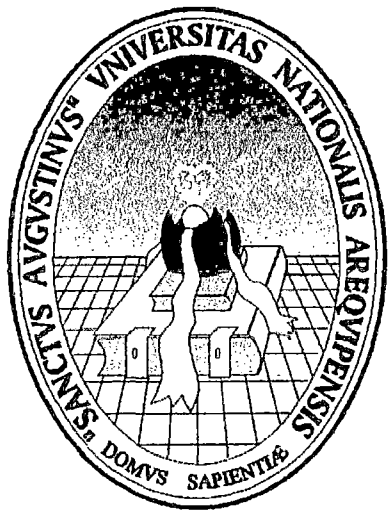
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN

FACULTAD DE INGENIERIA DE PROCESOS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MATERIALES



ESTUDIO DE LA VARIACION DE ESPESOR DE LAMINAS DE PET EN EL PROCESO DE TERMOFORMADO

Tesis Presentada por las Bachilleres:

KAREN MARIEL PAREDES LUQUE
GIOVANNA ROQUE CANAHUIRE

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de Materiales

UNSA - SADI
No. Doc. B2-M-18254
No Ej. 01 Fecha 15/08/21
Firma Registrador

AREQUIPA-PERU
2015

PRESENTACIÓN

Sr. Decano de la Facultad de Ingeniería de Procesos.
Sr. Director de la Escuela Profesional de Ingeniería de Materiales.
Señores Miembros del Jurado

Ponemos a consideración de ustedes el trabajo de tesis intitulado:

"ESTUDIO DE LA VARIACION DE ESPESOR DE LAMINAS DE PET EN EL PROCESO DE TERMOFORMADO"

A fin de que sea evaluado de acuerdo al reglamento de grados y títulos y se nos permita optar el Título Profesional de Ingenieros de Materiales.

AGRADECIMIENTOS

Al creador de todas las cosas, el que nos ha dado la fortaleza para continuar cuando a punto de caer hemos estado; por ello dedicamos primeramente nuestro trabajo a Dios.

De igual forma, dedicamos esta tesis a nuestras madres por ser nuestra amiga y compañera. Gracias por la paciencia, el amor que nos dan. Y por siempre estar cuando más las necesitamos. Sin su apoyo no hubiese sido posible empezar ni terminar nuestro trabajo.

Agradecer hoy y siempre a nuestras familias, porque nos han brindado su apoyo incondicional y por compartir con nosotras buenos y malos momentos. Y porque sabemos que siempre están y estarán para darnos su apoyo.

DEDICATORIA

A nuestras madres...

Por habernos apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que nos ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

RESUMEN

El objetivo principal de este proyecto fue Estudiar la variación del espesor de láminas de PET en el proceso de termoformado.

Tomando como base que el termoformado consiste en ablandar una lámina por medio del calor, para adaptarse a la forme de un molde por acción de succión o vacío. Todas estas variables se evaluaran por medio de inspección visual y medios estadísticos; conllevándonos a analizar cuál es la variable más significativa durante este método de termoformado y así poder obtener un producto optimo y darle uso dado que la industria del plástico está en constante crecimiento para diferentes rubros debido a sus buenas propiedades y bajo costo.

Esta experimentación se realizó en etapas como la recopilación de datos teóricos; con el primer ensayo obtuvimos interrogantes acerca del proceso, material, procedimiento, variantes que no se conocía a fondo y que conllevo a dar respuesta a cada uno de ellos haciendo que nos preguntáramos ¿ cómo podríamos mejorar o que intervenía que obtuviéramos un buen producto ? ¿El que paso, el porqué, el cómo y dónde?

Ante estas interrogantes es que empezó a considerar estas variantes y procedimos a ejecutar ensayos con objetivos concretos a responder como es que la Temperatura, Tiempo y presión pueden hacer cambiar nuestras propiedades del material; al final de esta experimentación se determinó que la Temperaturas la variable más significativa para lograr un buen producto terminado.

Con este proyecto queremos aportar y dar inicio a futuros proyectos sobre el estudio de los parámetros que intervienen en todos los procesos de formado y no tan solo de un polímero sino para tal caso de los diferentes que existen para poder realizar mejoras en sus propiedades , usos y estudios de avanzada tecnología.

En la actualidad contamos con diferentes productos en base a los polímeros y que gracias a los estudios hemos logrado cambiar estilos de vida pero aun continuamos buscando nuevas tendencias para seguir mejorando el confort de las personas y seguir incrementando estudios de mejora.

ABSTRACT

The main objective of this project was to study the variation of the thickness of PET sheet in the thermoforming process.

Based on the thermoforming sheet is soften by heat, to suit the form of a mold by suction or vacuum action. All these variables were evaluated by visual inspection and statistical methods; send us to analyze which is the most significant variable for this method of thermoforming and thereby obtain an optimal product and put it to use since the plastics industry is constantly growing for different items due to their good properties and low cost.

This experiment was carried out in stages as theoretical data collection; with the first test we got questions about the process, material, process, variants was not known in depth and entail to respond to each of them making us wonder how we could improve or intervening us from obtaining a good product? Does happened, why, how and where?

Faced with these questions is that began to consider these variants and proceeded to run tests targeted to respond as the temperature, time and pressure can change our material properties; at the end of this experimentation has determined that the most significant variable temperatures to achieve a good end product.

With this project we want to contribute and begin future projects on the study of the parameters involved in all processes and not just made of a polymer but for this case different world to make improvements to their properties, uses and studies of advanced technology.

Today we have different products based on polymers and thanks to the studies we have succeeded in changing lifestyles but still continue to seek new trends to further improve the comfort of people and further enhance improvement studies.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN
ABSTRACT
CAPITULO I 10
MARCO METODOLOGICO 10
1.1 Introducción 11
1.2 Antecedentes 11
1.3 Planteamiento del Problema 14
1.4 Hipótesis 14
1.5 Justificación 14
1.6 Objetivos 15
CAPITULO II 16
MARCO CONCEPTUAL 16
2. Los Polímeros 17
2.1 Clasificación de los polímeros 17
2.2 Características generales de los plásticos 19
2.3 Propiedades generales de los plásticos 19
2.4 Ventajas de los plásticos 21
2.5 Técnicas de transformación de plásticos 22
2.6 Tipos de plásticos 25
2.7 Termoformado 27
2.8 Variables del proceso de termoformado 40
2.9. Moldes 41
2.10 Material PET 47
CAPITULO III 52
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 52
3.1 EL LABORATORIO 53
3.2 EQUIPOS 54
3.3 MAQUINA DE TERMOFORMADO AUTOMATIZADA 56
3.4 MATERIALES Y EQUIPOS DE MEDICIÓN EMPLEADOS 62
3.5 Micrómetro 62
3.4 LÁMINAS DE PET 62
3.5 PROCEDIMIENTO PARA TERMOFORMAR SISTEMA AUTOMATICO ... 63
3.6 ENSAYOS 66

CAPITULO IV 76
ANÁLISIS DE RESULTADOS 76
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS 77
4.1 Condiciones Iniciales de Experimentación 77
4.2 Espesor de la lámina de PET 78
4.3 Medición de espesor de la lámina termoformada 80
4.4 Variación del espesor función del tiempo de calentamiento de la lámina .. 80
4.5 VARIACIÓN DEL ESPESOR EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA 85
4.6 PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE LA LÁMINA DESPUÉS DE SER TERMOFORMADA 87
4.7 VARIACIÓN ESPESOR MODELO BETUN 88
4.8 VARIACIÓN ESPESOR MODELO VASO ALTO 89
4.9 VARIACIÓN ESPESOR MODELO FUENTE 91
5. CONCLUSIONES 93
6. RECOMENDACIONES 94
7. BIBLIOGRAFIA 95

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. N° 1 17
Fig. N° 2 18
Fig. N° 3 18
Fig. N° 4 20
Fig. N° 5 21
Fig. N° 6 22
Fig. N° 7 23
Fig. N° 8 23
Fig. N° 9 24
Fig. N° 10 24
Fig. N° 11 25
Fig. N° 12 28
Fig. N° 13 32
Fig. N° 14 32
Fig. N° 15 33
Fig. N° 16 33
Fig. N° 17 33
Fig. N° 18 34
Fig. N° 19 35
Fig. N° 20 37
Fig. N° 21 44
Fig. N° 22 44
Fig. N° 23 45
Fig. N° 24 46
Fig. N° 25 46
Fig. N° 26 51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 19
Tabla N° 2 21
Tabla N° 3 27
Tabla N° 4 39
Tabla N° 5 40
Tabla N° 6 48
Tabla N° 7 49

CAPITULO I

MARCO METODOLOGICO

1.1 Introducción

En la actualidad es difícil imaginar que algún sector, productivo o económico, pueda prescindir de los plásticos. Basta una simple visualización a nuestro alrededor para verificar la importancia que tienen estos materiales en nuestro diario vivir. La producción de plásticos continuará creciendo, abarcando distintos sectores, debido principalmente a sus propiedades y a su relación costo-beneficio. Ellos presentan gran variedad de propiedades, algunas de las cuales no son posibles de obtener en otros materiales.

1.2 Antecedentes

El termoformado es una técnica muy antigua. Los egipcios observaron que se podían calentar caparazones de tortugas para moldear recipientes y figuras. Cuando se empezó a disponer de polímeros sintéticos, el termoformado fue una de sus primeras aplicaciones. Hoy en día existen diversos tipos de artículos elaborados por medio de esta técnica por ejemplo: señales, accesorios de lámparas, porta-herramientas, vajillas, juguetes, paneles de refrigeradores, etc.

En los últimos años se han realizado algunas publicaciones acerca del estudio de la influencia de las variables del proceso de termoformado sobre la distribución de espesores en el producto final, así como también sobre la importancia del uso de las técnicas estadísticas como el diseño de experimentos, que otorgan posibilidades de optimización del proceso, disminuyendo el número de experimentos a realizar.

La forma tradicional que se utilizaba en la experimentación para el estudio de estos problemas se basaba en analizar los factores uno a uno, es decir, variar los niveles de un factor manteniendo fijos los demás.

Esta metodología presenta grandes inconvenientes:

- Es necesario un gran número de pruebas.
- Las conclusiones obtenidas en el estudio de cada factor tiene un campo de validez muy restringido.

- No es posible estudiar la existencia de interacción entre los factores.
- Es inviable, en muchos casos, por problemas de tiempo o costo.

En tal sentido, Harron y colaboradores (Libro de Memorias de Antec I) investigaron la importancia de ciertas variables utilizando el método de pistón asistido para el proceso de termoformado de envases, tales como: índice de fluidez, temperatura de la lámina, geometría, temperatura y forma del pistón, profundidad de penetración de la lámina y tiempo de presión de vacío. Estas pruebas experimentales fueron ejecutadas para láminas de diferentes polipropilenos (PP) de igual espesor. Debido al gran número de variables que tomaron en cuenta, realizaron el estudio de optimización del proceso mediante la técnica de DOE. Por medio de este estudio se pudo demostrar el efecto que tiene el pistón en la distribución y uniformidad de espesores en la pared de los envases termoformados, bien sea en su forma, temperatura, profundidad y tiempo de pistón avanzado. Además, encontraron que la resistencia a la compresión distribución de espesores en la pared y que la fuerza que ejerce el pistón sobre la lámina influenciada por la temperatura de la lámina.

Entre otros estudios se encuentra el realizado por Harron y colaboradores (Libro de Memorias de Antec II), los cuales estudian la optimización del proceso de termoformado para láminas de PP de 1,45 mm (± 0,05mm) de espesor, mediante la implantación de la técnica de DOE. Las variables estudiadas fueron: velocidad de la línea, temperatura de la lámina, material, temperatura, tiempo y forma del molde y presión de vacío del pistón resultado que la distribución de espesores es controlada por cuatro factores los cuales son: temperatura de lámina, profundidad, forma y tiempo de pistón en posición. El esfuerzo a la compresión distribución de espesores en la pared de los vasos y es controlado por los mismos factores. La fuerza que ejerce el pistón sobre la lámina directamente relacionada a la temperatura de la lámina y por último, que la contracción de los vasos es controlada por la temperatura del agua utilizada como agente refrigerante, obteniéndose menor contracción a menor temperatura del agua.

Posteriormente, Hegemann
variables que afectan el proceso de termoformado de láminas de PEAD, por medio del método de prueba IKP, el cual consiste en realizar una serie de pruebas por medio de una maquina -
permite determinar curvas de fuerza - deformación para los polímeros utilizados en el proceso de termoformado. Con este método se encontró que la temperatura del pistón y de la lámina tiene un efecto significativo en la fuerza- de formación de la lámina, además de que el PEAD es un material muy difícil de termoformar y en consecuencia, las variaciones de material del pistón no pueden ser estudiadas.

Entre otras investigaciones se encuentra el realizado por Novotny y Saha (Libro de Memorias de Antec IV),' quienes realizaron un estudio de las diversas vías para optimizar el proceso de termoformado, usando un programa de computación que simulara el proceso, evitando así las pérdidas de tiempo, material y dinero. Se examinaron diferentes métodos de optimización usando diferentes materiales, temperaturas y espesores de la lámina, perfiles y parámetros de proceso. Llevaron a cabo la simulación del proceso por medio del programa T- SIM®, obteniendo como resultado que la mayor influencia en la distribución posición final del pistón. Destacaron que si la máquina de termoformado usada en un proceso real ofrece la posibilidad de fijar la posición final del asistente, esta es probablemente la manera más fácil de optimizar el espesor. En cuanto a la optimización del material encontraron que la mejor distribución de espesores se consigue con materiales que se endurecen por deformación.

Encontramos también en las investigaciones por R. Morales y M. Candal que su investigación principal fue estudiar la influencia de los parámetros de procesamiento sobre las propiedades finales de piezas termoformadas. Para ello se empleó un Diseño de Experimentos (DOE) tipo factorial fraccionado (2^{4-1}). Las variables de proceso estudiadas fueron: temperatura de la lámina, presión de vacío, tiempos de ciclo y de retardo. Los resultados experimentales

mostraron que el tiempo de retardo es el parámetro más importante para obtener buena calidad en las piezas termoformadas.

1.3 Planteamiento del Problema

¿De qué manera las variables del proceso de termoformado afectan la variación del espesor de pared de las láminas de PET termoformadas?

En la industria del termoformado sobretodo en la pequeña y microempresa muchas veces se recurre al ensayo de prueba y error para lograr establecer las condiciones más óptimas para lograr el espesor necesario del producto ocasionando pérdida de tiempo y de material hasta lograr las características adecuadas de la pieza termoformar.

El hecho de establecer las relaciones adecuadas entre las distintas variables del proceso de termoformado y la variación de espesor ayudara a comprender mejor como se afecta esta característica en función de la manipulación de las distintas variables y así disminuir el tiempo y material empleado en el establecimiento de las condiciones adecuadas para lograr las características finales de una determinada pieza a termoformar

1.4 Hipótesis

Se espera que la variación del espesor de la lámina de PET sea la variable más importante del proceso ya que si esta no es adecuadamente controlada el producto final puede sufrir cambios que afecten el proceso de termoformado.

1.5 Justificación

En la actualidad los estudios de investigación en el proceso de termoformado son muy limitados y más aún las herramientas que se emplean para ello.

Algunos trabajos al respecto solo se los encuentra en idioma ingles y son muy escasos.

El PET es uno de los materiales más comúnmente utilizados para fabricar productos termoformados entonces se hace necesario un estudio que relacione las diferentes variables del proceso de termoformado con la variación del espesor de la lámina termoformada como producto final.

Dichas relaciones son importantes estudiarlas y conocerlas ya que el conocimiento de las mismas, aportaran a un mejor entendimiento del proceso de termoformado en relación a lograr el espesor de pared adecuado que cumpla con las especificaciones de diseño y satisfaga las necesidades del producto.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Estudiar la variación del espesor de láminas de PET en el proceso de termoformado

1.6.2 Objetivos Específicos

- Determinar las variables que más influyen en la variación del espesor de la lámina.
- Aplicar un diseño experimental adecuado para establecer una ecuación de predicción para los espesores en función de las variables del proceso
- Determinar los porcentajes de reducción en espesor de la lámina después de ser termoformada.

CAPITULO II

MARCO CONCEPTUAL

2. Los Polímeros

Es una sustancia formada por muchas unidades iguales, esta unión repetitiva son denominadas unidades monoméricas, formando cadenas largas y flexible que en la gran mayoría de casos es una hilera de átomos de carbono.

Las propiedades de los polímeros dependen de múltiples factores:

- Naturaleza monomérica
- Peso molecular
- Aspectos estructurales
- Cristalinidad

2.1 Clasificación de los polímeros

- **Termoplásticos**

Son polímeros lineales, que pueden estar ramificados o no; son solubles en algunos disolventes orgánicos, son capaces de fundirse por acción del calor por lo tanto son reciclables. Tienen buenas propiedades mecánicas, son fáciles de procesar y bastantes económicos.

Si los comparamos con los demás tipos de plásticos, los termoplásticos se fabrican y emplean en cantidades muy grandes y los de uso más frecuente son: PE, PP, PS y PVC.

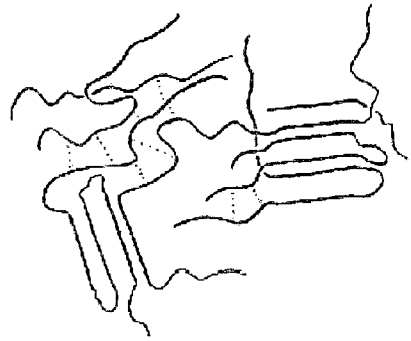


Fig. N° 1

- **Termoestables**

Son polímeros tridimensionales que adquieren un estado final reticulado, son insolubles e incapaces de fundirse, esto hace que sean más fuertes, más

rígidos y capaces de aguantar temperaturas más altas que los termoplásticos, sin embargo tienden a ser más frágiles.

Son materiales que presentan muy buenas propiedades a elevadas temperaturas, junto con su alta resistencia térmica, química, rigidez dureza superficial; los de uso más frecuente son el poliuretano y las resinas epóxica y fenólicas.

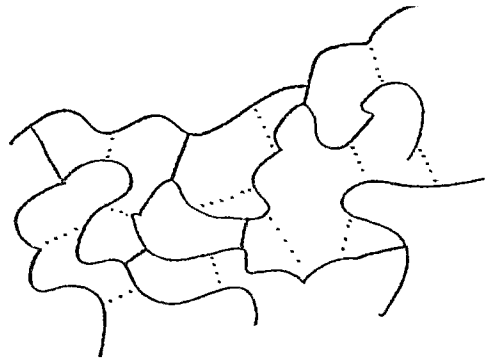


Fig. N° 2

- **Elastómeros**

También denominados cauchos, son polímeros con cadena lineales pero que tienen muchos enlaces entrecruzados, son capaces de soportar deformaciones muy grandes recuperando su forma inicial.

Son materiales muy tenaces, resistentes a aceites, grasos y al ozono, presentan buena flexibilidad a bajas temperaturas, la desventaja es que requieren procesos muy lentos lo que consume grandes cantidades de tiempo y energía y tampoco son reciclables. Ejemplo tenemos el ABS, PC – ABS, caucho natural, polibutadieno, estireno SBR.

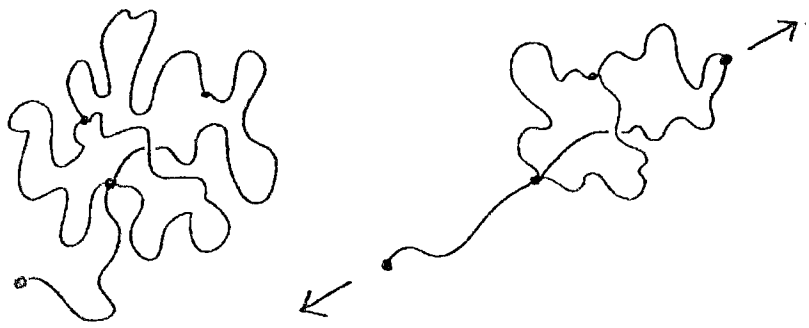


Fig. N° 3

2.2 Características generales de los plásticos

Cuando a un material polimérico se le incorporan ciertas sustancias denominadas aditivos con el fin de modificar sus propiedades, facilitar su transformación y mejorar su resistencia. El producto obtenido se denomina PLASTICO en la tabla N°1 detallamos sus características.

Densidad	Baja
Precio	Bajo
Procesamiento	Fácil
Corrosión	Resistentes
Consumo de energía	Bajo
Flexibilidad	Alta y Baja
Transparencia	Alta y Baja
Conducción de electricidad	Aislante

Tabla N° 1

2.3 Propiedades generales de los plásticos

En los polímeros, más que en otro tipo de materiales, la temperatura y el tiempo presentan un papel fundamental que influyen de manera notable en sus propiedades mecánicas.

Sus propiedades mecánicas difieren mucho de unas familias a otras y además están enormemente influenciadas por:

- Condiciones de ejecución de los ensayos:
- Velocidad de aplicación de la carga (velocidad de deformación)
- Temperatura
- Magnitud de la deformación impuesta
- Naturaleza química del medio (presencia de agua, oxígeno, disolventes orgánicos, etc.).

Las propiedades también dependen de la temperatura; el efecto de la temperatura sobre la rigidez de los polímeros tiene mayor importancia en el

diseño y uso de los polímeros para aplicaciones de ingeniería (sometidos a cargas más o menos importantes).

El comportamiento de los termoplásticos depende de la disposición de las cadenas moleculares y, en particular, si es cristalino (ordenado) o amorfo (aleatorio).

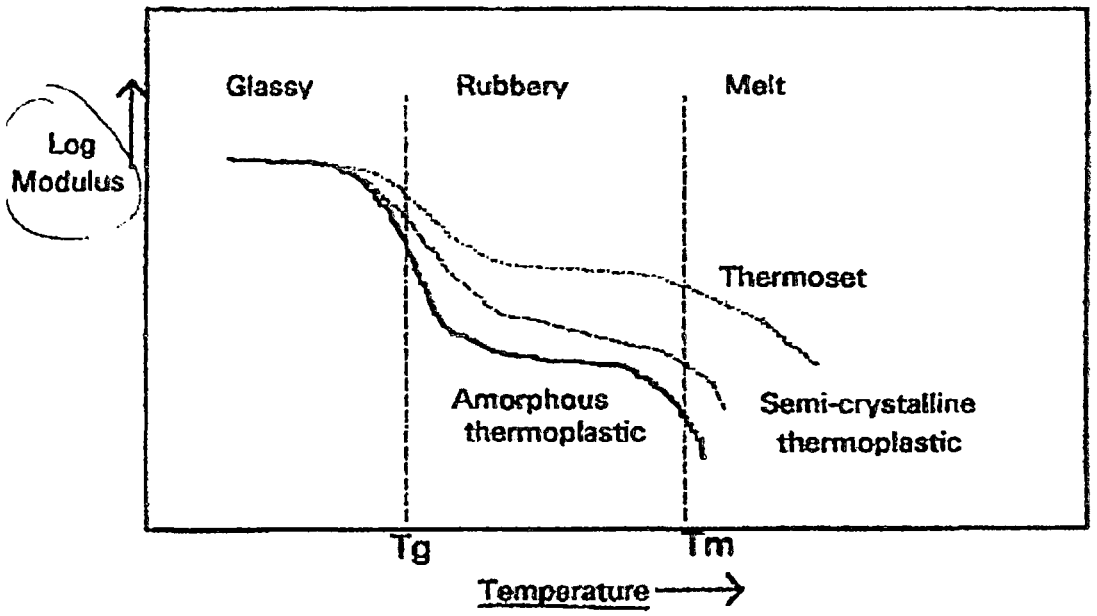


Fig. N° 4

La elasticidad según la ley de Hook afirma que el esfuerzo aplicado es proporcional a la deformación resultante, pero es independiente de la velocidad de deformación.

La deformación elástica es independiente del tiempo, o sea: una tensión aplicada producía una deformación elástica instantánea que permanecía constante durante el tiempo que se mantenía aplicada la carga también se ha supuesto que al retirar la carga, la deformación se recuperaba totalmente, de forma instantánea.

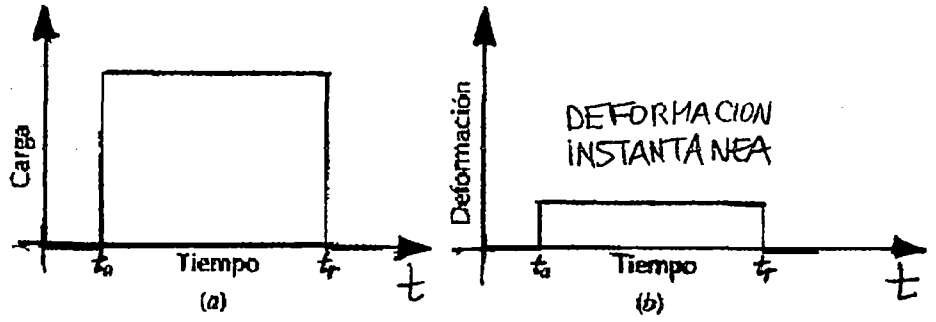


Fig. N° 5

La anelasticidad es el comportamiento elástico dependiente del tiempo y es causado por la dependencia del tiempo de los mecanismos microscópicos que tienen lugar cuando el material se deforma. La carga aplicada origina el estirado de las cadenas del polímero apartándolas de sus conformaciones más Estables.

El flujo viscoso es una deformación no reversible o permanente. La componente viscosa es dominante en los líquidos, y por tanto sus propiedades pueden describirse mediante la ley de newton, que establece que el esfuerzo aplicado es proporcional a la velocidad de deformación pero es independiente del alargamiento

Densidad	800/1000 kg/m3
Modulo elástico	1 – 4 GPa
Resistencia	7 – 100 MPa
Temperatura de distorsión	50 – 150 ° C
Temperatura de fusión	< 350 ° C
Expansión térmica	30 – 200 x 10 ^-6 K^-1
Conductividad térmica	0.1 – 0.4 W/m.K

Tabla N° 2

2.4 Ventajas de los plásticos

- Fácil procesado
- Elevada ductilidad
- Productos ligeros

- Aislantes térmicos
- Aislantes eléctricos
- Elevada Resistencia a la corrosión

2.5 Técnicas de transformación de plásticos

2.5.1 Extrusión

Se utiliza ampliamente en la industria del plástico para la producción en continuo de piezas en materiales termoplásticos y en algunos termoestables.
Consiste que el termoplástico se carga en una tolva desde la cual se alimenta al cilindro, donde el husillo se encarga de introducirlo, transportándolo hacia adelante y comprimirlo de esta manera el plástico se funde y sale del cilindro a través de una boquilla que recibe la forma de ésta, el resultado final es un perfil o también denominado preforma.

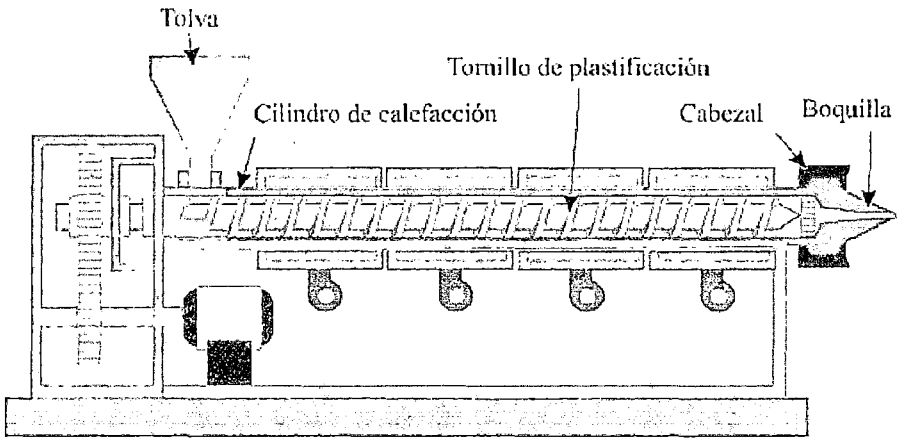


Fig. N° 6

2.5.2 Moldeo por Inyección

Consiste básicamente en fundir un material plástico en condiciones adecuadas e introducirlo a presión en las cavidades de un molde donde se enfría a una temperatura apta para que las piezas puedan ser extraídas sin deformarse.
El material entra en forma de gránulos al cilindro de calefacción a través de una tolva de alimentación situada en la parte posterior del cilindro, una vez fundido el material sale por la boquilla de inyección hacia el molde que en ese momento debe encontrarse cerrado. El molde se mantiene cerrado todo el

tiempo suficiente, para que el material se enfrié a una temperatura tal que la pieza pueda ser extraída sin que sufra deformaciones.

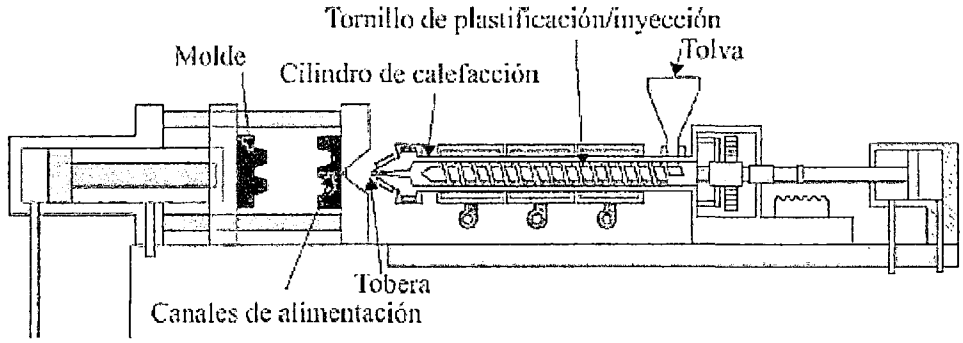


Fig. N° 7

2.5.3 Moldeo por soplado

Mediante este proceso se puede fabricar cuerpos huecos como depositos de combustible, bidones, depositos de aceite de calefaccion y botellas. El proceso consite basicamente en insuflar aire en una preforma tubular que se encuentra en el interior del molde, se emplea en materiales termoplasticos

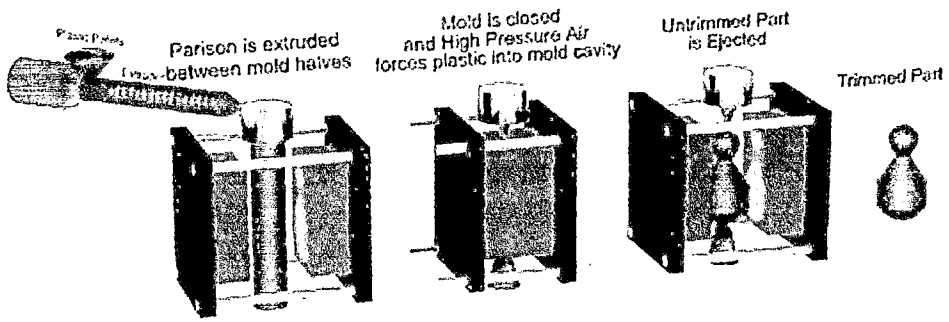


Fig. N° 8

2.5.4 Moldeo Rotacional

Es un método para transformar plásticos, que generalmente se encuentran en polvo o en forma de pasta liquida, se pueden emplear indistintamente para materiales termoplásticos y termoestables.

Una cantidad de plástico frio, se introduce en una mitad del molde también frio, el molde se cierra y se hace rotar biaxialmente en el interior del horno. Como la superficie metálica del molde se calienta el plástico que se encuentra en el interior comienza a pegarse por las paredes del molde, luego pasa a la etapa

de enfriamiento mientras continua la rotación una vez solidificado el plástico se abre el molde y se extrae la pieza.

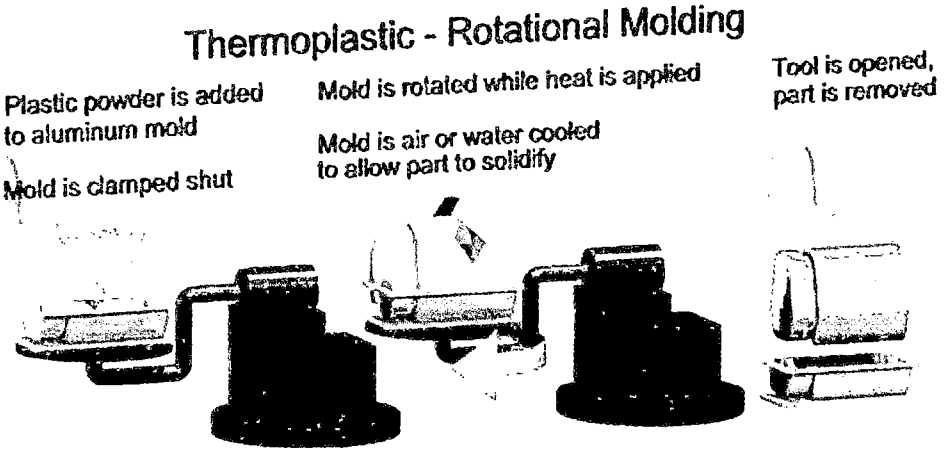


Fig. N° 9

2.5.5 Moldeo por compresión y transferencia

Se aplica generalmente para moldear materiales termoestables, el ciclo comienza con la apertura del molde, una vez que este limpio dicho molde se coloca en el las inserciones metálicas si las hubiera y se introduce el material de moldeo bien en forma de polvo o pastilla, se cierra el molde caliente se aplica toda la presion y se mantiene el tiempo necesario hasta que el material haya curado totalmente.

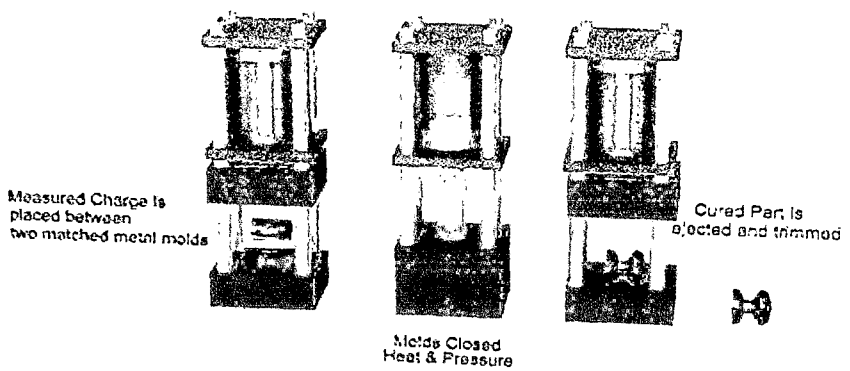


Fig. N° 10

2.5.6 Termoformado

Es un proceso de moldeo de preformas termoplasticas que generalmente se encuentran en forma de lamina o plancha.

El material se calienta mediante radiacion, conveccion o conduccion; se tensa encima de un bastidor y, por medio de aire a presion o vacio, se estampa o se presiona sobre las paredes de un molde frio.

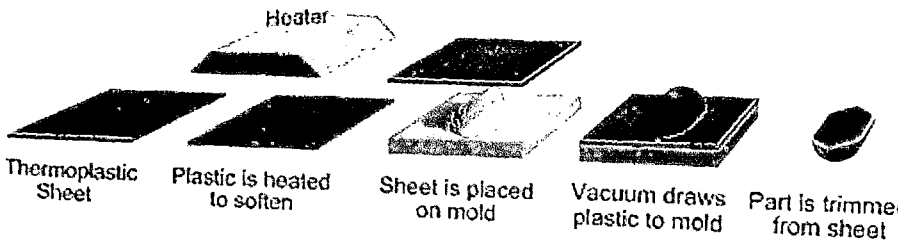


Fig. N° 11

2.6 Tipos de plásticos

- *Polietileno (PE).*

El polietileno de alta densidad (PEAD) es un termoplástico fabricado a partir del etileno (elaborado a partir del etano, uno de los componentes del gas natural). Es muy versátil y se lo puede transformar de diversas formas: Inyección, Soplado, Extrusión, o Rotomoldeo.

El polietileno de baja densidad (PEBD) se produce a partir del gas natural. Al igual que el (PEAD) es de gran versatilidad y se procesa de diversas formas: Inyección, Soplado, Extrusión y Rotomoldeo.

Su transparencia, flexibilidad, tenacidad y economía hacen que esté presente en una diversidad de envases, sólo o en conjunto con otros materiales y en variadas aplicaciones.

- *Polipropileno (PP).*

El PP es un termoplástico que se obtiene por polimerización del propileno. Los copolímeros se forman agregando etileno durante el proceso. El PP es un plástico rígido de alta cristalinidad y elevado punto de fusión, excelente resistencia química y de más baja densidad. Al adicionarle distintas cargas (talco, caucho, fibra de vidrio, etc.), se potencian sus propiedades hasta transformarlo en un polímero de ingeniería.

(El PP es transformado en la industria por los procesos de inyección, Soplado y extrusión/termoformado).

		blanco o coloreado	bidones, envases de detergente
	Policloruro de vinilo	Plástico duro y rígido	Tuberías, cables, válvulas, losetas de piso, techos de vinilo para automóviles, cortinas de ducha, juguetes.
	Polietileno de baja densidad	Plástico suave y flexible	Tapas de contenedores, papeleras, envases de películas finas, pañales, láminas.
	Polipropileno	Plástico duro pero flexible, muchos usos	Tapas, etiquetas, baterías, tanques, fibras para alfombras, cuerdas, empaques.
	Poliestireno	Rígido, quebradizo; otro tipo es el espumado que es liviano y absorbe energía	Empaques, espuma aislantes, vasos y cubiertos descartables, paneles de iluminación, componentes de aparatos, etc.
	Incluye a todos los otros plásticos, incluidos acrílico y nylon. No pueden ser reciclados.		

Tabla N° 3

2.7 Termoformado

El termo conformado o termoformado es un proceso que consiste en calentar una plancha o lámina termoplástica por medio de calor (120 °C a 180 °C), de

- *Poliestireno (PS).*

PS Cristal: Es un polímero de estireno monómero (derivado del petróleo) cristalino y de alto brillo.

PS Alto Impacto: Es un polímero de estireno monómero con oclusiones de Polibutadieno que le confiere alta resistencia al impacto. Ambos PS son fácilmente moldeables a través de procesos de: Inyección, Extrusión/Termoformado, Soplado.

- *Cloruro de Polivinilo (PVC).*

Se produce a partir de dos materias primas naturales: gas 43% y sal común 57%, para su procesado es necesario fabricar compuestos con aditivos especiales, que permiten obtener productos de variadas propiedades para un gran número de aplicaciones. Se obtienen productos rígidos o totalmente flexibles (Inyección -Extrusión -Soplado).

- *Nylon.*

Es un material duro de alta resistencia a la tracción, al desgaste y al ataque químico se lo puede utilizar como hilo, tejidos en cepillo y el nylon solido se lo emplea para engranajes y tornillos.

- *PET.*

Se produce a partir del Ácido Tereftálico y Etilenglicol, por poli condensación; existiendo dos tipos: grado textil y grado botella. Para el grado botella se lo debe post condensar, existiendo diversos colores para estos usos.

Código de identificación	Nombre del plástico	Descripción	Aplicaciones y usos
	Polietileno (polietileno tereftalato)	Resistente y claro, puede usarse fibra	Botellas, películas para empaques, aislamiento de conductores, elementos caseros
	Polietileno de Alta Densidad	Plástico muy común generalmente	Botellas de leche y crema, botellas de shampoo, bolsas,

forma que al reblandecerse puede adaptarse a la forma de un molde por acción de presión vacío (600 a 760 mm Hg) o mediante un contra molde o matriz (madera, resina o aluminio).

En esta técnica de conformado de los materiales termoplásticos se parte de materiales semielaborados (preforma) en forma de filmes o laminas que se reblandecen por efecto del calor y se adaptan contra un molde mediante presión de aire, vacío o mediante un contra molde. Es el procedimiento más generalmente adoptado para la fabricación de piezas moldeadas de gran superficie, de paredes delgadas y en series que no necesariamente deben ser muy grandes.

En el termoformado, se calienta una preforma que, por lo común, es una lámina de polímero obtenida por extrusión o por calandrado, hasta que se reblandece y, luego, se deforma mediante una fuerza que se aplica al molde, donde se enfría. Esta es otra técnica de conformado donde el comportamiento que predomina es de tracción o de alargamiento.

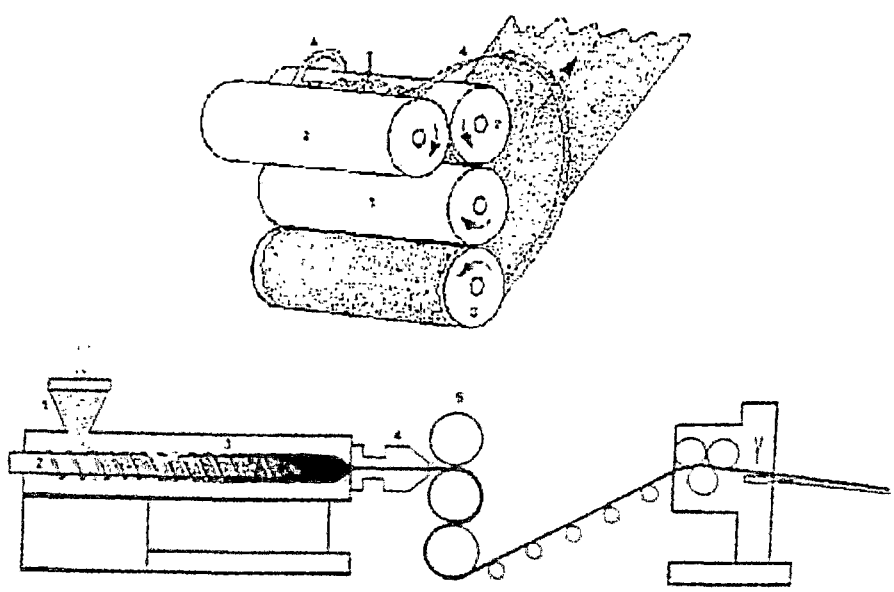


Fig. N° 12

El estirado que experimenta el material durante su deformación va a conducir a una disminución y a una heterogeneidad del espesor del producto acabado. La

búsqueda de una repartición ideal de los espesores es el origen de las diferentes variantes del ciclo de termoformado.

En el proceso de termoformado, uno de los criterios usados para evaluar la calidad de las piezas moldeadas es la uniformidad del espesor de las paredes de la estructura formada. En este proceso sólo uno de los lados de la lámina de plástico entra en contacto con la superficie del molde copiando así el contorno del mismo. Ésta es una particularidad que marca diferencias con el moldeo por inyección, en el cual el material copia la superficie del molde por todos lados. Este hecho hace que a través del proceso de termoformado se tienda a la no uniformidad de distribución de espesores en los artículos moldeados.

El proceso de termoformado se lleva a cabo a temperaturas y presiones relativamente bajas. Como consecuencia de esto, los costos de producción resultan comparativamente menores a los correspondientes a otros procesos de transformación de materiales plásticos. A su vez, los costos de fabricación de los moldes son menores, debido a que los mismos son mucho más sencillos que los moldes de otros procesos como el de inyección.

2.7.1 Parámetros del proceso

2.7.1.1 Calentamiento

El primer paso involucrado en el moldeo de un artículo por termoformado es el calentamiento de la lámina a una temperatura apropiada para la deformación del material. Los métodos de transferencia de calor y calentamiento dominan la tecnología de termoformado debido a que una lámina que ha sido calentada indebidamente, típicamente produce artículos de baja calidad; adicionalmente, los costos asociados al calentamiento representan una porción importante del costo final de la pieza formada.

Transferencia de calor: conducción, convección, radiación.

Existen tres métodos de transferencia de calor que pueden ser usados en el proceso de termoformado que son:

- **Conducción**

Consiste en la transferencia de la energía calorífica por medio del contacto directo entre solidos usando placas metálicas o cilindros calentados por resistencias. Este método es utilizado cuando se trata de láminas de espesor delgado.

Algunas de las ventajas que presenta este método de calentamiento son:

a) preciso control de temperatura de la lámina.

b) se evita el sobrecalentamiento de la lámina, si la temperatura fijada en las placas o cilindros calentadores corresponde a la temperatura de formado del material,

c) genera pocas perdidas de calor, periodos cortos de calentamiento para láminas delgadas.

Entre las desventajas de este método se tiene que cuando las temperaturas de los platos calentadores son mayores que la temperatura de formado puede ocurrir que el material se adhiera a la superficie del calentador y como el plástico se expande al ser calentado, es posible que aparezcan imperfecciones en la superficie del material, debido al alabeo causado por la gran expansión térmica

- **Convección**

Por contacto entre un fluido y un sólido. En el proceso de termoformado la lámina se encuentra rodeada por aire a temperatura ambiente. La energía es transferida cuando la temperatura del aire difiere de la lámina. La transferencia de la energía calórica depende del movimiento del aire y de la diferencia de temperatura entre el fluido y la lámina de polímero sólida. Como es de esperarse, la transferencia de energía es baja cuando el aire se encuentra estático, pero la misma aumenta al estar el aire en movimiento a lo largo de la superficie de la lámina. La proporcionalidad entre la diferencia de temperatura entre el fluido y la lámina plástica y la cantidad de calor transferido

se denomina coeficiente de transferencia de calor. Este valor y la cantidad de calor transferida por unidad de tiempo aumentan a medida que se incrementa la actividad del fluido

Por medio del calentamiento por convección la precisión de la temperatura alcanzada, tanto en la superficie como en el núcleo de la lámina, depende del tiempo de calentamiento. A velocidades altas de calentamiento, las temperaturas alcanzadas en la superficie de la lámina son inexactas. Para lograr una uniformidad de temperaturas en la lámina, la misma debe ser calentada por periodos de tiempo prolongados. Las láminas, sean gruesas o delgadas, deben ser pasadas por un medio que se encuentre a temperaturas elevadas por ambas caras (aire caliente, por ejemplo).

Radiación

Es el intercambio de energía electromagnética entre superficies sólidas calientes y frías. La energía electromagnética usualmente se caracteriza por la longitud de onda de la energía. El rango más cercano de longitud de onda del infrarrojo va de 0,7µm a 2,5µm y el rango más lejano de longitud de onda va desde 2,5µm a 100µm. Para la mayoría de los procesos de termoformado el mayor intercambio de energía ocurre en el rango del infrarrojo que va de los 2µm a los 15µm.

La eficiencia de la transferencia de calor por radiación depende de la habilidad de absorción y emisión relativas entre la fuente de calentamiento y la lámina plástica que se encuentra a menor temperatura. El calentamiento por radiación es el más rápido y eficiente de los distintos tipos de calentamiento para el proceso de termoformado.

2.7.1.2 Formado

En el proceso de termoformado ocurre un estiramiento de la lámina de forma diferencial. Esto sucede ya que cuando una porción de la lámina reblandecida entra en contacto con alguna parte de la superficie del molde, esta se adhiere y se detiene el estiramiento de la misma en ese punto. El resto de la lámina que

aún no toca las paredes del molde, continúa siendo estirada hasta que cubre completamente la superficie del mismo, momento en el cual se enfría y se detiene el estiramiento de la lámina. Como resultado de este estiramiento diferencial, se obtiene una pieza moldeada con mayor grosor en aquellas partes de la lámina que hayan tocado primero las paredes del molde, y más delgada en las zonas que tardaron más en tocar la superficie del mismo.

Existen diferentes tipos de formado como son:

- Mediante vacío sobre molde negativo.

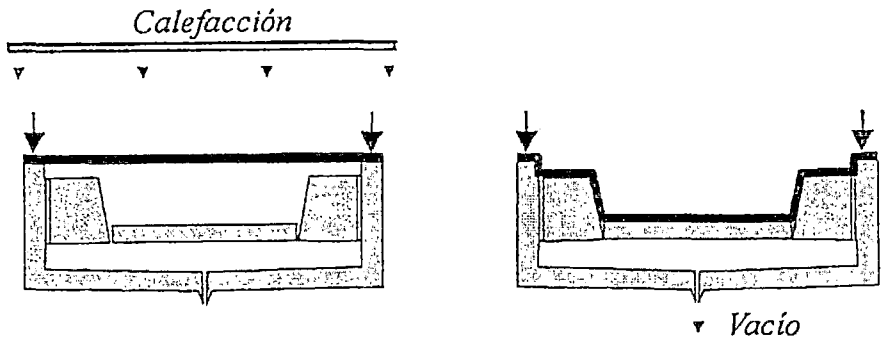


Fig. N° 13

- Mediante vacío contra molde positivo. Problema por rápido contacto con el molde: menor homogeneidad de espesores y deformación a menor temperatura.

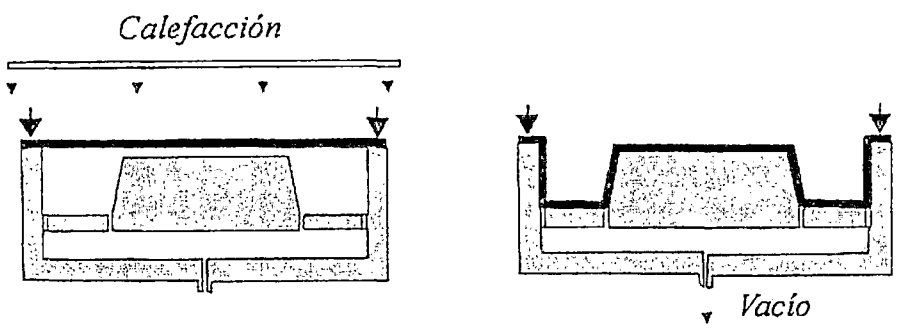


Fig. N° 14

- Termoformado positivo asistido con aire a presión y vacío. Solución al problema de contacto demasiado rápido con el molde.

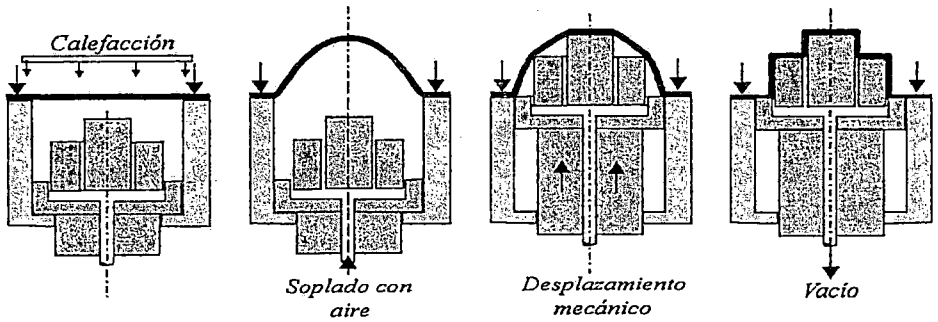


Fig. N° 15

- Empleo de pistón.

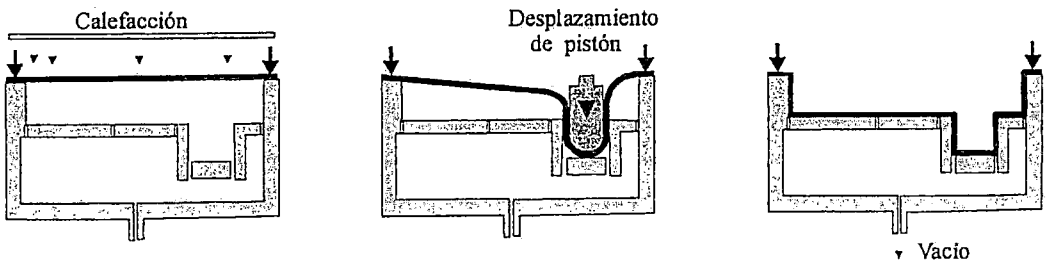


Fig. N° 16

- Empleo de varios moldes.

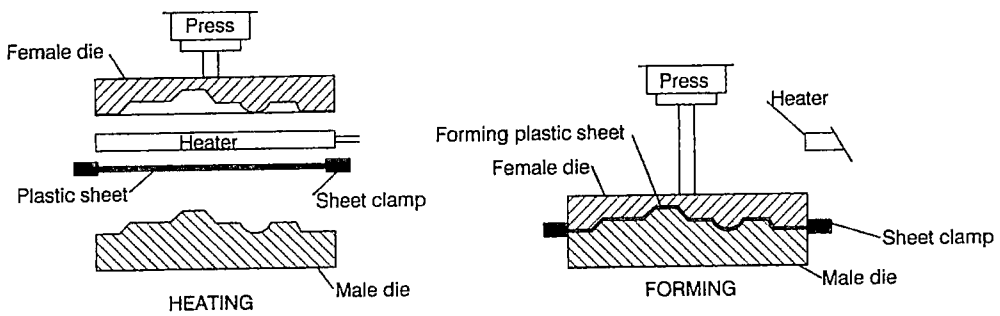


Fig. N° 17

- Termoformado de dos láminas gemelas:

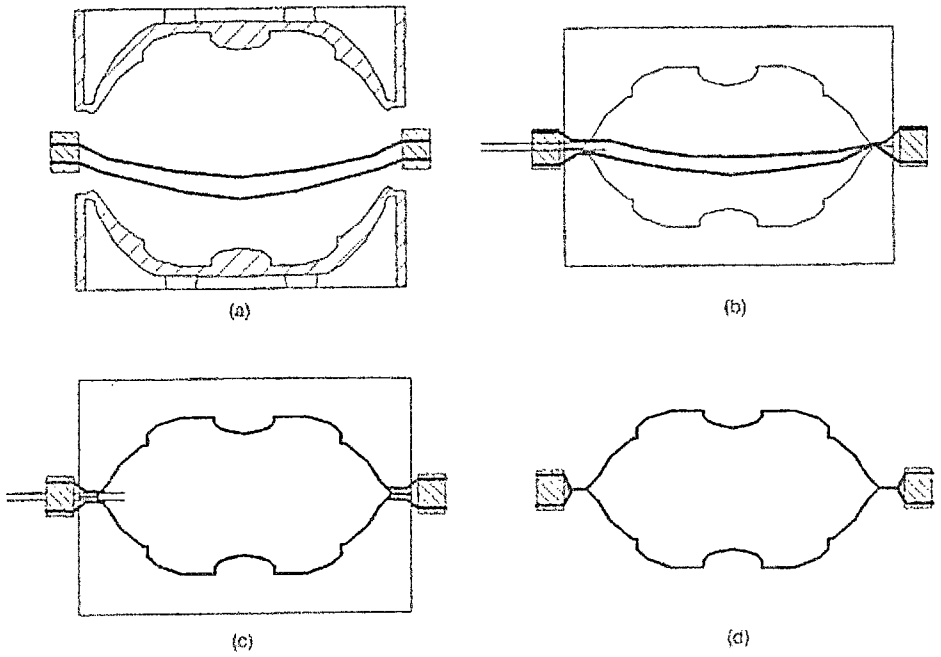


Fig. N° 18

2.7.1.3 Al vacío

En esta técnica de procesado una lámina de material termoplástico, cuyo espesor está comprendido entre 0.025 mm y 6.5 mm, se sujeta mediante una brida a la caja del molde. A continuación, un panel calentador se coloca encima de la lámina para precalentarla hasta alcanzar la plasticidad necesaria. Para láminas de mayor espesor es esencial tener calefacción por ambos lados de la lámina.

Después de que alcanza el ablandamiento suficiente se hace el vacío, reduciendo la presión de aire en el espacio existente entre ella y un molde, con lo que la presión atmosférica adapta la hoja contra las paredes del molde (Se crea una diferencia de presión entre las dos caras de la lámina o de la placa). Allí se enfría lo suficiente para conservar su forma y seguidamente se extrae.

Uno de la atractivos principales del conformado a vacío es, que como se trabaja a la presión atmosférica, los moldes no tienen por qué ser muy resistentes. Materiales como el yeso, la madera y resinas termoestables han sido usadas satisfactoriamente. Sin embargo, para capacidades de producción

elevadas en las que un enfriamiento rápido se hace esencial, es necesario la utilización de moldes metálicos. La experiencia ha mostrado que el metal más satisfactorio es el aluminio, ya que se conforma con facilidad, tiene una conductividad elevada, puede ser pulido y tiene una vida casi ilimitada.

Los materiales que pueden ser conformados a vacío satisfactoriamente son: el Poliestireno, el ABS, el cloruro de polivinilo, el acrílico, el policarbonato, el polipropileno y el polietileno de baja y alta densidad. Las láminas co-extruidas de plásticos diferentes y laminados multicolores también se usan extensamente hoy en día.

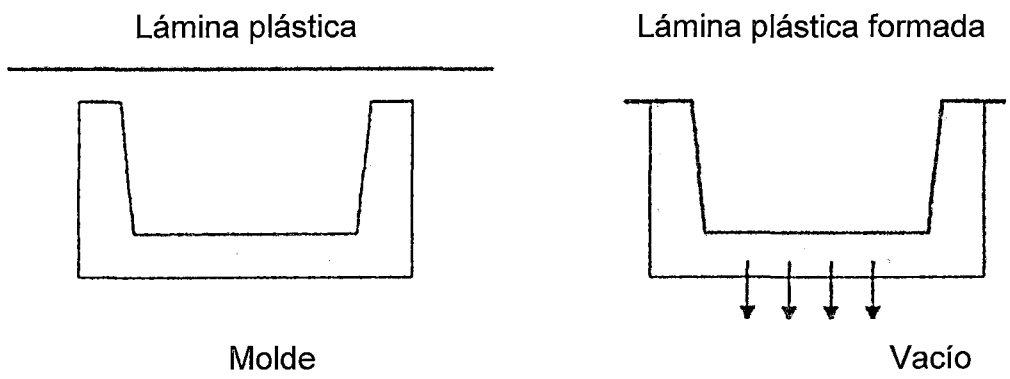


Fig. N° 19

2.7.1.4 Aplicación de las fuerzas de vacío

En general, las bombas operan constantemente para mantener el vacío en el tanque de almacenamiento, existiendo una variación en la lectura del vacuómetro con cada ciclo. El vacío que se provoca en la parte formada debe ser manteniendo el tiempo suficiente para que se enfríe y resista la fuerza interna del material que tenderá a conservar la forma original, causando ondulaciones y pandeo.

Como regla general, entre más rápido se haga el vacío, la apariencia de la pieza será mejor, ocasionalmente es conveniente una velocidad de formado lenta para piezas muy profundas o de secciones intrincadas.

2.7.1.5 Con aire y presión

El conformado a presión es, generalmente, similar al conformado en vacío pero la presión es aplicada encima de la lámina, en vez de realizar el vacío debajo de ello. La ventaja es que se pueden usar presiones más altas en el conformado de la lámina y que permite controlar mejor la variación de presión con el tiempo.

Un molde de tamaño regular requiere eventualmente una presión de cierre de algunas toneladas, que naturalmente una prensa común (tipo "C") no resiste. Es conveniente e utilizar una serie de "clamps" o sujetadores de acción rápida que son muy apropiados para este uso.
Los moldes de aluminio o metal maquinado es una buena opción; pero si los moldes son hechos de madera o resinas no deberán ser utilizados a menos que se refuercen con metal.

Igualmente deberá contar con tanque similar para el compresor. La tubería no requiere de especificaciones estrictas ya que la caída de presión es despreciable. Es conveniente también instalar una válvula de reducción de presión y un manómetro, así como un bafle o filtro a la entrada del molde, para que el aire frío nunca esté en contacto directo con la hoja caliente. Algunas veces será necesario incorporar calentadores al sistema de aire que ayudarán en grandes soplados, que deberán permanecer calientes hasta que la parte se forme en el molde.

De ser posible, es también necesario contar con filtros para eliminar el agua que tiende a condensarse en el sistema y que a la larga puede corroer el equipo, combinados con partículas de aire podrán tapar los orificios de ventilación en los moldes. Un mantenimiento periódico del equipo es indispensable.
El molde cuando así lo requiera deberá contar con orificios para ventilación del aire atrapado y así evitar arrugas o formados deficientes.

El formado con presión de aire se ha vuelto popular sobre todo en piezas pequeñas. Las ventajas de este método son: mejoras en las tolerancias

dimensionales, la velocidad de formado se puede incrementar considerablemente, así como una mejor definición de los detalles finos.

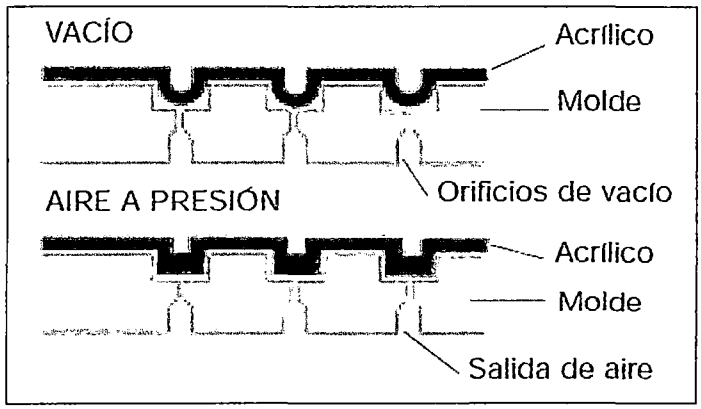


Fig. N° 20

2.7.1.6 Enfriamiento

lámina. Los materiales más comúnmente usados para estos moldes son la madera, el yeso, espumas sintéticas y el aluminio.

Las herramientas de moldeo fabricadas de materiales no - metálicos no presentan sistemas de enfriamiento. En el caso de moldes de superficies sencillas, la mayor parte del calor de la lámina termoformada es removida por medio de canales de enfriamiento ubicados en el cuerpo del molde. La superficie libre de la pieza formada se encuentra expuesta al aire ambiental, sin embargo, la remoción de calor en esta zona puede ser incrementada en un 10% si se colocan ventiladores o sistemas de soplado de aire que actúen sobre esta superficie. Cuando se utilizan moldes macho-hembra, ambas superficies de la lámina entran en contacto con el molde. En este caso, la velocidad de enfriamiento aumenta aproximadamente en un factor de cuatro. En el caso de láminas gruesas, la temperatura de la superficie del molde debe ser como mínimo 5°C menor a la temperatura de transición vítrea del material (Tg), la temperatura de distorsión o la temperatura de re - cristalización del polímero.

Aunque las bajas temperaturas de la superficie del molde disminuyen el tiempo de ciclo, pueden generarse esfuerzos residuales en las piezas termoformadas. Parte de estos esfuerzos pueden ser relajados durante el almacenamiento, el transporte o el uso (si los mismos involucran temperaturas relativamente elevadas). Estos esfuerzos residuales pueden traer como consecuencia la deformación del producto acabado. Por otro lado, la temperatura del molde debe ser elevada si se requiere una copia fiel de la superficie del mismo.

Para láminas delgadas, las temperaturas de la superficie del molde deben encontrarse por debajo de la temperatura a la cual puede ocurrir condensación. Este fenómeno puede causar la aparición de agujeros en las paredes de las piezas moldeadas.

El refrigerante más comúnmente usado en el proceso de termoformado es el agua, por sus bajos costos y su gran eficiencia como removedor de calor. En algunos casos, cuando las temperaturas del molde exceden los 90°C, se utiliza aceite caliente.

Un artículo sólo puede ser desmoldado, cuando la parte más gruesa del mismo se haya enfriado suficiente como para poder ser removida del molde en una condición estable. Si el artículo moldeado se encuentra todavía caliente al momento del desmoldeo el mismo se defor
a muy bajas temperaturas durante el desmoldeo el tiempo de ciclo se verá incrementado innecesariamente.

Con los moldes positivos se presenta una desventaja adicional, ya que será más difícil el desmoldeo a medida que aumente el periodo de enfriamiento, como consecuencia de la contracción del artículo dentro del molde. El desmoldeo a elevadas temperaturas (presenta todavía una alta expansión térmica), trae como consecuencia que el artículo presente mayores dimensiones que las que tendría a menores temperaturas, por lo que será más fácil desmoldar. En los moldes positivos esto trae como consecuencia la contracción dentro del molde y en moldes negativos se promueve el desmoldeo.

2.7.1.7 Propiedades y características de algunos polímeros termo formables.

Los plásticos son muy buenos aislantes térmicos. Debido a que para llevar a cabo el proceso de termoformado es necesario calentar la lámina hasta una temperatura de formado, y luego enfriar la pieza formada hasta una temperatura que el plástico retenga la forma del molde, es necesario conocer acerca de las propiedades térmicas de los polímeros. Las tres propiedades térmicas más importantes son:

Capacidad calórica: algunas veces llamada calor específico, es una medida de la cantidad de energía requerida para aumentar la temperatura del polímero. En termodinámica, una de las medidas fundamentales de absorción de energía es la entalpia.

- *Conductividad térmica:* es una medida de la trasmisión de energía a través de la lámina de polímero. Aunque las conductividades térmicas de los polímeros son bajas, existen diferencias entre estos valores para los diferentes polímeros

Polímero	Densidad (g/cm^3)	Conductividad térmica (kw/m°C)	Coeficiente de capacidad calórica (cal/g°C)
PS	1,05	0,18	0,54
ABS	1,05	0,12	0,40
PC	1,20	0,21	0,49
PVC rígido	1,35	0,17	0,37
PEBD	0,92	0,39	0,95
PEAD	0,96	0,50	1,05
PP	0,90	0,19	0,83
PET	1,37	0,24	0,44

Tabla N° 4

2.8 Variables del proceso de termoformado

2.8.1 Material de partida

Tenemos en cuenta que el material a elegir se debe considerar sus propiedades sean óptimas para el proceso

Polímero	Resistencia del fundido	Estabilidad térmica	Temperatura de operación °C
ABS	E	E	160-200
ABS/PVC	B	B	160-200
Acrílicas	B	B	150-195
ASA	B	R/B	165-195
PC	R	B	195-235
PC/ABS	B	B	180-220
PET	E	B	145-175
LDPE	M/R	E	160-180
HMW-HDPE	R/B	E	160-205
HIPS	E	E	165-200
PPO/PS	E	B	170-205
UPVC	R	R	145-180
PVC/Acrílicas	R/B	R/B	165-195
PP homopol.	M	B	170-185
PP copolím.	R	B	165-190
PS	B	B	145-180
PSU	R	E	205-250
PES	R	E	275-370
PEI	R	E	450-500
TPU	B	B	160-185

Tabla N° 5

2.8.2 Velocidad

Para mayor homogeneidad del espesor y por productividad, es conveniente que la deformación de la lámina sea rápida antes de tocar las paredes del molde

2.8.3 Temperatura de la lámina

Generalmente el calentamiento es mediante radiación IR. La temperatura no debe ser excesiva para que no se degrade el polímero.

2.8.4 Temperatura del molde

En el caso general interesan moldes fríos y que el material se deforme antes de entrar en contacto. De este modo el enfriamiento es más rápido y mayor la productividad.

2.8.5 Tensiones residuales y orientación molecular

- Tensiones residuales: inducidas por enfriamiento diferencial de diferentes partes y por las tensiones desarrolladas por efecto de la memoria del material.

- El alineamiento de las cadenas en las regiones amorfas vitrificadas produce la propensión del material a deformarse cuanto se recaliente cerca de Tg.

2.9. Moldes

2.9.1 Materiales empleados

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.

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.

2.9.2 Características generales

- Taladros para evacuar aire entre lámina y molde.
- Refrigeración y control de temperatura mediante circulación de líquido en conductos internos en el caso de moldes metálicos.
- Reducido coste (en comparación con moldes para inyección).

2.9.3 Tipos y Consideraciones

- **Moldes en madera**

Se fabrican a partir de maderas duras secadas al horno para evitar deformaciones debidas al ciclo térmico del proceso. Si deben construirse en

piezas, éstas se juntan a cola de milano o se encolan con resorcinol o adhesivo epoxi. Los taladros de ventilado se efectúan con pequeño diámetro desde la cara de trabajo y se aumenta el diámetro hasta cerca de la superficie taladrando desde la otra cara. Pueden terminarse con barnices epoxi o poliuretanos. La madera, fácil de mecanizar, puede emplearse también para construir prototipos de pistón en moldes definitivos metálicos y obtener la mejor forma por interacción.
El mejor desmoldante es talco para bebés o harina. En materiales muy sensibles como el Poliestireno, P.V.C. espumado o acrílico, no se deben utilizar maderas suaves debido a que se producirán marcas de moldeo.

Para corridas de producción largas no se deberá usar madera, debido a que el lento enfriamiento causará que el molde se expanda, provocando que las uniones se abran.

- **Moldes de escayola**

Especialmente si están reforzados con un 5% de fibra de vidrio cortada, tienen una duración sorprendente. Para realizarlos se requiere un modelo con suficiente resistencia para soportar la temperatura de fraguado del yeso (calor 100 °C), en el que se insertan alambres rígidos recubiertos con desmoldante, que sirven para formar los taladros de ventilado. Una primera capa fina relativamente rica en agua proporciona una buena calidad de superficie. A continuación se prepara y vierte sobre esta capa el resto de la colada, vertiendo la cantidad adecuada de yeso sobre el agua (y no al revés), mezclando cuidadosamente y eliminando por vibración el aire atrapado En esta fase, para facilitar la extracción de los alambres, éstos se recubren con un tubito fino de plástico.

Como desmoldante se suelen emplear jabones o parafina disuelta en aguarrás. El molde endurece en unos 30-50 minutos y puede extraerse, pero debe dejarse secar, para que adquiera suficiente consistencia, hasta que pueda encenderse una cerilla raspando sobre su superficie. Los moldes pueden barnizarse, después de aplicar un tapa poros (goma laca).

- **Moldes de aluminio**

Son los más populares para este proceso. Los moldes de alta calidad se mecanizan y para moldes más económicos puede utilizarse la colada, aunque suele presentar porosidades que crean problemas en la vecindad de los conductos de regulación térmica.

Para moldes metálicos o de resinas plásticas, se recomienda utilizar ceras desmoldantes o en aerosol.

- **Moldes de acero**

Para estos procesos, dado que las presiones son, casi siempre, muy inferiores a las de los procesos de inyección, pueden construirse con aceros menos conflictivos para el mecanizado y bruñido, además de presentar menor riesgo de deformación al endurecimiento.

2.9.4 Aplicaciones y usos en el termoformado

Técnica competitiva frente a moldeo por inyección para:

a) Formas grandes.

En este caso, el uso de los productos es más especializado y además la escala del conformado es mucho mayor. Los materiales son, con frecuencia, más complejos. Estos incluyen, además de termoplásticos simples, materiales compuestos, laminas obtenidas por extrusión y materiales laminados. Desde luego, todos deben ser termoplásticos para que funcione el procedimiento. Entre los productos se incluyen: lanchas, revestimientos de congelador, puertas de cocheras y tinas de baño domésticas. Estos productos son ejemplos de piezas moldeadas de estampado profundo de gran área. Las hojas que se requieren son por lo común, de hasta 3 m de ancho y el diseño y control del Dado del extrusor es un factor clave para controlar la calidad.

Fig. N° 21

b) Productos de series cortas:

Blíster y tarrinas

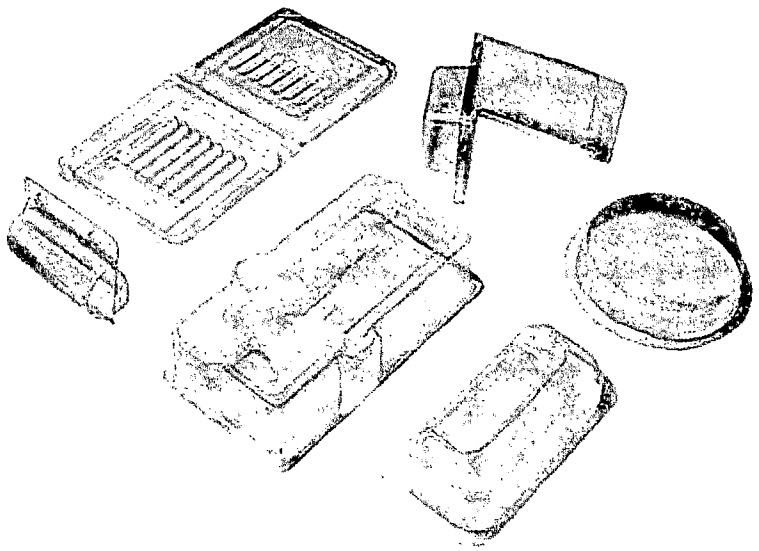


Fig. N° 22

c) Recipientes de pared delgada:

Son artículos como vasos, envases, etc. La línea de conformado se halla en la línea con el extrusor de laminación. Se controla exactamente el espesor de la lámina y las condiciones de extrusión

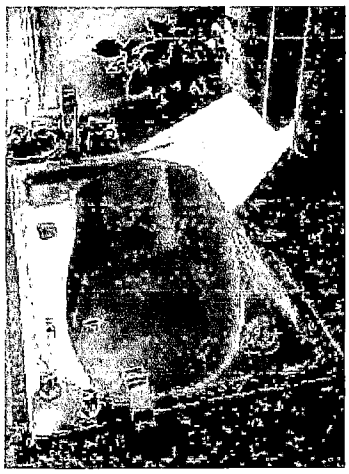
Fig. N° 23

d) Empaques con película y tipo burbuja

El envase de este tipo se usa en modernas presentaciones para ventas de una gran variedad de artículos domésticos, que van desde los de ferretería como clavos, tornillos y herramientas hasta artículos de tocador como rasuradoras desechables. Los empaques con película son aquellos donde una capa fina de material flexible se estira apretadamente sobre los artículos colocados en una base rígida. Los empaques tipo burbuja son hojas preformadas que siguen la forma del artículo que se ha de empacar; se sellan en la base después de introducir el artículo. Una modificación de la burbuja es el empaque "global" en el cual se usa una ampolla bastante rígida y de forma regular, con frecuencia, hemisférica.

Barquette en PVC

Gobelets en PP



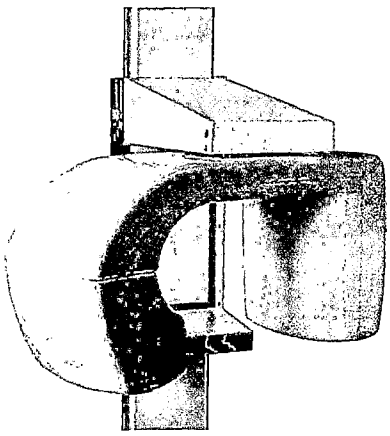
Baignoire
en *Altuglas* (PMMA)

Écoutille de pont de bateau
en *Altuglas* (PMMA)

Fig. N° 24

e) Piezas huecas

Conductos y recipientes de grandes dimensiones: termoformado de dos mitades + soldadas. Material típico: HDPE.



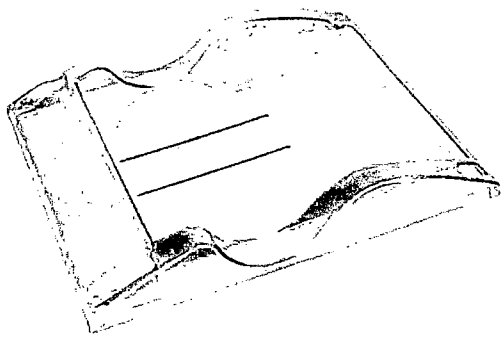


Fig. N° 25

2.10 Material PET

El PET o más conocido como Polietilentereftalato pertenece al grupo de materiales Sintético o Poliester.

Es un Termoplástico que por su alto grado de cristalinidad es uno de los principales poliésteres que es muy usado en envases de bebidas y textiles y por su comportamiento es que es apto para los procesos de inyección, extrusión y termoformado.

Una de las variedades de PET son las láminas que son aptas para contacto con alimentos porque proporciona excelente presentación o transparencia y resistencia al impacto.

2.10.1 Propiedades generales del PET

- Apto para procesar frascos, botellas, películas, laminas, planchas y piezas.
- Transparencia y Brillo con efecto lupa.
- Excelentes propiedades mecánicas,
- Barrera de los gases.
- Costo / performance.
- Liviano.
- N° 1 en el ranking como material reciclado (RPET).
- Disponibilidad

PROPIEDADES FÍSICAS	
Absorción de agua - Equilibrio (%)	< 0,7
Densidad (g/cm³)	1,3 - 1,4
Índice refractivo	1,58 - 1,64
Inflamabilidad	Auto extinguible
Resistencia a los ultravioletas	Buena

PROPIEDADES MECÁNICAS	
Coeficiente de fricción	0,2 - 0,4
Dureza – Rockwell	M94 – 101
Resistencia a la tracción (Mpa)	190 – 160
Resistencia al impacto (Jm^{-1})	13 – 35

PROPIEDADES TÉRMICAS	
Calor específico ($KJ.\ Kg^{-1}.\ K^{-1}$)	1,2 - 1,35
Coeficiente de expansión térmica ($x10^{-6}\ K^{-1}$)	20 - 80
Conductividad térmica ($Wm^{-1}\ K^{-1}$)	0,15 - 0,4
Temperatura máxima de utilización (°C)	115 - 170
Temperatura mínima de utilización (°C)	-40 a -60

Tabla N° 6

2.10.2 Características

a) Biorientación

Permite lograr propiedades mecánicas y de barrera con optimización de espesores.

b) Cristalización

Permite lograr resistencia térmica para utilizar bandejas termoconformadas en hornos a elevadas temperaturas de cocción.

c) Esterilización

El PET resiste esterilización química con óxido de etileno y radiación gamma.

d) Alternativas ecológicas

- Retornabilidad
- Reúso Molienda
- Fibras
- Polioles para Poliuretanos
- Poliésteres no saturados
- Envases no alimenticios
- Alcohólisis / Metanólisis
- Incineración

e) Resistencia química

Buena resistencia generalmente en grasas y aceites presentes en alimentos, soluciones diluidas en ácidos minerales, álcalis, sales, jabones, hidrocarburos alifáticos, y alcoholes.

RESISTENCIA QUÍMICA	
Ácidos concentrados	Buena
Álcalis	Mala
Alcoholes	Buena
Grasas y aceites	Buena
Halógenos	Buena
Hidrocarburos Aromáticos	Aceptable

Tabla N° 7

2.10.3. Aplicaciones

a) En envases y empaques

En el mercado se encuentran disponibles envases para el llenado a temperatura normal y a temperatura para el llenado en caliente.

La participación del PET en el mercado es:

- Bebidas carbonatadas
- Agua Purificada
- Aceite
- Conservas
- Cosméticos
- Detergentes y productos químicos
- Productos Farmacéuticos

b) En ingeniería y electrónica

Este segmento abarca distintivo tipos de películas y aplicaciones desde las películas ultra delgadas para capacitores de un micrómetro o menos hasta de 0.5 milímetros, utilizados para aislamiento de motores. Los capacitores tienen un material dieléctrico una película de PET empleada para telecomunicaciones. Se usa también para películas fotográficas y transparencias.

Su resistencia química permite aplicarla en cerdas de brochas para pinturas y cepillos industriales.

c) En Fibras

En la industria textil, la fibra de poliéster sirve para confeccionar una gran variedad de telas y prendas de vestir. Las prendas hechas de estas fibras son resistentes a las arrugas.

d) En Láminas

Son aptas para alimentos, sirve de barrera a los aromas, son principalmente transparentes con alto brillo, se puede agregar film impreso decorativo en la cara externa, usualmente se fabrica en blanco y negro.

Biblioteca Cs. Ingenierías Hemeroteca Universidad Nac. San Agustín

Se cuenta con espesores de 300 a 1350 micras; ancho de 200 a 1000 mm.

Sus aplicaciones son:

- Envases termoformado para frutas (Clam Shell), postres, sandwichs.
- Vasos termoformados para agua y zumos.
- Industria farmacéutica: blisters para medicamentos.
- Industria Gráfica: Planchas para imprimir publicidad.
- Blisters para diversos usos.
- Postres, lácteos, mouses.

Fig. N° 26

CAPITULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 EL LABORATORIO

Condiciones iniciales: Las condiciones iniciales para todos los ensayos fueron establecidos según como sigue

- Vacío alcanzado: -25" Hg.
- Potencia resistencias: 77%
- Distancia bastidor a las resistencias: 10 cm

Estos valores fueron establecidos según experiencias previas en la máquina de termoformado ya que estos parámetros ofrecieron buenos resultados

3.1.1 CONDICIONES

Para el presente trabajo se usaron las instalaciones del "***local de Hunter***" de la UNSA ubicado en el pueblo de San Juan de Dios del distrito de Hunter

Las condiciones del laboratorio no eran las más óptimas ya que las ventanas estaban rotas y en el lugar había fuertes corrientes de aire que hacían variar de alguna manera la estabilidad de la temperatura dentro del laboratorio.

Fig. 3.1 Ventanas del laboratorio

El laboratorio no se encontraba en muy buenas condiciones, se hace mención a esta situación ya que este hecho ha podido influenciar negativamente en los resultados

Fig. 3.2 Puertas del laboratorio

3.2 EQUIPOS

3.2.1 MÁQUINA DE TERMOFORMADO

La Escuela profesional de Ingeniería de Materiales cuenta con una máquina de termoformado totalmente automatizada con las siguientes características

- Es totalmente automatizada
- Posee 12 resistencia de 650W de potencia
- Una bomba de vacío de 6CFM
- Un tanque de compensación de 24L
- Un vacuometro (rango de -30" Hg a 0/ -1Bar a 0)
- Un potenciómetro para regular la potencia de las resistencias
- 2 cilindros neumáticos de doble efecto
- 1 unidad de mantenimiento
- 1 Manómetro
- 1 válvula de accionamiento manual
- 4 Regulador de caudal unidireccional
- 2 Silenciadores
- 1 reloj Timer
- 1 Compresora

3.2.2 LABORATORIO DE LA ESCUELA DE INGENIERIA DE MATERIALES

Los ensayos se realizaron en los laboratorios de la escuela profesional de Ingeniería de Materiales ubicados en el distrito de Hunter.

En estos laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería de Materiales se encuentra la maquina termoformadora

A continuación presentamos unas fotos de la máquina de termoformado en la cual indicamos sus principales partes

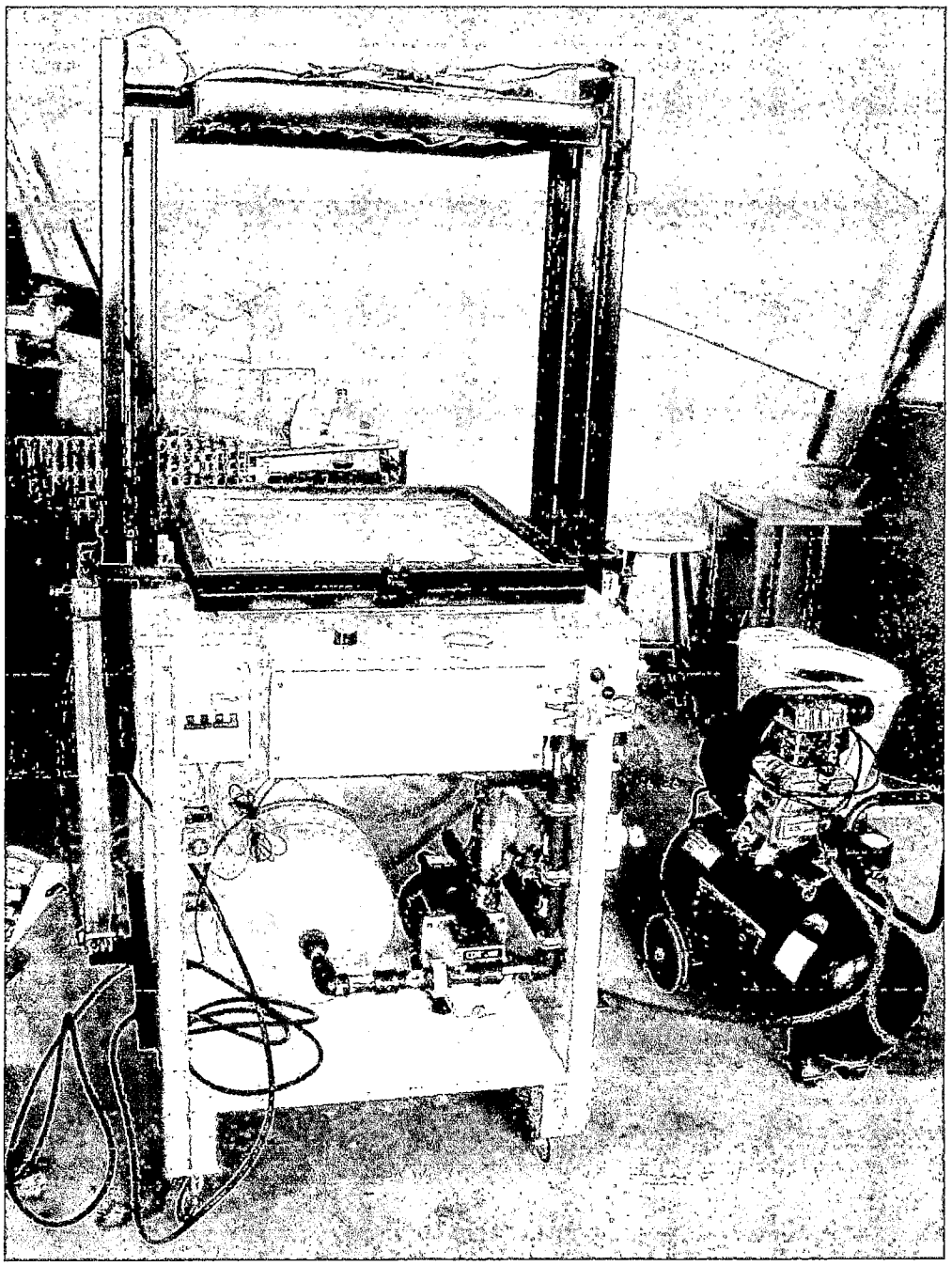
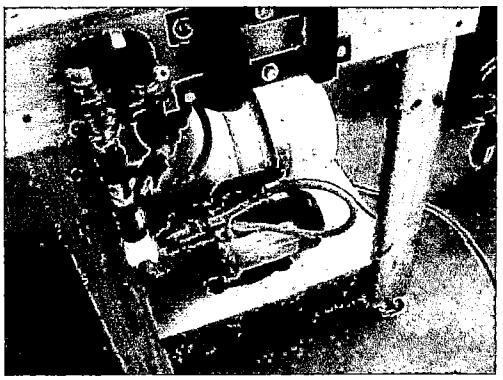


Fig. 3.3 Maquina de termoformado automatizada

3.3 MAQUINA DE TERMOFORMADO AUTOMATIZADA

3.3.1 PARTES PRINCIPALES DE LA MÁQUINA DE TERMOFORMADO

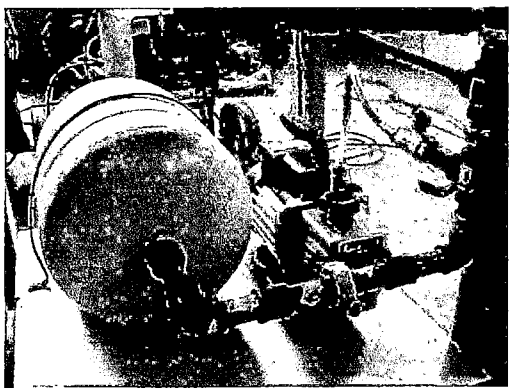
3.3.1.1 Bomba de vacío



Bomba de vacío de 6CFM, con esta bomba se genera el vacío necesario para succionar la lámina de PET y esta copie el molde que se desea.

Fig. 3.4 Bomba de vacío

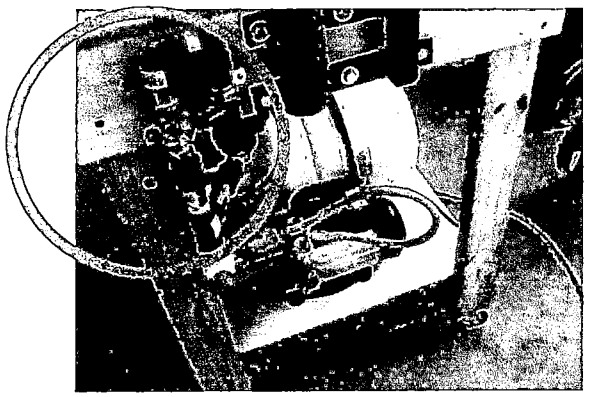
3.3.1.2 Tanque de compensación



El tanque de compensación de 24L, que sirve de ayuda para mantener el vacío

Fig. 3.5 Tanque de compensación

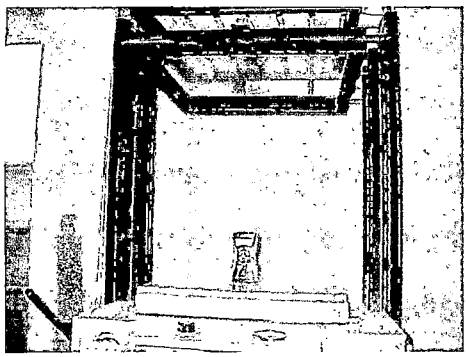
3.3.1.3 Llave de apertura de succión



La llave de apertura que conecta el tanque de compensación con la cámara sobre la cual se encuentra la lámina de PET a termoformar.

Fig. 3.6 Llave de succión

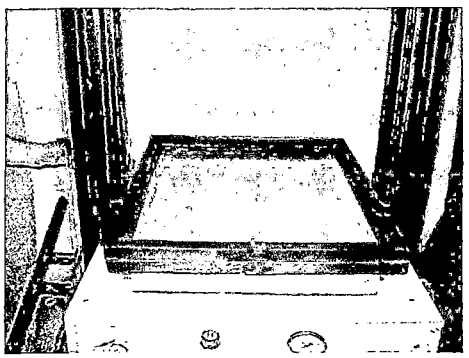
3.3.1.4 Resistencias Eléctricas



Las resistencias eléctricas de tipo IR se encuentran ubicadas en la parte superior pudiendo irradiar su calor hasta una distancia superior a 60 cm hacia abajo

Fig. 3.7 Resistencia eléctrica

3.3.1.5 Bastidor Porta – Lamina



El bastidor portalamina, en el cual se sujeta la lámina a termoformar y que mediante un sistema mecánico y manual se encarga de subir la lámina a termoformar lo más cerca de las resistencias

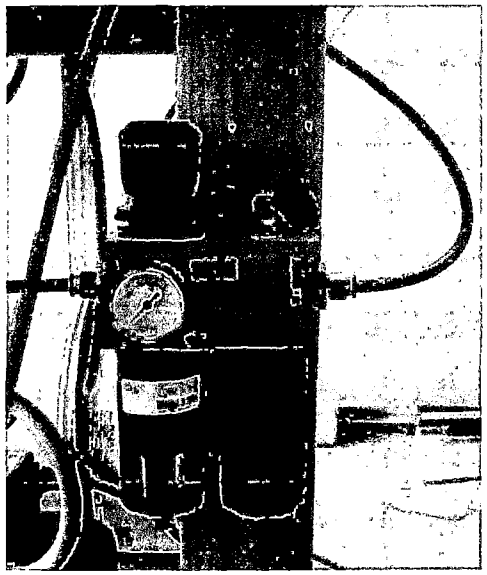
Fig. 3.8 Bastidor

3.3.1.6 Cilindros Neumáticos de doble efecto

Fig. 3.9 Cilindros neumaticos

Con los cilindros neumáticos se reemplaza la antigua manija que tenía como función elevar el bastidor portalamina hacia arriba cerca de las resistencias, de esta manera se reduce el número de operarios para hacer funcionar la maquina termoformadora ya que con este nuevo sistema una sola persona es capaza de operar la máquina.

3.3.1.7 Unidad de mantenimiento

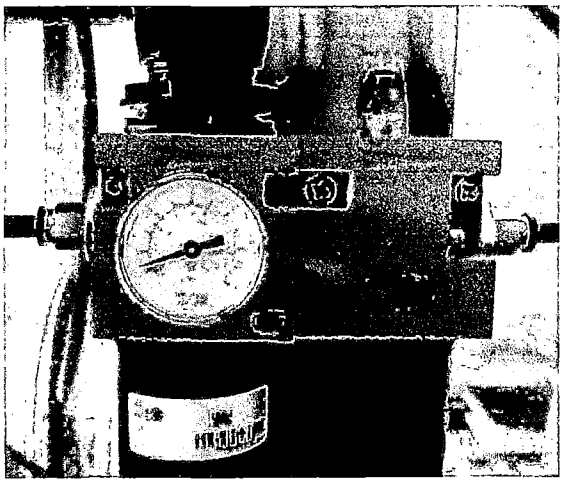


Esta unidad de mantenimiento tiene como principales funciones:

- Regular la presión hacia los cilindros neumáticos
- Proporcionar una adecuada lubricación hacia los cilindros neumáticos
- Impedir el paso de aire húmedo hacia los cilindros neumáticos

Fig. 3.10 Unidad de mantenimiento

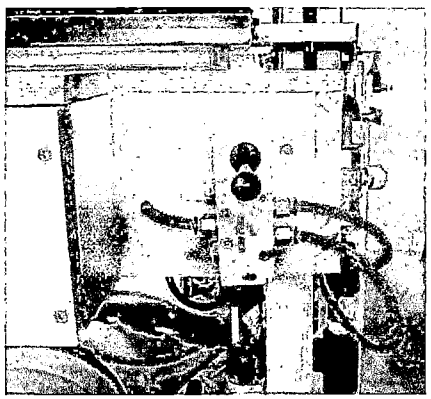
3.3.1.8 Manómetro



Un manómetro instalado en la unidad de mantenimiento permite verificar constantemente la presión de aire hacia los cilindros neumáticos. Pudiendo regular de esta manera el flujo de aire hacia los cilindros neumáticos

Fig. 3.11 Manómetro

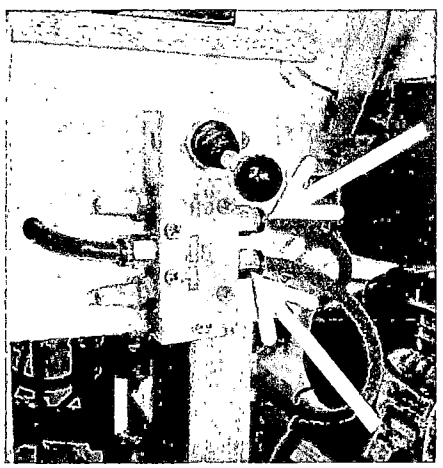
3.3.1.9 Váivula con accionamiento manual



Esta es una válvula de accionamiento manual de tres tiempos la cual permite maniobrar con mucha facilidad el bastidor portalamina para hacerlo subir y bajar de una forma cómoda y sencilla por el operario

Fig. 3.12 Válvula

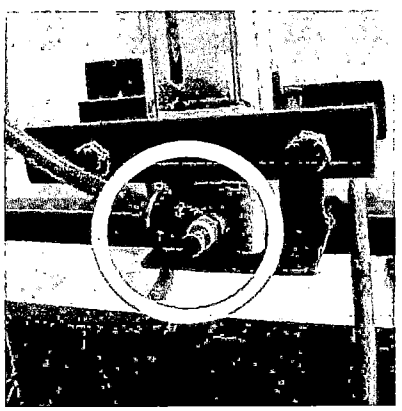
3.3.1.10 Conectores rápidos rectos



Este tipo de conectores permite acoplar rápidamente la válvula con los cilindros neumáticos y la unidad de mantenimiento se pueden sacar y colocar rápidamente con mucha facilidad.

Fig. 3.13 Conectores

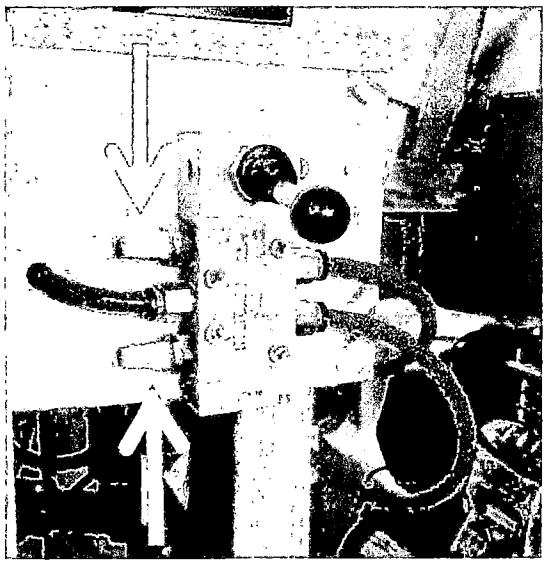
3.3.1.11 Regulador de caudal unidireccional



Los reguladores de caudal (4) están instalados en los cilindros neumáticos y permiten regular la cantidad del flujo de aire que actúa en el cilindro neumático para una correcta graduación entre los cilindros neumáticos

Fig. 3.14 Reguladores

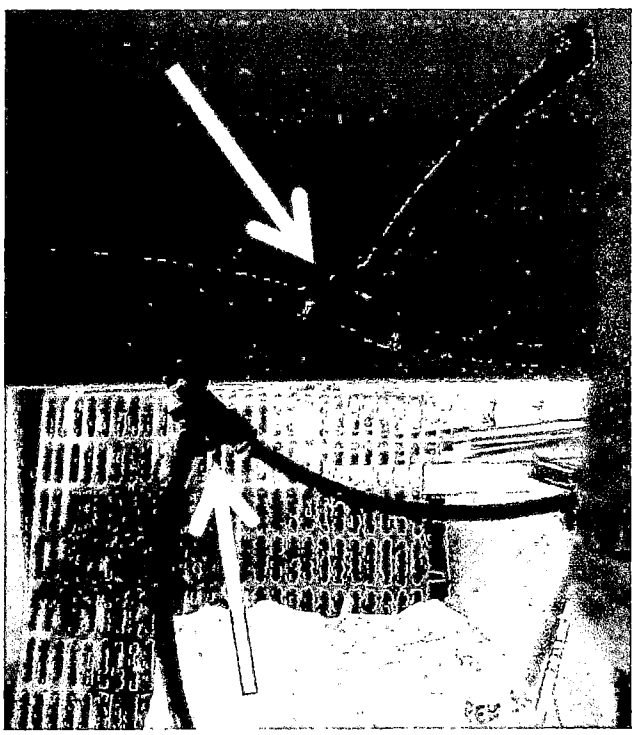
3.3.1.12 Silenciadores



Los silenciadores instalados en la válvula con accionamiento manual permiten reducir el ruido que produce el aire al pasar por la válvula manual

Fig. 3.15 Silenciadores

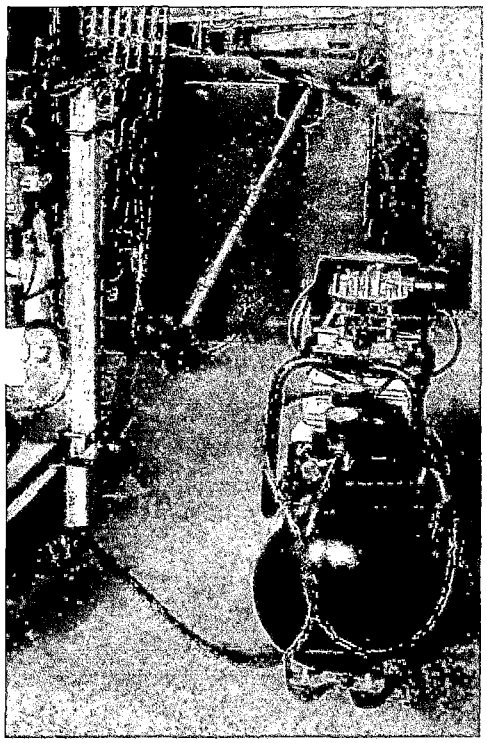
3.3.1.13 Conectar rápido tipo TEE



Este tipo de conectores permite conducir el flujo de aire hacia los dos cilindros neumáticos de manera simultánea y junto a los regulares de caudal unidireccional permiten sincronizar la subida y bajada de los cilindros neumáticos

Fig. 3.16 Conectores

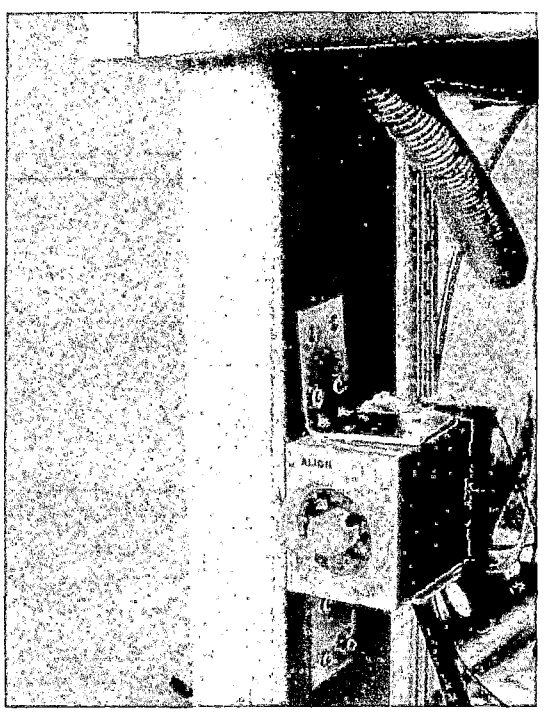
3.3.1.14 Compresora de aire



La compresora de aire nos proporciona la presión de aire necesaria para hacer funcionar nuestro sistema neumático

Fig. 3.17 Compresora de aire

3.3.1.15 Timer



El "timer" permite tener un control más estricto del tiempo de proceso de termoformado. El timer puede ser programado a un determinado tiempo y luego de alcanzar el tiempo programado hace sonar una alarma indicando así el término del proceso de calentamiento de la lámina a ser termoformada.

Fig. 3.18 Timer

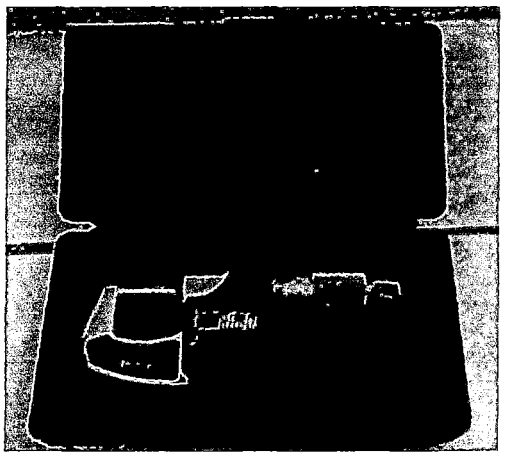
3.4 MATERIALES Y EQUIPOS DE MEDICIÓN EMPLEADOS

3.4.1 Medidor Laser de temperatura

El termómetro de infrarrojo fue muy necesario y útil al momento de registrar las temperaturas de las láminas ya que de otra manera hubiera sido muy difícil hacer las mediciones

Fig. 3.19 Medidor de temperatura

3.5 Micrómetro



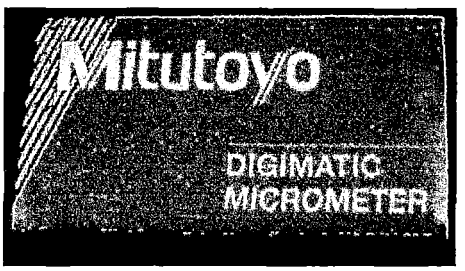


Fig. 3.20 Micrometro

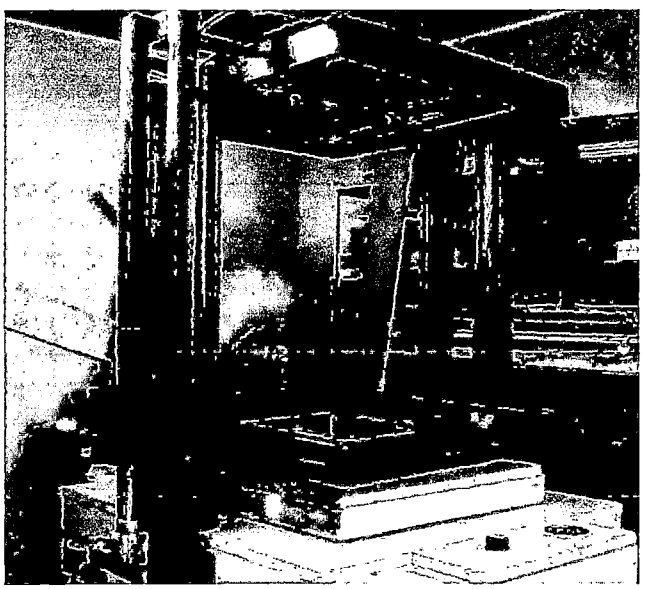
3.4 LÁMINAS DE PET

Las Láminas de PET usadas fueron cortadas de esta bobina de PET en un tamaño adecuado de tal manera que coincida con el bastidor portalamina (Aprox. 50x63cm). El espesor de dicha lámina es de 200 micras.

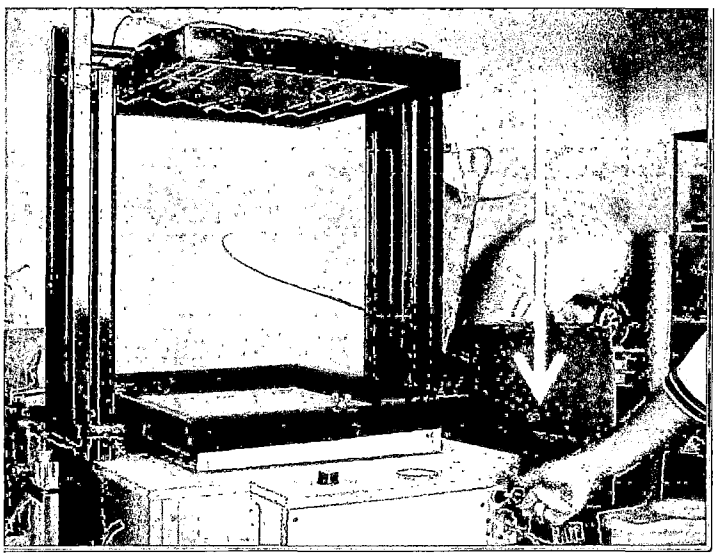
Fig. 3.21 Bobina de PET

3.5 PROCEDIMIENTO PARA TERMOFORMAR SISTEMA AUTOMATICO

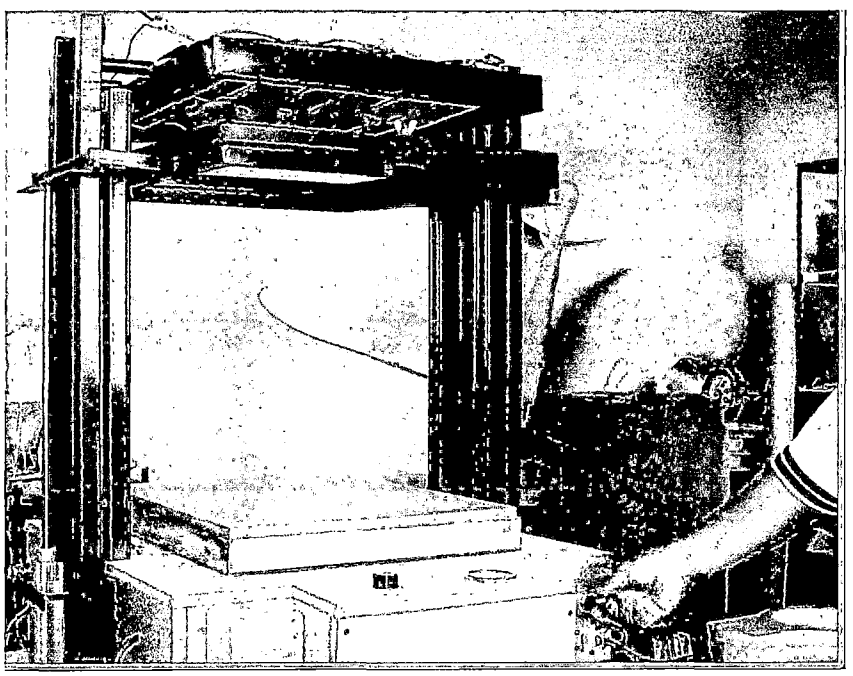
3.5.1 Colocación de la lámina: en el bastidor portalamina de la maquina termoformadora, se debe tener cuidado de evitar se formen pliegues o que la lámina no esté bien sujetada



3.5.2 Elevación: se maneja la válvula de accionamiento manual de tres tiempos hacia arriba o hacia abajo para hacer subir o bajar el bastidor portalamina hacia las resistencias.

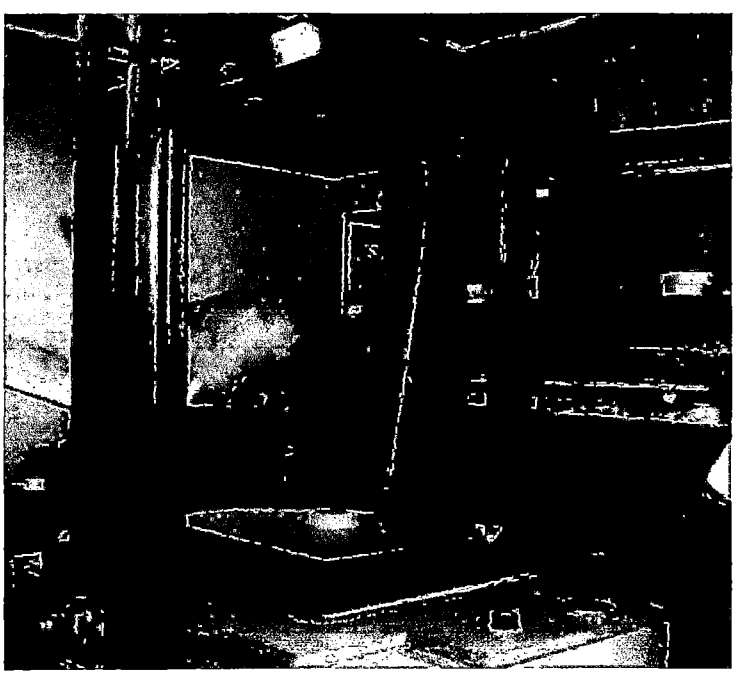


3.5.3 Distancia: La distancia del bastidor portalamina a las resistencias eléctricas es constantes y que determinada por acción del operador al manipular la válvula de tres tiempos instalada



3.5.4 Toma de tiempo registro de la temperatura de la lámina: El tiempo previamente al ensayo se establece mediante el "timer" instalado y la temperatura de la lámina se verifica manualmente con el termómetro laser por un solo operador

3.5.5 Aplicación de vacío: Luego que la lámina ha bajado inmediatamente se abre la llave de succión para obligar a la lámina caliente a copiar la forma del molde



3.5.6 Desmontaje: una vez que la lámina ha sido termoformada se procede a sacar la lámina y darle el acabo adecuado de la pieza

3.6 ENSAYOS

En la realización de los ensayos en la etapa preliminar se trabajó con 3 modelos distintos en altura para evaluar el efecto de la altura del modelo en la calidad final de la pieza termoformada con las correspondientes mediciones de los espesores de las piezas acabadas.

A continuación se muestran los datos obtenidos

3.6.1 Modelo N° 1

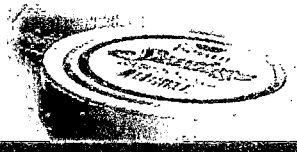
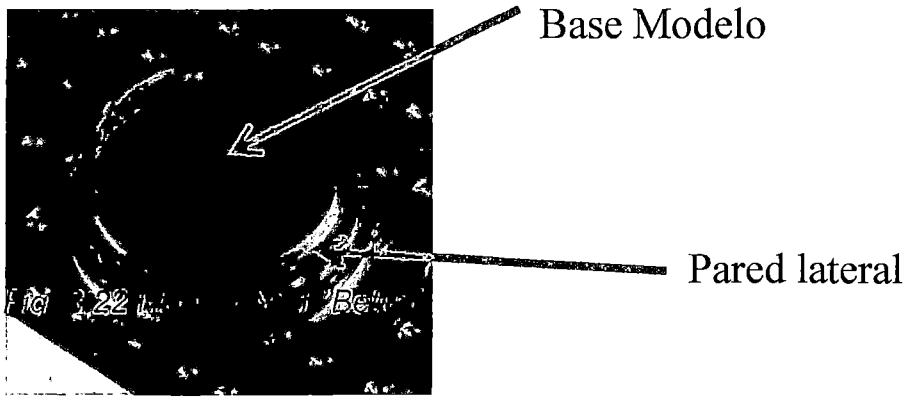


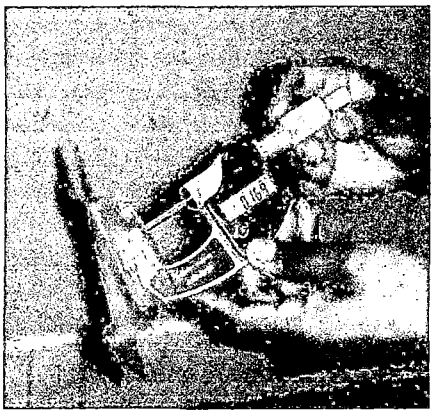
Tabla 3.1

Modelo 1: Betún de zapato

N°	Potencia (%)	Tiempo (Seg.)	T° Lamina (°C)	Observación
1	130	20	--	Aceptable
2	130	20	143	excelente
3	130	25	130	Bueno
4	130	25	140	excelente
5	130	25	148	excelente, leve cristalización

3.6.2 Mediciones efectuadas





Medición del espesor de la lámina termoformada en las paredes laterales y en la parte superior

Fig. 3.22 Medición de espesor

Tabla 3.2

Modelo 1: Betún de zapato

N°	Potencia (%)	Tiempo (Seg.)	T° Lamina (°C)	Medición espesor Base (µm)		
				1°	2°	3°
1	130	20	--	0.163	0.161	0.160
2	130	20	143	0.175	0.183	0.173
3	130	25	130	0.173	0.174	0.167
4	130	25	140	0.168	0.163	0.163
5	130	25	148	0.161	0.160	0.158

Tabla 3.3

Modelo 1: Betún de zapato

N°	Potencia (%)	Tiempo (Seg.)	T° Lamina (°C)	Medición espesor Pared (µm)		
				1	2	3
1	130	20	--	0.163	0.158	0.151
2	130	20	143	0.158	0.150	0.152
3	130	25	130	0.159	0.162	0.161
4	130	25	140	0.153	0.151	0.154
5	130	25	148	0.144	0.146	0.134

3.6.3 Modelo N° 2

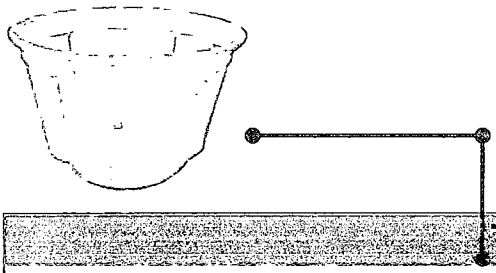


Tabla 3.4

Modelo 2: Gelatinero

N°	Potencia (%)	Tiempo (Seg.)	T° Lamina (°C)	Observación
1	130	10	110	Bien pero con pocos pliegues
2	130	10	111	Aceptable con poquísimos pliegues
3	130	15	128	Bien, pocos pliegues
4	130	20	123	Bien, pocos pliegues
5	130	20	130	muy bien, pocos pliegues
6	130	20	130	muy buen, pocos pliegues

3.6.4 Mediciones efectuadas

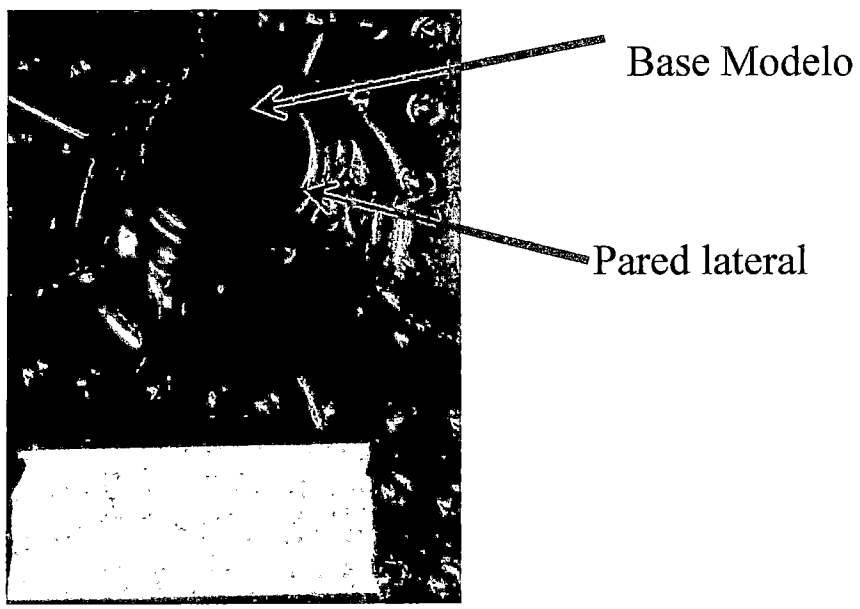
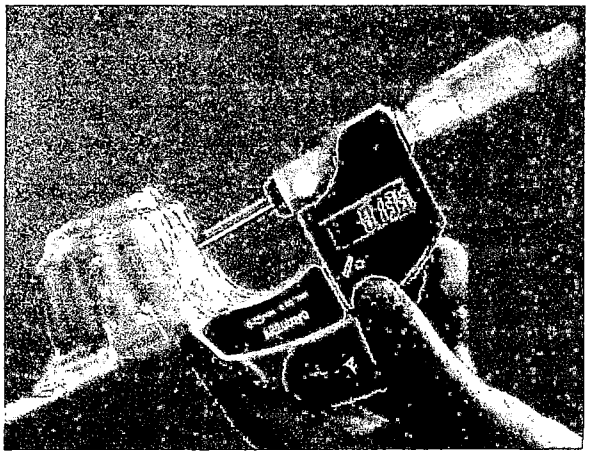


Fig. 3.23 Modelo N° 2 "Gelatinero"



Medición de espesor de la lámina termoformada "Gelatinero", de las paredes.

Fig. 3.24 Medición de espesor "Gelatinero"

Tabla 3.5

Modelo 2: Gelatinero

N°	Potencia (%)	Tiempo (Seg.)	T° Lamina (°C)	Medición espesor Base (µm)		
				1	2	3
1	130	10	110	0.169	0.163	0.170
2	130	10	111	0.164	0.163	0.168
3	130	15	128	0.178	0.180	0.177
4	130	20	123	0.177	0.168	0.167
5	130	20	130	0.174	0.167	0.173
6	130	20	130	0.188	0.187	0.187

Tabla 3.6

Modelo 2: Gelatinero

N°	Potencia (%)	Tiempo (Seg.)	T° Lamina (°C)	Medición espesor Pared (µm)		
				1	2	3
1	130	10	110	0.150	0.148	0.143
2	130	10	111	0.143	0.144	0.141
3	130	15	128	0.142	0.146	0.138
4	130	20	123	0.134	0.146	0.149
5	130	20	130	0.136	0.131	0.131
6	130	20	130	0.143	0.136	0.139

3.6.5 Modelo N° 3

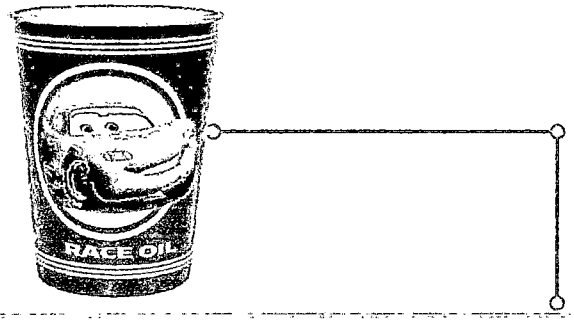


Tabla 3.7

Modelo 3: Vaso plástico

N°	Potencia (%)	Tiempo (Seg.)	T° Lamina (°C)	Observación
1	130	10	113	Presencia considerable de pliegues
2	130	10	116	Presencia considerable de pliegues
3	130	15	123	Presencia considerable de pliegues
4	130	15	124	Presencia considerable de pliegues
5	130	15	128	Presencia considerable de pliegues
6	130	20	140	Presencia considerable de pliegues
7	130	20	132	Presencia considerable de pliegues
8	130	20	135	Presencia considerable de pliegues
9	150	35	122	Presencia considerable de pliegues
10	150	35	124	Presencia considerable de pliegues
11	150	35	119	Presencia considerable de pliegues
12	150	40	120	Presencia considerable de pliegues

3.6.6 Mediciones efectuadas

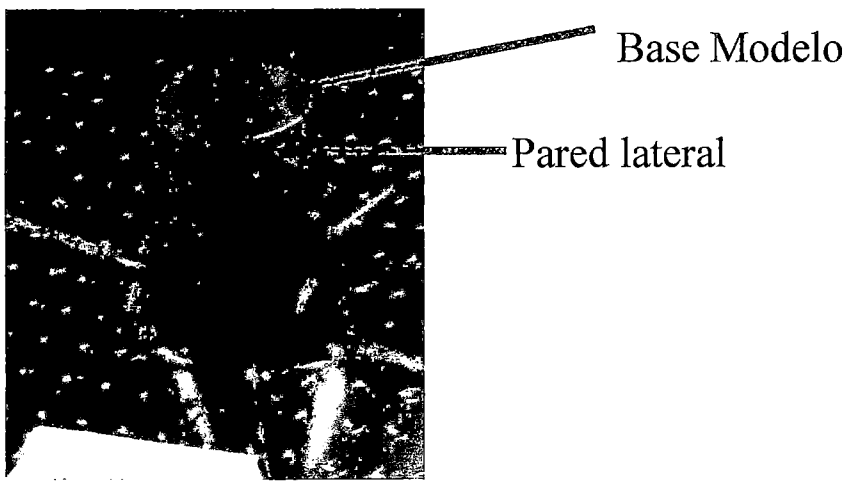
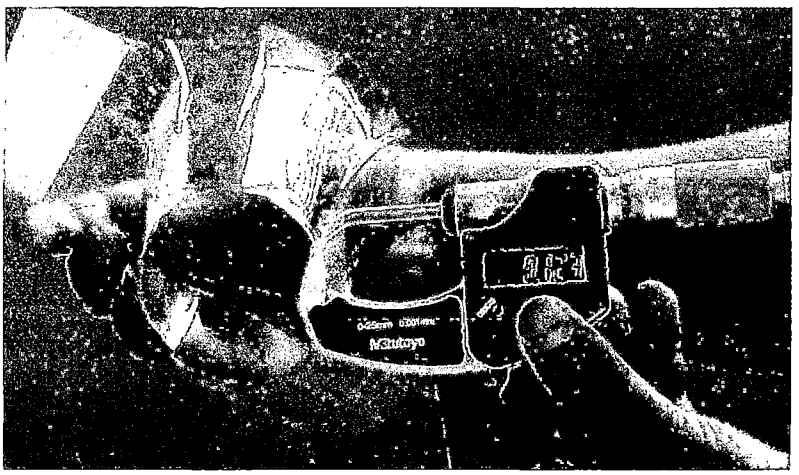


Fig. 3.25 Modelo N° 3 "Vaso"



Medición del espesor de las paredes del modelo N° 3 "Vaso".

Fig. 3.26 Medición de espesor "Vaso"

Tabla 3.8
Modelo 3: Vaso plástico

N°	Potencia (%)	Tiempo (Seg.)	T° Lamina (°C)	Medición espesor Base (µm)		
				1	2	3
1	130	10	113	0.112	0.116	0.112
2	130	10	116	0.107	0.107	0.108
3	130	15	123	0.118	0.118	0.113
4	130	15	124	0.109	0.116	0.115
5	130	15	128	0.114	0.107	0.112
6	130	20	140	0.085	0.085	0.085
7	130	20	132	0.104	0.097	0.103
8	130	20	135	0.098	0.097	0.103
9	150	35	122	0.107	0.107	0.105
10	150	35	124	0.109	0.110	0.109
11	150	35	119	0.114	0.117	0.115
12	150	40	120	0.108	0.105	0.104

Tabla 3.9

Modelo 3: Vaso plástico

N°	Potencia (%)	Tiempo (Seg.)	T° Lamina (°C)	Medición espesor Pared (µm)		
				1	2	3
1	130	10	113	0.112	0.116	0.112
2	130	10	116	0.107	0.107	0.108
3	130	15	123	0.118	0.118	0.113
4	130	15	124	0.109	0.116	0.115
5	130	15	128	0.114	0.107	0.112
6	130	20	140	0.085	0.085	0.085
7	130	20	132	0.104	0.097	0.103
8	130	20	135	0.098	0.097	0.103
9	150	35	122	0.107	0.107	0.105
10	150	35	124	0.109	0.110	0.109
11	150	35	119	0.114	0.117	0.115
12	150	40	120	0.108	0.105	0.104

3.6.7 Modelo N° 4

Tabla 3.10

Modelo 4: Fuente

N°	Potencia (%)	Tiempo (Seg.)	T° Lamina (°C)	Observación
1	130	20	130	tope mas o menos, no pliegues
2	130	20	138	buen tope sin pliegues
3	130	20	135	tope mas o menos, no pliegues
4	130	30	139	buen tope, no pliegues, leve cristalización
5	130	30	139	buen tope, no pliegues
6	130	30	138	excelente tope, no pliegues
7	130	30	141	excelentisimo tope, no pliegues

3.6.8 Mediciones efectuadas

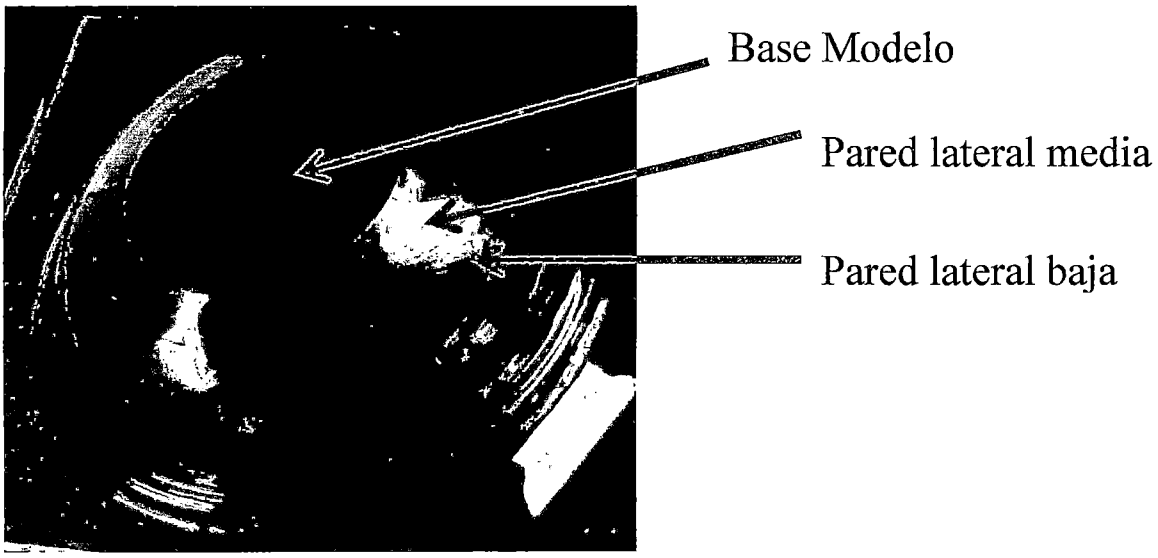
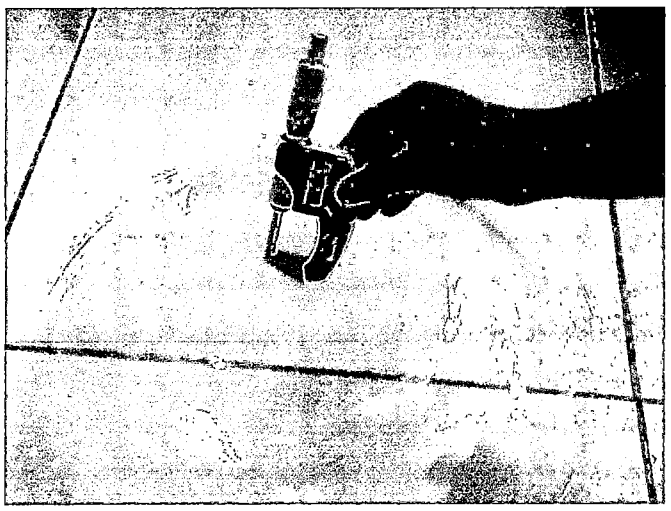


Fig. 3.27 Modelo N° 4 "Fuente"



Medición de espesor de la parte superior de la lámina termoformada.

Fig. 3.28 Medición de espesor "Fuente"

Tabla 3.11

Modelo 4: Fuente

N°	Potencia (%)	Tiempo (Seg.)	T° Lamina (°C)	Medición espesor Base (µm)		
				1	2	3
1	130	20	130	0.164	0.155	0.157
2	130	20	138	0.137	0.141	0.141
3	130	20	135	0.136	0.142	0.146
4	130	30	139	0.144	0.141	0.143
5	130	30	139	0.147	0.143	0.145
6	130	30	138	0.143	0.148	0.152
7	130	30	141	0.148	0.151	0.148

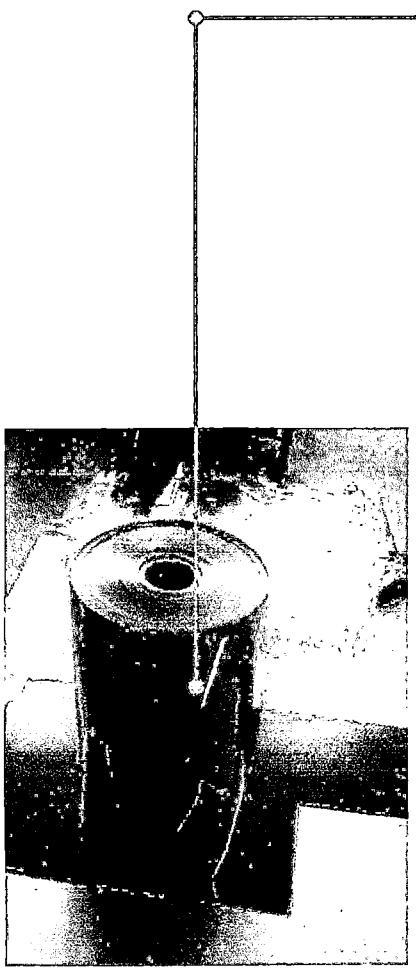
Tabla 3.12

Modelo 4: Fuente

N°	Potencia (%)	Tiempo (Seg.)	T° Lamina (°C)	Medición espesor Pared Lateral media (µm)		
				1	2	3
1	130	20	130	0.181	0.150	0.163
2	130	20	138	0.140	0.169	0.164
3	130	20	135	0.160	0.140	0.161
4	130	30	139	0.157	0.132	0.134
5	130	30	139	0.156	0.136	0.145
6	130	30	138	0.134	0.150	0.163
7	130	30	141	0.150	0.182	0.167

Tabla 3.13						
Modelo 4: Fuente						
N°	Potencia (%)	Tiempo (Seg.)	T° Lamina (°C)	Medición espesor Pared Lateral baja (µm)		
				1	2	3
1	130	20	130	0.176	0.137	0.131
2	130	20	138	0.149	0.169	0.172
3	130	20	135	0.178	0.151	0.175
4	130	30	139	0.163	0.161	0.156
5	130	30	139	0.167	0.169	0.149
6	130	30	138	0.158	0.141	0.153
7	130	30	141	0.127	0.157	0.143

3.6.9 Medición espesor de la lámina de PET



N°	MEDIDA (µm)
1	0.204
2	0.203
3	0.203
4	0.199
5	0.195
6	0.202
7	0.210
8	0.209
9	0.200
10	0.199
11	0.210
12	0.207
13	0.205
14	0.208
15	0.207
16	0.206
17	0.200
18	0.197
19	0.200
20	0.202
21	0.200

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Condiciones Iniciales de Experimentación

Luego de haber hecho una serie de pruebas iniciales se establecieron las condiciones iniciales de la máquina de termoformado.

Tabla 4.1

Potencia de las resistencias	Tiempo de Termoformado
77.5 %	20-40 seg

Estas condiciones aseguran un buen termoformado evitando la cristalización del PET y por ende estropear la pieza a termoformar.

Cabe mencionar que para el presente trabajo se escogieron diferentes modelos en cuanto a forma, altura y dimensiones para establecer un punto de inicio y fijar las condiciones más optimas de trabajo que aseguren una aceptable calidad de la pieza termoformada ya que es muy importante también conseguir una buena distribución de espesores en la pieza termoformada pero también un buen acabado

También hay que considerar las limitaciones del proceso de termoformado aplicando vacío ya que algunas geometrías serían muy difíciles de conseguir mediante la técnica de termoformado aplicando vacío.

Por último el proceso de termoformado es muy variable ya que las variables a controlar pueden variar debido a problemas como el ambiente del laboratorio, efecto de calor acumulado por uso prolongado de la maquina termoformadora, irregularidad de espesor en la lamina a termoformar así como la distribución no uniforme de calor en la lámina debido a la ubicación de las resistencias, entre otros

4.2 Espesor de la lámina de PET

El grosor de la lámina de PET es de 200 μm según ficha técnica, aun así se procedió a hacer unas mediciones en una lámina de PET y estos fueron los resultados.

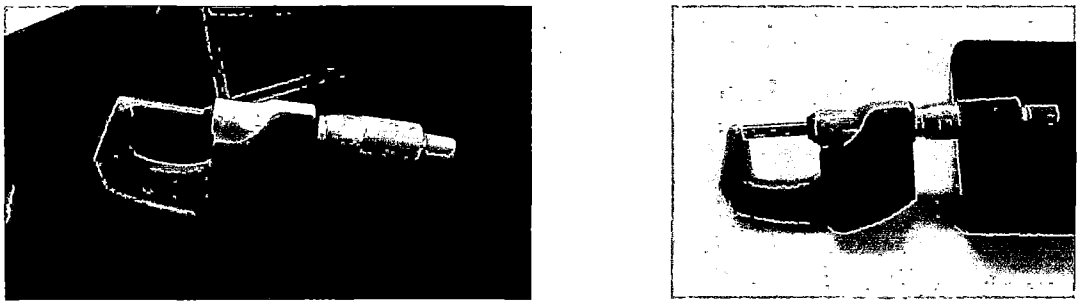


Fig. 4.1 Medición de espesor de lámina de PET

De los datos tomados se obtiene el siguiente resumen estadístico

Tabla 4.2

Datos	21
Promedio	0.203143
Mediana	0.203
Desviación estandar	0.00432765
Coef. De variacion	2.13035%
Minimo	0.195
Maximo	0.21
Rango	0.015
Stnd. skewness	0.0821587
Stnd. kurtosis	-0.853976

- De los datos se observa que efectivamente todas las mediciones hechas tienden a las 200 μm. Como indica la ficha técnica de la lámina de PET
- Se observa un coeficiente de variación (CV) del 2.1% lo que indica que los datos son bastante homogéneos
- Los valores de sesgo (skewness) y kurtosis nos indican claramente que la distribución de los datos se asemeja a una distribución normal
- La desviación estándar indica cuánto pueden alejarse los valores respecto al promedio en este caso 0.004μm del promedio que es 200μm.
- Los valores de la mediana y del promedio son bastante cercanos, un indicio más de la uniformidad de las mediciones

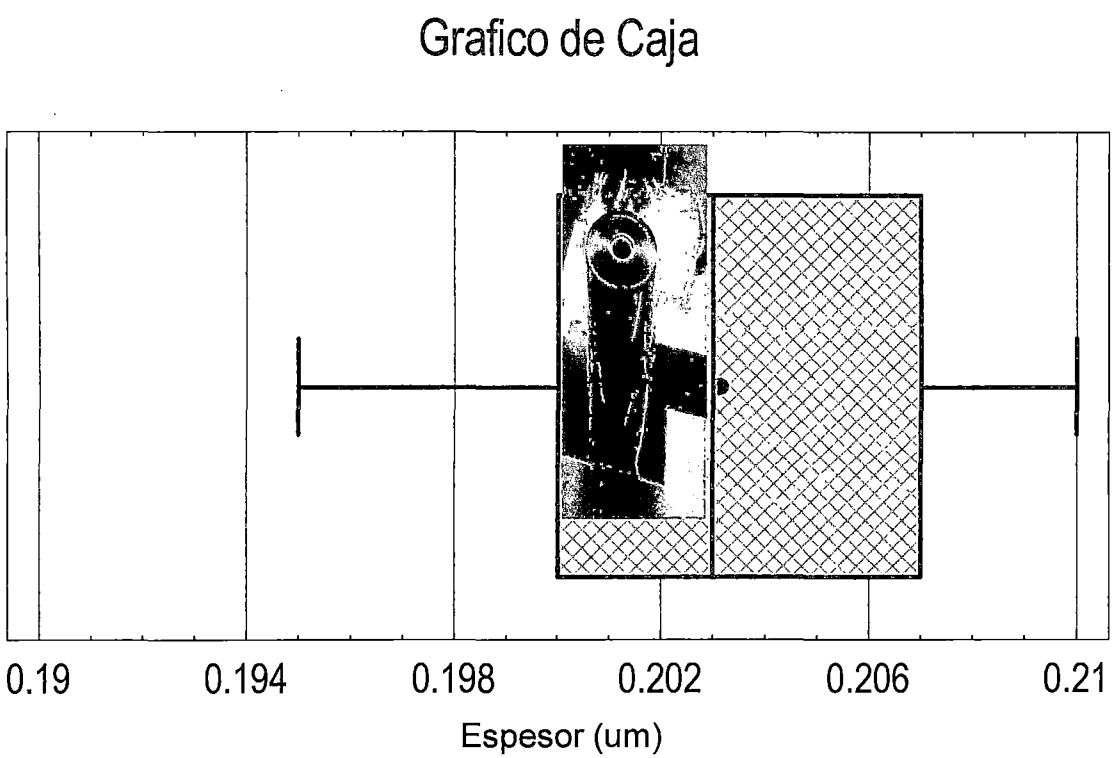


Fig. 4.2 Diagrama de caja para la variable espesor

4.3 Medición de espesor de la lámina termoformada

Luego de definir las condiciones de trabajo, se procedió a termoformar las piezas según el procedimiento mostrado en la sección 3.5, por cada pieza se tomaron 7 mediciones como se indica en la figura 4.3

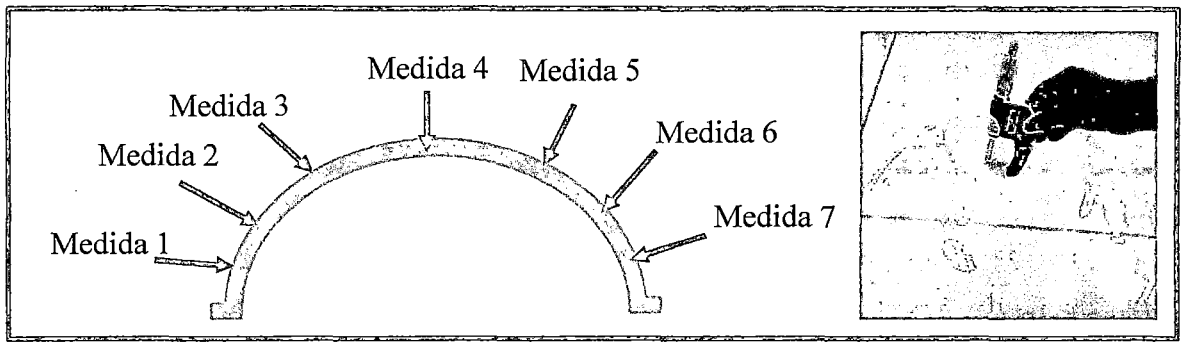


Fig. 4.3 medición de espesor de piezas termoformadas

4.4 Variación del espesor función del tiempo de calentamiento de la lámina

Se procedió a registrar el espesor de la pieza termoformada según la metodología propuesta y se apuntaron los resultados como sigue

Tabla 4.3

Potencia: 77%
Tiempo: 20 seg.
T° Promedio: 136 °C

T° Lamina	M1	M2	M3	**M4**	M5	M6	M7
135	0.147	0.143	0.164	**0.167**	0.156	0.137	0.128
136	0.148	0.153	0.170	**0.170**	0.170	0.160	0.156
137	0.153	0.156	0.171	**0.170**	0.156	0.143	0.138

Tabla 4.4

Potencia: 77%
Tiempo 25 seg.
T° Promedio: 137

T° Lamina	M1	M2	M3	M5	M6	M7	M4
137	0.144	0.157	0.161	0.173	0.159	0.151	0.176
137	0.153	0.157	0.167	0.170	0.166	0.158	0.183
137	0.133	0.143	0.163	0.166	0.149	0.140	0.167

Tabla 4.5

Potencia: 77%
Tiempo: 30 seg.
T° Promedio: 138

T° Lamina	M1	M2	M3	M5	M6	M7	M4
139	0.147	0.156	0.168	0.166	0.154	0.141	0.168
138	0.150	0.152	0.165	0.159	0.147	0.146	0.160
137	0.158	0.158	0.162	0.155	0.145	0.140	0.174

4.4.1 Variación del espesor de la pared media (M2 y M6)

Se procedió a promediar el espesor de pared media (M2 y M6) de la lámina termoformada y se graficó como función del tiempo de calentamiento de la lamina

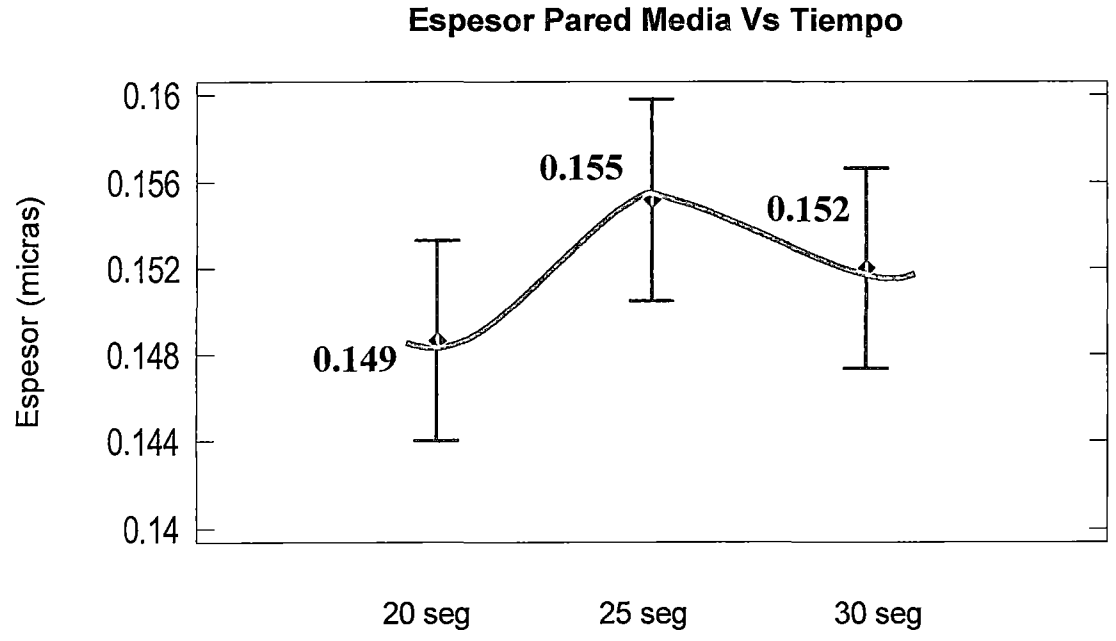


Fig. 4.4 Espesor de pared media en función del tiempo de calentamiento de lámina

- Como se puede apreciar a medida que se incrementa el tiempo de calentamiento de la lámina el espesor en general disminuye debido a que la lámina se puede deformar más.

4.4.2 Variación del espesor de pared baja (M1 y M7)

Se procedió a promediar el espesor de pared baja (M1 y M7) de la lámina termoformada y se graficó como función del tiempo de calentamiento de la lamina

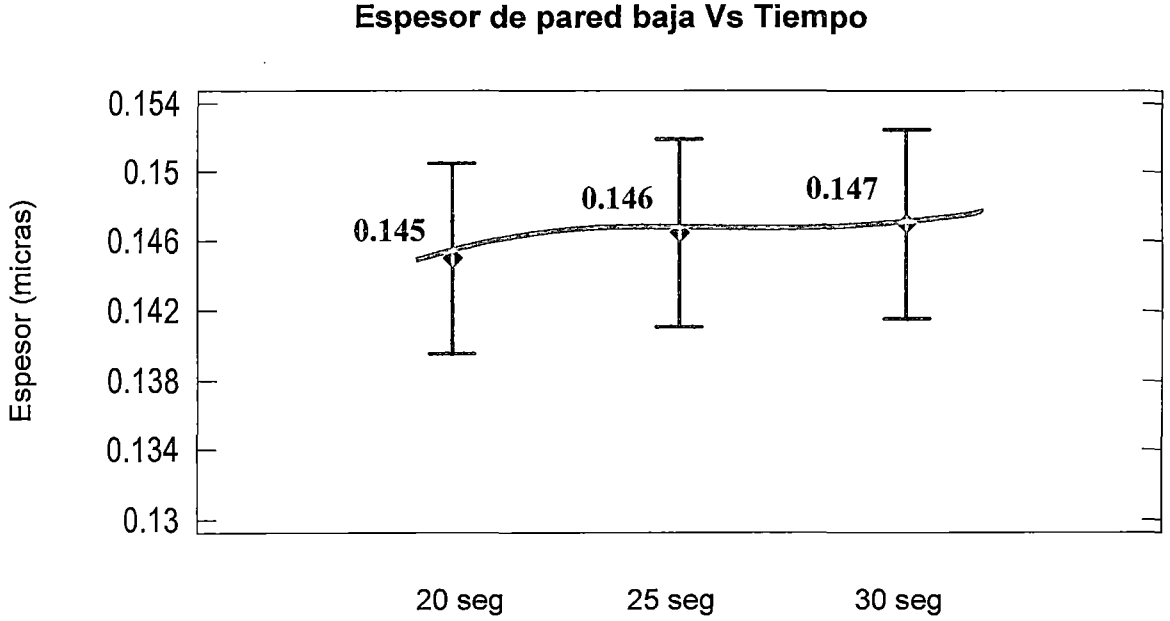


Fig 4.5 Espesor de Pared baja en función del tiempo de calentamiento de lámina

- Como se puede apreciar a medida que se incrementa el tiempo de calentamiento de la lámina a termoformar el espesor de pared baja se mantiene casi constante

4.4.3 Variación del espesor de pared alta (M3 y M5)

Se procedió a promediar el espesor de pared alta (M3 y M5) de la pieza termoformada y se graficó como función del tiempo de calentamiento de la lámina a termoformar

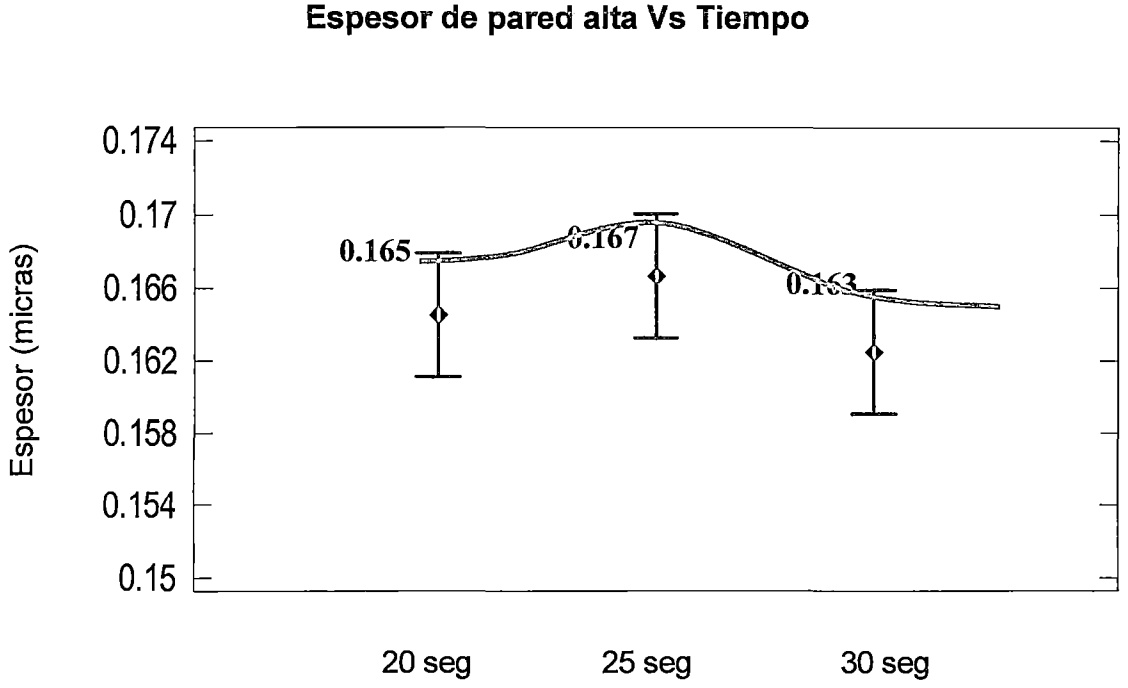


Fig 4.6 Espesor de Pared alta en función del tiempo de calentamiento de lámina

- Como se puede apreciar a medida que se incrementa el tiempo de calentamiento de la lámina el espesor de pared alta muestra un comportamiento inusual pero con características a mantenerse sin mucha variación

- Aunque los datos se pueden considerar homogéneos la tendencia es claro que a mayor tiempo de calentamiento de la lámina y por ende pero no necesariamente más temperatura es efecto es una reducción del espesor

4.4.4 Variación de espesor de la base (M4)

Se procedió a promediar el espesor de la base (M4) de la pieza termoformada y se graficó como función del tiempo de calentamiento de la lámina a termoformar

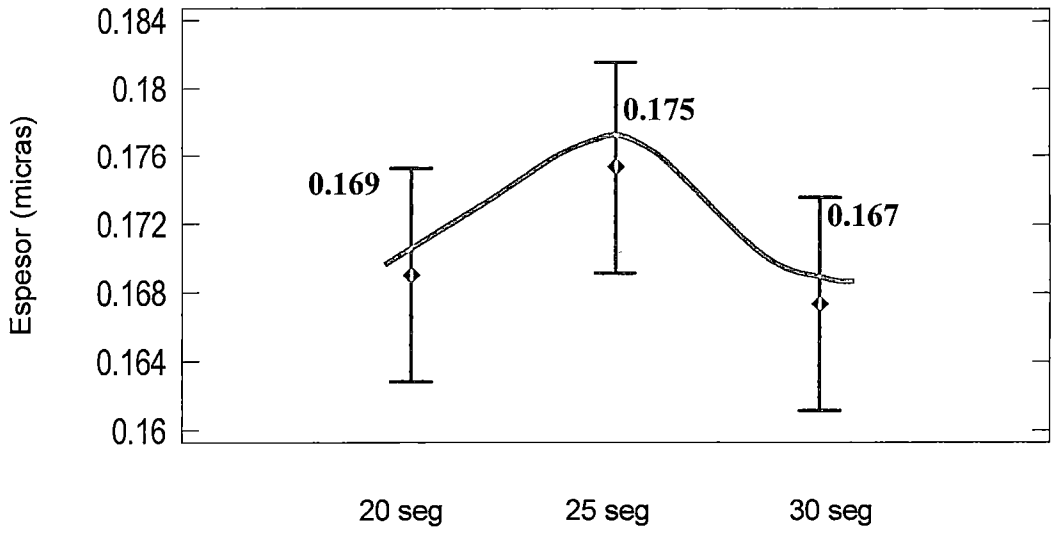


Fig. 4.7 Espesor de Pared base en función del tiempo de calentamiento de lámina

- Como se puede apreciar a medida que se incrementa el tiempo de calentamiento de la lámina a termoformar el espesor de la base muestra un comportamiento inusual indicándonos una disminución a 20 y 30 seg

- También podemos considerar los datos muy uniformes a pesar de las leves diferencias, aun así la tendencia es a disminuir a 30seg.

4.5 VARIACIÓN DEL ESPESOR EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

4.5.1 Variación del espesor de pared media en función de la temperatura

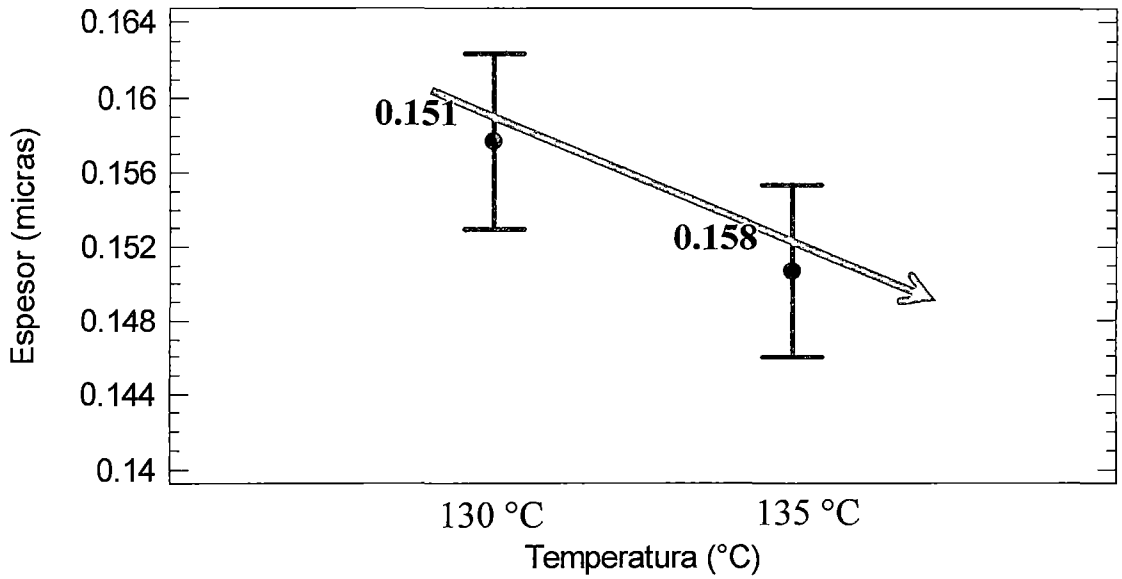


Fig. 4.8 Espesor de Pared media en función de la temperatura de la lámina

- Como se puede apreciar a medida que se incrementa la temperatura de calentamiento de la lámina el espesor de pared media disminuye aunque aun así estos promedio se pueden considerar homogéneos

- Un control más estricto sobre la temperatura es más adecuado ya que permite controlar de manera más precisa la distribución de los espesores finales como se puede observar

4.5.2 Variación del espesor de la base en función de la temperatura

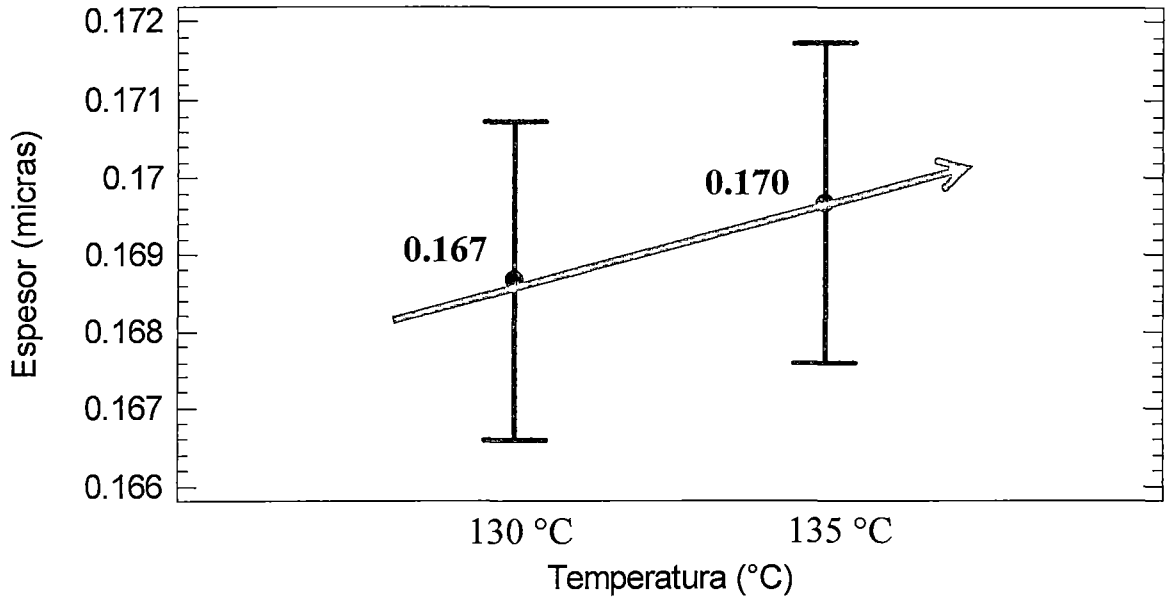


Fig. 4.9 Espesor de Pared base en función de la temperatura de la lámina

- Dado que las gráficas tienden a superponerse si las proyectamos una sobre otra en un gran porcentaje estos resultados se consideran iguales, esto es que la base no varía considerablemente en cuanto a su espesor por un cambio de temperatura de 130 – 135°C

4.6 PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE LA LÁMINA DESPUÉS DE SER TERMOFORMADA

Tabla 4.6

Potencia: 77%
Tiempo: 20 seg.
T° Promedio: 136 °C

T° Lamina	M1	M2	M3	**M4**	M5	M6	M7
135	0.147	0.143	0.164	**0.167**	0.156	0.137	0.128
136	0.148	0.153	0.170	**0.170**	0.170	0.160	0.156
137	0.153	0.156	0.171	**0.170**	0.156	0.143	0.138

PROMEDIO LAMINA = 0.155 µm
REDUCION PORCENTUAL = 22.5%

Tabla 4.7

Potencia: 77%
Tiempo 25 seg.
T° Promedio: 137

T° Lamina	M1	M2	M3	M5	M6	M7	M4
137	0.144	0.157	0.161	0.173	0.159	0.151	0.176
137	0.153	0.157	0.167	0.170	0.166	0.158	0.183
137	0.133	0.143	0.163	0.166	0.149	0.140	0.167

PROMEDIO LAMINA = 0.159 µm
REDUCION PORCENTUAL = 22%

Tabla 4.8

Potencia: 77%
Tiempo: 30 seg.
T° Promedio: 138

T° Lamina	M1	M2	M3	M5	M6	M7	M4
139	0.147	0.156	0.168	0.166	0.154	0.141	0.168
138	0.150	0.152	0.165	0.159	0.147	0.146	0.160
137	0.158	0.158	0.162	0.155	0.145	0.140	0.174

PROMEDIO LAMINA = 0.156 µm
REDUCION PORCENTUAL = 20.5%

- Como se puede apreciar la variación porcentual no supera el 30% limite considerado por algunos autores como aceptable

4.7 VARIACIÓN ESPESOR MODELO BETUN

4.7.1 Variación espesor fondo

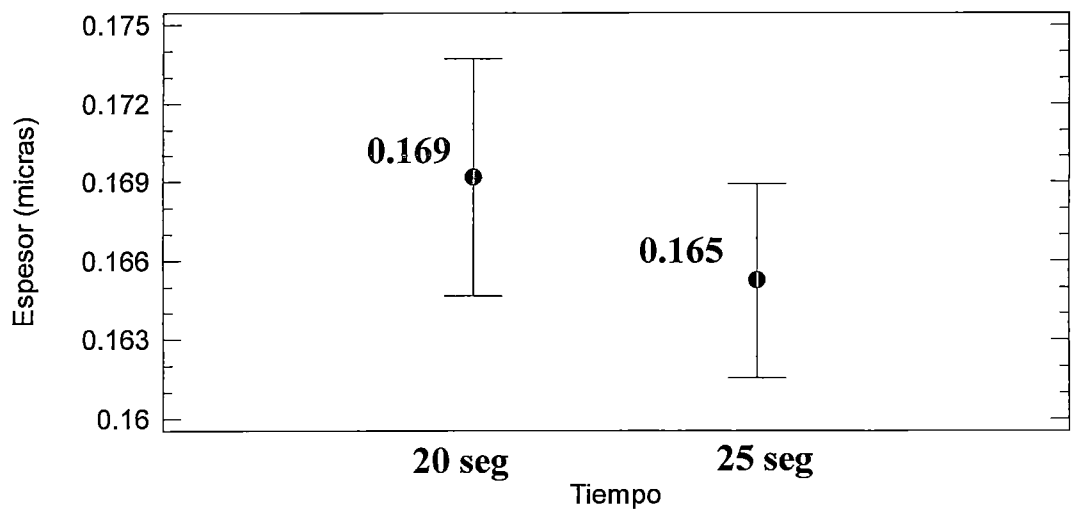


Fig. 4.10 Espesor de fondo en función del tiempo de calentamiento de la lámina

4.7.2 Variación de espesor Paredes laterales

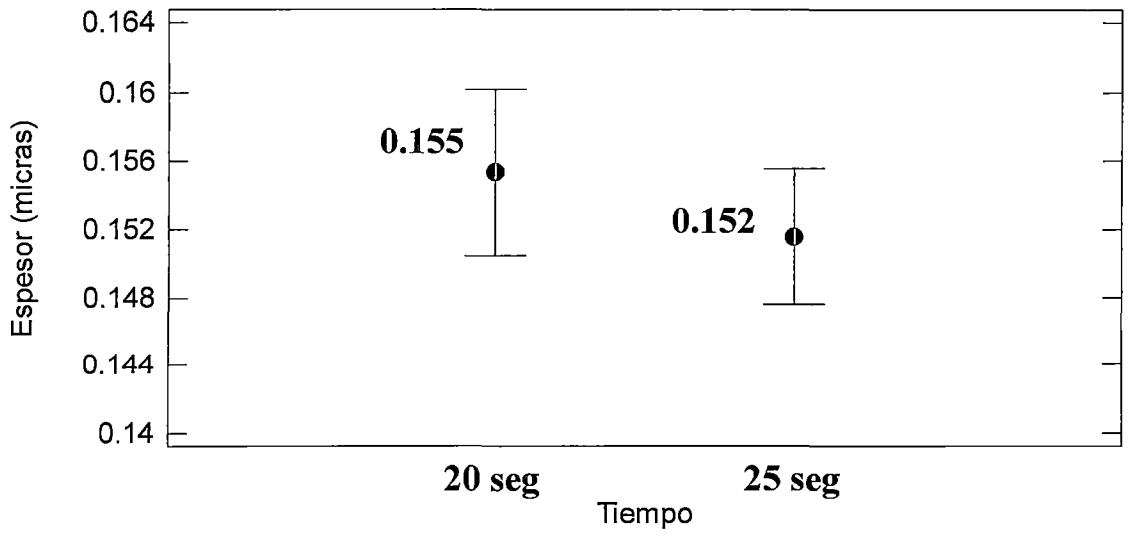


Fig. 4.11 Espesor de paredes laterales en función del tiempo de calentamiento de la lámina

4.8 VARIACIÓN ESPESOR MODELO VASO ALTO

4.8.1 Variación espesor fondo

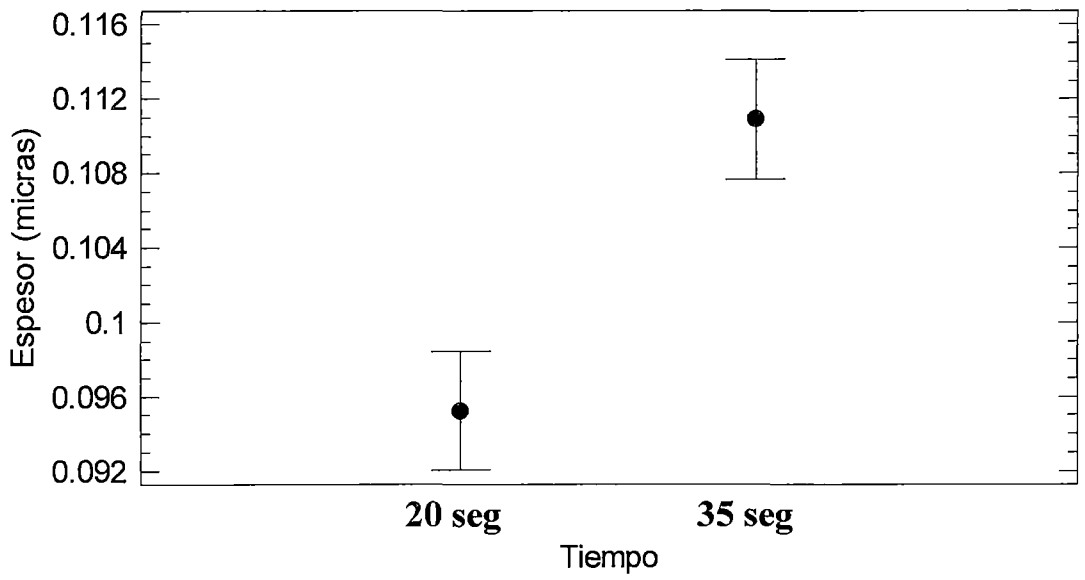


Fig. 4.12 Espesor de fondo en función del tiempo de calentamiento de la lámina

- Hay que resaltar que en este caso el hacer el ensayo hasta 35seg. no garantizo que la temperatura sea mayor que a 25 seg., extrañamente a 25 grados se logró alcanzar una temperatura mayor que a 35 seg como se puede ver en la tabla 3.7

4.8.2 Variación de espesor Paredes laterales

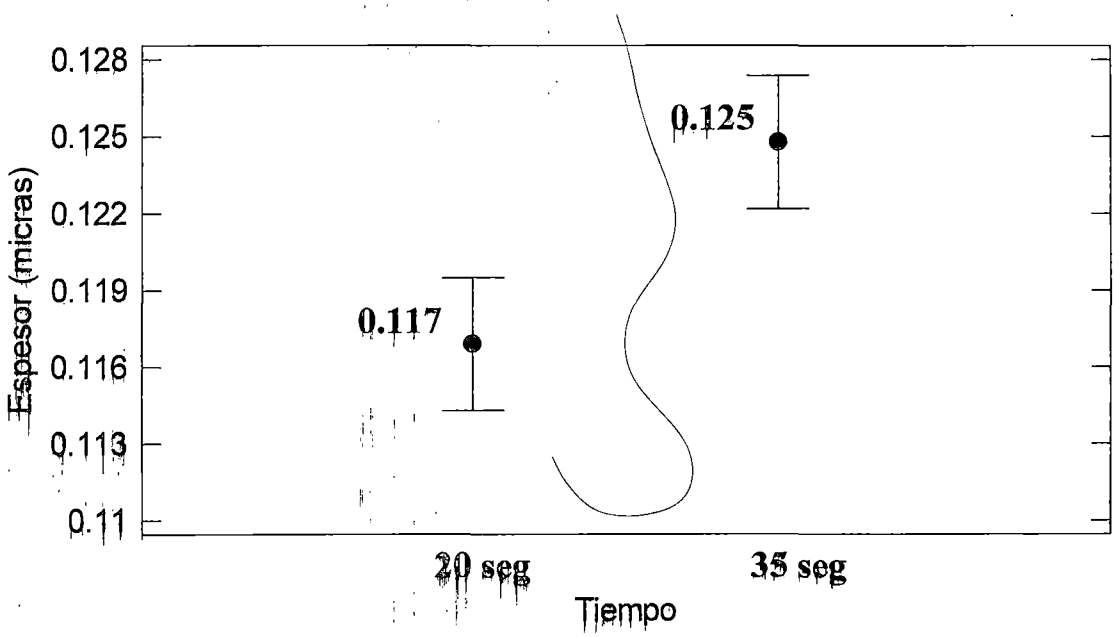


Fig. 4.13 Espesor de paredes laterales en función del tiempo de calentamiento de la lámina

- En este caso ocurrió e mismo efecto que es que a 20 seg.se consiguió una temperatura mayor que a 35seg., por eso es que a 25seg. se tiene un espesor menos que a 35seg.

4.9 VARIACIÓN ESPESOR MODELO FUENTE

4.9.1 Variación de espesor de la base

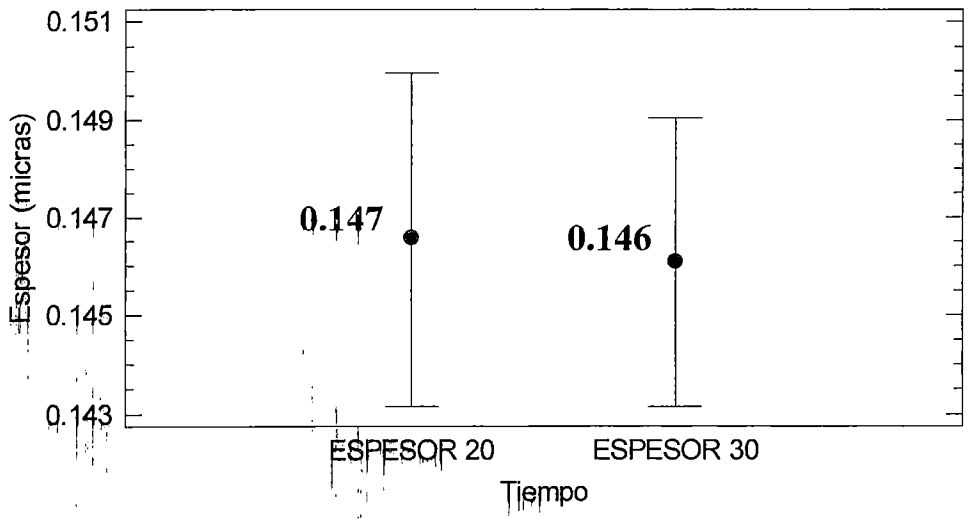


Fig. 4.14 Espesor de la base en función del tiempo de calentamiento de la lámina

- Como se puede observar en la tabla 3.10 las temperaturas a 20 y a 30seg son muy parecida corroborando una vez más que la temperatura que alcanza la lámina es de vital importancia en la distribución de espesores de la lámina a termoformar.

4.9.2 Variación de espesor de las paredes del modelo Fuente

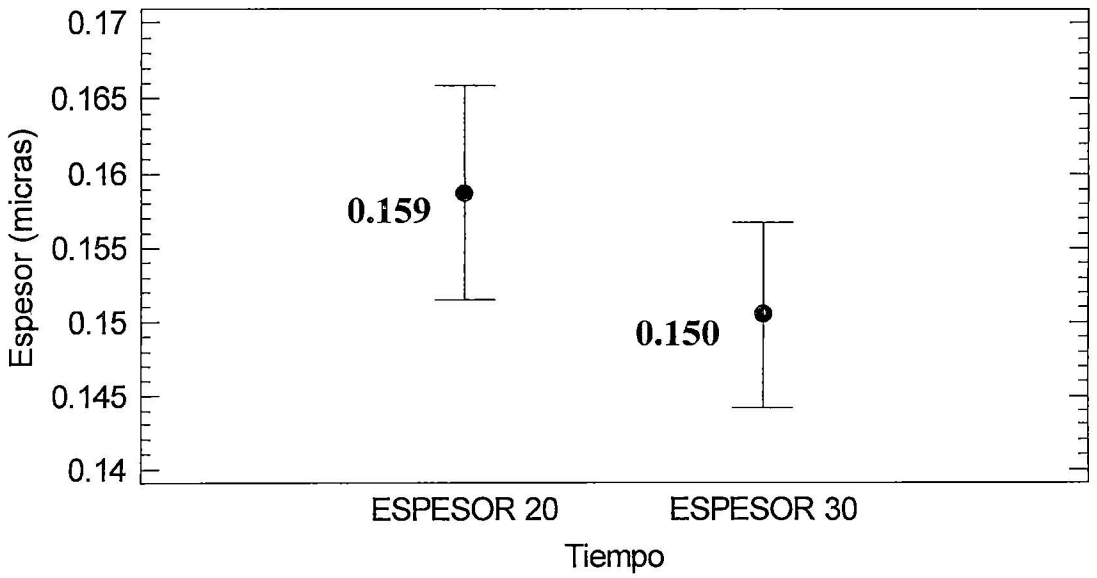


Fig. 4.15 Espesor de las paredes en función del tiempo de calentamiento de la lámina

5. CONCLUSIONES

- Como se puede apreciar en los gráficos una de las variables que más influye en la variación del espesor de la pieza termoformada es la T° de la lámina, el tiempo de calentamiento de la lámina es relativo ya que este tiempo no garantiza que se obtendrá la misma temperatura en la superficie de la lámina como se ha demostrado en el presente trabajo según los datos registrados.

- Las relaciones que se encontraron fueron las siguientes: a mayor temperatura de la lámina a termoformar el espesor tiende a disminuir en la pared media de la pieza termoformada, y en el caso de la base de la pieza termoformada permanece igual sin cambio aparente como se puede apreciar en el grafico

- Los porcentajes de reducción que se lograron fuero los siguientes:
  - Tiempo 20seg: 22.5%
  - Tiempo 25seg: 22%
  - Tiempo 30seg: 20.5%

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer estudios sobre velocidad de calentamiento para construir las curvas de calentamiento en función del tiempo necesario para calentar la lamina
- Se recomienda mejorar el sistema de vacío de tal manera de tener una adecuada distribución de calor que sea uniforme a la lámina a termoformar

7. BIBLIOGRAFIA

- Manual técnico de Termoformado, Plastiglas de México, S.A. de C.V.