



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**EVALUACIÓN A PARTIR DE  
EXPERIMENTOS SOBRE EL  
SELLADO DE AMPOLLETAS.**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO**

**P R E S E N T A**

学生

**CARLOS ALBERTO VAZQUEZ JIMENEZ**

Director de tesis:

先生

**Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich.**



CIUDAD UNIVERSITARIA  
MÉXICO, D.F. 20 DE SEPTIEMBRE DE 2008

*“Aderezarás mesa delante de mi, en presencia de mis angustiadores.”*

*“Ungiste mi cabeza con aceite, mi copa está rebosando.”*

*“Ciertamente el bien y la misericordia me seguirán todos los días de mi vida.”*

*“Y en la casa de Jehová moraré por largos días.”*

*Salmos 23: 5-6*

## AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS.

- ❖ A **“DIOS”** por permitirme vivir hasta ahora... Sus bendiciones han sido muchas...
- ❖ A mis padres **“Erasto”** y **“Aurora”** por su invaluable apoyo y amor. Creo que ha sido el mejor regalo que Dios pudo darme para encarar con valor el mundo.
- ❖ A mi hermana **“Karen”** (Chorlo) por su excelente consejo de aplicar el yeso que utilizan los dentistas como aislante térmico. Se me facilitó mucho resolver este problema. ☺
- ❖ A mi hermana **“Patricia”** por su compañía y atención. Platicando con ella pude encontrar mejores soluciones para la realización de este trabajo. ☺
- ❖ Al Dr. **“Alejandro C. Ramirez Reivich”** por enseñarme que el verdadero conocimiento proviene de la curiosidad por descubrir cosas nuevas. Que la investigación es como explorar una selva donde fácilmente te puedes perder, sin embargo, cuando logras salir es sinónimo de que aprendiste algo nuevo y único. Pero sobre todo, aprendí una lección de vida, la lección de **“humildad”**. (P)
- ❖ A M. en I. **“Gustavo Olivares”** por ser un excelente amigo. Muchos fueron los consejos que me diste durante esta etapa de la vida. No olvidaré tu compañía en la SOMIM de Acapulco y en el Cervantino. Te deseo lo mejor...
- ❖ A **“Iván”** por su amistad. Conocerte en la facultad me llevó a enfrentar retos que jamás había imaginado. Por tus consejos y sobre todo, en depositar tu confianza en mí para estar a lado de tus seres queridos. **“Lucero” TQM.** (U)
- ❖ A **“Oskar”, “Premolar”, “Sam”, “Patito”** (Cuac Cuac) y **“Monse”** por estar conmigo cada viernes en las canchas de Medicina para reír, reír, reír, reír y mas reír de la vida. Eso me hizo sentir tan joven. ¡Arriba la banda turistera!
- ❖ A **“Alejandra”** por su inigualable conocimiento de la palabra. Ella fue quien le dio sentido a mis ideas para escribir mi tesis. Su sensibilidad por las palabras es algo que atesoraré con mucho cariño. No olvidare los WOWS de iluminación que le llegaban a su celular mientras trabajábamos. Fue algo genial...
- ❖ A **“Newton”, “Mike”, “Vanne”** y **“Tagle”**. La Tropa Gui- Niu (como se escriba) por su amistad, risa y aventuras. Jamás olvidaré esos tiempos.
- ❖ A toda la padilla de las canchas: **“Güero”, “Sue”, “Bark”, “Josué” “Mario” “Hiram”, “Jess”, “Andrea”, “Dona”, “Bety”**. Que buenas retas de Basquetball...
- ❖ A **“Liz”, “José Juan”, “Mary Carmen”, “Eloisa”** y **“Oliver”**. Su compañía en el cubículo fue muy agradable. ¡Que buenos proyectos de fotos he hecho con **“Lalo”!**
- ❖ A la **“UNAM”** por sus invaluable oportunidades que ofrece y regala. No cabe duda que Ciudad Universitaria es la más bella cuna que un estudiante pueda tener... Te abraza con verdadero amor...



*DEDICADO CON MUCHO CARIÑO EN MEMORIA  
DE MÍ ABUELITA ADELA. †*



*GRACIAS AMIGOS.* 🙌

## PENSAMIENTOS

*No puedes conectar los puntos mirando hacia adelante; solamente mirando hacia atrás. Así que tendrás que confiar que se conectarán en el futuro. Porque creer en que se conectarán te dará la confianza de seguir tu corazón.*

*En ocasiones la vida te golpea con un ladrillo en la cabeza. No pierdas la fe.*

*Tienes que encontrar eso que amas. Y es tan válido para tu trabajo como para tus amores. Tu trabajo va a llenar gran parte de tu vida y la única manera de sentirte realmente satisfecho es hacer aquello que crees es un trabajo genial. Y la única forma de hacer un trabajo genial es amando lo que haces. Si todavía no lo has encontrado, sigue buscando. No te detengas. Al igual que con los asuntos del corazón, lo sabrás cuando lo hayas encontrado. Y al igual que en las relaciones geniales, mejorará con el paso de los años. Así que sigue buscando hasta que lo encuentres. No te conformes.*

***“Si vives cada día como si fuera el último, es muy probable que algún día hagas lo correcto”.***

*“Si hoy fuera el último día de mi vida ¿Querría hacer lo que voy a hacer hoy?” Cada vez que la respuesta ha sido “No” por varios días seguidos, sabía que necesitaba cambiar algo.*

*Recordar que vas a morir es la mejor forma que conozco de evitar la trampa de pensar que tienes algo que perder. Estás desnudo y por tanto no hay razón para no seguir tu corazón.*

*Tu tiempo es limitado, así que no lo gastes viviendo la vida de otra persona. No te dejes atrapar por dogmas, que es vivir según los resultados del pensamiento de otros. No dejes que el ruido de las opiniones de los demás silencien tu propia voz interior. Y más importante todavía, ten el coraje de seguir tu corazón e intuición, que de alguna manera saben lo que realmente quieres llegar a ser. Todo lo demás es secundario.*

***“Mantente hambriento. Mantente loco”.***

*Fragmentos del discurso de Steve Jobs en la Universidad de Stanford.*

***“Por todos lados encuentras el movimiento de la vida.”***

*Mi abuelo Narciso Salomón.*

***“Sólo hay una regla, y es que todo estudiante es un caballero.”***

*Gral. Robert E. Lee.*

***“¿Conocerás como la semilla es plantada?” “Todo tu tiempo has estado creciendo demasiado aprisa. Sin saberlo...”***

*TARKUS – Emerson Lake & Palmer.*

## INDICE

<b>Introducción.....</b>	<b>9</b>
<b>Objetivos del trabajo.....</b>	<b>10</b>
<b>Capítulo 1. Fronteras del caso de estudio.....</b>	<b>11</b>
1.1 Especificaciones de sellado.....	14
1.2 Etapas de la ampollita en el caso de estudio.....	15
1.3 Antecedentes teóricos. ....	16
1.3.1 Comportamiento de los materiales plásticos al calor.....	16
1.3.2 Fundamentos teóricos sobre la transferencia del calor. ....	18
1.3.2.1 Ecuación fundamental de transferencia de calor por convección.....	19
1.3.2.2 Ecuación fundamental de transferencia de calor por conducción.....	21
1.3.2.3 Ecuación fundamental de transferencia de calor por radiación.....	23
1.4 Especificaciones de la ampollita y el PVC (Policloruro de vinilo).....	25
1.4.1 Dimensiones de la ampollita de PVC.....	26
1.5 Parámetros en la experimentación.....	27
1.6 Diagrama síntesis sobre antecedentes teóricos.....	29
<b>Capítulo 2. Diseño conceptual del proceso de sellado.....</b>	<b>30</b>
2.1 Cuatro funciones principales en el proceso de sellado.....	30
<b>Capítulo 3. El banco de pruebas.....</b>	<b>32</b>
3.1 Principios de diseño en el banco de pruebas.....	33
3.2 Los procesos de sellado en el banco de pruebas.....	33
3.2.1 Proceso de sellado por convección.....	33
3.2.2 Proceso de sellado por radiación ....	35
3.2.3 Proceso de sellado por conducción ....	36
3.3 Sistema neumático para el accionar de los procesos de sellado.....	39
3.4 La sujeción de la ampollita.....	40

3.5 El termómetro digital.....	41
3.6 Notas finales sobre el banco de pruebas.....	42
<b>Capítulo 4. La experimentación.....</b>	<b>43</b>
4.1 Colocación de los sensores de temperatura.....	44
4.2 Primera serie de experimentos en el proceso de sellado por convección.....	46
4.3 Segunda serie de experimentos en el proceso de sellado por convección.....	48
4.4 Tercera serie de experimentos en el proceso de sellado por conducción.....	49
4.5 Cuarta serie de los experimentos en el proceso de sellado por radiación.....	51
4.6 Notas finales respecto a los experimentos.....	52
<b>Capítulo 5. Los resultados de la experimentación.....</b>	<b>53</b>
5.1 Los resultados de la primera serie de experimentos.....	53
5.2 Los resultados de la segunda serie de experimentos.....	59
5.3 Los resultados de la tercera serie de experimentos.....	62
5.4 Los resultados de la cuarta serie de experimentos.....	68
5.5 Exploración del comportamiento de las fuentes de calor.....	72
<b>Capítulo 6. Exploración del sellado de ampollitas en máquinas.....</b>	<b>75</b>
6.1 Funciones involucradas en el proceso de sellado de las maquinas.....	75
6.2 Diseño de las maquinas selladoras de ampollitas.....	76
6.2.1 La primer máquina de sellado de ampollitas.....	77
6.2.2 La segunda máquina de sellado de ampollitas.....	80
6.2.3 La tercera máquina de sellado de ampollitas.....	83
6.3 Adquisición de datos experimentales en las máquinas.....	85
6.3.1 Datos experimentales de la Maquina 2.....	85
6.3.2 Comportamiento de los sistemas de calentamiento en las máquinas. ....	88
<b>Capítulo 7. Las conclusiones.....</b>	<b>93</b>
7.1 Sobre el diseño conceptual del sellado de ampollitas.....	93
7.2 Los experimentos.....	95
7.2.1 Experimentos del proceso de sellado por convección.....	96
7.2.2 Experimentos del proceso de sellado por conducción.....	97

7.2.3 Resultados de los experimentos por radiación.....	98
7.3 Sobre la punta de la ampolleta.....	98
7.4 Sobre el proceso de sellado en las máquinas.....	105
<b>Bibliografía.....</b>	<b>107</b>
<b>Apéndice A. Datos generales de la ampolleta.....</b>	<b>108</b>
<b>Apéndice B. Dispositivos del banco de pruebas.....</b>	<b>109</b>

## INTRODUCCIÓN.

El uso de los materiales plásticos en la fabricación de contenedores para el almacenamiento de líquidos es rentable en nuestros días debido a que los medios para su elaboración son a bajos costos de producción en comparación a otros materiales. Para esto la ingeniería de diseño ha desarrollado medios y herramientas a través del conocimiento, control y mejora de los factores que intervienen en el moldeado de los plásticos haciendo cumplir las necesidades y restricciones de cada empresa.

Una de estas necesidades es sellar los contenedores plásticos sin permitir que el líquido salga de su interior, lo cual hace importante analizar las formas de lograr un sellado sin defectos de fuga para lo cual en este trabajo se estudiará el caso particular de ampollitas hechas de Policloruro de Vinilo (PVC) que contienen tratamiento líquido para el cabello, la cual es sellada mediante un proceso que utiliza un dado para moldear la punta de una forma específica. Se trabajará con una ampollita rediseñada donde el diámetro de la boca de su punta ha sido aumentado 2 veces para permitir el llenado volumétrico por medio de la inserción de una aguja y posteriormente, sellarla utilizando el proceso actual con la finalidad de estudiar las complicaciones que surgen a partir de este rediseño.

Para evaluar los impactos sobre el sellado de la nueva ampollita se realizaron diferentes tipos de experimentos utilizando tres principios de transferencia de calor:

- Convección.
- Conducción.
- Radiación.

Estos principios serán desarrollados en los posteriores capítulos para encontrar la mejor forma de calentar la punta de la ampollita durante el proceso de sellado.

Como antecedente para el estudio se tiene la experiencia de dos generaciones anteriores de máquinas selladoras de ampollitas de PVC. Estas se tomarán como punto de referencia para comparar e interpretar los resultados de los experimentos realizados. El objetivo general de esta tesis es encontrar los factores involucrados y más relevantes para sellar la nueva ampollita con la finalidad de generar información preliminar en el estudio y desarrollo para el diseño de una nueva máquina selladora de ampollitas plásticas.

## **OBJETIVOS DEL TRABAJO.**

1. Desarrollar experimentos que permitan determinar los factores necesarios utilizando tres principios básicos de calentamiento (Convección, conducción y radiación) que ayuden a crear un nuevo sistema de sellado de ampollitas de material plástico.
2. Diseñar y construir un banco de pruebas para simulación un proceso de sellado de ampollitas plásticas.
3. Generar datos experimentales aplicando tres principios básicos de calentamiento (convección, conducción y radiación).
4. Encontrar parámetros de diseño comparativos con la finalidad de comparar los sistemas de calentamiento.

**CAPITULO 1. FRONTERAS DEL CASO DE ESTUDIO.**

*Si tratamos de iniciar en cualquier punto, no llegaremos a nada*

*“The Selection of Design” Glegg [1].*

Antes de realizar un análisis exhaustivo de un problema en particular es importante determinar un punto de arranque. Si se contempla todos los aspectos que circundan al problema se corre el riesgo de no llegar a un punto en específico por lo tanto es necesario establecer límites para restringir el análisis y llegar a la solución del problema con mayor claridad, de lo contrario es posible que el caso de estudio no consiga resultados concisos.

El caso de estudio de este trabajo circunda en el sellado de ampollitas hechas de PVC para el almacenamiento de productos de tratamiento para el cabello. Se tiene como antecedente la utilización de una ampollita donde la sección de la punta tiene un diámetro estrecho de 1.9 [mm] por lo que para verter el líquido se aplica un proceso de llenado al vacío y posteriormente se cierra el envase utilizando un dado como molde que le da forma y acabado estético. Por las condiciones en que la ampollita es llenada queda líquido en la punta de la ampollita dando como resultado un sellado con defectos de fuga. Como etapa intermedia, las ampollitas después de ser llenadas, la punta se seca de líquido y posteriormente pasan hacia un proceso de sellado, sin embargo gran número de ampollitas aún llegan a tener defectos de fuga en el sellado.

Se rediseñó la ampollita con la finalidad de modificar el proceso de llenado mediante la inserción de una aguja evitando así el contacto del líquido con la punta de la ampollita. Para esto se aumentó el diámetro de la punta a un tamaño dos veces mayor (4.1 [mm]) que el actual. Es a partir de este rediseño que surgió la necesidad de realizar experimentos para observar si es posible aplicar el proceso actual de sellado en la nueva ampollita.

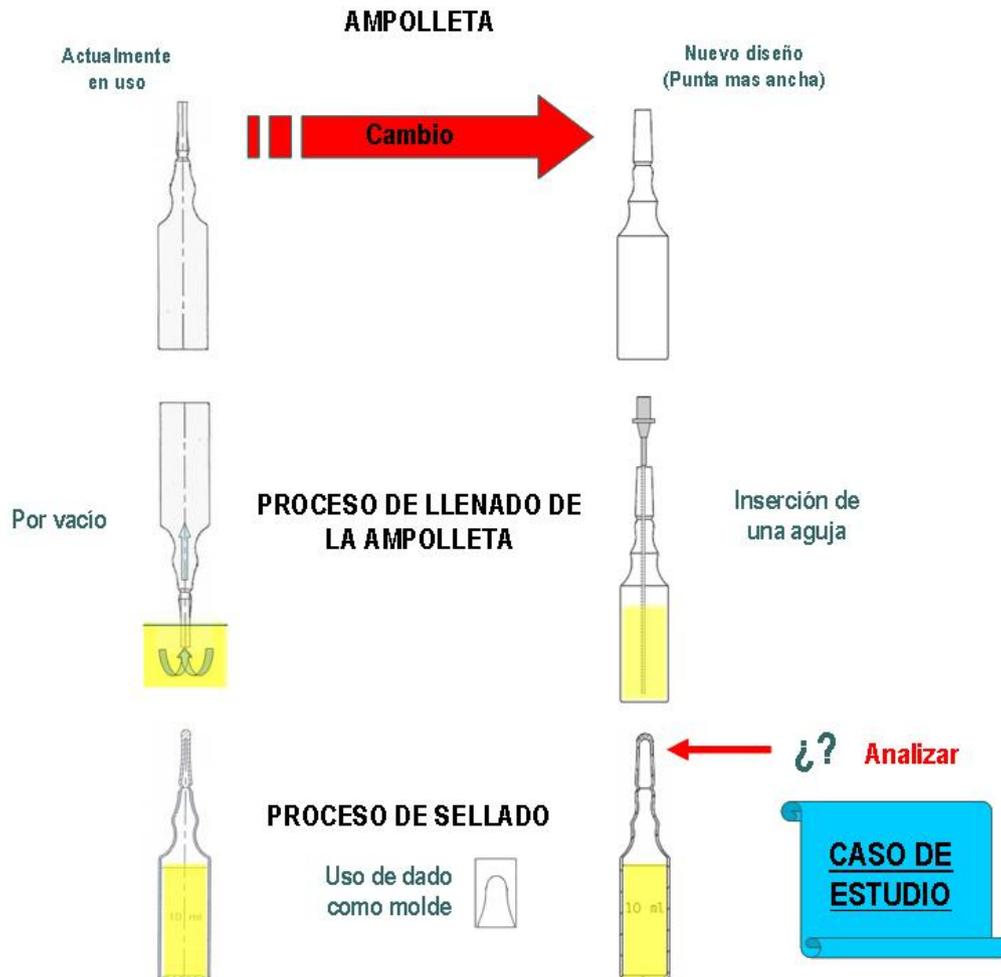


Figura 1. Aspecto que circundan a la ampolleta plástica.

La finalidad del sellado es contener los líquidos sin permitir fuga alguna. Sin embargo pasar de una ampolleta abierta a una sellada, es necesario determinar los factores que intervienen en el sellado de la nueva ampolleta siendo este el objetivo fundamental para la realización de los experimentos. Para alcanzar dicho objetivo se establecen las siguientes restricciones en el análisis:

- *No se desarrollarán nuevos métodos de sellado de ampolletas;* se utilizará el mismo proceso de sellado, un dado cuya función es moldear la punta de la ampolleta, con un desplazamiento lineal perpendicular con respecto a la ampolleta, de fuerza constante y con un giro en sentido horario (Ver Figura 2):
- *No se analizará la parte del llenado de la ampolleta;* se considerará que la punta de la ampolleta esta libre de líquido.

- *El diseño de la ampollita en que se realizarán los experimentos ya está determinado; durante el desarrollo de este trabajo se utilizará un solo tipo de ampollita. (Ver Apéndice A)*
- *Se trabajará con un solo material plástico; Policloruro de Vinilo (PVC); este trabajo será el inicio del estudio sobre el sellado para esta particular ampollita, pues se pretende que a futuras etapas de investigación se trabaje con nuevos diseños hechos de otros materiales plásticos.*
- *Se experimentará en la parte superior de la ampollita sin observar sus demás secciones (Ver figura 3).*



Figura 2. Restricciones en el proceso de sellado.



Figura 3. Límites del caso de estudio.

Para sellar la nueva ampollita es necesario someterla a un proceso compuesto por los siguientes pasos:

- 1 *Sujeción de la ampollita:* El número de ampollitas así como su agrupamiento esta determinado por la configuración de la máquina que ejecuta el proceso de sellado. Durante el desarrollo de los experimentos se establece que se manipulará una sola ampollita pues con esto se pretende simplificar el estudio analizando los factores involucrados en el sellado de una ampollita.
- 2 *Calentamiento:* Para lograr el sellado de la ampollita el material que conforma la punta debe someterse a la exposición de calor para que alcance ciertas temperaturas y ser moldeado a una forma específica. Los modos de calentamiento en los cuales se realizarán los experimentos son los siguientes:
  - *Convección:* La transferencia de calor se efectuara mediante el calentamiento del aire por medio de un dispositivo, y ser dirigido hacia la punta de la ampollita.
  - *Conducción:* La transferencia de calor se efectuará mediante el contacto entre la punta de la ampollita y el dado molde hecho de aluminio calentado por una resistencia eléctrica.
  - *Radiación:* La transferencia de calor se efectuará al exponer la punta de la ampollita a una resistencia eléctrica.

Se pretende determinar con los experimentos la mejor forma de calentar la punta de la ampollita en el proceso de sellado.

- 3 *Sellado y conformado de la ampollita:* Este paso esta determinado por el proceso actual de sellado. Será un solo tipo de dado que se utilizará durante los experimentos. (Ver Apéndice A).

## 1.1 ESPECIFICACIONES DE SELLADO

La punta de la ampollita se considera sellada si cumple las siguientes tres especificaciones (Ver figura 4):

1. Que se tenga una unión uniforme del material en todo el perfil de la punta. Esto se comprueba haciendo pasar un haz de luz para observar que no haya marcas divisoras dentro del material con la finalidad de que no exista fugas.

2. Que la punta de la ampolleta tenga la geometría determinada por el dado que funciona como molde con la finalidad de que se tenga una apariencia estética.
3. Que el material mantenga la transparencia y su aspecto sea semejante al vidrio para fines estéticos.

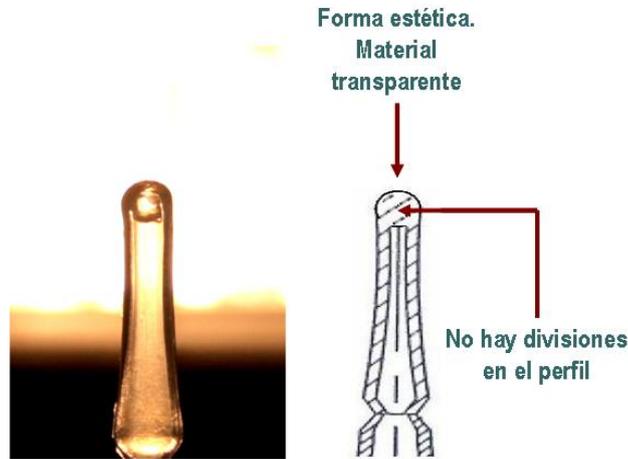


Figura 4. Sellado de la ampolleta.

### 1.2 ETAPAS DE LA AMPOLLETA EN EL CASO DE ESTUDIO.

Para determinar los factores más significativos en el proceso de sellado se establecen dos etapas por las cuales pasa la ampolleta en el caso de estudio (Ver figura 5).

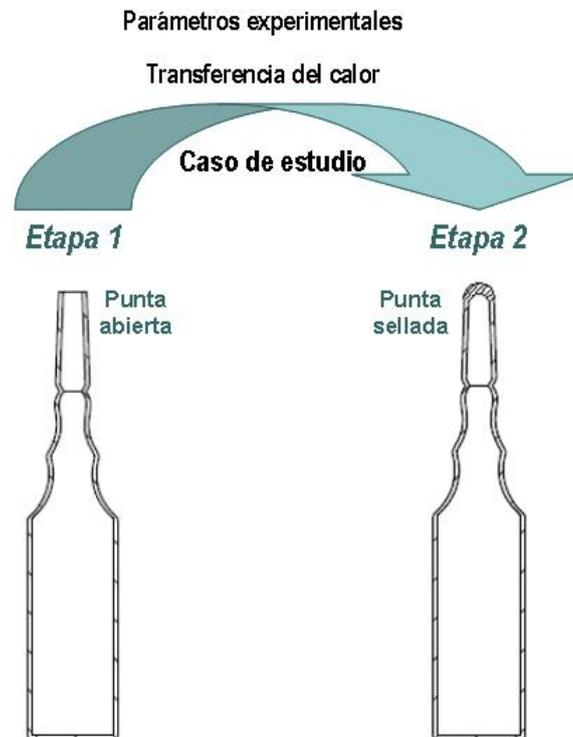


Figura 5. Etapas del estudio

- *Etapa 1:* La ampollita con la punta abierta. Es la parte inicial en el estudio, En este momento el material no ha sido expuesto anteriormente a ningún otro proceso de manipulación más que en la elaboración de la propia botella mediante un proceso de moldeo por extrusión-soplo.
- *Etapa 2:* Se tiene la punta de la ampollita sellada. Es la parte final del estudio.

El cambio de la etapa 1 a la etapa 2 es el momento donde el caso de estudio interviene. Los medios tecnológicos para generar calor, la teoría de transferencia del calor y la experimentación serán parte esencial de este trabajo.

Se conoce que el moldeo de los materiales plásticos se efectúa por procesos donde la exposición al calor es el principio más importante y fundamental para que el material se plastifique y fluya para darle forma sobre el molde. [2] Los principios de transferencia de calor por convección, conducción y radiación se analizarán a partir de la base teórica de los principios de transferencia de calor, desarrollados de manera elemental para descubrir los primeros parámetros experimentales para cuantificar el proceso de sellado.

### 1.3 ANTECEDENTES TEÓRICOS.

#### 1.3.1 Comportamiento de los materiales plásticos al calor.

Para lograr el sellado de la ampollita es necesario entender como realizar el formado en los materiales plásticos. En operaciones de moldeo se prepara el material empleando pasos de calentamiento donde a ciertas temperaturas se obtiene las condiciones necesarias para darle formas diversas. Como lo mencionan *Zehev y Costas* [2], el proceso que maneje un rango de temperatura apreciablemente superior a la *temperatura de transición vítrea* " $T_g$ "<sup>1</sup> para polímeros amorfos, y superior del *punto de fundición* " $T_m$ " para polímeros semicristalinos, funde el material. En polímeros este paso es muy importante pues en la realidad, dominarlo no es algo simple de resolver ya que el proceso consume entre el 70-80 % del total de la energía de entrada de un sistema de calentamiento además de determinar la calidad del producto de acuerdo con la

---

<sup>1</sup> Para las condiciones de fundición el término técnico correcto en los plásticos es transición vítrea.

homogeneidad y estabilidad del material plástico. Una vez que el plástico ha alcanzado una temperatura por encima del *punto de transición vítrea* se suspende el calentamiento pues no se desea llegar a la temperatura en donde el material se degrada porque pierde las propiedades físicas, químicas y estéticas que interesan mantener al momento de sellar la ampollita para que esta conserve una apariencia similar al vidrio.

En la realidad es factible encontrar un rango de temperaturas dentro del cual se puede sellar la ampollita poniendo como punto de partida la temperatura  $T_g$  (*Temperatura de transición vítrea*), y como límite la temperatura de degradación del material para controlar las condiciones de sellado y moldeado en la punta de la ampollita. Es entonces que cuando se establece una temperatura de sellado " $T_{se}$ ", el cual se define a continuación:

$$T_{se} = T_g + \Delta T \quad 5[^\circ C] < \Delta T < 15[^\circ C]$$

Donde:

$T_{se}$ : *Temperatura de sellado.*

$T_g$ : *Temperatura de transición vítrea.*

$\Delta T$ : *Rango de temperaturas recomendado para el sellado.*

Se sugiere que el problema de sellado puede resolverse manteniendo la temperatura del material plástico en un rango superior al punto  $T_g$  (*Temperatura de transición vítrea*), por lo que el control de la temperatura en la punta de la ampollita toma relevancia para que el proceso de sellado una las partes derretidas. (Ver figura 6).

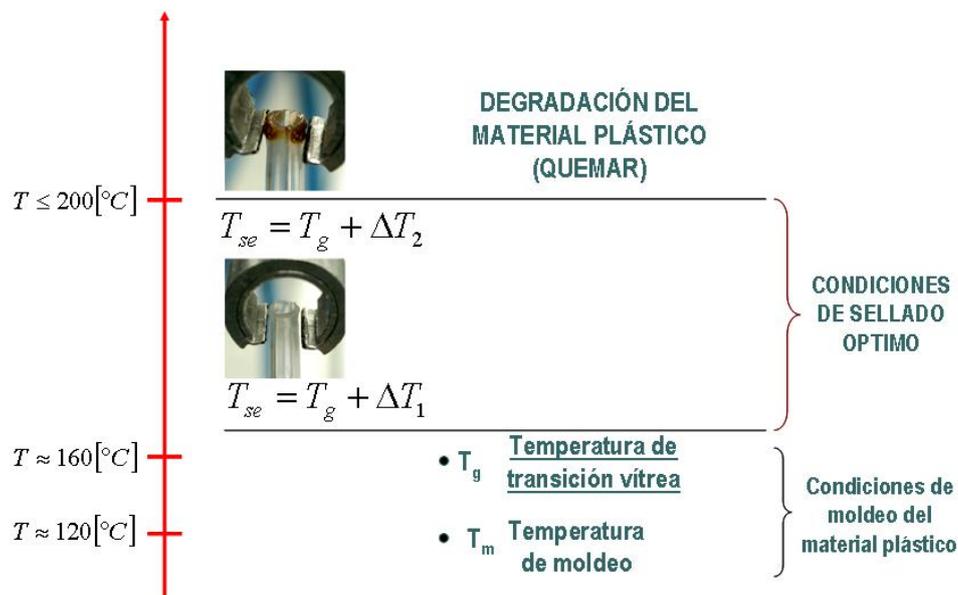


Figura 6. Límites de las temperaturas sellado.

No es necesario que toda la sección de la punta de la ampollita supere la temperatura  $T_g$ , la parte fundamental que se requiere fundir es la boca de la punta, la demás secciones deben encontrarse en condiciones que permitan el moldeo para conseguir el acabado final de la punta. Por tanto son dos secciones que se establecen necesarios en el proceso de sellado sobre la punta de la ampollita (Ver figura 7) ya que el material necesitará estar en un ambiente donde existan las condiciones de *transición vítrea* y de moldeo, los tres principios de transferencia de calor deben ser analizados para así poder enfrentar la complejidad de controlar la temperatura y dirigir el flujo de calor en las zonas específicas de la punta de la ampollita. La forma en que se generen las respuestas del material para alcanzar las condiciones de transición vítrea y moldeo, será un factor que influirá de manera directa en los dispositivos que efectúen el sellado y conformado.

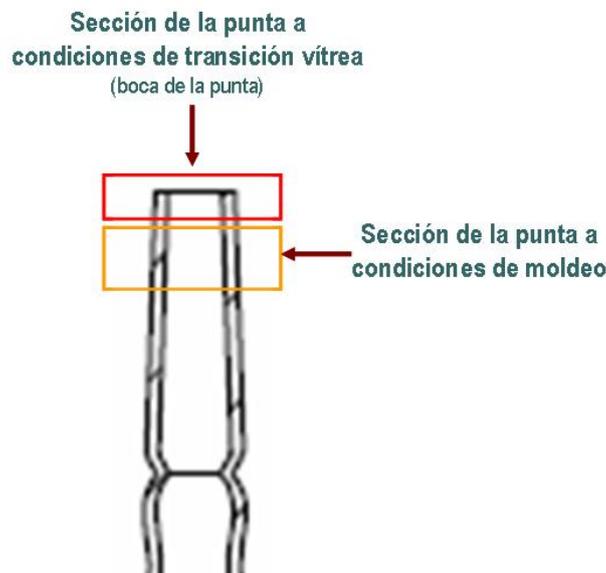


Figura 7. Secciones de interés en la punta de la ampollita.

### 1.3.2 Fundamentos teóricos sobre la transferencia del calor.

Se tomarán como base las ecuaciones fundamentales sobre transferencia de calor para brindar una primera visualización del comportamiento del flujo de calor sobre la punta de la ampollita. Estas ecuaciones predicen la realidad a condiciones de flujos de calor rígidos y cuerpos geométricos simples, y aunque esto no puede aplicarse de forma total, exponen parámetros a considerar en la realización de experimentos mostrando las características distintivas de cada principio de transferencia del calor. En este capítulo se verá de manera general el planteamiento de cada ecuación fundamental, citando las limitantes que se tienen si son aplicados a la realidad en el proceso de sellado.

**1.3.2.1 Ecuación fundamental de transferencia de calor por convección.**

La transferencia de calor por conducción consistirá en calentar por medio de una resistencia el aire y dirigirlo hacia la punta de la ampollita para que el material alcance la temperatura de sellado  $T_{se}$ . Este es el primer el primer principio de transferencia de calor que se analizará para el proceso del sellado de ampollitas. Independientemente de las características del dispositivo de calentamiento, la razón de transferencia de calor por convección entre una superficie y un fluido es el siguiente [3]:

$$q_c = \bar{h}_c A (T_s - T_o)$$

Donde:

- $q_c$       Gradiente de transferencia de calor.  $[W]$
- $A$         Área de transferencia de calor.  $[m^2]$
- $\bar{h}_c$       Coeficiente de transferencia de calor.  $[\frac{W}{m^2K}]$
- $(T_s - T_o)$  Diferencia entre la temperatura del fluido  $T_s$  y la temperatura de la superficie a calentar  $T_o$ .

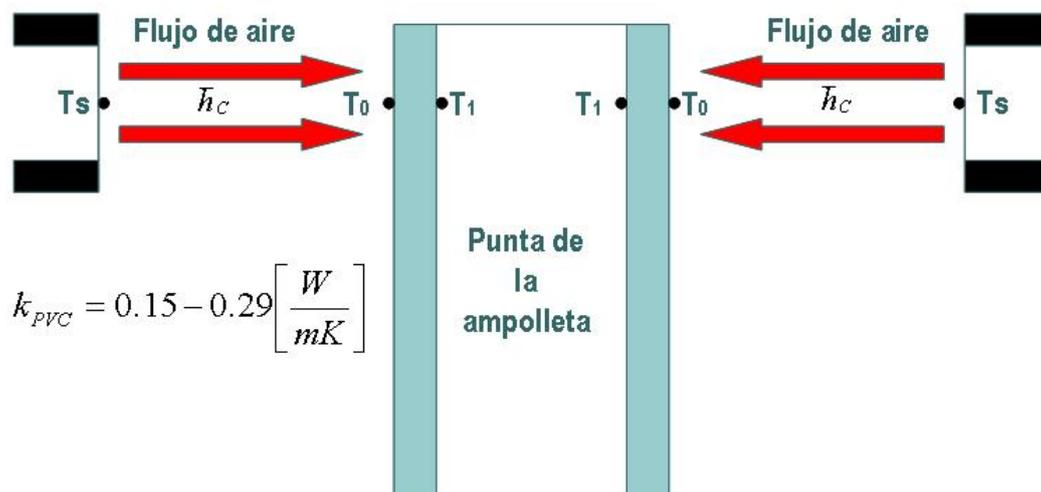


Figura 8. Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección depende de la densidad, viscosidad, velocidad del flujo y las propiedades térmicas (conductividad térmica y calor específico) del aire. [3] El gradiente de temperaturas es la variable directamente a medir, y esta relacionada con el coeficiente de transferencia de calor  $\bar{h}_c$  del aire. En este estudio se trabajará con convección forzada pues la velocidad del flujo del aire se puede especificar de manera

directa por medio de un ventilador que es parte del dispositivo de calentamiento que se utilizará en los experimentos.

El valor numérico  $\bar{h}_c$  para un sistema particular de calentamiento depende de varios factores:

- Si se trata de un flujo de convección forzada.
- La geometría de la superficie a calentar.
- La velocidad y propiedades físicas del fluido.
- Las diferencias de temperaturas entre el fluido y la superficie a calentar.

Esto hace que el valor de  $\bar{h}_c$  no sea constante sobre la superficie a calentar pues varía de un punto a otro. Calcular cada valor particular requiere desarrollar complejas ecuaciones que se resolverían con métodos numéricos bajo condiciones en que la superficie a calentar debe ser completamente uniforme por un chorro de aire con flujo laminar, además es necesario corroborar los datos obtenidos en el análisis numérico con experimentos complejos. Por lo tanto no es fácil aplicar la ecuación fundamental de transferencia de calor por convección en condiciones reales. Obtener el valor real de  $\bar{h}_c$  es complicado debido a las prioridades de este trabajo el valor  $\bar{h}_c$  del aire se obtendrá a partir de tablas en condiciones de transferencia de calor por convección con flujo turbulento con respecto a una pared sólida plana.

Adaptando la ecuación fundamental a la geometría de la ampollita (cilindro hueco) para conocer el calor transferido en la pared interior de la punta de la ampollita, la ecuación de transferencia de calor es el siguiente:

$$q_c = \frac{(T_s - T_1)}{A \left( \frac{1}{\bar{h}_c} + \frac{L}{k_{PVC}} \right)}$$

Esta ecuación involucra dos principios de transferencia de calor. En primera instancia la convección entre el aire y la superficie externa de la pared de la punta de la ampollita y a continuación el calor que es transferido por conducción a través del material. La conductividad térmica  $k_{PVC}$  del material toma relevancia durante el calentamiento;

porque es necesario calcular el tiempo específico que se requiere en alcanzar condiciones de transición vítrea de forma homogénea en la punta de la ampolleta.

Profundizar en el estudio del flujo del aire de un sistema de calentamiento en particular a través de la ecuación de transferencia de calor es la parte fundamental para desarrollar mejoras en la eficiencia del calentamiento del aire. En investigaciones anteriores acerca de la transferencia de calor de un fluido que circula por ductos se ha descubierto que la temperatura del fluido varía a lo largo de la dirección del flujo de masa así como en la dirección del flujo de calor. [3] Por todo lo anteriormente dicho la conducción del flujo del aire es uno de los factores que mas influyen en el consumo y aprovechamiento de la energía de entrada en cualquier sistema de calentamiento del aire. Se debe tomar en cuenta las superficies, formas y aislamiento de dicha trayectoria.

### 1.3.2.2 Ecuación fundamental de transferencia de calor por conducción.

Para analizar la transferencia de calor por conducción se tomará en cuenta el material que conduce el calor y el material a calentar. En este trabajo el material conductor es un dado hecho de un material con alta conductividad térmica  $k_{AL}$  (Aluminio) acoplado a una resistencia, en el que un termopar registrará la temperatura que alcance el sistema por el suministro de energía eléctrica de un dispositivo regulador de temperatura tipo encendido-apagado (on-off). Esta fuente de calor estará rígidamente sujeto y la ampolleta será trasladada hasta que la boca de su punta esté con el dado para que el material sea calentado y moldeado a una forma establecida. En este principio de transferencia el calor fluye de la región con mayor temperatura a la región de menor temperatura, y se representa en la ecuación fundamental como un gradiente de temperaturas en un medio sólido [3]:

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx}$$

Donde:

- $q_k$  **Gradiente de transferencia de calor por contacto.**  $[W]$
- $k$  **Conductividad térmica del material.**  $\left[\frac{W}{m K}\right]$
- $A$  **Área a través de la cual se transfiere el calor.**  $[m^2]$
- $\frac{dT}{dx}$  **Gradiente de temperaturas,  $x$  es la distancia en la dirección del flujo de calor.**

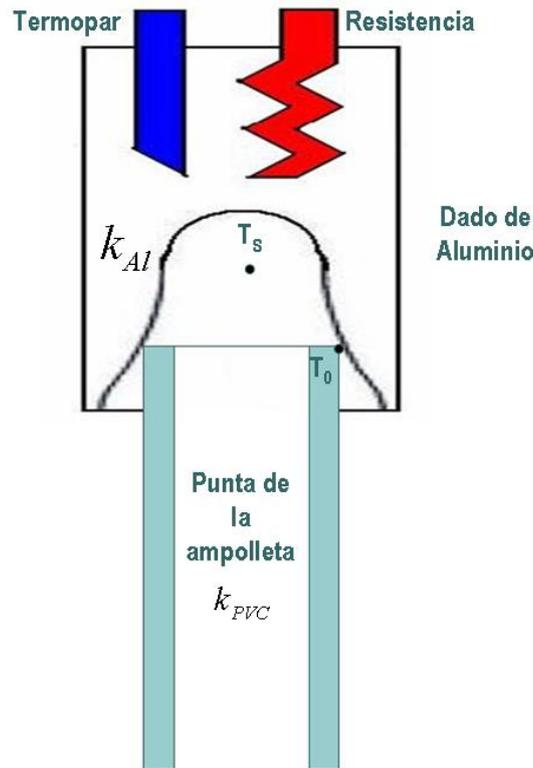


Figura 9. Transferencia de calor por conducción

En esta ecuación la conductividad térmica  $k$  indica la cantidad de calor que fluirá a través de un área de contacto que interviene directamente en la transmisión del calor. En este estudio el contacto estará determinado por la forma del dado y la geometría cilíndrica de la boca de la ampolleta (Ver figura 9). Tomando en cuenta lo anterior el proceso de calentamiento, sellado y conformado requiere de un tiempo más prolongado y específico de ejecución.

El método analítico de la ecuación se limita a formas geométricas relativamente simples para representar de manera aproximada la situación en problemas de ingeniería reales. Por ello resulta difícil determinar el gradiente de temperaturas tal como lo expone la ecuación. [3] En cambio presenta ventajas respecto a los otros 2 sistemas de

calentamiento ya que permite que la transferencia de calor ocurra de manera más simple debido a que la conductancia térmica  $k$ , un parámetro que no depende de variables ajenas al del propio material conductor.

### 1.3.2.3 Ecuación fundamental de transferencia de calor por radiación.

Al pasar corriente eléctrica sobre una resistencia se generará calor y sin la intervención de ningún medio la transferencia del calor se dará solo en virtud de la diferencia de temperaturas entre dos cuerpos, a esto se le conoce como radiación. La cantidad de energía en forma de calor radiante que abandona una superficie depende de la temperatura y la naturaleza geométrica del cuerpo. Esta se establece en la siguiente ecuación:

$$q_r = K_r (T_s - T'_0)$$

Donde:

$q_r$  : Razón de flujo de calor.

$K_r$  : Conductancia por radiación.

$T_s$  : Temperatura de la fuente.

$T'_0$  : Temperatura de referencia del cuerpo a calentar.

En casos reales la radiación se combina con otras formas de transferencia de calor pero estos no serán tomados en cuenta. En la ecuación anterior representando la conductancia térmica con el siguiente parámetro  $K_r$  cuya definición real es la siguiente:

$$K_r = \frac{A_1 \mathfrak{F}_{1-2} \sigma (T_s^4 - T_0^4)}{T_s - T'_0} \quad \left[ \frac{W}{K} \right]$$

Donde:

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann.

$T_s^4$  : Temperatura de la fuente.

$T'_0$  : Temperatura de referencia del cuerpo a calentar.

$\mathfrak{F}_{1-2}$  : Factor de forma para cuerpos reales.

El valor de la constante  $\sigma$  se considera para cuerpos ideales de radiación llamados cuerpos negros.<sup>II</sup> El valor  $\mathfrak{F}_{1-2}$  es una magnitud adimensional que modifica la ecuación para emitancias de cuerpos reales pues contempla que la radiación no es absorbida por ellos completamente debido, en gran parte, a las geometrías de los cuerpos y su capacidad de absorción de las ondas. La ecuación muestra que una superficie, de cualquier cuerpo, irradia calor a cierta temperatura siguiendo una proporción a la cuarta potencia, mientras que la emisión del calor radiante es independiente de las condiciones del medio circundante. La transferencia neta de calor radiante requiere de una diferencia en la temperatura superficial de dos cuerpos cualesquiera entre los que ocurre el intercambio. En este caso dichos cuerpos son la resistencia y la punta de la ampolleta. (Ver figura 10)

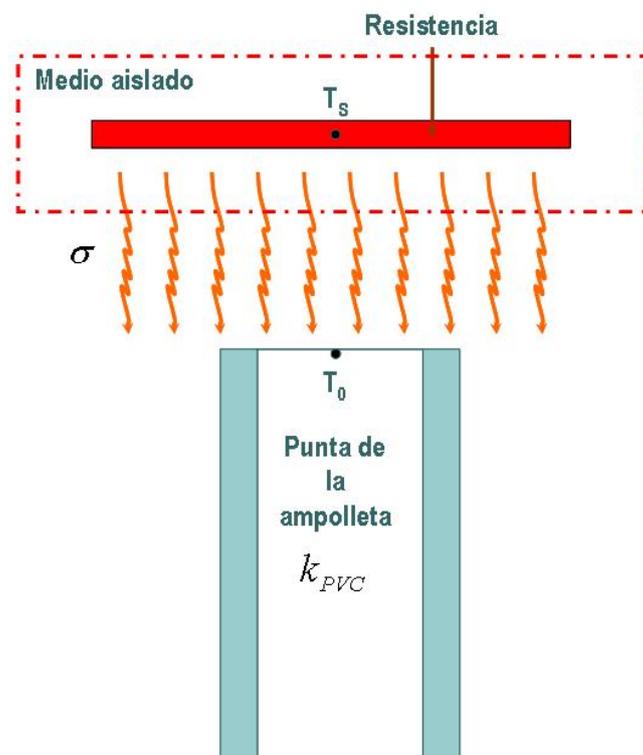


Figura 10. Transferencia de calor por radiación.

La diferencia de temperaturas entre la fuente de calor y la superficie a calentar es de nueva cuenta la variable a medir. Para determinar el valor de  $K_r$ , es necesario aplicar ecuaciones específicas a las geometrías de los cuerpos en cuestión. Para este estudio, el valor de  $K_r$  será obtenido a partir de tablas considerando cuerpos simples de un cilindro y una barra metálica circular.

<sup>II</sup> Se considera cuerpo negro aquel que absorbe toda la energía radiante que se incide sobre el.

#### 1.4 ESPECIFICACIONES DE LA AMPOLLETA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PVC (POLICLORURO DE VINILO).

En la actualidad los productos fabricados a partir del PVC obedecen a elevados patrones de calidad técnica que han ampliado su uso a diversos productos. [4] Las características que posee este material de costo, desempeño e imagen lo hace muy aceptado para los requerimientos de mercadotecnia por su similitud visual al vidrio. Las características más sobresalientes son los siguientes:

- Es un aislante térmico.
- Resistente a las variaciones de temperatura y a golpes.
- Nulo mantenimiento y fácil limpieza.
- Por su alta concentración de cloro, no es inflamable al ser quemado, produce hollín.

Se destaca que el PVC por su naturaleza de material autoextinguible, ofrece resistencia térmica arriba de los 200 [°C] y solo con ciertas condiciones críticas se degrada a 150 [°C]. [5] Esta degradación se manifiesta cuando el material toma un coloración café y cuando por el exceso de exposición al calor, se esponja causando humo tóxico provocado por el componente de cloro que se quema. Es por esta razón que el material no provoca flama a comparación de otros materiales plásticos. Cuando el PVC se degrada tiene que ser desechado.

La siguiente tabla se muestra las propiedades térmicas del PVC.

Características Térmicas	
Temperatura de reblandecimiento	82.5 [ °C]
Coefficiente de dilatación lineal (-30 °C / +50 °C)	$80 \times 10^{-5} K^{-1}$
Calor específico a 20 °C	0.753 $\left[ \frac{KJ}{kg K} \right]$
Conductividad térmica a 20 °C	0.18 $\left[ \frac{W}{K m} \right]$

Tabla 1 Propiedades térmicas del PVC

Estos valores son menores con respecto a los metales por ser pobres conductores de calor, por lo que la energía requerida para elevar la temperatura del PVC a condiciones de transición vítrea y moldeo es elevada. La homogeneidad de calentamiento y los tiempos de exposición a los sistemas de calentamiento son diferentes dependiendo del material tratado en el proceso de sellado.

La tabla 2 muestra las propiedades mecánicas más importantes a considerar en un proceso de formado:

Propiedades Mecánicas	A 20 [°C]
Densidad	1.1 – 1.4 $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$
Módulo de elasticidad (Tracción)	2.740 $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
Módulo de elasticidad (Flexión)	2.750 $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
Resistencia a la tracción	48 $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
Resistencia a la flexión	68 $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
Tensión límite en la flexión	80 $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
Alargamiento a la rotura	70 %
Deformación al impacto (23 [°C])	25 $\left[\frac{KJ}{m^2}\right]$

Tabla 2 Propiedades mecánicas del PVC.

Estas propiedades cambian con respecto a la temperatura en que se encuentre el PVC para facilitar su manejo durante los procesos de formado. Es por esta razón que se emplean los pasos de calentamiento teniendo conocimiento de los límites térmicos del material que a continuación se muestran en la tabla 2.

#### 1.4.1 Dimensiones de la ampollita de PVC.

Las dimensiones de la ampollita en los que se realizarán los experimentos de sellado se muestran en el Apéndice A. Para este estudio, se pondrá especial interés en las dimensiones de la punta de la ampollita; el espesor de pared y el diámetro de la boca

donde una aguja se inserta para su llenado. Como referencia de comparación la ampolla que se utiliza actualmente igualmente se muestra en el apéndice A.

### 1.5 PARÁMETROS EN LA EXPERIMENTACIÓN.

Tras haber hecho un análisis de la teoría fundamental de los tres principios de transferencia calor se puede decir que:

- Las bases teóricas permiten plantear los experimentos.
- Muestran los parámetros que intervienen en el calentamiento de la punta de la ampolla.
- Orientan en la interpretación de los resultados de los experimentos.
- Muestran un rango de posibles resultados y soluciones.

Al explorar la teoría del calentamiento de los materiales plásticos y las ecuaciones fundamentales de transferencia de calor, se tienen las siguientes observaciones:

1. La *conductividad térmica*  $k_{PVC}$  del material interviene en los tres principios de calentamiento sobre la punta de la ampolla.
2. El valor numérico de  $k_{PVC}$  cuantifica que el PVC es un pobre conductor de calor. Y por lo tanto se necesita mucha energía para elevar su temperatura y mayor tiempo de exposición al calor.
3. La forma cilíndrica de la punta de la ampolla es un factor para que la temperatura  $T_g$  no sea uniforme en un tiempo corto de exposición al calor.
4. Se establece un rango de trabajo de experimentación con el calentamiento de la punta de la ampolla partiendo de la temperatura de fundición  $T_g$  hasta la temperatura de degradación del material.
5. Por tratarse de PVC su degradación se manifiesta cuando pierde transparencia (toma una coloración café) y se quema sin producir flama (por ser un material autoextinguible).
6. El humo de PVC es altamente tóxico por el componente de cloro que se quema, se requiere de ventilación especial en la zona donde se realizarán los experimentos.

Con respecto a los principios de transferencia de calor se establece lo siguiente:

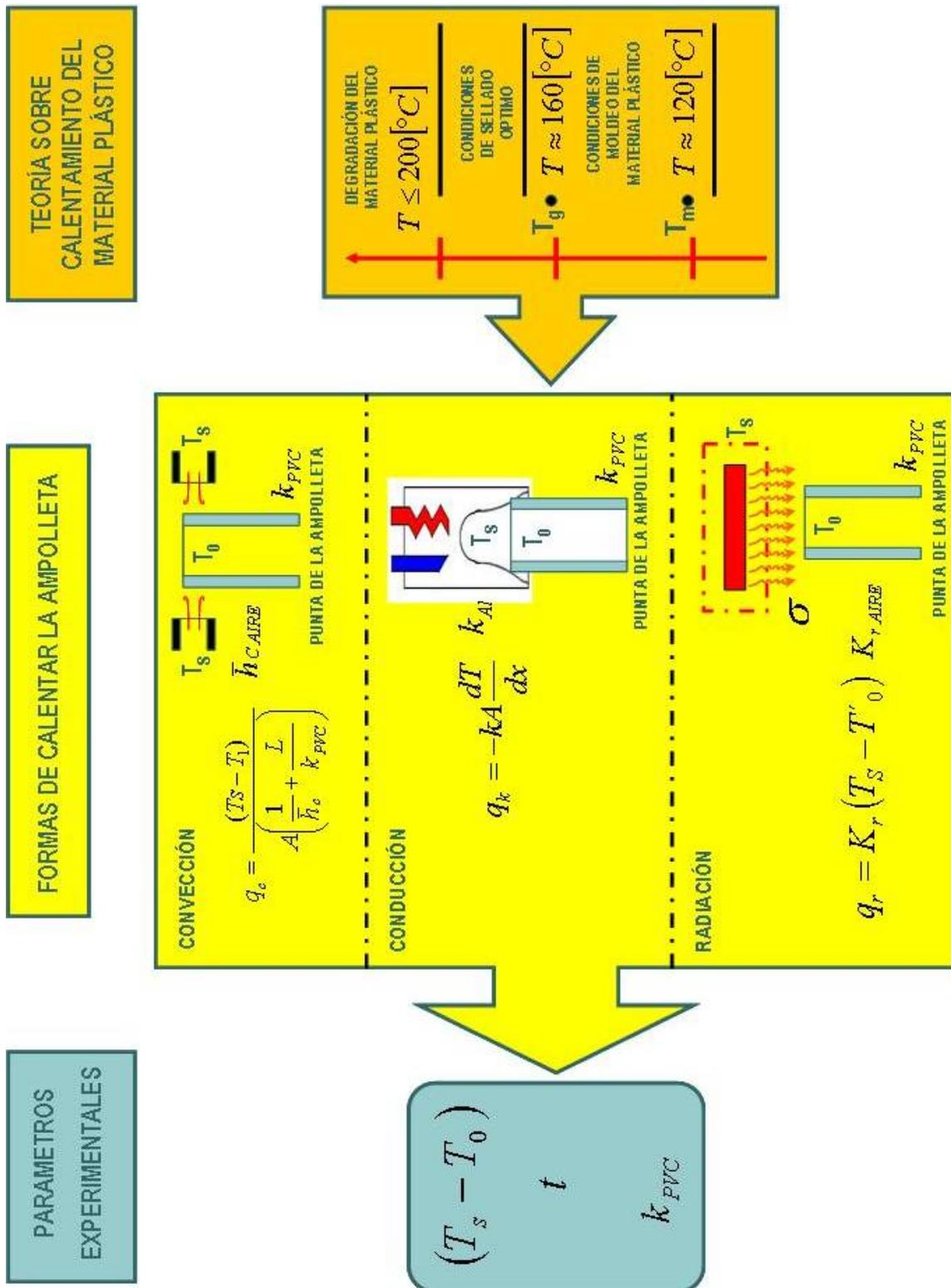
1. La temperatura es el parámetro intrínseco en los tres principios de transferencia de calor.
2. La diferencia de temperaturas entre la fuente de calor y la punta de la ampolleta determina la cantidad de calor que se transfiere.
3. La particularidad de cada principio de transferencia de calor se relaciona con sus respectivos coeficientes, permitiendo analizar la optimización cada principios de transferencia de calor:
  - *Convección*: coeficiente de transferencia de calor  $\bar{h}_c$ .
  - *Contacto*: conductividad térmica  $k$  del material del dado.
  - *Radiación*: Conductancia térmica por radiación  $Kr$ . Constante de Stefan-Boltzmann  $\sigma$ .

Los parámetros requeridos en el estudio para cuantificar los efectos y cambios que el calor causa sobre el material de la ampolleta son:

- La temperatura que alcanza la punta de la ampolleta. ( $T_0$ )
- La temperatura requerida en la salida de la fuente de calor para calentar la punta de la ampolleta. ( $T_s$ )
- La conductividad térmica  $k_{PVC}$  del material de la ampolleta.
- El tiempo en el cual la punta de la ampolleta es expuesta al calor relacionada con la temperatura de salida de la fuente. ( $t$ )

A partir de estos parámetros y de los cambios que se observen en el material de la ampolleta se extraerá la información esencial sobre el comportamiento real de los principios de calentamiento y el proceso de sellado de la ampolleta para la generación de las bases en la solución del sellado.

1.6 FIGURA SÍNTESIS SOBRE ANTECEDENTES TEÓRICOS.



## CAPITULO 2. DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROCESO DE SELLADO.

### 2.1 LAS CUATRO FUNCIONES PRINCIPALES EN EL PROCESO DE SELLADO.

**Definición de Función:** *Es la relación entre las entradas y salidas de un sistema. (Los requerimientos determinan la función.)* [6]

Pasar de la etapa 1 a la etapa 2 comprende al menos cuatro funciones fundamentales en un esquema de proceso de sellado de ampollitas, independientemente si es simple o compleja la solución que se lleve a cabo. Estas funciones se exponen en el siguiente diagrama (Figura 11), y toman este orden durante el desarrollo del estudio.

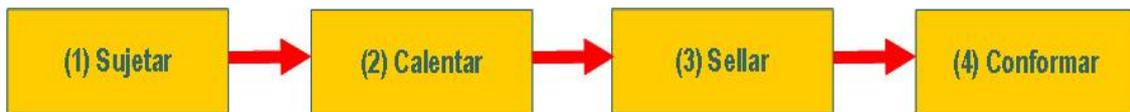


Figura 11. Diagrama funcional principal.

**1.- Sujetar;** Implica posicionar de forma rígida durante el proceso de sellado.

**2.- Calentar;** Su finalidad es llevar el material a condiciones de fundición y moldeo. Aquí el plástico será expuesto por tres diferentes métodos de transferencia de calor (convección, contacto, radiación).

**3.- Sellar;** Es hacer que las paredes de la punta de la ampollita fundidas se peguen y se tenga un solo componente de material en todo el perfil de la punta de la ampollita.

**4.- Conformar;** Es dar la forma deseada a la punta de la ampollita.

Las relación existente entre la entrada y la salida para un proceso de sellado se resume en las 4 funciones del diagrama principal. Este se puede modificar de acuerdo con las especificaciones del problema, siendo que cada función principal puede ser modificada en lo correspondiente a subfunciones (adición, sustracción o variación) [7]. Con este tipo de análisis es posible desarrollar otras configuraciones proporcionando un muestrario de posibles soluciones reales. Las cuatro funciones pueden estar separadas o

juntas en un solo elemento dependiendo de la solución a desarrollarse. Para este trabajo se analizarán las variantes del diagrama principal con la finalidad de contemplar los esquemas de calentamiento y sellado de ampolletas para la elaboración de un banco de pruebas y realizar los experimentos. Los diagramas obtenidos son los siguientes conservando el orden de las funciones del diagrama principal (Ver figura 12).

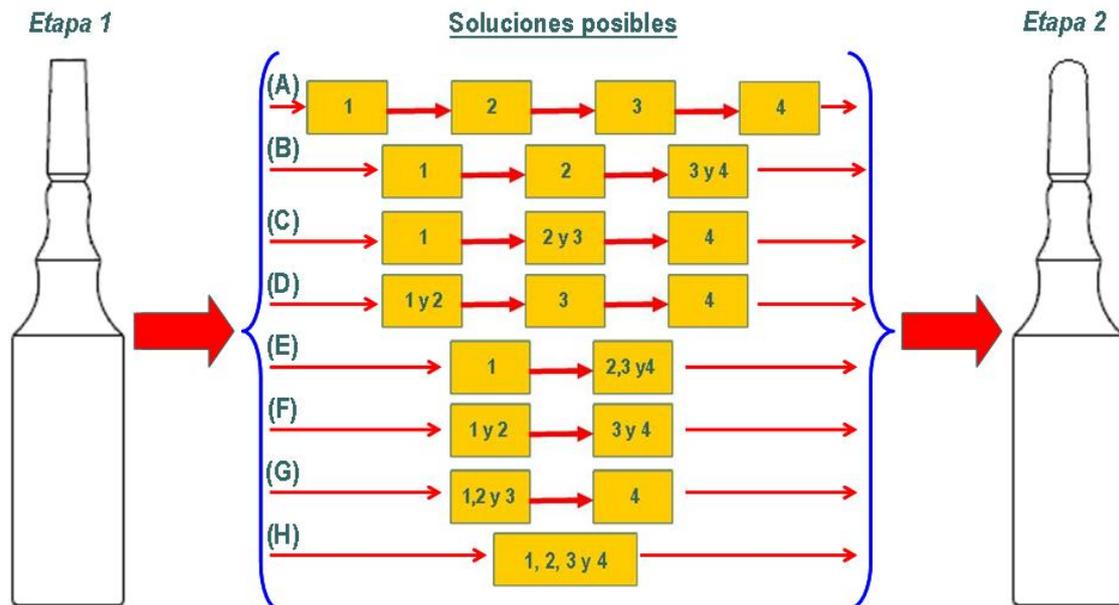


Figura 12. Diagramas de solución posibles para el proceso de sellado.

En la figura anterior se presentan propuestas de diagramas en que las funciones, que originalmente aparecían individualmente, han sido unidas en bloques para empezar a evaluar posibles soluciones. En este tipo de configuraciones de solución es necesario ser cuidadoso porque como lo indica Glegg [1 y 8] es fácil romper el balance entre los dispositivos de la solución y las funciones que deben cubrir.

Los dispositivos tomarán relevancia en el proceso de sellado dependiendo del diagrama que se aplique en la solución del sellado de ampolletas. Por ejemplo el dado utilizado en el proceso actual de sellado efectúa las dos funciones finales (sellar y conformar), si se separan estas funciones los resultados finales serán distintos y el dispositivo tendrá otra forma. El repertorio de soluciones para desarrollar un proceso de sellado en el que se desarrollarán los experimentos es amplio; no obstante, debido a los límites de estudio establecidos, los diagramas de funciones de las soluciones se limitará a los diagramas B y E de la figura 12.

### CAPITULO 3. EL BANCO DE PRUEBAS.

Para llevar a cabo los experimentos de sellado de ampollitas es necesario diseñar y construir un banco de pruebas. Los requerimientos esenciales que debe cumplir dicho diseño son los siguientes:

- *Reproducir el proceso de sellado con cada caso de principio de transferencia de calor (convección, conducción y radiación)*
- *Analizar el proceso de sellado de ampollitas de PVC de manera simple para determinar los factores involucrados.*
- *Seguridad del investigador al momento de realizar los experimentos.*

Para cumplir con estos puntos el banco de pruebas tendrá algunos dispositivos de calentamiento, sujeción y ejecución automatizada durante la simulación del proceso de sellado. Los diseños de estos dispositivos estarán basados en principios de diseño que permiten cometer el menor número de errores pues cada solución considerada a nivel conceptual trae consigo un impacto al comportamiento real del fenómeno a analizar. Además para la caracterización del calor el banco de pruebas tendrá un sistema de medición y registro del valor más característico de la temperatura en cada prueba que se realice durante el proceso de sellado. En los experimentos se deben obtener:

- Resultados repetibles.
- Precisos.

Como se experimentará con los tres principios de transferencia de calor el diseño del banco de pruebas debe tener las dos siguientes características en su diseño:

- Agilidad para tomar los datos experimentales.
- Versatilidad para tomar diferentes formas.

A partir del desarrollo y estudio de los antecedentes teóricos, las pruebas a realizar serán:

- Medición de la temperatura.

- Ambiente.
- De la punta ampolleta.
- De la fuente de calor.
- Medición del Tiempo de exposición al calor.

### **3.1 PRINCIPIOS DE DISEÑO EN EL BANCO DE PRUEBAS.**

Para facilitar el diseño y construcción de los dispositivos que intervendrán en los procesos de sellado en el banco de pruebas se recurrieron a los siguientes principios de diseño enunciados por French [9]:

1. *“Diseñar elementos con el menor número de restricciones al movimiento”*
2. *“Transmitir las fuerza de la manera mas directa y corta.”*
3. *Diseñar reduciendo el número de partes para minimizar la oportunidad de tener una parte defectuosa.”*

Aplicando estas recomendaciones se desarrollan elementos simples y de fácil ensamble.

### **3.2 LOS PROCESOS DE SELLADO EN EL BANCO DE PRUEBAS.**

Para los experimentos de la presente investigación se establecerán pasos esenciales en el proceso de sellado a simularse en el banco de pruebas. Se pretende que estos pasos permitan analizar y determinar los factores que intervienen en el sellado de la ampolleta. Los pasos de sellado se establecerán a partir de los elementos básicos del proceso de sellado actual. Además se tomarán en cuenta los diagramas funcionales B y E mencionados anteriormente (Ver figura 12). Cuando se use la solución B, se empleará el calentamiento por convección y radiación mientras que en la solución E se utilizará el calentamiento por conducción.

#### **3.2.1 Proceso de sellado por convección.**

La figura 13 muestra la instalación que será llevada a cabo en el banco de pruebas. Se incluye el diagrama funcional sobre el cual se visualizó, mostrándose los dispositivos que aplicarán cada específica tarea.



Figura 13. Proceso de sellado por convección

En esta instalación la función *Sujetar* (1) será ejecutada por un carro acoplado a un pistón neumático que dirige la ampollita es dirigida hacia la zona de calentamiento y es expuesta al chorro de aire caliente durante un tiempo determinado hasta llegar a la temperatura  $T_g$  estimada.

La función *Calentar* (2) será llevada a cabo por la fuente de calor. En este primer sistema de sellado dicha fuente será una pistola de aire caliente, Hot Air Tool Leister CH- 6060 Sarnen. Type Hot-Jet S m (Especificaciones en el Apéndice B.) compuesta por un ventilador que determina la velocidad del chorro de aire, una resistencia eléctrica que funciona como dispositivo generador de calor y un control de temperatura de continuo monitoreo para mantener la temperatura del aire a un valor constante durante el tiempo de trabajo de la pistola de aire.

Las funciones *Sellar* (3) y *Conformar* (4) serán ejecutadas por el dado como se mencionó anteriormente. Este dado esta acoplado a otro pistón neumático de doble efecto lineal que gira sobre su propio eje de acción. Cuando la ampollita este colocada en el punto de la carrera del pistón, el dado bajará oprimiendo la punta calentada a temperatura  $T_g$  y gira en sentido horario  $210^\circ$ , para lograr el conformado final.

### 3.2.2 Proceso de sellado por radiación.

La figura 14 muestra la instalación llevada a cabo en el banco de pruebas. El diagrama funcional es el mismo con respecto al proceso de sellado por convección.



Figura 14. Proceso de sellado por radiación.

Al igual que en el proceso anterior la función *Sujetar* (1) la ejecutará el mismo carro acoplado al pistón neumático que dirige la ampollita hacia la zona de calentamiento. En esta zona se encontrará una resistencia a condiciones de temperatura al rojo vivo que realiza la función *Calentar* (2). Dicha fuente de calor estará integrada por los siguientes componentes:

1. Resistencia en forma de herradura hecha de hierro.
2. Termopar punta de acero Watlow tipo J.
3. Fuente de Calor: Controlador Watlow 1/16 DIN SD6C - HCJA - DNRG

Los datos generales de estos dispositivos se muestran el Anexo B.

Las funciones *Sellar* (3) y *Conformar* (4) serán ejecutadas por el mismo dado acoplado que se describió en el proceso de sellado por convección.

### 3.2.3 Proceso de sellado por conducción.

La figura 15 es la representación elemental de la instalación llevada a cabo en el banco de pruebas y el diagrama funcional en el cual se visualizó.

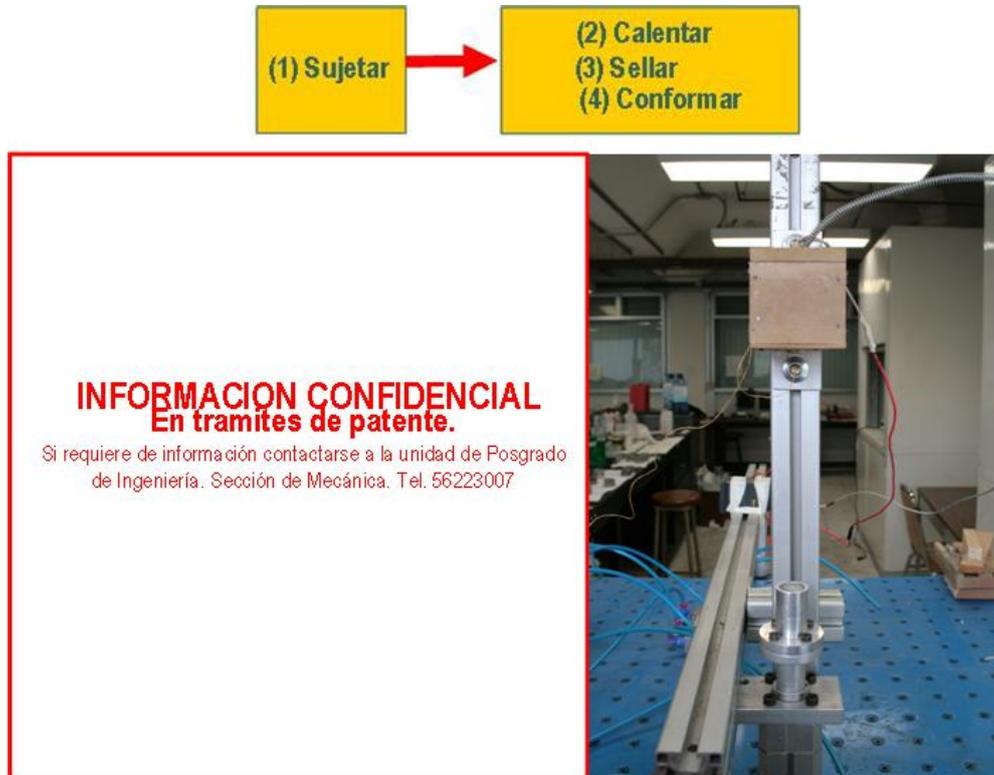


Figura 15. Proceso de sellado por contacto.

Para este sistema de sellado las funciones *Calentar* (2), *Sellar* (3) y *Conformar* (4) estarán unidas en un solo dispositivo, el dado. Cuando este y la boca de la ampollita entran en contacto las tres funciones se llevarán a cabo al mismo tiempo debido a la presión que ejerza el pistón durante la ejecución del proceso. En este caso el dado se encuentra fijo y la ampollita es la que gira sobre su eje impulsada por el movimiento del pistón para obtener el conformado final.

La fuente de calor en este caso estará integrada por los siguientes componentes:

1. Resistencia en cartucho de acero inoxidable.
2. Termopar de casquillo tipo J.
3. Fuente de Calor: Controlador Watlow 1/16 DIN SD6C - HCJA - DNRG

Los datos específicos de los dispositivos se muestran el Apéndice B.

Así para los principios de convección (Ver figura 16) y radiación (Ver figura 17) los pasos del proceso de sellado serán los siguientes:

1. Sujeción de la ampolleta.
2. Calentamiento.
3. Sellado y Conformado.
4. Finalización (ampolleta sellada).

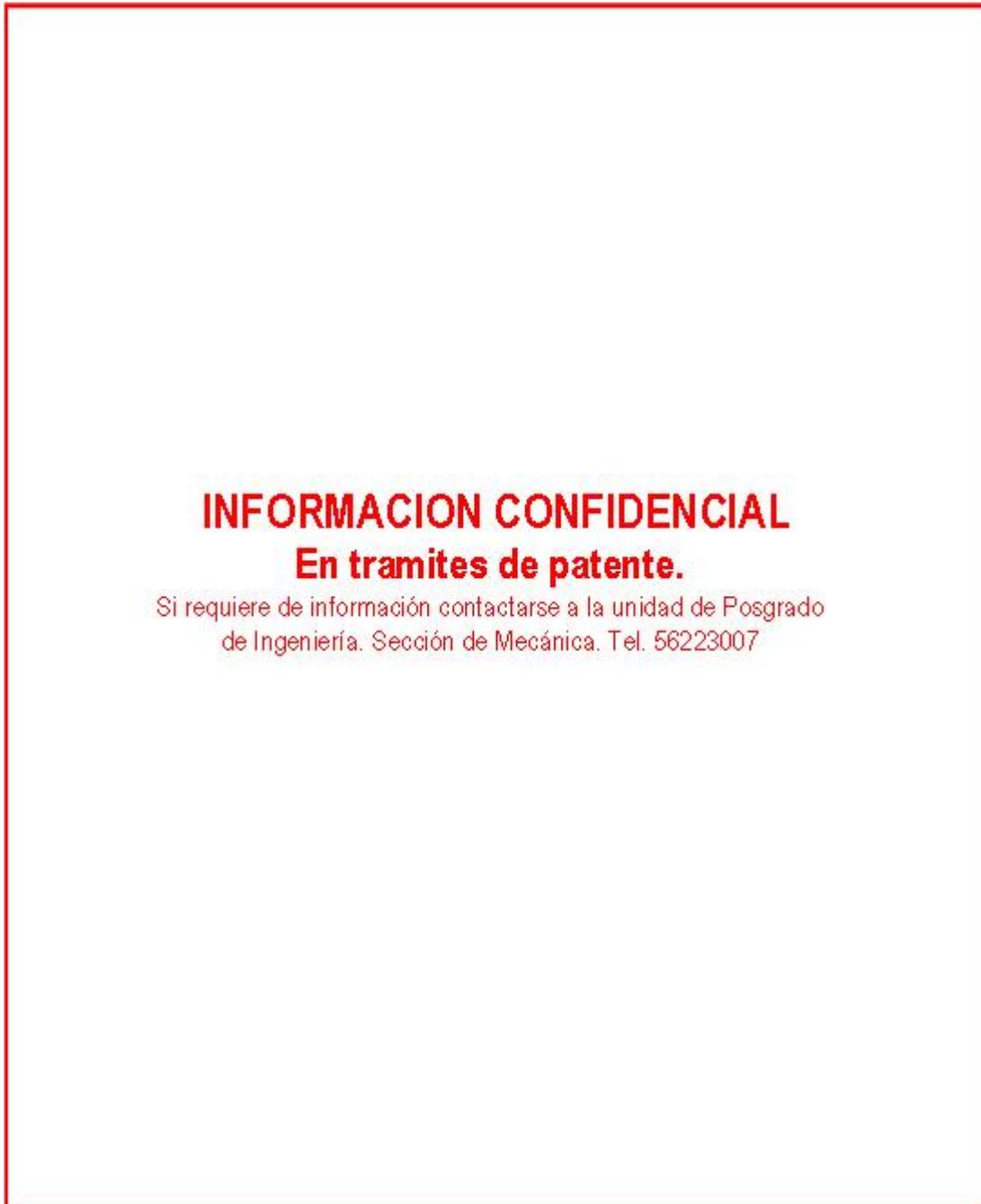


Figura 16. Pasos del proceso de sellado por convección.

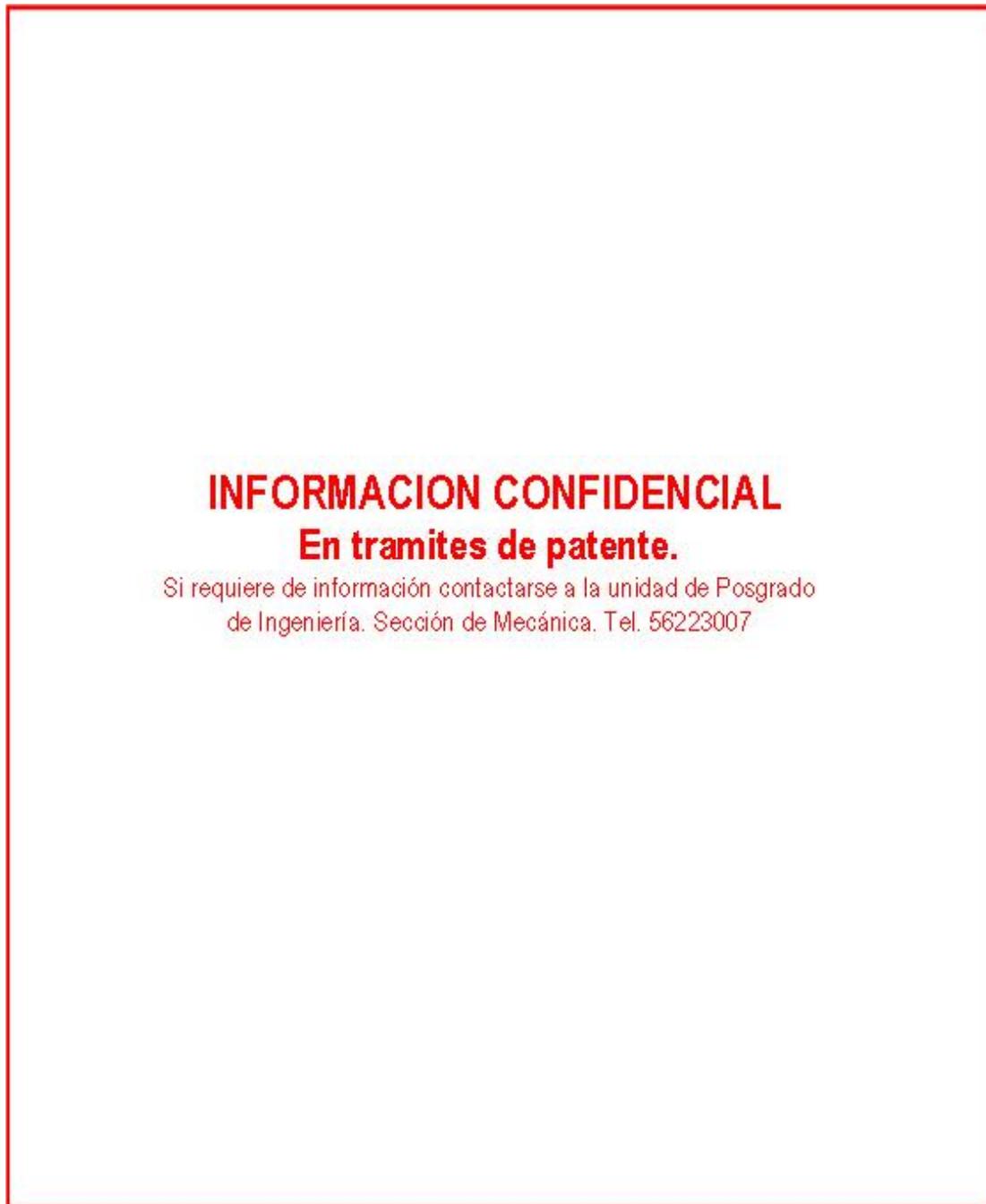


Figura 17. Pasos del proceso de sellado por radiación.

En el caso del proceso de sellado por conducción los pasos son diferentes con respecto a los dos procesos anteriores debido a que en dicho caso el dado es la fuente de calor, y al mismo tiempo es el dispositivo de sellado y conformado (Ver figura 18).

1. Sujeción de la ampollita
2. Calentamiento, sellado y conformado.
3. Finalización (ampollita sellada).



Figura 18. Pasos del proceso de sellado por contacto.

### **3.3 SISTEMA NEUMÁTICO PARA EL ACCIONAR DE LOS PROCESOS DE SELLADO.**

Al manejar procesos de sellado en los cuales se requiere utilizar calor a altas temperaturas es importante que el investigador ponga especial cuidado en la seguridad al momento de operar el banco de pruebas. Para esto se instaló un sistema neumático operado por botones que permita manejar de forma automatizada los procesos de sellado

establecidos para visualizar y analizar con seguridad los experimentos del sellado de las ampolletas.

Se diseñó una instalación simple y de fácil conexión que se adecuara a las configuraciones de los tres procesos de sellado. Después de analizar estas posibles configuraciones, el diagrama que cumple con los requerimientos para la simulación del sellado de manera más simple es el que se muestra en la figura 19.

Para manipular los dispositivos de sujeción, sellado y conformado del proceso de sellado se utilizarán dos pistones. El primero será un pistón de doble efecto lineal acoplado al carro de sujeción que transporta la ampolleta; el otro será un pistón de doble efecto lineal y giratorio acoplado al dado de sellado y conformado o a la ampolleta dependiendo del proceso que se maneje. Los datos de estos dispositivos se muestran en el Apéndice B.

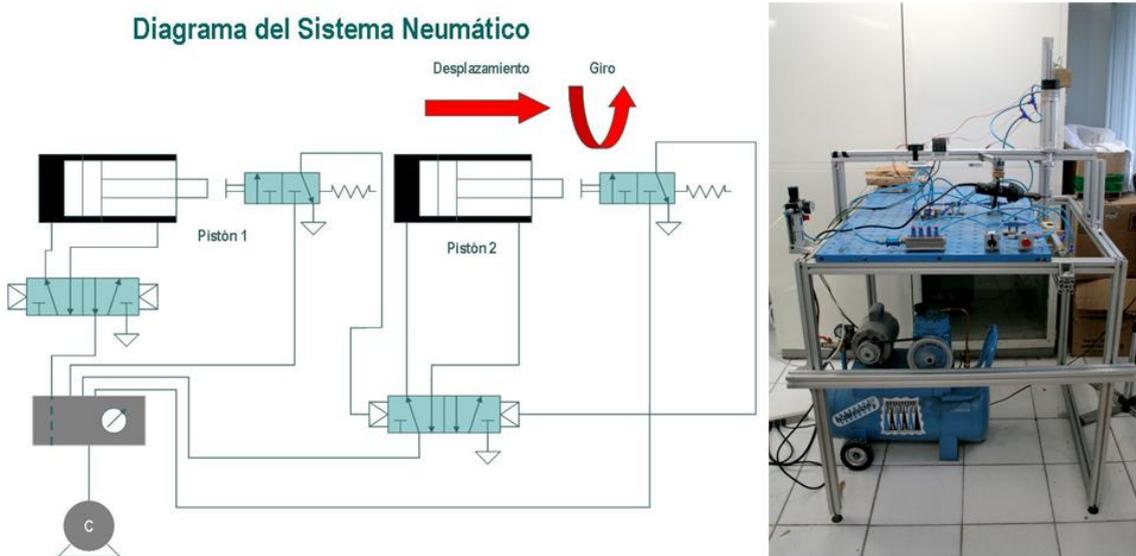
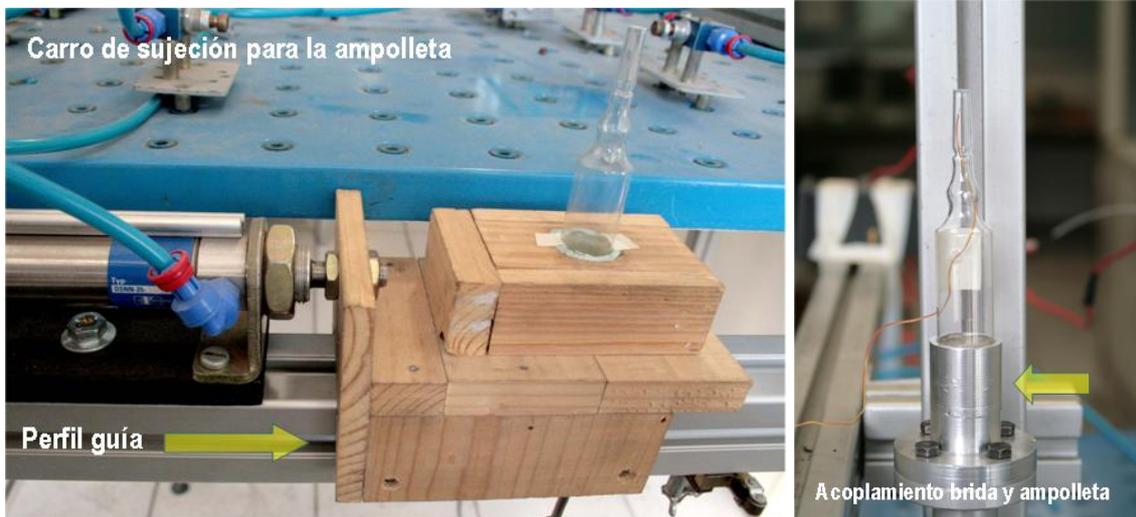


Figura 19. Diagrama del sistema neumático instalado en el banco de pruebas.

### 3.4 SUJECIÓN DE LA AMPOLLETA.

Para ejecutar la función *Sujetar* se diseñaron y construyeron los siguientes dos dispositivos (Ver figura 20) basados en los principios de diseño anteriormente enunciados:

- Carro de sujeción( Utilizado en los procesos de sellado por convección y radiación)
- Acoplamiento para brida y ampolleta. (Utilizado en el proceso de sellado por conducción)



a) Carro de Sujeción.

b) Acoplamiento para brida

Figura 20. Dispositivos de sujeción para la ampolleta.

Para sujetar la ampolleta en los procesos de sellado se consideró lo siguiente:

- Que fuera posible manipular el movimiento de la ampolleta en forma recta por cuestiones de simplicidad del proceso de sellado.
- Que existiera la menor resistencia al movimiento entre el carro de sujeción y el perfil guía (fricción) y que el contacto de las superficies de los rieles fuera el mínimo posible.
- Que el carro de sujeción, el acoplamiento de la brida y la ampolleta estuvieran conectados a la acción del pistón lo más directamente posible.

### 3.5 EL TERMÓMETRO DIGITAL.

Para la adquisición de los datos experimentales de temperatura se dispondrá de un Termómetro Digital Datalogger OM 3000 MAS. (Sus especificaciones se muestran en el Apéndice B.) Los sensores de temperatura empleados serán termopares en filamento tipo J, esto hace que la lectura sea puntual y no de forma gradual por lo que es relevante

su colocación para medir la temperatura de la forma más significativa en la fuente de calor, en la ampolleta y el medio ambiente.

### **3.6 NOTAS FINALES SOBRE EL BANCO DE PRUEBAS.**

El propósito primordial con que fue diseñado este banco de pruebas es realizar experimentos controlados mediante un simple proceso de sellado para determinar con facilidad los factores que intervienen en el sellado de la ampolleta. Sin embargo, algunos de estos factores no pueden ser controlados por el banco de pruebas pero pueden ser medidos y analizados para cuantificar sus impactos sobre los resultados del sellado en la ampolleta. En este punto del estudio es difícil mencionar cuales son, solamente conforme se desarrolle la etapa experimental y se observe los resultados que el banco de pruebas proyecte se lograrán identificar estos factores.

## CAPITULO 4. LA EXPERIMENTACIÓN.

Con base en los pasos del proceso de sellado, establecidos en el banco de pruebas, se realizarán 5 series de experimentos:

- Las tres primeras series de experimentos se efectuarán durante la ejecución del proceso de sellado en los sistemas de calentamiento por convección y conducción. Las dos series iniciales serán para el calentamiento por convección y la tercera para el calentamiento por conducción. Dentro de ellas se registrará la temperatura de la punta de la ampollita, la de la fuente de calor y del medio ambiente.
- La cuarta serie será un experimento para obtener un muestreo fotográfico sobre los cambios físicos que sufre el material en la punta de la ampollita al ser expuesto al calor usando el principio de transferencia por radiación. Para ello se utilizará una fuente de calor compuesta por una resistencia y posteriormente una configuración de dos resistencias conectadas en paralelo.
- La quinta serie consistirá en un experimento para registrar el comportamiento de la temperatura en las fuentes de calor de los tres sistemas de calentamiento sin ejecutar el proceso de sellado en el banco de pruebas durante un amplio periodo de tiempo.

El seguimiento y estudio de los cambios en la punta de la ampollita estarán cuantificados por los siguientes parámetros:

1. La temperatura de la punta de la ampollita.
2. La temperatura de la fuente de calor.
3. La temperatura del medio ambiente al momento de realizar los experimentos.
4. El tiempo de exposición al calor.

Los resultados que se obtengan de la acción del dado sobre la punta de la ampollita serán registrados en imágenes fotografías que se analizarán a detalle con el propósito de obtener una correlación entre los parámetros registrados y la forma final de la punta de la ampollita.

#### 4.1 LA COLOCACIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA DURANTE LOS EXPERIMENTOS.

La temperatura que se obtendrá de los experimentos se registrará tomando en cuenta el lugar en donde se coloquen los sensores. Este aspecto es primordial debido a que el sensor, por sus características, realiza la medición de la temperatura de manera puntual y no gradual. Por lo tanto, en este trabajo se establecerán los siguientes sitios de medición con el propósito de obtener un valor promedio real de la temperatura. Para el caso del registro de la temperatura de la fuente de calor y la punta de la ampollita los sensores serán colocados de la siguiente manera:

- En el caso de convección el sensor se colocará en el espacio existente entre la ampollita y la pistola de aire cuidando que el sensor registre directamente la temperatura del chorro de aire. Para el caso de calentamiento por conducción el sensor estará en contacto directo con la superficie del dado. Finalmente para registrar la temperatura del calentamiento por radiación, el sensor estará instalado en la superficie de la resistencia.

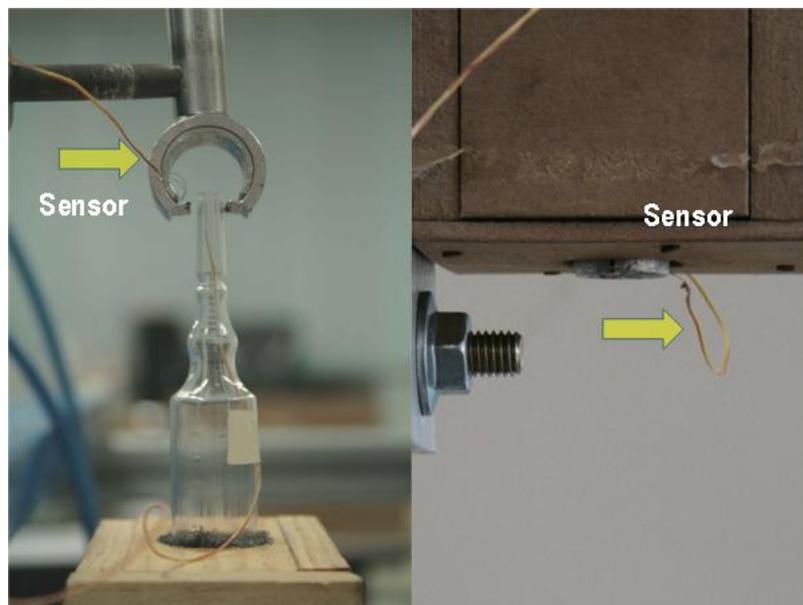


Figura 21. Colocación de los sensores en las fuentes de calor.

- Para registrar la temperatura de la punta de la ampollita se establecerá que el sensor tenga contacto directo con las paredes internas de la boca de la punta.



Figura 22. Colocación del sensor en la punta de la ampolleta.

Al medir la temperatura ambiente, el sensor requiere estar alejado de la zona de calentamiento que existe entre la punta de la ampolleta y la fuente de calor, esto se debe a que se pretende evitar que se registren las variaciones de temperatura que la fuente de calor provoque en el entorno circundante. Por lo tanto, el registro real de la temperatura del medio ambiente será obtenido colocando el sensor en una zona lejana de los dispositivos que integran el proceso de sellado.



Figura 23. Sensor para la medición de la temperatura ambiente.

## 4.2 PRIMERA SERIE DE EXPERIMENTOS EN EL PROCESO DE SELLADO POR CONVECCIÓN.

Esta serie se realizará utilizando en la pistola de aire caliente una boquilla que guíe el chorro de aire a una zona específica en la punta de la ampolleta para calentar solamente la sección de la boca. La siguiente figura 24 se ilustra lo anteriormente dicho.

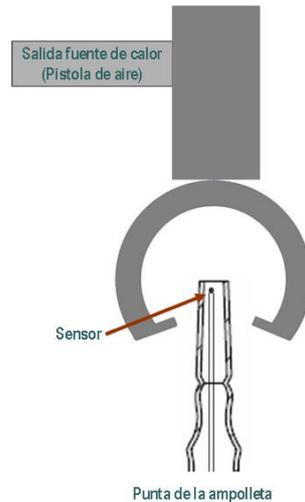


Figura 24. Uso de una boquilla en la pistola de aire caliente.

Dichos experimentos se realizarán midiendo constantemente las siguientes condiciones:

- Temperatura registrada a la salida del chorro de aire caliente “ $T_s$ ”:** El registro de este parámetro se efectuará durante todos los pasos del proceso de sellado.
- Temperatura ambiente “ $T_{amb}$ ”:** El registro de este parámetro se efectuará durante todos los pasos del proceso de sellado.
- Tiempo de exposición  $t$ :** Es la duración del paso dos del proceso de sellado por convección. Este parámetro será establecido dependiendo de los resultados de los experimentos.
- Temperatura de la punta de la ampolleta “ $T_0$ ”:** se medirá durante todos los pasos del proceso de sellado.

La secuencia de las pruebas a realizar durante el proceso de sellado en el banco de pruebas es la siguiente:

1. **Paso 1 del proceso:** Colocar la ampolleta en el carro de sujeción e instalar los sensores en la punta de la ampolleta, a la salida del aire y en una zona apartada del proceso para la medición de la temperatura ambiente. Los parámetros  $T_s$ ,  $T_0$  y  $T_{amb}$  comenzarán a registrarse 2 [seg.] antes de iniciar el segundo paso del proceso.
2. **Paso 2 del proceso (Calentamiento):** Se llevará a cabo de acuerdo al proceso de sellado por convección e inicialmente tendrá una duración de 7 [seg.] que podrá ser modificada de acuerdo a los resultados de cada experimento.
3. **Paso 3 del proceso (Sellado y Conformado):** Finalizado el tiempo el dado actúa sobre la punta de la ampolleta.
4. **Fase final:** El proceso de sellado vuelve al paso 1 y el registro de las temperaturas  $T_s$ ,  $T_0$  y  $T_{amb}$  se detiene. La ampolleta es retirada para el posterior análisis de su sellado.

La finalidad de esta primera serie de experimentos es obtener una primera cuantificación de los efectos del calor sobre la punta de la ampolleta para iniciar el análisis sobre el sellado a partir de los resultados obtenidos y determinar los posibles factores involucrados al utilizar el dado.



Figura 25. Secuencia de la primera serie de experimentos.

### 4.3 SEGUNDA SERIE DE EXPERIMENTOS EN EL PROCESO DE SELLADO POR CONVECCIÓN.

Esta serie de experimentos para el proceso de sellado por convección se realizará de manera similar a la primera serie pero sin utilizar la boquilla en la pistola de aire caliente. Además se modificará la posición de la pistola, que originalmente estaba en forma horizontal y ahora será instalada en posición vertical con respecto a la ampollita como lo muestra la figura 26. La finalidad del cambio de posición de la fuente de calor será analizar si esta modificación produce cambios en la temperatura de la punta de la ampollita o en el comportamiento del material plástico. Todos los demás pasos del experimento se mantendrán como en la primera serie.



Figura 26. Esquema de la segunda serie de experimentos. Otra dirección del flujo del aire caliente.

Las condiciones en las que se realizarán los experimentos serán las siguientes:

- a) **Temperatura registrada a la salida del chorro de aire caliente “Ts”:** El registro de este parámetro se efectuará durante todos los pasos del proceso de sellado.

- b) **Temperatura ambiente “ $T_{amb}$ ”:** El registro de este parámetro se efectuará durante todos los pasos del proceso de sellado.
- c) **Tiempo de exposición  $t$ :** Es la duración del paso dos del proceso de sellado por convección. Este parámetro será establecido dependiendo de los resultados de los experimentos.
- d) **Temperatura de la punta de la ampollita “ $T_0$ ”:** se medirá durante todos los pasos del proceso de sellado.

#### 4.4 TERCERA SERIE DE EXPERIMENTOS EN EL PROCESO DE SELLADO POR CONDUCCIÓN.

En esta serie la fuente de calor compuesta por la resistencia y el dado se mantendrá fija y el pistón realizará el desplazamiento. Estos experimentos se efectuarán bajo las siguientes condiciones:

- a) **Temperatura registrada en el dado “ $T_s$ ”:** Durante el segundo paso del proceso de sellado por conducción se incrementará la temperatura hasta que el material en la punta de la ampollita alcance las condiciones de transición vítrea.
- b) **Temperatura ambiente “ $T_{amb}$ ”:** Se realizará la medición en un sitio alejado de los dispositivos de calentamiento.
- c) **Tiempo de exposición “ $t$ ”:** Será la duración del paso 2 (Calentamiento, sellado y conformado) en el proceso de sellado por conducción. Este parámetro será establecido dependiendo de los resultados de los experimentos.
- d) **La temperatura de la punta de la ampollita “ $T_0$ ”** Será registrada durante la ejecución de todo el proceso de sellado.

La secuencia que seguirá esta serie de experimentos es la siguiente:

1. **Paso 1 del proceso:** Colocar la ampollita en el acoplamiento brida-pistón con los sensores situados en la punta de la ampollita, en contacto con la superficie externa del dado y en una zona lejana para la medición de la temperatura ambiente. Los datos  $T_s$ ,  $T_0$  y  $T_{amb}$  se comenzarán a registrar 2 [seg.] antes de iniciar el paso 2.

2. **Paso 2 del proceso (Calentamiento, sellado y conformado):** Debido a la lenta transferencia del calor, la velocidad de acción del pistón será baja.
3. **Fase final:** El proceso de sellado vuelve al paso 1 y el registro de las temperaturas  $T_s$ ,  $T_0$  y  $T_{amb}$  se detiene. La ampollita es retirada para el posterior análisis de su sellado.

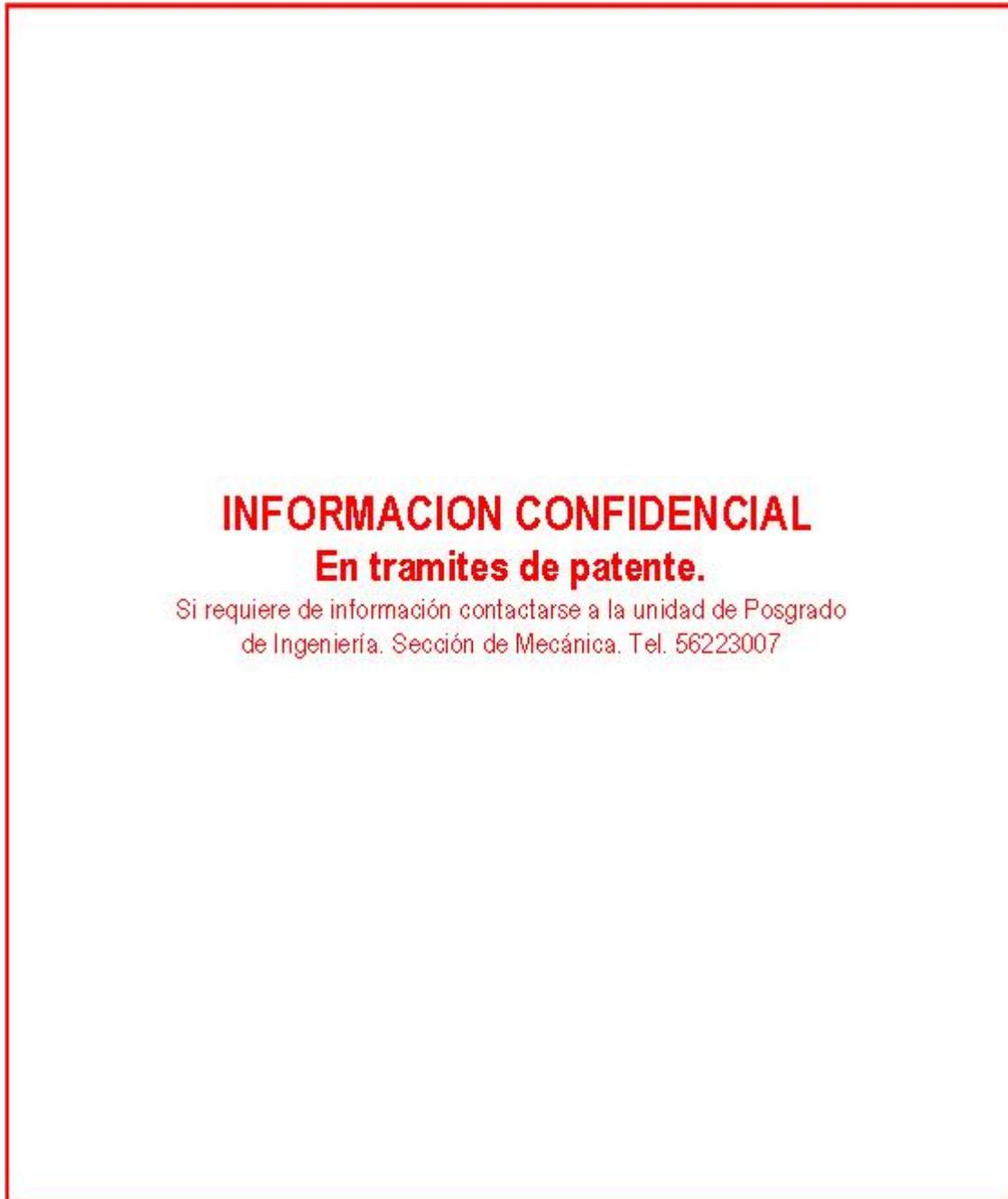


Figura 27. Secuencia de la serie tres de los experimentos.

#### 4.5 CUARTA SERIE DE LOS EXPERIMENTOS EN EL PROCESO DE SELLADO POR RADIACIÓN.

Esta serie de experimentos se realizará con una fuente de calor cuyas configuraciones serán las siguientes:

1. Un control de temperatura de encendido-apagado (on-off), un termopar con punta de acero inoxidable, ambos conectados a una resistencia cubierta de hierro. (Ver figura 28a)
2. Un control de temperatura de encendido-apagado (on-off), un termopar con punta de acero inoxidable y dos resistencias de hierro conectadas en paralelo. (Ver figura 28b)

Esta serie se enfocará a rastrear los cambios que presentará el material en la punta de la ampollita registrándolos en fotografías que serán tomadas durante el paso de transferencia de calor por radiación.



Figura 28a. Secuencia de la serie cuatro de los experimentos. Fuente de calor con una resistencia



Figura 28b. Secuencia de la serie cuatro de los experimentos. Fuente de calor con dos resistencia

#### **4.6 NOTAS FINALES RESPECTO A LOS EXPERIMENTOS.**

Después de analizar los resultados obtenidos a partir de los experimentos descritos en este capítulo se podrán establecer otros planteamientos y parámetros de experimentación que permitan obtener mayor información acerca de los factores involucrados en el sellado de la ampollita. El objetivo primordial de esta investigación será hallar y entender la tendencia del calentamiento en la punta de la ampollita y las condiciones de sellado obtenidas al usar el dado durante el proceso de sellado establecido en el banco de pruebas. Para localizar la exactitud y repetibilidad de los experimentos será necesario controlar agentes ajenos al calentamiento y sellado de la propia ampollita, entre estos se pueden citar los siguientes:

- a) Las condiciones de ataque del flujo de calor a la punta de la ampollita.
- b) El contacto entre el material y el sensor.

El análisis de la tendencia de las curvas de calentamientos de la ampollita, para cada uno de los tres principios de transferencia de calor, estará relacionado con la forma final de la punta de la ampollita.

## CAPITULO 5. LOS RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN.

Los experimentos llevados a cabo en la presente investigación fueron diseñados con la finalidad de observar aquellos factores que intervienen en el sellado de la ampolleta dentro de cada uno de los tres principios de transferencia de calor establecidos. De los resultados obtenidos en dichos experimentos, la tendencia del calentamiento y la forma final de la punta de la ampolleta serán los aspectos estudiados con mayor atención para entender los factores más relevantes en el proceso de sellado.

### 5.1 RESULTADOS DELA PRIMERA SERIE DE EXPERIMENTOS.

Como se describió en el capítulo anterior, dentro de la primera serie de pruebas para proceso de sellado por convección fue conectada una boquilla a la salida de la pistola de aire caliente que permitiera dirigir el flujo del aire hacia la zona de mayor interés a calentar: la boca de la punta de la ampolleta. Dicha boquilla expulsaba el aire por dos aberturas rectangulares de 2 [mm] de anchura por 1 [cm] de longitud.

Antes de realizar la experimentación, la conexión entre la boquilla y la salida de la pistola de aire caliente fue la siguiente. (Ver figura 29)

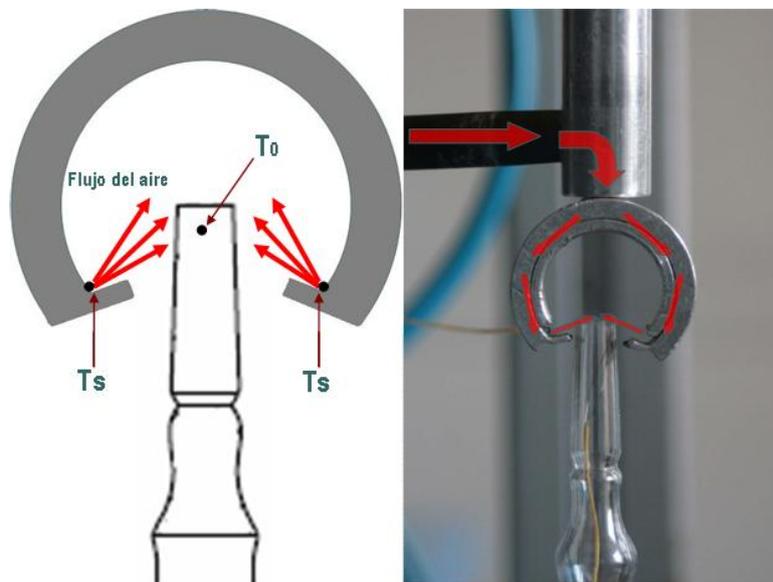


Figura 29. Utilización de la boquilla.

En las primeras etapas del diseño conceptual, la trayectoria del flujo de aire calentado se visualizaba como una trayectoria simple porque aparentemente tenía pocos cambios de dirección (Ver lado derecho de la figura 29). En esta etapa del experimento no se tenía

una cuantificación real de las pérdidas de calor que ocurrirían al momento de realizar los experimentos. Los factores que surgieron como resultado al utilizar la boquilla en el calentamiento de la punta de la ampollita fueron los siguientes:

- **Excesiva pérdida de energía calorífica:** El dispositivo trabajaba a su máxima capacidad de operación, sin embargo, al analizar la diferencia entre los valores de la temperatura antes de entrar a la boquilla (460 [°C]) y al salir de esta (240 [°C]) se cuantificó una pérdida de 220 [°C]. Al analizar estos registros se dedujo que los factores involucrados en esta excesiva pérdida de calor fueron los siguientes:
  1. Los cambios de trayectoria que sufre el flujo de aire caliente dificultan aprovechar el calor transferido. (Figura 30a)
  2. La boquilla de la pistola de aire presenta, por razones de manufactura, concavidades que perturban la trayectoria del flujo del aire.
  3. La boquilla utilizada en los experimentos fue hecha de aluminio y, debido a que este material presenta alta conductividad térmica, gran parte del calor del aire se disipó hacia el medio ambiente. (Figura 30a)
  
- **Temperaturas no homogéneas durante el calentamiento de la punta de la ampollita:** Después de hacer un registro de las temperaturas en distintos puntos de la boca de la ampollita, cuando ésta era expuesta al chorro de aire calentado, se comprobó que las paredes internas tenían temperaturas menores con respecto a las paredes externas. Esta diferencia de temperatura fue aproximadamente de 10 [°C]. De lo anterior se deduce que la geometría de la punta y la orientación del chorro de aire caliente son factores relevantes en el proceso de transferencia de calor. (Figura 30b)
  
- **Dos zonas de calentamiento a temperaturas  $T_g$  y  $T_m$ :** A lo largo de la punta de la ampollita, se establecieron dos zonas de calentamiento y cada una de estas presentó condiciones de temperaturas distintas. La parte superior (boca de la punta) alcanzó temperaturas  $T_g$  (transición vítrea) mientras que la sección inferior mostró temperaturas menores de  $T_m$  (moldeo) que no permitieron que el material cambiara su forma original. (Figura 30c)

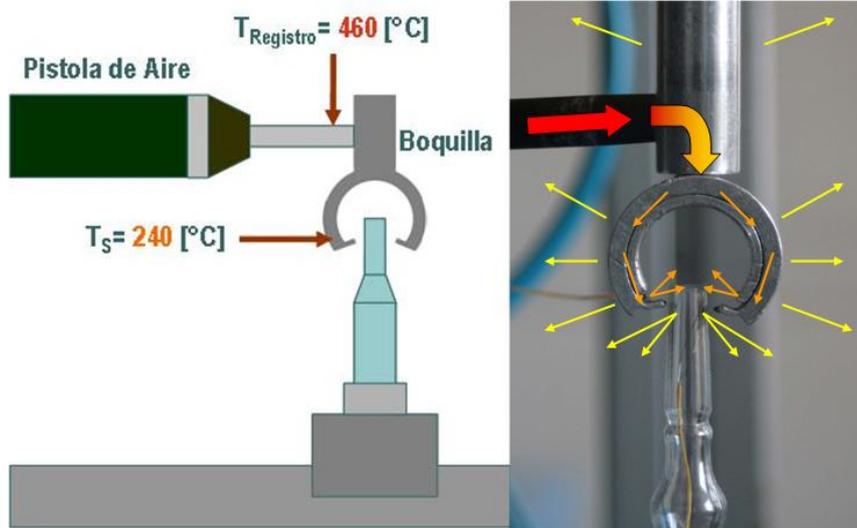


Figura 30a. Disipación de calor al usar la boquilla.

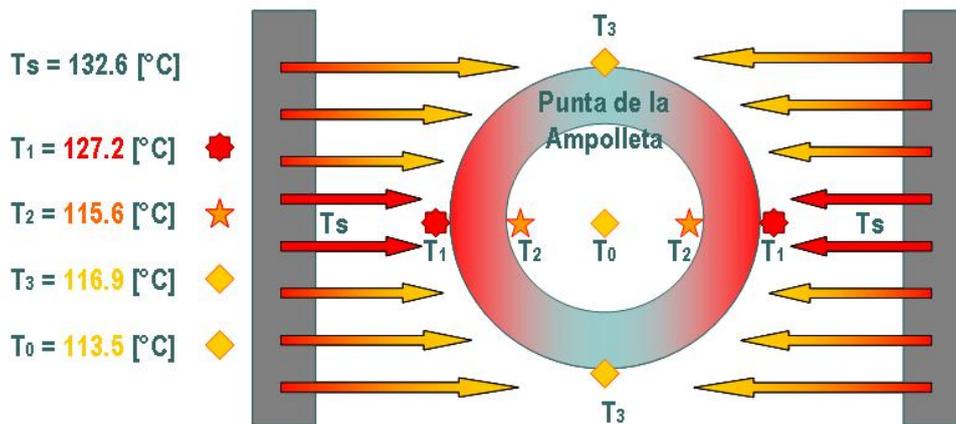


Figura 30b. Diferencia de temperaturas en la punta de la ampollita.

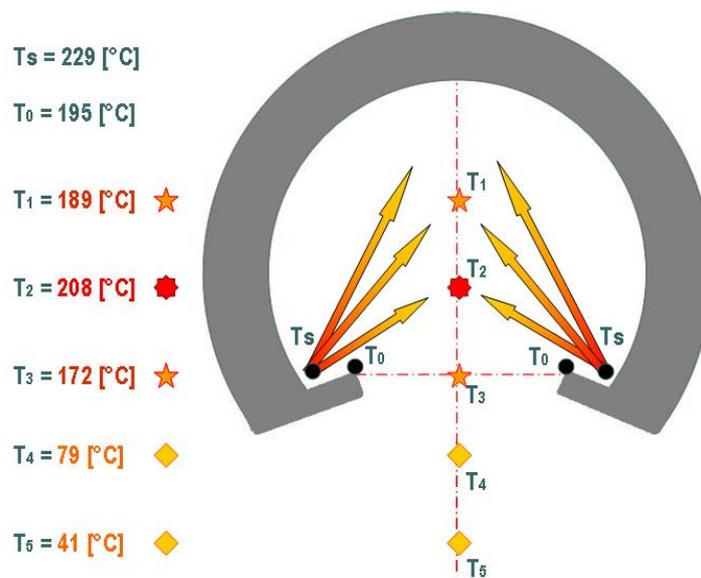
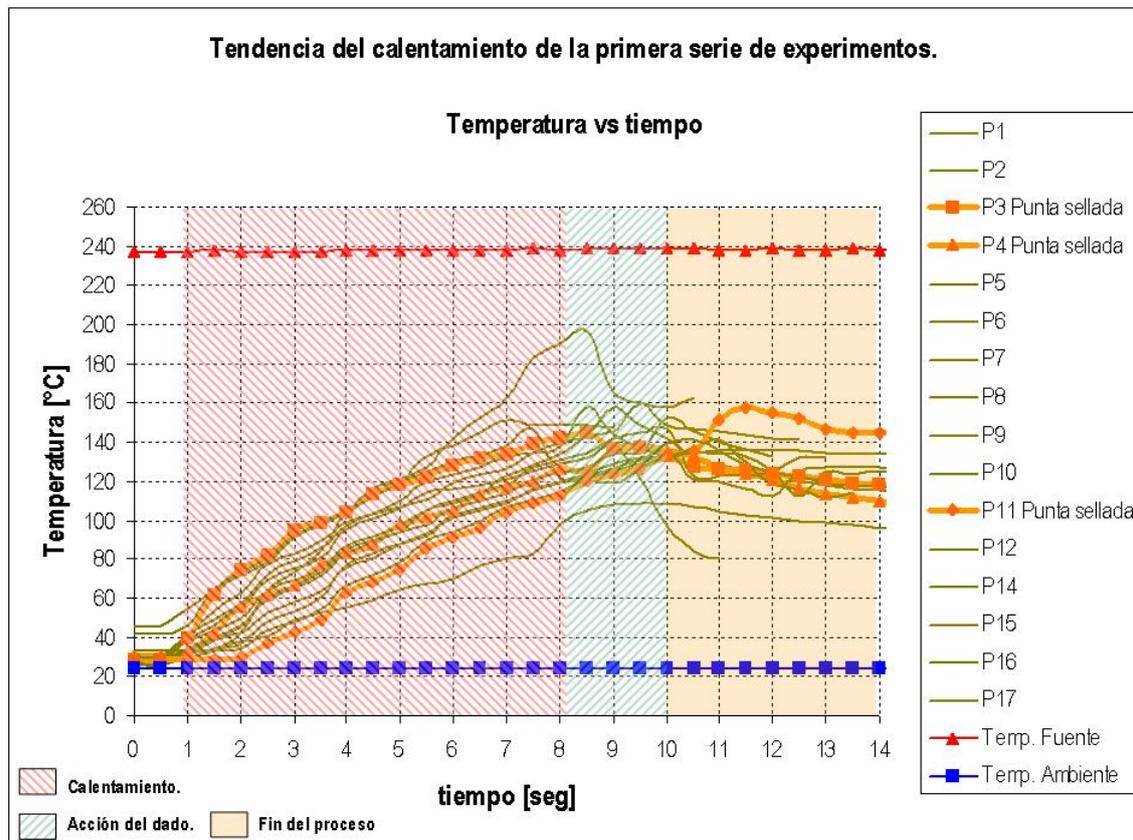


Figura 30c. Zona de calentamiento en la boquilla.

En la primera serie de experimentos se realizaron diecisiete pruebas para analizar el calentamiento de la punta de la ampolleta. Los resultados de estas se muestran en la gráfica 1.

El tiempo total para llevar a cabo los pasos del proceso de sellado por convección fue de 9 [seg.] de los cuales los primeros 7 [seg.] corresponden a la exposición de la punta de la ampolleta al chorro de aire caliente y los últimos 2 [seg] al tiempo de la acción del dado. Después de transcurrir 14 [seg.] se detuvo el registro de las temperaturas de la fuente de calor, la punta de la ampolleta y del medio ambiente.



Gráfica 1. Resultados de la primera serie de pruebas experimentales.

En la gráfica anterior, la línea superior (roja) representa el registro de la temperatura de salida “T<sub>s</sub>” de la pistola de aire caliente y la línea inferior (azul) muestra el registro de la temperatura ambiente “T<sub>amb</sub>”. Durante las diecisiete pruebas realizadas, se registró que la temperatura se comportaba de manera similar en todos los casos, con una diferencia de temperaturas de  $\pm 1$  [°C]; por lo tanto, se concluyó que las pruebas fueron realizadas bajo las mismas condiciones; esto permitió que fuera posible realizar comparaciones entre ellas.

En dicha gráfica se fijaron tres zonas determinadas por los tiempos de ejecución de los pasos del proceso de sellado. Estas zonas fueron:

1. *Calentamiento*: El tiempo de duración se estableció en la etapa de planeación de los experimentos.
2. *Acción del dado*: Involucra el paso de sellado y conformado y su retorno a la posición inicial para un nuevo experimento.
3. *Fin del proceso*: Es el registro de la temperatura de la punta de la ampolleta en su etapa de enfriamiento.

Examinando la grafica 1 se puede distinguir que los resultados obtenidos muestran lo siguiente:

1. **Se encontró un rango máximo de temperatura alcanzada durante el calentamiento**: Al transcurrir los 7 segundos correspondientes a la etapa del calentamiento (8 [seg.] contemplando el tiempo de 0 inicio de la prueba), se pudo visualizar un rango promedio de la máxima temperatura que alcanza la punta de la ampolleta. Este rango parte de 114.2 [°C] hasta 141.7 [°C]. Sólo en dos pruebas se registraron temperaturas que salen del rango promedio siendo estas de 190.2 [°C] y 97.5 [°C].
2. **La tendencia del calentamiento se asemeja a una recta ascendente**: Se deduce que este comportamiento es una particularidad del calentamiento de la punta de la ampolleta cuando la transferencia de calor es llevada a cabo por convección. Aun en las pruebas que salen del rango promedio de temperaturas máximas, el calentamiento de la punta de la ampolleta se da de forma gradual.
3. **Las temperaturas registradas en las pruebas no establecen condiciones de degradación del material**: En ninguna de las pruebas de esta serie el PVC tomó una coloración opaca, por lo tanto se puede concluir que a temperaturas no superiores a 190 [°C] el PVC puede ser tratado para cambiar su forma a condiciones de transición vítrea sin perder las propiedades estéticas de transparencia.

Examinando los resultados finales en las ampolletas dentro las diecisiete pruebas sólo en tres casos se obtuvieron resultados de sellado con las siguientes particularidades: (Ver figura 31a)

1. Acabado final rugoso sobre la superficie de la ampolleta que estuvo en contacto con el dado.
2. El material de la punta de la ampolleta no alcanzó de forma homogénea las condiciones de sellado (temperaturas de transición vítrea), lo cual produjo hendiduras en el material calentado.
3. La forma final no fue equivalente al perfil de media esfera del dado que realiza las funciones de sellado y conformado.

En los casos de las pruebas no selladas, las características más relevantes fueron las siguientes: (Ver figura 31b)

1. El material fundido resultó insuficiente para sellar la ampolleta.
2. La ampolleta sufrió fallas de alineación durante la acción del dado, ocasionando que el material fundido no haya sido situado y moldeado de manera satisfactoria.
3. La forma final presentó aberturas u orificios que ocasionaron fuga de líquido.



a) Resultado de ampolleta sellada.

b) Resultado de ampolleta no sellada

Figura 31. Resultados de la primera serie de pruebas.

A pesar de que en esta serie de pruebas el chorro de aire caliente fue dirigido hacia la zona de interés, los resultados del sellado no fueron satisfactorios porque no cumplieron con los requerimientos establecidos inicialmente (Ver Capítulo 1).

La desalineación de la ampolleta al momento de la ejecución del paso del sellado y conformado fue un aspecto indicador de que la función “*Sujetar*” no se realizó correctamente en todos los casos. De este modo, dicha función cobró relevancia en los resultados finales del proceso ya que a partir de estos resultados la relación de alineación existente entre el dado y la punta de la ampolleta fue mejor controlada en el dispositivo que ejecutó dicha función. Para las posteriores pruebas el dispositivo de sujeción (Carro de sujeción) se ajustó estrechando el espacio donde la ampolleta era colocada.

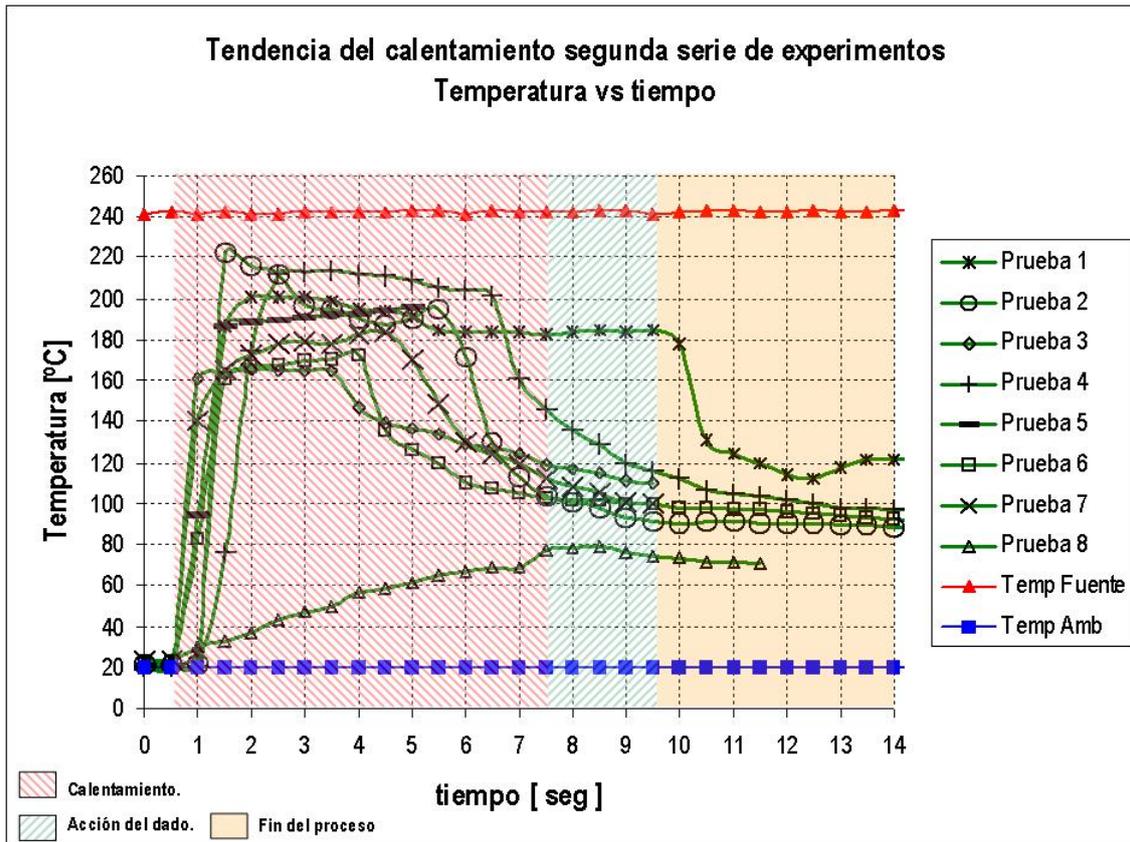
## **5.2 LOS RESULTADOS DE LA SEGUNDA SERIE DE EXPERIMENTOS.**

En esta serie el cambio de posición de la pistola de aire caliente a una posición vertical y la eliminación de la boquilla produjeron resultados distintos respecto a la primera serie de experimentos. Por otra parte, la alineación de la punta de la ampolleta con el eje de acción del dado aumentó gracias a los ajustes que se realizaron en el carro de sujeción.

Las tendencias de calentamiento registradas en esta segunda serie de experimentos se muestran en la gráfica 2.

En dicha gráfica la línea superior (roja) indica el comportamiento de la temperatura de salida “ $T_s$ ” de la pistola de aire caliente y la línea inferior (azul) el comportamiento de la temperatura ambiente “ $T_{amb}$ ”.

En esta serie se realizaron ocho pruebas dentro de las cuales se manifestó una diferencia de temperaturas de  $\pm 1$  [°C] por lo que se concluye que fueron ejecutadas a similares condiciones.



Grafica 2. Resultados de la segunda serie de pruebas experimentales.

De dichas pruebas se observó que dirigir el chorro de aire caliente directamente hacia la punta de la ampolleta en forma vertical produjo los siguientes resultados:

1. **El sensor no registró la temperatura de la punta de la ampolleta:** En estos experimentos, el sensor estuvo en contacto directo con el flujo de aire lo cual provocó que se midiera la temperatura de este y no la temperatura real de la punta (Ver figura 32).
2. **Tendencia de calentamiento irregular en las pruebas realizadas:** El sensor medía la temperatura de forma puntual haciendo difícil determinar la temperatura que el material alcanzaba en la etapa de calentamiento.
3. **Perdida de temperatura en el flujo del aire calentado:** En esta serie de experimentos, la temperatura máxima registrada fue de 220 [°C] lo cual indicó que el chorro de aire que calentaba la punta de la ampolleta no mantenía los 240 [°C] de temperatura de salida. Con lo anterior se pudo observar que parte de la energía calorífica era transferida al medio ambiente.

4. **No se manifestaron condiciones de degradación del material:** El PVC en la punta de la ampollita no tomó una coloración opaca (café).
5. **No se tuvo en la punta de la ampollita zonas definidas de temperaturas de sellado:** La libre trayectoria del chorro de aire caliente produjo que toda la punta de la ampollita se calentara alcanzando condiciones de moldeo sin llegar a temperaturas de transición vítrea.

Los resultados obtenidos en las puntas de las ampollitas expuestas al calor, al efectuarse la acción del dado fueron los siguientes:

1. El chorro de aire caliente que ingresó en el interior de la punta de la ampollita produjo un calentamiento homogéneo, ablandando todo el material de esta. Al efectuarse el giro del dado, la punta se deformó sin lograr unir las partes del material calentado.
2. No fue suficiente alcanzar condiciones de sellado en el material plástico, los resultados obtenidos indican que es preciso tener un soporte sólido para que el dado ejecute adecuadamente su función de *sellar y conformar*.

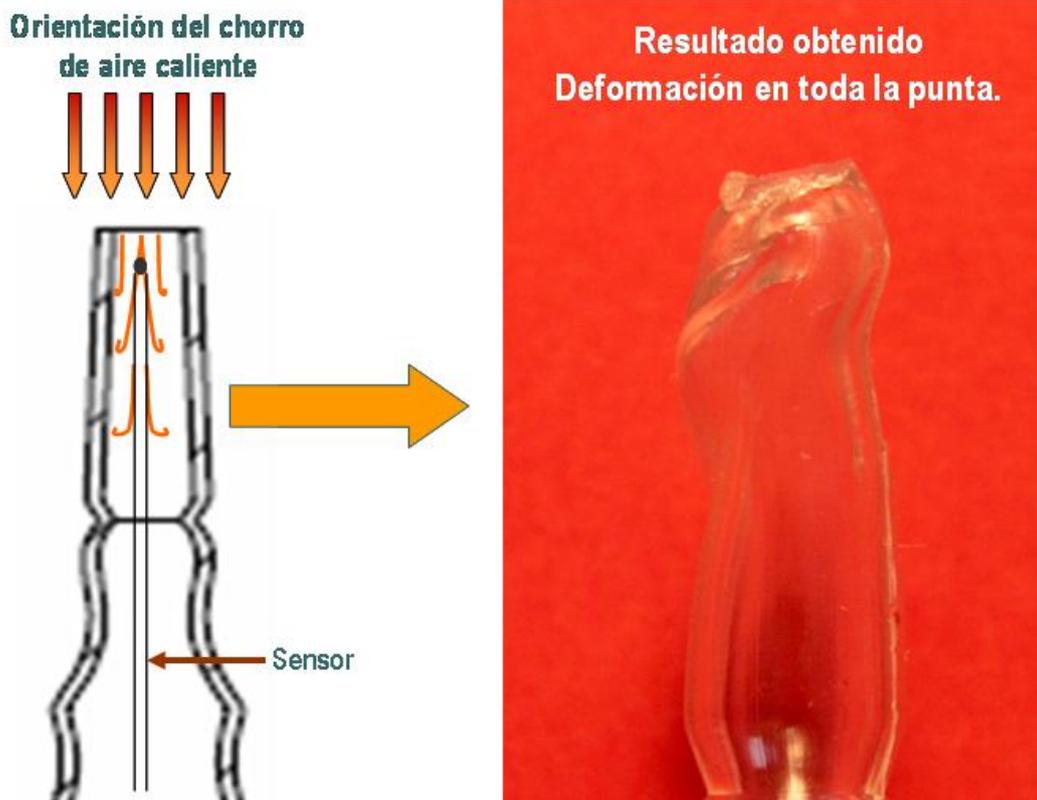


Figura 32. Resultado obtenido en la punta de la ampollita en la segunda serie de experimentos.

### 5.3 LOS RESULTADOS DE LA TERCERA SERIE DE EXPERIMENTOS.

En esta serie, se utilizó como fuente de calor una resistencia acoplada al dado de sellado y conformado; esto proporcionó resultados diferentes en los experimentos por convección.

En las siguientes seis gráficas, se mostrará el comportamiento que manifestó el material al entrar en contacto con la fuente de calor (gráficas 3a, 3b, 3c, 3d, 3e, 3f). Dichas gráficas tienen las siguientes particularidades:

1. La línea superior (roja) indica la conducta de la temperatura de salida “ $T_s$ ” del dado-resistencia y la línea inferior (azul) la temperatura ambiente “ $T_{amb}$ ”. Estos registros muestran una diferencia de temperatura de  $\pm 2$  [°C] entre una prueba y otra; de esto se concluye que para cada caso las condiciones experimentales fueron similares en las pruebas de esta serie de experimentos.
2. Se delimitaron dos zonas para marcar los límites entre cada uno de los pasos del proceso de sellado por conducción, dichos pasos fueron los siguientes:
  - *Calentamiento, sellado y conformado:* En el momento en que la punta de la ampollita y el dado están en contacto, inicia la transferencia del calor. Al realizarse el calentamiento, el material será colocado en la parte superior de la punta moldeándose a la forma semiesférica del dado.
  - *Fin del proceso.* En este paso se registró el enfriamiento de la punta de la ampollita después de haber pasado la acción del dado.

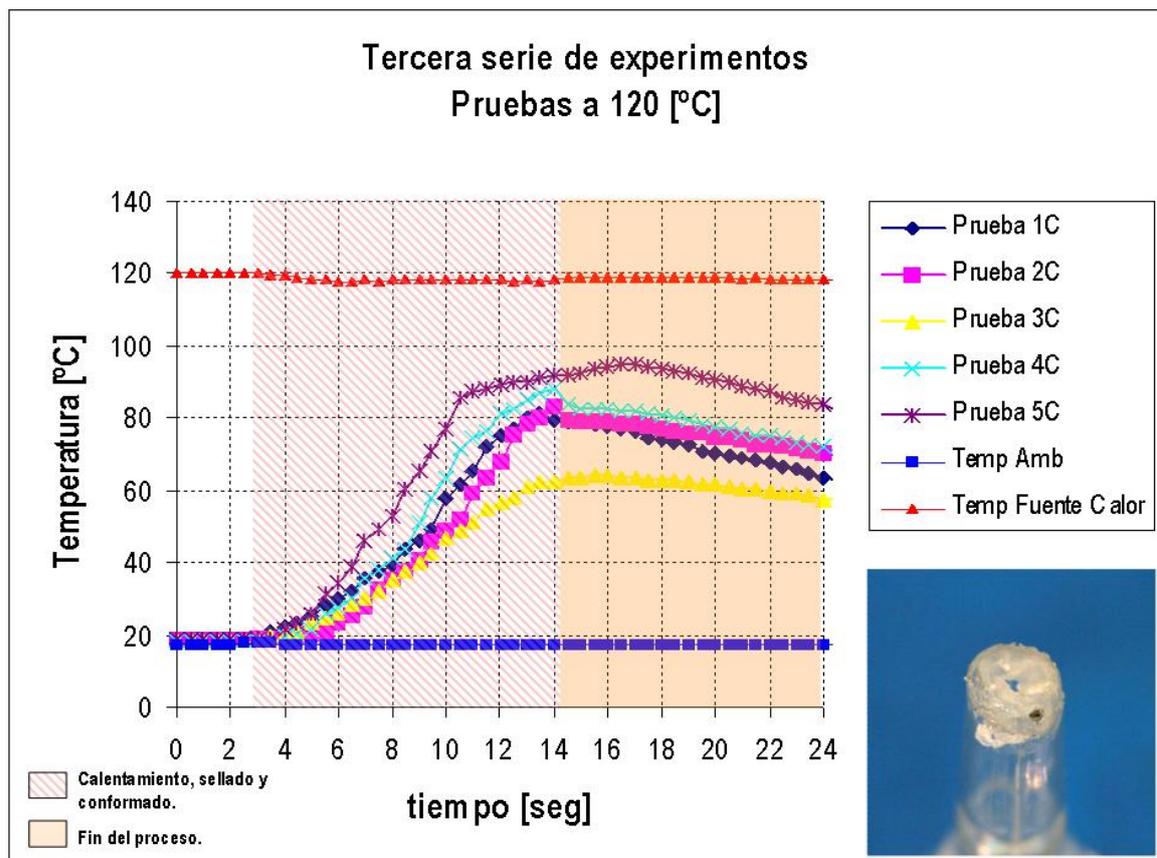
A pesar de que las gráficas 3a, 3b, 3c fueron efectuadas a distintas temperaturas (120 [°C], 136 [°C] y 157 [°C] respectivamente), los resultados obtenidos en sus registros muestran particularidades similares:

1. En la primera zona delimitada, la tendencia del calentamiento de la punta de la ampollita asemeja a una parábola.
2. En las pruebas realizadas, se observó un rango promedio de temperatura de 31 [°C] durante la ejecución del proceso de sellado en las distintas condiciones de calentamiento.

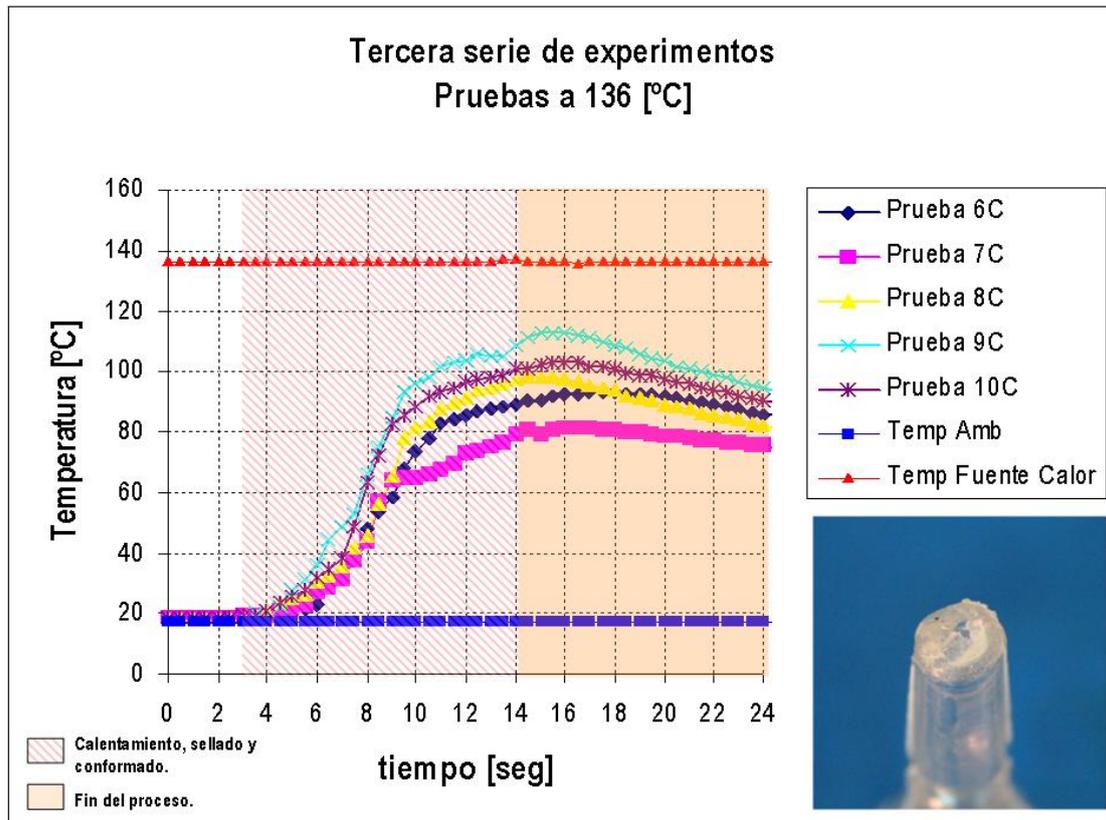
3. La temperatura máxima registrada durante el calentamiento no alcanzó la temperatura de la fuente de calor.
4. Las temperaturas registradas no lograron condiciones de transición vítrea, sólo llegaron a condiciones de moldeo.
5. No se manifestaron indicios de degradación en el PVC.

En las puntas de las ampollas los resultados obtenidos también muestran particularidades:

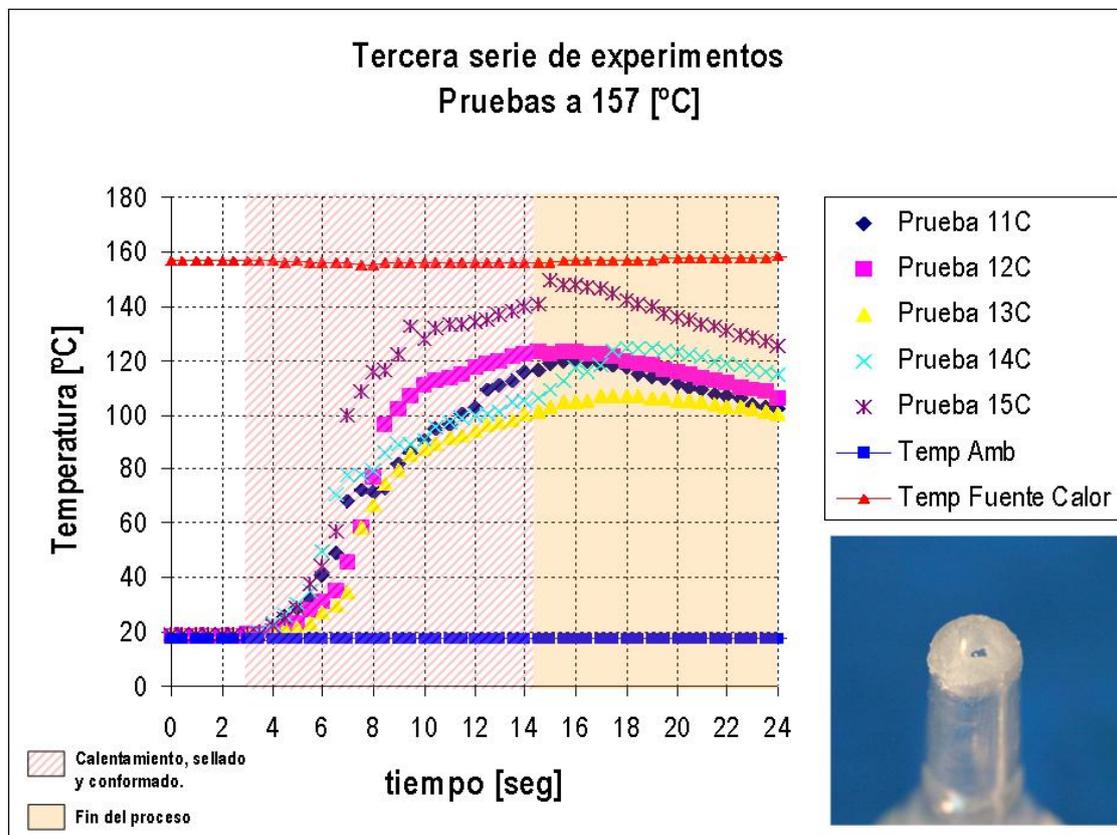
1. Un acabado rugoso sobre la superficie de la forma final.
2. Deformaciones en la punta causadas porque la temperatura de la fuente de calor no fue suficiente para alcanzar condiciones de sellado.
3. La forma final de la punta de la ampollita fue irregular y no correspondió al perfil de media esfera del dado.



Grafica 3a. Pruebas realizadas a  $T_s = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Grafica 3b. Pruebas realizadas a  $T_s = 136$  °C.



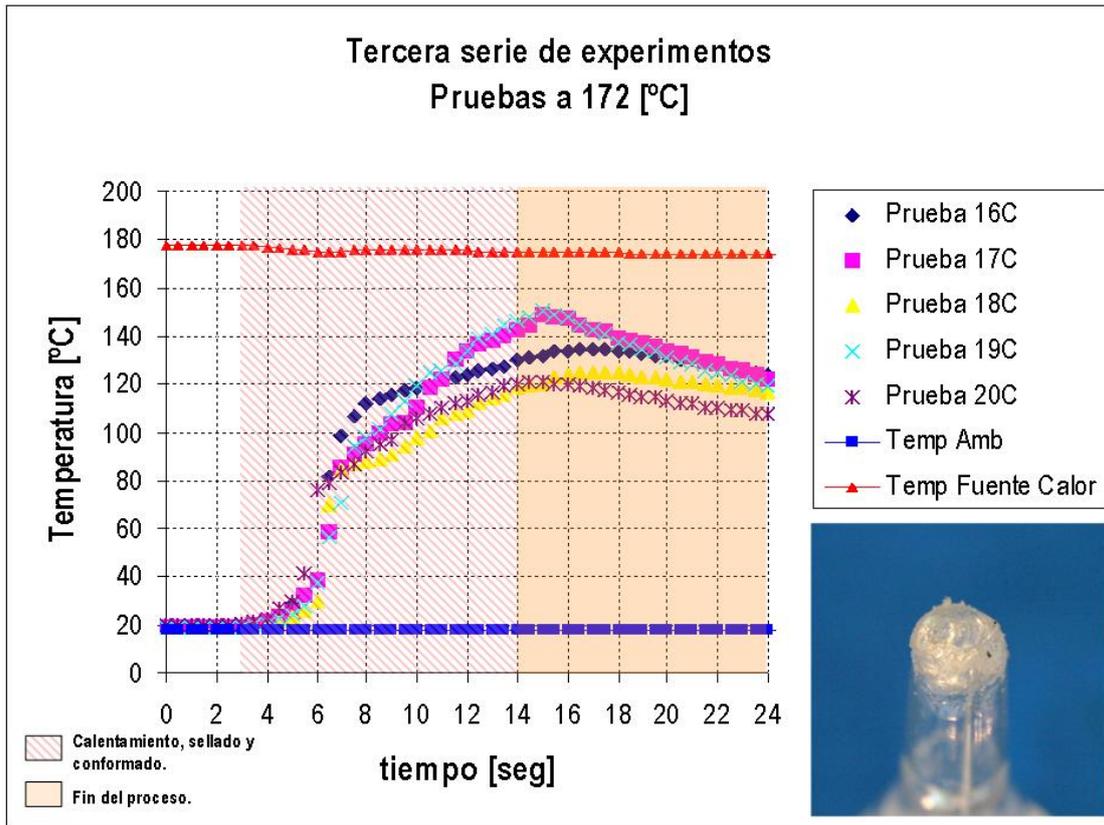
Grafica 3c. Pruebas realizadas a  $T_s = 157$  °C.

Las pruebas registradas en las gráficas 3d y 3e se efectuaron a temperaturas de 172 [°C] y 187 [°C] en la fuente de calor, respectivamente. Dichas gráficas revelan los siguientes aspectos:

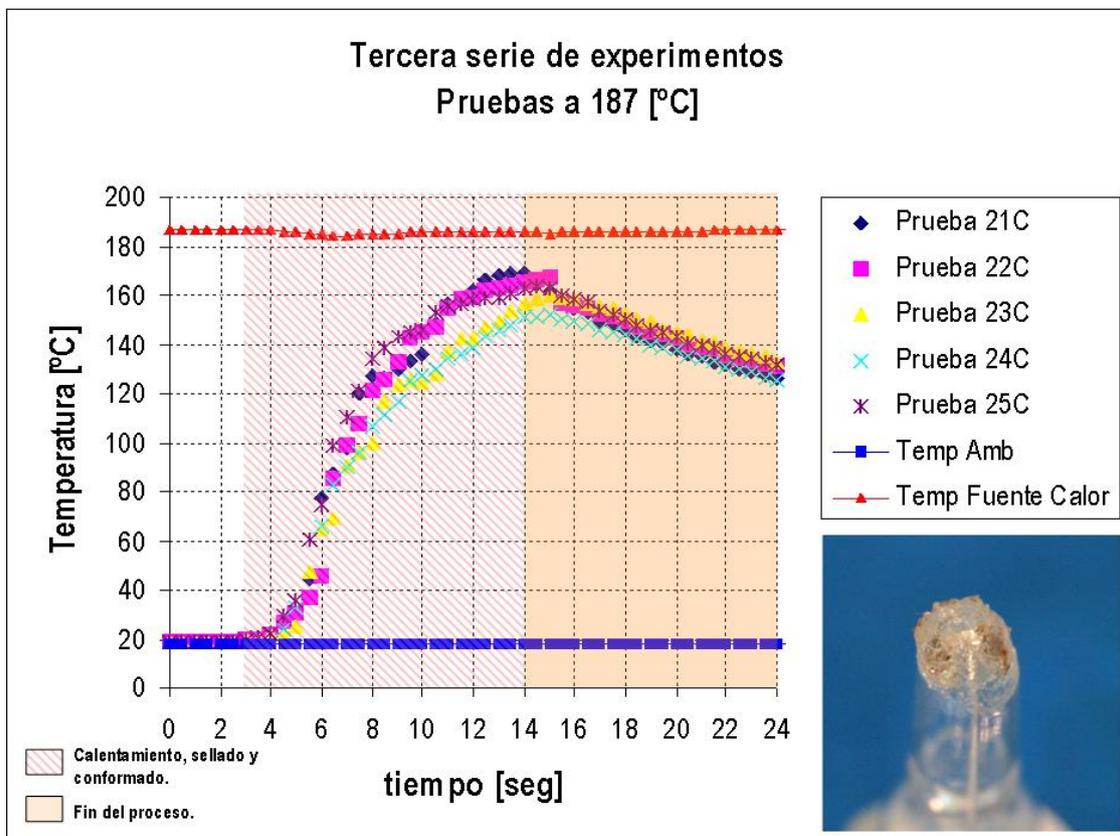
1. En la primera zona delimitada (etapa del calentamiento) la tenencia asemeja a una parábola.
2. En las pruebas realizadas se observó un rango promedio de temperatura de 20 [°C] lo cual manifiesta un calentamiento más homogéneo en la punta de la ampollita.
3. La temperatura máxima registrada durante el calentamiento no fue igual a la temperatura de la fuente de calor.
4. Las temperaturas alcanzadas en la punta proporcionaron condiciones de sellado en el PVC.
5. Hay indicios de degradación en el PVC.

Aunque las temperaturas en que se realizaron los experimentos hicieron que el PVC alcanzara el punto de transición vítrea, el sellado de la punta de la ampollita no cumplió con los requerimientos establecidos. Los resultados de sellado en esta serie de experimentos tuvieron las siguientes particularidades:

1. Acabado superficial áspero.
2. Parte del material que llegó al estado de transición vítrea quedó adherido a la superficie del dado.
3. A pesar de que el calentamiento haya sido uniforme el material que alcanzó el estado de transición vítrea fue insuficiente provocando que se presentaran secciones abiertas en todas las pruebas.
4. La forma final de la punta de la ampollita no fue equivalente al perfil de media esfera de la forma de dado.
5. En las pruebas realizadas a 187 [°C] la punta de la ampollita muestra inicios de degradación del PVC (coloración café).



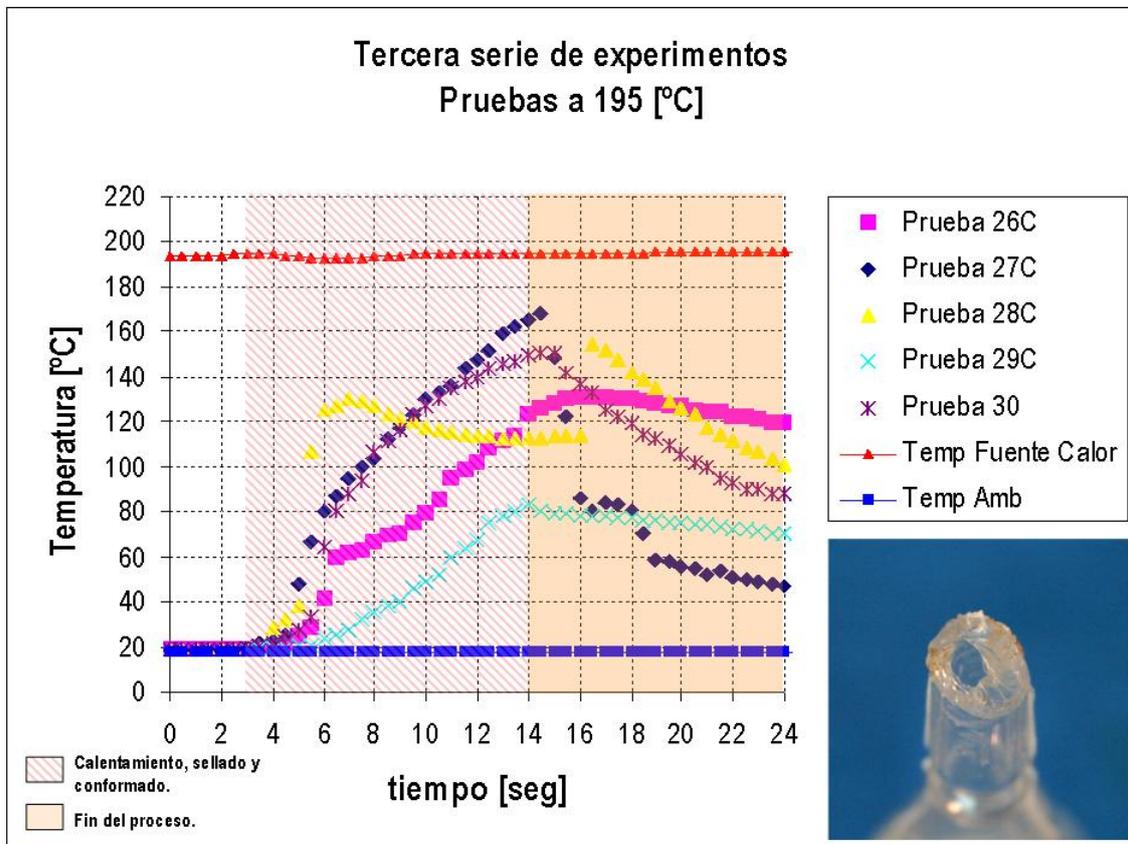
Grafica 3d. Resultados de la tercera serie de pruebas experimentales.



Grafica 3e. Resultados de la tercera serie de pruebas experimentales.

Los datos de la grafica 3f se obtuvieron manteniendo la misma temperatura ambiente de las pruebas anteriores y aumentando la temperatura de la fuente a 195 [°C]. Dichos registros muestran los siguientes resultados:

1. La tendencia del calentamiento de las pruebas fue irregular.
2. La curva de registro de las temperaturas no fue continua.
3. En las pruebas realizadas no se encontró un rango promedio de temperatura confiable lo cual muestra que no se tuvo un control adecuado de las mediciones de temperatura.
4. La temperatura máxima registrada durante el calentamiento no llegó a ser la temperatura de la fuente de calor.
5. Las temperaturas registradas proporcionaron condiciones de moldeo y transición vítrea en el PVC.
6. Se manifestó mayor degradación en el PVC que en las pruebas anteriores.



Grafica 3f. Resultados de la tercera serie de pruebas experimentales.

Las razones por las cuales se obtuvieron estos registros se pueden explicar con base en los resultados obtenidos en las puntas de las ampollitas. Dichos aspectos son los siguientes:

1. La parte de la punta de la ampollita que estuvo en contacto con el dado alcanzó temperaturas de transición vítrea " $T_g$ " por tanto las condiciones para sellar la punta eran idóneas.
2. Al retirar la ampollita del dado, el material a temperaturas " $T_g$ " quedó adherido en la concavidad de éste.
3. El PVC a temperatura " $T_g$ " es acuoso y viscoso.
4. El PVC comenzó a degradarse y tomó una coloración café por lo que perdió transparencia.

Tras haber observado los resultados de todos los experimentos se determinaron los siguientes aspectos:

1. La rugosidad superficial en la concavidad del dado determina el acabado final en las puntas de las ampollitas.
2. El dado requiere de un recubrimiento especial debido al aumento de la adherencia entre el material del dado y el PVC a temperaturas de transición vítrea " $T_g$ ".
3. La transferencia de calor por contacto tiene un tiempo específico que depende de la conductividad térmica del material de la ampollita.
4. Aumentando la temperatura de salida " $T_s$ " de la fuente de calor se obtiene mejores condiciones para que el material alcance condiciones de transición vítrea.

#### **5.4 LOS RESULTADOS DE LA CUARTA SERIE DE EXPERIMENTOS.**

En esta serie de experimentos no se registró la temperatura de la punta de la ampollita durante la fase de calentamiento porque, en previas simulaciones de sellado, el sensor registraba la temperatura emitida por la resistencia en vez de la temperatura que alcanzaba el material durante el proceso. Por lo tanto, se eligió analizar a través de

imágenes los cambios físicos de la punta de la ampollita durante la etapa del calentamiento.

En la primera configuración del sistema de calentamiento, el tiempo de exposición de las pruebas al calor fue de 7 [seg.] y la temperatura de la resistencia registró 420 [°C]. La resistencia, hecha de hierro, alcanzó el estado conocido como “rojo vivo”.

La serie de las imágenes que se muestran a continuación (Ver figura 33) fueron tomadas a intervalos de 2 [seg.] debido a que los cambios físicos de la punta de la ampollita son más notorios en este tiempo.

Los aspectos que se observaron durante estos experimentos fueron los siguientes:

- El PVC tomó una tonalidad opaca (humo) conforme se incrementó su temperatura.
- El calentamiento fue homogéneo en todo el perfil geométrico (cilíndrico) de la punta de la ampollita.
- A estas condiciones de calentamiento no hubo indicios de degradación en el PVC.
- Visualmente se observó que el PVC localizado en la boca de la punta de la ampollita alcanzó la temperatura  $T_g$  (transición vítrea).

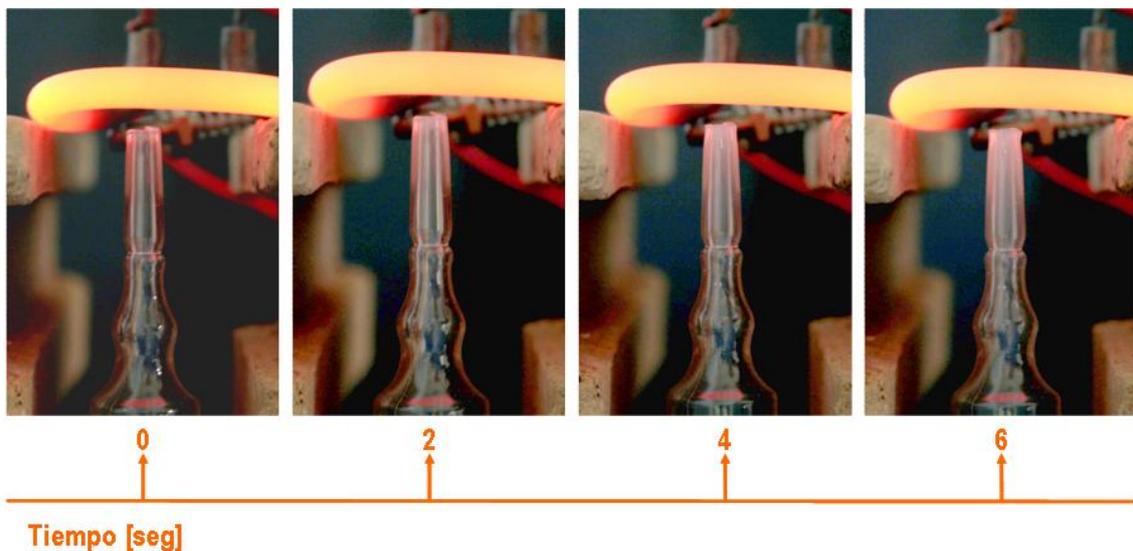


Figura 33. Secuencia de imágenes durante el calentamiento de la punta de la ampollita por radiación.

Durante el paso de sellado y conformado, el PVC localizado en la boca de la punta de la ampollita alcanzó temperaturas  $T_g$ , sin embargo, no se obtuvo un sellado uniforme debido a que la demás secciones de la punta sufrieron deformaciones causadas por la acción del dado.

Antes de obtener estos resultados, se realizó el cambio de configuración en el sistema de calentamiento de dos resistencias y se llevaron a cabo otros experimentos. Dichos experimentos tuvieron un tiempo de exposición al calor de 7 [seg.] a una temperatura de 409 [°C]. Al igual que en las pruebas anteriores, la serie de imágenes registradas fue tomada a intervalos de tiempo de 2 [seg] (figura 34).

En las fotografías tomadas a la punta de la ampollita se puede observar lo siguiente:

1. El PVC adquirió una tonalidad opaca (humo) conforme incrementó su temperatura.
2. A los 4 [seg.] del calentamiento la boca de la punta de la ampollita comenzó a deformarse debido al reblandecimiento del PCV.
3. El PVC mostró indicios de degradación a los 6 [seg.]

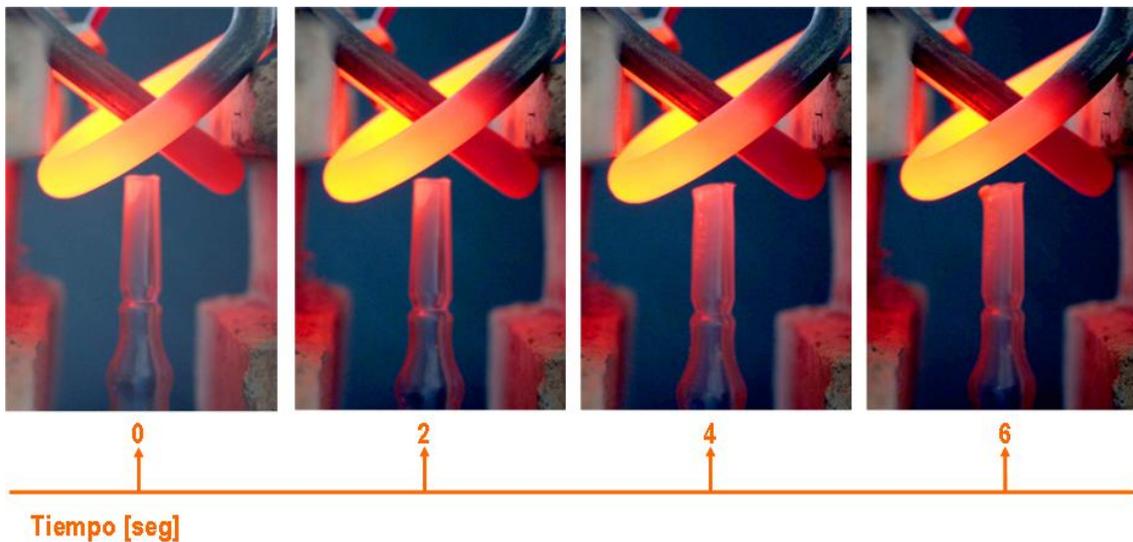


Figura 34. Secuencia cuarta serie de experimentos 2 resistencias.

Durante el paso de sellado y conformado el PVC localizado en la punta de la ampollita manifestó condiciones de sellado (temperaturas superiores a  $T_g$ ). Sin embargo, no se logró sellar la ampollita porque toda la punta se deformó debido a la acción del dado.

La forma final en la punta de las ampollitas obtenidas de estos experimentos es muy similar a la que se muestra en la figura 35.



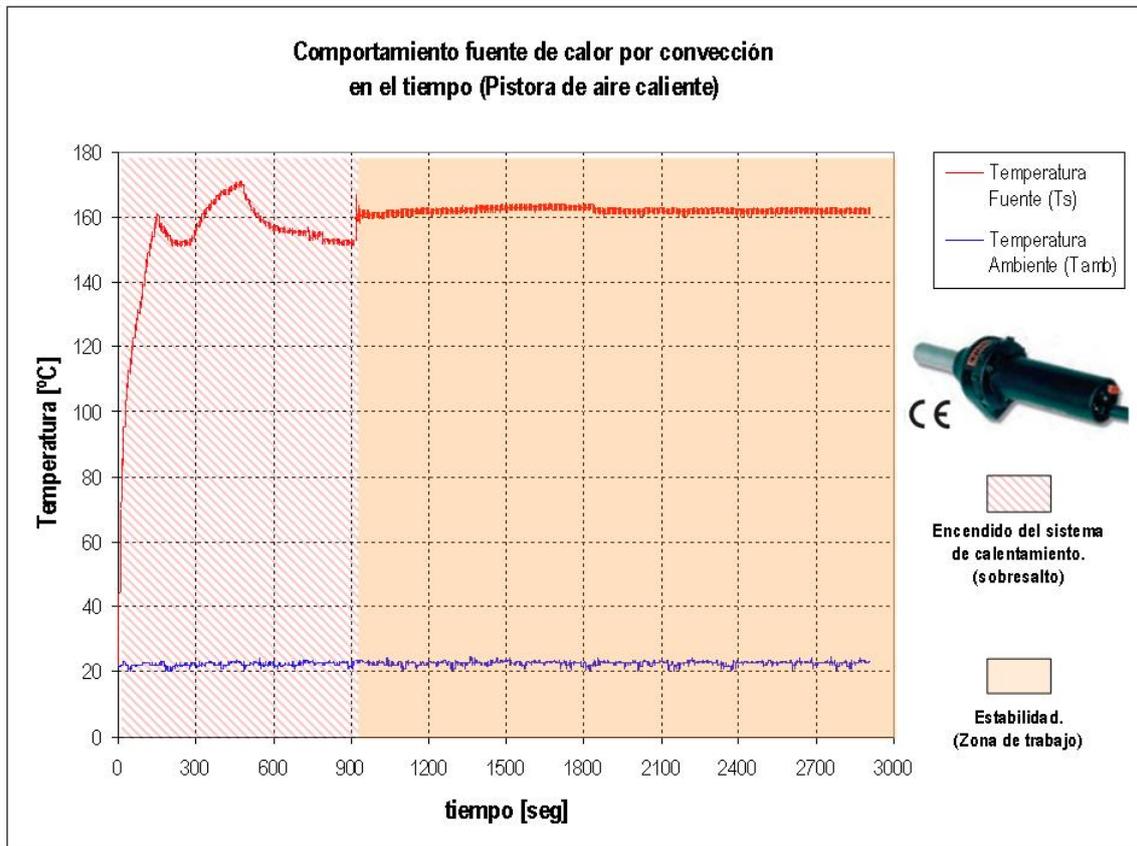
Figura 35. Resultados de la cuarta serie de experimentos en la punta de la ampollita.

Examinando ambos resultados de los experimentos se observa que:

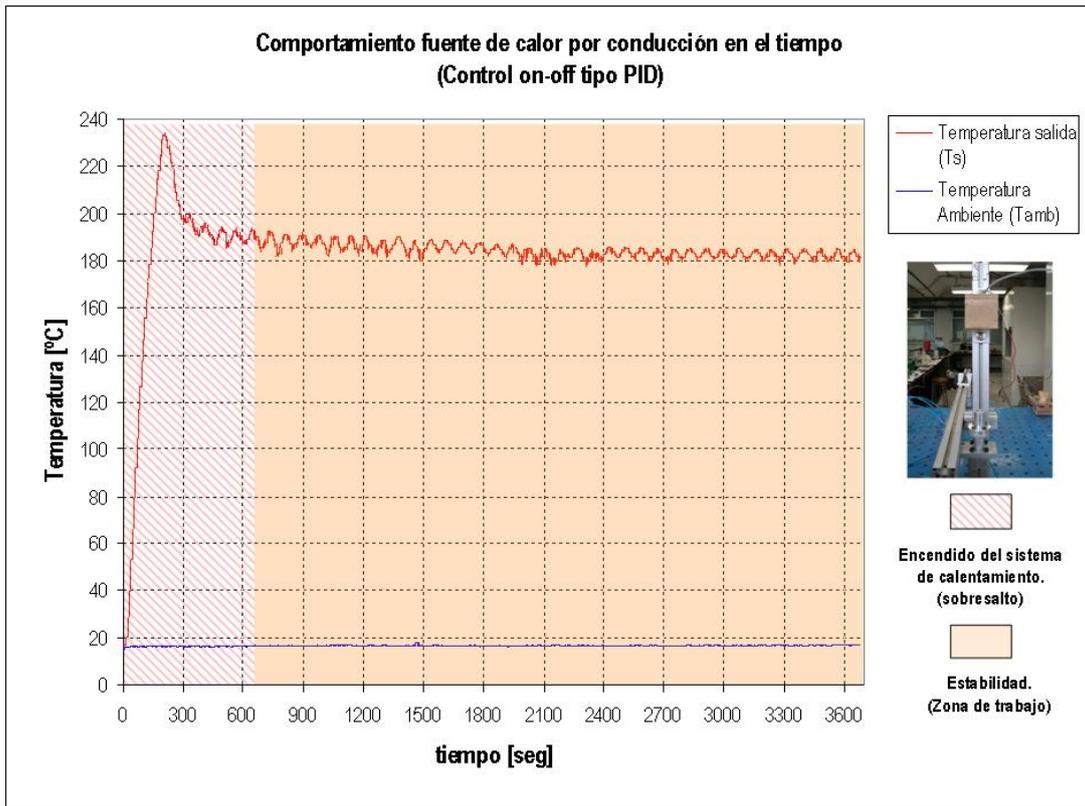
1. El PVC expuesto al calor radiante adquirió brillantez y su aspecto fue más cristalino por lo que aumentó su parecido al vidrio.
2. El calentamiento no se concentró en una parte específica de la punta de la ampollita. Se obtuvieron condiciones de moldeo en todo el perfil de la punta lo cual provocó que se deformara por completo y no se lograra un sellado y conformado adecuados.
3. Las condiciones de sellado a temperaturas superiores a la de transición vítrea no fueron suficientes para tener un sellado eficaz.

### 5.5 EXPLORACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS FUENTES DE CALOR.

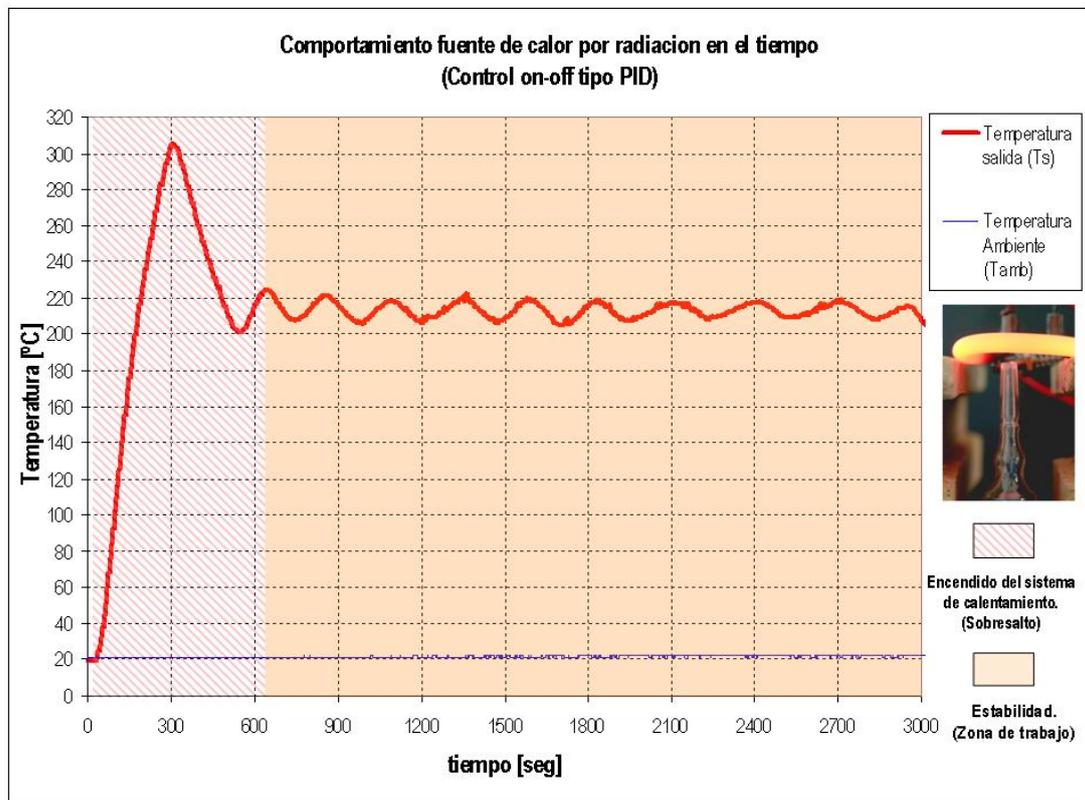
Uno de los factores a considerar en el proceso de sellado es el comportamiento de las fuentes de calor pues la variación de los resultados en el calentamiento de las ampollas está directamente relacionada con el comportamiento de la temperatura de salida “ $T_s$ ” de estas. Para darle seguimiento a este factor, dichas fuentes de calor fueron observadas en operación durante un prolongado periodo de tiempo sin llevar a cabo el calentamiento de ampollas. Los resultados obtenidos para convección, conducción y radiación se muestran en la graficas 4, 5 y 6 respectivamente.



Grafica 4. Comportamiento de la temperatura de la fuente de calor por convección en el tiempo.



Grafica 5. Comportamiento de la temperatura de la fuente de calor por conducción.



Grafica 6. Comportamiento de la temperatura de la fuente de calor por radiación.

Examinando las graficas simultáneamente se logran identificar los siguientes aspectos:

1. Hay dos zonas delimitadas por el comportamiento de la temperatura “ $T_s$ ” de la fuente de calor:
  - *Encendido del sistema de calentamiento:* Es el periodo de tiempo en que la fuente inicia a generar calor hasta alcanzar un valor constante de temperatura. En este periodo, el sistema de calentamiento enfrenta inestabilidad térmica en el arranque de su operación. El sobresalto de la temperatura es influido por factores como el diseño en la geometría del dispositivo generador de calor y la forma en que este es aislado. La temperatura no tiene un valor constante y por lo tanto las condiciones cambian para la realización de los experimentos. Cada fuente de calor analizado alcanza estabilidad térmica a tiempos distintos:
    - a) *Fuente de calor por convección:* aproximadamente 951 [seg.]
    - b) *Fuente de calor por conducción:* aproximadamente 629.5 [seg.]
    - c) *Fuente de calor por radiación:* aproximadamente 656.5 [seg.]
  - *Estabilidad del sistema:* La temperatura “ $T_s$ ” de salida de la fuente se mantiene en un rango promedio lo cual hace que las condiciones para realizar los experimentos sean similares. Cada fuente de calor opera a diferente rango promedio de temperaturas:
    - a) *Fuente de calor por convección:* Tiene una variación de temperatura de  $\pm 0.4$  [°C]. El control interno de la pistola de aire caliente esta en continuo aceleramiento para mantener la temperatura constante. La grafica de está fuente de calor es la que presenta mayor estabilidad de temperatura.
    - b) *Fuente de calor por conducción:* Muestra una variación de temperatura de  $\pm 2.5$  [°C]. Su comportamiento es oscilatorio. Dicha fuente está aislada para minimizar la transferencia de calor hacia el medio ambiente.
    - c) *Fuente de calor por radiación:* Manifiesta variaciones de temperatura de  $\pm 6$  [°C]. Presenta mayor inercia térmica debido a que la resistencia esta expuesta al medio ambiente sin recubrimiento aislante.

## CAPITULO 6. EXPLORACIÓN DEL SELLADO DE AMPOLLETAS EN MÁQUINAS.

Posterior a los experimentos en el banco de pruebas, se recurrió a obtener datos en el campo de trabajo de las maquinas selladoras de ampollitas plásticas que se encuentran en operación por las siguientes razones:

- El comportamiento de las máquinas son referencias que permiten obtener datos para analizar el sellado de las ampollitas a niveles de producción (grandes cantidades de ampollitas selladas).
- Estos datos permiten interpretar de mejor manera los resultados de los experimentos en el banco de pruebas.

Tres maquinas son las que han sido diseñadas para cumplir con las necesidades del sellado de las ampollitas, dos se encuentran actualmente en operación y una en construcción. Cada maquina es un caso de diseño y poseen características particulares, además el proceso de sellado mantiene el mismo diseño conceptual de las funciones fundamentales involucradas.

### 6.1 FUNCIONES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO DE SELLADO DE LAS MAQUINAS.

Dentro del estudio de campo de trabajo de las maquinas es posible observar que los tres casos de maquinas desarrolladas mantienen el mismo diseño conceptual de sus procesos de sellado ejecutando las funciones principales consideradas en el funcionamiento del banco de pruebas bajo el siguiente orden y relación. (Ver figura 36).



Figura 36. Orden de las funciones en el proceso de sellado de las maquinas.

Aun cuando los dispositivos de las máquina desarrolladas se especifiquen subfunciones, la relación de las funciones principales se respeta. Así pues el proceso de sellado establecido para la experimentación es una proyección del comportamiento real de los factores que intervienen en el sellado de la ampollita durante un proceso a grandes

números de producción y las relaciones de cada función se comprende con mayor claridad cuando se expone el propósito de cada dispositivo que conforma la máquina.

## 6.2 DISEÑO DE LAS MÁQUINAS SELLADORAS DE AMPOLLETAS.

El diseño del proceso de sellado establecido en las máquinas comprende de los siguientes sistemas:

1. **Sistema de sujeción:** Su función es *sujetar* durante el proceso de sellado las ampollitas trasladándolas a determinado número de desplazamientos o de forma continua.
2. **Sistema de calentamiento:** Su función es *calentar* la parte superior de la ampollita (punta) hasta alcanzar temperaturas de sellado. Los principios de transferencia de calor empleados en cada caso son por radiación y convección.
3. **Sistema de Sellado y Conformado:** Su función es *sellar y conformar* la punta de la ampollita por dos formas: aplastar la punta por medio de placas metálicas paralelas (forma final plano) o por giro de dados (forma final de media esfera).

En el desarrollo de las tres máquinas construidas se ha dado continuidad a los dispositivos que ejecutan las funciones de *sujetar* y de *sellar y conformar*:

- *Canastilla:* manipula un lote de 105 ampollitas y las posiciona durante el proceso de sellado en las dos primeras máquinas. (Ver figura 37a)
- *Dados de sellado-conformado:* Son parte del diseño de la segunda y tercera máquina, su acción es lineal en subida y bajada con un giro céntrico (solo en la segunda máquina construida) proporcionándole la forma a la punta de la ampollita de media esfera (Ver figura 37b)



Figura 37a. Canastilla de sujeción de ampollitas.



Figura 37b. Datos de sellado y conformado.

### 6.2.1 La primer máquina de sellado de ampollitas.

El diseño de la primera máquina (1er generación) desarrollada se muestra a continuación en la figura 38.



Figura 38. Diagrama del diseño de la primera maquina selladora de ampollitas. (1er generación.)

Este diseño comprende de las siguientes características:

- **Sistema de sujeción:** Su acción durante la ejecución del proceso de sellado es de cuatro desplazamientos lineales.
  - El dispositivo que cumple la función de sujetar es la canastilla con un lote de 105 ampollitas. (ver figura 39b)
  - Posiciona las ampollitas con dos desplazamientos lineales durante el calentamiento y dos desplazamientos lineales para el sellado y conformado. (ver figura 39b)
- **Sistema de calentamiento:** Para cumplir la función de calentar el sistema de calentamiento tiene una configuración relativamente simple, conformado por:
  - *Resistencias tipo cartucho:* Son los dispositivos que generan el calor.
  - *Placa metálica:* Irradia y direcciona el calor generado hacia las puntas de las ampollitas. Tiene forma similar (rectangular) y en dimensiones al agrupamiento de ampollitas de la canastilla. (Ver figura 39a)
  - *Control de temperatura:* Determina las condiciones de calentamiento durante el tiempo de trabajo de la maquina. Es un dispositivo tipo encendido-apagado (on-off) PID.
  - *Consumo de energía nominal del sistema:* 3000 [W]
  - *Temperatura de trabajo:* 120 [°C]
- **Sistema de sellado y conformado:**
  - El dispositivo que cumple con las funciones de sellar y conformar son de simple geometría de perfiles rectangulares metálicos. (ver figura 39a)
  - La forma final en la punta de la ampollita es plana.
  - La acción de los perfiles es aplastar la punta de la ampollita. (Ver figura 39b)
- El tiempo total del ciclo de sujeción, calentamiento, sellado y conformado es de 135 [seg.]
- Se requiere de 40 [seg.] para colocar la canastilla con el lote de ampollitas en la maquina. (tiempo muerto)
- El tiempo de trabajo a partir del primer desplazamiento hacia el sistema de calentamiento hasta el segundo desplazamiento de sellado-conformado es de 95 [seg.]. (Tiempo de trabajo)
- Producción estimada de ampollitas selladas: 47 [amp./min.]



Figura 39a. Maquina 1 (1ra generación).



Figura 39b. Función de los dispositivos de la Maquina 1 (1ra generación).

### 6.2.2 La segunda máquina de sellado de ampollitas.

La segunda máquina (2da generación) construida tiene cambios en los sistemas de calentamiento y de sellado y conformado debido a que:

1. La transferencia del calor que se emplea es por convección.
2. Se establece una nueva forma en la punta de la ampollita de media esfera.

En cambio se sigue manteniendo el sistema de sujeción de las ampollitas, la canastilla de 105 ampollitas (Ver figura 40).



Figura 40. Diagrama del diseño de la segunda máquina selladora de ampollitas. (2da generación.)

El diseño de la segunda máquina cuenta con las siguientes características:

- **Sistema de sujeción:**
  - El dispositivo para ejecutar la función *sujetar* es nuevamente es nuevamente la canastilla de las ampollitas. (ver figura 41b)

- Las ampollitas son posicionadas con 3 desplazamientos lineales durante el calentamiento y con 5 desplazamientos lineales durante el sellado y conformado.
- **Sistema de calentamiento:** Por la agrupación de las ampollitas y el tipo de transferencia de calor para ejecutar la función de *calentar* este sistema tiene mayor número de elementos con la finalidad de distribuir el calor y alcanzar condiciones de sellado al lote de ampollitas de la canastilla de forma uniforme. Los elementos que conforman este sistema son los siguientes.
  - *Calentador de aire:* Establece la temperatura y velocidad del flujo del aire calentado que es tomado del medio ambiente.
  - *Distribuidor de aire caliente:* Esta directamente conectado al calentador, direcciona y distribuye el aire calentado por medio de conductos, los cuales tienen orificios haciendo que el aire salga directamente hacia las puntas del lote de ampollitas de la canastilla. (Ver figura 41a)
  - *Consumo de energía nominal* (calentador de aire): 4.5 [kW]
  - *Temperatura de trabajo:* 120 a 160 [°C]
- **Sistema de sellado y conformado:**
  - Los dispositivos que ejecutan la función de *sellar* son dados cuya acción es lineal en subida y bajada. (Ver figura 41b)
  - Para la ejecución de la función *conformar* los dados giran con respecto a su propio eje. (Ver figura 41b)
  - La forma final de la punta de la ampollita es semiesférica.
- Tiempo total del ciclo de calentamiento, sellado y conformado: 75 [seg.]
- Se requiere de 40 [seg.] para colocar la canastilla con el lote de ampollitas en la maquina. (tiempo muerto)
- El tiempo de trabajo a partir del primer desplazamiento hacia el sistema de calentamiento hasta el segundo desplazamiento para el sellado y conformado es de 35 [seg.] (tiempo de trabajo)
- Producción de ampollitas selladas: 84 [amp./min.]



Figura 41a. Máquina 2 (2da generación).



Figura 41b. Función de los dispositivos de la Máquina 2 (2da generación).

### 6.2.3 La tercera máquina de sellado de ampollitas.

Actualmente esta en construcción la tercera máquina selladora de ampollitas plásticas (3er generación), este diseño cambia la forma de trasladar y agrupar las ampollitas retomando nuevamente el calentamiento por radiación. (Ver figura 42)



Figura 42. Diagrama del diseño de la tercera máquina selladora de ampollitas. (3ra generación.)

Las características de su diseño son los siguientes:

- **Sistema de sujeción:**
  - Los dispositivos que cumplen con la función *sujetar* son discos giratorios que trasladan las ampollitas hacia los sistemas de calentamiento y de sellado y conformado de forma continua, es decir una por una las puntas de las ampollitas son calentadas y selladas. (Ver figura 43)
- **Sistema de calentamiento:** Se retoma la transferencia de calor por radiación en el sistema de calentamiento para ejecutar la función *calentar* conformado por los siguientes dispositivos.
  - *Resistencia de acero inoxidable:* Durante la ejecución del proceso de sellado la resistencia alcanza temperaturas superiores a los 1000 [°C] (temperatura de la superficie) alcanzando condiciones al rojo vivo.

- *Perfil de acero inoxidable*: Este dispositivo busca la resistencia haciendo exponer solo una parte de esta para calentar la punta de la ampollita. Su finalidad es concentrar la radiación hacia la zona de la boca de la punta de la ampollita. (Ver figura 43)
- *Control de temperatura*: Determina la temperatura de calentamiento durante el tiempo de trabajo de la máquina. Es un control de tipo encendido apagado (on-off) PID.
- *Consumo de energía nominal* (sistema de calentamiento): 3000 [W]
- *Temperatura de trabajo*: superior a los 200 [°C]
- **Sistema de sellado y conformado:**
  - La ejecución de la función *sellar* y *conformar* se realiza mediante el traslado de las ampollitas (una por una) donde los dados manufacturados con el perfil hueco de media esfera se accionan en subida y bajada haciendo presión a la punta de la ampollita.
  - Se pretende que la forma final de la punta de la ampollita sea semiesférico con un acabado liso. (Ver figura 43)
- Tiempo total del ciclo de calentamiento, sellado y conformado: 1/4[seg.]
- Con la nueva configuración para *sujetar* las ampollitas no se realizan acciones extras de operación. (Las ampollitas se colocan de forma automática)
- Producción estimada de ampollitas selladas: 210 [amp./min.]



Figura 43. Función de los dispositivos de la Máquina 3 (3ra generación).

### 6.3 ADQUISICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES EN LAS MÁQUINAS.

Cada uno de los casos de las máquinas pueden ser analizados con los parámetros establecidos en la parte experimental y así tener una mayor comprensión de la complejidad de diseño de los dispositivos que conforman a las máquinas. Se recopiló datos durante la operación del proceso de sellado y en ciertos casos desde el arranque de la máquina. Estas pruebas fueron realizadas dependiendo de las actividades de producción de la empresa, por lo que se caracterizó la parte más esencial del proceso de sellado de las máquinas.

#### 6.3.1 Datos experimentales de la Maquina 2.

El proceso de sellado que ejecuta la maquina puede ser comparado con el proceso simulado en el banco de pruebas cuando se utilizó la transferencia de calor por convección, además que el sistema de sellado y conformado es por la acción de dados. La adquisición de los datos se realizo durante los turnos de producción de la máquina, por lo que las condiciones del proceso de sellado a niveles de producción recopilados se compararán con los resultados obtenidos en los experimentos en el banco de pruebas. Las condiciones en las cuales la máquina trabaja son las siguientes:

- a) **Temperatura registrada a la salida del Calentador de aire:**  $T_{S1} = 462$  [°C].
- b) **Temperatura registrada a la salida del distribuidor de aire:**  $T_{S2} = 182$  [°C].
- c) **Temperatura ambiente:**  $T_{amb} = 27$  [°C].
- d) **Tiempo de calentamiento:**  $t = 11$  [seg.].

Catorce pruebas fueron realizadas durante la secuencia del proceso de sellado en la Maquina 2, procediendo de la siguiente forma:

1. Se coloca el sensor en una de las ampollitas de la canastilla (Ver figura 43). Dos segundos antes de iniciar el proceso de sellado en la maquina, empieza el registro de la temperatura en la punta de la ampollita.
2. El operador da inicio al proceso de sellado. La punta de la ampollita es trasladada en 2 desplazamientos durante el calentamiento, tiene una duración de 11 [seg.]

3. Prosigue la etapa de sellado y conformado en un desplazamiento, el registro de la temperatura de la ampolleta continua.
4. El proceso finaliza cuando la canastilla retorna a la posición inicial. Se detiene el registro de la temperatura y se retira la ampolleta de la canastilla.

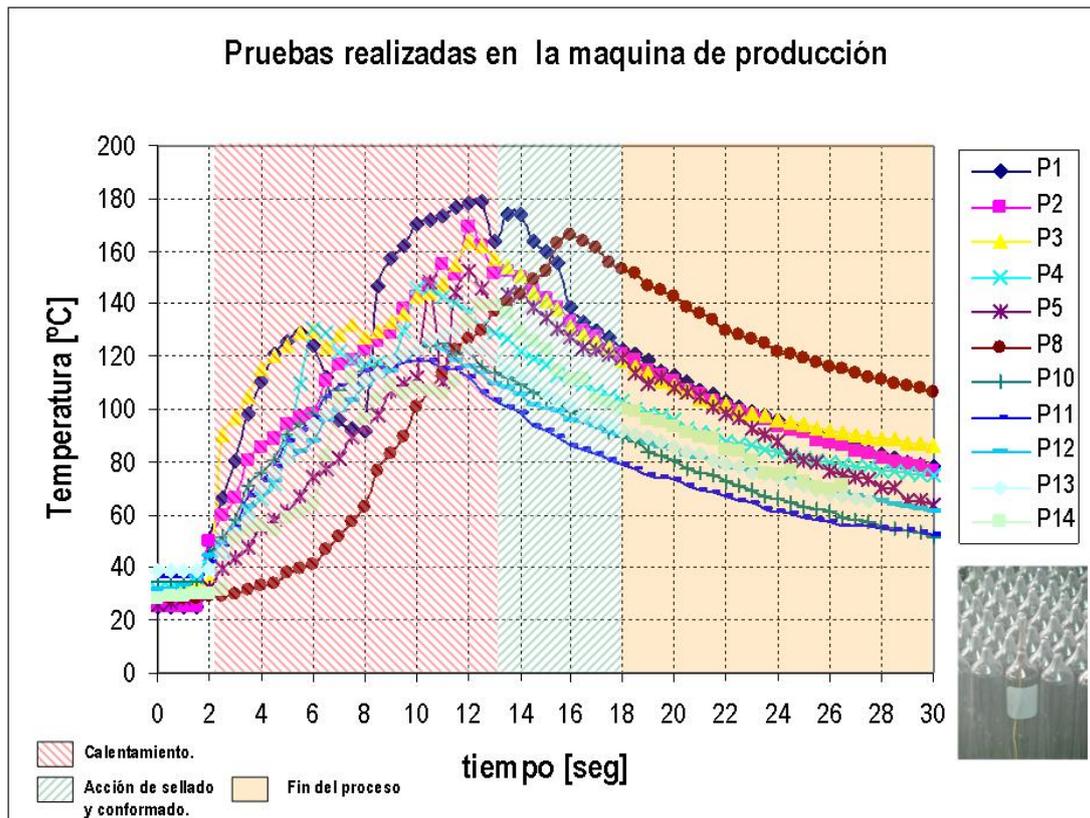


Figura 44. Experimentos en la Máquina 2 (2da generación)

Los resultados obtenidos sobre el comportamiento del calentamiento de la punta de la ampolleta se muestran en la gráfica 7. Nuevamente se delimitan tres zonas determinadas por los tiempos de ejecución de los pasos del proceso de sellado.

1. *Calentamiento*: Tiene una duración del tiempo es de 11 [seg.]. Este inicia a los 2 [seg.] y finaliza a los 13 [seg.].
2. *Acción de sellado y conformado*: El dado baja, gira y retorna a la posición inicial para un nuevo desplazamiento de la canastilla. El tiempo de duración de la acción de los dados es de 3 [seg.].
3. *Fin del proceso*: Es el registro de la temperatura de la punta de la ampolleta en su etapa de enfriamiento.

El tiempo total en que la ampolleta de prueba pasa por todos los pasos del proceso de sellado en la máquina es de 17 [seg.] El tiempo total del registro de la temperatura es de 30 [seg.].



Grafica 7. Datos obtenidos de la Maquina 2. (2da generación)

Cada línea representa el calentamiento de una ampollita de prueba colocada arbitrariamente en el lote de las ampollitas de la canastilla por lo que la grafica 7 muestra los siguientes resultados:

1. **Las tendencias de cada una de las pruebas no muestran repetibilidad:** Existe similitud en el comportamiento entre las pruebas porque las condiciones de calentamiento comprende un rango de los 120 – 180 [°C] como temperatura de salida para calentar la punta de la ampollita.
2. **Máxima temperatura registrada durante el calentamiento:** 179.2 [°C]
3. **Temperatura promedio de salida en el sistema de calentamiento:** 145 [°C].
4. **Mínima temperatura registrada durante el calentamiento:** 105.9 [°C]
5. **La tendencia del calentamiento asemeja a una recta:** El calentamiento de la punta de la ampollita por convección es de forma gradual.
6. **Las temperaturas registradas en las pruebas no establecen condiciones de degradación del material:** Ninguna de las puntas de las ampollitas toman una coloración oscura u opaca. A temperaturas inferiores a 180 [°C] el PVC puede

ser tratado a condiciones de transición vítrea sin perder las propiedades estéticas de transparencia.

Los resultados finales en las puntas de las ampolletas al proceso de sellado de la Maquina 2 muestran las siguientes particularidades: (Ver figura 45)

- Forma final de media esfera en la punta de la ampolleta y corresponde al perfil de la forma de dado de sellado y conformado.
- Acabado final liso.
- El material localizado en la boca de la punta alcanzó condiciones de sellado (temperaturas de transición vítrea), exponiendo la punta a un haz de luz, no se observan divisiones en el perfil del material calentado.

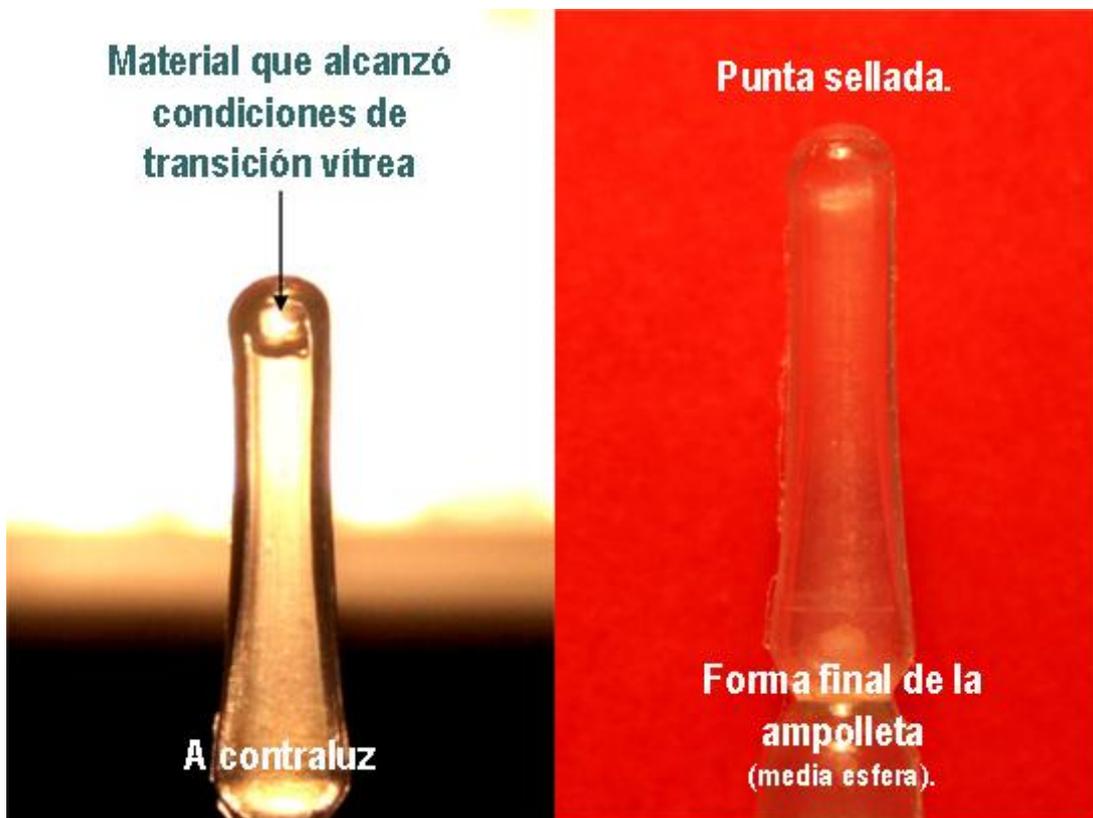


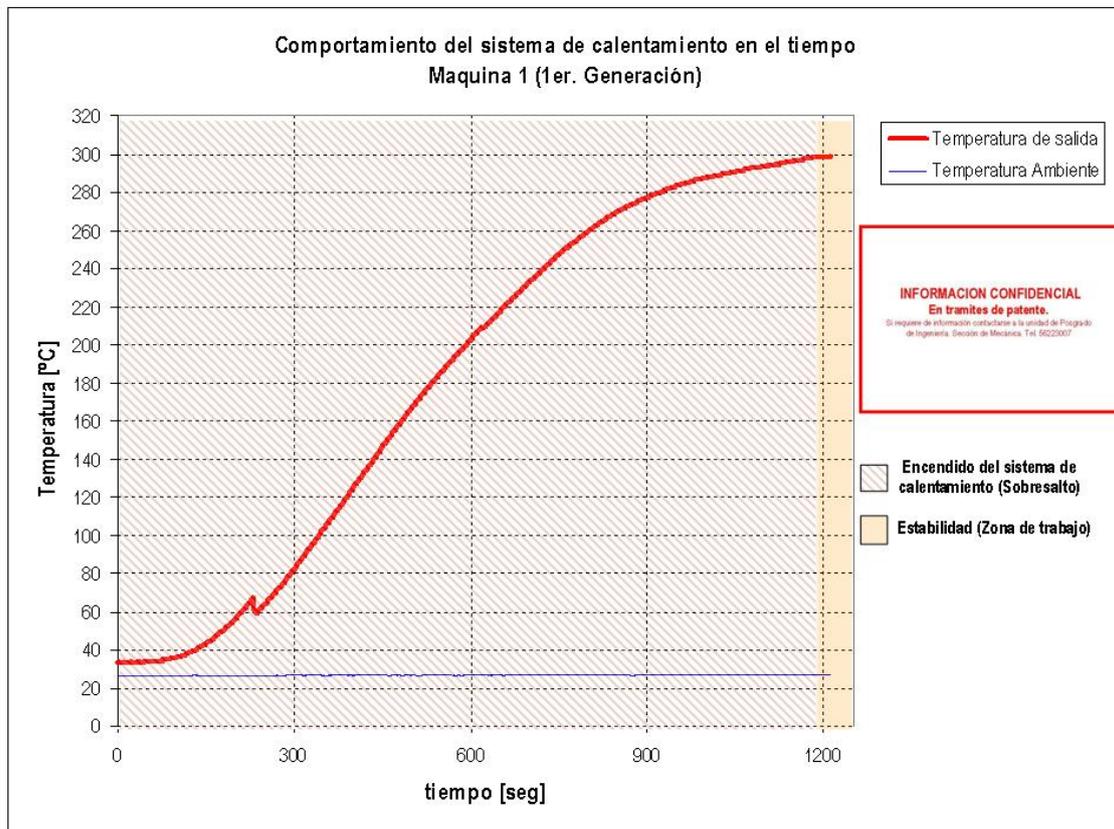
Figura 45. Sellado de las ampolletas en la Maquina 2

### 6.3.2 Comportamiento de los sistemas de calentamiento en las máquinas.

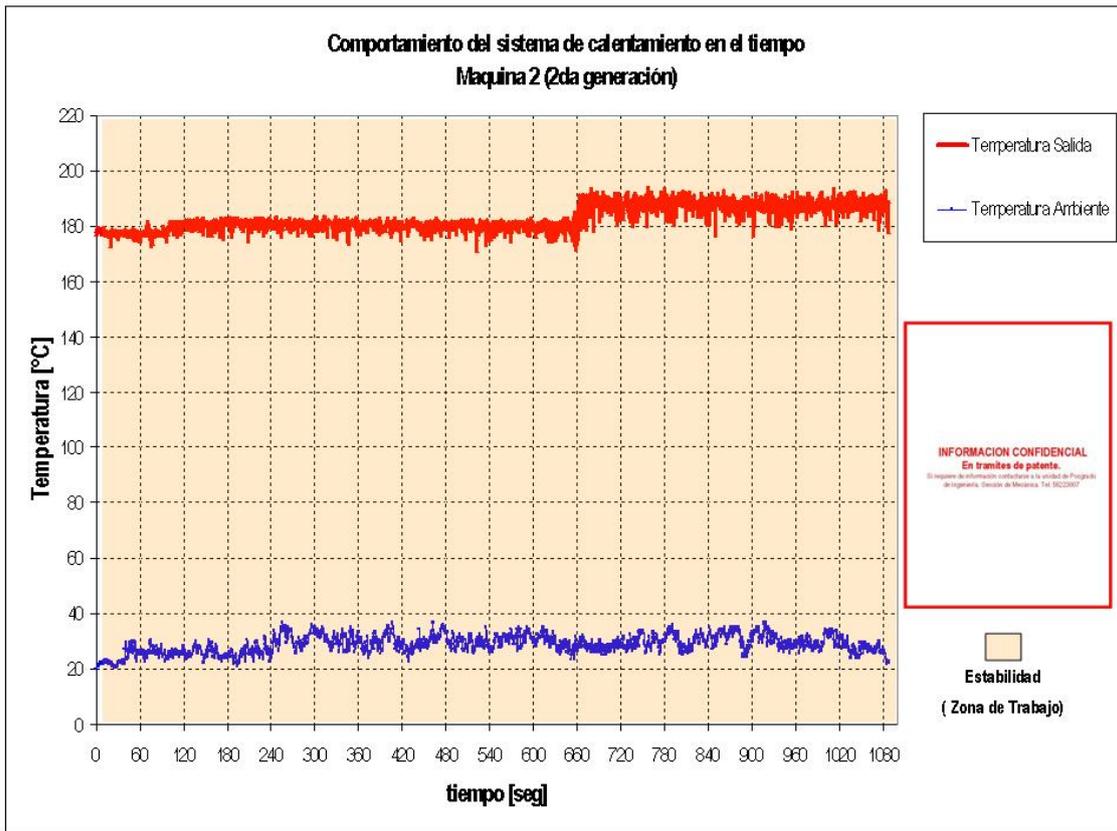
Es importante que durante la operación de las máquinas los sistemas de calentamiento controlen las condiciones de temperatura de forma estable y continua. Así como en el banco de pruebas las condiciones de temperatura son un factor en la repetibilidad de los resultados para que el material alcance temperaturas de transición vítrea, los procesos de

sellado de las máquinas igualmente deben tener esta característica en la producción de grandes volúmenes de ampollas selladas.

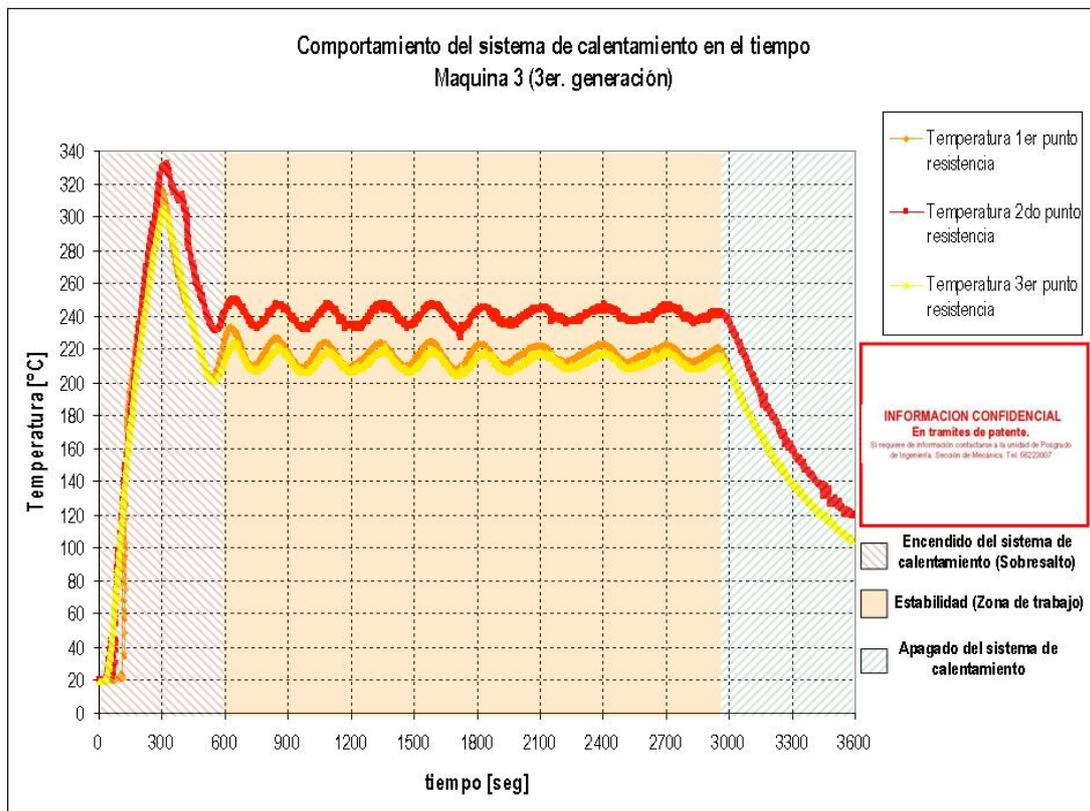
Para dar seguimiento al comportamiento de los sistemas de calentamiento estuvieron a un prolongado tiempo de operación sin ejecución alguna de calentamiento, sellado y conformado de ampollas. Las gráficas obtenidas a partir del arranque en la maquina 1, durante la operación de la máquina 2, y en el arranque y exploración en el tiempo en las primeras pruebas de funcionamiento de la maquina 3 se muestran en las graficas 8, 9 y 10 respectivamente.



Grafica 8. Comportamiento de la temperatura de la fuente de calor de la Maquina 1.



Grafica 9. Comportamiento de la temperatura de la fuente de calor de la Máquina 2.



Grafica 10. Comportamiento de la temperatura de la fuente de calor de la Máquina 3.

Estas graficas muestran los siguientes aspectos.

- Dos zonas delimitadas por el comportamiento de la temperatura de salida del sistema de calentamiento:

1. *Encendido del sistema de calentamiento (sobresalto)*: En el arranque de operación de la maquina la temperatura no es constante, por lo que el sistema de calentamiento tiene inestabilidad térmica. Para cada uno de los casos de las máquinas, los sistemas de calentamiento difieren en el comportamiento del sobresalto, y los tiempos que le toma para que la temperatura de salida tome valores constantes:

a) *Sistema de calentamiento Máquina 1*: aproximadamente a los 1200 [seg.] el sistema muestra estabilidad. El control de temperatura hace que el sobresalto de forma gradual.

b) *Sistema de calentamiento Máquina 2*: Por cuestiones de operación de la máquina no se pudo registrar el comportamiento desde el arranque.

c) *Sistema de calentamiento Máquina 3*: El sobresalto es de tipo parabólico, es el sistema con mayor inercia térmica. Aproximadamente a los 600 [seg.] la temperatura de salida del sistema muestra un comportamiento repetible.

En este periodo de tiempo no se ejecuta el proceso de sellado, pues las condiciones no son las idóneas para sellar la ampollita.

2. *Estabilidad del sistema de calentamiento (zona de trabajo)*: La temperatura de salida de la fuente se mantiene a un valor promedio, las condiciones para sellar la ampollita son estables. Cada fuente de calor opera a diferente rango promedio de temperaturas:

a) *Sistema de calentamiento Máquina 1*: Tiene una variación de temperatura de  $\pm 0.1$  [°C] Este sistema es el que muestra mayor estabilidad durante el tiempo de operación del proceso de sellado.

b) *Sistema de calentamiento Máquina 2*: La variación de temperatura en este sistema es mayor, comprende un rango de  $\pm 5$  [°C] Se puede ver en la gráfica que el control de temperatura esta en continuo registro.

- c) *Sistema de calentamiento Máquina 1:* Se colocaron tres sensores debido al tamaño de la resistencia (en el inicio, parte media y al final de recorrido de la ampollita a través del sistema de calentamiento) La temperatura en todo lo largo de la resistencia tiene una variación de  $\pm 13$  [°C]. Los extremos de la resistencia tienen menor temperatura, la parte central es la más caliente. Aunque el control registre de forma continua la temperatura, este sistema es el que tiene mayor inercia térmica debido a que la resistencia esta expuesta al medio ambiente sin algún recubrimiento aislante.

## CAPÍTULO 7. LAS CONCLUSIONES.

En este capítulo se muestra de forma sintetizada los razonamientos a los cuales se llegó tras haber realizado los experimentos y haber observado los resultados obtenidos, además de analizar el proceso de sellado en las máquinas que actualmente están trabajando. Estos razonamientos se encuentran agrupados en los siguientes puntos.

### 7.1 SOBRE EL DISEÑO CONCEPTUAL DEL SELLADO DE AMPOLLETAS.

- ❖ Es recomendable considerar analizar el problema de sellado mediante el método de identificación de funciones establecido por *Pahl* y *Beitz* [6] en una etapa inicial de estudio pues esto permite establecer los elementos necesarios para la elaboración de una solución elemental.
- ❖ Es importante considerar las especificaciones de diseño teniendo claros las funciones que debe realizar la solución (número de ampolletas a mover al mismo tiempo), o en caso de no tenerse, establecerlas; porque la solución depende directamente de la relación entre función, especificación y diseño.
- ❖ Para diseñar y construir cada uno de los dispositivos que componen el banco de pruebas se establecieron las siguientes especificaciones de diseño, siendo estas las más elementales para ser aplicadas en un proceso de sellado:
  1. *Sujetar:*
    - a. *Número de ampolletas a manejar durante el proceso de sellado:* 1 ampolleta.
    - b. *Número de pasos de movimiento del dispositivo:* 2 movimientos, ida y regreso.
    - c. *Tipo y trayectoria del movimiento:* lineal, horizontal.
    - d. *Tiempo de acción del dispositivo:* rango de 4 [seg.] a 2 [min] dependiendo de la ejecución del sistema de calentamiento.
  2. *Calentar:*
    - a. *Número de ampolletas a calentar:* 1 ampolleta.
    - b. *Restricción al movimiento:* Rígido.

- c. *Rango de temperaturas a controlar:* Rango comprendido de  $T_{amb}$  hasta la  $T_s = 470$  [°C] (considerando los tres sistemas de calentamiento)
- d. *Tiempo de acción de calentamiento:* rango de 2 [seg.] a 2 [min.]

3. *Sellar y Conformar:*

- a. *Número de ampolletas a sellar y conformar:* 1 ampolleta.
- b. *Número de pasos movimientos:* 3 pasos: Ida, giro y regreso.
- c. *Tipo y trayectoria del movimiento:* Lineal, vertical y giro en sentido horario.

- ❖ El proceso de sellado establecido en el banco de pruebas mostró aspectos muy variables sobre el sellado de la ampolleta. Por ello a nivel conceptual es difícil tener una visualización sobre el comportamiento real de dicho proceso.
- ❖ Como *Glegg* [1] lo establece, la frontera natural de un sistema se encuentra en las interfases de materia y energía. En etapas de diseño conceptual, es importante identificar estas interfases pues son puntos críticos que requieren de mayor análisis y experimentación para la toma de decisiones en la elaboración de una solución. En el caso particular del proceso de sellado, esta interfase se ubica en el paso del calentamiento. La función “*Calentar*” corresponde a la parte de interfase de energía del proceso de sellado, por tanto ésta determina el dominio de las funciones “*Sellar*” y “*Conformar*”.
- ❖ En los pasos finales del proceso de sellado, las funciones “*Sellar*” y “*Conformar*” se mantuvieron unidas. Sin embargo con el cambio de diseño de la ampolleta, las especificaciones de sellado cambiaron, por lo tanto, es necesario que dichas funciones sean separadas y sean ejecutadas en distintos dispositivos.
- ❖ En etapas de diseño conceptual no es sencillo determinar los factores del sellado de la ampolleta por lo cual es necesario generar información mediante un análisis experimental de los parámetros involucrados en el sellado y así tomar decisiones tempranas para la solución del proceso de diseño.

- ❖ El análisis teórico del fenómeno del calor fue limitado pues dominarlo no es simple. Es necesario generar datos que permitan caracterizar el calor para una aplicación en particular.

## 7.2 LOS EXPERIMENTOS.

- ❖ Cada principio de transferencia de calor analizado durante los experimentos mostró un comportamiento diferente durante el calentamiento de la punta de la ampollita. Las variaciones de temperatura y las pérdidas del calor están relacionadas con la capacidad de estabilidad de cada uno de los sistemas de calentamiento diseñados.
- ❖ Los resultados de los experimentos permiten determinar los factores involucrados en el sellado de la ampollita. Sin embargo es necesario realizar un análisis mas profundo para determinar la configuración de un proceso de sellado aplicado en una máquina, porque los experimentos solo muestran los factores que deberán ser repetidos y controlados en el proceso de sellado de la máquina.
- ❖ Durante los experimentos se pudo observar que la etapa de calentamiento es el factor que determina el sellado y la geometría final de la punta de la ampollita.
- ❖ Los datos obtenidos en los experimentos son considerados preliminares pues es necesario profundizar el estudio de la transferencia del calor aplicada al proceso de sellado. Independientemente del principio de transferencia de calor que se utilice en el calentamiento, se requiere de un control muy preciso para dirigir el calor de forma correcta hacia la punta de la ampollita.
- ❖ No se alcanzó obtener una repetibilidad precisa de los datos obtenidos en este trabajo. Sin embargo, se logró identificar los siguientes factores que influyeron al momento del registro, y se recomienda, sean tomados en cuenta para posteriores experimentos:
  - *La colocación del sensor de temperatura durante el calentamiento de la punta de la ampollita:* es necesario que la posición sea la mismo para que el sensor registre las condiciones en cada uno de los experimentos.

- *La distribución del calor sobre la punta de la ampollita:* independientemente del tipo de transferencia de calor que se utilice, es necesario que las condiciones de transferencia del calor sean las mismas en cada una de las secciones de la punta de la ampollita.
  - *Condiciones del medio ambiente:* es recomendable realizar las series de experimentos en un medio donde los cambios de temperatura no sean bruscos porque éstos alteran el calentamiento inicial de la punta de la ampollita.
  - *Contacto del sensor con el material de la punta de la ampollita:* es importante que, para un confiable registro, este factor sea controlado de forma adecuada. Los resultados obtenidos en este trabajo, no tuvieron una repetibilidad debido al contacto poco constante del sensor con el material que fue expuesto al calor.
  - *Control de la temperatura del sistema de calentamiento:* es necesario asegurar que las condiciones sean las mismas en cada experimento que se realice.
- ❖ La alineación de la punta de la ampollita en los dispositivos de calentamiento, sellado y conformado es un factor que determinan la calidad del sellado y la forma final de la punta de la ampollita.

### **7.2.1 Experimentos del proceso de sellado por convección.**

- ❖ En el proceso de sellado por convección se visualizaron los siguientes puntos:
- Se requiere de un dispositivo (boquilla) para dirigir y distribuir el flujo del aire caliente a la punta de la ampollita en un área determinada.
  - La temperatura del medio ambiente y corrientes externas al flujo del aire de la fuente de calor influyen en el calentamiento de la punta de la ampollita.
  - La transferencia de calor por convección es más difícil de guiar por medio de un sistema de distribución porque presenta excesivas pérdidas de calor a través de la trayectoria del flujo.

- En este procedimiento se tiene un mayor control del calentamiento de la punta de la ampollita porque es viable dirigir el chorro de aire caliente hacia una sección específica de la punta.
- El calentamiento por medio del aire caliente permite obtener mayor calidad en el acabado en la punta de la ampollita; no se altera la transparencia del PVC (esto se cumple mientras no se alcancen condiciones de degradación).

### 7.2.2 Experimentos del proceso de sellado por conducción.

- ❖ En el proceso de sellado por conducción se visualizaron los siguientes puntos:
  - Se requiere que el dado que realiza el calentamiento, sellado y conformado sobre la punta de la ampollita sea de un material con alta conductividad térmica.
  - Para mantener la temperatura constante de la fuente de calor ésta debe estar regulada por un controlador de temperatura tipo PID.
  - La fuente de calor debe estar apartada de los dispositivos de sujeción y del medio ambiente por medio de materiales aislantes resistentes a altas temperaturas.
  - En este proceso se guía el flujo de calor de forma más directa hacia el material para alcanzar de forma homogénea las condiciones de transición vítrea.
  - Es necesario que el dado tenga un recubrimiento especial porque a temperaturas de 195 [°C] el PVC alcanza *condiciones de transición vítrea*  $T_g$ , lo cual hace que se adhiera a la superficie del dado. Por lo tanto, es necesario que este sistema de calentamiento tenga continuo mantenimiento.
  - Durante el comienzo del calentamiento, el contacto entre la punta de la ampollita y el dado es pobre, debido a las distintas geometrías que ambos poseen. La concavidad del dado hace que no se tenga un área de contacto grande con la forma cilíndrica de la punta. Por tanto, el proceso de sellado aplicando el calentamiento por conducción requiere mayor tiempo de ejecución.

### 7.2.3 Resultados de los experimentos por radiación.

- ❖ En el proceso de sellado por radiación, se visualizaron los siguientes puntos:
  - Dificultad para dirigir el flujo de calor: la radiación se disipa hacia todas direcciones y no se concentra en una zona específica de la punta de la punta de la ampollita.
  - El calentamiento de la punta de la ampollita es más homogéneo en su geometría.
  - El PVC toma un aspecto cristalino brillante.
  - Es simple construir la configuración de la fuente de calor.
  - Es necesario aislar la resistencia del ambiente u otros dispositivos para mantener el calor contenido y lograr que la resistencia alcance altas temperaturas.
  
- ❖ Es posible controlar de mejor forma el calentamiento por radiación aislando gran parte de la resistencia y dejando una sección libre para que la punta se caliente y tome condiciones de *transición vítrea*  $T_g$ .
  
- ❖ Para que la ampollita alcance temperaturas de transición vítrea, la resistencia necesita estar a una temperatura cuatro veces mayor.

### 7.3 SOBRE LA PUNTA DE LA AMPOLLETA.

- ❖ Durante el transcurso de las pruebas realizadas se ha determinado que el rango de temperaturas que permite que el material alcance condiciones de transición vítrea inicie a partir de los 140 [°C] y finalice hasta 195 [°C]. Esto es para el caso del PVC.
  
- ❖ Las condiciones de transición vítrea del PVC dependen de los *plastisoles* que contenga.

- ❖ Para sellar la punta de la nueva ampollita se requiere un manejo de mayor cantidad de material en condiciones de transición vítrea porque existe mas espacio entre las paredes de la punta para lograr un sellado óptimo (ver figura 46)

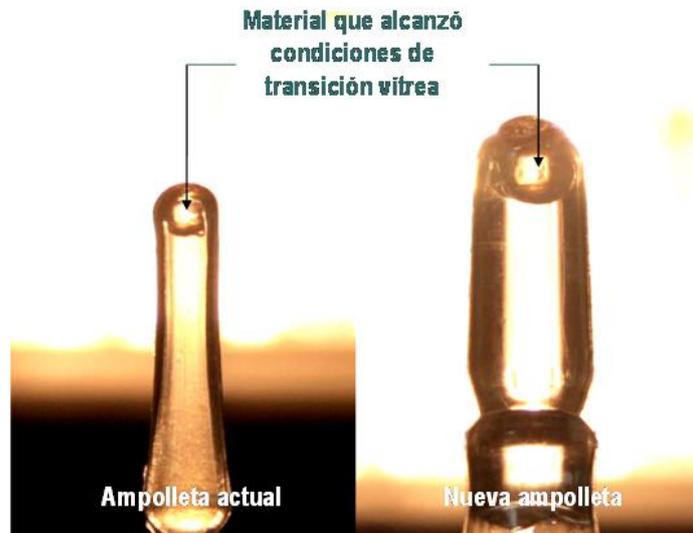


Figura 46. Comparación de sellado de las ampolletas.

- ❖ Para mantener el aspecto transparente del PVC el tiempo de calentamiento debe prolongarse hasta antes que el material alcance las condiciones de degradación. Esto se puede controlar conociendo los tiempos en los cuales se alcanzan las temperaturas de transición vítrea. En las siguientes gráficas se puede apreciar el comportamiento de dicho calentamiento dependiendo de las condiciones establecidas en la fuente de calor. Utilizando el proceso de sellado por convección la punta de la ampollita se expuso al chorro de aire caliente hasta un prolongado periodo de tiempo en el cual el PVC manifestó cambios antes y durante la transición vítrea hasta sobrepasar las condiciones de degradación. Estas condiciones de temperaturas a la salida de la fuente de calor se muestran a continuación:

- 274 [°C]
- 253 [°C]
- 234 [°C]
- 210 [°C]

Los tiempos de exposición fueron los siguientes:

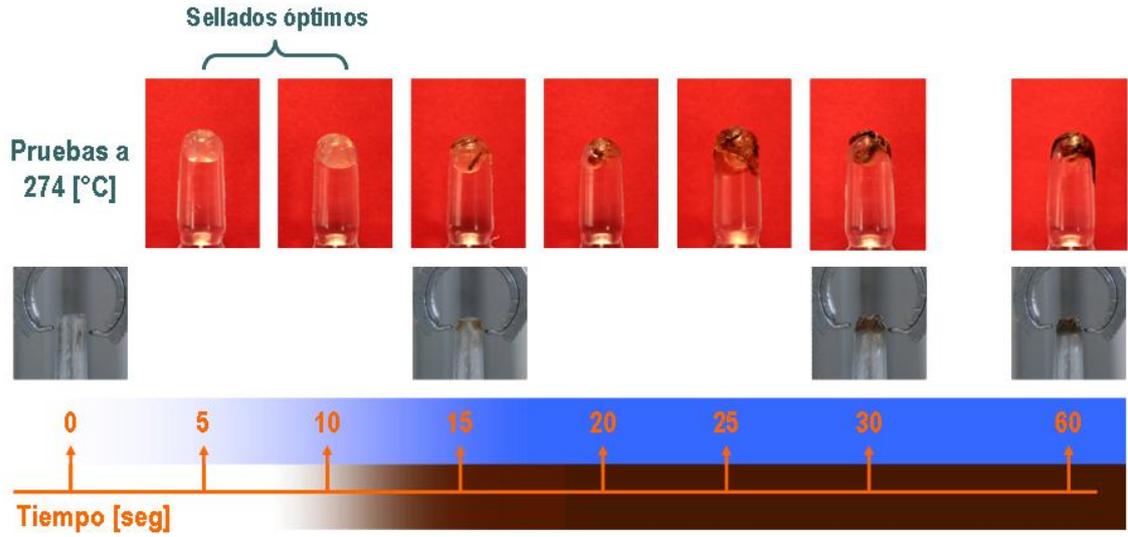
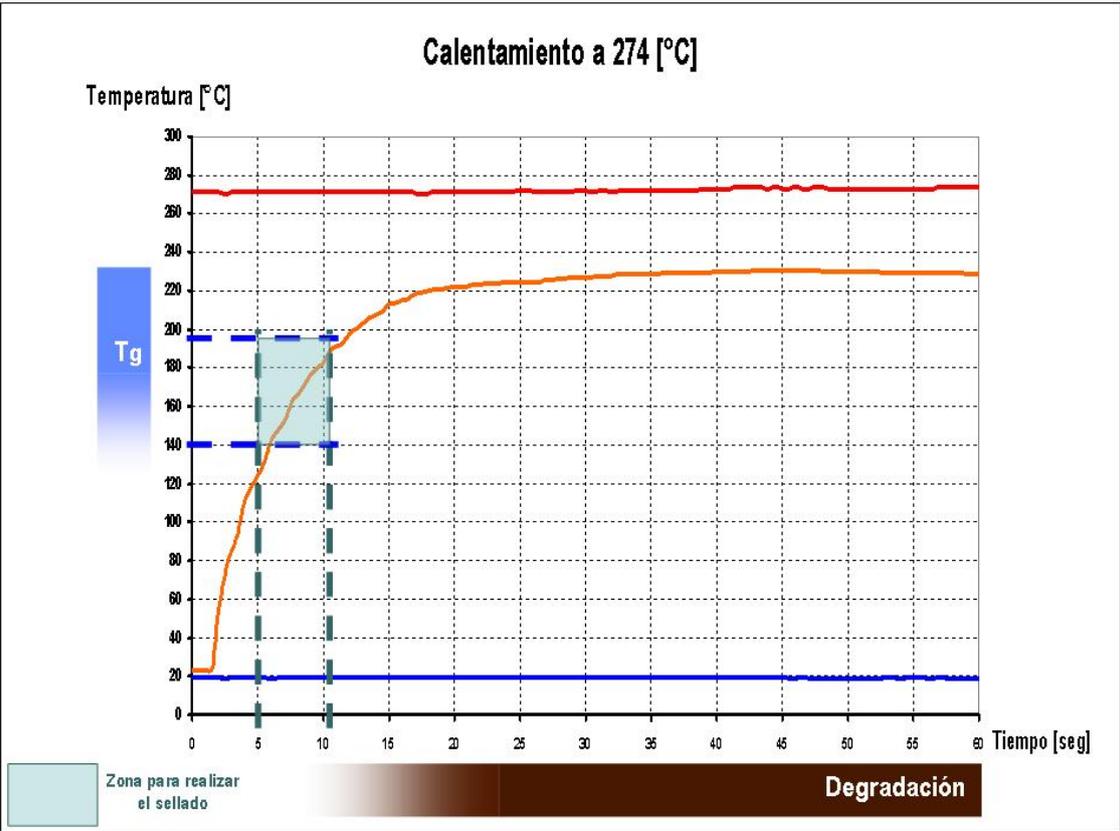
5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 y 60 [seg.]

Mediante los anteriores experimentos se determinó el rango de temperaturas en donde se presentan condiciones de transición vítrea. Este rango, comprendido de 140 [°C] hasta los 195 [°C], es un punto de referencia en las gráficas, donde se puede apreciar lo siguiente:

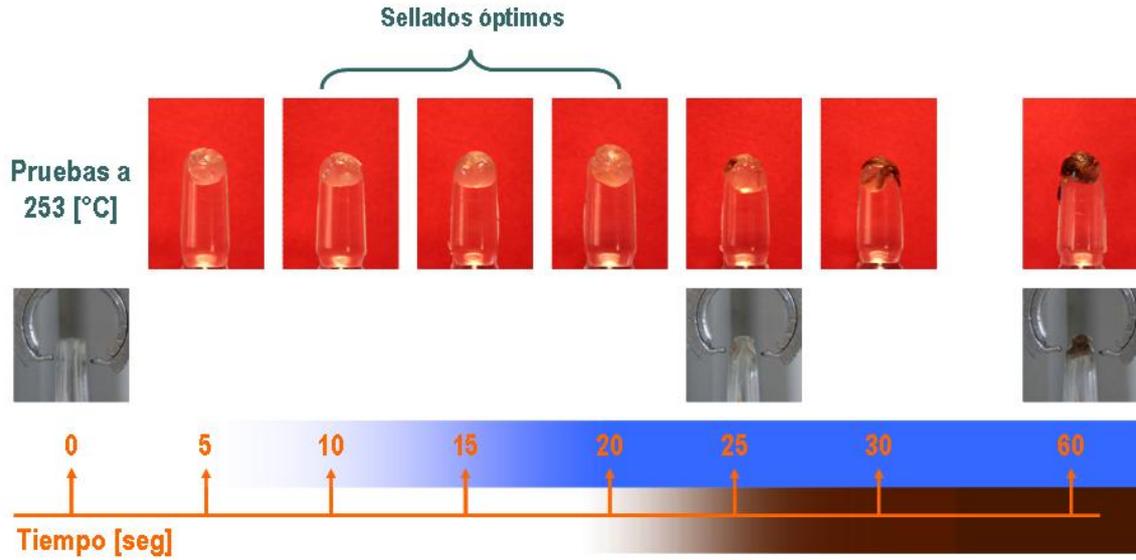
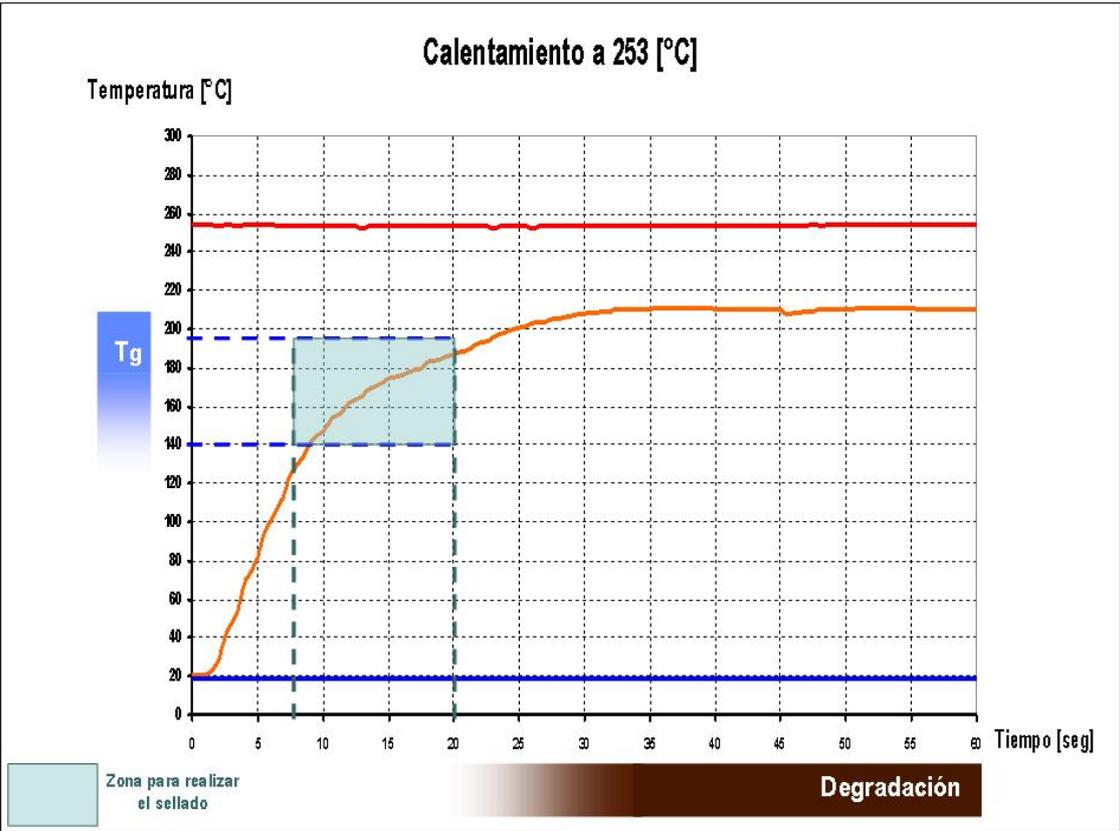
- Antes de alcanzar la temperatura de 140 [°C] el PVC muestra condiciones de moldeo por lo que el sellado de la ampolla no se garantiza, al aplicarse el paso de sellado la unión no se da de manera uniforme y el material presenta grietas.
- Sobrepasando la temperatura de 195 [°C] el PVC alcanza las condiciones de degradación. Es posible sellar la ampolla de forma óptima pues hay unión de material, sin embargo se pierde la transparencia y por lo tanto el acabado es poco estético.
- En el rango de temperaturas entre los 140 [°C] a 195 [°C] se obtienen sellados en la ampolla que cumplen con las características establecidas.

Para cada una de las condiciones de temperatura establecidas, el rango de temperaturas fue localizado indistintamente. El tiempo de exposición se establece dependiendo de la temperatura máxima que suministra la fuente de calor. La grafica de calentamiento a 274 [°C] muestra que las temperaturas límites para las condiciones de transición vítrea de 140 [°C] y 195[°C] se alcanzan en tiempos de 5 y 11 [seg.] respectivamente, mientras que en la gráfica de calentamiento a 256 [°C] los tiempos son de 7 y 20 [seg.].

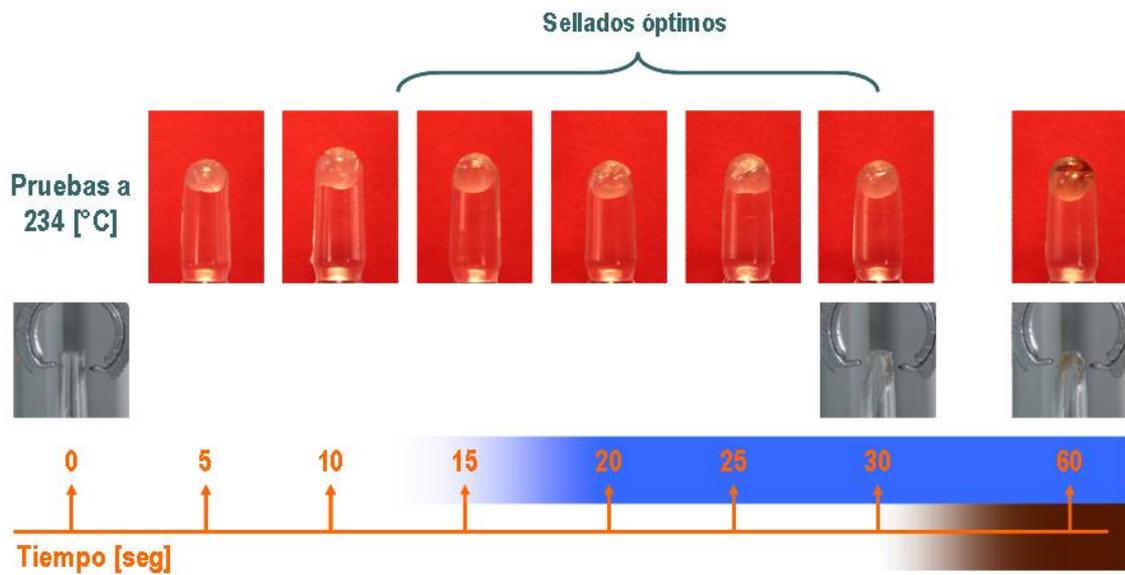
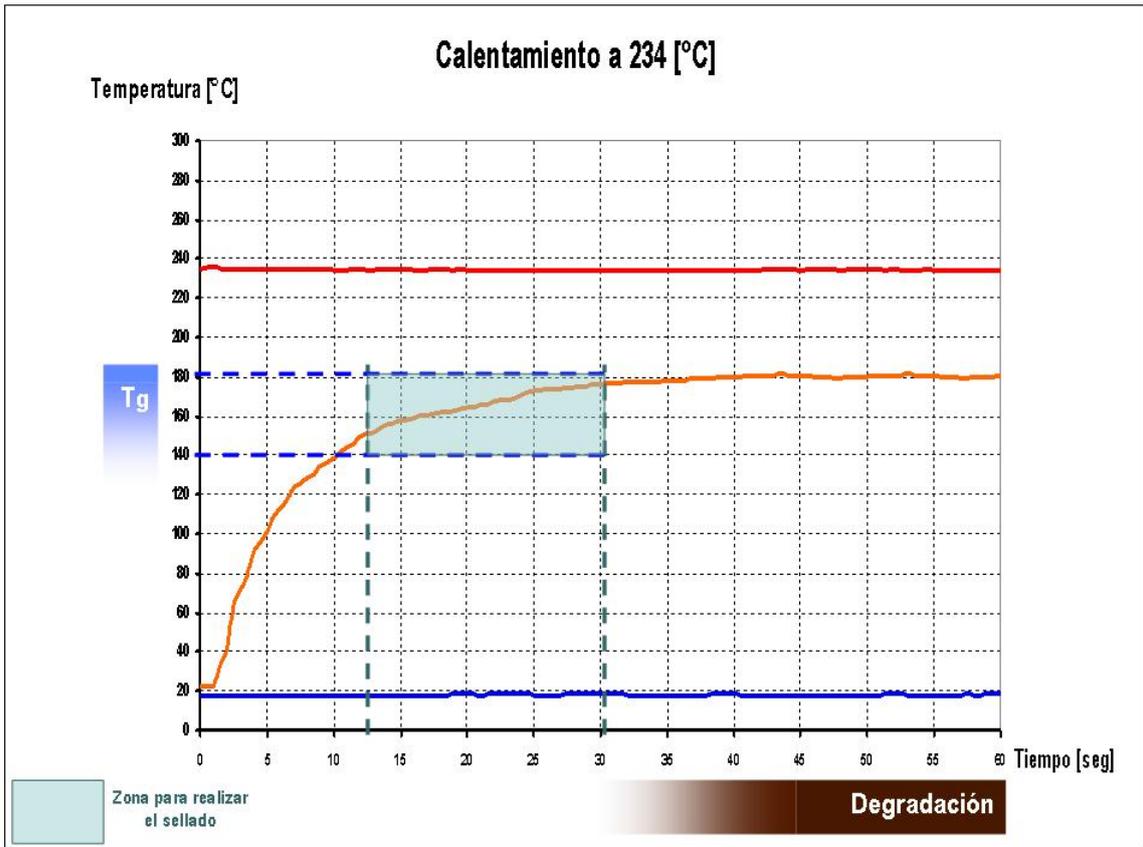
Con esto se logra identificar una zona específica para condiciones de transición vítrea en el PVC. Conforme la temperatura de calentamiento en la fuente de calor disminuye, esta zona se amplía en el eje del tiempo pero disminuye en el rango de las temperaturas.



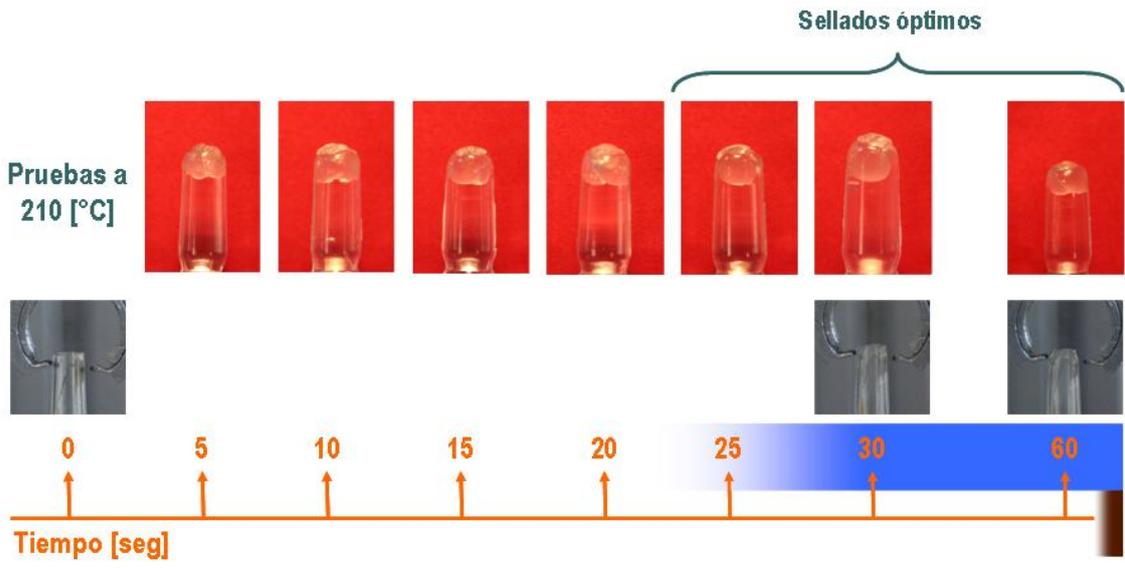
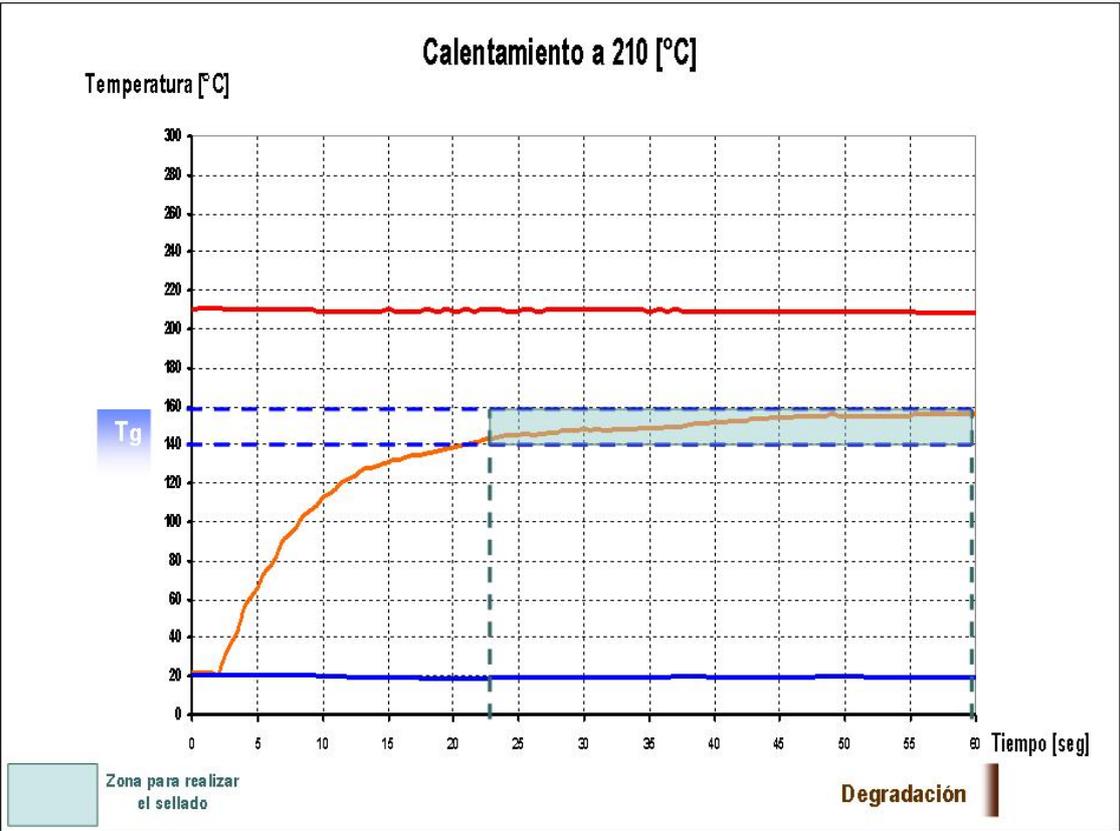
Grafica 11. Curva de calentamiento de sellado a 274 [°C]



Grafica 12. Curva de calentamiento de sellado a 253 [°C]



Grafica 13. Curva de calentamiento de sellado a 234 [°C]



Grafica 14. Curva de calentamiento de sellado a 210 [°C]

- ❖ Las formas que se lograron visualizar para calentar la punta de la ampollita entre las distintas fuentes de calor son las siguientes.

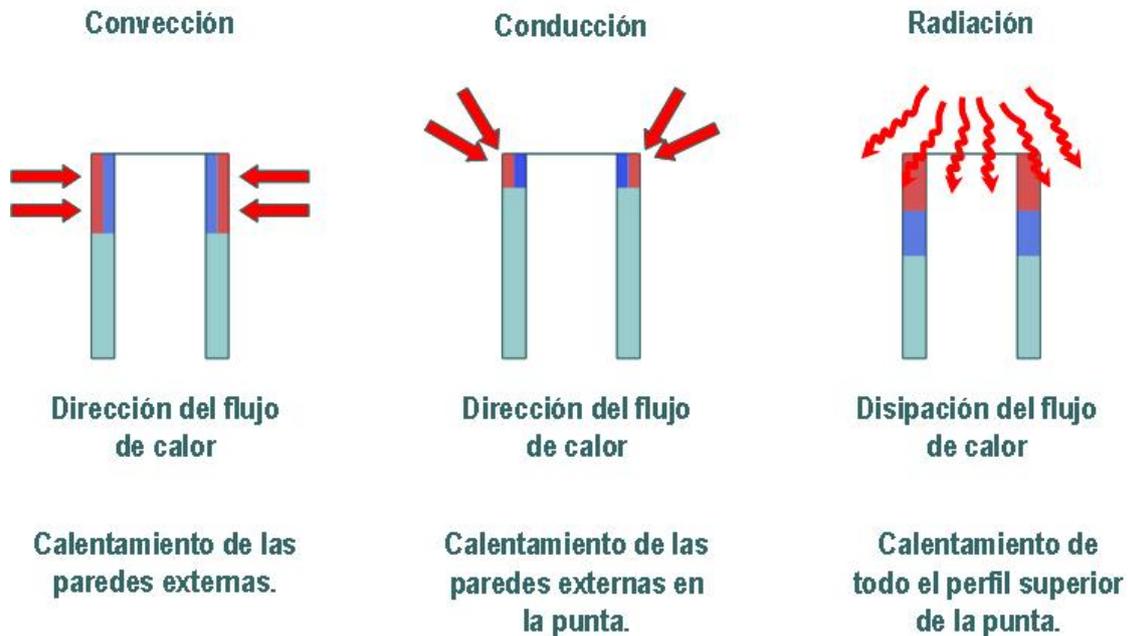


Figura 47. Formas de calentar la punta de la ampollita.

Es importante mencionar que es necesario que las paredes internas de la punta de la ampollita sean las que alcancen temperaturas de transición vítrea, por lo que el calentamiento por radiación es el más recomendable.

#### 7.4 SOBRE EL PROCESO DE SELLADO EN LAS MÁQUINAS.

- ❖ Comparando los sistemas de calentamiento de las máquinas 1 y 2 se observó que utilizar el calentamiento por medio de convección implica desarrollar un sistema de calentamiento más complejo determinado por el modo de transferencia calor. Por ende, los sistemas de calentamientos por radiación son de configuraciones más simples.
- ❖ Durante las generaciones de las máquinas se ha mantenido la unión de las funciones *Sellar* y *Conformar*. Es posible que para una nueva generación estas funciones tengan que ser separadas pues los requerimientos de sellado y las especificaciones de diseño cambiarán.

**INFORMACION CONFIDENCIAL**  
**En tramites de patente.**

Si requiere de información contactarse a la unidad de Posgrado de Ingeniería. Sección de Mecánica. Tel. 56223007

Figura 48. Desarrollo de las máquinas.

**BIBLIOGRAFIA.**

- [1] Glegg G., 1971, "*The Selection of Design*", Cambridge University Press. England.
- [2] Zehev, T. and Costas, G., 2006, "*Principles of polymer processing*", J. Wiley, New York, U.S.A.
- [3] Frank Kreith and Mark S. Bohn, 2001, "*Principios de Transferencia de Calor*", Thomson Learning. México 6 Ed.
- [4] Bralla James, 1993, "*Manual de Diseño de Producto para Manufactura*", Mc Graw-Hill, 3<sup>rd</sup> Ed.
- [5] "*Enciclopedia del Plástico*", Tomo 1
- [6] Pahl, G. and Beitz, W., 1984, "*Engineering Design*", The Design Council, Springer-Verlag, London.
- [7] Olivares, G. and Ramírez, R., 2006, "*Identificación de guías y tendencias de diseño en un producto cotidiano y la evaluación de su funcionamiento, a través de un estudio de diseño comparativo entre modelos y marcas existentes en el mercado*", Procedente del XIII Congreso Anual SOMIM, ISBN 968-9173-00-6, Acapulco Gro, México.
- [8] Glegg G., 1969, "*The Design of Design*", Cambridge University Press. England.
- [9] French, M., 1994, "*An Annotated list of Design Principles*", Proc Instn Mech Engrs Vol. 208, B06593, IMechE.
- [10] French, M., 1998, "*Conceptual Design for Engineers*", The Design Council, Springer-Verlag, London, 3<sup>rd</sup> Ed.
- [11] Aguirre, G. "*Evaluation of Design Systems at the Design Stage*"; Tesis de Doctorado, Cambridge, Inglaterra, 1era Ed, 1992.
- [12] Olivares, G. and Ramírez, R., 2007, "*Análisis y Elaboración de Esquemas como Solución a Problemas de Diseño*", Procedente del XIII Congreso Anual SOMIM, ISBN 968-9173-02-2, Durango, México.
- [13] Gonzalez, J. "*Diseño Conceptual de un Sistema para Verificar el Sellado en Ampolletas de Material Plástico*"; Tesis de Maestría, UNAM, México, 2006.

**Apéndice A. Datos generales de las ampolletas.**

**INFORMACION CONFIDENCIAL**  
**En tramites de patente.**

Si requiere de información contactarse a la unidad de Posgrado  
de Ingeniería. Sección de Mecánica. Tel. 56223007

## Apéndice B. Dispositivos del banco de pruebas.

### INFORMACION CONFIDENCIAL En tramites de patente.

Si requiere de información contactarse a la unidad de Posgrado de Ingeniería. Sección de Mecánica. Tel. 56223007

## Fuentes de Calor

### Pistola de aire:

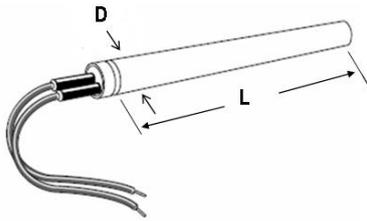
Hot Air Tool Leister CH- 6060 Sarnen. Type Hot-Jet S

Type	120	V~
Voltage	460	W
Power consumption	50/60	Hz
Frequency	20 – 600,	°C
Temperature	20 – 80,	l/min.
Air flow	max. 1600 (16 mbar)	Pa
Pressure stat.	59	L <sub>pa</sub> (dB)
Emission level	235 × 70, handle ø 40	mm
Size	580 with 3 m cord	g
Weight	CCA certified	Ⓢ
Approval mark:		



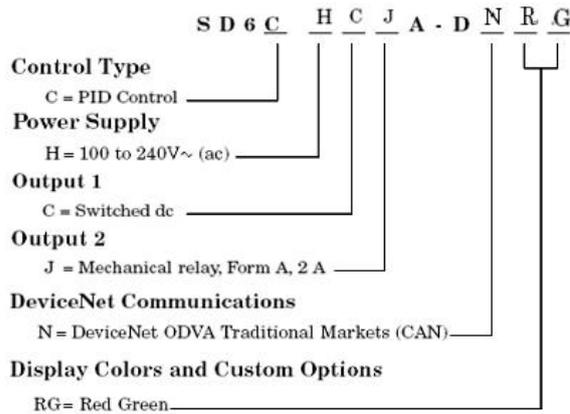
**Hot Jet S**

**Resistencia en cartucho de acero inoxidable.**



Diámetro: 3/8 [in]  
 Longitud: 2.5 [in]  
 127 [V] ~ 75 [W]

**Controlador Watlow 1/16 DIN SD6C - HCJA - DNRG**



**Relevador tipo SSR Watlow Modelo SSR-240-40A-DC1**

<b>Output Current (Amps)</b>	40
<b>Output Voltage</b>	120/ 240V~(ac)
<b>Input Control Voltage</b>	Zero Cross 3-32V=(dc)
<b>Off State Leakage</b>	10mA
<b>Thermal Resistance</b>	0.63°C/W
<b>Frequency Range</b>	47-63Hz
<b>Output Voltage Range</b>	24-280V~(ac)



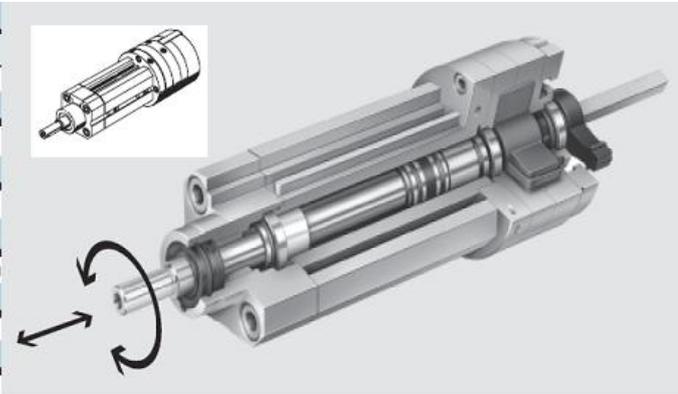
**SSR-240-40A-DC1**

**Pistones Neumáticos:**

**Actuador doble efecto giratorio lineal**

Modelo: **Festo DSL-20-100-270P-S20-FF**

<b>Tipo</b>	
Doble efecto	
DSL	Unidad giratoria y lineal
<b>Diámetro del émbolo [mm]</b>	
20	
<b>Carrera [mm]</b>	
100	
<b>Ángulo de giro máx. y amortiguación</b>	
270P	270°, sin posibilidad de regulación
<b>Variante de vástago</b>	
S20	Doble vástago hueco
<b>Tope fijo / Amortiguador</b>	
FF	Tope fijo



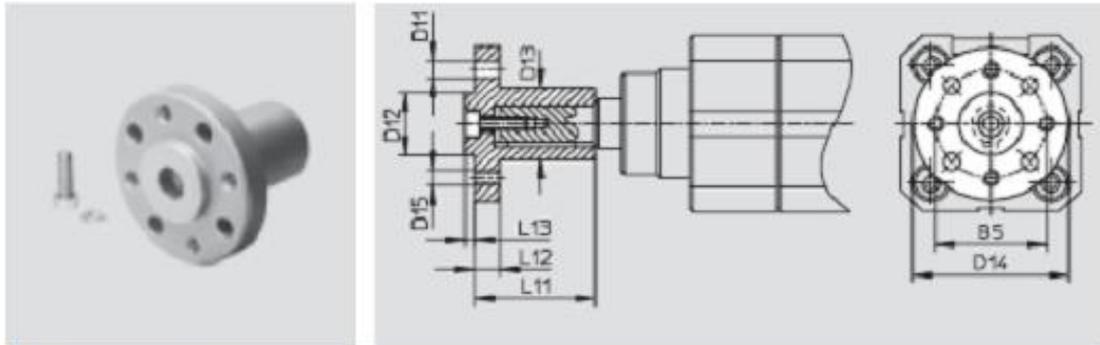
**Actuador doble efecto**

Modelo: **Festo DSNN-25-100-PPV-A**

<b>Tipo</b>	
Doble efecto	
DSNN	Cilindros redondos
<b>Diámetro del émbolo [mm]</b>	
25	
<b>Carrera [mm]</b>	
100	
<b>Amortiguación</b>	
PPV	Amortiguación neumática regulable en ambos lados
<b>Detección de posiciones</b>	
A	Para detectores de proximidad



**Brida de Acoplamiento FWSR**



Dimensiones y referencias									
Para diámetro	B5	D11	D12	D13	D14	D15	L11	L12	L13
[mm]		H13	f8						
		∅	∅	∅	∅				
20	28	4,5	16	17	40	M4	28	5	6

**Termómetro Digital. Datos generales:**

Specifications	Model: OM3000-T6V4 6 Temperature Channels Incorporating 4 Voltage Channels	
<b>Range</b> T Type Thermocouple E Type Thermocouple J Type Thermocouple K Type Thermocouple Voltage Common Mode Range	-418 to +743°F (-250 to +395°C) -418 to +1823°F (-250 to +995°C) -348 to +2183°F (-210 to +1195°C) -418 to +2498°F (-250 to +1370°C) ±5VDC and ±30VDC (user-selectable) ±30VDC (voltage channels only)	
<b>Resolution</b> Temperature Voltage	Above -148°F (-100°C): 0.1°F or °C At or below -148°F (-100°C): 1°F or °C ±5VDC: 200µV (0.0002V)    ±30VDC: 1mV (0.001V)	
<b>Accuracy</b> Temperature Voltage Common Mode Error	Above -148°F (-100°C): ±0.1% of reading ±0.9°F (0.5°C) At or below -148°F (-100°C): ±1% of reading ±0.9°F (0.5°C) ±5VDC: ±0.3% of reading ±0.6mV ±30VDC: ±0.3% of reading ±3mV 0.1% of common mode voltage	

Dimensiones del carro de sujeción de la ampolleta. Cotas mm.

