldeo.

Hay distintos métodos para enfriar un molde, por ejemplo, cuando existen zonas críticas de moldeo, se pueden incorporar insertos plásticos de nylon o politetrafluoretileno. En algunos casos se puede aplicar un recubrimiento plástico para reducir la conductividad térmica o inclusive, después del termoformado se puede inyectar por los orificios de vacío, aire a presión. En la figura 37 se muestran tres sistemas de enfriamiento: el primero, es un

sistema ondulatorio de enfriamiento, el segundo, es un sistema de ramal y el tercero es un sistema de flujo alternativo múltiple externo con dos entradas y dos salidas.

No se debe enfriar el molde mucho sino la formación de detalles será pobre o posiblemente un estiramiento de la lámina desigual. Algunas operaciones no necesitan enfriar el molde porque el medio ambiente disipa suficiente calor. Algunos volúmenes de producción bajos necesitan un calentamiento auxiliar del molde porque algunos materiales termoplásticos requieren una temperatura elevada en el molde para un formado apropiado. El calentamiento del molde se puede conseguir por medio de un calentador eléctrico o la circulación de fluidos calientes (usualmente agua o aceite) a través del interior del molde. Una temperatura apropiada del molde es crítica para la producción de una pieza exitosa. Los fabricantes de láminas usualmente dan una idea del rango de temperatura del molde pero siempre hay un cierto nivel de puesta a punto involucrada.

Figura 37. Algunos sistemas de refrigeración del molde



3.5.10 Materiales empleados en la fabricación de moldes de termoformado

En contraste con otros procesos de moldeado de plásticos, como la inyección o compresión, en el termoformado se tiene la ventaja de utilizar presión y temperatura relativamente bajas, por esta razón se puede utilizar una gran variedad de materiales. Generalmente podemos emplear moldes de madera, éstos son ideales para una baja producción y como la madera tiene baja conductividad térmica, favorece que la hoja revenida no se enfríe rápidamente al primer contacto, pero cuando se tiene una mediana o alta producción los moldes de madera son inadecuados. La construcción de moldes con laminados fenólicos resulta mejor debido a que no son mayormente afectados por el calor o la humedad.

Existen también moldes fabricados con cargas minerales o metálicas y resina poliéster o epóxica o de poliuretano rígido. Éstos tienen la facilidad de poder

vaciarse de un molde y tener inclusive un molde de cavidades múltiples. Las propiedades térmicas de las resinas epóxicas o poliéster los hacen adecuados para corridas de mediana producción, inclusive se podrá embeber tubería de cobre como sistema de enfriamiento para controlar mejor la temperatura del molde, pero aún así resulta insuficiente para altas producciones.

Los moldes de aluminio son los mejores para altas producciones, pero la conductividad térmica del aluminio hará necesario precalentar el molde por medio de circulación de agua caliente a través del sistema de enfriamiento/calentamiento o radiando calor con resistencias eléctricas o inclusive calentando el molde con el mismo material a termoformar. Para corridas largas será necesario incorporar un termostato para asegurar que exista la menor fluctuación de temperatura en la superficie del molde, evitando así un sobre enfriamiento. Las propiedades de uso del aluminio podrán ser mejoradas con la aplicación de politetrafluoretileno.

En resumen, existen cuatro grupos de materiales para la construcción de moldes de termoformado:

- Madera
- Minerales
- Resinas plásticas
- Metales

Tabla 6. Materiales empleados en moldes de termoformado

GRUPO	MATERIALES EMPLEADOS	VOLUMEN DE PRODUCCION	VENTAJAS Y DESVENTAJAS
Maderas	Pino Caoba Cedro Maple Triplex Aglomerado	Baja	Estos moldes se caracterizan por ser de bajo costo, tiempo de construcción corto y buen acabado superficial, aunque en algunos casos la veta de la madera deje marcas de moldeo. La madera deberá ser estufada y si se desea un mejor acabado y evitar cambios dimensionales debido a la humedad, los moldes deberán sellarse con caseína, barniz fenólico

			<p>o resina epóxica diluida en metil etil cetona. Para lograr un mejor acabado la veta de la madera debe estar paralela a la longitud del molde. Los moldes hechos con triplex o aglomerado tienen más duración. La duración del molde puede prolongarse considerablemente reforzando las aristas con metal.</p>
Minerales	<p>Yeso (carbonato de calcio) Fluosilicato de sodio</p>	<p>Baja Mediana</p>	<p>Los moldes de yeso tienen mayor duración que los de madera y pueden vaciarse de un compuesto de yeso de bajo encogimiento, alta resistencia y reforzados en su interior con malla de metal, fibra de vidrio u otros materiales que no absorban humedad. El yeso se vacía sobre el modelo y debe dejarse curar por espacio de 5 a 7 días a temperatura ambiente. Si la superficie del modelo es buena, no se requerirá un acabado posterior. Los recubrimientos de resina poliéster, epóxica o fenólica proporcionan una superficie más resistente. Deben tenerse extremas precauciones para no astillar el yeso al hacer las perforaciones de vacío. En ocasiones puede eliminarse las perforaciones, si se dejan previamente insertados trozos de alambre, que sean</p>

			removidos de su sitio después del fraguado.
Resinas plásticas	Resina poliéster Resina epóxica Resina fenólica Laminados plásticos Nylon	Mediana	Los moldes de resinas plásticas son más costosos y elaborados que los de yeso o madera, pero ofrecen una mayor duración, superficies más tersas y mejor estabilidad dimensional. A las resinas poliéster, epóxicas o fenólicas se pueden cargar con polvo de aluminio, que proporciona una temperatura más homogénea del molde o, con caolín, fibra de vidrio y otras cargas. A estos moldes se puede incorporar el sistema de vacío, embebiendo media caña de cartón en la parte posterior del molde.
Metálicos	Aluminio Cobre-berilio Fierro	Alta	Son ideales para grandes corridas de producción, altas presiones o formado mecánico. Pueden usarse moldes de fundición en aluminio, bronce o cualquier otra aleación de bajo punto de fusión, y maquinados en acero, latón o bronce. Son los más costosos, el tiempo de construcción es largo, tienen mejor acabado superficial, bajo costo de mantenimiento y mejor estabilidad dimensional. Es forzoso utilizar sistema de enfriamiento, así como evitar enfriamientos rápidos en la pieza.

4. MAQUINAS DE TERMOFORMADO

Las máquinas termoformadoras vienen en una amplia variedad de formas y tamaños. Las máquinas son a menudo diseñadas especialmente con el propósito de hacer un pieza en particular. Algunas máquinas pueden ser consideradas para propósitos más generales pero esas máquinas con frecuencia no tienen la capacidad de altas velocidades de producción, lo que no ocurre con las máquinas especializadas.

Las termoformadoras vienen en dos tipos básicos: alimentadas por lámina y alimentadas por rodillo. Ambos tipos tienen diferentes niveles de sofisticación y automatización. Un amplio rango de tamaños está disponible para ambos tipos. El tamaño de la máquina es medido generalmente por el tamaño del molde que puede ser alojado y la cantidad de fuerza de formado disponible.

4.1. TERMOFORMADORA ALIMENTADA POR LAMINA

En las máquinas alimentadas por lámina generalmente solamente pueden alojar una lámina al tiempo excepto por las máquinas termoformadoras de láminas gemelas las cuales pueden procesar dos láminas simultáneamente. La termoformadora alimentada por lámina más simple es estacionaria, la lámina es calentada y formada en el mismo lugar. Las termoformadoras de plataforma tales como la mostrada en la figura 38 son más comunes. La característica básica de una termoformadora de plataforma es que la lámina sujeta entra y sale del área de calentamiento. Se pueden encontrar numerosas variaciones pero el principio es el mismo.

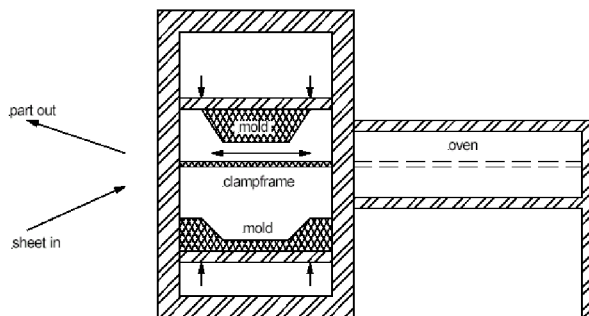


Figura 38. Máquina Termoformadora
plataforma de estación

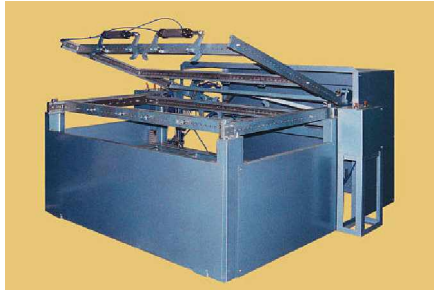


Figura 39. Termoformadora manual

4.2. TERMOFORMADORA ALIMENTADA POR RODILLO

Las termoformadoras alimentadas por rodillo son para altos volúmenes de producción, máquinas en línea que halan el material termoplástico de un rodillo grande a un extremo de la máquina. El proceso es mucho más eficiente además que nos es necesario cargar y descargar material dentro y fuera de la máquina. Es importante notar que las termoformadoras alimentadas por rodillo solamente pueden trabajar con material de espesor pequeño porque que no es posible enrollar materiales gruesos en forma de rodillo. Algunas variaciones de termoformadoras alimentadas por rodillo incluyen estación de corte en línea.

Figura 40. Ejemplo de termoformadoras alimentadas por rodillo



TC SERIE C



GN1407TM

5. PASOS DEL PROCESO DE TERMOFORMADO

En el termoformado podemos observar cinco pasos que son la sujeción de la lámina, calentamiento, formado, enfriamiento y corte; resaltándose lo sencillo y práctico del proceso.

5.1. SUJECIÓN DE LA LÁMINA

La sujeción de la lámina se refiere a todo el proceso antes del calentamiento. Para comenzar, el proceso de termoformado la lámina (o rollo) es removido del almacenamiento y secada en un horno secador si es necesario. (los rollos no pueden ser secados, solamente las láminas individuales) La lámina es entonces alimentada dentro de la cadena transportadora o marco de sujeción. Con esto el proceso de termoformado está listo para comenzar.

5.2. CALENTAMIENTO DE LA LAMINA

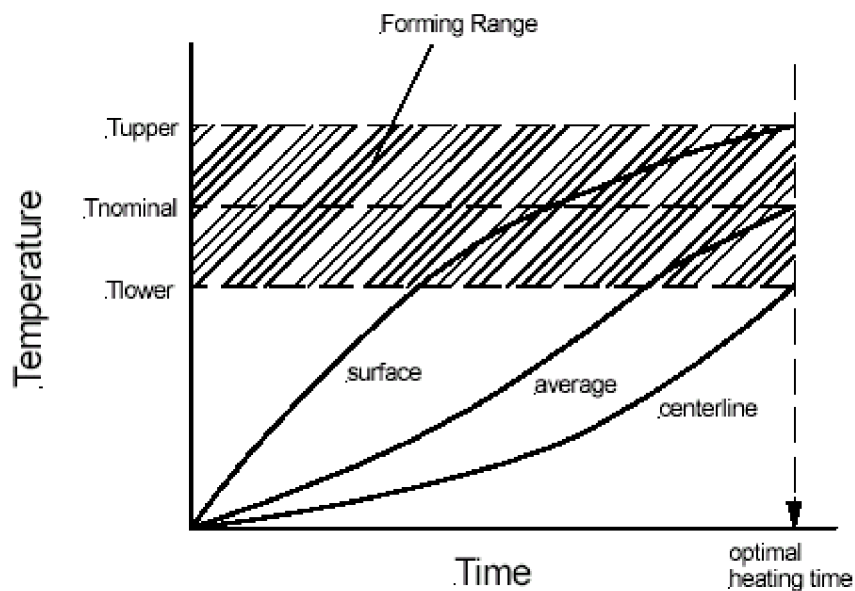
El calentamiento, o recalentamiento, probablemente es el paso más importante porque los resultados del calentamiento de la lámina pueden afectar todos los pasos del proceso que siguen.

Los dos factores a controlar para la etapa de calentamiento de la lámina son fijar la temperatura y el tiempo de calentamiento. El objetivo al calentar la lámina es traer la línea central de temperatura arriba hasta la mínima temperatura de formado tan pronto como sea posible. Para calentamiento por radiación, la temperatura de la superficie se incrementará rápidamente, y continuará elevándose mientras permanezca en el horno. Esto es muy importante para fijar las temperaturas de calentamiento tal que la temperatura de la superficie de la lámina no se eleve por encima de la máxima temperatura permitida. Si la temperatura de la superficie llega a ser muy alta hay una alta posibilidad de degradación del material y aun quemar la superficie del material, la cual resultara en una pieza rechazada. Además es importante limitar la rata de calentamiento para algunos materiales. Una rata de calentamiento muy rápida puede provocar una pérdida en la orientación molecular, degradar la superficie, y para materiales espumosos, resquebrajamiento de la espuma debido a la pobre expansión del materia. La máxima rata de calentamiento será fijada por la aplicación de la pieza y el tipo de lámina termoplástica.

Aun cuando los termoplásticos tengan un calor de procesamiento específico, el formado requiere un radiación de calor uniforme, rápida e intensa desde los extremos hasta el centro de la superficie. Para formar láminas de espesores por encima de 1.02mm se deben usar calentadores tipo sándwich (arriba y abajo). Para asegurarse que es usado suficiente calor, los calentadores deben tener capacidad de al menos 43 a 65 kW/m².

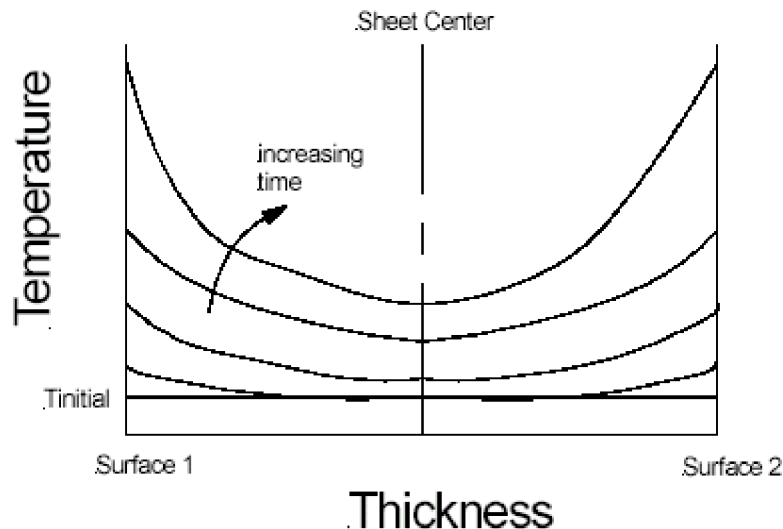
La curva de la figura 41 muestra el perfil típico de calentamiento de una lámina termoplástica. El área de formado (temperatura de lámina mínima y máxima permitida) generalmente es especificada por el fabricante del material. El hecho que la línea central de la lámina quede atrás de la temperatura de la superficie indica que el gradiente de temperatura aparecerá a través del espesor de lámina, el cual es ciertamente el caso. La figura 42 muestra los gradientes de temperatura que aparecen a través del espesor de la lámina durante el ciclo de calentamiento. El nivel de variación de temperatura a través de la lámina depende del espesor del material. En láminas gruesas se verán grandes variaciones de temperatura mientras que en láminas delgadas se verán variaciones muy pequeñas. Es importante notar que se desea una mínima variación de temperatura a través del espesor de la lámina. Pequeños gradientes de temperatura resultan en piezas que tienen propiedades mecánicas superiores y piezas que son generalmente mas fáciles de moldear.

Figura 41. Ejemplo del perfil de calentamiento de una lámina



Los gradientes de temperatura además pueden aparecer a través de la superficie de la lámina debido a un calentamiento no uniforme. El calentamiento no uniforme ocurre naturalmente en los sistemas de calentamiento por radiación aun si la fuente de calor se mantiene constante, la temperatura distribuida uniformemente. Si la fuente de radiación es mantenida a una temperatura uniforme, el centro de la lámina llegará a ser más caliente que los lados y las esquinas. Esto es debido a la naturaleza del calentamiento por radiación. Al centro de la lámina le llegará más energía de radiación que los lados y las esquinas, de tal manera este será más caliente. Las máquinas termoformadoras modernas generalmente tienen hornos con control de calentamiento por zonas, haciendo posible un calentamiento uniforme de la lámina; sin embargo, un calentamiento uniforme no es necesariamente deseado en todas las aplicaciones. Para algunos casos puede ser deseable fijar las temperaturas de calentamiento para producir sitios calientes en la lámina con el propósito de transferir material. Por ejemplo, el formado básico usando un molde hembra resulta en espesores de pared más delgados hacia el centro del fondo de la pieza. Ahora, con el calentamiento por zonas es posible calentar la lámina más en el centro de modo que el material fluirá hacia el centro de la lámina de tal forma que después del formado, el espesor de las paredes de la pieza será más uniforme que sin un calentamiento zonificado.

Figura 42. Ejemplo de perfil de calentamiento de lámina: gradiente de temperatura a través del espesor



estiramiento desigual debido al pandeo más adelante conducirá a un espesor de pared no uniforme. Si se si son usadas fuerzas de presión o vacío. El formado al vacío es usado más ampliamente pero la aplicación de fuerzas de presión para el formado esta aumentando ya que es posible obtener una mayor definición en Dos hechos acerca del comportamiento del material se deben mencionar. Las láminas hechas del mismo material pero con diferentes técnicas de manufactura no se comportarán de la misma manera cuando se sometan a las mismas condiciones de calentamiento. Además, los mismo materiales termoplásticos producidos de la misma manera teóricamente debería tener un comportamiento idéntico en los procesos de calentamiento y formado. En la práctica existen pequeñas diferencias. Al empezar el proceso de calentamiento, algunas láminas realmente experimentan movimientos ondulatorios transitorios debido al alto gradiente de temperatura inicial dentro de la lámina. Usualmente, este fenómeno es muy rápido y pasa desapercibido. Después de exponerse más al calor la lámina tiende a temporalmente a tensarse. Este comportamiento la mayoría de la veces no se nota. En el momento de mayor calentamiento la lámina se ablandará una vez la temperatura de transición vítrea halla sido alcanzada. Esta finalmente cederá por la gravedad y comenzará a pandearse. Este es el primer comportamiento notable de la lámina. Generalmente el pandeo es indeseable y se debería reducir tanto como sea posible. Algunas veces el pandeo puede ser ventajoso si se usa para el pre-estiramiento de la lámina en un intento por conseguir una distribución del espesor de la pared. Esto es importante de notar, sin embargo, el pandeo es muy difícil de controlar y un deja mucho tiempo en el horno se sobrecalienta y se rompe.

5.3. FORMADO

Una vez la lámina es calentada esta lista para ser formada. El formado es necesario para transmitir la forma del molde a la lámina. Como se mencionó antes, casi todas las operaciones de termoformado usan ya sea moldes macho, hembra o machi-hembra. El formado puede se clasificado basado en las piezas con grandes fuerzas de presión que con las pequeñas fuerzas de vacío. Existen muchos métodos diferentes de formado. Un objetivo común que tienen todos esos métodos de formado es una distribución del material uniforme, la cual puede ser generalizada como la finalidad última del termoformado.

El termoformado al vacío puede ser asociado a la mayoría de los otros procesos de formado. La lámina caliente y flexible es llevada rápidamente al molde (tal vez por piñones conductores) y/o movida por una presión de aire diferencial, la cual la mantiene en su sitio hasta enfriarla.

Los dos requisitos importantes en este ciclo son mantener la presión y asegurar un calentamiento uniforme del plástico. Una evacuación más rápida generalmente produce piezas de mayor calidad. Es importante tener un adecuado calentamiento del molde así el vacío rápido producirá piezas sin tensiones internas (o muy pequeñas). Mientras la pieza es formada, la presión manométrica nunca debe caer por debajo de 20 in Hg (68 kPa). A medida que el plástico se enfría, la presión no puede proporcionar fuerza suficiente para formar la pieza y no mantendrá el plástico pegado contra el molde.

Un vacío por debajo de 20 in Hg (68kPa) no es aceptable; son requeridas por lo menos 25 in Hg (85 kPa). Para regular apropiadamente la presión, es necesario un tanque de almacenar el vacío para mantener un vacío mínimo uniforme. Para ciclos de formado largos, un tanque permitirá el uso de bombas de vacío más pequeñas que de otra forma serian requeridas.

Lo mejor es tener el tanque de almacenamiento de vacío tan cerca como sea posible a la estación de formado y la válvula de control de vacío. Las mangueras flexibles para vacío con acoplamientos eliminan codos, tes y reducciones en la tubería. Todas las válvulas deben ser capaces de operar en su posición completamente abiertas. Para aprovechar la rápida capacidad de vacío del tanque, el molde debe ser capaz de sacar provecho de toda la presión de vacío disponible. Los orificios de vacíos deben ser taladrados tan grandes como sean posibles, y se debe usar una gran cantidad

En el termoformado algunas veces es necesario pre-estirar la lámina caliente antes del formado final. Normalmente es usado aire comprimido de 3-5 psi (21-34 kPa).

5.4. ENFRIAMIENTO

El siguiente paso en el proceso de termoformado es enfriar la pieza. El material debe enfriarse hasta que esté completamente rígido antes de que pueda ser sacado del molde. El enfriamiento es hecho por el mismo molde y algunas veces son usados ventiladores auxiliares para soplar aire del ambiente sobre la pieza para enfriarla más rápidamente. Al igual que con la rata de calentamiento, la rata de enfriamiento debe también ser considerada ya que esta afecta la cristalización del material, la cual puede ser un factor determinante en las propiedades mecánicas de la pieza. Los factores que afectan el tiempo de enfriamiento incluyen: 1) material de lámina; 2) espesor de lámina; 3) temperatura de formado; 4) material del molde; 5) temperatura del molde; 6) intensidad de contacto entre el molde y la lámina.

5.5. CORTE

Una vez la pieza es formada y enfriada es removida del molde y trasladada a la estación de corte. Para una sola pieza hecha de una sola lámina, el material de la lámina que fue usado para la sujeción usualmente necesita ser removido. A menudo se hace referencia a este como material de desecho en la industria de procesamiento de polímeros. Para piezas múltiples hechas de una sola lámina el material de desecho incluye el material de sujeción así como el material entre los moldes. El corte puede ser realizado manualmente usando cortadora manual o herramientas mecánicas pero esta técnica es usualmente reservada para operaciones que producen un pequeño número de piezas. Usualmente son usados equipos automatizados tales como punzón o troqueladora, o aun sistemas de corte robóticos.

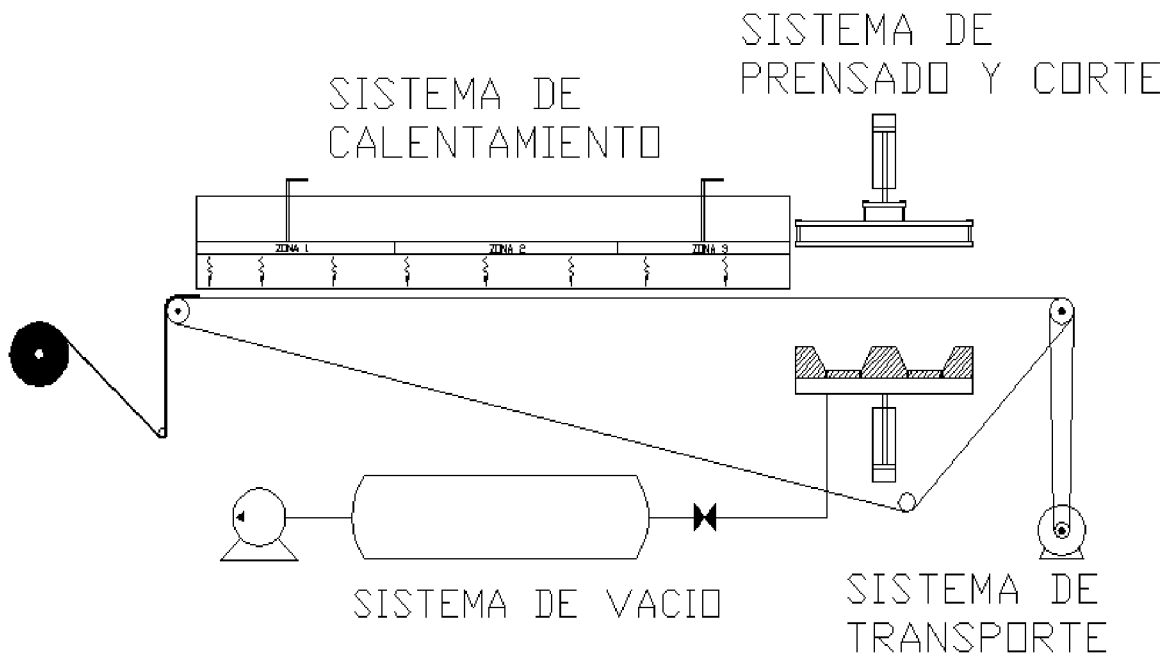
6. CALCULO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS

La termoformadora al vacío se puede considerar formada por varios subsistemas que integrados permiten la obtención de los diferentes productos plásticos propuestos. El diseño y selección se realizó de acuerdo a cada uno de dichos subsistemas.

Los subsistemas que componen la termoformadora son:

- Sistema de calentamiento
- Sistema de vacío
- Sistema de transporte
- Sistema de sujeción y corte
- Molde
- Sistema de control

Figura 43. Subsistemas de la termoformadora.



6.1. SISTEMA DE CALENTAMIENTO

El objetivo en el diseño del sistema de calentamiento es determinar los elementos y condiciones que permitan llevar a la lámina desde la temperatura ambiente a una temperatura óptima de formado

Los pasos para el diseño del calentador son los siguientes

- Elegir modo de calentamiento
- Elegir el material de la lámina con la que se desea trabajar
- Hallar las dimensiones del calentador
- Hallar la temperatura a la que se debe encontrar la superficie radiante
- Caracterizar el calentador

En la figura 44 se muestra un dibujo esquemático del corte transversal del calentador observándose la ubicación de la superficie de calentamiento con respecto a la lámina de plástico.

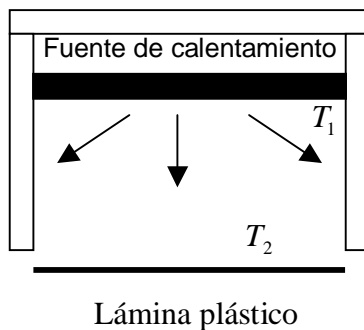


Figura 44. Representación del calentador

6.1.1 Elección del modo de calentamiento

El modo de calentamiento elegido es por radiación al ser este el más eficiente y el que presenta una mayor facilidad para controlar la temperatura, de acuerdo con lo visto en el capítulo 3. Para determinar el tipo de calentador tenemos en cuenta los siguientes parámetros:

- Bajo costo
- Eficiencia

El tipo de calentador seleccionado es tubular o de barra, que en comparación con los calentadores cerámicos y de cuarzo son mucho más económicos y con una eficiencia aceptable.

6.1.2 Tipo de lámina

El material utilizado para las pruebas de la máquina es el PET, debido a su facilidad para ser formado y no necesitar un control muy exacto de la temperatura de formado. Sus propiedades se toman de la tabla 7.

TABLA 7. Propiedades de algunos termoplásticos usados en termoformado

TERMOPLASTICO	Cp (J/ Kg.K)	TEMPERATURA OPTIMA DE FORMADO (K)	DENSIDAD (g/cm³)	EMISIVIDAD
POLIESTIRENO	1200	428	1.05	0.9
POLIETILENO ALTA DENSIDAD	1900	441	0.95	0.9
POLIETILENO BAJA DENSIDAD	1900	430	0.92	0.9
POLIPROPILENO	1800	446	0.9	0.9
ABS	1400	438	1.05	0.9
PVC	1256	433	1.58	0.9
PET	1275	433	1.35	0.9
POLICARBONATO	1200	508	1.2	0.9

6.1.3 Área del calentador

De acuerdo a las recomendaciones anteriormente mencionadas en el capítulo 3 , el área de calentamiento depende de las dimensiones de la lámina a moldear, y esta debe extenderse 50mm más de la longitud deseada de formado.

$$L_c = L + (50\text{mm}) \quad \text{en donde } \begin{array}{l} L_c = \text{longitud del calentador} \\ L = \text{longitud de la lámina} \end{array}$$

En nuestro caso el área a formar es 460mm de ancho por 600mm de largo, la cual permite formar piezas de un tamaño mediano o fabricar varias piezas pequeñas.

$$\begin{array}{l} L_c \text{ largo} = 600\text{mm} + 50\text{mm} = 650\text{mm} \\ L_c \text{ ancho} = 460\text{mm} + 50\text{mm} = 510\text{mm} \end{array}$$

Con el fin de obtener un calentamiento más uniforme y menos intenso este proceso se hace en tres zonas, la duración de cada etapa depende del ciclaje con que se trabaje. Para nuestro caso la producción es de 8 ciclos por minuto dándonos un tiempo de calentamiento por etapa de 7.5 segundos.

$$L \text{ horno} = L_c \text{ largo} \times 3 \text{ zonas} = 650\text{mm} \times 3\text{mm} = 1950\text{mm}$$

donde L horno = largo del horno

6.1.4 Temperatura de la superficie radiante

Para conocer la temperatura a la cual se debe encontrar la superficie radiante, hacemos un balance de energía. El calor por radiación transferido por esta superficie a la lámina plástica debe ser igual al calor que esta necesita para alcanzar su temperatura de ablandamiento para ser formada.

$$Q_a = Q_{1-2}$$

La energía necesaria para calentar la lámina por unidad de tiempo está definida por :

$$Q_a = \frac{C_p m \Delta T}{t}$$

donde C_p = calor específico del material
 m = masa de la lámina a calentar
 ΔT = delta de temperatura final e inicial de la lámina
 t = tiempo de calentamiento

El tiempo de calentamiento es el tiempo que la lámina se encuentra dentro del calentador, pasando por cada una de las zonas de calentamiento, este equivale al triple del tiempo gastado por lámina en la estación de formado.

$$t = 22.5 \text{ segundos}$$

El calor que le llega a la lámina pueda definirse como el flujo de calor radiante en un recinto cerrado compuesto de dos superficies grises conectadas por superficies radiantes así:

$$Q_{1 \leftrightarrow 2} = A_1 f_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

Donde $A_1 f_{1-2}$ = Conductancia del circuito equivalente

$$\sigma = \text{Constante de Stefan-Boltzman} = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

T_1 = Temperatura del calentador

$$T_2 = \text{Temperatura promedio de lámina} = \frac{T_{final} + T_{inicial}}{2}$$

En la figura 45 se muestra la conductancia total entre la superficie radiante y la lámina de plástico, expresada de la siguiente forma:

$$A_1 f_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{A_1} \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) + \frac{1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) + \frac{1}{A_1 \left[f_{1-2} + \frac{1}{f_{1-R}} + \frac{A_1}{A_2 f_{2-R}} \right]}}$$

donde ϵ_1 = Emitancia de las resistencias = 0,7

ϵ_2 = Emitancia de la lámina

A_1 = Área del calentador

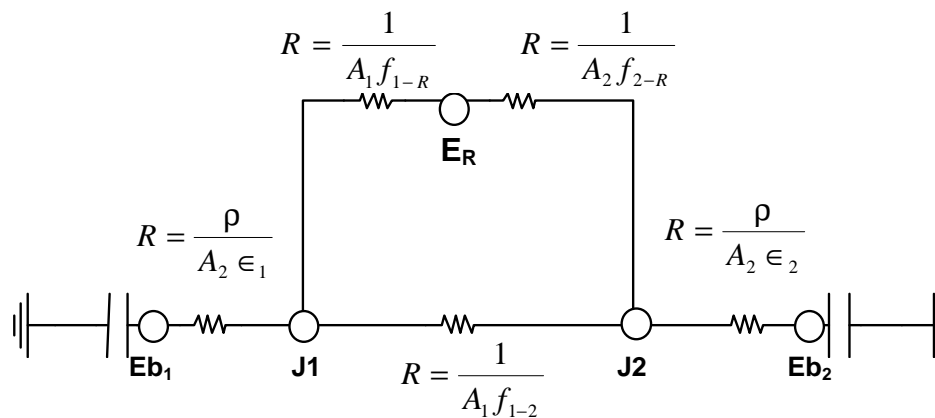
A_2 = Área de la lámina

f_{1-2} = Factor de visión entre las resistencias y la lámina

f_{1-R} = Factor de visión entre las resistencias y la superficie rerradiante

f_{2-R} = Factor de visión entre la lámina y la superficie rerradiante

Figura 45. Circuito análogo para radiación en un recinto cerrado compuesto de dos superficies grises conectadas por una superficie reirradiante



Donde E_R = Potencia emisora de las superficies reirradiantes

E_{b1} = Potencia emisora de cuerpo negro de las resistencias

E_{b2} = Potencia emisora de cuerpo negro de la lámina

$J1$ = Radiocidad de las resistencias

$J2$ = Radiocidad de la lámina

Debido a que el tipo de resistencias utilizado, no garantizan un calentamiento muy uniforme tomamos como separación entre la superficie radiante y la lámina 10cm. A esta distancia las pérdidas de calor son mayores que a distancias más cortas pero la lámina es calentada con mayor uniformidad en toda su superficie y no solo en el centro.

De acuerdo a las dimensiones de la lámina, las dimensiones de la zona de calentamiento son las siguientes:

DIMENSIONES DE ZONA DE CALENTAMIENTO (cm)	
X	65
Y	51

De la siguientes gráficas (figura 46 y 47) se hallan las relaciones para encontrar los factores de visión.

Figura 46. Factor de forma de rectángulos directamente opuestos. (Tomada del libro de Principios de Transferencia de Calor. Kreith)

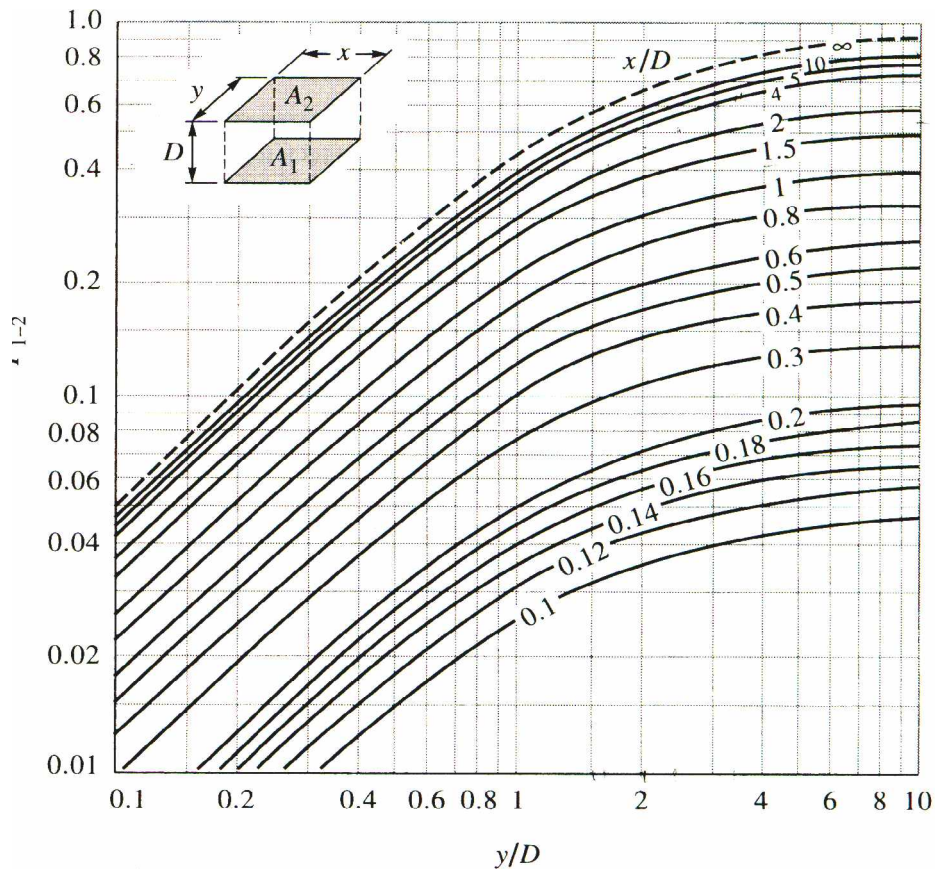
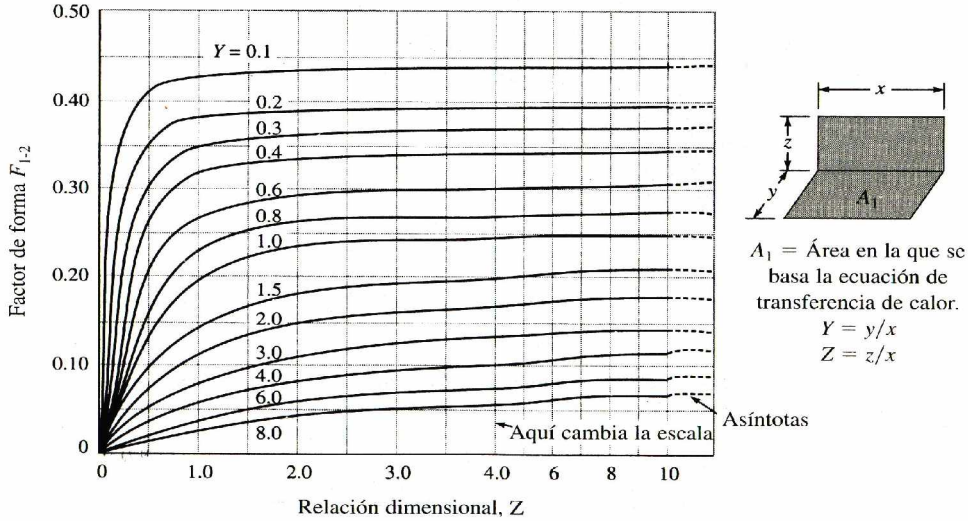


Figura 47. Factor de forma de rectángulos adyacentes en planos perpendiculares que comparten un borde común (Tomada del libro de Principios de Transferencia de Calor. Kreith)

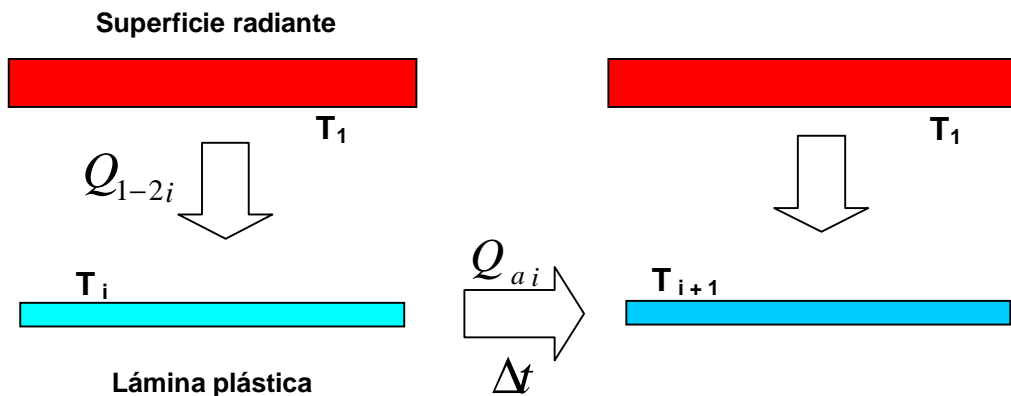


En la tabla 8 se muestran los valores de los factores de visión para las distancias de separación entre el horno y la lámina.

Tabla 8. Factores de visión a diferentes distancias.

D(cm)	x/D	y/D	F12	y/x	D/x	F1R	F2R	A1F12
30	2.16667	1.7	0.4	0.78461538	0.46153846	0.17	0.17	0.14202221
25	2.6	2.04	0.43	0.78461538	0.38461538	0.14	0.14	0.14249616
20	3.25	2.55	0.45	0.78461538	0.30769231	0.12	0.12	0.142721
15	4.33333	3.4	0.63	0.78461538	0.23076923	0.1	0.1	0.17139584
10	6.5	5.1	0.75	0.78461538	0.15384615	0.04	0.04	0.18134858
5	13	10.2	0.81	0.78461538	0.07692308	0.01	0.01	0.18607502

Figura 48. Calentamiento de la lamina para un instante de tiempo



Para observar el comportamiento de la lámina al ser calentada evaluamos la evolución de la temperatura con el tiempo (figura 44). El calor de ablandamiento para un delta de tiempo es igual a:

$$Q_{ai} = \frac{C_p m \Delta T_i}{\Delta t}$$

$$\Delta T_i = T_{i+1} - T_i$$

donde T_{i+1} = Temperatura al termino del delta de tiempo
 T_i = Temperatura al inicio del delta de tiempo

El calor transferido por el horno a la lámina para un delta de tiempo es igual a:

$$Q_{1 \leftrightarrow 2i} = A_1 f_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

$$T_2 = \frac{T_{i+1} + T_i}{2}$$

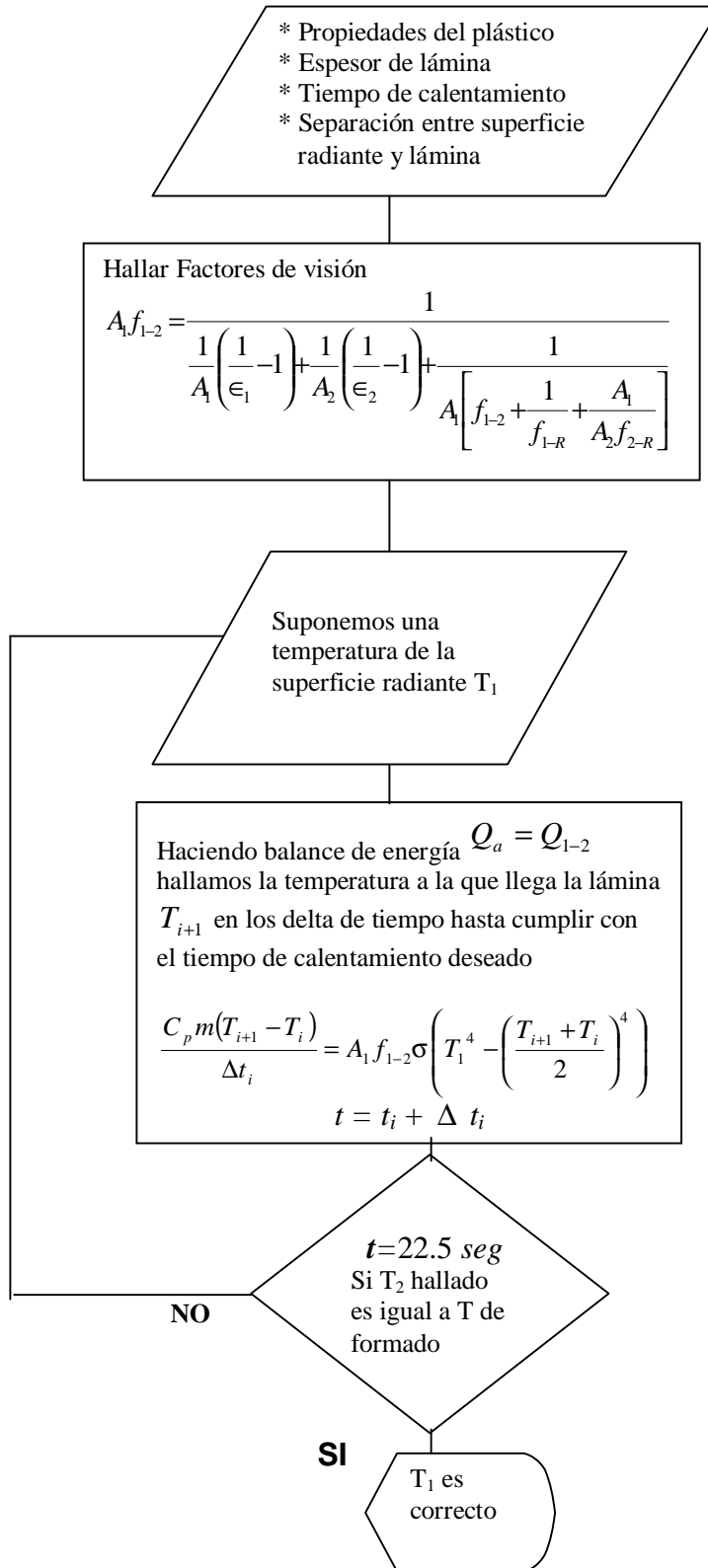
En el primer instante, tomando como la temperatura inicial de la lámina la temperatura ambiente en un delta de tiempo de 0.75 segundos, para un tiempo total de 22.5 segundos. Hacemos el balance de energía

$$Q_{ai} = Q_{1-2i}$$

$$\frac{C_p m (T_{i+1} - T_i)}{\Delta t_i} = A_1 f_{1-2} \sigma \left(T_1^4 - \left(\frac{T_{i+1} + T_i}{2} \right)^4 \right)$$

Para hallar la temperatura T_1 a la cual se debe encontrar la superficie radiante, suponemos varias temperaturas hasta encontrar la que cumpla con la condición de llevar a la lámina hasta su temperatura óptima de formado; en el siguiente diagrama de flujo, se muestran los pasos para comprobar si T_1 supuesta es la temperatura correcta para un tiempo de calentamiento de $t = 22.5$ seg.

Diagrama de flujo para el cálculo de la temperatura de superficie radiante



En la tabla 9 se muestra el comportamiento de la evolución de la temperatura de la lámina con el tiempo, para una temperatura supuesta de $T_1 = 639 \text{ K}$.

Tabla 9. Variación de la temperatura con el tiempo para una distancia entre el calentador y la lámina de 10 cm

PET		
D = 10cm		
t (seg)	Ti	Ti+1
0.75	288	293.27
1.5	293.27	298.53
2.25	298.53	303.77
3	303.77	309
3.75	309	314.2
4.5	314.2	319.38
5.25	319.38	324.54
6	324.54	329.68
6.75	329.54	334.79
7.5	334.79	339.88
8.25	339.88	344.94
9	344.4	349.97
9.75	349.97	354.98
10.5	354.98	359.95
11.25	359.95	364.9
12	364.9	369.81
12.75	369.81	374.69
13.5	374.69	379.54
14.25	379.54	384.35
15	384.35	389.13
15.75	389.13	393.86
16.5	393.86	398.56
17.25	398.56	403.23
18	403.23	407.85
18.75	407.85	412.43
19.5	412.43	416.96
20.25	416.96	421.46
21	421.46	425.91
21.75	425.91	430.31
22.5	430.31	434.67

La tabla muestra que con la temperatura de la superficie radiante tomada, la lámina alcanza a llegar a su temperatura de formado que es aproximadamente $T = 433 \text{ K}$ (Tabla 7). Entonces $T_1 = 639 \text{ K}$ es la temperatura a la que se debe encontrar la superficie radiante.

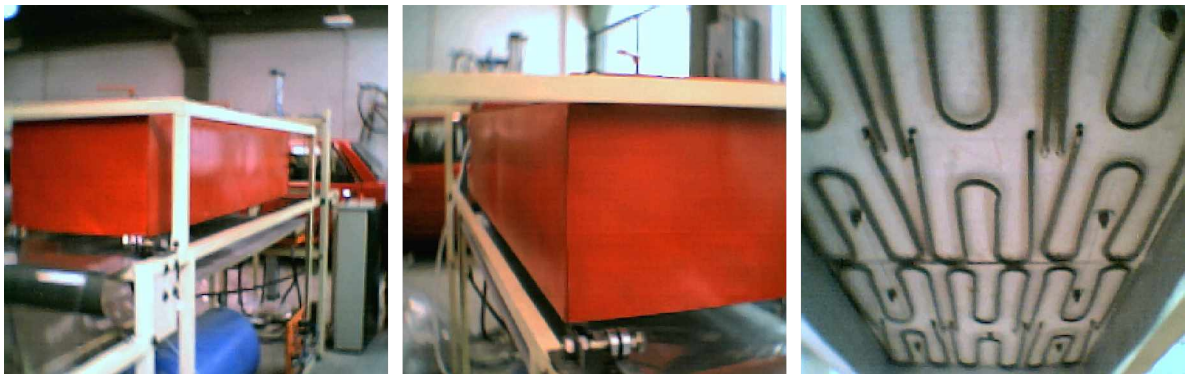
6.1.5 Características del calentador

El calentador cuenta con tres zonas de calentamiento con 6 resistencias tubulares cada uno. Para el aislamiento se utiliza lana de roca de una pulgada de espesor.

En el diseño del calentador se contempla el ajuste de la altura de las zonas de calentamiento con respecto a la lámina de plástico, debido a que se pueden manejar diferentes espesores y materiales de lámina que tienen comportamiento térmico diferentes, para este fin se diseñaron dos manivelas que dan la altura a las zonas.

Para proteger del calor el tanque de vacío y la bomba, que se encuentran debajo del calentador cuando está en funcionamiento, se ubicó encima de ellos una lámina de acero cubierta con pintura reflectiva y con láminas de fibra de vidrio debajo de ella (figura 49).

Figura 49. Vista exterior e interior del horno

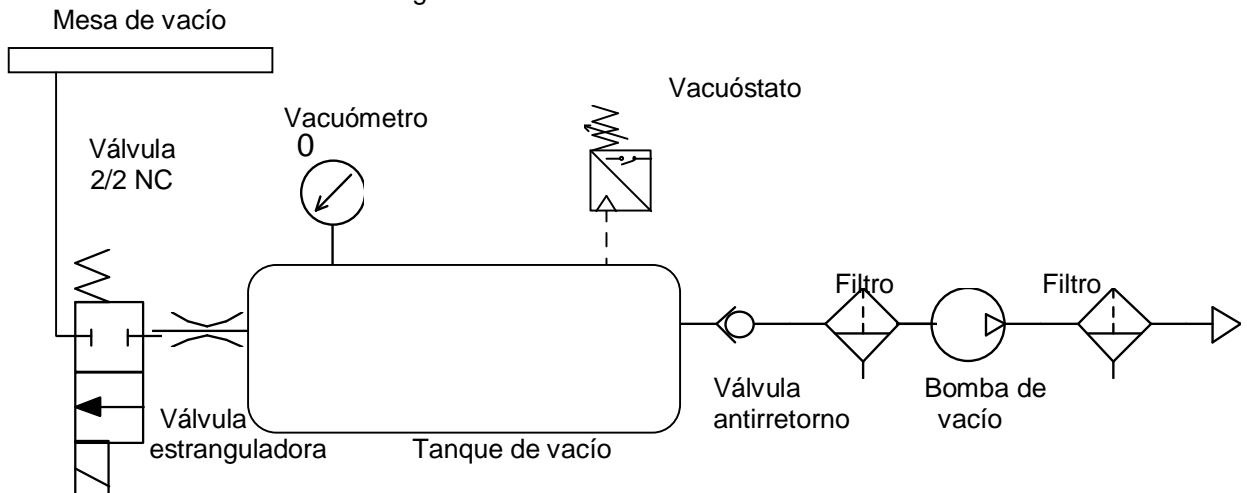


6.2. SISTEMA DE VACÍO

El diseño del sistema de vacío se concentra, en la selección de la bomba de vacío y el cálculo del acumulador o tanque de vacío. porque son estos las bases principales para el formado, teniéndose en cuenta trabajar a una presión de vacío mayor o igual a 20 in

El sistema de vacío consta de las siguientes partes (figura 50):

Figura 50. Sistema de vacío



- Mesa de vacío: es una caja que cuenta con una tapa llena de agujeros por los cuales se succiona la lámina para que se pegue contra el molde
- Válvula 2/2: comunica la mesa de vacío con el tanque de vacío, se encarga de regular el tiempo de vaciado.
- Válvula estranguladora: permite la regulación de la velocidad de vaciado, en caso de que sea necesario. Esto se hace sobre todo para piezas profundas.
- Vacuómetro: indica la presión a la que se encuentra el tanque
- Vacuóstato: envía la señal al PLC cuando se ha alcanzado la presión deseada para que apague la bomba
- Válvula antirretorno: evita que el vacío del tanque se pierda al momento de apagar la bomba
- Filtros: Protegen a la bomba de la entrada de partículas
- Bomba de vacío: se encarga de la succión del aire en el tanque, disminuyendo su presión.

A continuación se muestran algunas fotografías de los componentes del sistema de vacío:



Figura 51. Bomba de vacío, filtros y tanque vacío

Figura 52. Válvulas estranguladora y direccional



Figura 53. Conexión de la manguera principal a las 4 mangueras que se conectan a la mesa



Figura 54. Mangueras de vacío



Figura 55. Mesa de vacío



6.2.1. Selección de la bomba de vacío

Para la selección de la bomba de vacío se calcula la velocidad de vacío utilizando la siguiente formula (tomada de el Manual del Ingeniero Mecánico de Marks) :

$$S = \frac{V}{t_2 - t_1} \ln \frac{P_1}{P_2}$$

donde V = Volumen a desplazar

t_1 = Tiempo inicial

t_2 = Tiempo final

P_1 = Presión absoluta inicial

P_2 = Presión final absoluta final

$$V = V_{molde} + V_{mesa} + V_{mangueras}$$

Donde V_{molde} = Volumen de aire a desplazar en el molde

V_{mesa} = Volumen de aire a desplazar en la mesa de formado

$V_{mangueras}$ = Volumen de aire a desplazar en la manguera desde la mesa de formado hasta la válvula

Para estimar el máximo volumen del molde tomamos la máxima altura de formado propuesta que son 15 cm y las dimensiones del área de formado, 46 cm de ancho por 60 cm de largo, restándole 1 cm por cada lado que se encuentra con el marco de sujeción.

$$V_{\text{molde}} = 15\text{cm} \times 44\text{cm} \times 58\text{cm} = 38280\text{cm}^3 = 0.03828\text{m}^3$$

Las dimensiones de la mesa de formado son 62 cm de largo por 46 cm de ancho y una altura de 4 cm

$$V_{\text{mesa}} = 62\text{cm} \times 46\text{cm} \times 15\text{cm} = 11408\text{cm}^3 = 0.011408\text{m}^3$$

Desde la válvula 2/2 hasta la mesa de vacío se encuentra 5 mangueras de caucho reforzadas con alma de acero, la principal tiene un diámetro de 1 pulgada por 1 metro de longitud y parte de la válvula 2/2 hasta el acople con las otras 4 mangueras secundarias que son de ½ pulgada de diámetro por 50 cm de largo conectadas a la mesa.

$$V_{\text{mangueras}} = \Pi \times r_p^2 \times L_{mp} + 4 \times (\Pi \times r_s^2 \times L_{ms})$$

Donde r_p = radio de manguera principal

r_s = radio de manguera secundaria

L_{mp} = Longitud de la manguera principal

L_{ms} = Longitud de la manguera secundaria

$$V_{\text{mangueras}} = 3.1415 \times (1.27\text{cm})^2 \times 100 \text{ cm} + 4 \times 3.1415 \times (0.635\text{cm})^2 \times 50\text{cm}$$

$$V_{\text{mangueras}} = 760.0388\text{cm}^3 = 0.000760\text{m}^3$$

$$V = 0.03828\text{m}^3 + 0.011408\text{m}^3 + 0.000760\text{m}^3$$

$$V = 0.050448039\text{m}^3$$

El tiempo que la bomba dispone para evacuar el volumen V es igual a 7,5 segundo que es el tiempo que dura un ciclo.

$$S = \frac{0.050448039\text{m}^3}{7,5\text{seg}} \times \ln \frac{15 \text{ plg } Hg}{10 \text{ plg } Hg}$$

$$S = 0.00272732\text{m}^3/\text{s} = 9.8183\text{m}^3/\text{h} = 5.778\text{CFM}$$

La bomba seleccionada para las pruebas es marca GATS, modelo 2065, con una capacidad máxima de succión de 17CFM (anexo 1).

6.2.2. Cálculo del tanque de vacío

Por recomendación del Manual Técnico de Termoformado (Plastiglas de México, SA.de C.V) se toma el volumen del tanque como 2.5 veces el volumen a desplazar.

$$V_{\text{tanque}} = 2.5 \times 0.050448039\text{m}^3 = 0.12612\text{m}^3$$



Figura 56. Tanque de vacío

Debido a que el tanque de vacío se encuentra sometido a la presión externa, este se diseña para que soporte un 25% más de la presión externa máxima posible. La presión máxima a la que puede llegar la bomba son 25 plg Hg ($P=12,278\text{psi}$).

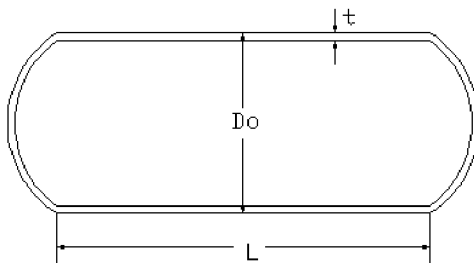


Figura 57. Dimensiones del tanque

Las dimensiones del tanque son las siguientes:

- $t = 0,2\text{cm}$
- $Do = 45\text{cm}$
- $L = 90\text{cm}$

Determinamos el valor de L/Do y Do/t

$$\frac{Do}{t} = \frac{45}{0,2} = 225 \qquad \frac{L}{Do} = \frac{90}{45} = 2$$

Para Do/t igual o mayor que 10 la presión máxima permitida se calcula de la siguiente forma:

$$Pa = \frac{4B}{3\left(\frac{Do}{t}\right)}$$

Donde P = Presión manométrica externa de diseño (lb/plg²)

Pa = Presión manométrica máxima de trabajo permitida (lb/plg²)

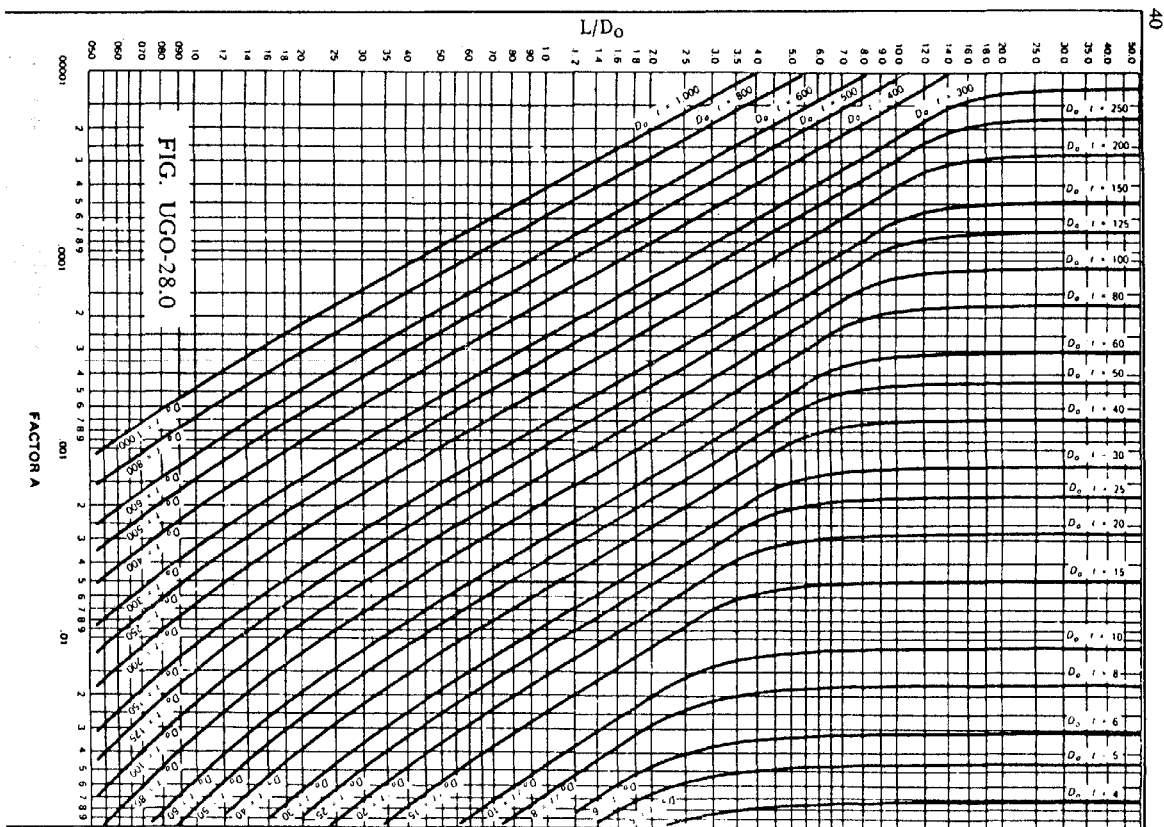
Do = Diámetro exterior (plg)

L = Distancia entre las tangentes de las cabezas más un tercio de la profundidad de ésta (plg)

t = Espesor de pared mínimo requerido (plg)

Con los valores de L/Do y Do/t en la figura 58 encontramos el valor del factor A.

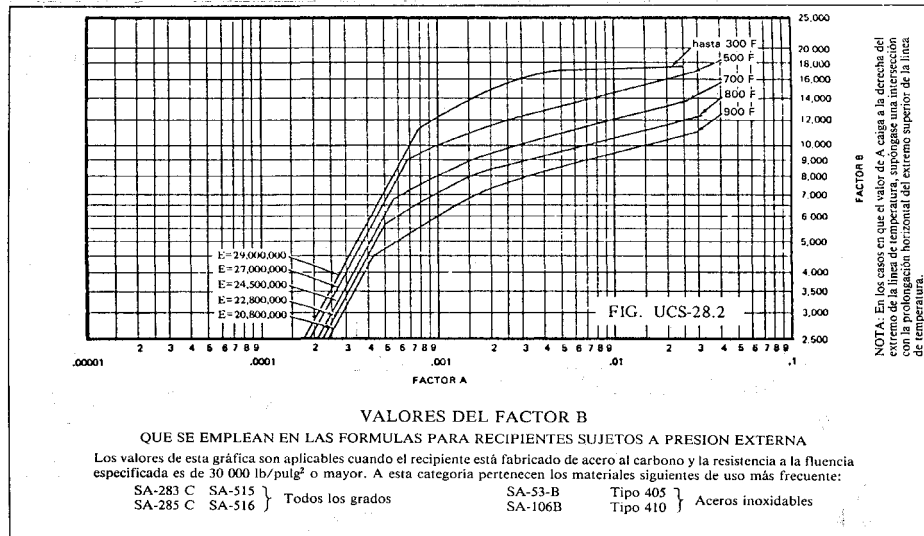
Figura 58. Valores del factor A que se usan en las formulas de recipientes sometidos a presión externa



Factor A = 0,0002

Con el factor A se halla en la figura 59 el factor B, y con este valor comprobar si $Pa \geq 0.25P$, cumpliendo así con la recomendación de la norma sobre recipientes a presión de la ASME.

Figura 59. Valores del factor B que se emplea en las fórmulas para recipientes sujetos a presión externa



Factor B = 2900

$$Pa = \frac{2 \times 2900}{3 \times \left(\frac{45}{0.2} \right)} = 17,18 \text{ lb/pulg}^2$$

La presión máxima de trabajo permitida es mayor que la presión de diseño en un 39,95%, cumpliendo así con las recomendaciones de seguridad en tanques sometidos a presión

6.3. SISTEMA DE TRANSPORTE

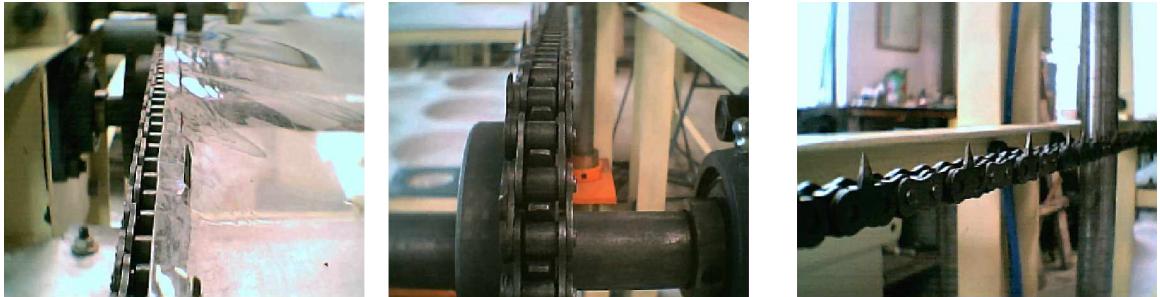
Para el diseño del sistema de transporte se selecciona el tipo de cadena y la potencia del motor que se encarga de moverla.

6.3.1 Selección de la cadena

El transporte de la lámina se realiza por medio de cadenas sencilla de rodillos No. 40 de 1/2" de paso, siendo esta la más comercial y la única que posee aditamento de púas, las cuales son necesarias para la sujeción de la

lámina a la cadena. Las púas utilizadas son de dos tamaños (2 y 3 cm) ubicándose una púa por cada dos eslabones. Para la unión de las púas a la cadena se utilizó el pegante Loctite que es usado para fijar rodamientos.

Figura 60. Cadena de transporte con púas



Con el fin de obtener un posicionamiento rápido de la lámina tomamos una velocidad de avance de 120cm/seg. Para la selección de los piñones se busca que la lubricación sea de tipo manual y cumpla con los requerimientos de potencia, el piñón encargado de mover la cadena que conduce la lámina es de 28 dientes y el piñón que va unido al eje del motor es de 14 dientes (anexo 2), trabajando cada uno a 200 y 400 rpm respectivamente, dando como resultado una relación de velocidades de 2 a 1.

6.3.2 Selección del motor

Para la selección del motor despreciamos el peso de la lámina, entonces las únicas fuerzas a vencer serían el peso de la cadena, la inercia en los piñones y la fricción en los rodamientos. Por lo tanto adoptamos una fuerza de entrada en el piñón del motor de 50 Kg, lo cual da un torque de transporte de $T_t = 17,1616 \text{ N-m}$. calculando la potencia del motor a 400 rpm tenemos $P_t = 0.306 \text{ HP}$, para esto seleccionamos un motor de 1 HP que cumplirá con los requerimientos del sistema. El cual cuenta con un variador de velocidad para su control.

FIGURA 61. Motor y transmisión de cadena



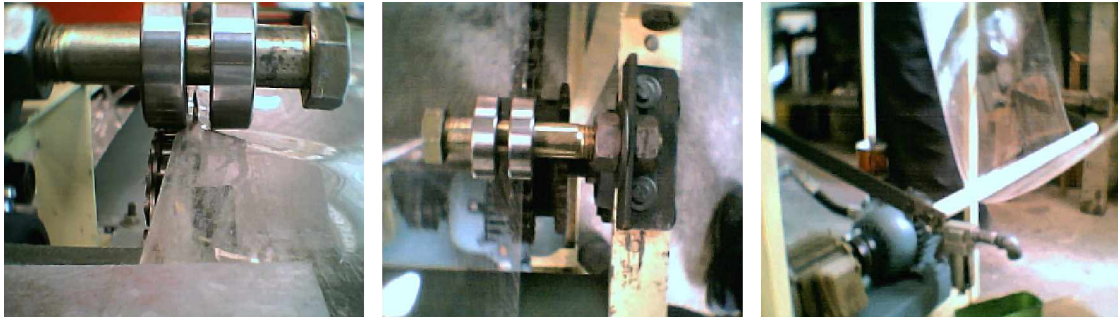
El rollo de plástico esta soportado por dos tapas que van unidas a un eje con rodamientos que permiten su libre rotación cuando el plástico es halado.

Figura 62. Alimentación de plástico



En la entrada de la lámina al horno se encuentran los pisadores que son los encargados de asegurar la lámina contra las púas de la cadena ayudados por la tensión ejercida por el tensor de entrada.

Figura 63. Pisadores y tensor de lámina

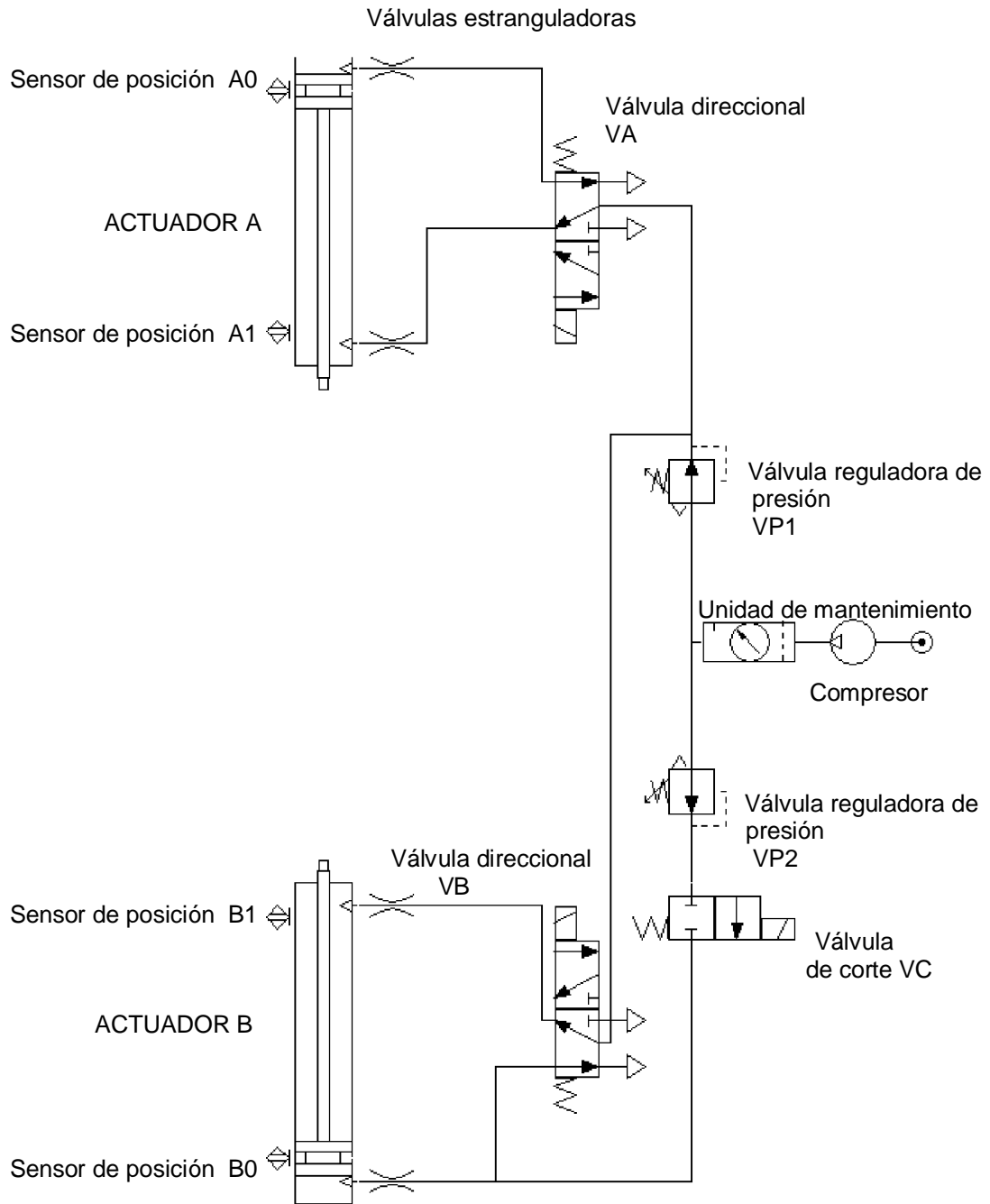


6.4. SISTEMA DE SUJECIÓN Y CORTE

En el sistema de sujeción y corte lo primordial es la selección de los actuadores neumáticos los cuales se encargan del prensado y corte de la lámina.

La sujeción de la lámina contra el molde la hace el marco inferior que pega contra este, efectuándose un sellado entre ellos, en la figura 64 se puede ver el circuito neumático encargado del movimiento del molde y los marcos.

Figura 64. Circuito neumático de sujeción y corte



- Actuador A: se encarga del movimiento del marco para la sujeción de la lámina contra el molde.
- Actuador B: tiene la función de elevar la mesa de vacío y el molde a la altura de la lámina.
- Sensores de : sensores inductivos para determinar la posición de los posición actuadores, ya sea, extendidos o recogidos.
- Válvulas estranguladoras: permiten regular la velocidad de los actuadores.
- Válvulas direccionales: controlan la dirección del flujo de aire comprimido para el movimiento de los actuadores.
- Válvula reguladora de presión VP1: regula la presión para el movimiento de la prensa
- Válvula reguladora de presión VP2: regula presión para el corte de las piezas fabricadas.
- Válvula direccional VC: permite el flujo de aire comprimido al actuador B para ejecutar el corte.
- Unidad de mantenimiento: controla la calidad del aire comprimido que va a los actuadores.
- Compresor: suministra aire a presión para el movimiento de los actuadores

6.4.1 Selección de los actuadores neumáticos

Para determinar los actuadores que necesitamos en la prensa, calculamos la fuerza ejercida por el peso de la mesa de vacío y el molde.

$W_{\text{mesa}} = 25 \text{ Kg}$

$W_{\text{molde}} = 100\text{Kg}$

$W_{\text{total}} = W_{\text{mesa}} + W_{\text{molde}} = 125\text{Kg}$

W_{mesa} = peso de la mesa de vacío

W_{molde} = máximo peso del molde de aluminio

W_{total} = peso total

A una presión recomendada de trabajo de 6 bares, el actuador que cumple con los requerimientos de fuerza para desplazar el molde y la mesa, ejerciendo a su vez una fuerza de sellado adecuada entre el molde y la lámina es de 63mm de diámetro (Ver anexo 2).

Para una profundidad máxima de formado de 15cm, necesitamos que el actuador totalmente extendido descienda por lo menos esta distancia para

que cuando la pieza sea formada pueda salir totalmente del molde y ser desplazada por la cadena sin chocar con el molde. La carrera de los actuadores elegida es de 20cm.

En la figura 65 se muestran algunas fotografías de la prensa, con los marcos de sujeción, mesa de vacío y molde

Figura 65. Prensa



6.4.2. Corte

Para el corte se diseñó un módulo de doble marco (figura 66 y 67) separados por 4 resortes con guía que permite que la lámina sea prensada, formada, enfriada y luego se realice el corte comprimiendo los resortes.

Figura 66. Esquema del corte

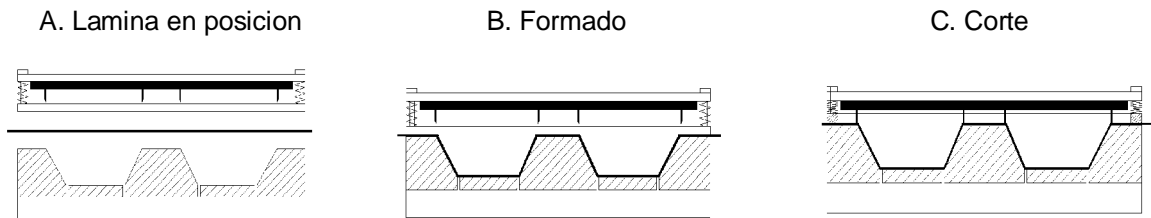
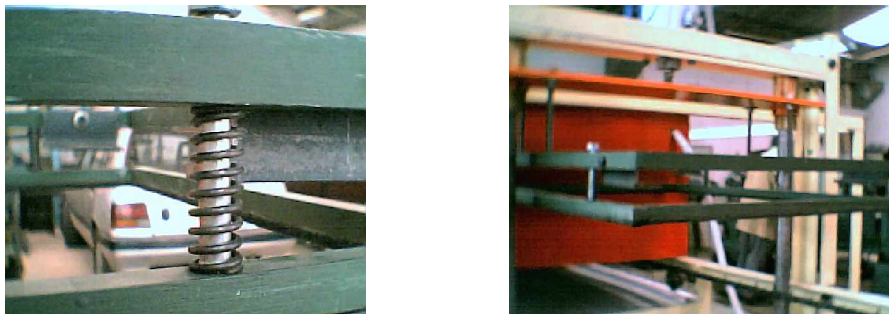


Figura 67. Módulo de doble marco para el corte



El corte se realiza una vez la pieza halla sido formada y alcance una temperatura adecuada, este se hace por medio de un segundo nivel de presión que ayuda a que el molde venza los resortes y pegue contra las cuchillas multi-punto que se encuentran en un dado de corte o en un contra-molde que a su vez está soportado por el marco superior de la prensa, las cuchillas multi-punto permiten que se tenga una menor presión en el corte y que el producto no se separe de la lámina en el instante del corte, sino luego, cuando sea retirado de la prensa.

6.5. MOLDE

El molde utilizado para las pruebas de formado de la máquina es hembra, contiene nueve platos y cuatro vasos. Los materiales utilizados en la fabricación del molde y su proporción son los siguientes:

- Resina Poliéster al 100 %: aglomerante
- Carbonato de calcio al 200%: aditivo para aumentar la dureza
- Estireno al 20%: aglutinante
- MECK al 2%: catalizador

Para la fabricación del molde se elaboro un contra-molde positivo compuesto de una caja de madera y machos en yeso con la forma de platos y vasos. Luego se mezclaron la resina el carbonato y el estireno hasta logra una apariencia homogénea; en ese momento se adiciona el meck el cual acelera el secado del molde. Por último se vierte la mezcla sobre el contra-molde añadiendo capas de fibra de vidrio para aumentar su resistencia y se deja secar aproximadamente dos horas para su posterior desmoldeo. Por último se perforan los orificios de vació con una broca 1.5 mm

La elección del la resina como material para el molde es debido a que este material presenta una buena resistencia y su costo no es tan elevado. También se probó un molde fabricado en yeso pero resulto demasiado frágil y se fracturo al recibir la presión atmosférica en su primera prueba.

Figura 68. Molde hembra para la fabricación de platos y vasos



En la figura 69 se pueden apreciar los agujeros en el molde por donde el aire es evacuado

Figura 69. Detalle del molde con los agujeros



6.6. SISTEMA DE CONTROL

El control de la máquina se hace pensando en obtener la mayor eficiencia, la cual es dada si el proceso es autónomo, es decir todo paso involucrado en el proceso del termoformado debe ser automático.

El tipo de control del proceso de termoformado es secuencial, programado en un PLC, encargado de controlar los sistemas de avance de lámina calentamiento, vacío, prensado, formado y corte.

Los sistemas de control del calentamiento y del vacío son controles de lazo cerrado, incorporados al PLC para mantener una temperatura y presión de vacío adecuadas, permitiendo el manejo automático del proceso de termoformado.

La termoformadora cuenta con un PLC GE FANUC SERIES 90 MICRO, con 24 entradas y 16 salidas, que se encarga del control automático del proceso.



Figura 70. PLC

En los anexos C y D, se muestran el Graficet , el GEMMA y el programa realizados para la automatización del proceso.

6.6.1 Tablero de control

Para la interfaz con el operario se tiene un tablero de control para su manejo. En el tablero puede apreciarse lo siguiente:

- Arranque: sirve para poner en funcionamiento la máquina
- Paro: acaba con el ciclo que se está efectuando
- Paro de Emergencia: apaga la máquina y reinicia todo al principio
- Luz de encendido: nos indica que la máquina está encendida
- Ciclo manual / automático: el operario selecciona en que modo desea trabajar
- Motor Cadena: el operario selecciona hacia a donde quiere hacer avanzar la lámina
- Prensa: acciona las válvulas para que los actuadores salgan
- Vacío: abre la válvula que esta comunicada con el tanque donde se almacena el vacío
- Corte: acciona la válvula que da un segundo nivel de presión al actuador B para que efectúe el corte contra las cuchillas
- Ventilador: pone en funcionamiento un ventilador para aumentar la velocidad de enfriamiento de la pieza formada.

Figura 71. Tablero de control



6.6.2 Control de avance de lámina

El avance de lámina se controla temporizando la señal de encendido del variador en el PLC, el cual está ajustado a una frecuencia de 13.33 hz. dando una velocidad angular de 400 rpm y entrando a una relación de piñones de 2/1 que permite mantener una velocidad lineal de transporte de lámina 120cm/seg. Así mismo el variador controla del tiempo de arranque y parada del motor logrando el posicionamiento de la lámina más exacto.



Figura 72. Variador de velocidades

6.6.3 Control de temperatura

Para este fin se cuenta con un pirómetro digital, en el cual se fija la temperatura de las resistencias siendo sensada a través de una termocupla tipo J que está ubicada dentro del horno y en contacto con una resistencia en la tercera zona de calentamiento. El control realizado es del tipo ON-OFF, cuando es alcanzada la temperatura deseada del calentador el pirómetro da la señal al PLC para que este desenergice la bobina del contactor de las resistencias y cuando se está por debajo de la temperatura fijada energice la bobina del contactor.

Figura 73. Display del pirómetro



Figura 74. Termocupla



6.6.4 Control de presión de vacío

El control de presión de vacío, la efectua el PLC que recibe la señal del vacuostato, para prender el motor de la bomba de vacío, si la presión a llegado a la mínima o apagar si se a llegado a la máxima. En en el vacuostato se regula la presión máxima de trabajo; y la mínima esta incorporada y son por defecto 5 in de Hg menos de la presión máxima de trabajo.



Figura 75. Vacuóstato

6.6.5 Control de prensado y corte

Para el prensado los actuadores neumáticos cuentan con 4 sensores de posición de inducción magnética, los cuales indican el inicio y final de carrera de cada actuador, su señal es registrada por el PLC que de acuerdo a la secuencia, activa las válvulas selenoides encargadas del accionamiento de los mismos; para el corte el PLC temporiza la duración del formado para luego activar la válvula 2/2 que permite la entrada de la presión de corte.

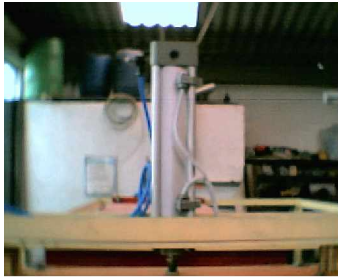


Figura 76. Actuador y Sensores de posición

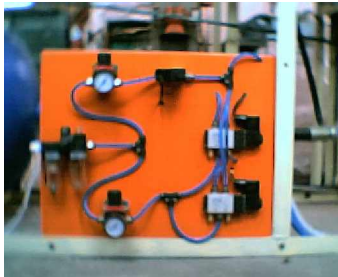


Figura 77. Tablero del circuito neumático

6.6.6. Control de formado

El formado es controlado por el PLC dando la orden de apertura y cierre a una válvula 2/2 de 1 pulgadas de diámetro, que es accionada cuando la lámina se encuentre prensada y desactivada después de cumplir con el tiempo de formado programado.



Figura 78. Válvula 2/2 para control del vacío

7. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA TERMOFORMADORA

El principio básico de la termoformadora es el de fabricar productos partiendo de un rollo de la lámina de plástico, esta debe ser calentada a través de tres zonas de calentamiento hasta que alcance un temperatura adecuada para poder pasar a otra zona donde posteriormente va a ser formada por medio de la fuerza ejercida por el vacío generado por la bomba. Al tener la pieza formada se procede a realizar el corte para luego dar paso a la siguiente lámina que viene del calentador, repitiendo nuevamente el proceso.

Al poner la máquina en funcionamiento se encienden el calentador y la bomba de vacío. Buscando las condiciones de trabajo adecuadas de presión y temperatura para el formado de la lámina. La termoformadora cuenta con la posibilidad de operar en dos modos de trabajo, los cuales son el modo manual y automático

7.1. MANUAL

En este modo de trabajo el control lo hace el operario y es utilizado para comprobar el correcto funcionamiento de los elementos de la máquina en caso de ser necesario.

Los elementos que se pueden controlar en este modo son:

- Motor de la cadena
- Prensa
- Vacío
- Corte

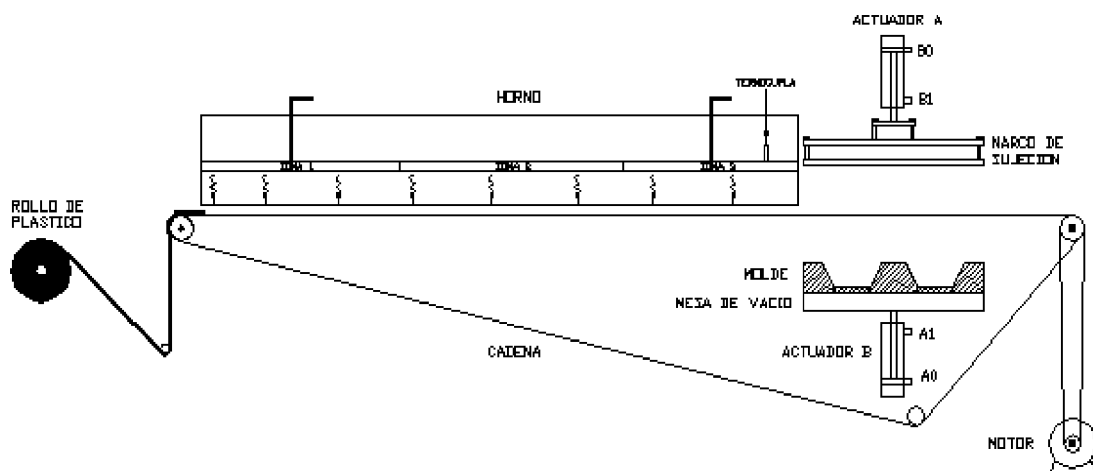
7.2. AUTOMATICO

En este modo de trabajo el control lo realiza un PLC y es el utilizado para la fabricación de los productos.

Antes de iniciar el funcionamiento de la máquina en modo automático debemos verificar:

- El horno a alcanzado la temperatura fijada para el ablandamiento de la lámina y se mantiene estable
- Se ha alcanzado la presión de vacío necesaria para el formado de la lámina
- El compresor cuenta con la presión necesaria para el prensado de la lámina
- Posición correcta de la lámina de plástico en la entrada de la máquina este se realiza colocando manualmente la lámina de plástico en los aditamentos de la cadena (figura 77)

Figura 79. Posición inicial de la lámina



Calentamiento

Al accionar el modo automático el motor de la cadena es encendido ubicando la lámina en la primera zona de calentamiento (figura 80), después de cumplir con el tiempo de ciclo de formado, pasa a la segunda zona de calentamiento (figura 81), y al cumplir con un nuevo tiempo de ciclo sigue a la tercera zona de calentamiento (figura 82), donde la lámina alcanza su temperatura de formado.

Figura 80. Lámina en la primera zona de calentamiento

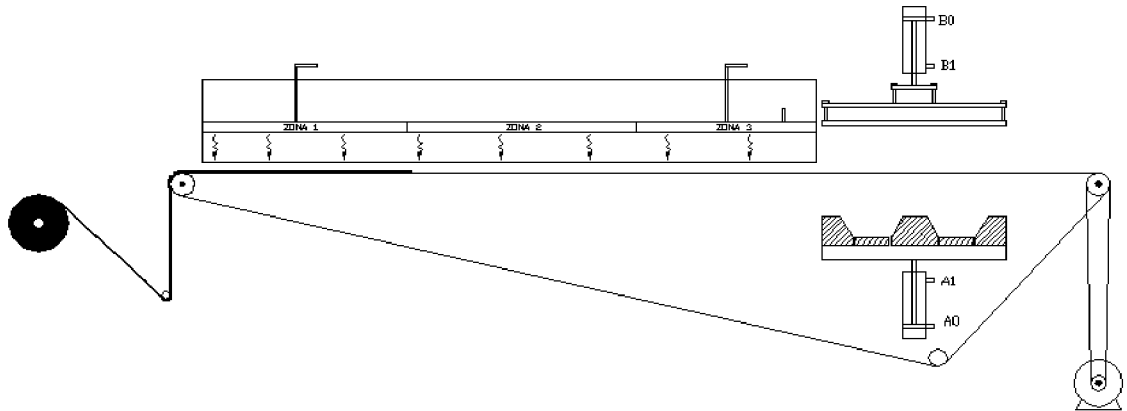


Figura 81. Lámina en la segunda zona de calentamiento

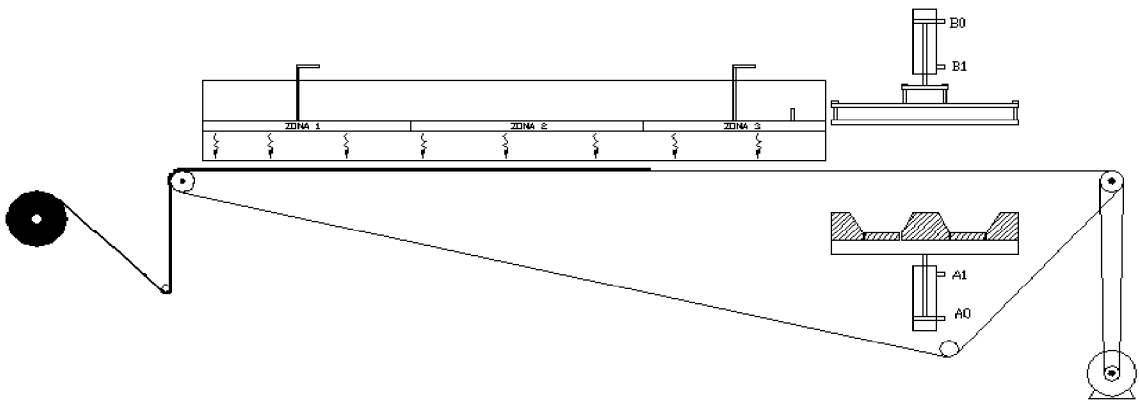
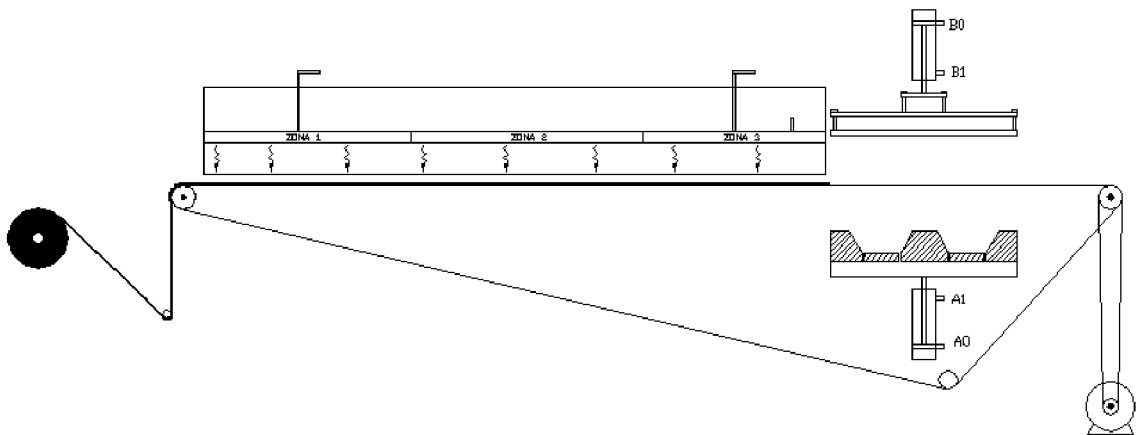


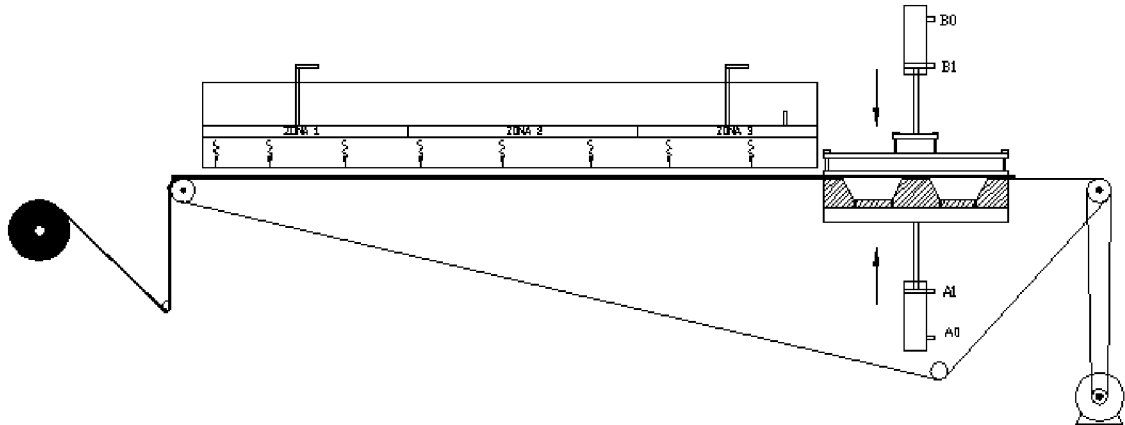
Figura 82. Lámina en la tercera zona de calentamiento



Prensado

Luego del calentamiento la lámina es transportada a la estación de formado, donde la prensa se cierra efectuándose el sello entre el marco inferior y el perímetro del molde (figura 83) .

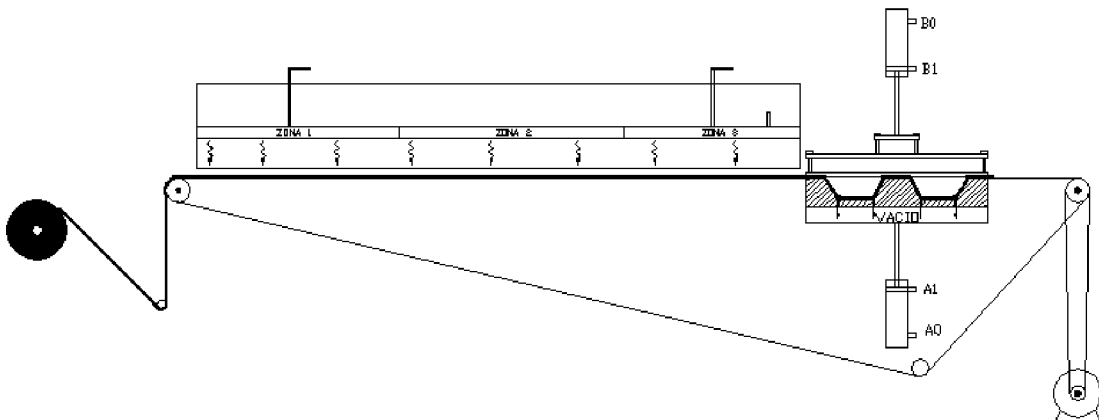
Figura 83. Prensado de la lámina



Formado y corte

Con la lámina asegurada entre el marco y el molde se realiza la apertura de la válvula de vacío, entonces la presión atmosférica ejercida pega la lámina contra las superficies del molde formando los productos, luego al disminuir la temperatura de la pieza formada se realiza el corte. (figura 84)

Figura 84. Formado de la lámina



8. PIEZAS FORMADAS

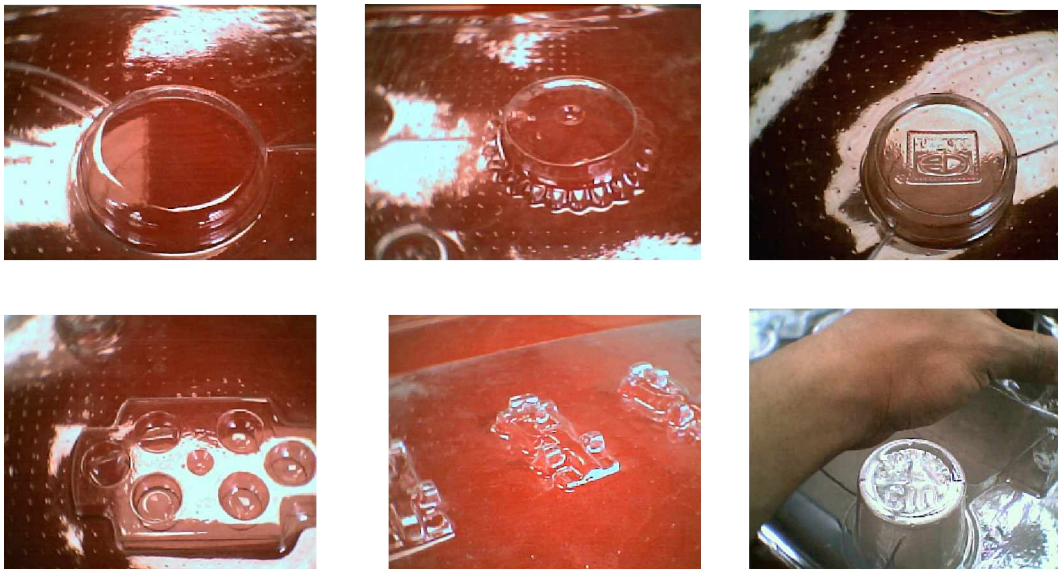
Se realizaron varias pruebas utilizando los dos tipos de moldes, macho y hembra. Al comienzo se trabajó con molde macho formando vasos, pero debido al tipo de sujeción de sujeción de la lámina en el momento de hacer contacto con el molde provoca arrugas en los extremos de la pieza optándose por el empleo de moldes hembra para alturas mayores de 3 cm.

Figura 86. Piezas fabricadas con molde macho con altura mayores a 3cm



Para alturas de molde pequeñas y de radios grandes las arrugas no se presentaron y se presentaban lo hacían por fuera de la pieza formada sin dañar su apariencia.

Figura 87. Piezas fabricadas con molde macho de alturas bajas y radios grandes



Con el empleo del molde hembra no presentó el inconveniente de las arrugas que si se veía con el molde macho, pero para radios pequeños de pieza se ve necesario el uso de un bloque o tapón asistente que ayude a dar una mayor uniformidad al espesor del material en el fondo de la pieza.

Figura 88. Piezas fabricadas con molde hembra



9. ANÁLISIS ECONOMICO

Para evaluar la rentabilidad de la máquina se tienen en cuenta la inversión realizada, los costos de operación y los ingresos que se podrían obtener por la venta de los productos. En nuestro caso al no tener aún un producto específico para la comercialización tomamos como ejemplo los platos que formamos para las pruebas. Estos no son aptos para la comercialización debido a los desperfectos en apariencia que tiene el molde de prueba, repercutiendo en la calidad del producto pero nos sirve para hacer una estimación de las ganancias que se podrían recibir por su venta.

Tabla 10. Presupuesto de inversión

PRESUPUESTO DE INVERSION			
CONCEPTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL
COMPONENTES DEL SISTEMA DE VACIO			
Bomba de vacío	1	1.800,000	1,800,000
Tanque de vacío	1	80,000	80,000
Mangueras con alma de acero y uniones	6		260,000
Válvula antirretorno de ¾plg	1	10,000	10,000
Electro válvula 2/2 de 1plg	1	230,000	230,000
Filtros	2	70,000	140,000
Válvula de bola de 1plg	1	10,000	10,000
Vacuóstato	1	170,000	170,000
Vacuómetro	1	20,000	20,000
Placa de aluminio de 3/8 de 65x48cm	1	210,000	210,000
Caja de vacío	1	160,000	160,000
SUBTOTAL			3,090,000
COMPONENTES DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO			
Resistencias eléctricas	18	11,000	198,000
Lana de roca x 10 kilos	2	25,000	50,000
Lámina calibre 20 120x240cm	1	140,000	140,000
Tubo cuadrado de 1plg x 6m	2	25,000	50,000

Lamina de fibra de vidrio de 1plg de 60x120cm	2	14,000	28,000
Lámina calibre 20 de 70x200 cm	1	50,000	50,000
Lámina de eternit de 60x120 cm	2	12,000	24,000
Pirómetro	1	90,000	90,000
SUBTOTAL			630,000
COMPONENTES DEL SISTEMA DE PRENSADO			
Actuadores neumáticos de 63mm	2	250,000	500,000
Válvula 5/3 de 1/4	2	140,000	280,000
Válvula 2/2 de 1/4	1	120,000	120,000
Unidad de mantenimiento	1	250,000	250,000
Sensores inductivos	4	36,000	144,000
Reguladora de presión de 1/4	1	160,000	160,000
Otros			200,000
SUBTOTAL			1,654,000
COMPONENTES DEL SISTEMA DE TRANSPORTE			
Cadena No 40 paso de 1/2 3m	5	57,000	285,000
Púas	300	600	180,000
Piñon de 28 dientes	5	25,000	125,000
Piñon de 14 dientes	5	12,000	60,000
Motor de 1Hp	1	750,000	750,000
Ejes	2	10,000	20,000
Chumaceras	4	34,000	136,000
Variador de velocidad	1	650,000	650,000
Otros			80,000
SUBTOTAL			2,286,000
ESTRUCTURA			
Perfil en angulo de 1 1/2 x 3/16 tramos de 6m	8	32,000	256,000

Perfil en angulo de 1/2 x 1/8 tramos de 6m	1	22,000	22,000
Otros			100,000
SUBTOTAL			378,000
CAJA DE CONTROL			
PLC	1	1,100,000	1,100,000
Contactores de 12 amperios	4	130,000	520,000
Caja	1	200,000	200,000
Taco principal	1	120,000	120,000
Otros			300,000
SUBTOTAL			2,240,000
TALLER			
Tornero			450,000
Soldador			140,000
Alquiler de máquinas fresadora, taladro, equipo de soldadura y herramientas			1,500,000
SUBTOTAL			2,090,000
MOLDE			
Molde en resina			300,000
SUBTOTAL			300,000
TOTAL			12,668,000

Tabla 11. Presupuesto de operación

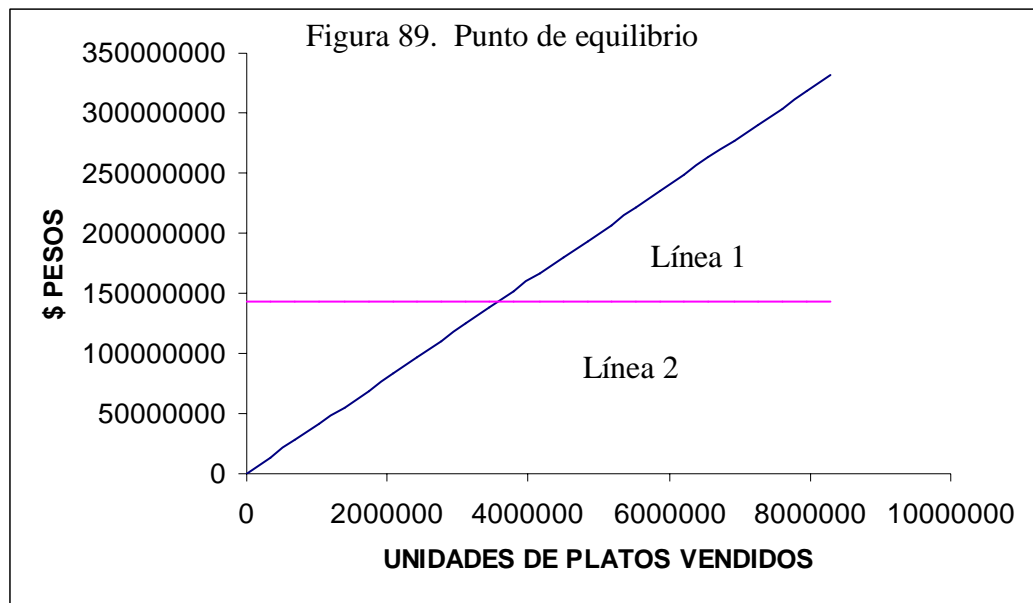
PRESUPUESTO DE OPERACIÓN PARA 4 HORAS DIARIA DE TRABAJO (PROYECCION ANUAL)			
CONCEPTO	CANTIDAD	VALOR AL MES	TOTAL ANUAL
MATERIAS PRIMAS			
Poliestireno calibre 10 por rollos de 50kg	52.416	10,483,200	125,798,400
SUBTOTAL			125,798,400
MANO DE OBRA			
Operario	1	400,000	4,800,000
Prestaciones		246,667	2,960,000
SUBTOTAL			7,760,000
COSTOS INDIRECTOS DE FABRICACION			
Mantenimiento maquinaria		150,000	1,800,000
Depreciación de la máquina			2,533,600
Energía consumida en kWatt hora	20	192,976	2,315,712

Materiales para el empaque (bolsas)			300000
SUBTOTAL			6,949,312
GASTOS DE ADMINISTRACION Y VENTAS			
Arriendo del local		130,000	1,560,000
GASTOS DE COMERCIALIZACION (PUBLICIDAD)			
Volantes		30000	360000
Radio, prensa			500000
SUBTOTAL			2,420,000.00
TOTAL			142,927,712

Tabla 12. Presupuesto de ingresos

PRESUPUESTO DE INGRESOS (PROYECCION ANUAL)			
	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL
VENTAS			
Platos de pastel (9 POR CADA CICLO)	4,147,200	40	165,888,000
Reciclaje en kilos	786.24	400	314496
TOTAL			166,202,496

Las ganancias obtenidas durante el año serían de \$23.274.784 pesos si toda la producción fuese vendida. En la figura 89 la línea 1 representa las ganancias obtenidas por las ventas de los productos y la línea 2 son los gastos de operación. El punto de intersección entre estas dos líneas es el punto de equilibrio, en donde se recupera la inversión.



10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La máquina cumple con un sistema de vacío óptimo para los ciclos de formado propuestos en el diseño, formando piezas con un buen acabado, copiando los más finos detalles del molde.
- Las pruebas del horno con sus tres estaciones comprobaron que el modelo térmico empleado para su estudio es muy aproximado.
- En la industria Colombiana la mayoría de las termoformadoras encontradas son alimentadas por lámina y de baja producción. La termoformadora alimentada por rodillo es una buena opción para producciones a mayor escala.
- Para el correcto formado de la lámina es necesario que esta se encuentre firmemente sujeta de todos sus lados. De lo contrario se pueden presentar arrugas y en consecuencia el rechazo de la pieza.
- La máquina trabaja satisfactoriamente en el formado de las piezas con molde hembra.
- Cuando se emplea molde macho de radios pequeños no se pueden exceder alturas de pieza mayores de aproximadamente 3 cm.
- Los vasos formados salieron con un fondo débil debido al espesor de la lámina ya que no se utilizaron ayudas mecánicas.
- La construcción de un molde sin defectos es vital para la apariencia final de la pieza. Los moldes en resina son una buena alternativa para pruebas y producción con bajo ciclaje.
- El uso de púas grandes garantiza un mejor agarre de la lámina a la cadena. Con la púas pequeñas la lámina a menudo se levanta por encima de estas y cuando es calentada esta se pandea y termina por salirse de la cadena obligando a parar el proceso.
- Las pruebas para desarrollar una pieza apta y de la forma más eficiente para el mercado implican una gran inversión de tiempo y dinero. Debido a la cantidad de variables que se manejan en el termoformado como son el tiempo de calentamiento, espesor y tipo de material, métodos de formado, tiempo de formado y enfriamiento,

ayudas mecánicas, etc. Sin la experiencia no es fácil encontrar las condiciones y método más adecuados.

- La rentabilidad de la termoformadora es aceptable, con un valor del 16.28%
- Para un mejor control de la temperatura del horno es conveniente que se instale una termocupla por cada zona de calentamiento.
- La unión de las púas a la cadena debe ser hecho por medio del aditamento, pues el pegante utilizado es resistente a la temperatura, pero con el tiempo se prevé que estas fallarán.
- Rellenar la mesa de vacío reduciría el tiempo de vaciado. aumentando la eficiencia del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- Thermoforming manual and trouble-shooting guide. Leroy M. Boser
- Manual técnico de termoformado. Plastiglas
- Diseño y cálculo de una máquina para moldeo de láminas de plástico al vacío. Ibes Nieto, Jairo Cabrera, Rodrigo Rueda. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander
- Termoformadora de material polimérico, diseño y construcción. Escuela de Diseño Industrial. Universidad Industrial de Santander
- In-Cycle control of the thermoforming reheat process. Ben Moore
Department of Electrical and Computer Engineering McGill University
- Principios de Transferencia del Calor. Kreith/Bohn
- Ceramic Infrared Emitters Technical Manual. National Plastic Heater
- Autómatas Programables Industriales (API). Jorge Meneses.
Universidad Industrial de Santander

ANEXO A . BOMBA DE VACIO



Separate Drive Rotary Vane 8.5, 17.0 and 21.0 cfm

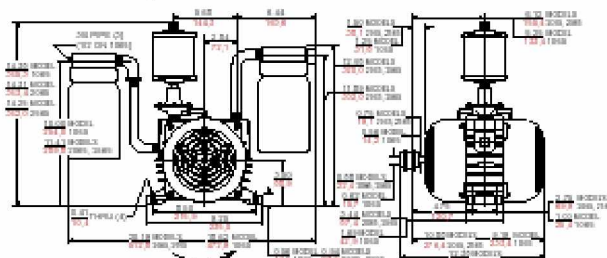


Vacuum Pump

Compressor

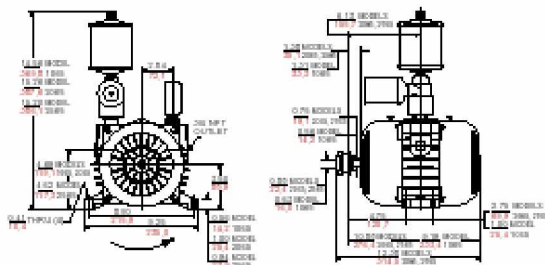
Product Dimensions (mm, inches)
Dimensions are for reference only.

Vacuum Pump



Note: One piece coupling (AE542A) used on 1065,
3 piece (AE543B) used on 2065/2565.

Compressor



Lubricated 1065, 2065, 2565 Series

MODEL 1065 SERIES

28" HG MAX. VAC., 8.5 CFM OPEN FLOW
25 PSI MAX. CONTINUOUS PRESSURE

MODEL 2065 SERIES

28" HG MAX. VAC., 17.0 CFM OPEN FLOW
15 PSI MAX. CONTINUOUS PRESSURE

MODEL 2565 SERIES

28" HG MAX. VAC., 21.0 CFM OPEN FLOW
15 PSI MAX. CONTINUOUS PRESSURE

PRODUCT FEATURES

- Lubricated operation
- Rugged construction/low maintenance
- Essentially pulse-free service

INCLUDES

- Filter AC432 (1065), AC435 (2065/2565) - Compressors
- Pressure lubricator A380C (1065), AA95A (2065/2565)
- Pressure gauge AA644B
- Filter AA800C (1065), AA900D (2065/2565) - Vacuum Pumps
- Muffler AA800D (1065), AA900E (2065/2565) - Vacuum Pumps
- Oil reservoir AA960
- Fan guards AC102B, AC102C
- Fan AC326A (1065), AC326C (2065/2565)
- Coupling assembly AE542A (1065), AE543B (2065/2565)
- Vacuum lubricator V40C

RECOMMENDED ACCESSORIES

- Base AB320H (1065), AB320F (2065/2565)
- Coupling guard AE873
- Vacuum relief valve AA840A (1065), AA308 (2065/2565)
- Vacuum gauge AA640
- Oil AD220
- Pressure relief valve AA600 (1065), AA307 (2065/2565)
- Repair kit K297 (1065), K295 (2065), K296 (2565)

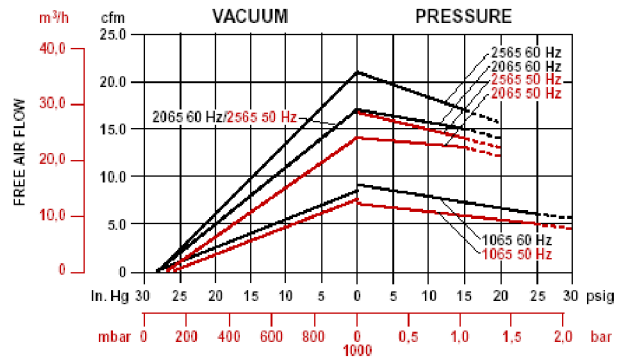
Product Specifications

Note: "P" models are pressure, "V" models are vacuum.

Model Number	Motor	RPM		HP	kW	Coupling Guard	Base	Thermotector	Net Wt.	
		60 cycle	50 cycle						lbs.	kg
1065-P18	Not included	1725	1425	1	0.74				22	9.9
1065-P20D-G38AX	115/230-60-1	1725	—	3/4	0.56	*	*	*	53	23.9
1065-V2A	Not included	1725	1425	1/2	0.37				23	10.4
1065-V3B	Not included	1725	1425	1/2	0.37	*	*		36	16.2
1065-V4B-G34AX	115/230-60-1	1725	—	1/2	0.37	*	*	*	56	25.2
1065-V2A-SD50-1*	220-240-50-1	—	1425	1/2	0.37	*	*		56	25.2
2065-P8	Not included	1725	1425	1 1/2	1.1				41	18.5
2065-P9B	Not included	1725	1425	1 1/2	1.1	*	*		61	27.5
2065-P10B-T336	230/460-60-3	1725	—	1 1/2	1.1	*	*		92	41.4
2065-V2A	Not included	1725	1425	1	0.75				43	19.4
2065-V3C	Not included	1725	1425	1	0.75	*	*		55	24.8
2065-V4C-T334	230/460-60-3	1725	—	1	0.75	*	*		80	36.0
2565-P19	Not included	1725	1425	2	1.5				40	18.0
2565-P19-SD150-1*	220/240-380/415-50-3 IP54	—	1425	2	1.5	*	*		90	40.5
2565-V2A	Not included	1725	1425	1 1/2	1.1				38	17.1
2565-V3C	Not included	1725	1425	1 1/2	1.1	*	*		55	24.8
2565-V4C-T336	230/460-60-3	1725	—	1 1/2	1.1	*	*		84	37.8
2565-V89A-SD100-1*	380/415-50-3	—	1425	1	0.75	*	*		84	37.8

*Available only in Europe.

Product Performance (Metric, U.S.)



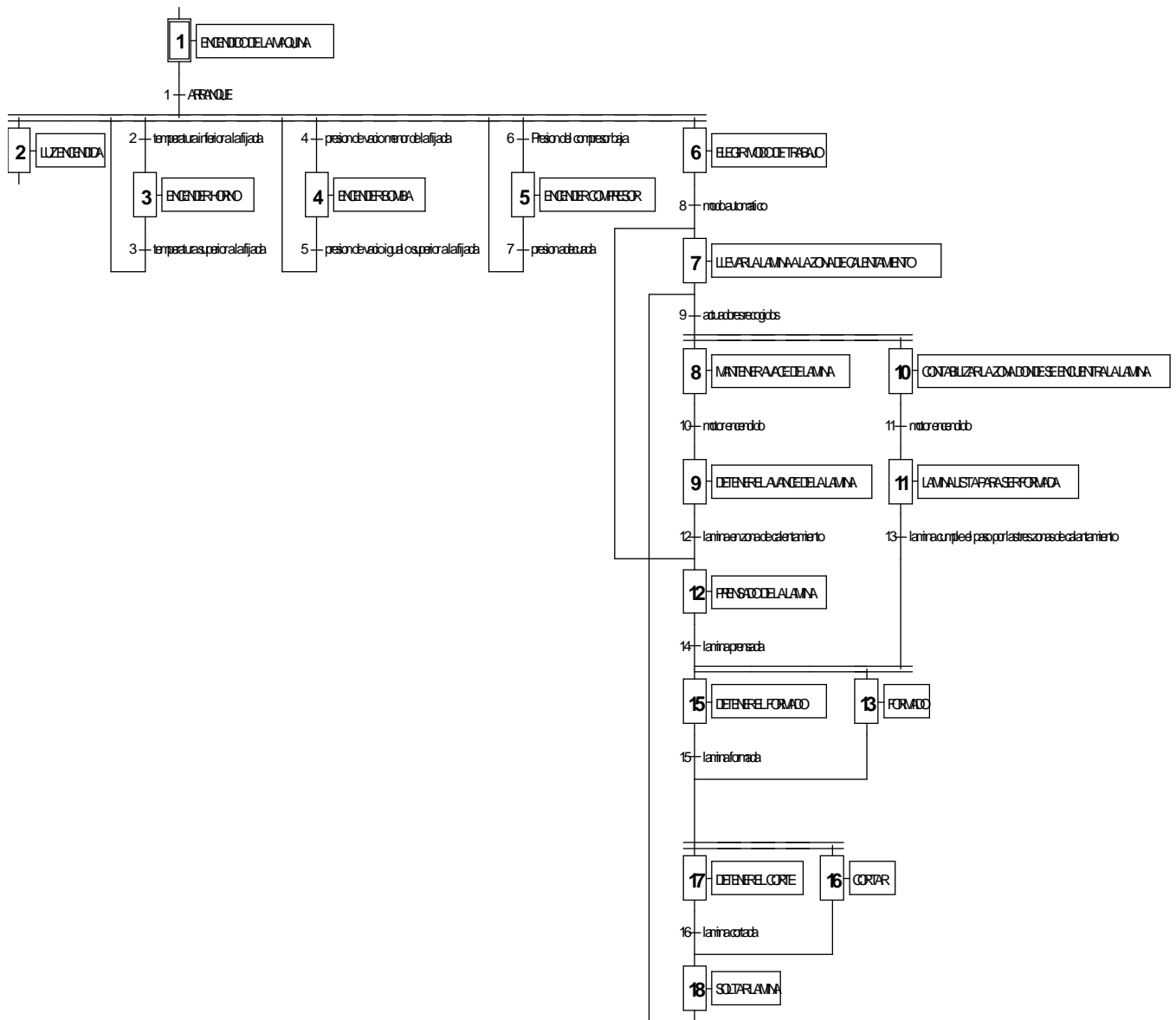
ANEXO B.

TABLA DE CAPACIDAD CADENA ESTANDAR SENCILLA DE RODILLOS No. 40 PASO 1/2"

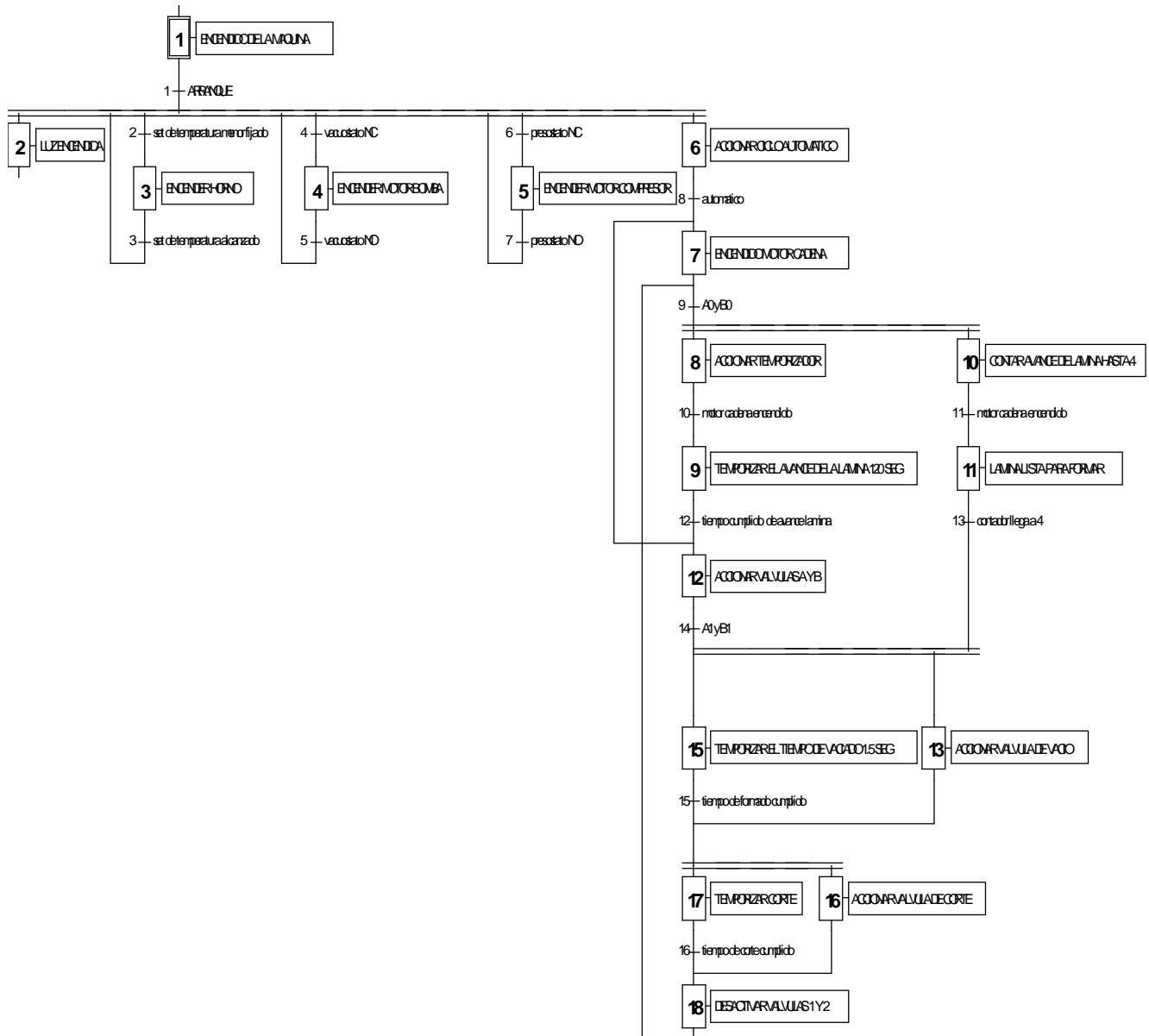
No. de dientes piñón conductor	R.P.M DEL PIÑON CONDUCTOR																																		
	10	25	50	100	200	300	400	500	700	900	1000	1200	1400	1600	1800	2100	2400	2700	3000	3500	4000	5000	6000	7000	8000										
9	0.04	0.10	0.19	0.35	0.65	0.93	1.21	1.48	2.00	2.51	2.75	3.25	3.73	4.12	3.45	2.74	2.24	1.88	1.60	1.27	1.04	0.75	0.57	0.45	0.37										
10	0.05	0.11	0.21	0.39	0.73	1.04	1.35	1.65	2.24	2.81	3.09	3.64	4.18	4.71	4.04	3.21	2.63	2.20	1.88	1.49	1.22	0.87	0.66	0.53	0.43										
11	0.05	0.12	0.23	0.43	0.90	1.16	1.50	1.83	2.48	3.11	3.42	4.03	4.63	5.22	4.66	3.70	3.03	2.54	2.17	1.72	1.41	1.01	0.77	0.61	0.50										
12	0.05	0.14	0.25	0.47	0.98	1.27	1.65	2.01	2.73	3.42	3.76	4.43	5.09	5.74	5.31	4.22	3.45	2.89	2.47	1.96	1.60	1.15	0.87	0.69	0.57										
13	0.06	0.15	0.28	0.52	0.96	1.39	1.80	2.20	2.97	3.73	4.10	4.83	5.55	6.26	5.99	4.76	3.89	3.26	2.79	2.21	1.81	1.29	0.98	0.78	0.64										
14	0.07	0.16	0.30	0.56	1.04	1.50	1.95	2.38	3.22	4.04	4.44	5.23	6.01	6.78	6.70	5.31	4.35	3.65	3.11	2.47	2.02	1.45	1.10	0.87	0.71										
15	0.07	0.17	0.32	0.60	1.12	1.62	2.10	2.56	3.47	4.35	4.78	5.64	6.47	7.30	7.43	5.89	4.82	4.04	3.37	2.74	2.24	1.60	1.22	0.97	0.79										
16	0.08	0.19	0.35	0.65	1.20	1.74	2.25	2.75	3.72	4.66	5.13	6.04	6.94	7.83	8.18	6.49	5.31	4.45	3.80	3.02	2.47	1.77	1.34	1.07	0.87										
17	0.08	0.20	0.37	0.69	1.29	1.85	2.40	2.93	3.97	4.98	5.48	6.45	7.41	8.36	8.96	7.11	5.82	4.88	4.17	3.31	2.71	1.94	1.47	1.17	0.96										
18	0.09	0.21	0.39	0.73	1.37	1.97	2.55	3.12	4.22	5.30	5.82	6.86	7.88	8.89	9.76	7.75	6.34	5.31	4.54	3.60	2.95	2.11	1.60	1.27	0										
19	0.09	0.22	0.42	0.78	1.45	2.09	2.71	3.31	4.48	5.62	6.17	7.27	8.36	9.42	10.5	8.40	6.88	5.76	4.92	3.91	3.20	2.29	1.74	1.38	0										
20	0.10	0.24	0.44	0.82	1.53	2.21	2.86	3.50	4.73	5.94	6.53	7.69	8.83	9.96	11.1	9.07	7.43	6.22	5.31	4.22	3.45	2.47	1.88	1.49	0										
21	0.11	0.25	0.46	0.87	1.62	2.33	3.02	3.69	4.99	6.26	6.88	8.11	9.31	10.5	11.7	9.76	7.99	6.70	5.72	4.54	3.71	2.66	2.02	1.60	0										
22	0.11	0.26	0.49	0.91	1.70	2.45	3.17	3.88	5.25	6.58	7.23	8.52	9.79	11.0	12.3	10.5	8.57	7.18	6.13	4.87	3.98	2.85	2.17	1.72	0										
23	0.12	0.27	0.51	0.96	1.78	2.57	3.33	4.07	5.51	6.90	7.59	8.94	10.3	11.6	12.9	11.2	9.16	7.68	6.55	5.20	4.26	3.05	2.32	1.84	0										
24	0.13	0.29	0.54	1.00	1.87	2.69	3.48	4.25	5.76	7.23	7.95	9.36	10.8	12.1	13.5	11.9	9.76	8.18	6.99	5.54	4.54	3.25	2.47	1.96	0										
25	0.13	0.30	0.56	1.05	1.95	2.81	3.64	4.45	6.02	7.55	8.30	9.78	11.2	12.7	14.1	12.7	10.4	8.70	7.43	5.89	4.82	3.45	2.63	0											
26	0.14	0.31	0.58	1.09	2.03	2.93	3.80	4.64	6.28	7.86	8.66	10.2	11.7	13.2	14.7	13.5	11.0	9.23	7.88	6.25	5.12	3.66	2.79	0											
28	0.15	0.34	0.63	1.18	2.20	3.18	4.11	5.03	6.81	8.54	9.39	11.1	12.7	14.3	15.9	15.0	12.3	10.3	8.80	6.99	5.72	4.09	3.11	0											
30	0.16	0.37	0.68	1.27	2.38	3.42	4.43	5.42	7.33	9.20	10.1	11.9	13.7	15.4	17.2	16.7	13.6	11.4	9.76	7.75	6.34	4.54	3.45	0											
32	0.17	0.39	0.73	1.36	2.55	3.67	4.75	5.81	7.86	9.86	10.8	12.8	14.7	16.5	18.4	18.4	15.0	12.6	10.8	8.64	6.99	5.00	0												
35	0.19	0.43	0.81	1.50	2.81	4.04	5.24	6.40	8.66	10.9	11.9	14.1	16.2	18.2	20.3	21.0	17.2	14.4	12.3	9.76	7.99	5.72	0												
40	0.22	0.50	0.93	1.74	3.24	4.67	6.05	7.39	10.0	12.5	13.8	16.3	18.7	21.1	23.4	25.7	21.0	17.6	15.0	11.9	9.76	6.99	0												
45	0.25	0.57	1.06	1.97	3.68	5.30	6.87	8.40	11.4	14.2	15.7	18.5	21.2	23.9	26.5	30.5	25.1	21.0	17.9	14.2	11.7	0													
	Lubricación Tipo A							Lubricación Tipo B							Lubricación Tipo C																				
<p>LUBRICACIÓN TIPO A: A mano, con aceite o brocha. LUBRICACIÓN TIPO B: En baño de aceite o por salpique. LUBRICACIÓN TIPO C: Al chorro bajo presión.</p> <p>La información contenida en estas tablas está basada en los estándares de la ASOCIACION AMERICANA DE FABRICANTES DE CADENAS (American Chain Association).</p>												<p>Cuando se trata de cadenas de hilera múltiple de este paso, multiplique la capacidad por:</p> <table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>No. DE HILERAS</td> <td>FACTOR</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1.7</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>2.5</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>3.3</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>3.9</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>4.6</td> </tr> </table>												No. DE HILERAS	FACTOR	2	1.7	3	2.5	4	3.3	5	3.9	6	4.6
No. DE HILERAS	FACTOR																																		
2	1.7																																		
3	2.5																																		
4	3.3																																		
5	3.9																																		
6	4.6																																		

ANEXO C.

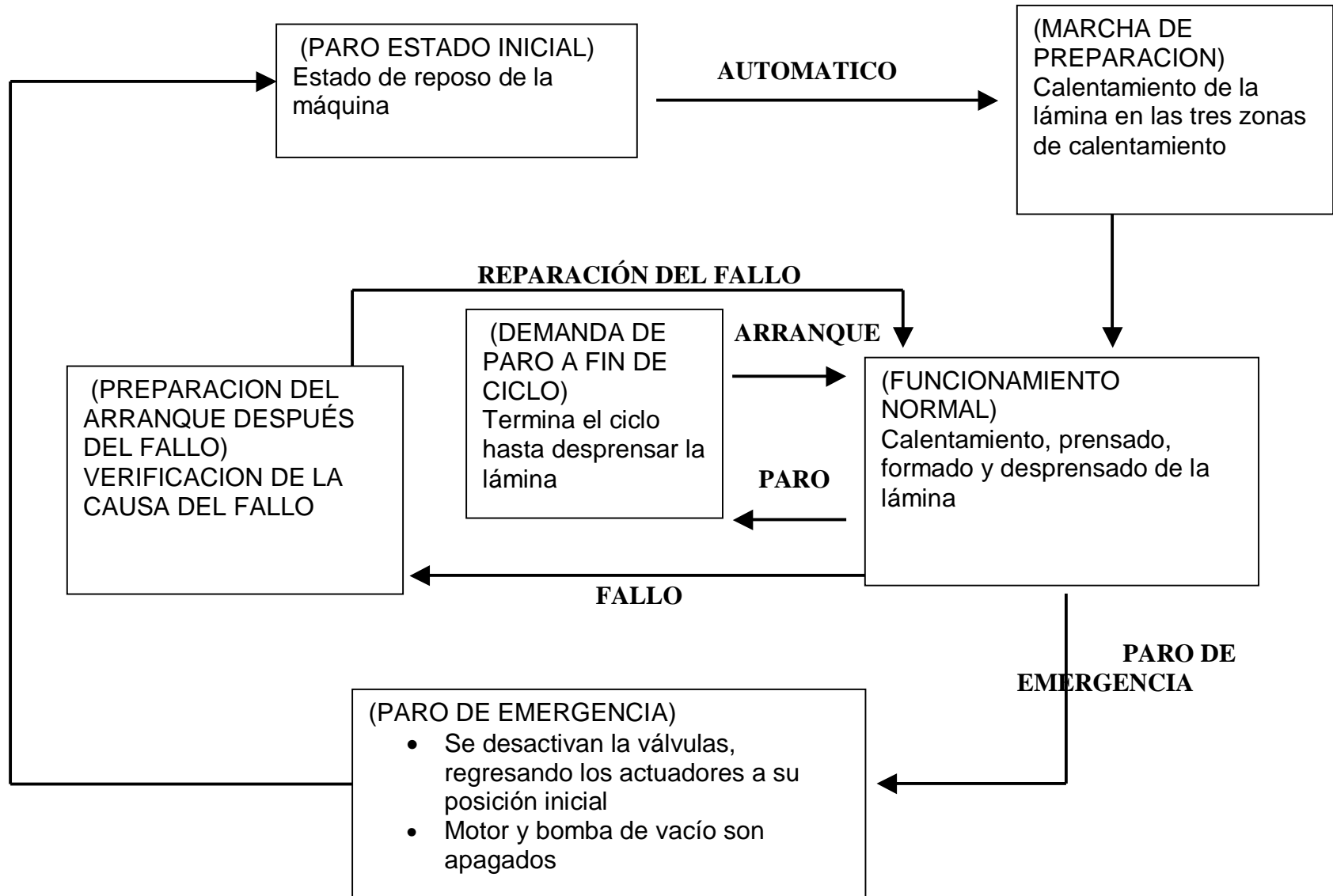
GRAFICET DESCRIPTIVO DEL PROCESO



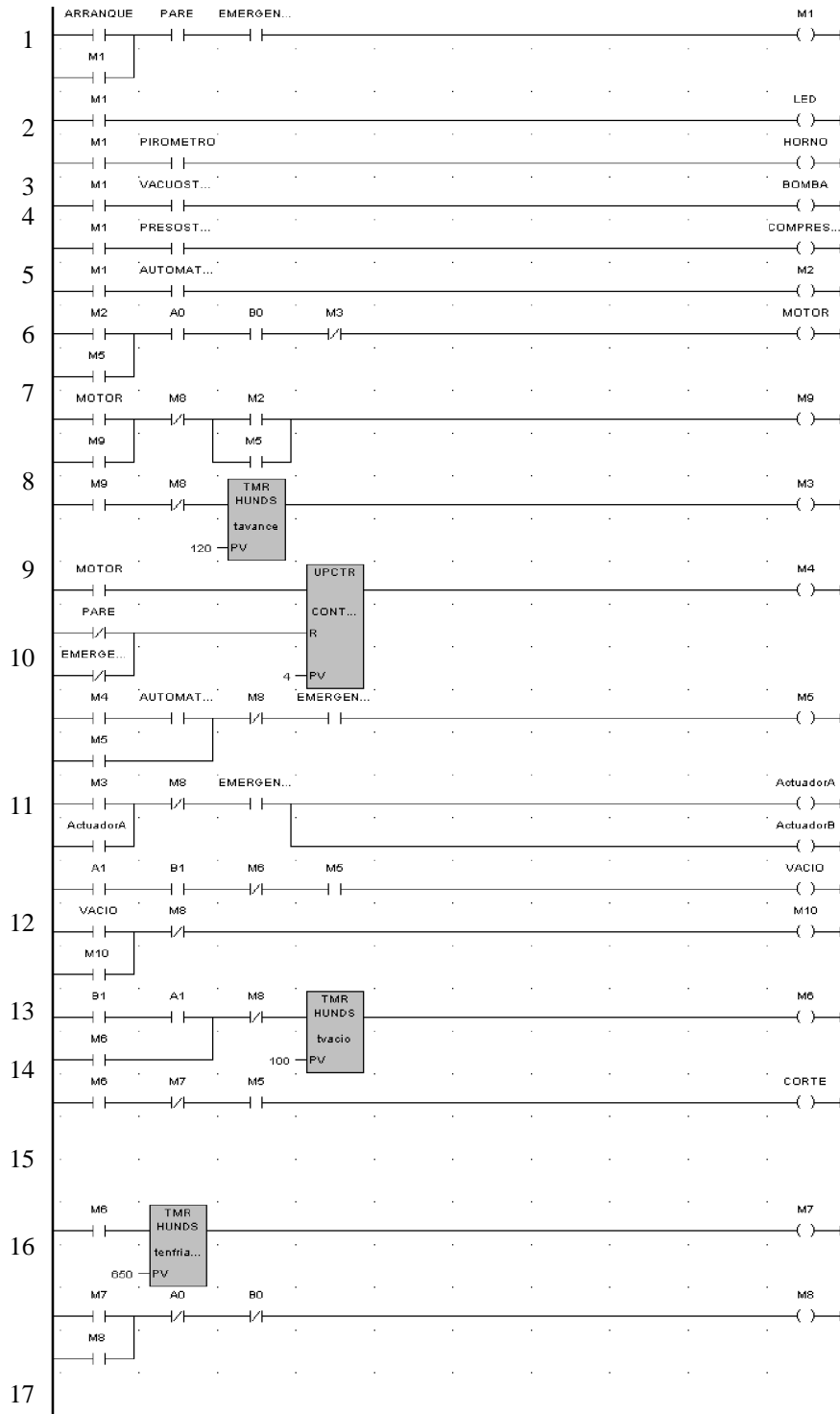
GRAFJET CON ACCIONAMIENTOS Y SENSORES



GEMMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA

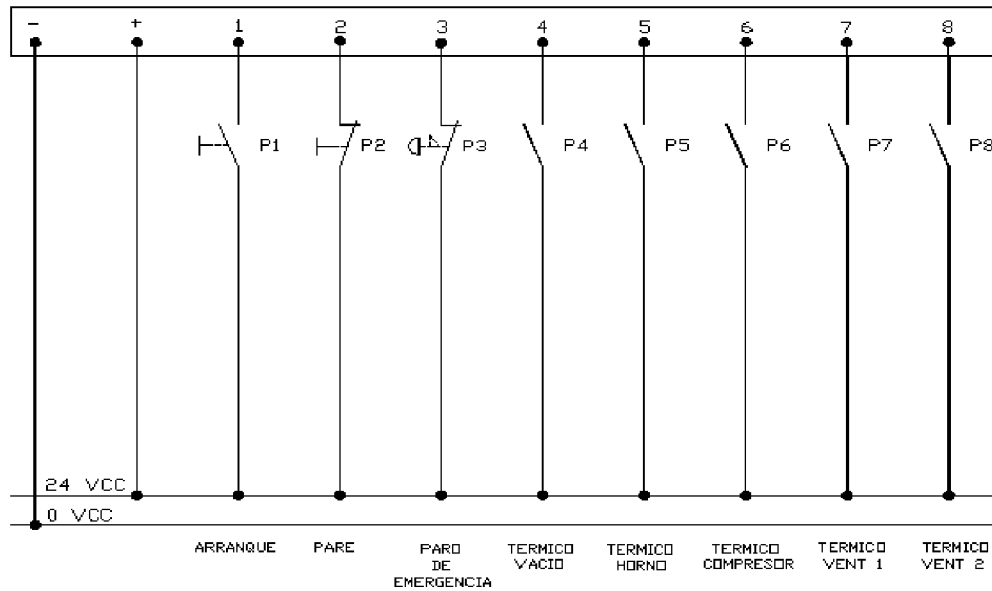


ANEXO D. PROGRAMA TERMOFORMADORA

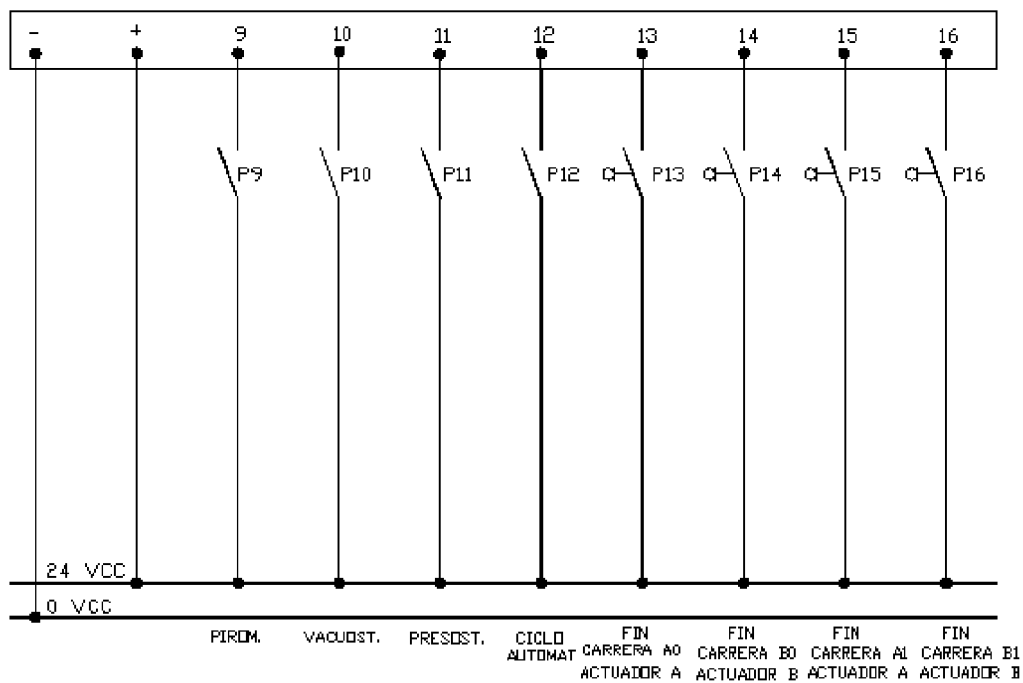


ANEXO E. PLANOS ELÉCTRICOS DE LA TERMOFORMADORA

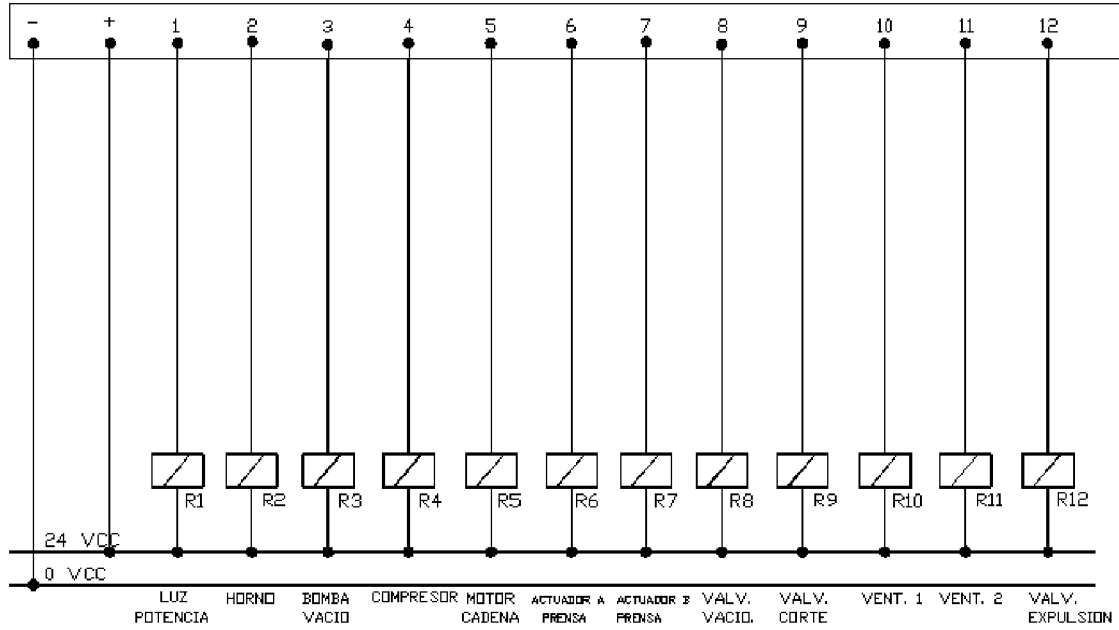
ENTRADAS DIGITALES GE FANUC SERIES 90 MICRO



ENTRADAS DIGITALES GE FANUC SERIES 90 MICRO

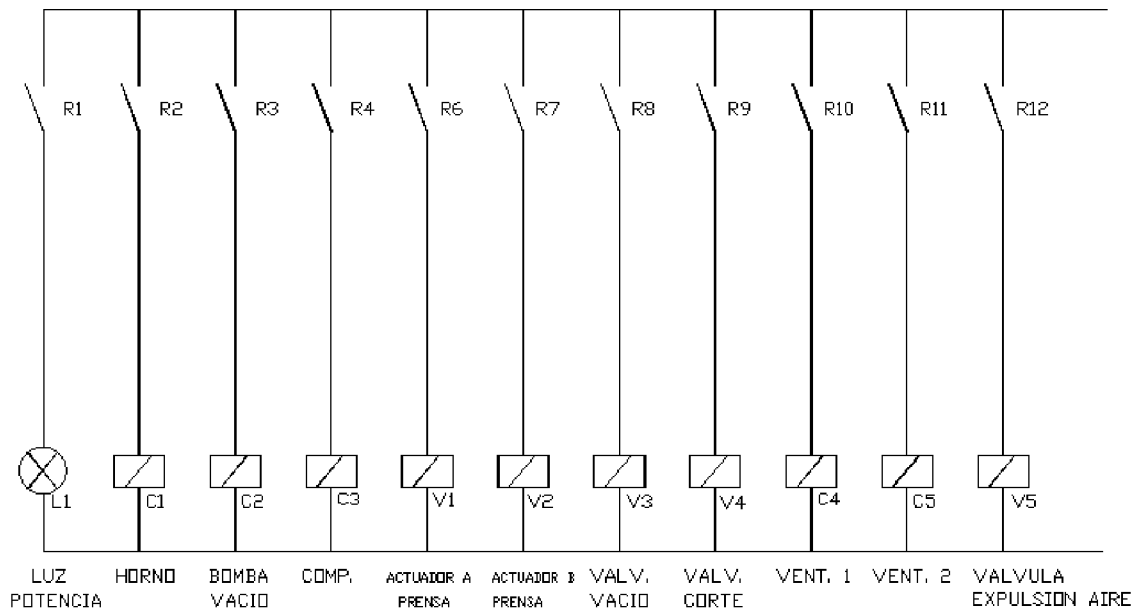


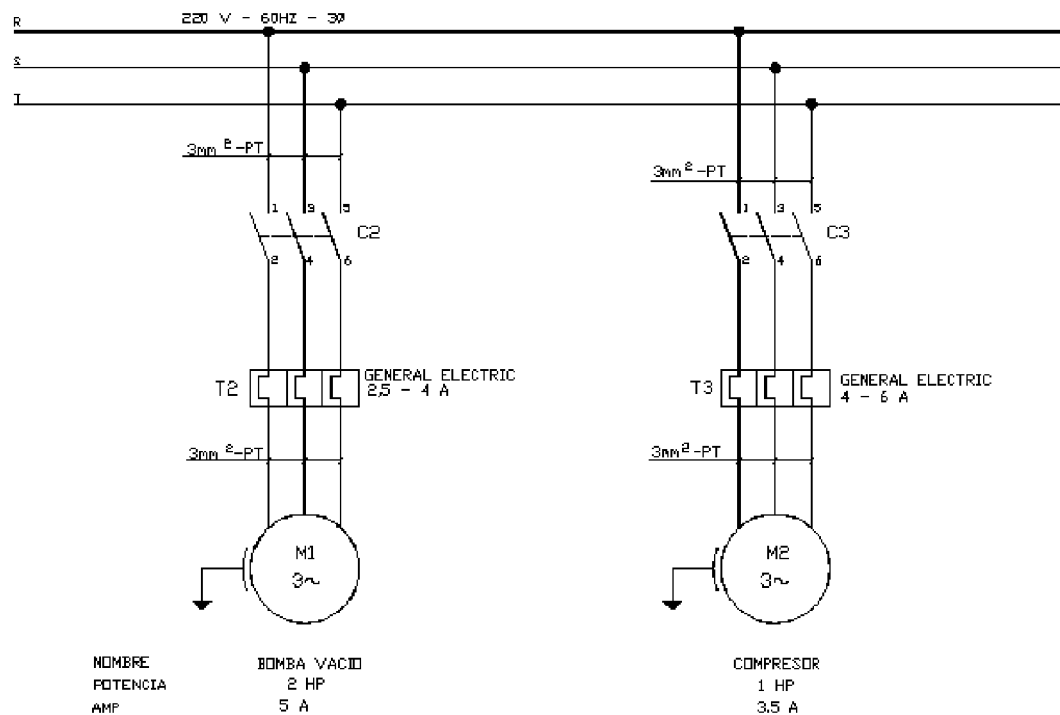
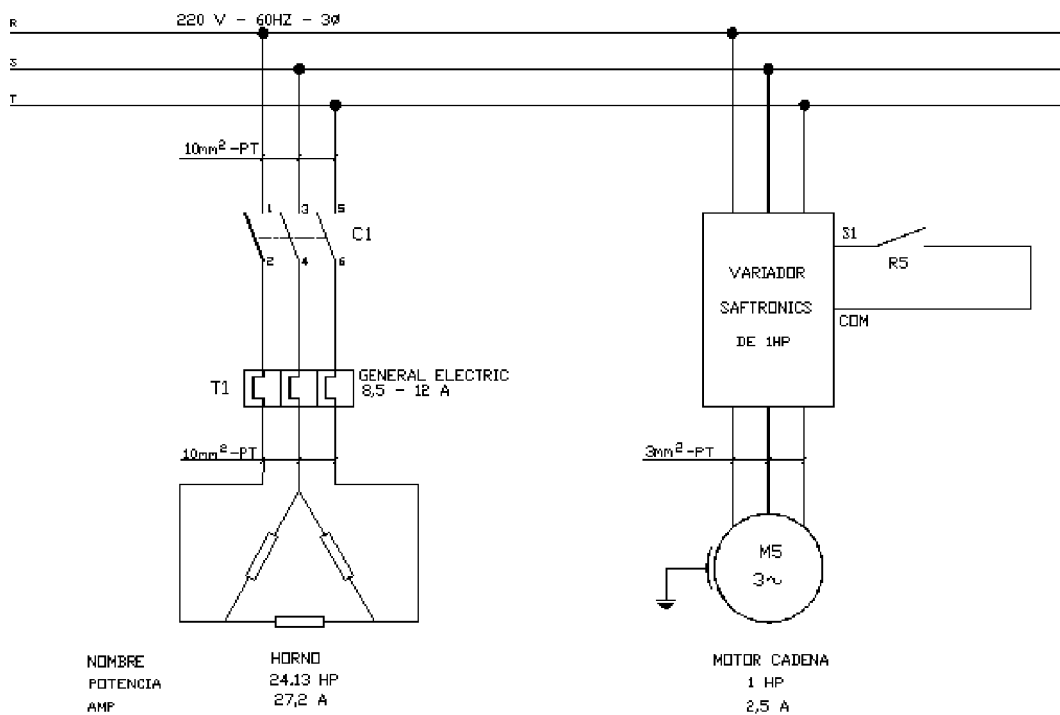
SALIDAS DIGITALES GE FANUC SERIES 90 MICRO

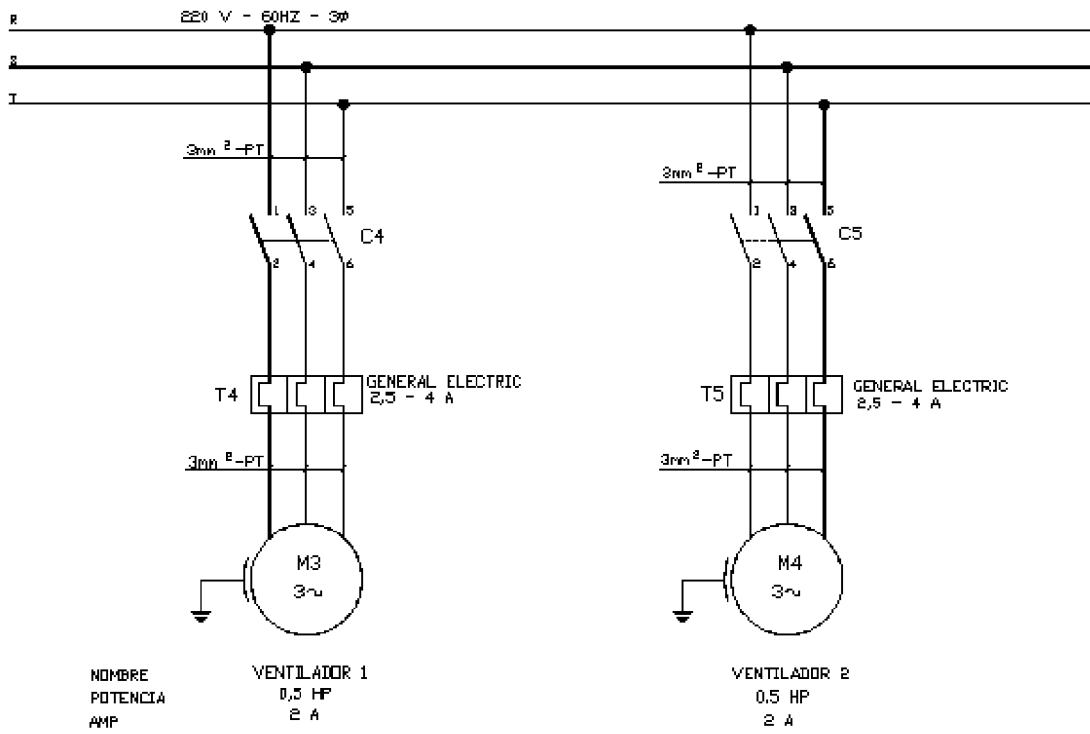


CABLEADO A LAS BOBINAS

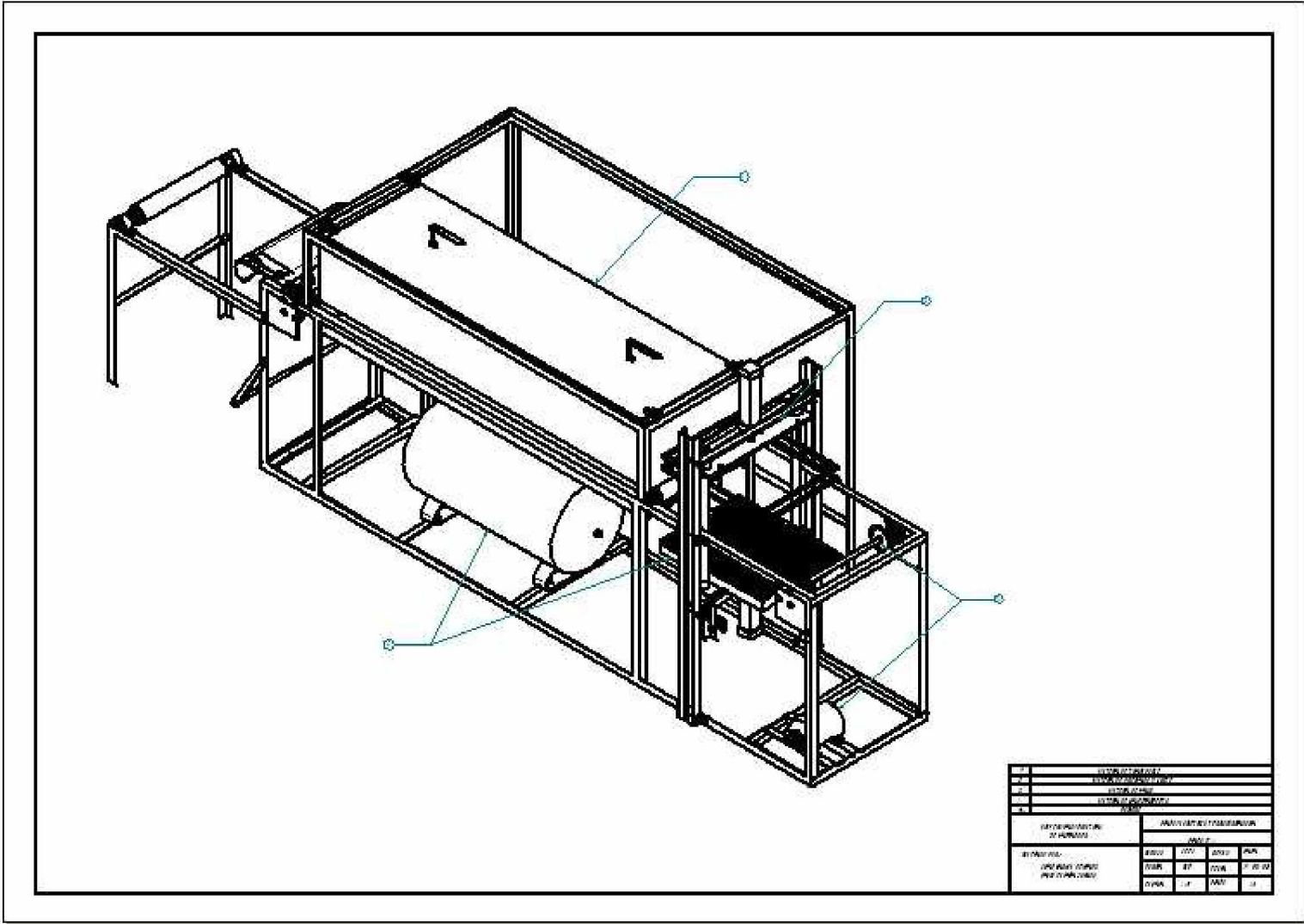
220V - 60 HZ

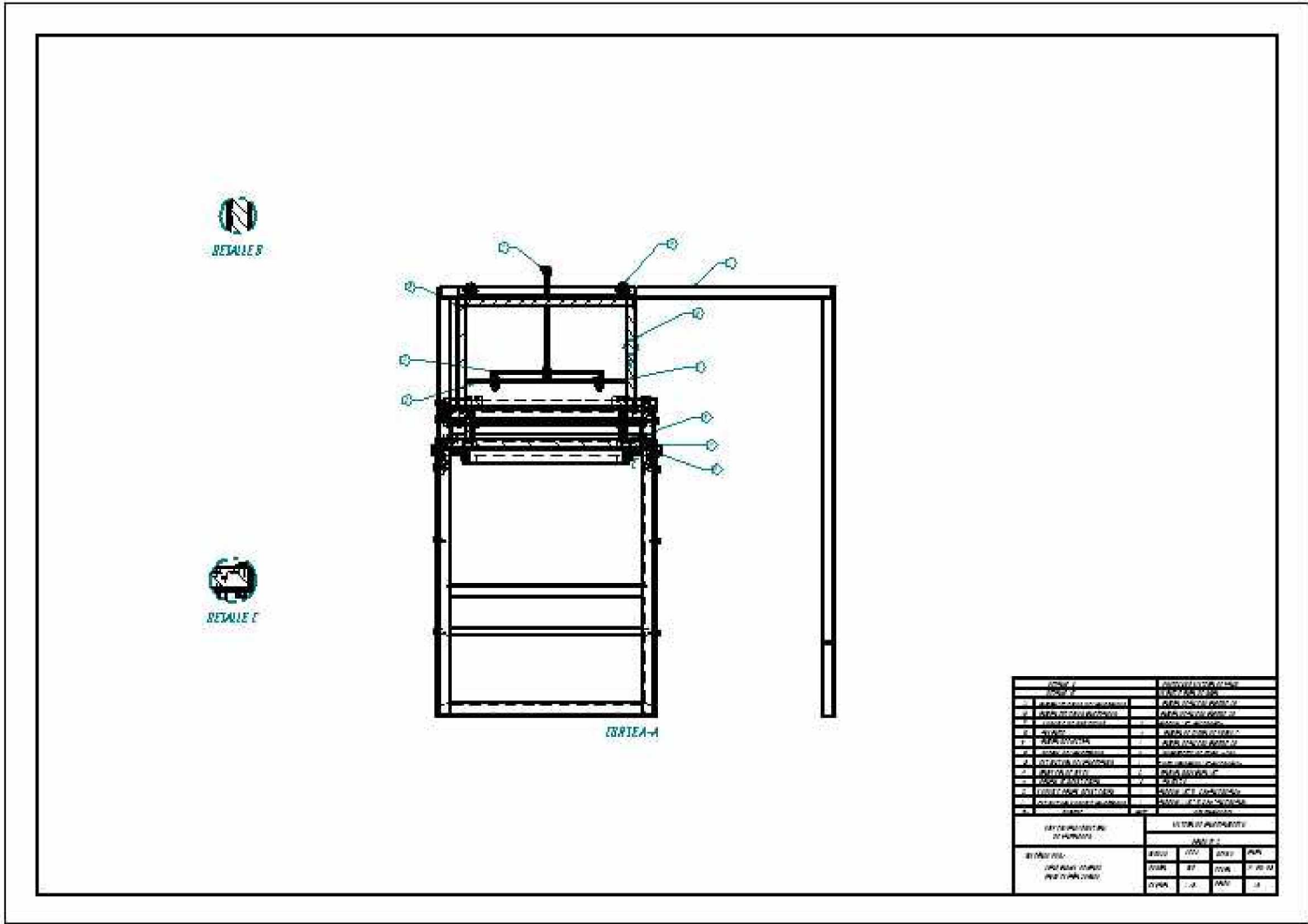


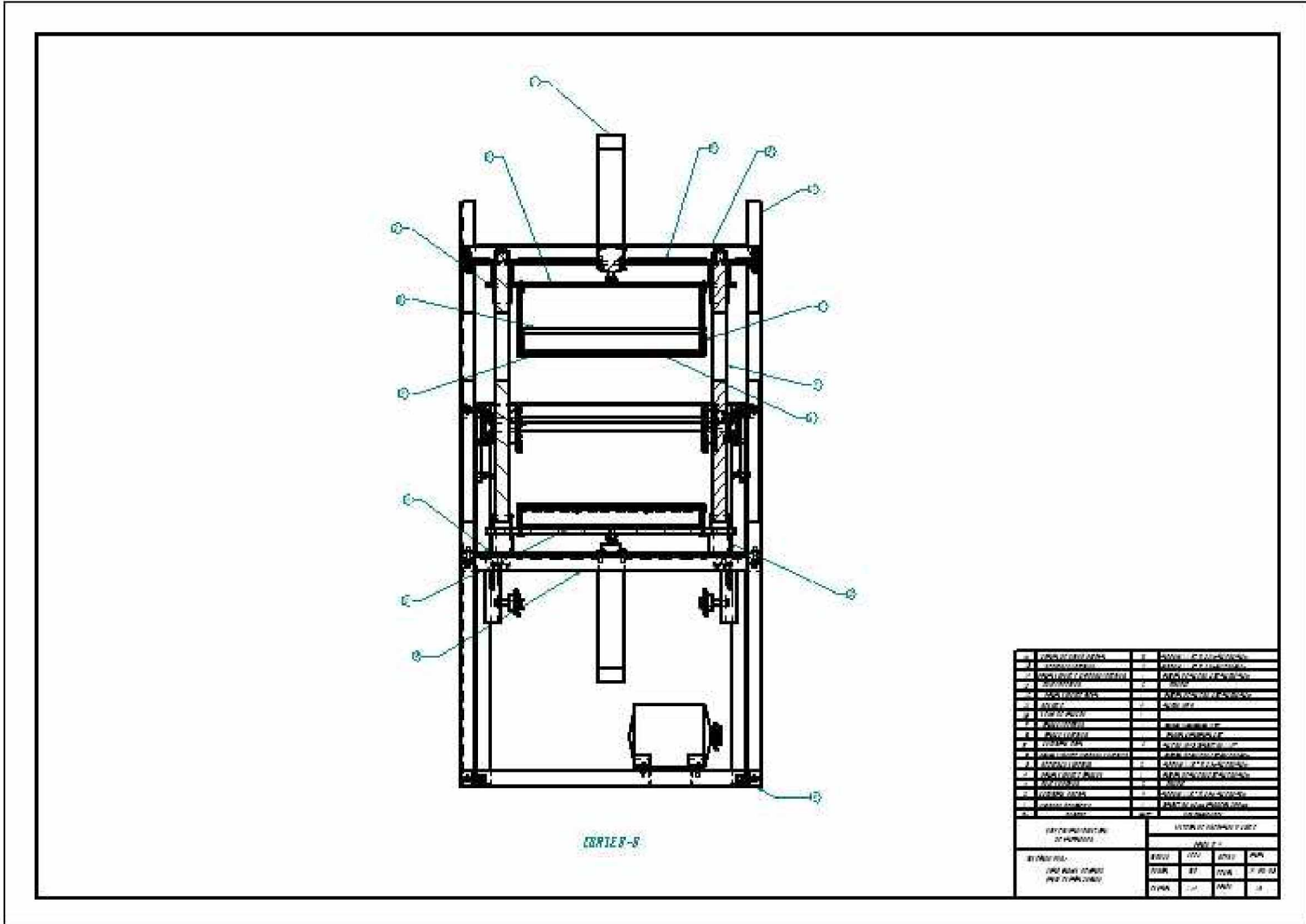


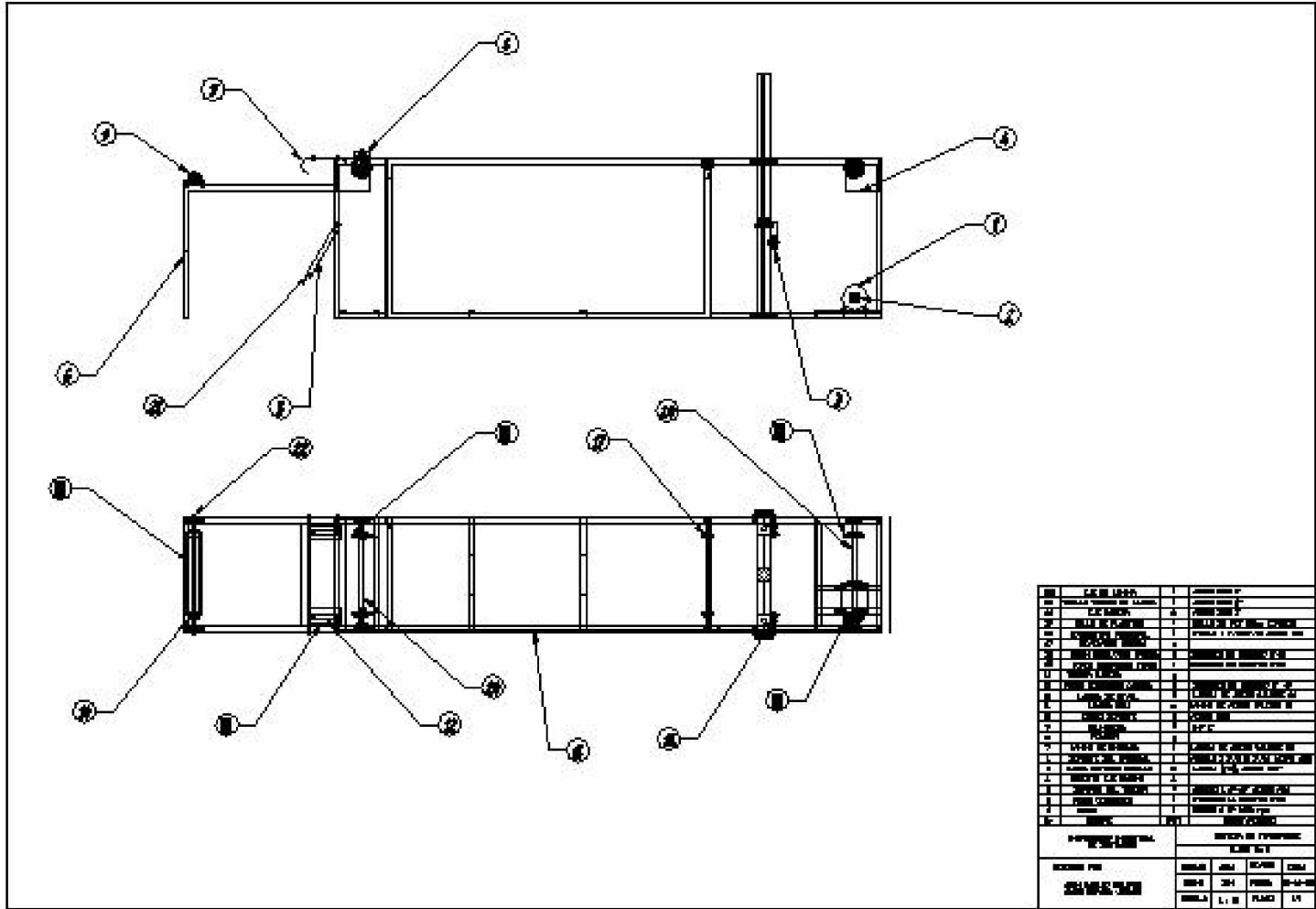


ANEXO F.
PLANOS

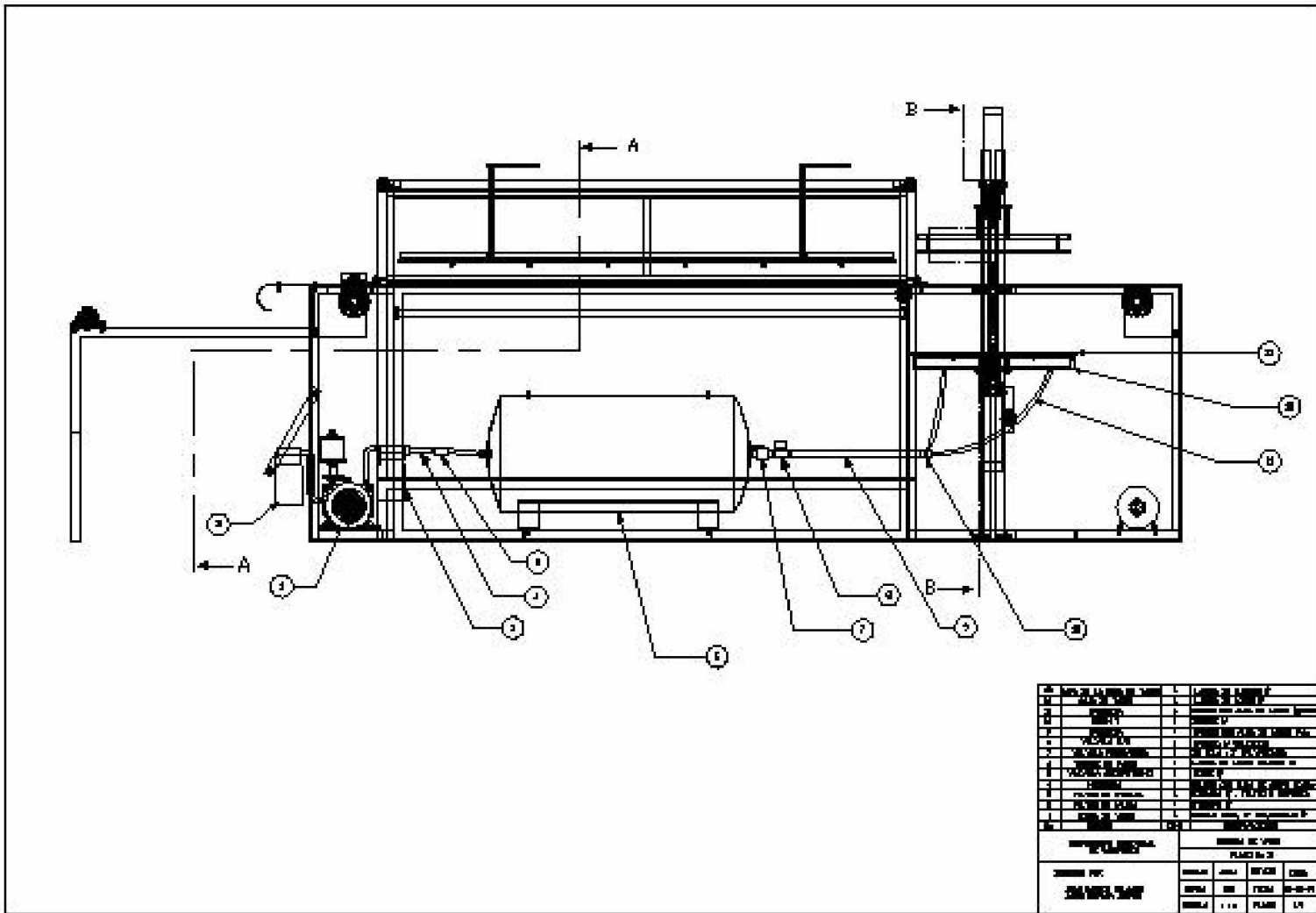


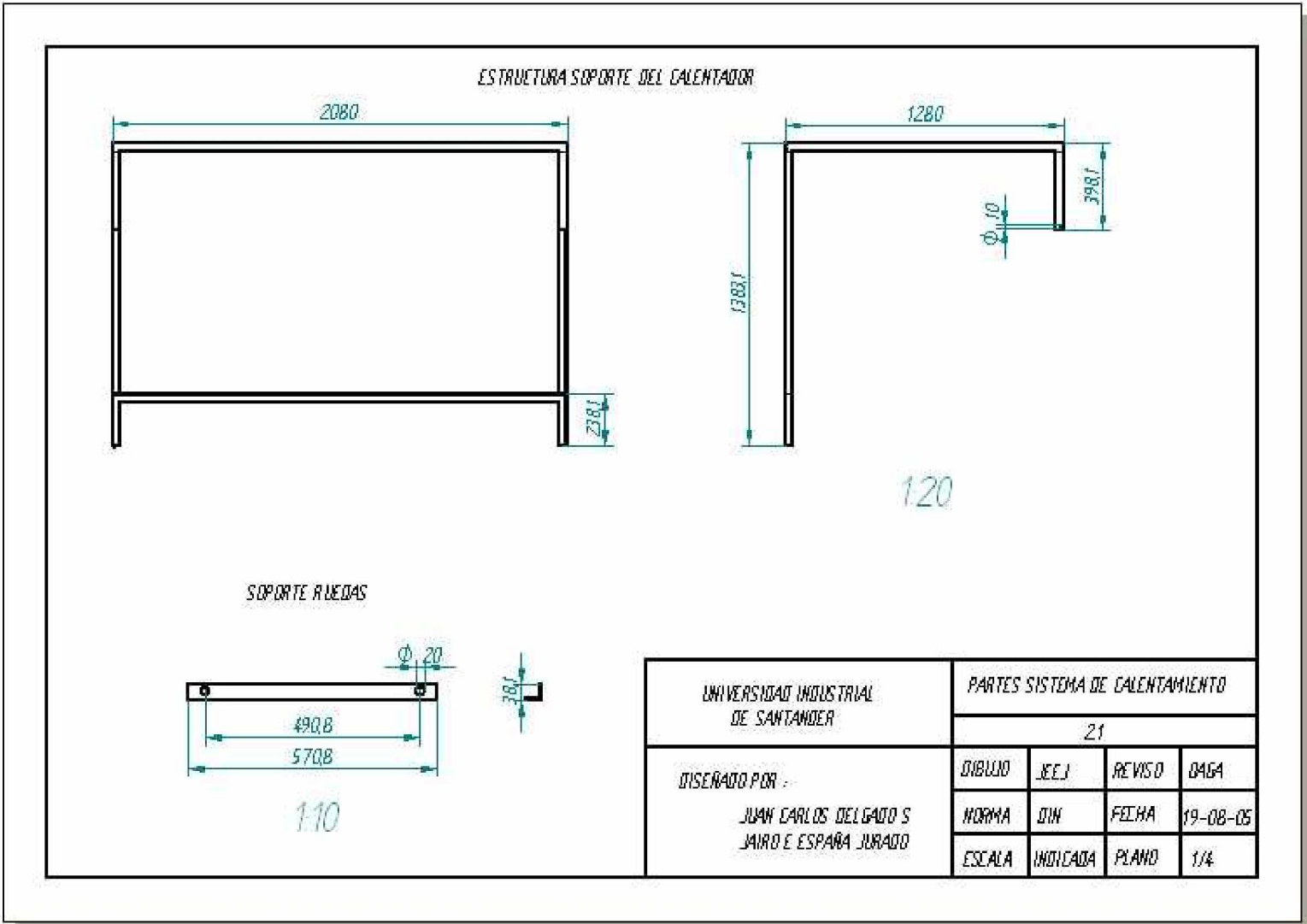


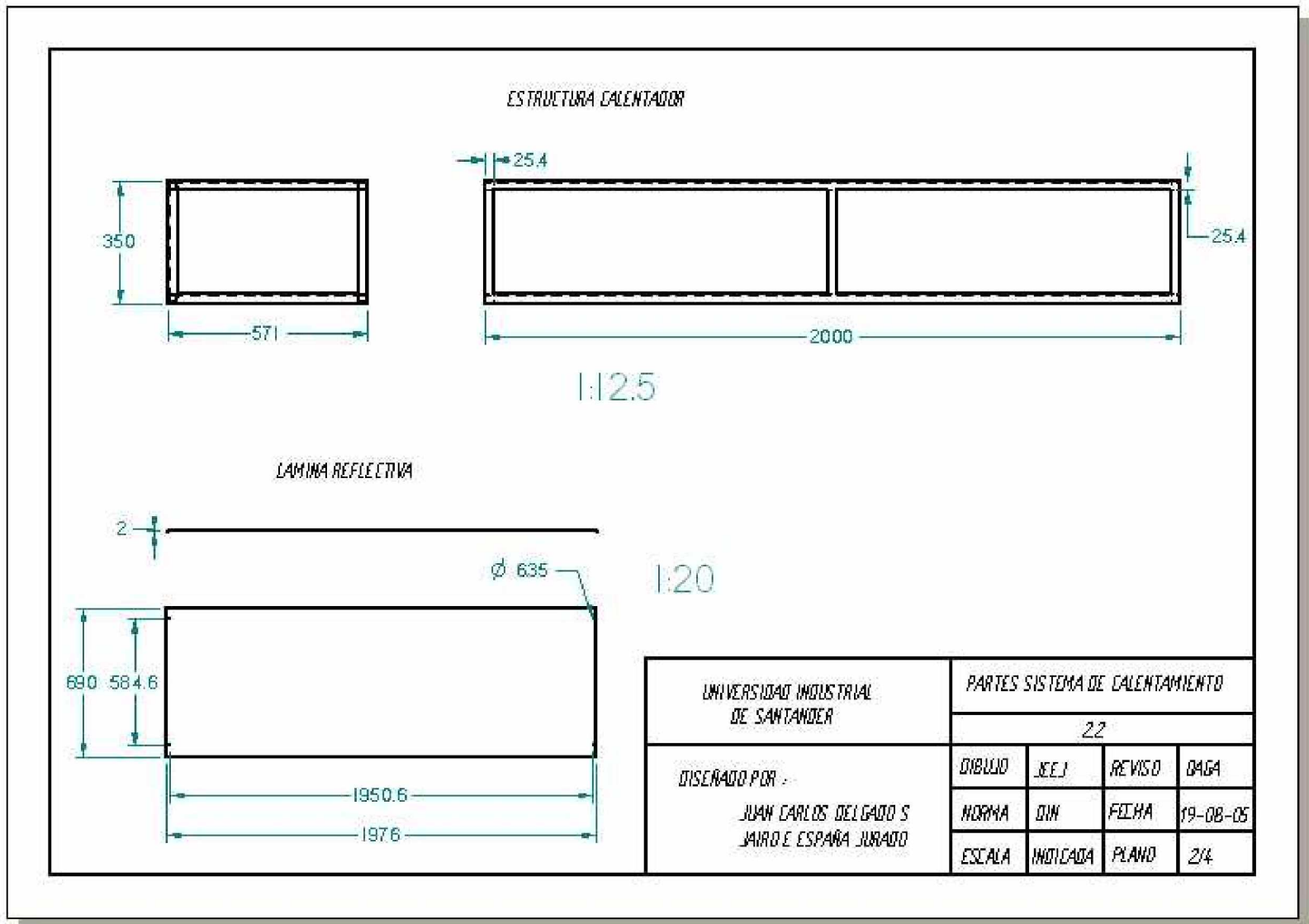




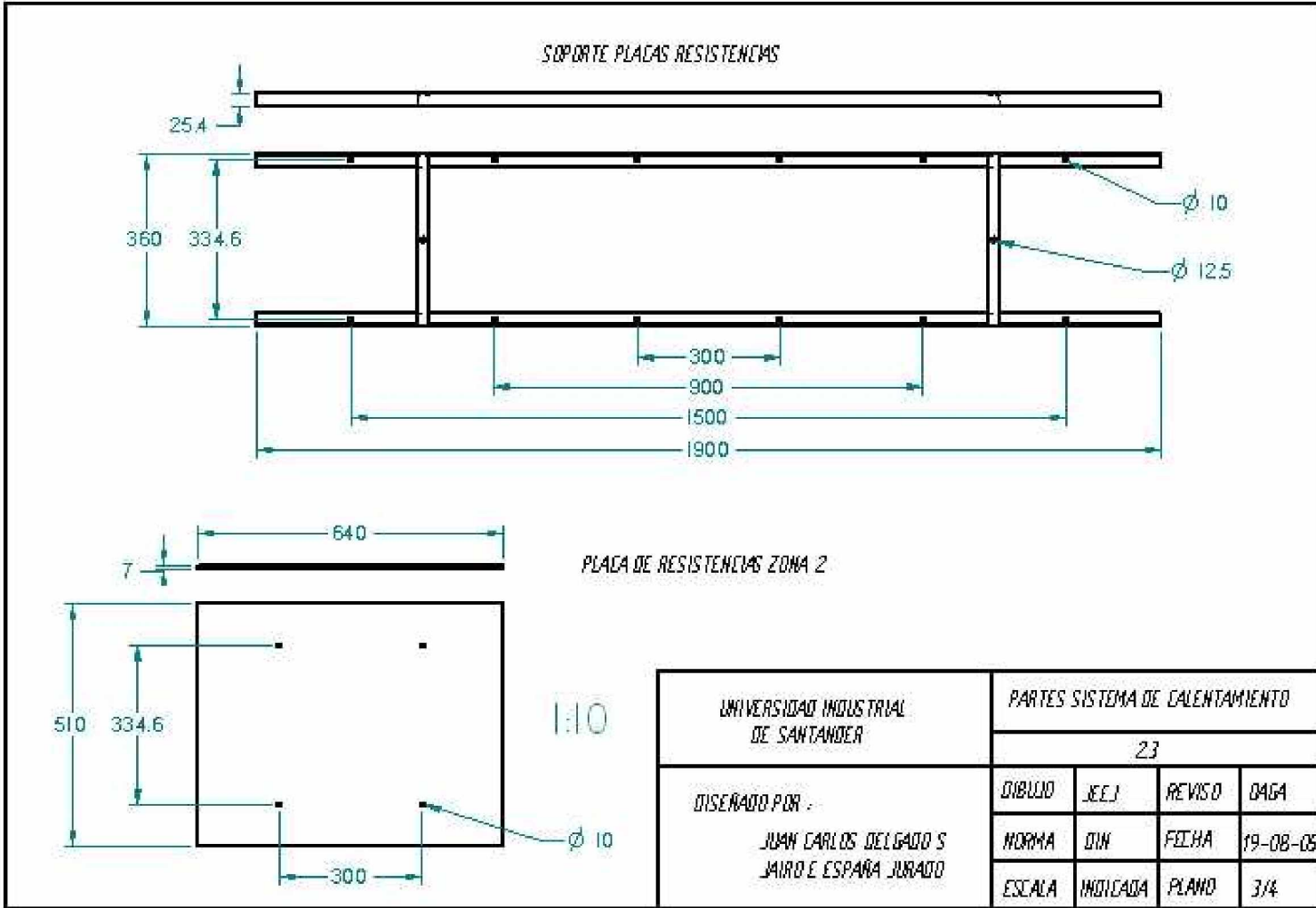
NO	DESCRIPTION	QUANTITY	UNIT
01	FLANGE	1	PC
02	WASHER	2	PC
03	NUT	2	PC
04	BOLT	2	PC
05	WASHER	2	PC
06	NUT	2	PC
07	BOLT	2	PC
08	WASHER	2	PC
09	NUT	2	PC
10	BOLT	2	PC
11	WASHER	2	PC
12	NUT	2	PC
13	BOLT	2	PC
14	WASHER	2	PC
15	NUT	2	PC
16	BOLT	2	PC
17	WASHER	2	PC
18	NUT	2	PC
19	BOLT	2	PC
20	WASHER	2	PC





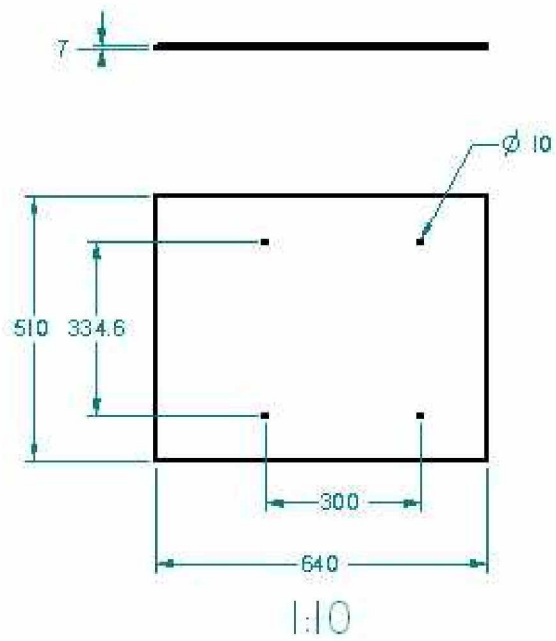


<i>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</i>	<i>PARTES SISTEMA DE CALENTAMIENTO</i>			
	22			
<i>DISEÑADO POR: JUAN CARLOS DELGADO S JAIR E ESPAÑA JURADO</i>	<i>DIBUJO</i>	<i>JEEJ</i>	<i>REVISO</i>	<i>DAGA</i>
	<i>NORMA</i>	<i>DIN</i>	<i>FECHA</i>	<i>19-08-05</i>
	<i>ESCALA</i>	<i>INDICADA</i>	<i>PLANO</i>	<i>2/4</i>

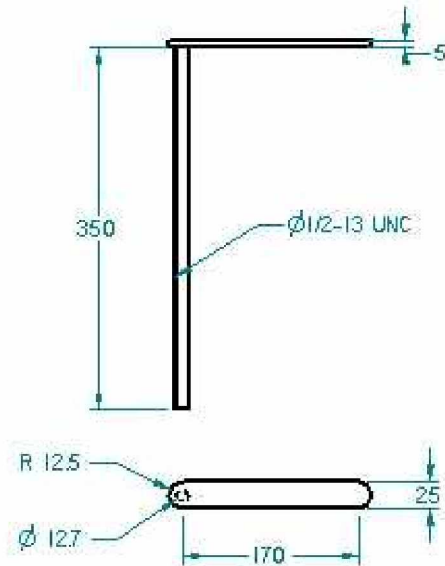


UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PARTES SISTEMA DE CALENTAMIENTO			
	23			
DISEÑADO POR JUAN CARLOS DELGADO S JAIRO E ESPAÑA JURADO	DIBUJO	JEEJ	REVISO	DAKA
	NORMA	DIN	FECHA	19-08-05
	ESCALA	INDICADA	PLANO	3/4

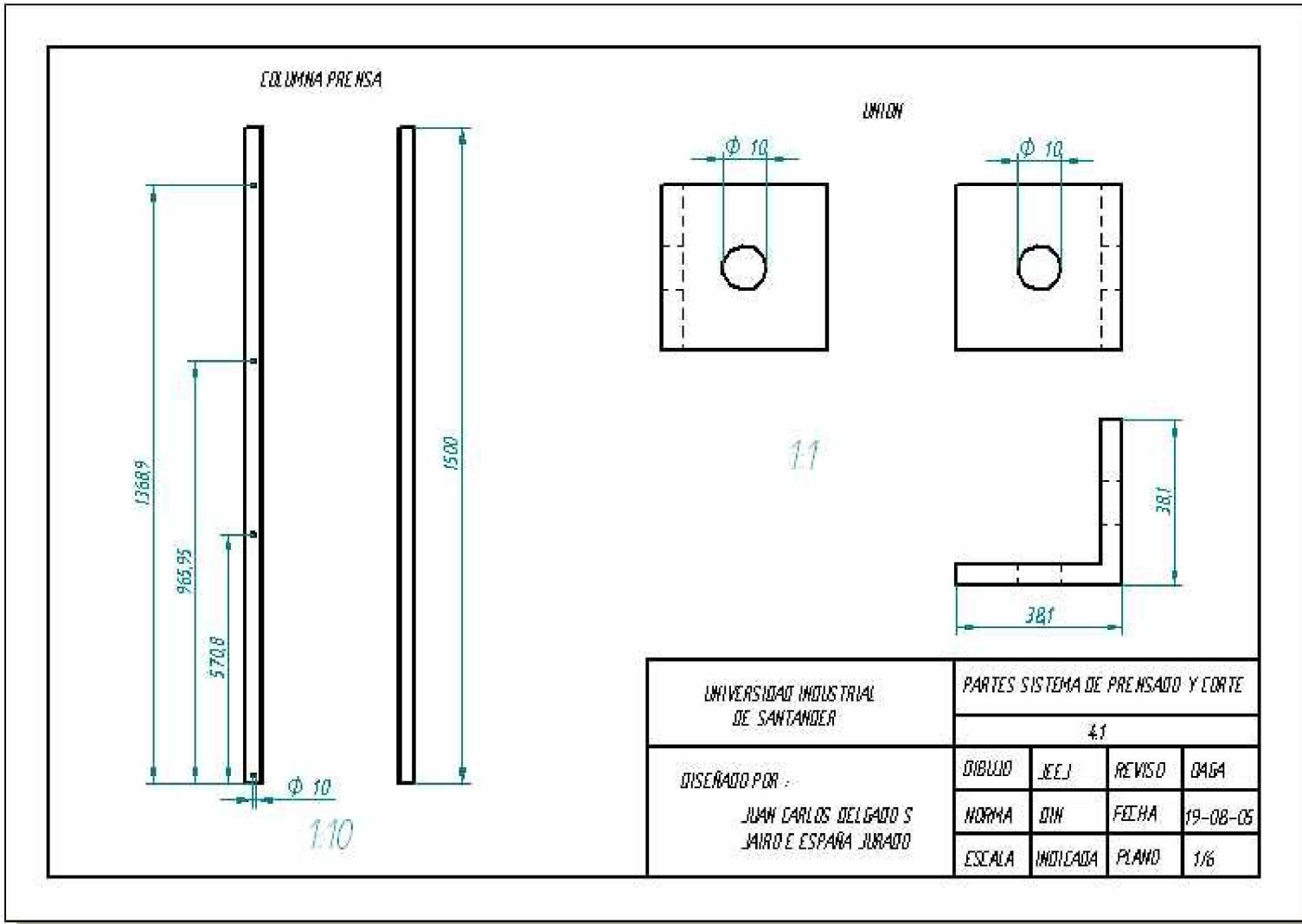
PLACA RESISTENCIAS ZONA 1 Y 3



MANIVELA DE NIVEL



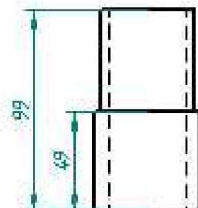
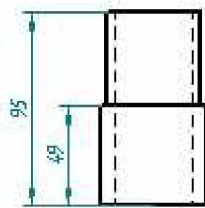
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PARTES SISTEMA DE CALENTAMIENTO			
	24			
DISEÑADO POR: JUAN CARLOS DELGADO S JAIRO E ESPARRA JURADO	DIBUJO	JEEJ	REVISO	DAGA
	NORMA	DIN	FECHA	19-08-05
	ESCALA	INDICADA	PLANO	4/4



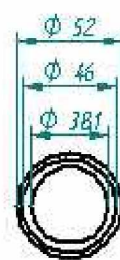
PLACA SOPORTE CILINDRO SUPERIOR E INFERIOR

BUE INFERIOR

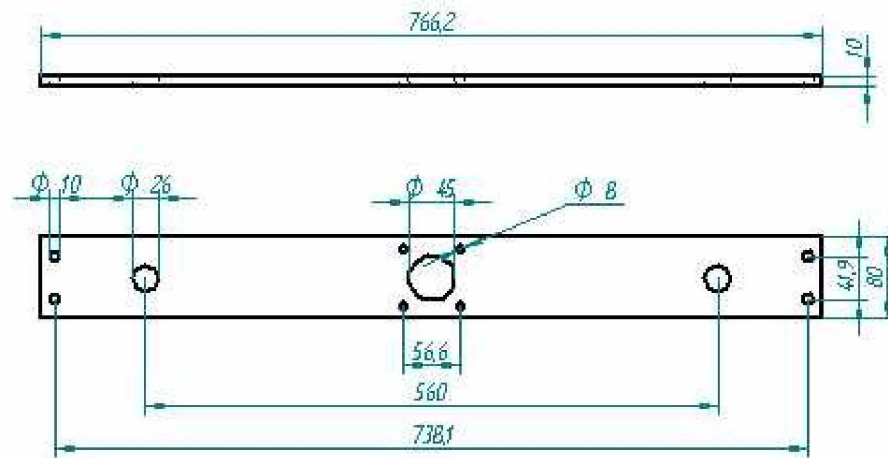
BUE SUPERIOR



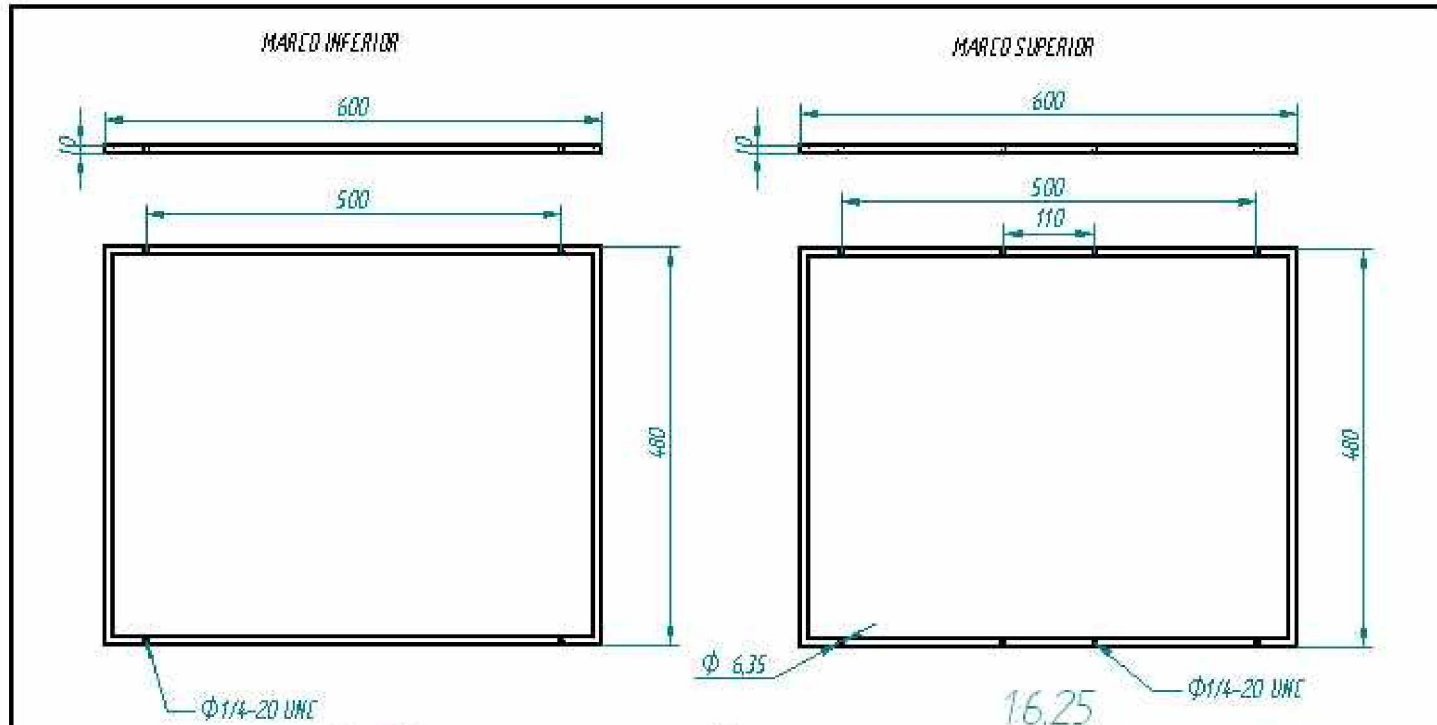
125



125



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PARTES SISTEMA PRENSADO Y CORTE			
	42			
DISEÑADO POR: JUAN CARLOS DELGADO S JAIRO E ESPAÑA JURADO	DIBUJO	JEEJ	REVISO	DAKA
	NORMA	DIN	FECHA	19-08-05
	ESCALA	INDICADA	PLANO	2%



Φ 1/4-20 UNC

16.25

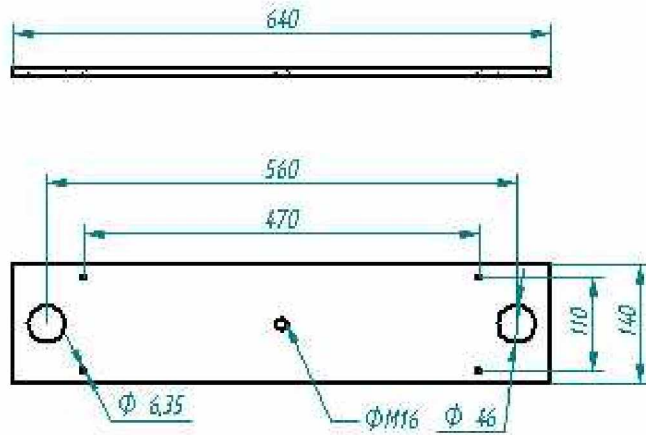
Φ 6.35

16.25

Φ 1/4-20 UNC

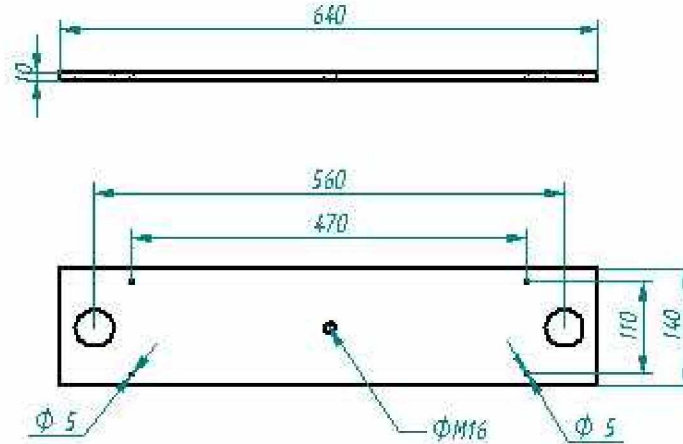
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PARTES SISTEMA DE PRENSADO Y CORTE			
	4.3			
DISEÑADO POR: JUAN CARLOS DELGADO S JAIR O ESPARÁ JURADO	DIBUJO	JEEJ	REVISO	DAGA
	NORMA	DIN	FECHA	19-08-05
	ESCALA	INDICADA	PLANO	3/6

PLACA SOPORTE MAREOS



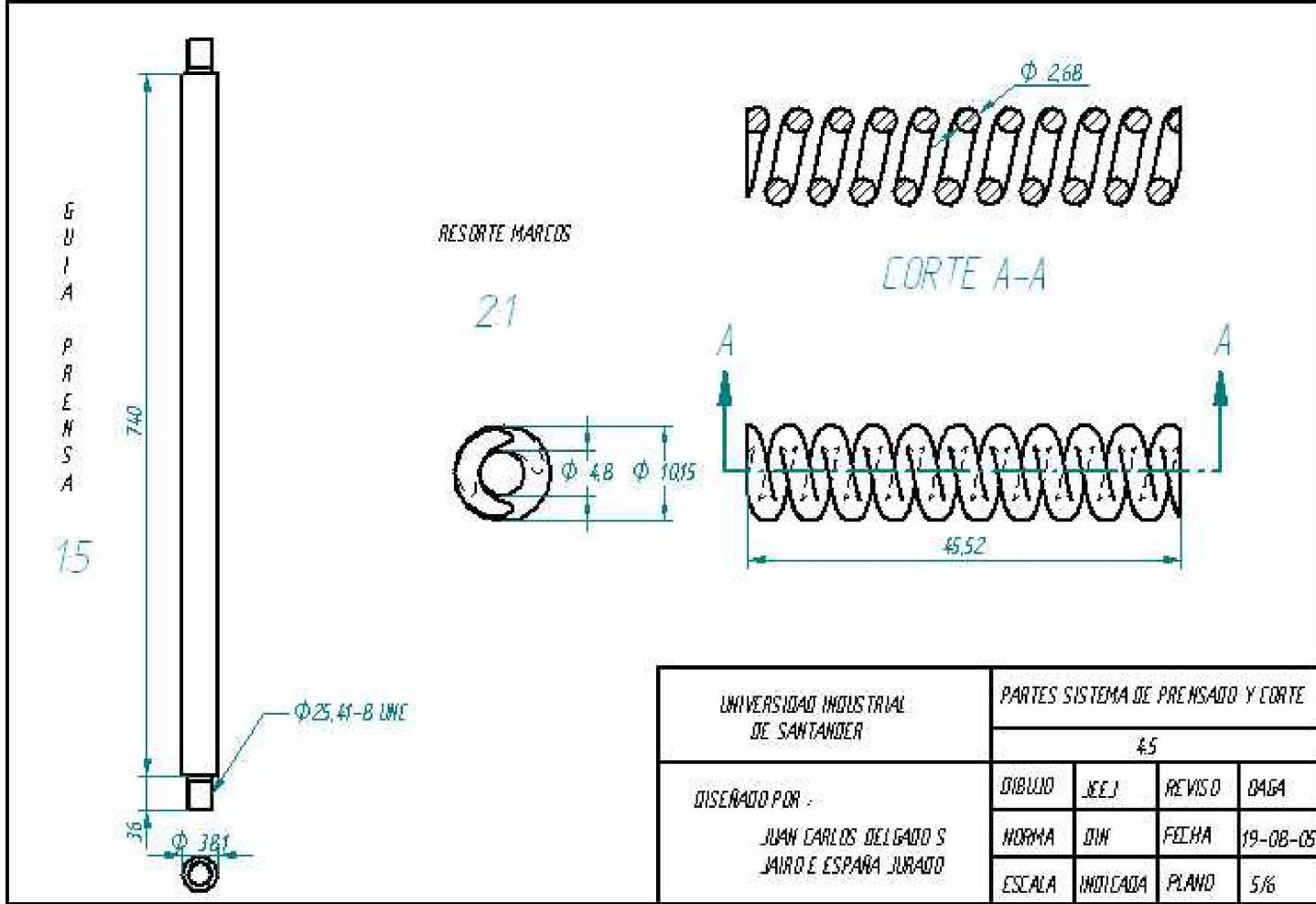
16.25

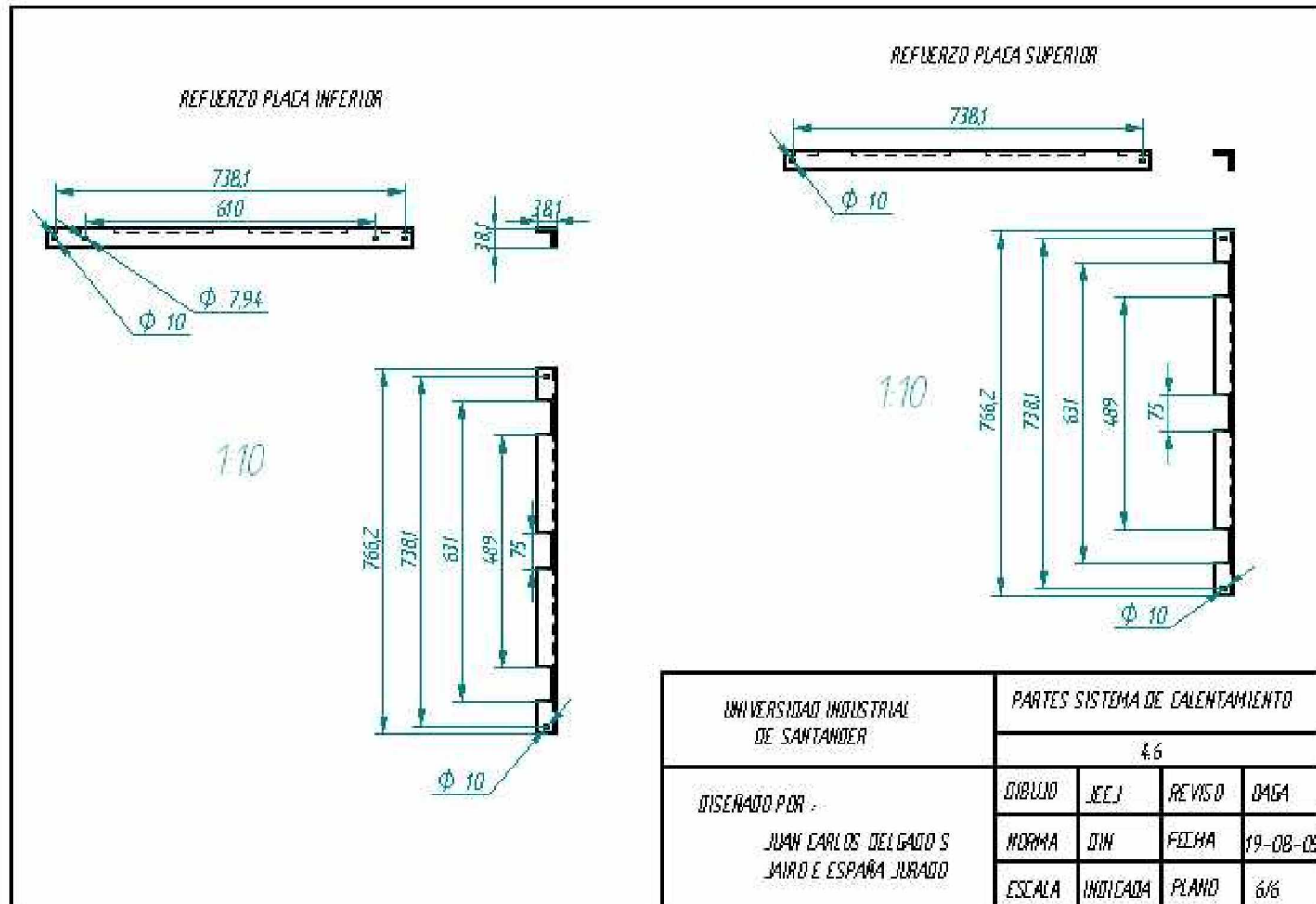
PLACA SOPORTE MESSA

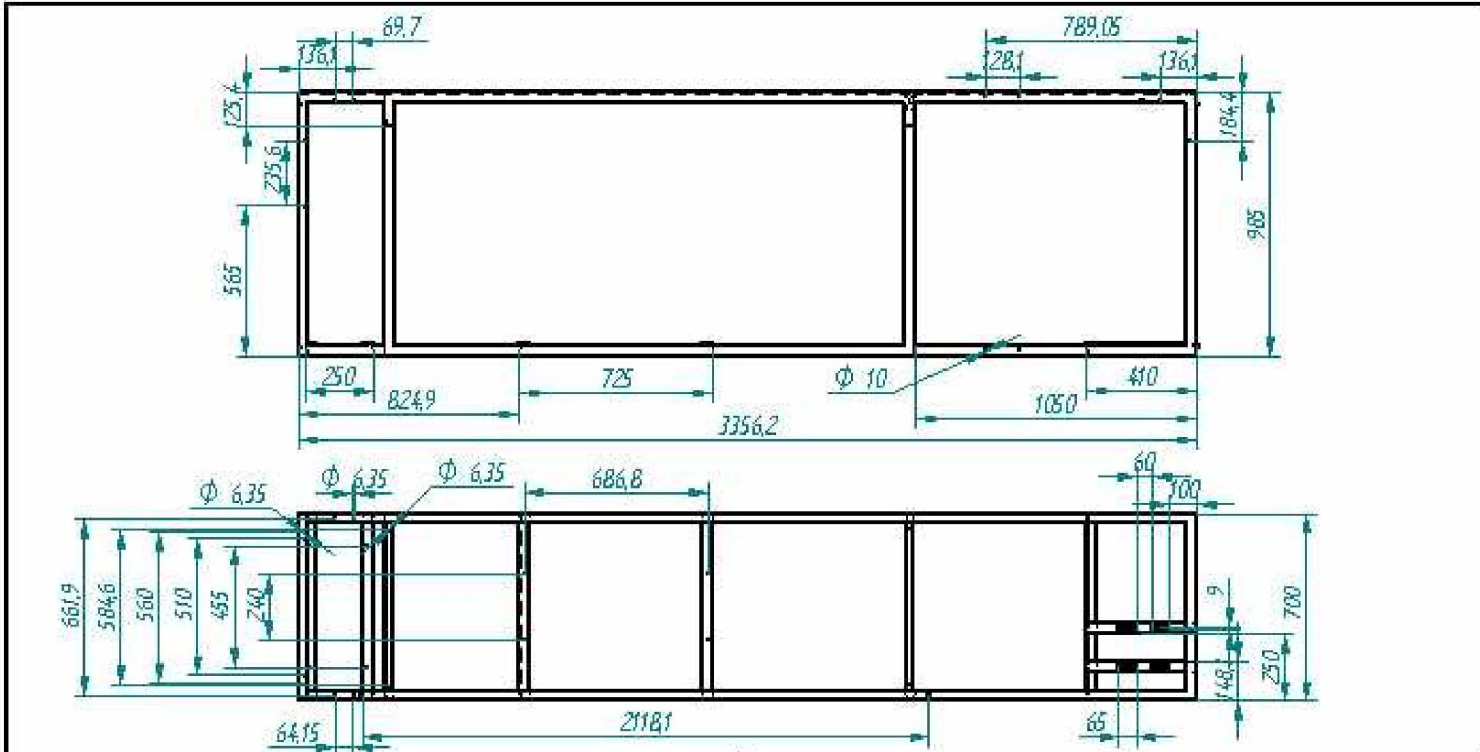


16.25

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PARTES SISTEMA DE Prensado y Corte			
	44			
DISEÑADO POR: JUAN CARLOS DELGADO S JAIRO E ESPAÑA JURADO	DIBUJO	JEEJ	REVISO	DABA
	NORMA	DIH	FECHA	19-08-05
	ESCALA	INDICADA	PLANO	4/6



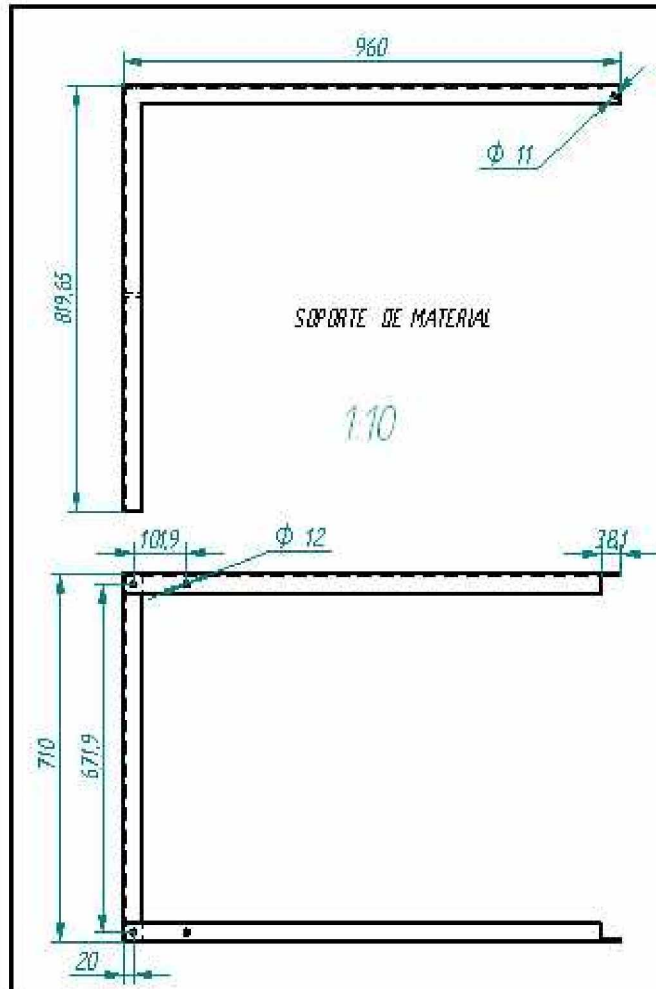




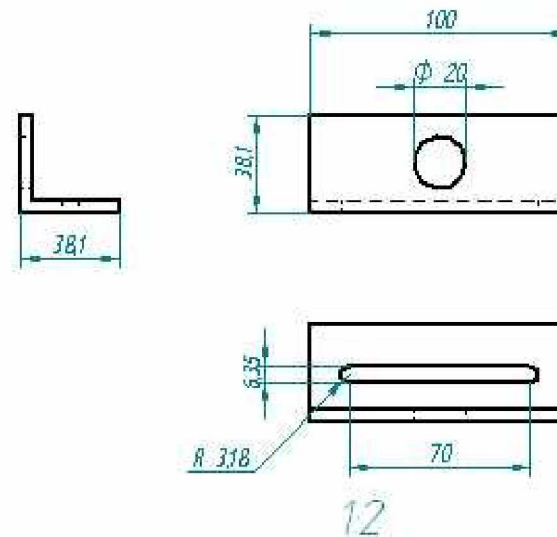
ESTRUCTURA PRINCIPAL

120

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PARTES SISTEMA DE TRANSPORTE			
	5.1			
DISEÑADO POR JUAN CARLOS DELGADO S JAIRO E ESPAÑA JURADO	DIBUJO	JEEJ	REVISO	DAGA
	NORMA	DIN	FECHA	19-08-05
	ESCALA	INDICADA	PLANO	1/6

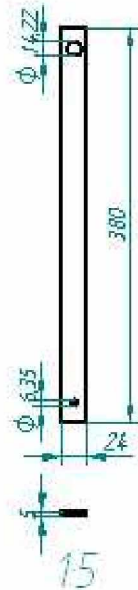


SOPORTE PISADOR DE LAMINA



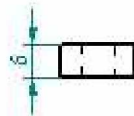
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PARTES SISTEMA DE TRANSPORTE			
	5.2			
DISEÑADO POR: JUAN CARLOS DELGADO S JAIRO E ESPARA JURADO	DIBUJO	JEEJ	REVISO	DATA
	NORMA	DIN	FECHA	19-08-05
	ESCALA	INDICADA	PLANO	2/6

BARRA SOPORTE DEL RODILLO



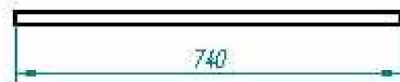
15

BULLE TENSOR DE LAMINA



11

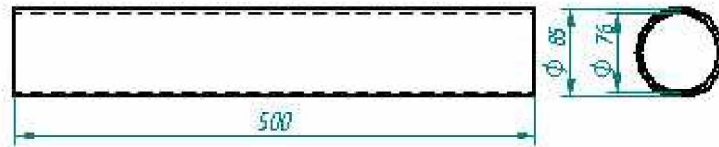
EJE SOPORTE DE LAMINA



110

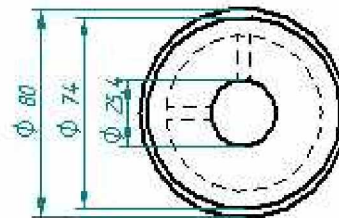


RODILLO CARTON

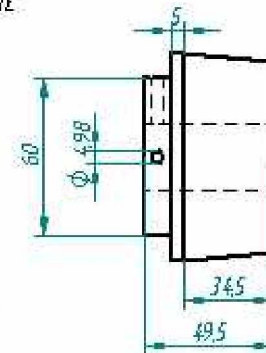


15

CONO SOPORTE



12



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL
DE SANTANDER

PARTES SISTEMA DE TRANSPORTE

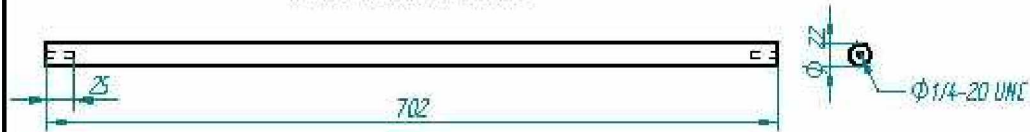
5.3

DISEÑADO POR :

JUAN CARLOS DELGADO S
JAIRO E ESPAÑA JURADO

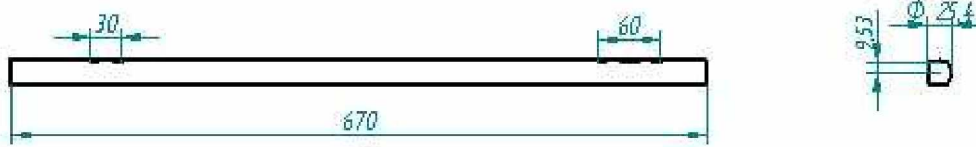
DIBUJO	EEJ	REVISO	DATA
NORMA	DIN	FECHA	19-08-05
ESCALA	INDICADA	PLANO	3/6

RODILLO TENSOR DE LAMINA



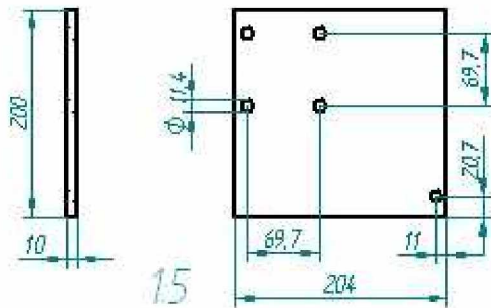
15

EJE CADENA



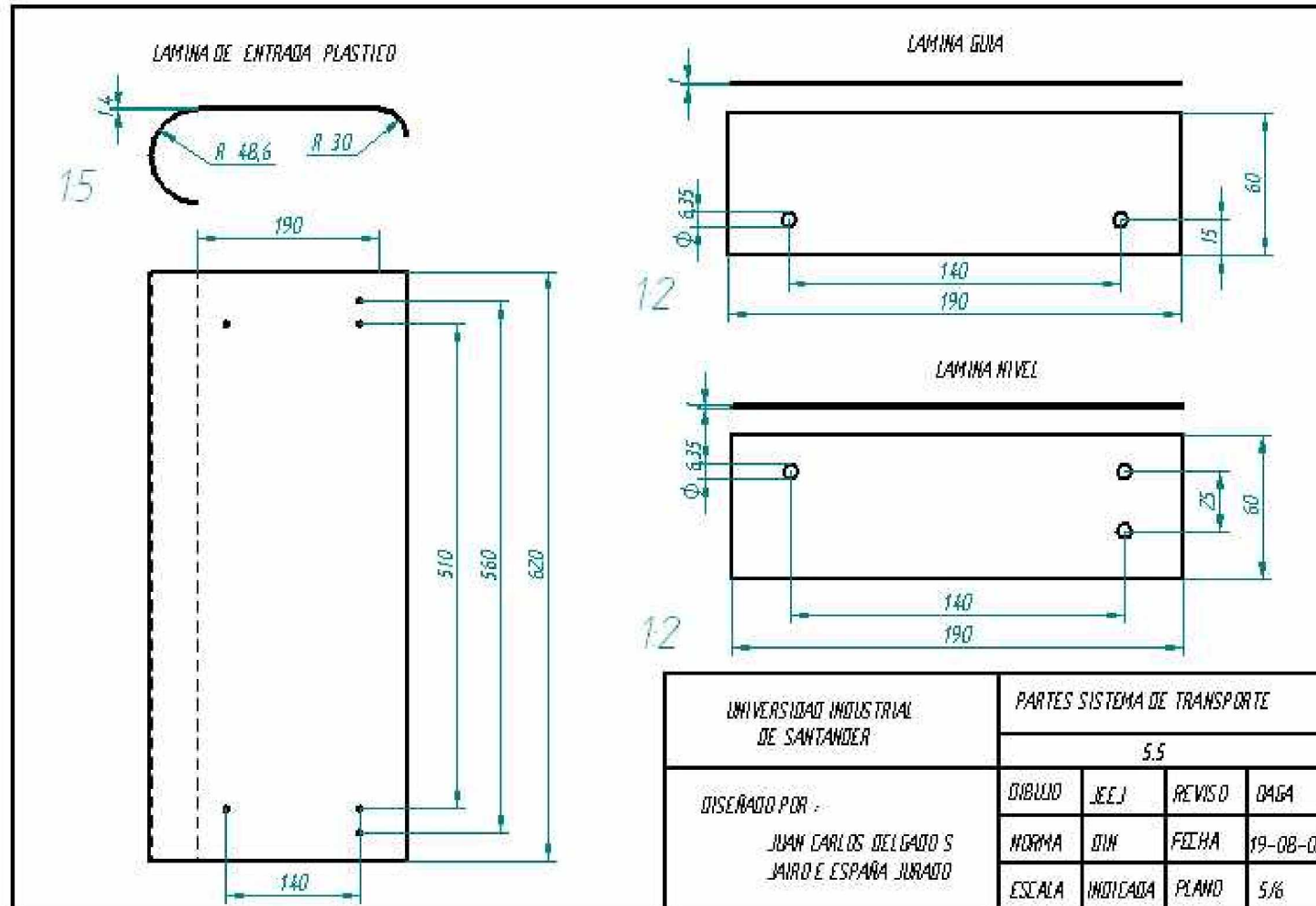
15

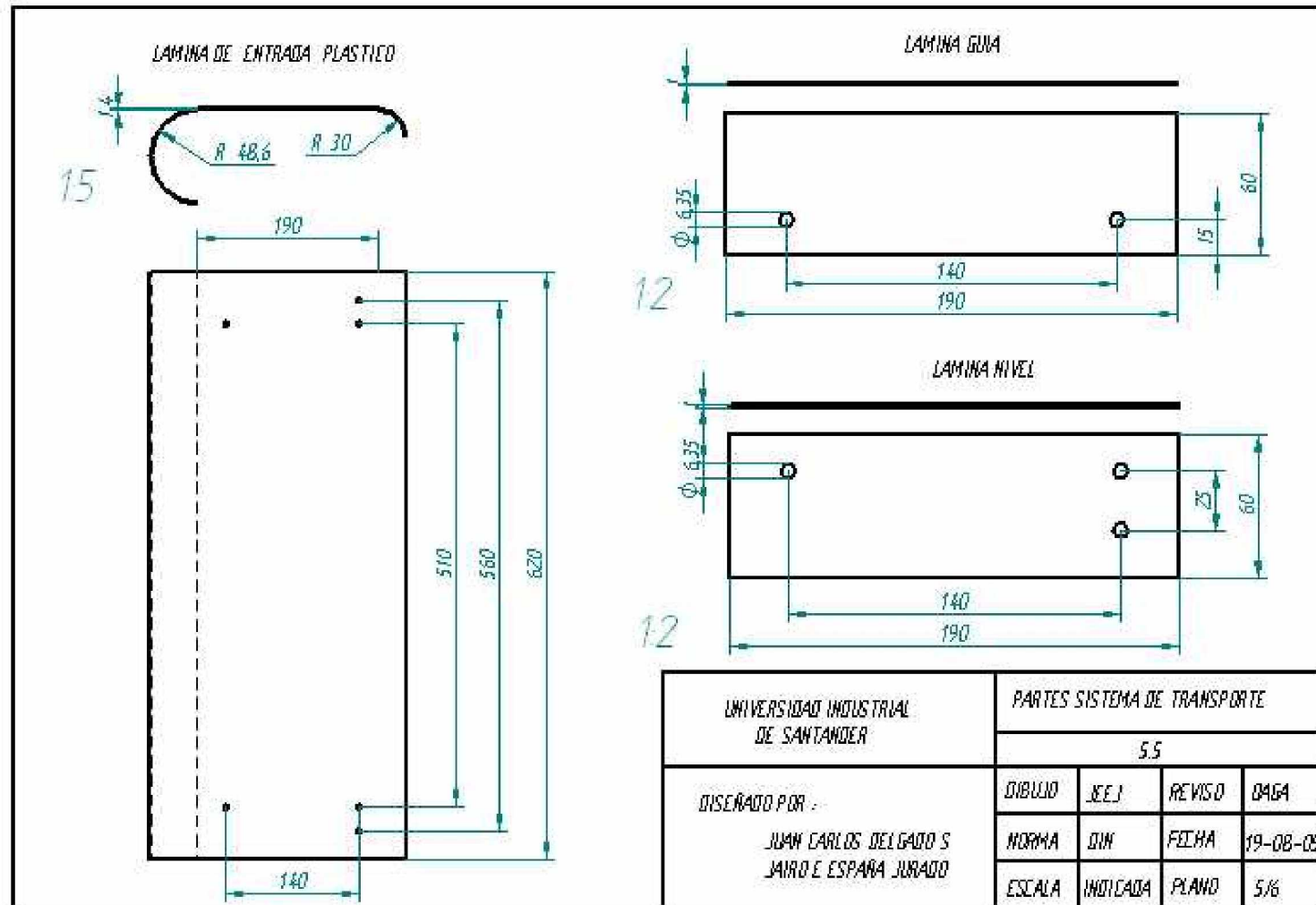
PLACAS CHUMACERAS

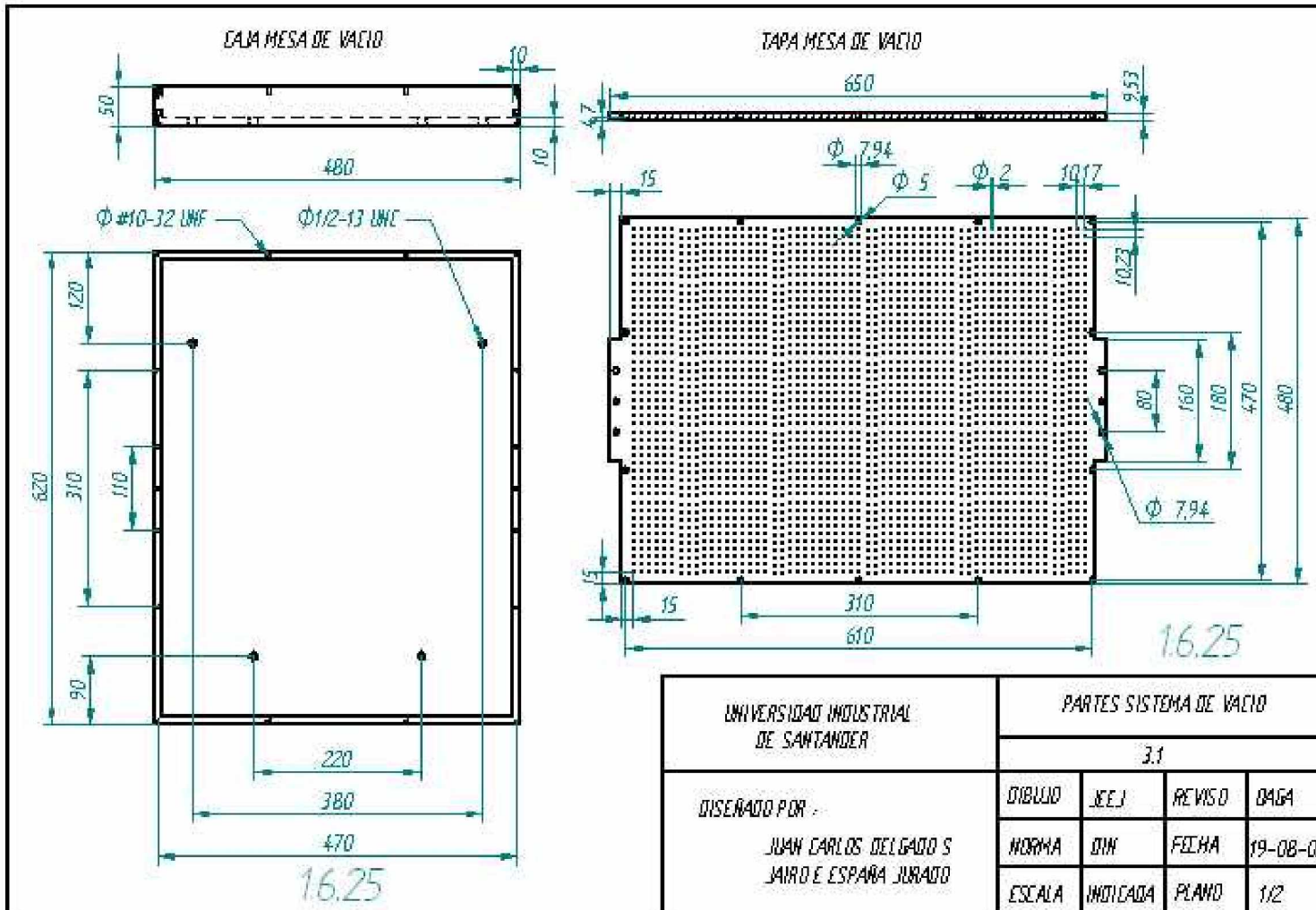


15

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PARTES SISTEMA DE CALENTAMIENTO			
	5.4			
DISEÑADO POR : JUAN CARLOS DELGADO S JAIRO E ESPARÁ JURADO	DIBUJO	JEEJ	REVISO	DAGA
	NORMA	DIN	FECHA	19-08-05
	ESCALA	INDICADA	PLANO	4/6







UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PARTES SISTEMA DE VACIO			
	3.1			
DISEÑADO POR: JUAN CARLOS DELGADO S JAIRO E ESPAÑA JURADO	DIBUJO	JEEJ	REVISO	DAGA
	NORMA	DIN	FECHA	19-08-05
	ESCALA	INDICADA	PLANO	1/2

