



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO SOBRE EL SELLADO DE AMPOLLETAS DE PVC

GUSTAVO OLIVARES GUAJARDO

SEPTIEMBRE 2010

**TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA
POR LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. ALEJANDRO C. RAMÍREZ REIVICH.**

**CODIRECTOR DE TESIS:
DR. MARCELO LÓPEZ PARRA.**

**SECCIÓN DE MECÁNICA,
POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA,
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
MÉXICO C.P. 04510**





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: DR. LÓPEZ PARRA MARCELO

SECRETARIO: DR. GONZÁLEZ GONZÁLEZ LEOPOLDO ADRIÁN

VOCAL: DR. RAMÍREZ REIVICH ALEJANDRO CUAUHTÉMOC

1er. SUPLENTE: DR. BORJA RAMÍREZ VICENTE

2do. SUPLENTE: DR. GONZÁLEZ VILLELA VÍCTOR JAVIER

CD, UNIVERSITARIA., MÉXICO, D.F.

TUTOR DE TESIS

DR. RAMÍREZ REIVICH ALEJANDRO CUAUHTÉMOC

A Dios...

A Rebe, mi Esposa...

A Gustavo y Graciela, mis Padres...

Agradecimientos

A Dios por todo su amor.

A mi Esposa Rebeca por todo su amor y por creer en mí.

A mis Padres Gustavo y Graciela por todo su amor y guía.

A mis Tutores Alejandro y Marcelo por la formación y amistad que me brindaron.

A mi Comité Tutoral por sus consejos para lograr los objetivos planteados.

A mis Compañeros y Amigos, en particular a aquellos que colaboraron para que este trabajo se cristalizara.

A la Sección de Mecánica del Posgrado en Ingeniería y mis Compañeros y Amigos de la misma, por compartir conmigo estos cinco años de trabajo.

Al Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica CDMIT y la Sección de Mecánica del Posgrado en Ingeniería por facilitarme los recursos necesarios.

A la Dirección General de Estudios de Posgrado DGEP por la beca otorgada.

A la UNAM por todo lo que me ha brindado con los brazos abiertos.

A aquellos Profesores que compartieron su sabiduría conmigo.

A mis Alumnos de Mecánica de Sólidos por ser mis Maestros.

A mis Hermanos Gerardo y Graciela por compartir conmigo la infancia.

A México por ser mi Patria querida.

Resumen

El presente trabajo de investigación nace a partir del diseño de máquinas originales para sellar ampollitas de plástico y representa una oportunidad importante porque la industria de los cosméticos en el mundo recientemente introdujo el uso de ampollitas hechas de materiales y contenidos con formulaciones novedosas. Hasta la realización de esta investigación no existían sistemas capaces de llenar y sellar ampollitas de PVC. Debido a que no existen datos publicados que expliquen el proceso y las variables que intervienen en el sellado de ampollitas de PVC, el autor investigó, diseñó y desarrolló aquí un banco de pruebas y un estudio experimental que produjo datos confiables y validados que permitirán construir una máquina de llenado-sellado innovadora. El autor reporta los rangos de temperatura, presión y tiempo de calentamiento necesarios para sellar ampollitas y da recomendaciones puntuales de diseño que serán de gran utilidad para el equipo de diseño de máquinas del Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM (CDMIT).

Índice

Resumen	iv
Índice	v
Índice de Figuras	xi
Índice de Tablas	xvi
1. Introducción	1
2. Preguntas Fundamentales, Hipótesis y Objetivos	4
2.1. Hipótesis	5
2.2. Objetivos de la Investigación	5
2.3. Justificación de la Hipótesis	6
3. Estado del Arte	7
3.1. Preparación de la Ampolleta para Sellado con Calor	25
3.2. Exposición de la Ampolleta a una Fuente de Calor	29
3.3. Tiempo de Exposición de la Ampolleta a una Fuente de Calor	41
3.4. Aplicación de Presión Mecánica a la Ampolleta	45
3.5. Enfriamiento del Sello de la Ampolleta	49
3.6. Verificación del Sello de la Ampolleta	52
3.7. Conclusión del Estudio del Estado del Arte	62
4. Experimentación	63
4.1. Diseño del Banco de Pruebas	65
1. Preparación de la Superficie	67
2. Calentamiento de la Boquilla de la Ampolleta	67

3.	Período de Tiempo de Calentamiento de la Boquilla de la Ampolleta_____	68
4.	Presión Mecánica Aplicada a la Boquilla de la Ampolleta_	69
5.	Enfriamiento del Sello de la Ampolleta_____	70
6.	Verificación del Sello de la Ampolleta_____	71
7.	Separación de la Boquilla del Cuerpo de la Ampolleta___	71
8.	Ensayo del Sello de la Ampolleta para Medir la Resistencia del Sello ante una Carga de Presión Hidrostática_____	72
9.	Registro de la Presión Hidrostática que el Sello de la Ampolleta es Capaz de Resistir_____	73
4.2.	Experimentación sobre Velocidad de Calentamiento_	74
4.2.1.	Experimento de Velocidad de Calentamiento_____	74
4.3.	Experimentación sobre el Sellado de la Ampolleta___	77
4.3.1.	Experimento para Medir la Resistencia del Sello de la Ampolleta ante una Carga de Presión Hidrostática___	78
4.4.	Resultados de los Experimentos_____	82
4.5.	Ensayo de Tracción del Sello de la Ampolleta_____	89
4.5.1.	Diseño de la Muestra para el Ensayo de Tracción del Sello de la Ampolleta_____	89
4.5.2.	Resultados del Ensayo de Tracción al Sello de la Ampolleta_____	92

5. Recomendaciones para el Diseño del Cabezal de Sellado	98
5.1. Recomendaciones para la Preparación de la Superficie	98
5.2. Recomendaciones para la Exposición a una Fuente de Calor	99
5.3. Recomendaciones para el Tiempo de Exposición a una Fuente de Calor	99
5.4. Recomendaciones para la Aplicación de Presión Mecánica	100
5.5. Recomendaciones para el Enfriamiento del Sello	101
5.6. Recomendaciones para la Verificación del Sello	102
6. Discusión	103
7. Conclusiones	106
7.1. Trabajo a Futuro	107
8. Aportaciones del Autor al Estado del Arte	110
Referencias	112
Anexo A “Comparaciones del Autor con el Estado del Arte”	123
A.1 El Proceso de Sellado de Ampolletas	123
A.2 Pasos Propuestos para el Proceso de Sellado de Ampolletas	125
A.2.1. Preparación de la Superficie de la Boquilla de la Ampolleta	125
A.2.2. Temperatura de la Boquilla de la Ampolleta	126

A.2.3.	Período de Tiempo de Exposición de la Boquilla de la Ampolleta a la Fuente de Calor_____	133
A.2.4.	Presión Mecánica Aplicada a la Boquilla de la Ampolleta_____	135
A.2.5.	Enfriamiento del Sello de la Ampolleta_____	136
A.2.6.	Verificación del Sello de la Ampolleta_____	137

Anexo B “Trabajo de Experimentación Realizado en el CDMIT”_____

141

B.1.	Análisis Funcional del Problema del Sellado de Ampolletas_____	142
------	--	-----

B.2.	Desarrollo de un Banco de Pruebas para Simular las Cuatro Funciones Estudiadas Durante el Análisis Funcional_____	143
------	---	-----

B.3.	Trabajo Experimental en el Banco de Pruebas de Sellado de Ampolletas de PVC_____	145
------	--	-----

B.4.	Trabajo de Campo Exploratorio Sobre el Diseño, Desarrollo y Operación de Tecnología Previa a la Presente Investigación_____	146
------	---	-----

B.4.1.	Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Pionera____	146
--------	--	-----

B.4.2.	Conocimiento Adquirido sobre la Primera Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada_____	147
--------	--	-----

B.4.3. Segunda Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada	147
B.4.4. Conocimiento Adquirido sobre la Segunda Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada	148
B.4.5. Tercera y Última Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada	149
B.4.6. Conocimiento Adquirido sobre la Tercera Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada	150
B.4.7. Recopilación y Análisis de Datos Experimentales y de Campo	151

Anexo C “Diseño del Banco de Pruebas para Ensayar Ampolletas ante Presión Hidrostática “Blow Out”	155
C.1. Primer Prototipo	156
C.2. Segundo Prototipo	157
C.3. Tercer Prototipo	158
C.4. Versión Final del Banco de Pruebas “Blow Out”	160
C.5. Observaciones Finales	163

Anexo D “Análisis de Esfuerzos a Partir de los Resultados del Experimento para Medir la Resistencia del Sello de la Ampolleta ante una Carga de Presión Hidrostática”	165
Anexo E “Inspección Estereoscópica del Sello de la Ampolleta”	167
E.1. Inspección de Muestras para el Ensayo de Tracción del Sello de la Ampolleta	168
E.2. Inspección de una Muestra Obtenida del Experimento para Sellar Ampolletas	172
E.3. Observaciones Finales	174
Anexo F “La Ampolleta de PVC”	175
Anexo G “El Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica CDMIT”	178

Índice de Figuras

Figura 1, Proceso de Sellado de Ampolletas de PVC._____	9
Figura 2, Variante del Proceso de Sellado de Ampolletas de PVC._____	10
Figura 3, Métodos de Sellado para Materiales Termoplásticos, Tomado de Balkan et al. [3]._____	17
Figura 4, Regiones de “Peeling o Tearing” Ubicados en una Curva Generada a Partir de la Correlación entre la Resistencia a la Tracción de una Probeta y la Temperatura a la que fue Sellada, Tomado de Hishinuma [1]._____	21
Figura 5, Incremento de la Temperatura en la Superficie Derretida con Componentes Volátiles sobre la Misma, Tomado de Hishinuma [1]._	26
Figura 6, Gráficas que Relacionan la Resistencia (Esfuerzo de Cedencia) con los Factores Estudiados para Muestras no Selladas (Izquierda) y para Muestras Selladas (Derecha), Tomado de Merhar [7]._____	32
Figura 7, Curvas Representativas de Esfuerzo-Deformación para Muestras no Selladas (Izquierda) y para Muestras Selladas (Derecha) a Diferentes Temperaturas Ambiente, Tomado de Merah, [8]._____	33
Figura 8, Curvas de Entalpia Específica para Polímeros Comunes, de Tadmor y Gogos [5]._____	34
Figura 9, Representación Esquemática de Remoción de Material Derretido Mediante Mecanismos de Inducción por Arrastre e Inducción por Presión Mecánica, de Tadmor y Gogos [5]._____	35
Figura 10, Respuesta de la Temperatura de la Superficie Derritiéndose para la Operación Básica de Sellado por Calor en un Sistema de Placa Caliente, Tomado de Hishinuma [1]._____	37
Figura 11, Banco de Pruebas Sellador de Láminas de PVC, de Van de Ven y Erdman [9]_____	42
Figura 12, Velocidad de Calentamiento de la Superficie de Derretimiento Relacionada con la Presión Mecánica, Tomado de Hishinuma [1]_	43

Figura 13, Contacto de las Películas Causado por la Presión Mecánica de la Placa Caliente, Tomado de Hishinuma [1]	43
Figura 14, Comparación de Velocidad de Enfriamiento entre el Enfriamiento Forzado y Enfriamiento Natural de la Muestra Sellada, Tomado de Hishinuma [1]	51
Figura 15, Superficie de Fractura Típica para una Mezcla 30/70 de PVC/HDPE con PVC de Peso Molecular Bajo Mostrando la Depresión Iniciada y las Magnificaciones del Sitio de Iniciación para (b) PVC de Peso Molecular 67,000; (c) PVC de Peso Molecular 83,000 y (d) PVC de Peso Molecular 141,000, Tomado de Jarus [10]	53
Figura 16, Representación Esquemática de la Deformación de la Superficie en la Iniciación de la Fractura Típica para una Mezcla 30/70 de PVC/HDPE con PVC de Peso Molecular Bajo (Débil) y PVC de Peso Molecular Alto (Fuerte), Tomado de Jarus [10]	54
Figura 17, Vista Lateral de un Empaque Blíster Indicando la Colocación de un Desecante e Imagen del Comportamiento del Adhesivo Derretido para una Muestra Sellada a 190°C, Tomado de Lilian y Fritz [22]	56
Figura 18, Proceso Industrial de Verificación para el Sellado de Ampolletas de PVC	59
Figura 19, Relación del Diseño de los Experimentos con la Hipótesis de la Investigación	63
Figura 20, Representación Esquemática del Diseño del Banco de Pruebas	66
Figura 21, Ampolleta Ensayada en el Banco de Pruebas	66
Figura 22, Arreglo Ampolleta-Termopar Diseñado para Medir con Precisión la Temperatura en la Boquilla de la Ampolleta	68
Figura 23, Dado Utilizado en el Banco de Pruebas	70
Figura 24, Esquema Conceptual del Dispositivo para Verificar el Sello Producido en la Ampolleta por el Banco de Pruebas	71
Figura 25, Cuerpo Cilíndrico Hueco de Acero que Pertenece al Módulo 8	73

Figura 26, Representación Esquemática de los Primeros Tres Módulos del Banco de Pruebas para la Experimentación sobre Velocidad de Calentamiento_____	74
Figura 27, Resultados del Experimento de la Velocidad de Calentamiento____	83
Figura 28, Resultados del Experimento sobre el Sellado de la Ampolleta_____	85
Figura 29, Resistencia del Sello y del Cuerpo de la Ampolleta ante Presión Hidrostática_____	88
Figura 30, Dibujo de la Síntesis de Fabricación de la Muestra para el Ensayo de Tracción al Sello de la Ampolleta_____	90
Figura 31, Muestra para el Ensayo de Tracción al Sello de la Ampolleta Montada en la Máquina Universal_____	91
Figura 32, Falla Típica de Tensión que se Presentó en la Unión de las Boquillas. Muestras Ensayadas a Temperatura Ambiente _____	93
Figura 33, Falla Típica que se Presentó en el Cuerpo de las Muestras. La Falla no se Presentó en la Unión de las Boquillas _____	94
Figura 34, Muestra de PVC con Línea de Sellado Elaborada con Inyección, Merhar et al [7]_____	95
Figura 35, Calentamiento y Sellado de la Boquilla de la Ampolleta Utilizando Aire a Presión_____	100
Figura 36, Configuración de Desplazamiento del Cabezal de Sellado para Calentamiento de la Boquilla, Sellado de la Boquilla y Enfriamiento del Sello Disminuyendo en Cascada la Temperatura del Aire y Manteniendo la Presión del Aire Constante _____	102
Figura 37, Diferente Geometría del Dado_____	105
Figura 38, Diagrama Funcional para el Sellado de Ampolletas_____	142

Figura 39, Banco de Pruebas de Sellado de Ampolletas de PVC de la Etapa Exploratoria_____	143
Figura 40, Figura Esquemática del Banco de Pruebas de Sellado de Ampolletas de PVC de la Etapa Exploratoria_____	144
Figura 41, Primera Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada_____	147
Figura 42, Segunda Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada_____	148
Figura 43, Tercera Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada_____	150
Figura 44, Secuencia e Integración de las Funciones de las Maquinas Estudiadas_____	151
Figura 45, Primer Prototipo Elaborado para Desarrollar el Banco de Pruebas “Blow Out”_____	156
Figura 46, Segundo Prototipo Elaborado para Desarrollar el Banco de Pruebas “Blow Out”_____	157
Figura 47, Explosivo del Segundo Prototipo Elaborado para Desarrollar el Banco de Pruebas “Blow Out”_____	158
Figura 48, Detalle de la Muestra para Ensayo del Segundo Prototipo Elaborado para Desarrollar el Banco de Pruebas “Blow Out”_____	158
Figura 49, Tercer Prototipo Elaborado para Desarrollar el Banco de Pruebas “Blow Out”_____	159
Figura 50, Explosivo del Tercer Prototipo del Banco de Pruebas “Blow Out”_____	159
Figura 51, Detalle de la Muestra para Ensayo del Tercer Prototipo Elaborado para Desarrollar el Banco de Pruebas “Blow Out”_____	160
Figura 52, Versión Final del Banco de Pruebas “Blow Out”_____	161
Figura 53, Explosivo del Dispositivo Principal de la Versión Final del Banco de Pruebas “Blow Out”_____	162
Figura 54, Detalle del Banco de Pruebas “Blow Out” que Muestra el Instrumento para la Medición (Manómetro) de la Carga Hidrostática_____	162
Figura 55, Dispositivo Ensamblado del Banco de Pruebas “Blow Out”._____	163

Figura 56, Número de Piezas y de Ensamblajes para los Diversos Prototipos y la Versión Final del Banco de Pruebas “Blow Out” _____	164
Figura 57, Esfuerzo Plano en Recipiente Esférico de Pared Delgada que Modela el Sello de la Ampolleta _____	166
Figura 58, Estéreo-Microscopio Wild Heerbrug Photomakroskop M400 _____	167
Figura 59, Corte Longitudinal de Muestras para el Ensayo de Tracción del Sello de la Ampolleta Examinadas con el Estéreo-Microscopio _____	168
Figura 60, Primera Muestra de Inspección para el Estereomicroscopio _____	169
Figura 61, Segunda Muestra de Inspección para el Estereomicroscopio _____	170
Figura 62, Tercera Muestra de Inspección para el Estereomicroscopio _____	171
Figura 63, Muestra Obtenida del Experimento para Sellar Ampolletas _____	172
Figura 64, Detalle de la Muestra Obtenida del Experimento para Sellar Ampolletas _____	173
Figura 65, Características de la Boquilla de la Ampolleta _____	177
Figura 66, La Ampolleta y su Boquilla _____	177

Índice de Tablas

Tabla 1a, Autores que han Estudiado el Sellado de Materiales Termoplásticos en General_____	10
Tabla 1b, Autores que han Estudiado la Caracterización y el Sellado del PVC_____	12
Tabla 1c, Patentes Relacionadas con el Proceso de Sellado de Ampolletas Hechas de Vidrio o de Materiales Termoplásticos_____	13
Tabla 1d, Participación de los Sectores que Componen el Segmento de Mercado para la Industria del Empaque Relacionada con el Llenado y Sellado de Envases en México_____	15
Tabla 2, Valores de los factores experimentales de Merhar [7]._____	32
Tabla 3, Tabla Comparativa de Datos Referente al Principio de Calentamiento, el Rango de Temperatura de la Fuente de Calor y la Velocidad de Desplazamiento de la Muestra_____	75
Tabla 4, Tabla Comparativa de Datos Referente al Principio de Calentamiento y Rango de Presión Mecánica que se Ejerce sobre la Muestra_____	79
Tabla 5, Resultados del Experimento de la Velocidad de Calentamiento_____	84
Tabla 6, Resultados del Ensayo de Tracción al Sello de la Ampolleta. La Unión de las Boquillas Falla por Tensión_____	92
Tabla 7, Resultados del Ensayo de Tracción al Sello de la Ampolleta. La Unión de las Boquillas no Falla. La Falla por Tensión Corresponde al Cuerpo de la Ampolleta_____	93
Tabla 8, Relación Existente entre los Parámetros de Sellado de Merhar et al [7] y del Autor_____	96
Tabla 9, Aportaciones del Autor sobre el Proceso de Sellado de Materiales Termoplásticos_____	124
Tabla 10, Aportaciones del Autor sobre la Preparación de la Superficie_____	125
Tabla 11, Aportaciones del Autor a la Exposición del Material Termoplástico a una Fuente de Calor y el Parámetro de Sellado Correspondiente (T) _____	127

Tabla 12. Aportaciones del Autor al Período de Tiempo de Exposición del Material Termoplástico a una Fuente de Calor y el Parámetro de Sellado Correspondiente (t)_____	134
Tabla 13, Aportaciones del Autor a la Aplicación de una Presión Mecánica y el Parámetro de Sellado Correspondiente (P)_____	135
Tabla 14, Aportaciones del Autor al Enfriamiento del Material Sellado_____	137
Tabla 15, Aportaciones del Autor a la Verificación del Sello Realizado_____	137
Tabla 16, Tabla Comparativa de Parámetros de las Máquinas Desarrolladas para el Sellado de Ampolletas de PVC_____	152
Tabla 17, Ventajas y Desventajas del Prototipo 1 para el Banco de Pruebas “Blow Out”_____	157
Tabla 18, Ventajas y Desventajas del Prototipo 2 para el Banco de Pruebas “Blow Out”_____	158
Tabla 19, Ventajas y Desventajas del Tercer Prototipo 2 para el Banco de Pruebas “Blow Out”_____	160
Tabla 20, Ventajas y Desventajas del Banco de Pruebas “Blow Out”_____	163
Tabla 21, Número de Piezas y de Ensamblajes de Cada Prototipo_____	164
Tabla 22, Características del Sello Obtenidas de la Inspección a la Primera Muestra_____	169
Tabla 23, Características del Sello Obtenidas de la Inspección a la Segunda Muestra_____	170
Tabla 24, Características del Sello Obtenidas de la Inspección a la Tercera Muestra_____	171
Tabla 25, Tabla Comparativa entre Ampolletas de Vidrio y Ampolletas de Plástico_____	176

1. Introducción.

Una compañía internacional de cosméticos con operaciones en México requiere satisfacer una demanda de los mercados nacionales e internacionales de 4 millones de ampollas llenadas y selladas por mes, ampollas que contienen líquido acondicionador para el cabello. Como respuesta ante la demanda del mercado, la compañía solicitó al CDMIT el desarrollo de una máquina innovadora para el sellado de ampollas de PVC. El proceso de sellado de materiales termoplásticos con calor es una oportunidad de investigación muy importante, ya que la industria del empaque alrededor del mundo se estima en 550 mil millones de dólares estadounidenses; principalmente en las industrias de cosméticos, farmacéuticas, de alimentos y automotriz entre otras, Hishinuma [1]¹. Las compañías de cosméticos, farmacéuticas y de empaque desarrollan procesos y sellan ampollas termoplásticas que contienen líquido, para lo cual la resistencia e integridad hermética del sello de la ampolla termoplástica es de vital importancia para dichas compañías. El sellado de los contenedores termoplásticos es un tema de investigación que ha sido estudiado en todo el mundo, especialmente durante la última década, destacando autores como: Hishinuma [1], Merah [8] y Lilian y Fritz [22].

El proceso de sellado de la ampolla aún no se encuentra completamente entendido y la cantidad de información relacionada con el proceso de sellado de la

¹ El sistema de referencias utilizado es acorde con el Estilo del Professional Engineering Publishing perteneciente al Institution of Mechanical Engineers (IMechE). Author guide for journal authors. 2009; [6 páginas]. Disponible en URL: <http://www.pepublishing.com/acadpub/jmes/auth/authguide.htm>. Consultado Abril 2, 2010.

ampolleta es reducida, situación que estimuló la necesidad de investigar para generar el conocimiento no existente y que es necesario para obtener un sello de ampolleta resistente y hermético.

Para que el lector comprenda de manera correcta el contexto del fenómeno investigado, el autor hace una recomendación (obligatoria) al lector a leer los Anexos: F “La ampolleta de PVC” y B “Trabajo de Experimentación Realizado en el CDMIT”, antes de continuar con la lectura de la Tesis.

Este proceso de investigación ha sido dirigido por las siguientes preguntas que son planteadas en el capítulo II “Preguntas Fundamentales, Hipótesis y Objetivos” de la Tesis:

- a) ¿Cómo se sella una ampolleta?
- b) ¿Cómo se mide el sello de una ampolleta?

La presente Tesis proporciona una respuesta a tales preguntas y se fundamenta en el conocimiento recopilado a través del estado del arte, mismo que se presenta en el capítulo III “Estado del Arte” de la Tesis. La investigación se encuentra diseñada a través de seis pasos secuenciales para el proceso de sellado de ampolletas con calor y toma como referencia estos pasos para el diseño de un banco de pruebas y tres experimentos originales. Los resultados obtenidos de la experimentación se presentan en el capítulo IV “Experimentación” de la Tesis y fueron analizados y comparados con los resultados de diferentes autores cuyas investigaciones se encuentran en el estado del arte. Los resultados del trabajo cuantifican y validan los principales parámetros en el proceso de sellado: temperatura, presión y tiempo de calentamiento. La investigación generó conocimiento y tecnología útiles para el proceso rápido y eficiente de sellado de

ampolletas, mismos que se presentan en el capítulo V “Recomendaciones para el Diseño del Cabezal de Sellado” de la Tesis.

La información generada, además de ser fundamental para el diseño de sistemas automáticos de sellado, no ha sido documentada y reportada anteriormente.

2. Preguntas Fundamentales, Hipótesis y Objetivos

La investigación heurística y el esfuerzo de desarrollo se pueden resumir en las siguientes preguntas:

- ¿Cómo se sella la ampollita de PVC?
- ¿Cuál es el proceso para sellar la ampollita de PVC?
- ¿Cómo se mide el sello de la ampollita de PVC?
- ¿Cómo sellan los diferentes autores PVC y otros materiales termoplásticos?
- ¿Cuáles son los valores necesarios de: a) temperatura de la boquilla de la ampollita, b) período de tiempo de calentamiento, c) presión mecánica, para que la ampollita alcance las mejores condiciones de sellado?
- ¿Cómo puede sellarse adecuadamente la boquilla de la ampollita de PVC?
- ¿Cómo se identifica la calidad del sello de la ampollita de PVC?

Nuevamente el autor hace una recomendación (obligatoria) al lector a leer los Anexos: F “La ampollita de PVC” y B “Trabajo de Experimentación Realizado en el CDMIT”, antes de continuar con la lectura de la Tesis, con el fin de que el lector comprenda de manera correcta el proceso de sellado de ampollitas de PVC.

El proceso de sellado de ampollitas de PVC llevado a cabo por el grupo de diseño del CDMIT-UNAM hasta antes de la presente investigación corresponde a un proceso de desarrollo tecnológico caracterizado de manera no formal y no documentada, esta es la primera vez que se estudia y documenta el proceso de sellado de ampollitas de manera formal, es decir dentro de un marco científico.

En la búsqueda bibliográfica que se llevó a cabo sobre el tema del sellado de ampollitas no se encontró material publicado que indique un proceso formal para sellar ampollitas de PVC, sin embargo se encontraron trabajos valiosos, que fueron tomados como base de una propuesta de proceso formal para el sellado de ampollitas de PVC por parte del autor de la presente Tesis.

2.1. Hipótesis

El presente trabajo de investigación presenta la hipótesis:

“Un adecuado control de la temperatura de la boquilla de la ampollita, el tiempo de exposición al calor de la boquilla de la ampollita y la presión mecánica ejercida en la boquilla de la ampollita colaboran significativamente a producir sellos de ampollitas de PVC resistentes y herméticos”.

2.2. Objetivos de la Investigación

La presente investigación cuenta con objetivos precisos y definidos, que giran en torno a la generación de conocimiento para desarrollar nueva tecnología para el sellado de ampollitas termoplásticas de PVC. Los objetivos planteados se encuentran acotados debidamente, son medibles, son alcanzables y se plantearon con el fin de alcanzarlos en un período de tiempo de 4 a 5 años.

Los objetivos planteados son:

1. La definición del proceso de sellado de ampollitas de PVC.
2. El establecimiento de rangos de operación para producir un sello de ampollita de PVC resistente y hermético.

3. Producir una lista de recomendaciones para el diseño del cabezal de sellado que se integrará en un sistema continuo de llenado y sellado de ampollitas.

2.3. Justificación de la Hipótesis.

Esta hipótesis surge como una consecuencia de los objetivos de la investigación y la evidencia reunida para sustentarla proviene de: el trabajo preliminar; (Anexos F y B), la información recopilada mediante las máquinas selladoras de ampollitas que se encuentran en la línea de producción; (Anexo B), la revisión bibliográfica; (Capítulo III) y la metodología de investigación desarrollada.

Tanto los investigadores como las máquinas selladoras que se encuentran en la línea de producción confirman que entre los diferentes parámetros para caracterizar el proceso de sellado de ampollitas, la temperatura de la boquilla de la ampollita, el tiempo de exposición al calor de la ampollita y la presión mecánica ejercida en la boquilla de la ampollita se presentan como los más significativos.

El sellado adecuado de una ampollita de PVC se basa en la idea de que la unión del borde de la boquilla es un fenómeno que tiene lugar dentro de un dado y dicho fenómeno para desarrollarse con éxito requiere condiciones específicas para la boquilla de la ampollita: temperatura, tiempo de exposición al calor y presión mecánica ejercida.

3. Estado del Arte

Este capítulo representa el marco de referencia de la presente Tesis. Dicho marco de referencia lo componen:

- a) La descripción de los trabajos de aquellos autores que han estudiado el proceso de sellado de materiales termoplásticos y los diferentes pasos que forman parte de dicho proceso.
- b) La discusión de dichos trabajos a la luz del problema de investigación motivo de la presente Tesis.
- c) La descripción de la metodología de investigación utilizada por los diversos autores que han estudiado el proceso de sellado de materiales termoplásticos y los diferentes pasos que forman parte de dicho proceso.

Se revisaron exhaustivamente más de 100 artículos relacionados con el proceso y los parámetros involucrados con el correcto sellado de materiales termoplásticos (entre ellos el PVC) con calor. Dicha revisión describe el grado de avance científico y tecnológico del proceso y los parámetros involucrados en el sellado de ampollitas termoplásticas de PVC. Cabe señalar que hoy en día autores como Wypych [20], afirman que existen serias dudas sobre la validez del ampliamente aceptado perfil de cristalinidad del PVC, sin embargo para los fines de esta investigación se considera al PVC como tradicionalmente se ha venido considerando como un polímero “cristalino”.

Es importante remarcar que dentro de la realización de esta búsqueda de información en la literatura se encontró que los diversos autores refieren el fenómeno del sellado de materiales termoplásticos como:

- a) *Welding*
- b) *Sealing*
- c) *Bonding*
- d) *Adhesión*

Los pasos que involucra el proceso de sellado de materiales termoplásticos (incluyendo ampollitas de PVC) con calor y que se reportan actualmente en la literatura varían de autor en autor, sin embargo, basado en los estudios de Balkan et al. [3], Hishinuma [1] y Tadmor y Gogos [5], el autor propone una secuencia de 6 pasos para el proceso de sellado de ampollitas termoplásticas de PVC con calor y dichos pasos se muestran en la figura 1 y se pueden resumir como sigue:

1. Preparación de la ampollita para sellado con calor
2. Exposición de la ampollita a una fuente de calor
3. Tiempo de exposición de la ampollita a una fuente de calor
4. Aplicación de presión mecánica a la ampollita
5. Enfriamiento del sello de la ampollita
6. Verificación del sello de la ampollita

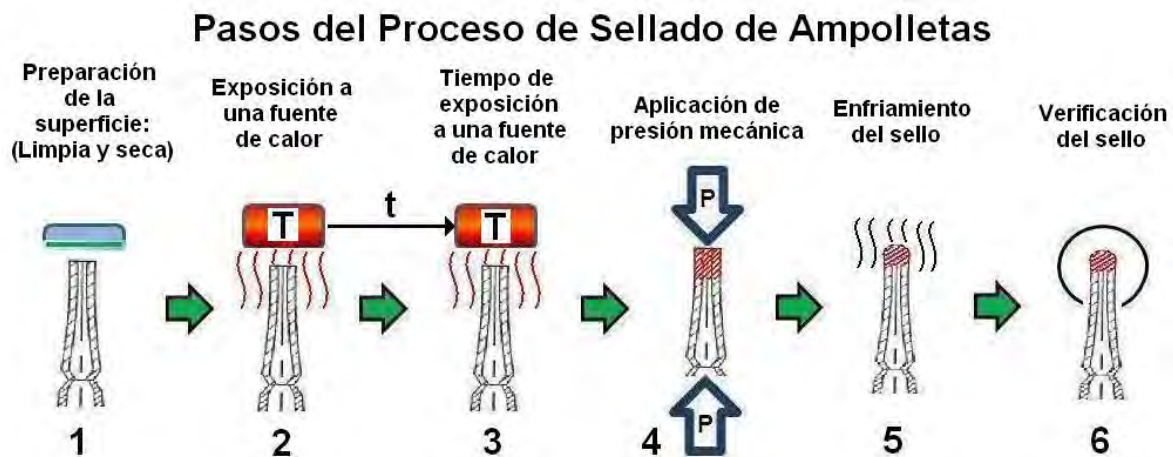


Figura 1. Proceso de Sellado de Ampolletas de PVC.

La manera de presentar, discutir y evaluar el trabajo publicado por los autores estudiados se encuentra basada en el seguimiento paso por paso del proceso de sellado de ampollas de PVC con calor, mismo que es mostrado en la figura 1.

Partiendo de la revisión bibliográfica realizada, se encontró que diversos autores, entre ellos se encuentran Hishinuma [1], Kamweld Technologies [2], Balkan et al. [3] y Van de Ven y Erdman [9], coinciden con una variante de la secuencia de los pasos del proceso de sellado de materiales termoplásticos (incluyendo ampollas de PVC) mostrado en la figura 1, representa una variante que incorpora los pasos 2, 3 y 4 en un paso. Los autores consultados presentan dicha variante como un proceso de sellado de materiales termoplásticos de gran aceptación a nivel industrial. Esta variante de la secuencia propuesta por el autor de los pasos del proceso de sellado de ampollas de PVC con calor se presenta a continuación en la figura 2:

Variante del Proceso de Sellado de Ampolletas

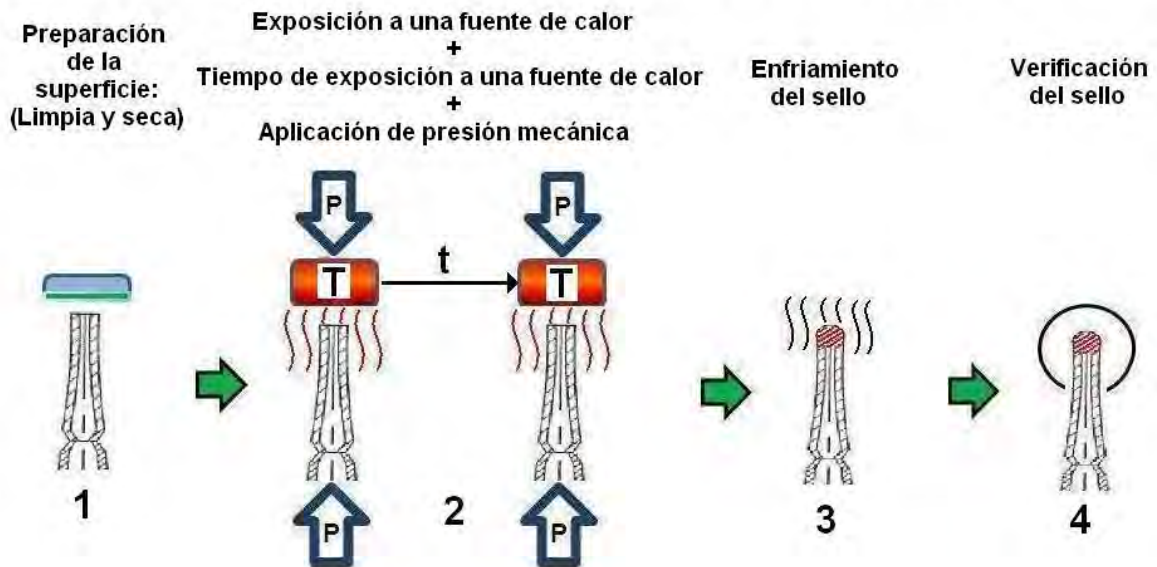


Figura 2. Variante del Proceso de Sellado de Ampolletas de PVC.

Una parte de los autores revisados en la literatura han abordado el sellado de materiales termoplásticos en general, como se muestra a continuación en la tabla 1a:

Tabla 1a. Autores que han Estudiado el Sellado de Materiales Termoplásticos en General

Autor	Descripción	Año
A. Graner Solana., et al., [69]	Predicciones de fatiga y deformación en juntas adheridas mediante adhesivo.	2010
Sylvain Chataigner., et al., [70]	Desarrollo de un criterio de falla no lineal para juntas adheridas con doble capa	2010
Byung-Gil Jeong., et al., [66]	Estudio sobre la verificación de un empaque hermético.	2009
SangWook Park., et al., [67]	Ensayos de tracción a juntas adheridas con un adhesivo reforzado con nano-partículas.	2009
X. Fan., et al., [76], [77]	Estudio de la producción y el procesamiento del "honeycomb". Partes I y II	2009
Peter Mitschang., et al [88]	Estudio sobre la adhesión de aluminio y fibra de carbono reforzada con nylon 66.	2009
Sage Publications [92]	Patentes relacionadas con el sellado y la adhesión de materiales termoplásticos.	2009
Rezaur Rahman., et al., [96]	Estudio de las propiedades físico-mecánicas de la fibra de yute tratada con ácido maleico.	2009
Paulo J. C. das Neves., et al., [68]	Análisis de juntas adheridas con adhesivo compuesto.	2008
J. van Malsen., et al., [85]	Estudio sobre la resistencia del sellado por calor de películas que sirven de barrera en paneles de aislamiento al vacío.	2008
Seong G. Kim, Chul B. Park and Mohini Sain [99]	Estudio sobre las capacidades de un termoplástico para desarrollar espuma utilizando diferentes agentes de soplado.	2008
I. De Baere., et al., [73]	Monitoreo utilizando sensores de fibra óptica de la deformación en materiales termoplásticos compuestos	2007

Autor	Descripción	Año
J. Philipp Brattfisch and Dirk Vandepitte [93]	Descripción del desarrollo de un concepto para la producción continua de "honeycomb" termoplástica.	2007
Dinesh Aithani., et al., [72]	Estudio sobre la resistencia de un sello de fácil apertura en un empaque	2006
D. Cava., et al., [74]	Estudio del desempeño de materiales termoplásticos biodegradables y nano-bio-compuestos vs. tereftalato de polietileno (PET) para empaques de alimento.	2006
Sage Publications [90]	Patentes relacionadas con el sellado y la adhesión de materiales termoplásticos.	2006
Sage Publications [91]	Patentes relacionadas con el sellado y la adhesión de materiales termoplásticos.	2006
John Tierney and J. W. Gillespie, Jr [101]	Desarrollo de un modelo de la resistencia de un material termoplástico a un proceso de remolque y colocación.	2006
Xiaolin Wang., et al., [104]	Estudio de elemento finito del campo de temperatura durante sellado ultrasónico de materiales compuestos PEEK.	2006
Val A. Kagan and Russell J. Nichols [83]	Estudio sobre los beneficios del sellado por inducción de termoplásticos reforzados para aplicaciones de alto desempeño.	2005
Sage Publications, [80]	Noticias relacionadas con el sellado y la adhesión de películas y láminas plásticas	2004
Val A. Kagan and Nicole M. Woosman [82]	Estudio de la eficiencia de tecnología laser para sellar materiales termoplásticos transparentes.	2004
Robert W. Messler, Jr [87]	Estudio sobre la adhesión de materiales compuestos y estructuras.	2004
K. L. Pickering and C. Ji [94]	Estudio del efecto de los agentes adherentes "poly[methylene(polyphenyl isocyanate)]" y el "maleated polypropylene" en los compuestos "radiata pine fiber-polypropylene" de Nueva Zelanda	2004
K. N. Shivakumar and S. A. Smith [100]	Estudio de la resistencia a la fractura de materiales en paneles tipo sándwich	2004
Yongjin Kwon, Teresa Wu and Juan Ochoa Saldivar [106]	Desarrollo de un sistema de decisión apoyado en un sistema CAD para el eficiente diseño de sellado.	2004
Ali Yousefpour and Mehrdad N. Ghasemi Nejhada [108]	Diseño, análisis manufactura y prueba de recipientes de APC-2/AS4 termoplástico compuesto para aplicaciones de aguas marinas profundas.	2004
Ali Yousefpour, Mehdi Hojjati and Jean-Pierre Immarigeon [109]	Estudio del sellado por fusión de materiales termoplásticos compuestos.	2004
L. T. Drzal and V. K. Raghavendran [75]	Estudio de la adhesión de matrices de material termoplástico en fibras de carbono.	2003
Dieter H. Mueller and Andreas Krobjilowski [89]	Descripción de un descubrimiento en las propiedades de materiales compuestos reforzados con fibras naturales.	2003
Ramazan Karakuzu, Züleyha Aslan and U. Kerim Yucel [97]	Análisis elasto-plástico por elemento finito de placas laminadas de material termoplástico sujetas con abrazaderas.	2003
G. M. Viana and L. A. Carlsson [102]	Estudios sobre la influencia de la densidad de espuma y el espesor en la resistencia a la desunión de probetas tipo sándwich de PVC	2003
Vinay Gupta., et al. [78]	Estudio de materiales termoplásticos compuestos Carbón/Kevlar/PEEK	2002
Sage Publications, [79]	Noticias relacionadas con el sellado y la adhesión de películas y láminas plásticas	2002
V. A. Kagan, R. G. Bray and W. P. Kuhn [81]	Estudio del sellado de materiales termoplásticos mediante laser.	2002
H. Potente and J. Schnieders [95]	Estudio de la influencia de los parámetros del proceso desellado con placa caliente en el fenómeno del esfuerzo de ruptura.	2002
Ali Yousefpour and Mehrdad N. Ghasemi Nejhada [107]	Estudio de los efectos de la optimización geométrica de tapas en el desempeño de recipientes gruesos de materiales compuestos termoplásticos que se encuentran bajo presión hidrostática externa.	2002
Ziya Seyhan Colak, Fazil Onder Sonmez and Vahan Kalenderoglu [110]	Modelado del proceso y optimización de la resistencia de sellado para materiales termoplásticos compuestos.	2002
Christophe Ageorges and Lin Ye [71]	Estudio de la resistencia de juntas selladas metal/termoplástico	2001
Wei-Ching Sun, Susan C. Mantell and Kim A. Stelson [103]	Mejoras en la calidad de unión de cintas de material termoplástico.	2001
F. Yang and R. Pitchumani [105]	Descripción fractal del desarrollo de contacto inter-laminar durante el procesamiento de materiales termoplásticos.	2001
Benjamin Zurn and Susan C. Mantell [111]	Evaluación no destructiva de materiales compuestos laminados utilizando ondas de Rayleigh.	2001
Ganesan Kumar and Karthik Ramani [84]	Caracterización de un sistema tipo sándwich, compuesto de madera-propileno.	2000
S. C. Mantell and E. J. Linstrom [86]	Evaluación no destructiva de la unión inter-laminar de polímeros compuestos.	1999
Sea Cheon Oh., et al. [98]	Estudio sobre la cinética de la descomposición no-isotérmica del PVC.	1999

Otra parte de los autores revisados en la literatura han estudiado con mayor detalle la caracterización y el sellado del PVC, como se muestra a continuación en la tabla 1b:

Tabla 1b. Autores que han Estudiado la Caracterización y el Sellado del PVC

Autor	Descripción	Año
Rohe [18]	Estudio sobre la resistencia del sello de costura utilizado en geomembranas de PVC	2008
Hammer et al., [15]	Estudio sobre la modificación de partículas porosas de PVC con PS	2008
Wypych [20]	Estudio sobre la degradación y estabilización del PVC	2008
Chaves et al., [21]	Estudio sobre la resistencia de la adhesión de juntas T de PVC para ventanas	2008
Van de Ven y Erdman [9]	Ensayos de tracción a probetas de PVC, elaboradas con láminas selladas mediante una punta caliente.	2007
Merah [8]	Ensayos de tracción a probetas de PVC con línea de sello.	2003
Jarus et al., [10]	Ensayos de tracción a probetas de PVC/Polietileno con línea de sello e inspección al microscopio de la muestra ensayada.	2000
Lin y Cheng [11]	Estudio sobre el sellado por fricción de PVC y PMMA	2000
Stokes [19]	Estudio sobre el sellado de PVC utilizando una herramienta caliente y vibración	2000
Weier [12]	Estudio de la resistencia del sello de PVC ante la influencia de modificadores de acrílico.	1997
Merhar [7]	Ensayos de tracción a probetas de PVC con línea de sello. Las probetas fueron elaboradas mediante extrusión.	1994
Leighton et al., [14]	Estudio sobre el sellado de PVC con radiofrecuencia.	1993
Hitt y Gilbert [6]	Ensayos de tracción a probetas de PVC con línea de sello.	1992
Dodin [13]	Estudio sobre la correlación entre la tecnología de sellado para películas de PVC y el grado de plastificación obtenido.	1987
Lilis [17]	Estudio sobre los efectos pulmonares de la exposición a PVC	1981
Johnson y Radon [16]	Estudio sobre el efecto que producen las relajaciones moleculares en el comportamiento de fractura del PVC	1975

El autor encontró en la literatura patentes y equipo comercial relacionados con el proceso de sellado de ampollitas hechas de vidrio o de materiales termoplásticos. Las patentes encontradas se muestran a continuación en la tabla 1c:

Tabla 1c. Patentes Relacionadas con el Proceso de Sellado de Ampolletas Hechas de Vidrio o de Materiales Termoplásticos

Inventor	Patente	Titular	Título	País	Año
Isotani, M., [35]	JP2006131265	Toyo Kikai Seisakusho Kk	Sealing Apparatus for Bag-Making, Packaging and Filling Machine	Japón	2006
Bernd, H., [36]	US 2005/0156360 A1	Bernd Hansen	Moulding Method, in Particular a Blowing or Vacuum Moulding Method for Production of a Dispensing Container Filled with a Medium for Dispensing	EUA	2005
Wang, S.M., [37]	CN1696017	Univ Shanghai Jiaotong	Sealed Driving Mechanism of Heating Unit in Use for Filling Machine	China	2005
Vartet, J-P., [38]	B65B31/02,B65 B3/16	Valois S.A.	Máquina y Procedimeinto para el Llenado y el Precintado de Recipientes	España	2004
Willstumpf, E., [39]	US 2003/0221395 A1	Erich Willstumpf	Method of Venting a Filled Bottle which is Closed by Means of an Elastic Stopper, and Apparatus for Implementing the Method	EUA	2003
Gómez, L.V., [40]	B65B9/04,B29C 51/00	Gómez Laguna Vicente	Máquina para la Fabricación de Envases de Contenido Consumible	España	2003
Lee, D., [41]	KR20020004505	Kwang Myung Pharm Ind Co LTD	Method for Packing Drug Type Medical Supplies and Dual Packing System	Corea	2002
Bullinger, S., [42]	DE29824611U	Bausch & Stroebel Maschf	Sealing Ampoules by Means of a Laser Beam	Alemania	2002
Odell, R.B., [43]	US6263641B1	Becton, Dickinson and Company	Method and Apparatus for Manufacturing, Filling and Packaging Medical Devices and Medical Containers	EUA	2001
Kato, T., [44]	JP9182254	Sumitomo Wiring Systems	Sealing Agent Filling Device for Grommet	Japón	1997
Bernd, H., [45]	US005687550	Bernd Hansen	Blow Molding Sealed Container System	EUA	1997
Rosen, R., [46]	US005540568	National Instrument Co., Inc.	Disposable Rolling Diaphragm Filling Unit	EUA	1996
Shimizu, K., [47]	US5390469(A1)	EISAI Co. Ltd	Filling/Sealing Apparatus for Ampoule or the Like and Method for Monitoring this Apparatus	EUA	1995
Betts, R.E., [48]	US005230427	PPG Industries, Inc.	Sterilizable Hermetically-Sealed Substantially Glass Container	EUA	1993
Baruffato, R., [49]	US005207049	Farmomac	Device for Sealing Open Ends of Monodose Containers Already Filled with Liquid or Viscous Solutions	EUA	1993
Gianelly, G.C., [50]	MX 161008	W.R. Grace & Co. Conn	Mejoras en aparato para empaquetar productos al vacío	México	1990
Yamada, Y., [51]	JP1308725	Yamada Yoshimitsu	Sealing Apparatus for Filling Mouth of Packaging Bag	Japón	1989
Redmond, S., [52]	B65B3/00,B65B 7/00	Stanford Redmond Inc.	Máquina Compacta de Conformado-Llenado-Sellado para la Producción Automática de Envases Herméticos	España	1989
Asada, T., [53]	JP63272643	CKD Corp	Sterilization of Aseptic Filling and Sealing Apparatus and Removal of Sterilizing Liquid	Japón	1988
Yonemochi, Y., [54]	JP62007644	ESAI Co. Ltd	Melt-Sealing Ampoule and Its Melt-Sealing Method	Japón	1987
Kovacs, L., [55]	US4532753	Hayssen MFG Co.	Method of an Apparatus for Forming, Filling and Sealing Packages	EUA	1985
Eli Lilly and Company., [56]	A61J3/07	Eli Lilly and Company	Método para Sellar una Cápsula de Gelatina Ingerible	España	1985
Kovacs, L., [57]	GB2135646	Hayssen MFG Co.	Forming, Filling and Sealing Packages	Gran Bretaña	1984

Inventor	Patente	Titular	Título	País	Año
Bausch & Strobel Maschf., [58]	GB1492595	Bausch & Stroebel Maschf	Bottle or Ampoule Filling and Closing Machine	Gran Bretaña	1977
Bausch, W.L., [59]	US3986320	Bausch & Stroebel Maschf	Apparatus for Filling and Sealing Ampoules	EUA	1976
Bausch, W.L., [60]	DE2352646	Bausch & Stroebel Maschf	Ampullenfuell-Und-Verschliessmaschine	Alemania	1975
Armando, R.J., [61]	A61J5/00	Armando Reler Jorge	Dispositivo Llenador y Sellador de Ampolleta Destinadas a Contener Productos Medicinales	España	1968
Cozzoli, F.J., [62]	GB671952	Frank Joseph Cozzoli	Improvements in Combined Ampoule Filling and Sealing Machine	Gran Bretaña	1952
Meyer, F., [63]	GB670313	Felix Meyer	Improvements in or Relating to the Manufacture of Plastic Fluid Containers, Especially Ampoules	Gran Bretaña	1952
Meyer, A., [64]	GB380384	Adolphe Meyer	Apparatus for Sealing Ampoules and the Like	Gran Bretaña	1932

El autor encontró durante la revisión bibliográfica de la investigación colaboró en un estudio de mercado sobre maquinaria de empaque enfocada al llenado y sellado de envases realizado por los investigadores del CDMIT, Estudio de Mercado para el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) [65]. Dicho estudio de mercado reporta lo siguiente:

El segmento de mercado para la industria del empaque relacionada con el llenado y sellado de envases en México está compuesto por 9 sectores, siendo los sectores de alimentos, de bebidas y farmacéutico los de mayor participación. El porcentaje de participación de cada uno de los 9 sectores se muestra en la siguiente tabla 1d:

Tabla 1d. Participación de los Sectores que Componen el Segmento de Mercado para la Industria del Empaque Relacionada con el Llenado y Sellado de Envases en México

Segmentos de Mercado para la Industria del Empaque Relacionada con el Llenado y Sellado de Envases en México	Participación en el Mercado (%)
Bebidas	16.4
Productos Químicos	5.5
Productos Durables de Consumo	4.5
Convertidores, Impresoras	4.3
Alimentos	42.3
Hardware, Automotriz e Industrial	4.9
Productos de Papel, Bienes Suaves, No Durables	7.5
Productos de Cuidado Personal	5.7
Farmacéutico, Químico	8.9
Total	100

Asimismo el estudio de mercado, Estudio de Mercado para CONACYT [65], reportó que el mercado Mexicano del empaque enfocado al llenado y sellado de envases está dominado por la importación de maquinaria y equipo, misma que se encuentra cercana al 90% del mercado total valuado en US \$402 Millones de Dólares. Este estudio de mercado resalta lo siguiente sobre la maquinaria de llenado y sellado de envases:

- a) Estados Unidos es el mayor exportador de maquinaria en México, contando con aproximadamente el 40% del volumen total de importación.
- b) La maquinaria norteamericana es principalmente fuerte en los sectores de comida y bebida donde controla aproximadamente el 45% y el 65% de las ventas de equipo nuevo respectivamente. Sin embargo tiene una débil penetración en los sectores mexicanos farmacéutico y de cuidado personal.
- c) Mientras tanto, Italia, España y Australia han incrementado sus exportaciones a México significativamente.

- d) Existe producción local de maquinaria, sin embargo no es altamente automatizada y son producidas para compañías locales medianas y pequeñas.
- e) El mercado nacional cuenta con elementos favorables que favorecen la inversión en máquinas hechas en México.
- f) Cerca del 85% de la maquinaria adquirida en México es importada.
- g) Existe una tendencia para adoptar nueva tecnología. (e.g. demanda de nuevas máquinas horizontales y verticales para dar forma, llenar y sellar, demandando diseños y tecnología de vanguardia).
- h) La maquinaria de vanguardia se presenta cada año en los siguientes foros:
 - a. Expo Pack en la Ciudad de México.
 - b. Pack Expo en Chicago.
 - c. Interpack en Alemania.
 - d. ExpoFarma (Industria Farmacéutica) en la Ciudad de México.
 - e. Beberexpo (Industria de bebidas) en la Ciudad de México.
 - f. Plastimagen (Plásticos) en la Ciudad de México.

La revisión bibliográfica realizada por el autor incluyó revistas y libros especializados en sellado de contenedores y sellado de materiales termoplásticos, patentes referentes a sistemas de sellado de contenedores, maquinaria y equipo de vanguardia para sellado de contenedores e investigación en el CDMIT relacionada con el sellado de ampollitas. Sin embargo, el autor no encontró en dicha revisión información o datos relacionados con algún proceso de sellado de ampollitas de PVC. Así como se explicó en la introducción, esta información es

justamente lo que la presente investigación reporta sobre el fenómeno de sellado de ampollas.

La figura 3 muestra la clasificación de métodos de sellado para materiales termoplásticos reportada por Balkan et al., [3]. Esta clasificación se divide en métodos internos y métodos externos; y se definen como sigue:

- a) Los métodos externos. En este método las moléculas de material termoplástico son excitadas en función de su proximidad a la superficie del material.
- b) Los métodos internos. En este método las moléculas de termoplástico son excitadas independientemente de su ubicación en el material.

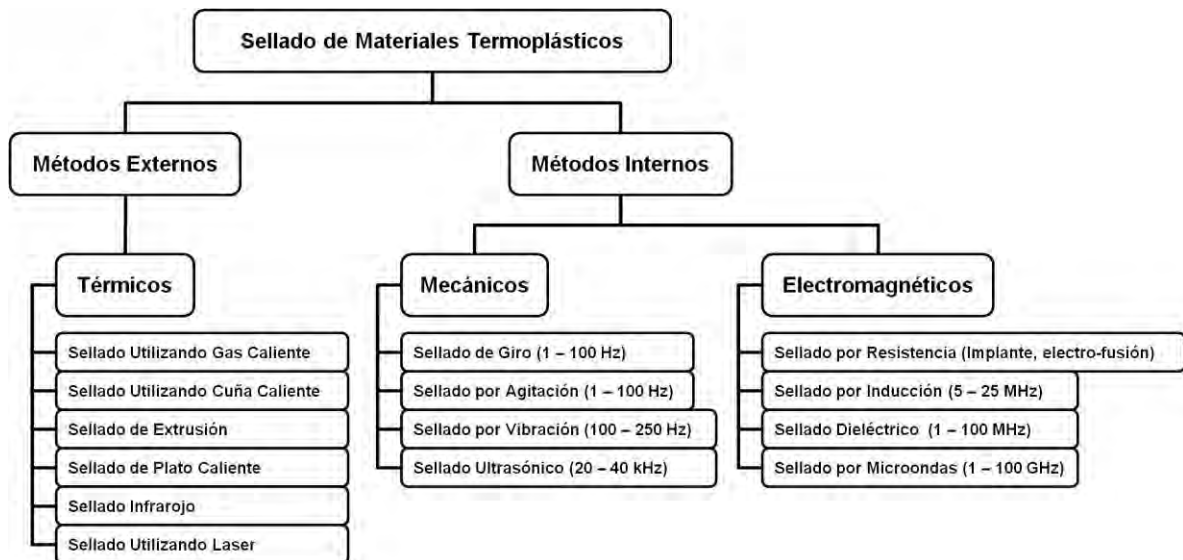


Figura 3. Métodos de Sellado para Materiales Termoplásticos, Tomado de Balkan et al. [3].

Como ejemplo de los métodos internos, Kamweld Technologies [2] reporta:

- a) El sellado por fricción o “spin welding”, (métodos internos/mecánicos). Se presenta cuando las superficies son friccionadas mutuamente mediante la

rotación de una superficie que gira contra otra que se encuentra estacionaria. Debido a que los materiales termoplásticos son pobres conductores del calor, el calor por fricción requerido para derretir las superficies en contacto es producido casi instantáneamente y la presión mecánica debe ser ejercida al mismo tiempo para completar el proceso de sellado entre ambas superficies en contacto. Este método se limita a áreas circulares.

- b) El sellado por inducción, (métodos internos/ electromagnéticos). Consiste en inducir el calor requerido para derretimiento de la muestra de material termoplástico utilizando una corriente eléctrica de alta frecuencia a través de un inserto metálico cercano a la superficie de la muestra de material termoplástico, posteriormente al calentamiento se aplica la presión mecánica para completar el proceso de sellado. Este método cuenta con el problema de que el inserto permanece en el material terminado.

Como ejemplos de los métodos externos, Kamweld Technologies [2] reporta:

- a) El sellado por placa caliente. Consiste en el calentamiento de dos placas de metal a una temperatura determinada y dichas placas son presionadas durante un tiempo determinado una contra la otra. Las placas contienen entre sí el material termoplástico a ser sellado y una vez que el material ha recibido el calor suficiente para derretirse y sellarse, las placas son liberadas y también el material sellado. Este método es ampliamente utilizado en la industria y por algunos investigadores de materiales termoplásticos como Hishinuma [1].

b) El sellado con gas caliente. Consiste en exponer las superficies a sellarse del material termoplástico a un flujo de calor durante un tiempo determinado para proporcionar al material termoplástico el calor necesario para derretirse y posteriormente aplicar una presión mecánica a dichas superficies para sellar la muestra. Este método es eficaz pero consume altas cantidades de energía.

Cabe señalar que Balkan et al. [3] hace referencia a la Norma ISO-472 [34] para describir el sellado de plásticos como el proceso de la unión de superficies suavizadas, generalmente con la ayuda de calor². Balkan et al. [3] menciona que para el sellado de termoplásticos se requiere el desarrollo secuencial de tres pasos:

- a) Preparación de la superficie.
- b) Aplicación de calor y una presión mecánica, que son procesos físicos necesarios para la difusión de las cadenas de polímero a través de la interfase.
- c) La etapa de enfriamiento.

Otra investigación importante en el tema del proceso de sellado de materiales termoplásticos es el trabajo de Hishinuma [1], que reporta que existen dos métodos diferentes para sellar materiales termoplásticos:

- a) Uno involucra el suministro de pegamento a las superficies de adhesión.
- b) El otro involucra el calentamiento de los materiales termoplásticos, su derretimiento, aplicación de presión mecánica al material derretido y

² Excepto por el método de sellado por solventes.

enfriamiento rápido del sello producido³. Hishinuma [1] utiliza este método para adherir capas de material termoplástico.

Hishinuma [1] estudia la adhesión intermolecular y afirma que el sellado de polímeros termoplásticos con calor es un tipo de adhesión que depende de la fuerza intermolecular y que es más débil que la unión química, refiriendo que la fuerza intermolecular está en proporción inversa a la 6ª potencia del espacio entre dos moléculas y dicho lo anterior plantea dos tipos de sellado:

- a) “Unión de interfase” ó “peel sealing” ó “peeling”. En este tipo de sellado las moléculas no se disipan completamente a través de la unión de la interfase. El rango de temperatura se encuentra entre una temperatura de transición vítrea (T_g) o temperatura de ablandamiento y la temperatura de derretimiento (T_m). Es un sello fácil de abrir, que evita la temperatura de degradación, y de manera controlada puede lograrse una región de “tear sealing”.
- b) “Unión cohesiva” ó “tear sealing” ó “tearing”. En este tipo de sellado las moléculas de polímero se entrelazan entre sí. El rango de temperatura debe encontrarse entre la temperatura de derretimiento (T_m) y la temperatura de degradación del material en cuestión. Es un sello ligeramente más resistente que la muestra sin sello.

En la figura 4 se presenta una curva que muestra la variación de la resistencia a la tracción contra la variación de temperatura de un polímero termoplástico. La curva muestra las regiones que componen los dos tipos de sellados propuestos por Hishinuma [1]. Cabe señalar que la curva mostrada en la figura 4 no especifica

³ Hishinuma [1] plantea un proceso similar al de la soldadura de metales.

si la resistencia a la tracción corresponde al esfuerzo de fluencia, al esfuerzo último o al esfuerzo de falla que generaría una probeta sellada⁴.

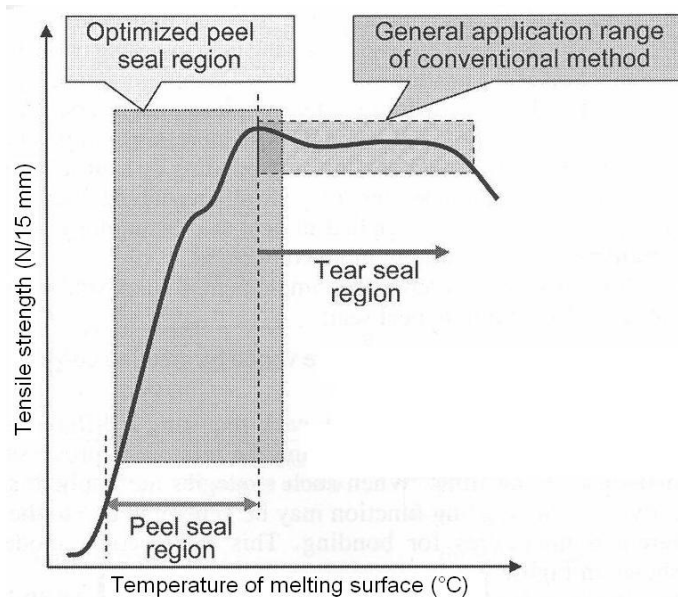


Figura 4. Regiones de “Peeling o Tearing” Ubicados en una Curva Generada a Partir de la Correlación entre la Resistencia a la Tracción de una Probeta y la Temperatura a la que fue Sellada, Tomado de Hishinuma [1].

Tanto el “peel sealing” como el “tear sealing” debido a sus propiedades cuentan con diversas aplicaciones y condiciones de sellado, en la sección 2.6 del presente capítulo (verificación del sellado) se ahondará sobre el desempeño de dichos tipos de sellos para materiales termoplásticos, (e.g. el estudio del desempeño del “peel sealing” en el sellado de geomembranas de PVC, Rohe [18]).

Balkan et al., [3] describió el proceso de sellado de PVC con gas caliente y presenta una serie de pasos y una secuencia correspondiente del proceso de sellado de materiales termoplásticos. Balkan et al., [3] define el proceso de sellado de materiales termoplásticos con calor en 4 pasos básicos: preparación de la

⁴ La probeta contará con alguno de los tipos de sello propuestos por el autor: “peeling o tearing”, que estará en función con su temperatura de sellado.

superficie del material, adición de calor, aplicación de una presión mecánica y enfriamiento, sin embargo no presenta de manera detallada la secuencia, las características y los detalles propios del proceso. Con base en el trabajo de investigación de Balkan et al. [3] se pueden formular las siguientes preguntas: ¿Qué características tiene una superficie suavizada? Es decir ¿Qué características tiene una superficie cuyas moléculas se encuentran propagadas debido a la exposición al calor? ¿De qué manera suavizo una superficie sin la ayuda de calor? ¿En qué consiste la ayuda de calor? También quedan por aclarar aspectos relacionados con cada uno de los pasos del proceso propuestos por Balkan et al. [3] para el sellado de termoplásticos:

- a) *Preparación de la superficie.* En este primer paso Balkan et al. [3] menciona que es necesario preparar la superficie para el sellado, pero no presenta una especificación para hacerlo. El análisis de este punto origina el planteamiento de la siguiente pregunta: ¿Cómo se prepara adecuadamente la superficie para el correcto sellado de termoplásticos?
- b) *Aplicación de calor y una presión mecánica, que son procesos físicos necesarios para la difusión de las cadenas de polímero a través de la interfase.* En este segundo punto planteado por Balkan et al. [3] menciona la aplicación de calor y una presión mecánica. Nuevamente el autor no presenta especificaciones para hacerlo, lo que origina el planteamiento de las siguientes preguntas: ¿Cuál es la secuencia para aplicar adecuadamente la presión mecánica y el calor a la superficie? ¿Cómo deben aplicarse la presión mecánica y el calor a la superficie?

c) *La etapa de enfriamiento*. En este tercer y último punto que Balkan et al. [3] plantea corresponde al enfriamiento del sello. El autor no ofrece elementos para justificar la existencia de este paso y nuevamente no presenta una especificación para llevarlo a cabo, argumentos que originan la siguiente pregunta: ¿Qué sucede con el sello cuando se enfría de manera forzada el sellado de termoplásticos?

Por otro lado Hishinuma [1] plantea que el proceso de sellado de materiales termoplásticos involucra:

- a) Calentamiento
- b) Derretimiento
- c) Aplicación de una presión mecánica superficie contra superficie
- d) Enfriamiento
- e) Obtención de dos tipos de sellado el sellado de “unión de interfase” y el sellado de “tear sealing” en función del control de la temperatura de la superficie del material termoplástico.

Como puede observarse los pasos y la secuencia del proceso de sellado de materiales termoplásticos propuesto por Hishinuma [1] son generales y cabe señalar que para el desarrollo de sus experimentos Hishinuma calienta sus muestras con placa caliente que representa “calentamiento por contacto”, lo que implica trabajar con la variante del proceso de sellado mostrada en la figura 2. Esta variante en el proceso de sellado se presenta cuando durante un mismo intervalo de tiempo se aplica una presión mecánica, se calienta, se derrite y finalmente se sella el material termoplástico.

Tomando en cuenta los métodos de calentamiento reportados por Balkan et al., [3], Hishinuma [1] y los Investigadores del CDMIT [32] se puede observar que dependiendo del método de calentamiento de la muestra (contacto, radiación, convección) el proceso de sellado de materiales termoplásticos ofrece variantes en la secuencia de los pasos, razón por la cuál es importante definir el tipo de calentamiento que se desea utilizar para precisar la secuencia correspondiente de pasos del proceso de sellado de ampollitas de PVC.

El énfasis de investigaciones recientes sugieren que el adecuado control de los siguientes parámetros del proceso de sellado de polímeros termoplásticos son los responsables de la resistencia y hermeticidad del sellado, así como lo confirman Hishinuma [1], Jarus [10] y Lilian y Fritz [22]:

- a) La temperatura de sellado (T), parámetro que corresponde al paso 2 del proceso de sellado mostrado en la figura 1.
- b) El período de tiempo de exposición al calor (t), parámetro que corresponde al paso 3 del proceso de sellado mostrado en la figura 1.
- c) La aplicación de presión mecánica (P), parámetro que corresponde al paso 4 del proceso de sellado mostrado en la figura 1.

A través de la recapitulación de la descripción de Balkan et al., [3], Hishinuma [1] y Tadmor y Gogos [5] para sellar materiales termoplásticos con calor se establecen las etapas del proceso de sellado de ampollitas de PVC con el fin de obtener un sellado de una ampollita de PVC resistente y hermético.

3.1. Preparación de la Ampolleta para Sellado con Calor

El primer paso en el proceso de sellado de un material termoplástico con calor corresponde a la limpieza de la superficie del material conforme al paso 1 de la secuencia del proceso de sellado de materiales termoplásticos como se muestra en la figura 1.

Del total de autores revisados para la presente investigación únicamente se detectaron 2 autores que hablan de la importancia de la preparación de la superficie, los autores son Hishinuma [1] y Kamweld Technologies [2]. La preparación de la superficie del material consiste básicamente en presentar una superficie de contacto limpia y seca, es decir libre de partículas ya sean líquidas, sólidas y/o gaseosas.

Hishinuma [1], es uno de los autores que está interesado en conocer las implicaciones de mantener una superficie seca y advierte sobre las consecuencias que tienen los elementos volátiles que se originan a partir de:

- a) Líquidos contenidos en los empaques.
- b) Monómeros no-polimerizados del material termoplástico.
- c) Humedad absorbida del ambiente.

Para tener una idea clara de las implicaciones de estos elementos que se volatizan cuando son calentados, Hishinuma [1] antes de unir las superficies a sellar, colocó en medio de ellas una hoja húmeda de papel y midió la temperatura, el tiempo y la presión para cada sello realizado con la hoja húmeda colocada en la interfase del sello. Las consecuencias involucradas que Hishinuma encontró son:

- a) La temperatura de la superficie del material termoplástico se mantiene a la temperatura de presión de vapor hasta que las partículas de vapor son expulsados a los alrededores del material termoplástico.
- b) Los elementos atrapados se reflejarán en forma de burbujas en el sello.
- c) El tiempo de calentamiento que toma obtener la temperatura de sellado es mayor que en una muestra limpia y seca.
- d) El incremento de la temperatura varía en función de la presión mecánica aplicada.

Los resultados de Hishinuma [1] pueden observarse en la figura 5. El valor de la presión en la figura es la presión de vapor de la temperatura cuyo incremento fue retrasado.

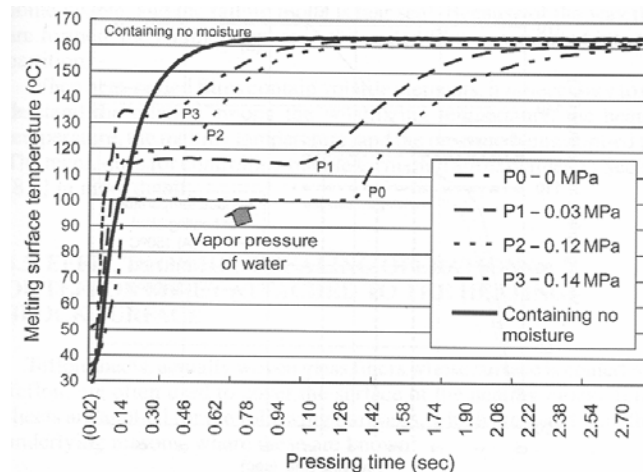


Figura 5. Incremento de la Temperatura en la Superficie Derretida con Componentes Volátiles sobre la Misma, Tomado de Hishinuma [1].

A nivel planta industrial se cuenta con la experiencia de Kamweld Technologies [2], cuya práctica común de preparación de la muestra a ser sellada es liberar la superficie de la muestra de humedad y aceite.

Para el caso de la preparación de ampollitas termoplásticas de PVC para su sellado por calor el autor realizó pruebas de laboratorio empleando calentamiento por radiación y convección. La boquilla de la ampollita se expuso durante 2 segundos tanto a una resistencia eléctrica de 3000W con temperatura de 500°C, como a un flujo de aire caliente con temperatura de 400°C, ambas fuentes de calor se colocaron a una distancia de 5mm por encima de la boquilla de la ampollita. Las observaciones realizadas fueron las siguientes:

- a) “Radiación” (calentamiento mediante resistencias). Es un sistema de calentamiento que promueve que la boquilla de la ampollita se encuentre libre de partículas líquidas, pero es necesario evitar por otros medios las partículas sólidas y gaseosas.
- b) “Convección” (calentamiento mediante un flujo dirigido de aire caliente). Es un sistema de calentamiento que promueve que la boquilla de la ampollita se encuentre libre de partículas líquidas y gaseosas, pero es necesario evitar por otros medios las partículas sólidas.

En lo que respecta a la discusión de la importancia de iniciar un proceso de sellado con calor contando con una superficie libre de partículas puede señalarse que las implicaciones son tan importantes así como contar con un sello resistente y hermético o erróneo. Hishinuma [1] advierte implicaciones acerca de los elementos volátiles en el material termoplástico a sellarse, las califica de muy importantes para los procesos de sellado con materiales termoplásticos, éstas implicaciones exhortan a tener la superficie libre de elementos volátiles y que el

material se encuentre en un ambiente libre de humedad, de lo contrario el sellado será incorrecto.

Como puede advertirse existen muchas áreas de oportunidad de trabajo de investigación respecto a las implicaciones de la presencia de partículas sólidas, líquidas o gaseosas en la superficie del material que será sellado. No obstante existen reglas prácticas para la preparación del material para el sellado de materiales termoplásticos:

- a) Limpiar la superficie de polvo.
- b) Secar la superficie.
- c) Evitar grasas en la superficie.

Es posible sintetizar el paso de *preparación del material para sellado con calor* en los siguientes tres puntos:

- a) Para lograr un sellado resistente y hermético es necesario liberar la superficie de sellado de partículas sólidas, líquidas y gaseosas.
- b) Es habitual la liberación de partículas sólidas, líquidas y gaseosas de la superficie del material para el proceso de sellado.
- c) Existen muchas áreas de oportunidad de trabajo de investigación respecto a las implicaciones de la presencia de partículas sólidas, líquidas o gaseosas en la superficie del material que será sellado.

Es muy importante que la superficie de la boquilla de la ampollita se encuentre libre de partículas para poder transitar por cada una de las etapas del proceso de sellado de materiales termoplásticos y poder lograr un sellado de una ampollita de PVC resistente y hermético.

3.2. Exposición de la Ampolleta a una Fuente de Calor

Una vez que ya se cuenta con la superficie del material preparada, es decir libre de partículas sólidas, líquidas o gaseosas, el siguiente paso dentro del proceso de sellado con calor (ver figura 1) corresponde a la exposición del material a una fuente de calor, conforme al paso 2 de la secuencia del proceso de sellado de materiales termoplásticos como se muestra en la figura 1.

La exposición de una muestra de material a una fuente de energía origina un incremento en la temperatura de la muestra y el estudio de este cambio de temperatura en el proceso de sellado de materiales termoplásticos es de gran importancia ya que forma parte fundamental del proceso de sellado. El énfasis de la investigación encontrada en la literatura científica está agudamente enfocado en el establecimiento de correlaciones entre la temperatura de sellado (T) y propiedades mecánicas de la muestra, entre los autores que han establecido este tipo de relación en sus respectivos estudios se encuentran: Hishinuma [1], Kitagawa [4], Hitt y Gilbert [6], Merhar [7], Merah [8], Van de Ven y Erdman [9], Jarus et al. [10], Lin y Cheng [11], Weier [12] y Lilian y Fritz [22].

En las décadas de los 60's y 70's se realizaron valiosos esfuerzos por establecer relaciones entre la temperatura del material termoplástico y sus propiedades mecánicas, por ejemplo Kitagawa [4], propuso para el PVC una relación⁵ entre Temperatura (T); y el esfuerzo cortante, el módulo de rigidez y el

⁵ El módulo de Poisson (ν) se consideró constante = 0.27 para [-10°C, -70°C]. El exponente (n) para polímeros amorfos como el PVC = 1.63. El subíndice "0" representa el valor de la variable al tiempo = 0, es decir al inicio del proceso de calentamiento, por ejemplo (τ_0) representa el valor inicial del esfuerzo cortante al inicio del proceso de calentamiento. El esfuerzo normal de fluencia está representado por: " σ_{ys} ". Finalmente, $E(T)$ se determina experimentalmente.

módulo de Young como funciones de la temperatura; $\tau(T)$, $G(T)$ y $E(T)$ respectivamente:

$$\frac{T_0\tau}{T\tau_0} = \left(\frac{T_0G}{TG_0}\right)^n \quad (1)$$

dónde:

$$G(T) = \frac{E(T)}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

así como:

$$\tau(T) = \frac{\sigma_{ys}(T)}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

Durante las décadas de los 80's y 90's se empezaron a correlacionar parámetros de sellado, (principalmente la temperatura de sellado de la muestra) con las propiedades mecánicas de las propias muestras. Como ejemplo Hitt [6], estudioso de los efectos de la temperatura en la unión de PVC, correlacionó la temperatura ambiente con las propiedades mecánicas para una muestra de PVC sellada. Los ensayos que realizó contaron con muestras a temperaturas ambiente en el rango de (23°C a 180°C), encontrando que el esfuerzo de ruptura es inversamente proporcional a la temperatura ambiente de la muestra. En este caso Hitt relaciona el desempeño de la unión (asociado al esfuerzo de ruptura de sus muestras) y las respectivas temperaturas ambiente de prueba de las muestras.

A partir de la década de los 90's la tendencia de correlacionar las propiedades del sellado como son la temperatura de sellado (T), el tiempo de exposición a la fuente de calor (t) y la presión mecánica ejercida (P) con las propiedades mecánicas correspondientes se ha mantenido hasta la fecha con el fin de evaluar

la unión lograda entre materiales. Los investigadores se han enfocado en los diversos aspectos que involucra cada experimento, como son la metrología y la experimentación, la elaboración de la muestra y la organización y presentación de los datos recabados.

Merhar [7], correlaciona la resistencia del material (PVC) con la temperatura de elaboración de una muestra sellada producida en una máquina de inyección de plásticos. El procedimiento que siguió para elaborar la muestra sellada consistió en separar el flujo del plástico en el molde mediante una columna o soporte, a sabiendas que dicho flujo se reuniría nuevamente al paso del soporte, formando así un sello en el material. Los valores de los factores experimentales que tomó en consideración se muestran en la tabla 2. Así mismo Merhar encuentra que cuando las temperaturas de moldeo se incrementan, la línea de unión se torna frágil⁶ y atribuye éste efecto a dos fenómenos, tanto una variación en la cristalización en la línea de unión, así como enlazamiento cruzado debido a la degradación. Los resultados de sus pruebas muestran un incremento de la resistencia de la muestra (tanto sellada como no sellada) que está en función del incremento de la temperatura de moldeo y afirma que los investigadores del área coinciden en que un incremento en la temperatura de moldeo causa un incremento en la resistencia de la muestra debido a un mayor tiempo de relajamiento y en congruencia con los resultados de sus experimentos y las afirmaciones de los investigadores del área, Merhar, plantea que la temperatura de moldeo es el factor más importante que afecta la resistencia de la línea de sellado, siendo esta una de las afirmaciones

⁶ Merhar [7] evalúa la fragilidad y ductilidad en función de la nitidez del punto de ruptura del diagrama esfuerzo-deformación de las muestras ensayadas.

más relevantes de su trabajo. Los datos experimentales que Merhar [7] reporta se presentan en la figura 6, que presenta dos gráficas que relacionan la resistencia (esfuerzo) con los factores estudiados para muestras selladas y no selladas.

Tabla 2. Valores de los factores experimentales de Merhar [7].

	Low	Mid	High
Melt Temperature	384° F	397° F	410° F
Mold Temperature	70° F	100° F	130° F
Injection Rate	0.63 in ³ /s	1.26 in ³ /s	1.89 in ³ /s
Hold Pressure	2000 psi	4000 psi	6000 psi
Flow Distance	1.5 in.	3.0 in.	4.5 in.
Wall Thickness	.100 in.		.160 in.

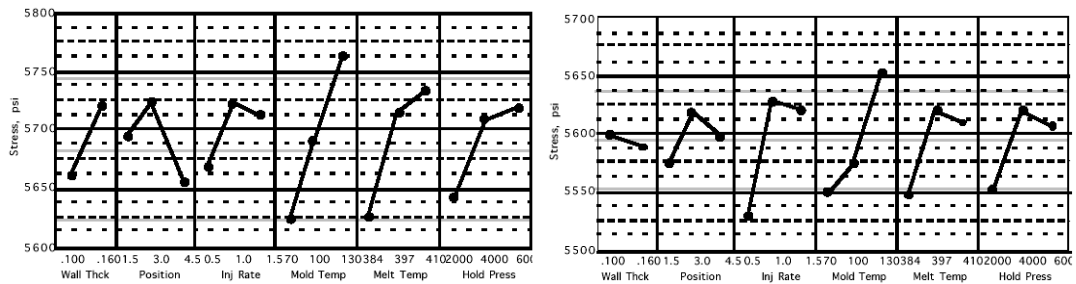


Figura 6. Gráficas que Relacionan la Resistencia (Esfuerzo de Cedencia) con los Factores Estudiados para Muestras no Selladas (Izquierda) y para Muestras Selladas (Derecha), Tomado de Merhar [7].

Merah [8] con el fin de reducir la influencia que tienen en el CPVC las condiciones ambientales estudió las propiedades mecánicas del CPVC, mismas que obtuvo a través de pruebas de tracción a diferentes muestras. Merah [8] estudió el CPVC que es PVC-clorado⁷. Sus pruebas fueron de tipo aleatorio y las realizó a diferentes temperaturas ambiente: -10°C, 0°C, 23°C, 50°C y 70°C. Los resultados de la investigación de Merah se presentan en las gráficas de la figura 7, dichas gráficas manifiestan que la resistencia de la muestra, se encuentre o no

⁷ Provoca un aumento en la temperatura de transición vítrea, T_g .

sellada, es inversamente proporcional a la temperatura ambiente de prueba de la muestra.

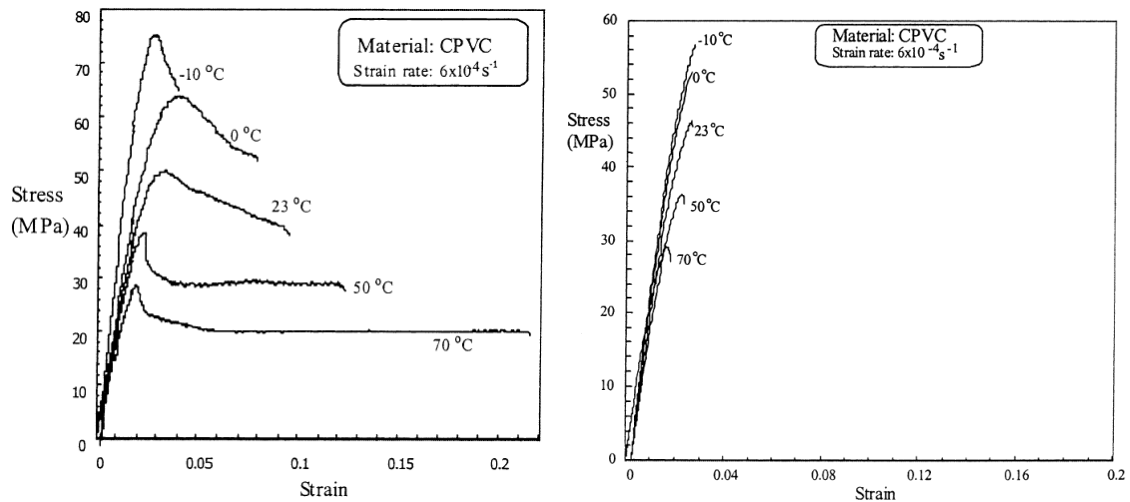


Figura 7. Curvas Representativas de Esfuerzo-Deformación para Muestras no Selladas (Izquierda) y para Muestras Selladas (Derecha) a Diferentes Temperaturas Ambiente, Tomado de Merah, [8].

Entre los autores que han estudiado con detalle el parámetro de la temperatura de los materiales termoplásticos en etapas previas al sellado del mismo y que además han expuesto su trabajo de manera ordenada y clara son Tadmor y Gogos [5] que al respecto afirman lo siguiente: “Se define el proceso de traer a un polímero a una forma común desde la temperatura de alimentación al rango de temperatura de procesamiento deseado, apreciablemente superior a la temperatura de transición vítrea, T_g , para polímeros amorfos y superior al punto de derretimiento para polímeros semicristalinos como el paso elemental del derretimiento”⁸. Tadmor y Gogos [5] afirman que el derretimiento en el procesamiento de polímeros es un paso elemental, con frecuencia es un paso de control de una razón, como lo son la conductividad térmica, los gradientes de temperatura y el área de contacto disponible entre la fuente de calor y el polímero

⁸ Tadmor y Gogos [5], pp. 179.

derritiéndose. Este paso consume entre el 70 y 80% del total de la energía del procesamiento y determina la calidad del producto relacionada a homogeneidad y estabilidad. También afirman que la baja conductividad térmica de los polímeros como lo es el caso del PVC y su sensibilidad a la temperatura los convierte en sujetos a degradación térmica y limita los gradientes de temperatura para procesamiento.

Tadmor y Gogos [5] muestran en la gráfica de la figura 8 la energía requerida para elevar la temperatura de cada polímero y se puede observar que el PVC es el polímero del conjunto presentado en la gráfica que menor energía requiere para elevar su temperatura, razón por la que podría presentarse como un buen candidato de selección, sin embargo entran además otros factores como el complejo control de la temperatura para sellarlo y a la vez evitar su temperatura de degradación o los efectos pulmonares que produce la utilización de PVC, misma que implica un alto factor de riesgo de cáncer pulmonar así como lo afirma Lilis [17].

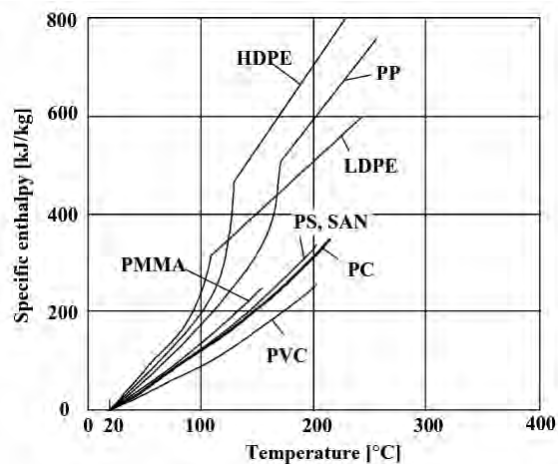


Figura 8. Curvas de Entalpia Específica para Polímeros Comunes, de Tadmor y Gogos [5].

Tadmor y Gogos [5] presentan dos mecanismos de calentamiento-derretimiento debido a que el gradiente de temperatura en la pared que determina el flujo de calor hacia aquellas zonas del sólido que permanecen aún sin derretirse cae exponencialmente con el tiempo, dicho mecanismo es mostrado en la figura 9. El primero consiste en inducir mediante arrastre la remoción de material derretido y el segundo consiste en inducir mediante presión mecánica la remoción de material derretido para lograr un calentamiento uniforme en aquellas zonas del sólido que permanecen aún sin derretirse.

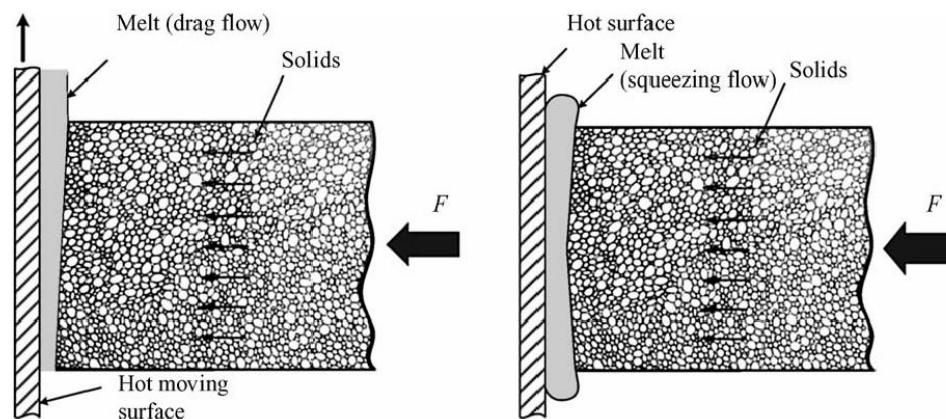


Figura 9. Representación Esquemática de Remoción de Material Derretido Mediante Mecanismos de Inducción por Arrastre e Inducción por Presión Mecánica, de Tadmor y Gogos [5].

Hishinuma [1] afirma que los tres elementos convencionales en la metodología de sellado por calor son: la temperatura de la superficie de derretimiento, el tiempo de exposición a la fuente de calor y la presión mecánica. Se supone que el sellado por calor controla la creación de fuerzas de unión intermoleculares y el principal factor de las operaciones de sellado por calor es la temperatura de la superficie de derretimiento. En la figura 10 se muestra la respuesta de la temperatura de la superficie derriéndose para la operación básica de sellado por calor en un

sistema de placa caliente. La figura 10 muestra claramente que existe un intervalo de temperatura indicado para un sellado adecuado y que es necesario aplicar la presión mecánica para sellado del material justo en el momento que la muestra alcanza una temperatura perteneciente a dicho intervalo.

Hishinuma [1] plantea que actualmente lo que se controla es la temperatura de la placa de calentamiento (para el caso de sellado con placa caliente) en vez de controlar la temperatura en la superficie del material, razón por la que desarrolla una metodología para medir la temperatura de la superficie en derretimiento y poder controlar de una manera muy precisa la temperatura de superficie de la muestra, para ello desarrolló un sistema de procesamiento de señales de alta velocidad y alta sensibilidad. La información que recopila es relativa a la temperatura de la superficie en derretimiento y recopila 200 datos puntuales en cada medición de un experimento y finalmente visualiza la información de manera gráfica. Hishinuma [1] menciona cuatro condiciones cruciales para una adhesión correcta con calor:

- a) La temperatura de derretimiento de la superficie.
- b) Confirmar que la superficie de derretimiento alcanza la temperatura requerida para sellado.
- c) El tiempo que le toma a la superficie de derretimiento para alcanzar la temperatura de sellado requerida.
- d) Ser capaz de limitar la temperatura, de modo que se mantenga menor a la temperatura de degradación térmica.

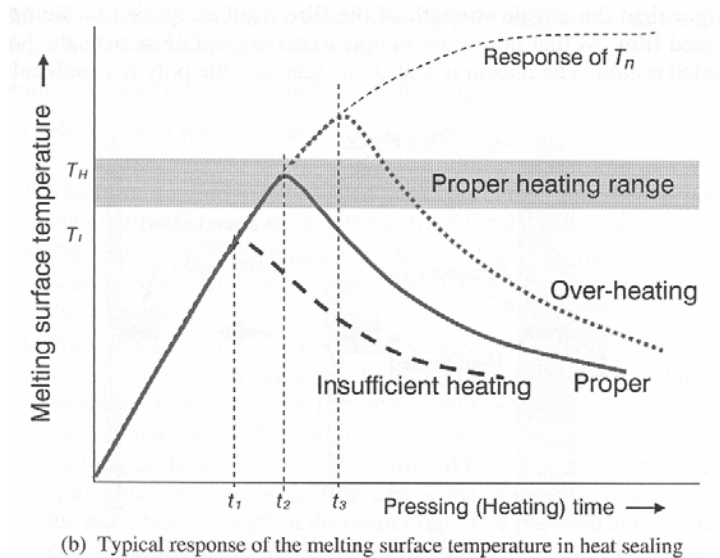


Figura 10. Respuesta de la Temperatura de la Superficie Derritiéndose para la Operación Básica de Sellado por Calor en un Sistema de Placa Caliente, Tomado de Hishinuma [1].

Hishinuma [1] critica los estándares Japonés (JIS) y Americano (ASTM) para prueba de materiales afirmando de que a pesar de que el sellado por calor se lleva a cabo controlando un fenómeno termofísico, la temperatura de sellado no es un parámetro para la evaluación del procedimiento y que están basados en experimentos que aportan resultados macroscópicos para capas selladas con calor que son relativamente anchas.

Lilian [22] estudió el efecto de la temperatura en láminas mayores a 25 micrómetros que sirven de sello para blísteres de la industria farmacéutica que están compuestas de aluminio, PVC y Nylon. Dichas láminas son impermeables excepto en la zona de sellado por calor y forman una barrera ultra alta contra la humedad. Las pruebas de tracción desarrolladas por el autor fueron para tres grupos de control a 150°C, 170°C y 190°C, los sellados óptimos tuvieron lugar para 150°C y 170°C, concluyendo que un exceso o merma de calor producirán un

sello erróneo y que el incremento en la resistencia del sello está relacionado directamente con el aumento de la temperatura.

Repasando brevemente a los autores más significativos sobre este tema (2.2) se tiene:

Hitt [6], que ha ensayado las propiedades del PVC probando muestras a temperaturas ambiente en el rango de (23°C a 180°C) no ofrece respuestas para esta investigación debido a que la temperatura de trabajo del sello de la ampollita es a temperatura ambiente, es decir 23°C. Solamente nos advierte en el sentido de evitar temperaturas de desempeño mayores a la temperatura ambiente para la ampollita.

Merhar [7], a pesar de que identifica uno de los factores más importantes para el sellado de PVC como es la temperatura de moldeo, no presenta evidencia sobre sus afirmaciones de fragilidad-ductilidad, además de que su manejo de las temperaturas de moldeo y de derretimiento para preparar sus muestras no es claro y da pie para el planteamiento de la siguiente pregunta: ¿Cuál es la temperatura óptima para obtener la mejor resistencia en la línea de sellado?

Merah [8], que también realizó pruebas mecánicas a muestras para reducir la influencia que tienen en el PVC las condiciones ambientales obtuvo resultados análogos a los de Hitt y Gilbert [6] y no ofrecen respuestas para esta investigación, sin embargo dan pie al siguiente cuestionamiento: ¿Existen además de la temperatura otros factores que en conjunto determinen el desempeño de la unión del PVC?

Tadmor y Gogos [5], ofrecen información más detallada sobre el cambio de la temperatura de materiales termoplásticos debido a la exposición al calor:

- a) Establece rangos de temperatura de calentamiento generales de acuerdo con el tipo de polímero a procesar ya sea éste semicristalino o amorfo.
- b) Presenta elementos importantes para el derretimiento en el procesamiento de polímeros como lo son la conductividad térmica, los gradientes de temperatura y el área de contacto disponible entre la fuente de calor y el sólido derriéndose.
- c) Presenta el porcentaje de consumo de energía del proceso y para el caso del PVC menciona que debido a su baja conductividad térmica es sujeto a degradación térmica.

Sin embargo partiendo del análisis de las afirmaciones de Tadmor y Gogos [5] y teniendo presente la obtención de un sellado de ampollitas resistente y hermético, se originan las siguientes preguntas:

- a) ¿Cuál es el rango de temperatura de calentamiento para el sellado de una ampollita de PVC con calidad óptima?
- b) ¿De qué manera influye el tipo de calentamiento en el sellado de ampollitas?
- c) ¿Es posible lograr un sellado de ampollitas de calidad a pesar de la baja conductividad térmica del PVC y su sensibilidad a la temperatura?

Ante tales preguntas Tadmor y Gogos [5] no presentan una respuesta adecuada y precisa, más bien ofrece planteamientos abiertos y generales.

Hishinuma [1] elabora la totalidad de sus muestras con películas de plástico roladas que después de calentarse a la temperatura de derretimiento tienden a regresar al volumen previo a la laminación encogiéndose, mientras que las ampollitas están elaboradas mediante aire soplado que después de calentarse a la temperatura de derretimiento no se encogen. Además sus muestras son elaboradas con la variante del proceso de sellado de ampollitas de PVC, es decir son calentadas con placa caliente que es un método de calentamiento que aplica de manera parcial para el sellado de ampollitas, ya que al sellar ampollitas con placa caliente se obtiene un sello del tipo “unión de la interfase” o “peel sealing” que no es deseable para el contenido de las ampollitas ya que se encuentran expuestas a presiones de manejo externas que pueden causar fuga. Sin embargo Hishinuma [1] es uno de los autores más avanzados en el tema del sellado con calor de materiales termoplásticos, el alcance, la creatividad, el desarrollo y la innovación de su investigación en el tema son significativos. Hishinuma [1] deja claro su enfoque respecto al tema, que está basado en la medición y control de la temperatura en la superficie de derretimiento del material termoplástico y plantea dicha temperatura como el parámetro de sellado más relevante del proceso de calentamiento con calor. El trabajo de investigación de Hishinuma [1] enriquece sobremedida la presente investigación, permitiendo conocer nuevos experimentos y enfoques.

Resumiendo el material presentado y discutido en la presente sección (3.2), es posible afirmar:

- a) Se han correlacionado las propiedades mecánicas del sello de PVC con las condiciones de temperatura ambientales y la temperatura de sellado de la muestra de PVC.
- b) Se han planteado rangos generales de temperatura para el moldeo, el derretimiento y la degradación de materiales termoplásticos.
- c) Los resultados de los diferentes autores representan un conjunto general de referencia, sin embargo para el presente caso de estudio falta determinar el rango de temperatura para obtener un sellado de ampollitas de PVC resistente y hermético.

Las contribuciones de los autores que comprenden la revisión bibliográfica de la presente investigación fueron fundamentales para establecer el marco de referencia para investigar la temperatura de la boquilla de la ampollita (T) adecuada para obtener un sellado de una ampollita de PVC resistente y hermético.

3.3. Tiempo de Exposición de la Ampollita a una Fuente de Calor

Ya que se cuenta con la superficie del material expuesta a una fuente de calor, el siguiente paso dentro del proceso de sellado con calor (ver figura 1) corresponde a la exposición de la superficie del material durante un tiempo determinado a dicha fuente de calor, conforme al paso 3 de la secuencia del proceso de sellado de materiales termoplásticos como se muestra en la figura 1. Este paso es el responsable de mantener el efecto de exposición del material a

una fuente de calor, dicho efecto es un incremento en la temperatura del material. Partiendo de la búsqueda bibliográfica realizada se encontró lo siguiente:

Van de Ven y Erdman [9], reportan el desarrollo de un banco de pruebas (ver figura 11) para establecer una relación entre la temperatura de sellado y la resistencia de sellado de láminas de PVC (con un espesor de 0.102 mm) selladas mediante una punta caliente, afirmando que un enfoque experimental fue requerido debido al complejo comportamiento de derretimiento del PVC. Ellos utilizaron un modelo numérico transitorio de transferencia de calor para relacionar la temperatura de la punta caliente utilizada en el experimento con la temperatura de la interfase de sellado después de un segundo de contacto. Van de Ven y Erdman [9] exploraron la presión mecánica en el rango de 0.11-1.84 MPa para el rango de temperatura de la punta caliente de 167-307°C y calcularon con su modelo numérico transitorio el rango de temperatura de 134-242°C correspondiente a la interfase de sellado.

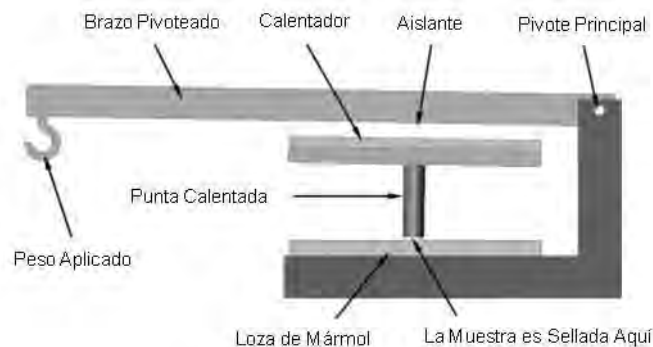


Figura 11, Banco de Pruebas Sellador de Láminas de PVC, de Van de Ven y Erdman [9]

Hishinuma [1], reporta un incremento de temperatura para una película de muestra de 77 μm de Al-deposited CPP/OPP (Cast-Polypropylene/Oriented-

Polypropylene) desde 30°C hasta 130°C utilizando un sistema de placa caliente a 140°C, los resultados obtenidos por Hishinuma se muestran en la figura 12.

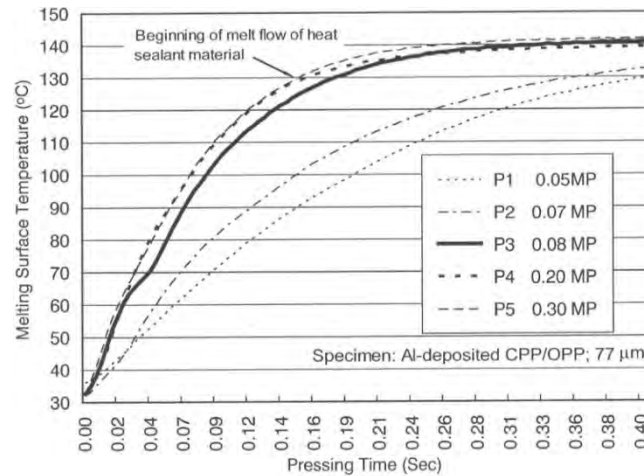


Figura 12, Velocidad de Calentamiento de la Superficie de Derretimiento Relacionada con la Presión Mecánica, Tomado de Hishinuma [1]

Hishinuma [1] explora la relación entre la presión mecánica y la temperatura de la superficie de derretimiento, encontrando que la velocidad de calentamiento de la superficie de derretimiento desde 30°C hasta 130°C pertenece al rango del período de tiempo de 0.4-0.15 segundos correspondiente al rango de presión de 0.05-0.3 MPa. Un dibujo del sistema de placa caliente utilizado por Hishinuma se muestra en la figura 13.

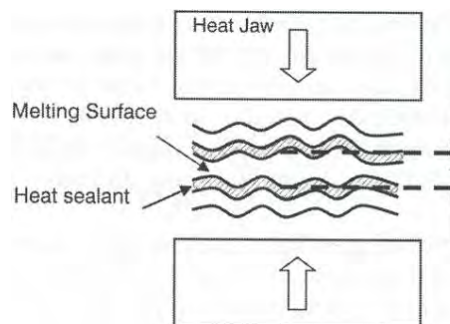


Figura 13, Contacto de las Películas Causado por la Presión Mecánica de la Placa Caliente, Tomado de Hishinuma [1]

Hishinuma [1] habla sobre este paso cuyo parámetro de sellado correspondiente es período de tiempo de exposición a la fuente de calor (t) y esto probablemente porque los demás autores se encuentran mayormente enfocados en la temperatura de sellado del material (T) como se mostró en la sección anterior (2.2).

El período de tiempo de exposición del material termoplástico a una fuente de calor es un parámetro de sellado estrechamente relacionado con la temperatura de sellado del material y la cantidad de materiales sellados producidos (que para la presente investigación representa la producción de ampollitas selladas). Para un proceso continuo ampollita por ampollita, la producción de ampollitas selladas está en función del tiempo requerido para incrementar la temperatura de la ampollita de temperatura ambiente a un rango de temperatura que permita obtener un sellado de ampollita resistente y hermético.

Hishinuma [1] considera el período de tiempo de exposición a la fuente de calor como uno de los tres parámetros convencionales para el sellado de materiales termoplásticos con calor y también considera este parámetro como una de las cuatro condiciones (mencionadas en la sección 2.2) relacionadas con el parámetro de la temperatura de sellado del material para obtener un sellado adecuado con calor de materiales termoplásticos: “El período de tiempo que le toma a la superficie de derretimiento para alcanzar la temperatura de sellado requerida”.

El paso del proceso de sellado correspondiente al período de tiempo de exposición del material termoplástico a una fuente de calor es relevante para esta

investigación ya que el proceso de sellado de ampollitas tiene lugar durante un período de tiempo.

Las aportaciones de Hishinuma [1] y la experimentación preliminar en laboratorio fueron esenciales para establecer el marco de referencia para investigar el período de tiempo de exposición de la ampollita a la fuente de calor para obtener un sellado de una ampollita de PVC resistente y hermético.

Basado en la información bibliográfica recopilada y la experimentación realizada en el CDMIT, el autor afirma que el período de tiempo de exposición de la ampollita a la fuente de calor presenta una estrecha relación con las propiedades del PVC, la fuente de calor y el sello.

3.4. Aplicación de Presión Mecánica a la Ampollita

Una vez que el material termoplástico cuenta con la temperatura de sellado del material (necesaria para lograr un sellado resistente y hermético), el siguiente paso dentro del proceso de sellado con calor (ver figura 1) corresponde a la aplicación de una presión mecánica (P) al material termoplástico, conforme al paso 4 de la secuencia del proceso de sellado de materiales termoplásticos como se muestra en la figura 1.

Los siguientes autores presentan información relevante sobre este tema en particular:

Merhar [7], encontró en las muestras de PVC selladas que para altos valores de presión mecánica se presenta una reducción en la resistencia. El argumento de Merhar al respecto es que dicho comportamiento se debe a que las altas

presiones restringen el movimiento de las cadenas de polímero en la línea de unión inhibiendo la formación cristalina. En contraparte resalta que la presión mecánica y el espesor de pared presentan un comportamiento monótonico con respecto a la resistencia del material para muestras sin sellar.

Hishinuma [1] afirma que la presión mecánica es necesaria para reducir el espacio entre las superficies de las películas del material y obtener unión intermolecular, por lo que plantea “presionarlos juntos” (a los materiales a ser sellados). Hishinuma afirma que: “El rango adecuado de presión mecánica encontrado experimentalmente es de (0.08 - 0.2 MPa) ya que una presión mecánica menor a 0.08 MPa causará una pérdida de conducción térmica, resultando en una adhesión no segura y una presión mecánica mayor a 0.2 MPa forzará al polímero termoplástico derretido fuera de la región de sellado caliente y se creará “poly-ball”⁹. El fenómeno planteado por Hishinuma como poly-ball es del conocimiento industrial y se presenta durante la práctica industrial en inyección de plásticos, aunque generalmente tiene lugar para rangos de valores de presión mecánica mayores a los planteados por Hishinuma. Al hacer estas afirmaciones Hishinuma explica que son valores para un material termoplástico dado y no refiere de manera particular la manera en que midió la presión mecánica. Otra de las afirmaciones importantes que realiza Hishinuma al respecto dice que la carga aplicada a un empaque sellado por calor puede absorberse como energía de “unión de interfase” o energía de “peel sealing”, lo que elimina la necesidad de utilizar “unión cohesiva” o “tear sealing” (para este caso el autor de la presente

⁹ El Poly-Ball lo define Hishinuma [1] como el derramamiento del material en forma de protuberancias o bolas alrededor de la zona de sellado caliente.

Tesis infiere que Hishinuma plantea la utilización de altos valores de presión mecánica a cambio de utilizar valores de temperatura de derretimiento del material menores, aunque Hishinuma no es claro sobre este planteamiento). Cabe resaltar que Lilian y Fritz [22], estudiosos de aplicaciones prácticas del sellado de termoplásticos, al igual que Hishinuma [1] estiman que un exceso de presión mecánica causará un derramamiento de material y por consiguiente un sellado defectuoso.

Van de Ven y Erdman [9] sellaron láminas de PVC utilizando una punta caliente, tal como se mencionó en la sección 3.3, fijando el período de tiempo de exposición de las láminas de PVC a la punta caliente en 1 segundo y variando la temperatura de sellado del material y la presión mecánica. El rango de exploración calculado para la temperatura de la interfase de sellado fue de 134 - 242°C, mientras que el rango de exploración para la presión mecánica fue de 0.11 - 1.84 MPa. Sus muestras las evaluaron correlacionando la presión mecánica y la temperatura de la punta caliente con la resistencia mecánica de la muestra sellada y basados en los resultados de su investigación manifiestan que para el rango de exploración que realizaron la presión mecánica no es determinante para un sellado adecuado, considerando así que el parámetro de sellado determinante es la temperatura de la interfase de sellado.

Una vez que se ha mostrado la perspectiva de cada uno de los autores referenciados sobre este tema es posible discutir sus respectivas contribuciones para la presente investigación:

Merhar [7] establece una relación entre la presión mecánica y la resistencia mecánica de las muestras selladas con dicha presión mecánica y se da cuenta de que el comportamiento del material a altas presiones no corresponde a sus expectativas de crecimiento monotónico, ya que obtiene una disminución en la resistencia de la muestra sellada. Dicha afirmación ofrece una respuesta para la siguiente pregunta: ¿qué sucede con altos valores de presión mecánica? Altos valores de presión mecánica no permiten un sellado adecuado del material, (presión de inyección mayor a 27.57 MPa). Esta respuesta da luz en el sentido de que las altas presiones no son recomendables para sellar la boquilla de la ampollita, razonamiento que da pie para preguntar: ¿cuál será el rango superior de presión mecánica para sellar una ampollita de PVC? Pese a las respuestas proporcionadas, Merhar [7] no reporta valores recomendados bajos de presión mecánica para obtener un sellado adecuado.

Hishinuma [1] plantea también presionar juntos los materiales a sellar y plantea un rango de valores de presión mecánica que va de 0.05 a 0.3MPa para el sellado de películas de materiales termoplásticos con calor, sin embargo su descripción es ambigua en el sentido de que no menciona:

- a) El mecanismo de aplicación de la presión mecánica y cuáles son sus implicaciones.
- b) En qué material termoplástico específicamente desarrollo sus experimentos.

Con respecto a esta investigación, las diferencias radican en el tipo de calentamiento utilizado por Hishinuma [1], que es de placa caliente y en el tipo de muestra que utiliza, que es de un espesor inferior al espesor de la boquilla de la

ampolleta. No obstante, las aportaciones de Hishinuma representan una importante referencia y permite ver la posibilidad de que para calentamiento con placa caliente existe un límite mínimo de presión mecánica en el cual el material no tiene la capacidad de unirse y un límite máximo de presión mecánica en el cuál existe el peligro de derramamiento de material.

La afirmación de Van de Ven y Erdman [9] con respecto al pobre efecto de la presión mecánica en el sellado de placas de PVC da pie para plantear el siguiente cuestionamiento: ¿cuál será el efecto del parámetro presión mecánica para el sellado de ampollitas?

Las aportaciones de los diversos autores citados fueron fundamentales para establecer el marco de referencia para investigar la presión mecánica adecuada para obtener un sellado de una ampolleta de PVC resistente y hermético.

3.5. Enfriamiento del Sello de la Ampolleta

Una vez que el material termoplástico se encuentra a la temperatura de sellado y recibió la aplicación de una presión mecánica, el material termoplástico ya se encuentra sellado. Por lo tanto el siguiente paso dentro del proceso de sellado con calor (ver figura 1) corresponde al enfriamiento del sellado, es decir, la disminución de la temperatura del sello a temperatura ambiente con el fin de asegurar un sellado resistente y hermético, conforme al paso 5 de la secuencia del proceso de sellado de materiales termoplásticos como se muestra en la figura 1.

Nuevamente Hishinuma [1] realiza aportaciones importantes respecto a este tema y comenta que existen problemas de unión de la interfase o “peeling” en la

superficie de sellado cuando una fuerza externa es aplicada al material sellado antes de que la superficie de sellado solidifique completamente, esto es, debido a que la temperatura sobre la superficie derretida no es enfriada inmediatamente aún cuando el proceso de calentamiento terminó, es un fenómeno conocido como “meter caliente” o “hot tuck”. Este fenómeno se presenta de manera natural durante un período de tiempo posterior a la aplicación de presión mecánica al material termoplástico, este período de tiempo corresponde al período de tiempo que requiere el material para descender a una temperatura de recristalización. Cuando el material termoplástico es enfriado de manera forzada, la velocidad de enfriamiento puede disminuir hasta alcanzar valores similares a la velocidad de calentamiento. En la figura 14 se presentan los resultados de Hishinuma [1] respecto a las mediciones de las temperaturas de enfriamiento del sello de diferentes muestras, los resultados obtenidos son presentados en forma de curvas que representan la temperatura de enfriamiento natural o forzado¹⁰ como función del tiempo. El análisis de dicha figura plantea que el tiempo de enfriamiento natural para alcanzar la temperatura de recristalización es aproximadamente de 2.25 veces el tiempo de enfriamiento forzado necesario para alcanzar la misma temperatura y por lo tanto de mayor conveniencia que un enfriamiento natural.

Debido al fenómeno de “hot tuck”¹¹ que limita el manejo de los productos inmediatamente al sellado del mismo Hishinuma [1] recomienda:

- a) Colocar un sistema de enfriamiento después del sellado del material.

¹⁰ La curva continua corresponde al enfriamiento forzado y la curva punteada al enfriamiento natural.

¹¹ Los materiales con alto valor de viscosidad en fase de derretimiento responden de mejor manera al efecto “hot tuck”.

- b) Controlar la temperatura de calentamiento de la superficie del material hasta un valor limítrofe con la temperatura de derretimiento para evitar que el material se licue.
- c) Utilizar posteriormente a la placa caliente¹² una placa a temperatura ambiente para enfriar de manera forzada o inducida el material sellado. Este método de enfriamiento forzado proporciona un mejor acabado y ofrece la posibilidad de recomponer un sello imperfecto debido a esfuerzos de distorsión.

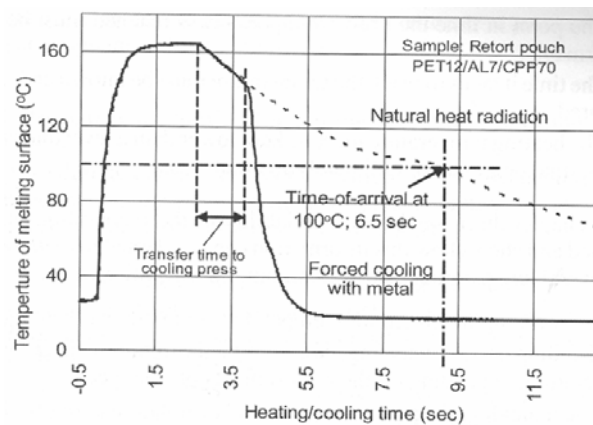


Figura 14. Comparación de Velocidad de Enfriamiento entre el Enfriamiento Forzado y Enfriamiento Natural de la Muestra Sellada, Tomado de Hishinuma [1].

El trabajo de investigación de Hishinuma [1] ofrece un valioso marco de referencia para comprender la importancia del enfriamiento (de manera natural o forzada) del sellado de una ampollita de PVC a temperatura ambiente con el fin de asegurar un sellado resistente y hermético.

La aplicación de presión mecánica en la boquilla de la ampollita además de tener el propósito de unir el material para producir el sello de la ampollita tiene el propósito de conformar o dar la forma final a la boquilla de la ampollita. En este

¹² El método de calentamiento de Hishinuma [1] es la placa caliente.

sentido la aplicación de presión mecánica es semejante al proceso de termoformado.

3.6. Verificación del Sello de la Ampolleta

Para esta etapa del proceso de sellado el material ya transitó por una secuencia de pasos en los que la temperatura del material termoplástico se incrementó hasta que adquirió la temperatura de sellado, posteriormente recibió la aplicación de una presión mecánica y ya encontrándose en ese instante sellado dicho sello fue enfriado, disminuyendo así su temperatura hasta la temperatura ambiente. El paso posterior concierne a la verificación del sellado realizado conforme al paso 6 de la secuencia del proceso de sellado de materiales termoplásticos como se muestra en la figura 1 con el fin de validar si el sellado obtenido es resistente y hermético.

La verificación del sellado de materiales termoplásticos con calor consiste en llevar a cabo una revisión de la unión desarrollada en el material con el propósito de comprobar la integridad hermética y la resistencia del sellado y con el objeto de conocer el estado del arte al respecto se realizó una investigación bibliográfica que comprendió a diferentes autores que hablan de la importancia de la verificación del sellado y de diversas aplicaciones a nivel científico e industrial, ente estos autores encontramos a Hishinuma [1], Kamweld Technologies [2], Jarus [10], Lin y Cheng [11], Dodin [13], Leighton et al. [14], Rohe [18] y Lilian y Fritz [22].

Entre los autores que han verificado la unión del material a través del grado de plastificación encontrado en inspecciones microscópicas del sellado de las

muestras se encuentran Jarus [10], Dodin [13] y Leighton [14]. A continuación se describirán con detalle diversos trabajos sobre verificación de la unión del material.

Jarus [10] se basó en pruebas de fractografía para verificar el sellado de materiales termoplásticos. Utilizó un microscopio electrónico, para verificar el sellado en mezclas 30/70 de policloruro de vinilo/polietileno de alta densidad, (PVC/HDPE)¹³. Imágenes de una fractura de sellado al microscopio obtenidas por Jarus son mostradas en la figura 15, mientras que en la figura 16 se muestra una representación esquemática de la deformación de la superficie del material (PVC/HDPE) en la iniciación de una fractura típica según Jarus.

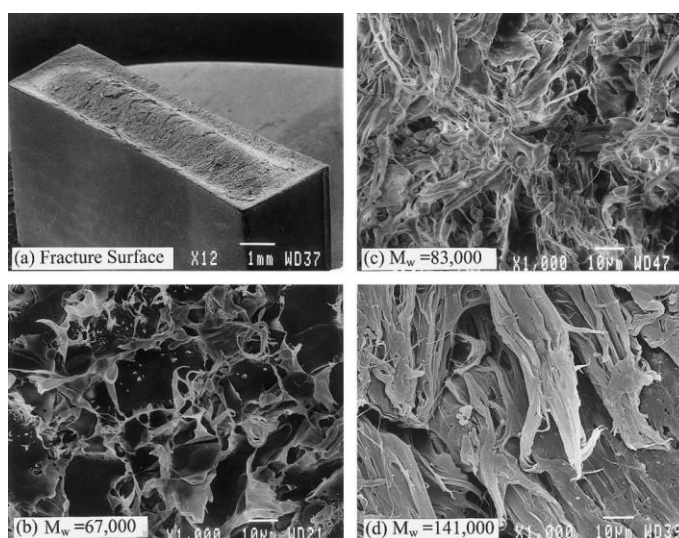


Figura 15. Superficie de Fractura Típica para una Mezcla 30/70 de PVC/HDPE con PVC de Peso Molecular Bajo Mostrando la Depresión Iniciada y las Magnificaciones del Sitio de Iniciación para (b) PVC de Peso Molecular 67,000; (c) PVC de Peso Molecular 83,000 y (d) PVC de Peso Molecular 141,000, Tomado de Jarus [10].

¹³ Jarus y su equipo de investigación pertenecen al Departamento de Ciencia Macromolecular y Centro para la Investigación Aplicada de Polímeros de la Case Western Reserve University.

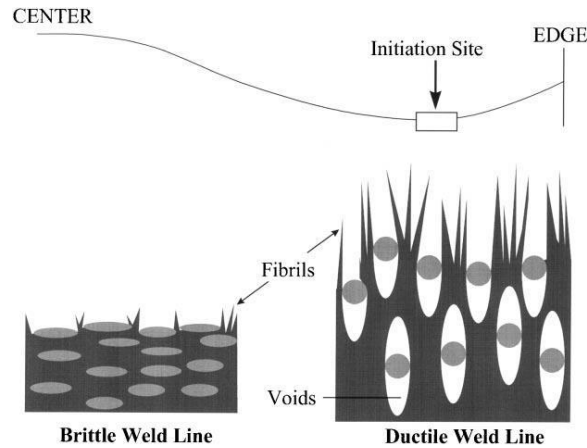


Figura 16. Representación Esquemática de la Deformación de la Superficie en la Iniciación de la Fractura Típica para una Mezcla 30/70 de PVC/HDPE con PVC de Peso Molecular Bajo (Débil) y PVC de Peso Molecular Alto (Fuerte), Tomado de Jarus [10].

Rohe [18] es un investigador que desarrolla proyectos de protección al medio ambiente y utilizó geomembranas de PVC para cubrir el suelo de un repositorio de aguas contaminadas. Con el fin de verificar el sellado de la costura de las geomembranas de PVC (cuyo sellado es de tipo “peeling”) utilizó canales de aire. Rohe consideró el efecto de la temperatura ambiente en la resistencia del sellado de la costura de las geomembranas de PVC a una presión de reventamiento del sellado de la costura. Para establecer los parámetros variables de sellado estableció tres diferentes temperaturas de sellado con tres diferentes velocidades de sellado y el sellado se desarrollo en materiales a tres diferentes temperaturas ambiente, cabe mencionar que no señala los valores utilizados para estas 27 combinaciones de muestras de sellado.

Hishinuma [1], reporta que la verificación del sello se da de forma empírica correlacionando pruebas mecánicas de los sellos con cambios en la temperatura

de calentamiento, velocidad de procesamiento y observación de los modos de falla y plantea 3 factores involucrados en las fallas del sello:

- a) El acabado sobre la superficie calentada por calor.
- b) Fuentes de esfuerzo para sellado por unión de la interfase o “peeling” y para sellado por unión cohesiva o “tearing”.
- c) Fuentes de concentración de esfuerzo.

Lilian y Fritz [22] plantean que las principales preocupaciones para el sellado de blísteres para la industria farmacéutica son una resistencia física y una integridad hermética del sello y que se asume generalmente que si existe una integridad hermética, el sello es bueno, comentan que en muchas maneras esto es correcto porque si el sello está intacto existirá una barrera al exterior del empaque y menciona que la ruta usual para verificar el sello requiere que la integridad hermética se establezca primero y posteriormente mediante una prueba de tracción cuantificar la resistencia del sello. En la figura 17 se muestra un blíster indicando la colocación de un desecante y la imagen del comportamiento del adhesivo derretido para una muestra sellada a 190°C. Lilian y Fritz mencionan que existen diversos métodos para evaluar el sello:

- a) Ultrasonido no destructivo, con frecuencias que varían desde 5 a 300 MHz, siendo un método que permite detectar defectos con dimensiones de 5 a 10 micrómetros.
- b) Métodos destructivos.
 - a. Dado de vacío.
 - b. Resistencia del sello.

- c. Vapor de amoniaco presurizado.
- c) Prueba de fuga de baño de agua al vacío (basado en el estándar ASTM F2338, Prueba estándar para detección de fugas no destructiva en empaques al vacío).
- d) Espectrómetros de masa calibrados para helio como gas de trazabilidad.
- e) Alto voltaje para identificar defectos de hasta 5 micrómetros.
- f) Secretos industriales que mantiene la industria farmacéutica y no se encuentran publicados en la literatura científica relativa al tema en cuestión.

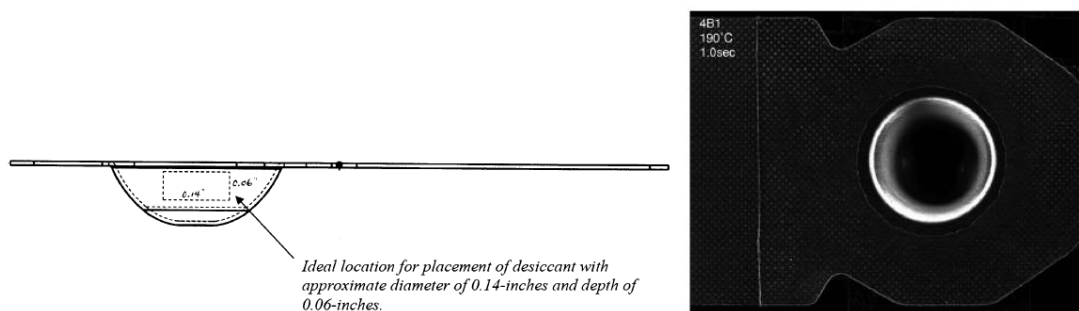


Figura 17. Vista Lateral de un Empaque Blíster Indicando la Colocación de un Desecante e Imagen del Comportamiento del Adhesivo Derretido para una Muestra Sellada a 190°C, Tomado de Lilian y Fritz [22].

Kamweld Technologies [2] comparte su experiencia dentro de las prácticas industriales comunes para la verificación del sellado de materiales termoplásticos por adhesión y clasifica los métodos de verificación del sellado en tres categorías generales:

- a) Métodos destructivos
 - a. Prueba de tracción.
 - b. Prueba de flexión.

b) Métodos no destructivos

a. Inspección visual

- i. Líneas de flujo continuas y uniformes (sellado correcto).
- ii. Líneas de flujo discontinuas y no-uniformes (sellado incorrecto).
- iii. Ángulo de luz oblicuo al ángulo de sellado (detección de burbujas en materiales translucidos).

b. Probador de chispa de alta frecuencia, alto voltaje para detección de poros. Las chispas pasan a través de la fractura/fisura/falla que no es visible mediante inspección visual, sin embargo debe tenerse cuidado de no utilizar un voltaje tal que genere descomposición del material. El valor promedio utilizado industrialmente es de 8000 volts.

c. Radiografía. Es considerado como uno de los métodos más eficientes para detección de fallas de sellado en materiales termoplásticos y también de mayor costo.

c) Métodos químicos.

a. Inmersión de la muestra sellada de PVC en acetona de dos a cuatro horas, los elementos sellados con falla se separarán del material base, mientras que los esfuerzos y las deformaciones se indicarán por hinchazón del material. Este tipo de prueba es de gran aceptación a nivel industrial para determinar si el sellado es satisfactorio o no para un servicio determinado.

- b. Exponer el sellado a un medio de contraste penetrante que se filtre a través del sellado y decolore el sellado en presencia de un sellado inadecuado.

Lin y Cheng [11], han verificado el sellado de termoplásticos por fricción rotatoria mediante el análisis de la fractura de muestras a tensión y establecieron tres diferentes tipos de secciones de acuerdo con la morfología de la fractura:

- a) No-plastificada. Se presenta en la región central de la fractura.
- b) Plastificada. Se presenta en la región periférica de la fractura.
- c) Parcialmente plastificada. Se presenta entre las regiones No-plastificada y Plastificada.

Para complementar la información proporcionada por los diversos autores estudiados cabe mencionar que se realizaron diversas visitas de campo a una empresa mexicana de cosméticos establecida en Querétaro (2007-2010), con el fin de estudiar las prácticas industriales de verificación del sello de las ampollitas. El método de detección de fugas utilizado actualmente a nivel planta industrial está basado en una prueba en la que se someten a vacío a las ampollitas previamente y posteriormente por inspección¹⁴ visual y sensitiva se determina si la ampollita está correctamente sellada o no. La figura 18 muestra el dispositivo utilizado por la empresa de cosméticos para la verificación del sello de las ampollitas de PVC.

¹⁴ Dicha inspección consiste en observar y palpar el sello de la ampollita con el fin de corroborar si la prueba de vacío produjo alguna fuga de fluido contenido en la ampollita.

Información Confidencial
Para mayor información comuníquese al CDMIT
con los Profesores:
Dr. Ramírez Reivich y Dr. López Parra
y/o con el Autor al correo:
gustavo_olivaresmx@yahoo.com.mx

Figura 18. Proceso Industrial de Verificación para el Sellado de Ampolletas de PVC.

Dicho método de detección de fugas representa una medición semi-heurística para comprobar si el sello de la ampollita producido por las máquinas que se encuentran en la línea de producción es correcto. Las ampollitas son introducidas dentro de la cámara de vacío mostrada en la figura 18 por un período de 20 segundos a una presión de vacío que oscila entre -65 y -40 Psi, valores que corresponden a -0.49 y -0.27 MPa, posteriormente se determina si el sello de la ampollita es correcto utilizando los siguientes estándares:

- a) Sellado exitoso. Ocurre cuando el sello de la ampollita se encuentra seco y no contiene fugas.
- b) Sellado fallido, (fuga regular). Ocurre cuando el sello se encuentra mojado, el contenido contiene burbujas y el contenido muestra una significativa reducción en su volumen.
- c) Sellado fallido, (microfuga). Ocurre cuando el sello apenas se percibe húmedo, el contenido contiene burbujas y el contenido es casi el mismo. La problemática de éste tipo de fuga radica en que su detección se debe a la

experiencia y sensibilidad de los operarios para con las ampollitas que han sido probadas en la cámara de vacío.

Basado en el trabajo realizado por los investigadores del CDMIT, el autor afirma que el método de verificación del sellado de las ampollitas es una prueba “pasa, no pasa” y no es confiable. Dicho método ha mostrado una capacidad limitada para detectar y eliminar todo el espectro de fugas que se presentan en el sello de las ampollitas; como lo son las microfugas que son imperceptibles a la vista y tacto humanos.

A modo de discusión sobre el presente tema (3.6) surgen las siguientes inquietudes:

- a) Es relevante el que Hishinuma [1] afirme que la verificación del sello de materiales termoplásticos se da de manera empírica y que únicamente se correlacionen variables físicas del proceso de sellado con la resistencia del sello obtenido, este razonamiento invita a buscar una respuesta a las siguientes preguntas: ¿Existen otras formas de verificar el sello obtenido? ¿Si existen, cuáles son?
- b) También Hishinuma [1] presenta 3 factores que se encuentran involucrados en la falla del sellado. Ante dichos factores surge la siguiente pregunta: ¿Dichos factores son también válidos para el sellado de ampollitas termoplásticas de PVC? Para encontrar respuesta a dicha pregunta se requiere de mayor investigación sobre la falla del sello en ampollitas termoplásticas de PVC, dado que Hishinuma trabaja con el sellado con placa caliente de películas de materiales termoplásticos que si bien pueden simular

el borde de un blíster de empaque no representan el modelo más adecuado para simular el sello en la boquilla de una ampolleta.

- c) Rohe [18] presenta un método de verificación del sellado mediante presión aerostática y para Rohe representa un método de verificación adecuado para las condiciones que presenta su problema, un sellado lineal que forma una costura entre las geomembranas de PVC. Este tipo de verificación da pie a la siguiente pregunta: ¿Será posible que mediante aire a presión se logre una verificación adecuada del sellado de ampolletas termoplásticas de PVC? ¿Qué implicaciones tiene este tipo de verificación en el sellado de ampolletas termoplásticas?

La capacidad instalada de verificación del sellado elaborado en ampolletas termoplásticas de PVC a nivel planta industrial demanda con urgencia la elaboración de reportes a nivel laboratorio o a nivel planta industrial sobre mediciones que relacionen un sellado de calidad en la boquilla de la ampolleta con los parámetros correspondientes al proceso de sellado de la misma.

Asimismo, el autor realizó a manera de verificación del sello de la ampolleta inspecciones estereoscópicas al sello de la ampolleta, mismas que se presentan en el Anexo E denominado “Inspección Estereoscópica del Sello de la Ampolleta”.

De esta manera se presenta el marco de referencia para corroborar los factores involucrados en el adecuado o inadecuado sellado en ampolletas termoplásticas de PVC, así como el análisis y desarrollo de nuevas formas para verificar el sello de la ampolleta con una estructura sistemática e innovadora y no únicamente correlacionando pruebas mecánicas del sellado con cambios en la temperatura de

sellado, la velocidad de calentamiento y la observación de los modos de falla, como comúnmente se realiza la verificación del sellado, así como lo han venido desarrollando autores como Hishinuma [1], Van de Ven y Erdman [9], Dodin [13] y Leighton et al. [14].

3.7. Conclusión del Estudio del Estado del Arte

El estado del arte obtenido de la revisión bibliográfica presentó información parcial o que no ha sido completamente desarrollada sobre:

- a) La velocidad del incremento de la temperatura de la punta de la ampolleta hasta alcanzar el rango adecuado de temperatura para el sellado de la ampolleta.
- b) La posibilidad de sellar la ampolleta teniendo un buen control de la presión mecánica y temperatura de sellado.
- c) El nivel de presión hidrostática que son capaces de soportar los sellos de las ampolletas.
- d) La resistencia a la tracción del sello de la ampolleta.

4. Experimentación

El presente capítulo corresponde a la parte experimental del trabajo de investigación que comprende el desarrollo del diseño de un banco de pruebas y la realización de tres experimentos. Los tres experimentos desarrollados por el autor se definen a partir de las dudas que surgen durante el capítulo anterior; y que a su vez se encuentran relacionadas con la hipótesis de la investigación. La figura 19 presenta un diagrama de la relación del diseño de los tres experimentos desarrollados durante la investigación y la hipótesis de la misma.

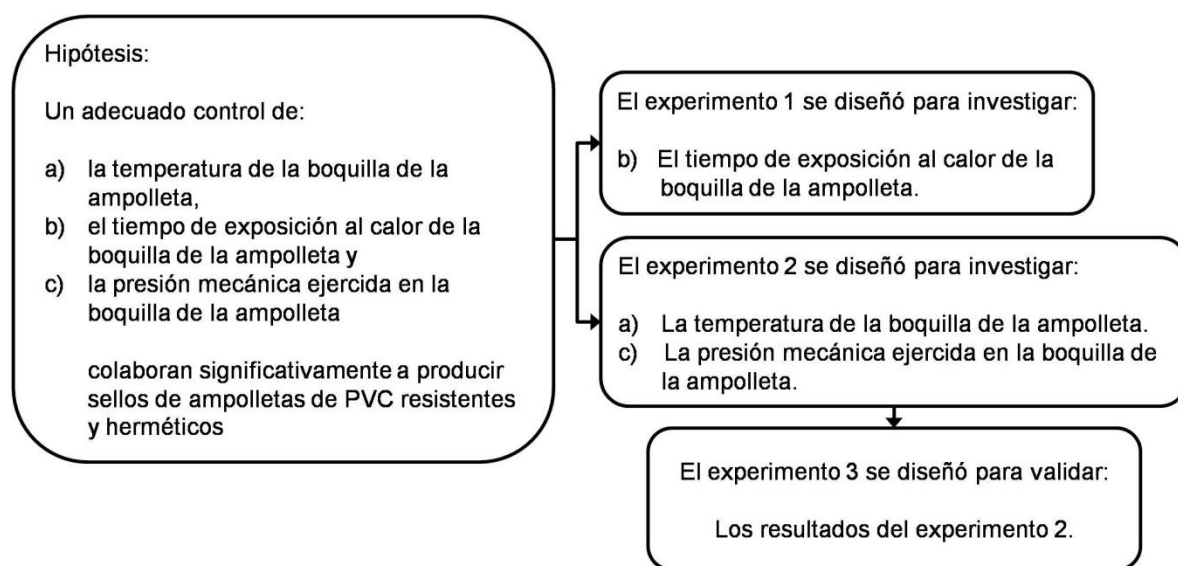


Figura 19, Relación del Diseño de los Experimentos con la Hipótesis de la Investigación.

El primer experimento es concerniente a la velocidad de calentamiento de la boquilla de la ampollita. Este experimento se definió para investigar el período de tiempo de exposición de la ampollita a una fuente de calor, con el fin de obtener un sello de la ampollita resistente y hermético. El experimento fue diseñado para exponer la boquilla de la ampollita a una fuente de calor y al mismo tiempo medir

y registrar la temperatura de la misma. El experimento se reporta en la sección 4.2 del presente capítulo y los resultados correspondientes a este experimento se reportan en la sección 4.4 del presente capítulo.

El segundo experimento es concerniente al sellado de la ampolleta. Este experimento se definió para investigar la temperatura de la boquilla de la ampolleta y la presión mecánica aplicada a la boquilla de la ampolleta, con el fin de obtener un sello de la ampolleta resistente y hermético. El experimento fue diseñado para sellar la ampolleta y posteriormente verificar dicho sello. El sellado de la ampolleta consistió en la aplicación de determinada presión mecánica a la boquilla de la ampolleta, misma que se encontraba a una temperatura determinada. La verificación del sello consistió en el sometimiento del sello de la ampolleta a una carga de presión hidrostática y al mismo tiempo se midió y registró dicha carga. El experimento se reporta en la sección 4.3 del presente capítulo y los resultados correspondientes a este experimento se reportan en la sección 4.4 del presente capítulo.

Se elaboró un banco de pruebas para el desarrollo de los experimentos previamente definidos. El banco de pruebas se describe en la sección 4.1 de este capítulo.

El tercer experimento es concerniente al ensayo de tracción del sello de la ampolleta. Este experimento se definió para validar los resultados del segundo experimento. Se elaboró una probeta para ensayo de tracción que consistió en el sellado de dos boquillas de ampolleta de PVC que se encontraban una frente a la otra y cada una con la misma temperatura. Las boquillas de ampolleta de PVC

fueron selladas únicamente desplazando una contra la otra, evitando así el ejercicio de presión mecánica en dicho sello. Las probetas elaboradas fueron ensayadas en una máquina universal Instron 4206 y tanto el experimento como los resultados del mismo se reportan en la sección 4.5 del presente capítulo.

4.1. Diseño del Banco de Pruebas

Para el desarrollo experimental del presente trabajo de investigación el autor diseñó y construyó un banco de pruebas. El banco aprovechó algunos módulos fabricados en el CDMIT, los cuales fueron utilizados para realizar pruebas de producción en la planta industrial. La figura 20 muestra el banco de pruebas de 9 módulos. Los primeros 6 módulos ejecutan los 6 primeros pasos de la secuencia propuesta por el autor para el proceso del sellado de ampollitas con calor y los restantes 3 módulos ejecutan los pasos propuestos para ensayar el sello de la ampollita con el propósito de evaluar la capacidad de resistencia de cada muestra ante una carga de presión hidrostática. El banco de pruebas puede ser utilizado para ensayar ampollitas de 6, 10 y 15 ml. Una ampollita de 10 ml. se muestra en la figura 21.

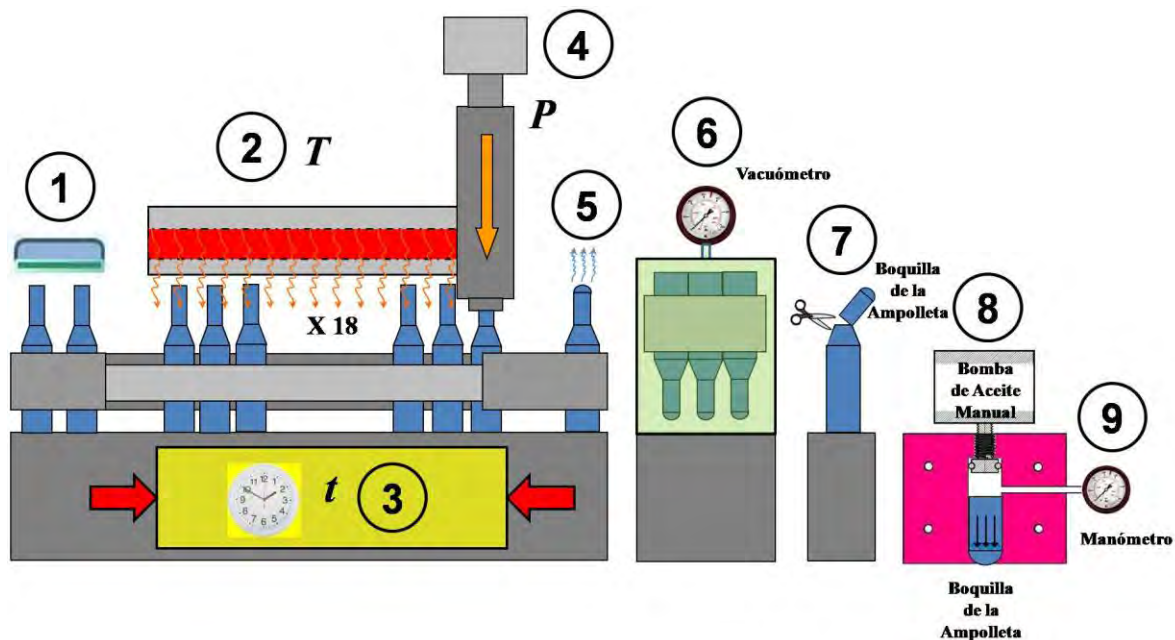


Figura 20, Representación Esquemática del Diseño del Banco de Pruebas.

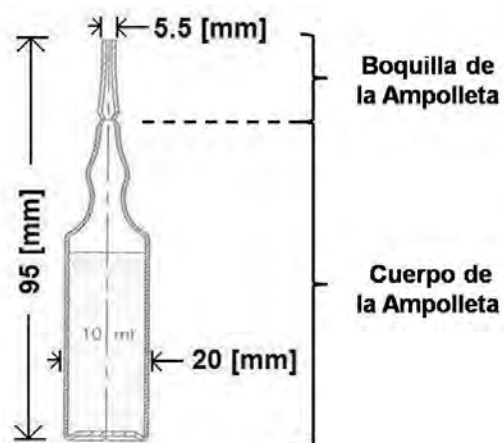


Figura 21, Ampolleta Ensayada en el Banco de Pruebas.

A continuación se describe el banco de pruebas conforme a cada uno de los módulos que se muestran en la figura 20.

1 Preparación de la Superficie.

La preparación de la superficie de la boquilla de la ampolleta se realiza a través de la aplicación de un flujo de aire a presión a la boquilla de la ampolleta mediante un aspersor que se encuentra conectado a la línea de aire a presión. El aspersor es manipulado manualmente.

2 Calentamiento de la Boquilla de la Ampolleta.

Para el calentamiento de la boquilla de la ampolleta se diseñó una fuente de calor compuesta por una resistencia eléctrica de 3000 W y de 1.2 m de longitud que permite calentar hasta 18 ampolletas simultáneamente. La resistencia está montada en un cabezal de acero que se encuentra ubicado en la parte superior de las ampolletas con el fin de radiar calor hacia las boquillas de las ampolletas y es manejada con un controlador (proporcional-derivativo). La resistencia se calienta en un rango de temperatura que se encuentra entre los 20°C y los 600°C y presenta variaciones que van desde 3 hasta 6°C. Esta configuración permite lograr un calentamiento de la boquilla de la ampolleta a un rango de temperatura que se presenta entre los 20°C y los 300°C.

El cabezal con la resistencia montada en él puede desplazarse verticalmente, relativo a la boquilla de la ampolleta, en un rango de distancia que se delimita entre los 2 y los 50 mm. El motivo de que la resistencia eléctrica montada en el cabezal de acero cuente con este desplazamiento relativo con respecto a la

boquilla de la ampollita es que el banco de pruebas cuente con la capacidad de ensayar ampollitas de diferentes tamaños para futuros experimentos.

La temperatura de la boquilla de la ampollita es medida utilizando un arreglo ampollita-termopar, dicho arreglo mide la temperatura de la boquilla de la ampollita con una resolución de centésimas de grado Celsius. El arreglo se muestra en la figura 22. El termómetro tiene la capacidad de grabar 5 registros en una base de datos de la temperatura medida cada segundo transcurrido.



Figura 22, Arreglo Ampollita-Termopar Diseñado para Medir con Precisión la Temperatura en la Boquilla de la Ampollita

3 Período de Tiempo de Calentamiento de la Boquilla de la Ampollita.

Para exponer un período de tiempo determinado la boquilla de la ampollita a la fuente de calor se utilizó una banda transportadora propulsada por un motor eléctrico de 1 Hp. La banda transportadora tiene la capacidad de propulsar las ampollitas con una velocidad mínima de 6.6 mm/s y máxima de 245 mm/s, velocidades que representan una razón de procesamiento de sellado de entre 6 y 220 ampollitas por minuto.

4 Presión Mecánica Aplicada a la Boquilla de la Ampolleta.

Para aplicar una presión mecánica en la boquilla de la ampolleta se utilizó un revólver con 12 cilindros neumáticos (Festo - DGS-12-100-P-9146). Cada cilindro del revólver contiene una cámara cuyo émbolo es de 12 mm de diámetro (ϑ). La fuerza de operación de cada cilindro es equivalente a el producto de el área de émbolo del cilindro y la presión de alimentación ($P_{alimentación}$) que posee un rango de 0.5 – 7 bares (con variaciones que van de 0.1 a 0.2 bares). El diseño tipo revólver permite a cada dado un período de tiempo de enfriamiento que es equivalente al período de tiempo que le toma al revólver completar un ciclo de 360°. Esta configuración permite que el dado trabaje siempre a una temperatura cercana a la del medio ambiente.

El efector final de cada cilindro es un dado de conformado semiesférico con 5.5 mm de diámetro (φ) y representa la interfase entre el vástago del cilindro neumático y la boquilla de la ampolleta. El dado magnifica 4.7 veces la presión que transmite el émbolo del cilindro a la boquilla de la ampolleta ($P_{ampolleta}$) y proporciona un rango de presión mecánica sobre la boquilla de la ampolleta de 0.142 – 3.33 MPa. El cálculo correspondiente se muestra a continuación.

$$\text{Área del émbolo del cilindro} = \pi \left(\frac{\vartheta}{2}\right)^2 \quad (4)$$

$$\text{Área de apoyo del dado de conformado} = \pi \left(\frac{\varphi}{2}\right)^2 \quad (5)$$

$$P_{alimentación} = \frac{\text{Fuerza del vástago del cilindro}}{\text{Área del émbolo del cilindro}} \quad (6)$$

$$P_{ampolleta} = \frac{\text{Fuerza del vástago del cilindro}}{\text{Área de apoyo del dado de conformado}} \quad (7)$$

$$Fuerza\ del\ vástago\ del\ cilindro = (P_{alimentación})\pi\left(\frac{\vartheta}{2}\right)^2 \quad (8)$$

$$P_{ampolleta} = \frac{(P_{alimentación})\pi\left(\frac{\vartheta}{2}\right)^2}{\pi\left(\frac{\varphi}{2}\right)^2} \quad (9)$$

$$P_{ampolleta} = \frac{(P_{alimentación})(\vartheta^2)}{\varphi^2} \quad (10)$$

$$P_{ampolleta} = \frac{(P_{alimentación})(12^2)}{5.5^2} = 4.7(P_{alimentación}) \quad (11)$$

El diseño del dado es semiesférico, (como se muestra en la figura 23), geometría que permite ajustar el dado con la boquilla de la ampollita. El dado también es intercambiable con el fin de tener la posibilidad de ensayar diferentes geometrías.

Información Confidencial

Para mayor información comuníquese al CDMIT
con los Profesores:
Dr. Ramírez Reivich y Dr. López Parra
y/o con el Autor al correo:
gustavo_olivaresmx@yahoo.com.mx

Figura 23, Dado Utilizado en el Banco de Pruebas.

5 Enfriamiento del Sello de la Ampolleta.

Las ampollitas son enfriadas por convección natural a temperatura ambiente. La temperatura ambiente osciló entre 16.3 y 24.6°C durante los experimentos.

6 Verificación del Sello de la Ampolleta.

Para verificar el sello logrado en cada ampolleta se utilizó una cámara de vacío con el fin de someter al vacío a las ampolletas selladas en el banco de pruebas. Auxiliándose de una inspección visual y manual (tacto) se determina si la ampolleta presenta fuga. Las ampolletas son introducidas dentro de la cámara de vacío mostrada en la figura 24 por un período de 20 segundos a una presión de vacío que oscila entre -65 y -40 Psi, (-0.49 y -0.27 MPa).

Información Confidencial

Para mayor información comuníquese al CDMIT
con los Profesores:
Dr. Ramírez Reivich y Dr. López Parra
y/o con el Autor al correo:
gustavo_olivaresmx@yahoo.com.mx

Figura 24, Esquema Conceptual del Dispositivo para la Verificar el Sello Producido en la Ampolleta por el Banco de Pruebas.

7 Separación de la Boquilla del Cuerpo de la Ampolleta.

La boquilla de la ampolleta se remueve del cuerpo de la ampolleta de manera manual con el fin de ser utilizada posteriormente en el ensayo del sello de la ampolleta que medirá su resistencia ante una carga de presión hidrostática. El muestreo se realizó considerando conjuntos de 4 elementos.

8 Ensayo del Sello de la Ampolleta para Medir la Resistencia del Sello ante una Carga de Presión Hidrostática.

Para ensayar el sello de la ampolleta ante una carga de presión hidrostática el autor diseñó y fabricó el módulo del banco de pruebas denominado “Blow Out”, mismo que se describe con detalle en el Anexo C de la Tesis “Diseño del Banco de Pruebas para Ensayar Ampolletas ante Presión Hidrostática “Blow Out””. El autor hace una recomendación (obligatoria) al lector a leer este Anexo C antes de continuar con la lectura de la Tesis.

El módulo “Blow Out” sujeta herméticamente la boquilla de la ampolleta con el propósito de que la presión hidrostática producida por un cilindro hidráulico induzca esfuerzos normales y cortantes en el sello de la ampolleta.

Como se observa en la figura 25, un cilindro hueco de acero sirve para sujetar la boquilla de la ampolleta. El mismo cilindro también funciona como un conducto por donde fluye el aceite que ejerce la presión hidrostática. La presión hidrostática del sistema se registra utilizando un manómetro.

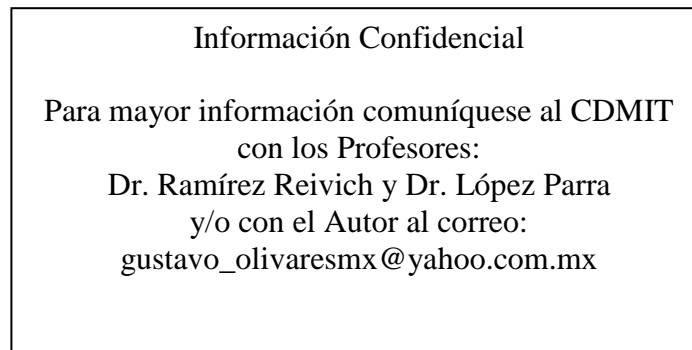


Figura 25, Cuerpo Cilíndrico Hueco de Acero que Pertenece al Módulo 8

Una tapa roscada que contiene un orificio cónico se utiliza para alinear y fijar la boquilla de la ampolleta de ensayo a la tapa roscada del cuerpo hueco cilíndrico (ver figura 25).

9

Registro de la Presión Hidrostática que el Sello de la Ampolleta es Capaz de Resistir.

Para medir la cantidad de presión máxima que resiste cada sello de ampolleta se utiliza un manómetro con rango de medición de 0 – 5000 Psi, (0 – 34.47 MPa).

El banco de pruebas se utilizó para realizar los experimentos que se describen a continuación.

4.2. Experimentación sobre Velocidad de Calentamiento

La experimentación sobre la velocidad de calentamiento fue el primer experimento realizado en la presente investigación.

Con el fin de investigar la velocidad del incremento de la temperatura de la boquilla de PVC, adecuada para el sellado de la ampollita, se utilizaron los primeros tres módulos del banco de pruebas que simulan los tres primeros pasos de la secuencia propuesta para el proceso del sellado de ampollitas con calor (ver figura 26).

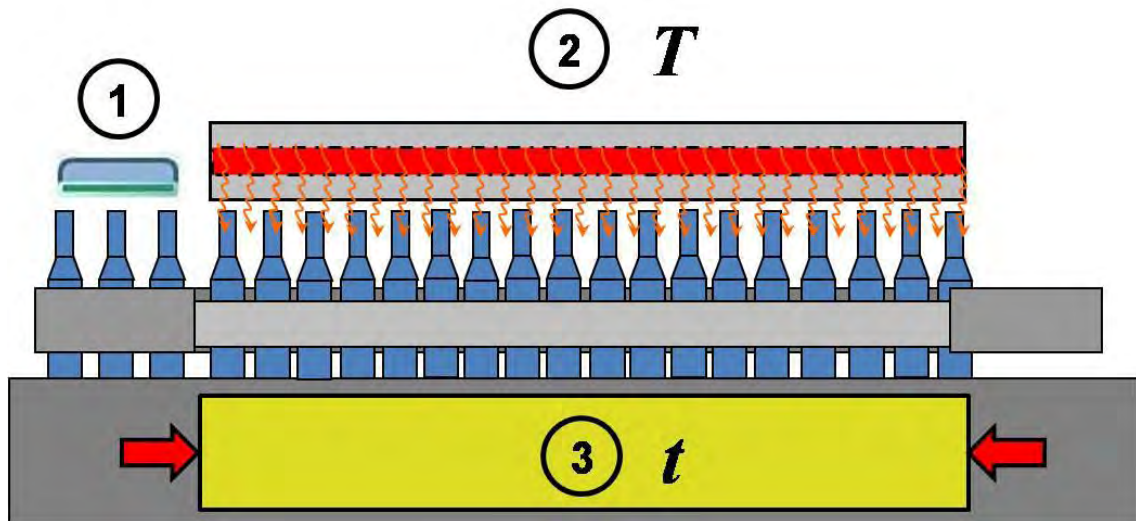


Figura 26, Representación Esquemática de los Primeros Tres Módulos del Banco de Pruebas para la Experimentación sobre la Velocidad de Calentamiento

4.2.1. Experimento de Velocidad de Calentamiento

Para explorar el período de tiempo requerido para incrementar la temperatura de la boquilla de la ampollita hasta un valor de temperatura adecuado para el sellado de la ampollita, se midieron:

- La temperatura de la boquilla de la ampollita.

b) El período de tiempo de exposición a la fuente de calor.

El procedimiento que se siguió fue el siguiente:

Primero se limpiaron cada una de las boquillas con un flujo de aire a presión.

Posteriormente se ensayaron 4 ampollitas para cada uno de los valores de temperatura seleccionados para la resistencia de 3000 W: 475°C, 495°C, 515°C y 535°C. También se fijó la distancia entre el cabezal con la resistencia y la boquilla de la ampollita en 3 mm. Cabe mencionar que dichos valores de temperatura para la resistencia de 3000W y el valor de la distancia entre la resistencia y la boquilla de la ampollita fueron definidos con base en el estudio que el autor hizo de los trabajos de investigación aplicada del CDMIT y los datos proporcionados en la literatura científica. El comparativo de los datos obtenidos del trabajo de investigación aplicada de los investigadores del CDMIT, de los datos proporcionados en la literatura científica y de los datos de diseño definidos por el autor se resumen en la siguiente tabla 3.

Tabla 3, Tabla Comparativa de Datos Referente al Principio de Calentamiento, el Rango de Temperatura de la Fuente de Calor y la Velocidad de Desplazamiento de la Muestra.

Investigador	Principio de calentamiento	Rango de temperatura de la fuente de calor [°C]	Distancia de la boquilla de la ampollita a la fuente de calor [mm]	Velocidad de desplazamiento de la muestra [m/s]	Tiempo de exposición al calor [s]
Van de Ven y Erdman [9]	Conducción	167 – 307°C	0 mm	0 mm/s	1 s
Investigadores del CDMIT (1/2)	Convección	400 – 500°C	1 mm	0 mm/s	3 - 5 s
Investigadores del CDMIT (2/2)	Radiación	300 – 600°C	3 – 6 mm	245 – 100 mm/s	4.9 - 12.4 s
Autor	Radiación	475 – 535°C	3 mm	190 mm/s	6.3 s

El experimento diseñado por el autor presenta un principio de calentamiento basado en radiación térmica que permitió, durante la fase experimental, tener un mayor control (resolución) de los rangos de temperatura de la boquilla de la ampolla que serán probados en el banco de pruebas. Asimismo, el rango de temperaturas seleccionado por el autor para comenzar los experimentos se definió previendo que la utilización de un mayor grado de temperatura, comparado con los utilizados industrialmente por el grupo de investigación del CDMIT, permitiría sellar la boquilla de la ampolla utilizando presiones mecánicas significativamente menores a las utilizadas industrialmente. La temperatura máxima de la resistencia de calentamiento del banco de pruebas de 535°C representa una temperatura adecuada para calentar la boquilla de la ampolla sin correr el riesgo de que la boquilla de la ampolla alcance su fase de degradación.

Finalmente, la velocidad de la banda transportadora se fijó en 190 mm/s porque este valor depende del rango de temperaturas de la resistencia de 3000 W que fueron definidos para realizar los experimentos. Mayores temperaturas implican necesariamente procesos de calentamiento más rápidos. Esta magnitud de velocidad para la banda transportadora permite exponer la boquilla de cada ampolla a la resistencia de 3000W (1.2 m de longitud) por un período de tiempo de 6.3 s.

Cabe señalar aquí, como referencia, diferentes sistemas diseñados para calentar y sellar el material. Una referencia útil es una máquina diseñada en el CDMIT la cual utiliza aire caliente cuya temperatura se encuentra en el rango de los 400 y 500°C como fuente de calor para calentar la boquilla de la ampolla que

permanece posicionada en un lugar de manera estática por un período de tiempo que se encuentra entre los 3 y 5s. La fuente de calor se encuentra a 1 mm de la boquilla de la ampolleta. Una segunda máquina, también diseñada por el mismo grupo, utiliza una resistencia eléctrica cuya temperatura oscila entre los 300°C y los 600°C. La resistencia calienta la boquilla de la ampolleta en un período que oscila entre los 4.9 y 12.4 s. Durante el calentamiento la ampolleta se mueve sobre un transportador circular. Esta segunda máquina ubica la boquilla de la ampolleta entre 3 y 6 mm por debajo de la resistencia eléctrica. Por otro lado, Van de Ven y Erdman [9] diseñaron un experimento que utiliza un punzón caliente (167°C a 307°C) para realizar el calentamiento y sellado de láminas de PVC de 0.102 mm de espesor. El punzón calienta y sella en un tiempo de un segundo y mediante contacto las láminas de PVC alcanzando una temperatura calculada en 134 y 242°C. Cálculo hecho para las superficies de las láminas de PVC. El experimento de Van de Ven y Erdman [9] presenta un principio de calentamiento basado en conducción térmica, las máquinas del CDMIT se basan en un principio de convección y radiación térmica y, por otro lado, el banco de pruebas diseñado aquí por el autor presenta un principio de calentamiento basado en radiación térmica.

4.3. Experimentación sobre el Sellado de la Ampolleta.

La experimentación sobre el sellado de la ampolleta fue el segundo experimento realizado en la presente investigación. A continuación se describirá con detalle el experimento y se presentarán los resultados obtenidos del mismo.

4.3.1. Experimento para Medir la Resistencia del Sello de la Ampolleta ante una Carga de Presión Hidrostática

Para explorar la resistencia del sello de la ampolleta ante una carga de presión hidrostática el procedimiento que se siguió fue el siguiente:

- a) La boquilla de cada ampolleta ensayada fue preparada a través de la aplicación de un flujo de aire a presión para calentamiento conforme al módulo 1 del banco de pruebas.
- b) En el segundo módulo del banco de pruebas se ensayaron 4 ampolletas para el rango de valores de temperatura seleccionados para la resistencia de 3000 W: 475 – 535°C y se fijó la distancia entre el cabezal con la resistencia y la boquilla de la ampolleta en 3 mm.
- c) En el tercer módulo del banco de pruebas la velocidad de la banda transportadora se fijó en 190 mm/s.
- d) Posteriormente se utilizó el cuarto módulo del banco de pruebas para ejercer una presión mecánica sobre la boquilla de la ampolleta. El rango de presión ejercido a través del dado semiesférico utilizado fue de 0.238 – 3.33 MPa. El comparativo de los datos obtenidos del trabajo del CDMIT, de los datos proporcionados en la literatura científica y de los datos definidos por el autor se resumen en la siguiente tabla 4.

Tabla 4, Tabla Comparativa de Datos Referente al Principio de Calentamiento y Rango de Presión Mecánica que se Ejerce sobre la Muestra.

Investigador	Principio de Calentamiento	Acoplamiento: Calentamiento/Presión Mecánica	Mecanismo para Ejercer la Presión Mecánica	Presión Mecánica en la Boquilla de la Ampolleta [MPa]
Van de Ven y Erdman [9]	Conducción	Sí	Punzón caliente accionado por una palanca cargada con pesas	0.11 - 1.84
Hishinuma [1]	Conducción	Sí	Par de placas calientes	0.05 - 0.3
Investigadores del CDMIT	Radiación	No	Dado semicircular frío acoplado a un cilindro neumático	3.33
Autor	Radiación	No	Dado semicircular frío acoplado a un cilindro neumático	0.238 – 3.33

Cabe señalar aquí, como referencia, las presiones utilizadas por varios autores en otras investigaciones. Por ejemplo el CDMIT diseñó una máquina que utiliza una resistencia eléctrica para calentar la boquilla de la ampolleta y cuenta con un cabezal de sellado de ampolletas con configuración de revólver con 12 cilindros neumáticos, cada cilindro del revólver aplica a cada ampolleta a través de un dado semicircular una presión mecánica de 3.33 MPa. Por otro lado, Van de Ven y Erdman [9] diseñaron un experimento que utiliza un punzón caliente para realizar el calentamiento y sellado de láminas de PVC de 0.102 mm de espesor, (ver figura 11, página 42). El punzón ejerce presión mecánica sobre la muestra mediante una palanca cargada con pesas. Van de Ven y Erdman [9] exploraron la presión mecánica en el rango de 0.11-1.84 MPa para el rango de temperatura calculada en la muestra de 134-242°C. Adicionalmente Hishinuma [1] diseñó un experimento para explorar la relación entre la presión mecánica y la temperatura de la superficie de derretimiento. El experimento de Hishinuma

consiste en colocar de manera fija una película de 77 μm de Al-deposited CPP/OPP (Cast-Polypropylene/Oriented-Polypropylene) entre dos placas calientes y posteriormente ejercer una presión mecánica a la película a través de las placas, (ver figura 13, página 43). Hishinuma [1] exploró el rango de presión de 0.05 - 0.3 MPa correspondientes a un rango de temperatura en la película de 130 - 140°C, (ver figura 15).

Se puede observar en la tabla 4 que el máximo valor de presión mecánica lo proporcionan los investigadores del CDMIT y el mínimo valor de presión mecánica lo proporciona Hishinuma [1]. Basado en estas observaciones el autor, en su afán por explorar el mayor rango posible de presión mecánica para el sellado de ampollitas de PVC, definió el rango de 0.238 – 3.33 MPa. Se previó que las presiones mecánicas que se encuentran por debajo de los 0.2 MPa así como las presiones mayores a 3.4 MPa impedirían un buen sellado. Asimismo, se previó que este rango de presiones permitiría la realización de experimentos exitosos en el rango de temperaturas elegido y congruente con las capacidades y resolución del banco de pruebas.

- e) Se ensayaron 4 ampollitas por cada parámetro cruzado (P vs T) de sellado de ampollitas experimentado.
 - e1. La temperatura requerida para los parámetros cruzados que fueron experimentados se extendió desde 80°C hasta 210°C y fue dividido en 14 particiones con 10°C dividiendo cada una, es decir el conjunto: (80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200 y 210). La temperatura de la boquilla de la ampollita correspondiente a

80°C se encuentra 15°C por debajo de T_g que es 95°C para la resina base del PVC (Merah, et al. [8]), mientras que la temperatura de la boquilla de la ampollita correspondiente a 210°C se encuentra entre 5 y 10°C por debajo de la fase de degradación experimental de la ampollita de PVC.

- e2. El dado acoplado al cilindro neumático del banco de pruebas aplicó la presión mecánica que permitió la resolución del banco de pruebas y que se extendió desde 0.238 MPa hasta 3.332 MPa, rango de presión que fue dividido en 14 niveles con 0.238 MPa dividiendo cada uno, es decir el conjunto: (0.238, 0.476, 0.714, 0.952, 1.19, 1.428, 1.667, 1.904, 2.142, 2.38, 2.618, 2.856, 3.094 y 3.332).
- e3. Los parámetros cruzados P vs T del experimento sobre el sellado de la ampollita resultaron en 196 valores:

$$(P \times T)^T = \begin{pmatrix} 3.332 \text{ MPa} \\ 3.094 \text{ MPa} \\ 2.856 \text{ MPa} \\ 2.618 \text{ MPa} \\ 2.38 \text{ MPa} \\ 2.142 \text{ MPa} \\ 1.904 \text{ MPa} \\ 1.666 \text{ MPa} \\ 1.428 \text{ MPa} \\ 1.19 \text{ MPa} \\ 0.952 \text{ MPa} \\ 0.714 \text{ MPa} \\ 0.436 \text{ MPa} \\ 0.238 \text{ MPa} \end{pmatrix} \times (80^\circ\text{C}, 90^\circ\text{C}, 100^\circ\text{C}, 110^\circ\text{C}, 120^\circ\text{C}, 130^\circ\text{C}, 140^\circ\text{C}, 150^\circ\text{C}, 160^\circ\text{C}, 170^\circ\text{C}, 180^\circ\text{C}, 190^\circ\text{C}, 200^\circ\text{C}, 210^\circ\text{C}) \quad (12)$$

- f) Se enfrió el sello de las ampollitas a temperatura ambiente, (módulo 5).
- g) Se verificó el sello de la ampollita utilizando el módulo 6 del banco de pruebas. Las ampollitas se expusieron 20 segundos a una presión de vacío que se ubica entre -0.49 y -0.27 MPa. Este rango de presión de vacío permitió identificar fugas visibles en el sello de las ampollitas de manera expedita.

- h) La boquilla de la ampollita fue removida del cuerpo de la ampollita de manera manual conforme al módulo 7 del banco de pruebas.
- i) Conforme con el módulo 8 del banco de pruebas se ejerció una carga de presión hidrostática en el rango de cero a 15 MPa al sello de la ampollita para medir la resistencia del sello. Cabe señalar que Merah et al. [8] reporta que las tuberías y accesorios de PVC para distribución de agua fría y caliente a una temperatura de servicio de 50°C son capaces de resistir una presión hidrostática de 0.95 MPa. Este valor de resistencia ante una carga hidrostática del PVC representa una importante referencia para el presente trabajo de investigación.
- j) Finalmente se registró la máxima presión hidrostática que el sello de la ampollita fue capaz de resistir.

4.4. Resultados de los Experimentos

Los resultados del experimento de la velocidad de calentamiento pueden observarse en la figura 27 que muestra la tendencia promedio de la temperatura de la boquilla de las 4 ampollitas ensayadas para cada uno de los valores de temperatura seleccionados para la resistencia de 3000 W. Los resultados de este experimento muestran el tiempo promedio requerido para incrementar la temperatura de la boquilla de la ampollita.

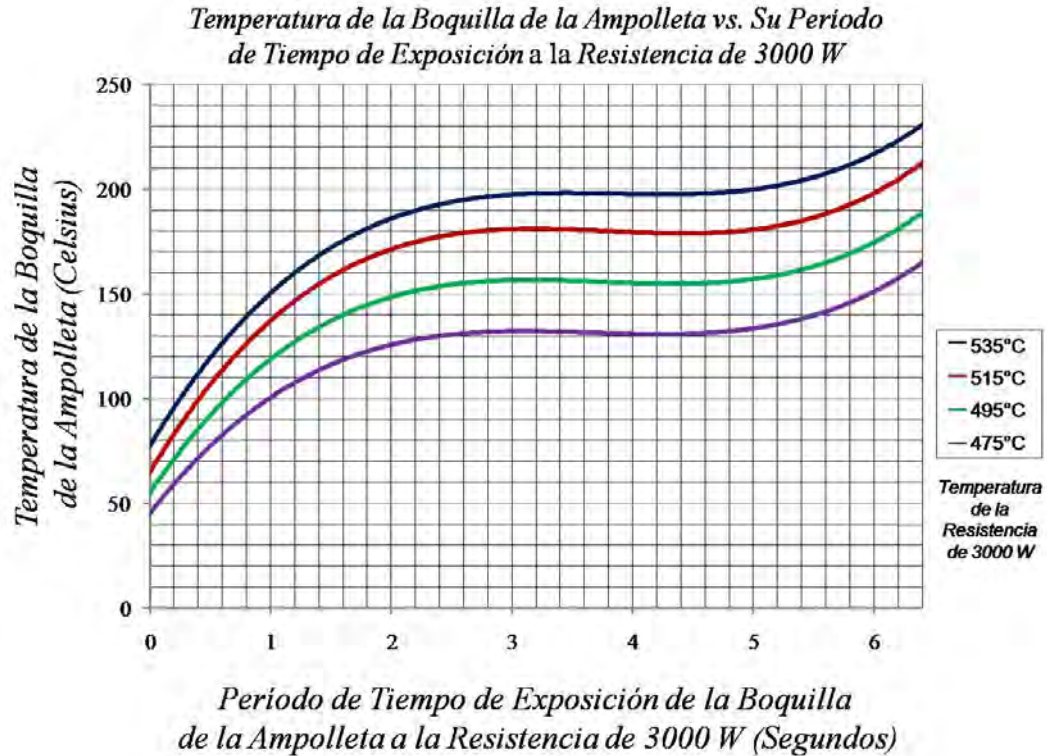


Figura 27, Resultados del Experimento de la Velocidad de Calentamiento

Los resultados del experimento de la velocidad de calentamiento (figura 27) muestran la correlación entre la temperatura de la boquilla de la ampolleta y el período de tiempo promedio de exposición de la boquilla de la ampolleta a la fuente de calor. Estos resultados indican que es posible incrementar la temperatura de la boquilla de la ampolleta en un período de tiempo de 6.3 s para obtener un rango de temperatura de la boquilla de la ampolleta que se extiende desde 160°C hasta 225°C. Este rango de temperatura se extiende 15°C por debajo de la referencia experimental T_m para el PVC (175°C) hasta 5 - 10°C por encima de la fase de degradación experimental de la ampolleta (215 - 220°C), (ver tabla 5).

Tabla 5, Resultados del Experimento de la Velocidad de Calentamiento

Temperatura de la resistencia de 3000 W	Temperatura de la boquilla de la ampollita (T)	Período de tiempo promedio de exposición a la fuente de calor (t)
535°C	(170 – 210°C)	(1.4 – 5.9 s)
515°C	(170 – 210°C)	(1.9 – 6.2 s)
495°C	(170 – 190°C)	(5.8 – 6.4 s)
475°C	170	6.5 s

Asimismo los resultados del experimento sobre el sellado de la ampollita se describen a continuación. Los sellos de las ampollitas elaborados con los parámetros cruzados P vs T , (presión mecánica ejercida en la boquilla de la ampollita vs la temperatura de la boquilla de la ampollita), establecidos en la sección 4.3.2 inciso d) fueron ensayados ante una carga de presión hidrostática y se puede afirmar que los sellos que presentaron fuga se ubicaron en la región de no-sellado del plano formado por los parámetros cruzados P vs T , esta zona se muestra en color ámbar en la gráfica de la figura 28. Los sellos que presentaron resistencia ante la carga de presión hidrostática y que mostraron valores de resistencia que se extienden en el rango de 12.41 - 14.47 MPa se ubicaron en la región de sellado del plano formado por los parámetros cruzados P vs T , esta zona se muestra en color verde olivo en la gráfica de la figura 28.

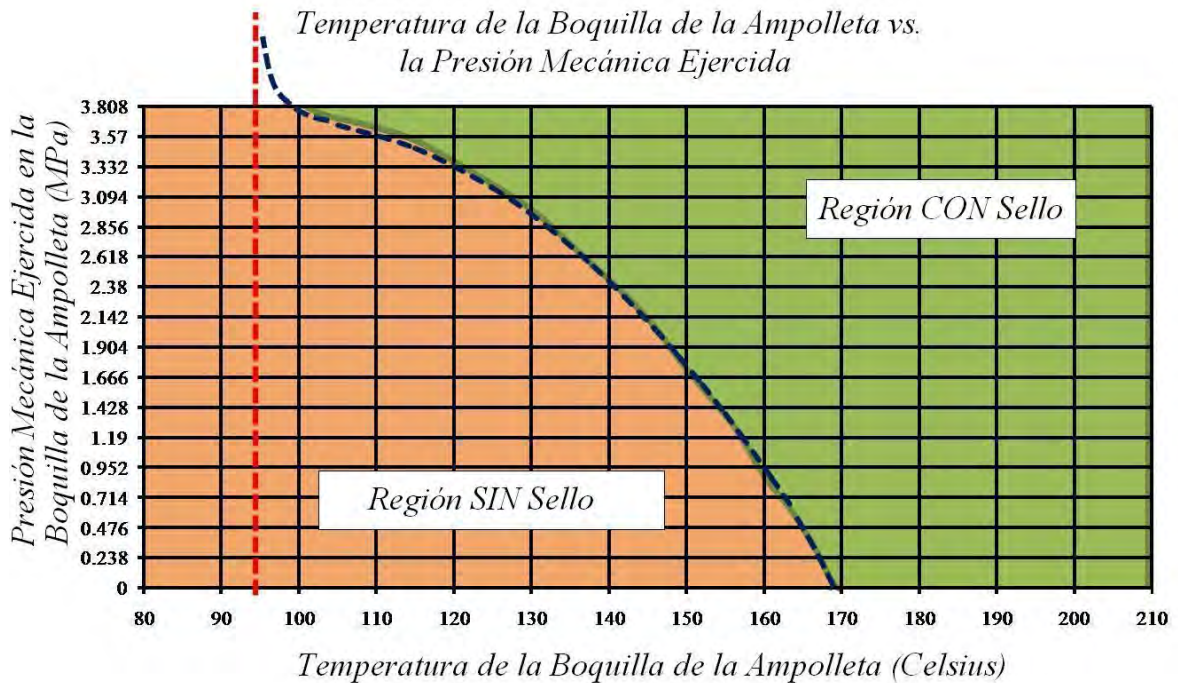


Figura 28, Resultados del Experimento sobre el Sellado de la Ampollita.

A continuación se describen las tres diferentes regiones de sellado del plano formado por los parámetros cruzados P vs T y que se muestra en la gráfica de la figura 28.

- a) *Primera región de parámetros cruzados P vs T de sellado de ampollitas de PVC.*

Esta región se encuentra ubicada en el rango de temperatura de la boquilla de la ampollita correspondiente a 80 - 110°C para el rango de interés de la presión mecánica ejercida en la boquilla de la ampollita (0.238 - 3.332 MPa). Las ampollitas de esta región no presentaron sello, por lo tanto se descartó este rango de temperatura de la boquilla de la ampollita correspondiente a 80 - 110°C.

b) *Segunda región de parámetros cruzados P vs T de sellado de ampollitas de PVC.*

Esta región se encuentra ubicada en el rango de temperatura de la boquilla de la ampollita correspondiente a 110 - 170°C para el rango de interés de la presión mecánica ejercida en la boquilla de la ampollita (0.238 - 3.332 MPa). Las 4 ampollitas para cada parámetro cruzado P vs T de sellado de ampollitas sellaron de manera exitosa para los valores de presión mecánica validos para la siguiente desigualdad:

$$P > -\frac{T^2}{1440.5} + \frac{T}{7.415} - 2.85 \quad (13)$$

La ecuación No. 13 se obtuvo aplicando a los resultados del experimento el formato de línea de tendencia de Microsoft Excel con tipo de regresión polinomial de segundo grado. Para esta región de sellado de ampollitas de PVC el valor inferior del rango de temperatura para la boquilla de la ampollita se localiza en la vecindad de la T_g reportada para el PVC por Merah [8] (95°C), mientras que el máximo valor de dicho rango de temperatura se localiza en la vecindad de la T_m reportada para el PVC por Van de Ven y Erdman [9] (175°C). Los valores de T_g y de T_m se reportan para el PVC a lo largo de la revisión bibliográfica.

c) *Tercera región de parámetros cruzados P vs T de sellado de ampollitas de PVC.*

Esta región se encuentra ubicada en el rango de temperatura de la boquilla de la ampollita correspondiente a 170 – 210°C. En términos de efectividad en el sellado de la ampollita esta región de sellado de ampollitas de PVC

representa la zona de mayor conveniencia para obtener un sellado de ampollita resistente y hermético debido a que las 4 ampollitas para cada parámetro cruzado P vs T de sellado de ampollitas perteneciente a este rango de temperatura de la boquilla de la ampollita sellaron para todo el rango de interés de la presión mecánica. Este hallazgo es equivalente al hallazgo de Van de Ven y Erdman [9], que afirman que la influencia de la presión mecánica no es determinante para el sellado de láminas de PVC utilizando un punzón caliente. La tendencia de los resultados del experimento indica que es posible lograr el sellado de la ampollita con presiones mecánicas menores a 0.238 MPa cuando la temperatura es cercana a los 170°C. Debido a que los sellos de esta región mostraron valores de resistencia que se extienden en el rango de 12.41 - 14.47 MPa, como se mencionó anteriormente, puede inferirse que los sellos correspondientes a esta región son entre 13 y 15.2 veces más resistentes ante una carga hidrostática que el valor de referencia de Merah et al. [8] (0.95 MPa).

El resultado de los sellos que presentaron resistencia ante la carga de presión hidrostática y que mostraron valores de resistencia que se extienden en el rango de 12.41 - 14.47 MPa es presentado junto con el resultado de la resistencia promedio del cuerpo de la ampollita ensayado ante una carga de presión hidrostática (1.37 MPa) en la figura 29. Es por esto que el autor concluye al respecto que el sello de la ampollita resiste mucho más que el cuerpo de la ampollita ante una carga de presión hidrostática. Cabe mencionar que el cuerpo

de la ampolleta cuenta con un espesor de pared de 0.5 mm y la boquilla con un espesor de pared de 1.0 mm. Asimismo, el correspondiente análisis de esfuerzo plano a la resistencia del sello de la ampolleta ante carga de presión hidrostática es discutido con detalle en el Anexo D denominado “Análisis de Esfuerzos a Partir de los Resultados del Experimento para Medir la Resistencia del Sello de la Ampolleta ante una Carga de Presión Hidrostática”.

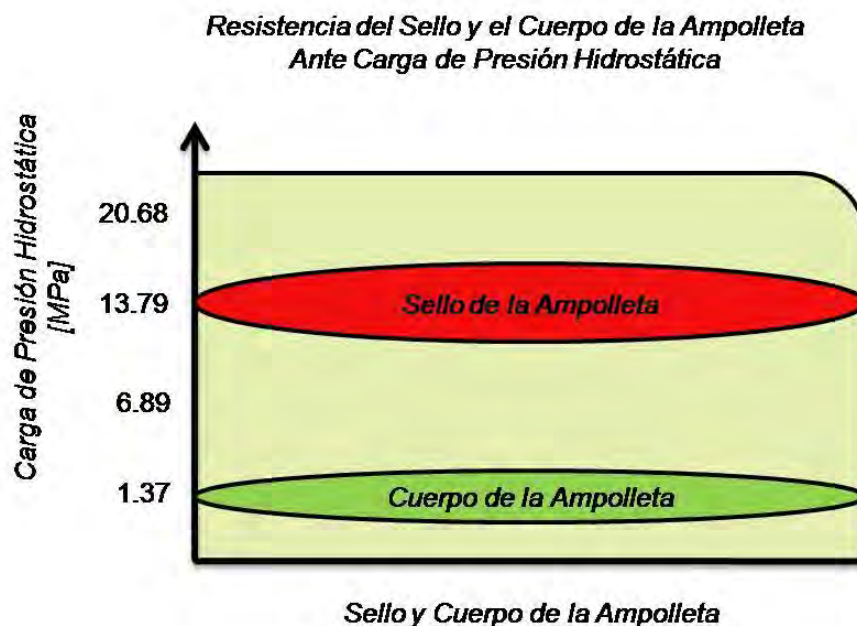


Figura 29, Resistencia del Sello y del Cuerpo de la Ampolleta Ante Presión Hidrostática

El banco de pruebas diseñado por el autor no contó con la resolución necesaria para encontrar con precisión los valores exactos de los parámetros cruzados P vs. T necesarios para lograr el sello de la ampolleta ante la unión del material de la boquilla de la ampolleta, sin embargo el banco de pruebas sí permitió encontrar rangos de valores en los que es posible lograr el sello correcto de la ampolleta. Ante esta situación el autor plantea como trabajo a futuro de la presente investigación mejoras al banco de pruebas con el afán de encontrar con precisión

la frontera límite de los parámetros cruzados P vs T necesarios para lograr el sello de la ampollita.

4.5. Ensayo de Tracción del Sello de la Ampolleta

Con el fin de corroborar los resultados obtenidos a través de los experimentos desarrollados en el presente trabajo de investigación, también se ensayó a tracción el sello de la ampollita. Para lograrlo fue necesario diseñar una muestra (espécimen) original. A continuación se describen las actividades realizadas para llevar a cabo el ensayo de tracción del sello de la ampollita.

4.5.1. Diseño de la Muestra para el Ensayo de Tracción del Sello de la Ampolleta

Los resultados obtenidos del experimento sobre el sellado de la ampollita sugieren que es posible lograr una unión adecuada del material con el simple hecho de poner en contacto dos boquillas calientes a una temperatura correcta.

La muestra para el ensayo de tracción del sello de la ampollita es mostrada en la figura 30. Su fabricación requiere de los siguientes pasos:

1. Colocación y alineación de las boquillas de dos ampollitas frente a frente
2. Para el rango de interés de la temperatura de la boquilla de la ampollita, establecer y calibrar la temperatura de la fuente de calor utilizando termopares.
3. Colocación de la fuente de calor entre las boquillas de las dos ampollitas.

4. Poner en contacto las boquillas de las dos ampolletas con la fuente de calor.
5. Remoción de la fuente de calor
6. Aplicación de una fuerza constante para desplazar las boquillas de las ampolletas 1 mm para poner en contacto ambas boquillas una contra la otra. Con el fin de evitar la implicación de la presión mecánica como un parámetro de sellado de la muestra para el ensayo de tracción al sello de la ampolleta fue necesario detener los desplazamientos de las boquillas de las ampolletas con el auxilio de un aditamento adicional de paro de desplazamiento.
7. Permitir el enfriamiento de la muestra para el ensayo de tracción al sello de la ampolleta.

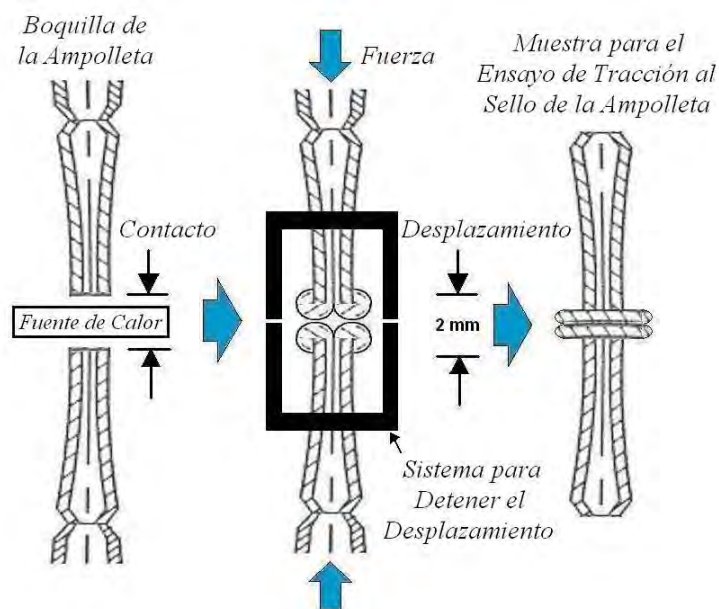


Figura 30, Dibujo de la Síntesis de Fabricación de la Muestra para el Ensayo de Tracción al Sello de la Ampolleta

Las muestras fueron ensayadas en una máquina universal Instron 4206 y su sistema de sujeción con una celda de carga de 500 kN. La figura 31 presenta que las muestras fueron sujetadas con un sistema de mordazas a una distancia de 12 mm (2 veces el diámetro de la ampolleta) de la interfase del sello con el propósito de evitar efectos de concentración de esfuerzos en la línea de sellado de conformidad con el principio de Saint-Venant, tal como Beer et al. [29] lo reportan. Las muestras fueron ensayadas a tracción con una razón de deformación de 2 mm por minuto y las pruebas fueron desarrolladas a temperatura ambiente (20°C).

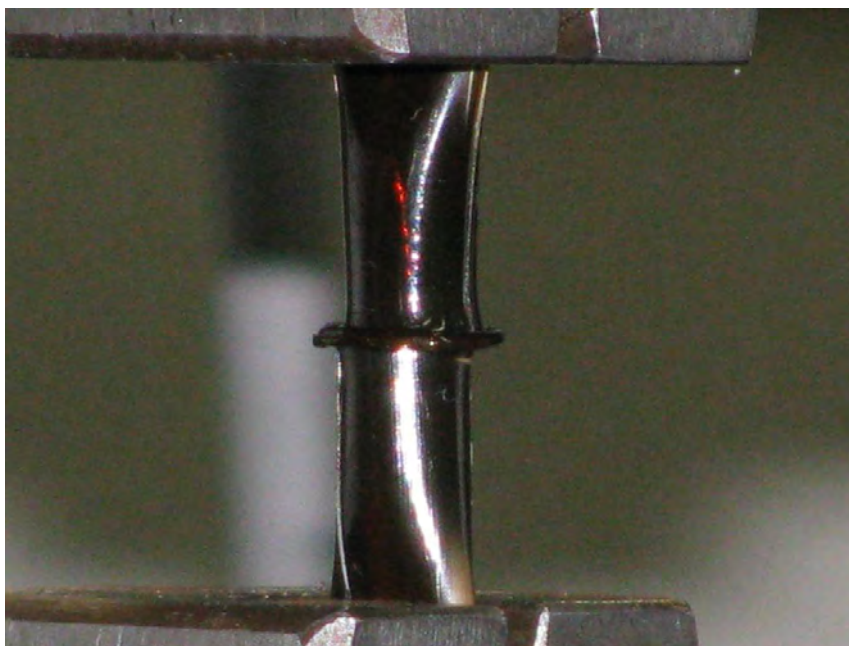


Figura 31, Muestra para el Ensayo de Tracción al Sello de la Ampolleta Montada en la Máquina Universal

El rango de interés para la temperatura de la boquilla de la ampolleta se extendió desde 140°C (35°C por debajo de la T_m que Van de Ven y Erdman [9] reportan) hasta 210°C (5 – 10°C por debajo de la fase de degradación experimental de la ampolleta).

El rango para la temperatura de la boquilla de la ampollita fue dividido en 7 niveles de 10°C cada uno, es decir el conjunto: (140, 150, 160, 170, 180, 190, 200 y 210) y se ensayaron 4 muestras para cada temperatura de la boquilla de la ampollita.

El ensayo para medir la resistencia a la desunión del sello de la ampollita se realizó una vez que la muestra se había enfriado y se encontraba a temperatura ambiente.

4.5.2. Resultados del Ensayo de Tracción al Sello de la Ampollita

Los resultados del ensayo de tracción al sello de la ampollita se reportan en las tablas 6 y 7 que se muestran a continuación.

La tabla 6 ilustra los valores promedio del esfuerzo de cedencia de las muestras para el ensayo de tracción al sello de la ampollita para las temperaturas de la boquilla de la ampollita de 140, 150 y 160°C.

Tabla 6, Resultados del Ensayo de Tracción al Sello de la Ampollita. La Unión de las Boquillas
Falla por Tensión.

Temperatura de la boquilla de las ampollitas a la que se fabricó cada muestra (Celsius)	Esfuerzo de cedencia promedio medido a temperatura ambiente (MPa)	Desviación Estándar (MPa)
160°C	33.63 MPa	5.64
150°C	32.61 MPa	5.83
140°C	29.32 MPa	5.59

Cabe mencionar que para estas temperaturas la falla se presentó en el sello de la muestra como se observa en la siguiente figura 32.



Figura 32, Falla Típica de Tensión que se Presentó en la Unión de las Boquillas. Muestras Ensayadas a Temperatura Ambiente.

La tabla 7 ilustra los valores promedio del esfuerzo de cedencia de las muestras para el ensayo de tracción al sello de la ampolleta para las temperaturas de la boquilla de la ampolleta de 170, 180, 190, 200 y 210°C.

Tabla 7, Resultados del Ensayo de Tracción al Sello de la Ampolleta. La Unión de las Boquillas no Falla. La Falla por Tensión Corresponde al Cuerpo de la Ampolleta.

Temperatura de la boquilla de la ampolleta a la que se fabricó cada muestra (Celsius)	Esfuerzo de cedencia promedio medido a temperatura ambiente (MPa)	Desviación Estándar (MPa)
210°C	42.63 MPa	5.17
200°C	42.48 MPa	4.62
190°C	41.84 MPa	4.85
180°C	40.94 MPa	5.02
170°C	40.74 MPa	6.20

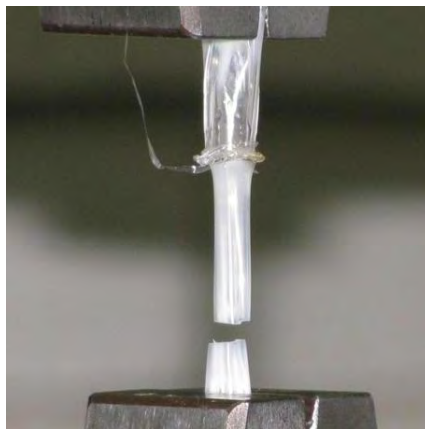


Figura 33, Falla Típica que se Presentó en el Cuerpo de las Muestras. La Falla no se Presentó en la Unión de Boquillas.

Asimismo mediante el ensayo a tracción para un grupo de 4 muestras de ampollas no selladas, es decir vírgenes, se obtuvo un esfuerzo de cedencia promedio de 47.84 MPa, con una desviación estándar de 5.86 MPa. Este valor de esfuerzo de cedencia es el valor de referencia para el PVC del que están hechas las ampollas y al mismo tiempo permitió obtener un rango para el factor de sellado¹⁵ que se extiende desde 0.61 hasta 0.89 correspondientes a las temperaturas de la boquilla de la ampolla de 140 – 210°C.

Los resultados obtenidos del ensayo de tracción al sello de la ampolla verifican que conforme la temperatura de la boquilla de la ampolla se acerca a la vecindad de los 170°C la muestra falla en un lugar diferente al sello de la muestra, con un esfuerzo de cedencia menor al esfuerzo de cedencia de una muestra virgen. Estos resultados confirman que es posible lograr un sello adecuado en la boquilla de la ampolla ejerciendo mínima presión en la boquilla de la ampolla

¹⁵ El factor de sellado es la razón entre el esfuerzo de cedencia obtenido a partir del ensayo de tracción de una probeta con línea de sello y el esfuerzo de cedencia obtenido a partir del ensayo de tracción de una probeta virgen o sin línea de sello.

cuando el rango de temperatura de la boquilla de la ampolleta se encuentre entre 170 y 210°C.

El presente capítulo tiene el cometido de reportar los resultados de los experimentos del autor, no obstante y debido a que en las secciones sucesivas de la Tesis los resultados del ensayo de tracción al sello de la ampolleta no serán retomados, el autor considera relevante incluir una breve comparación de las observaciones obtenidas por el autor con los resultados del ensayo de tracción al sello de la ampolleta con los resultados obtenidos por Merhar et al. [7] ensayando a tracción muestras de PVC con línea de sellado elaboradas mediante inyección con molde, como se muestra a continuación en la representación esquemática de la figura 34 sobre la elaboración de una muestra para tracción con línea de sellado.

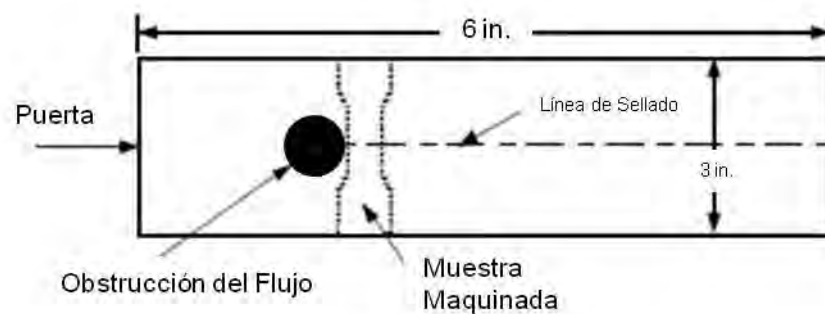


Figura 34, Muestra de PVC con Línea de Sellado Elaborada con Inyección, Merhar et al. [7]

Merhar obtuvo 38.26 MPa, 38.75 MPa y 38.66 MPa de esfuerzo de cedencia para muestras de PVC con línea de sellado, las muestras fueron elaboradas con temperaturas de sellado de 195°C, 203°C y 210°C respectivamente y a presiones de inyección de 13.78 MPa, 27.57 MPa y 41.36 MPa respectivamente.

La comparación entre los ensayos de tracción de Merhar et al. [7] y del autor se encuentra basada en:

- a) La configuración de las muestras es similar. La muestra de PVC elaborada por Merhar et al [7] con línea de sellado elaborada mediante inyección con molde (ver figura 34) y la muestra de PVC elaborada por el autor con línea de sellado elaborada mediante la unión de dos boquillas de ampolleta (ver figura 30).
- b) La relación que existe entre los parámetros de sellado de Merhar et al [7] y del autor se muestran en la siguiente tabla 8:

Tabla 8, Relación Existente entre los Parámetros de Sellado de Merhar et al [7] y del Autor

Parámetro	Merhar et al [7]	Autor
Temperatura del material para sellado de la muestra (Celsius)	195, 203 y 210°C	190, 200 y 210°C
Presión ejercida al material para sellado de la muestra (MPa)	13.78, 27.57 y 41.36 MPa	0 MPa
Esfuerzos de cedencia obtenidos para cada muestra ensayada (MPa)	38.26, 38.75 y 38.66 MPa	41.84, 42.48 y 42.63 MPa

- c) La evidencia que ofrecen los resultados de Merhar et al. [7] sobre los parámetros de sellado T y P , se encuentra basada en el correspondiente decremento en el esfuerzo de cedencia de 38.75 MPa a 38.66 MPa para las muestras de PVC con línea de sellado elaboradas con un incremento en la temperatura de sellado respectiva de 203°C a 210°C y con un incremento en la presión de inyección respectiva de 27.57 MPa a 41.36 MPa. Este resultado sugiere que la muestra ensayada se encontraba cercana a la fase de degradación del material y confirma que la presión no es un parámetro significativo para el sellado de muestras de PVC.

- d) En el caso del presente trabajo los esfuerzos de cedencia obtenidos para cada muestra ensayada son incrementales; y dado que cada muestra ensayada se realizó sin la presencia de presión mecánica, se confirma que la presión no es un parámetro significativo para el sellado de ampollitas de PVC.

De esta manera se concluye el capítulo correspondiente a experimentación y se da paso al capítulo correspondiente a la discusión de los resultados a la luz de la información recabada durante la revisión del Estado del Arte.

5. Recomendaciones para el Diseño del Cabezal de Sellado

Sellado

La presente investigación permite aprovechar de manera significativa la secuencia de pasos del proceso propuesto por el autor para el sellado de ampollitas y los rangos de los parámetros de sellado obtenidos experimentalmente. Esta investigación proporciona información valiosa para desarrollar tecnología para el sellado de ampollitas de PVC. Un caso posible de desarrollo de tecnología lo representa el desarrollo de una máquina automática selladora de ampollitas que cuente con un alto desempeño técnico y económico. La lista de recomendaciones que fue elaborada para el diseño del cabezal de sellado se reporta a continuación conforme a la secuencia de pasos del proceso propuesto para el sellado de ampollitas.

5.1. Recomendaciones para la Preparación de la Superficie

Se requiere del desarrollo de un sistema de llenado de líquido, capaz de llenar la ampollita sin dejar partículas de líquido en la zona de sellado de la ampollita.

5.2. Recomendaciones para la Exposición a una Fuente de Calor

- a) Asegurar que la temperatura de la boquilla de la ampollita, al momento de ejercer la presión mecánica, se encuentre en el rango: (170 – 210°C).
- b) El sello de la ampollita obtenido en el banco de pruebas cuenta con por lo menos 13 veces la resistencia ante carga de presión hidrostática que las aplicaciones tradicionales de PVC. Esta situación indica que el espesor de la boquilla de la ampollita puede reducirse hasta en 80% de su actual espesor (0.8 mm), de tal forma que el espesor requerido de la ampollita es 0.16 mm. Debido a que el flujo de calor es inversamente proporcional al espesor del material para calentar el material por contacto, el cambio propuesto en el espesor de la ampollita ahorrará alrededor del 80% de la energía consumida para calentar la boquilla ampollita.
- c) Se recomienda una fuente de calor basada en el principio de convección térmica (aire caliente dirigido) que deberá calentar la boquilla de la ampollita hasta que alcance el rango de temperatura de (170 – 210°C).

5.3. Recomendaciones para el Tiempo de Exposición a una Fuente de Calor

El principio de convección térmica (aire caliente dirigido) como fuente de calor reduce significativamente el tiempo de exposición a la fuente de calor con respecto al principio de radiación térmica (resistencia eléctrica). Con base en los experimentos realizados por el grupo de investigadores del CDMIT [32], el

tiempo esperado de calentamiento de la boquilla utilizando aire caliente dirigido como fuente de calor oscila entre 3 y 5 s.

5.4. Recomendaciones para la Aplicación de Presión

Mecánica

a) Se recomienda ejercer la presión mecánica requerida para unir el material de la boquilla de la ampollita utilizando la presión que ejerce el flujo de aire que es utilizado para calentar la boquilla. La figura 35 muestra esquemáticamente que el aire caliente bajo la configuración propuesta cumple dos funciones, que son tanto el calentamiento de la boquilla, así como el desplazamiento del material caliente para su posterior unión. Las pruebas realizadas proporcionan información útil para respaldar esta recomendación, sin embargo se recomienda realizar una investigación de mayor profundidad al respecto, así como se refiere en la sección 7.1 correspondiente a las actividades propuestas para trabajo a futuro.

<p>Información Confidencial</p> <p>Para mayor información comuníquese al CDMIT con los Profesores: Dr. Ramírez Reivich y Dr. López Parra y/o con el Autor al correo: gustavo_olivaresmx@yahoo.com.mx</p>
--

Figura 35. Calentamiento y Sellado de la Boquilla de la Ampolleta Utilizando Aire a Presión

b) La ampollita requiere fijarse como una viga simplemente apoyada y con carga al centro. Esto con el propósito de que la ampollita permanezca en

una posición vertical estable, la cual ayudará a su vez a que el flujo de aire caliente trabaje en forma precisa y repetible en la punta de la ampolleta.

- c) La ampolleta requiere trasladarse rotando sobre su propio eje para forzar un calentamiento uniforme y un flujo plástico de material distribuido en el perímetro de la boquilla de la ampolleta.

5.5. Recomendaciones para el Enfriamiento del Sello

El flujo de aire, que ejerce la presión requerida para unir el material de la boquilla, deberá mantenerse y disminuir su temperatura a lo largo de 4 etapas para enfriar gradualmente el sello y asegurar un sello correcto. La figura 36 muestra una configuración de desplazamiento rotatorio de la ampolleta e indica la localización de cada una de las 4 etapas. Cada etapa de desplazamiento corresponde a una temperatura específica del flujo de aire a presión, de tal manera que la etapa posterior a la entrada (primera etapa) cuenta con la temperatura de mayor valor para el flujo de aire a presión y la etapa previa a la salida (etapa final) cuenta con la temperatura de menor valor para el flujo de aire a presión. Esta configuración proyecta:

- a) Calentamiento de la boquilla
- b) Sellado de la boquilla
- c) Enfriamiento del sello disminuyendo en cascada la temperatura del aire y manteniendo la presión del aire constante

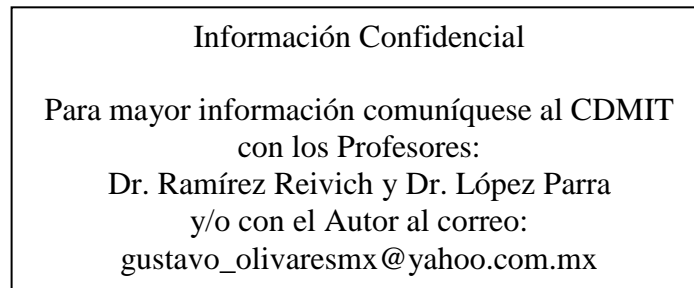


Figura 36. Configuración de Desplazamiento del Cabezal de Sellado para Calentamiento de la Boquilla, Sellado de la Boquilla y Enfriamiento del Sello Disminuyendo en Cascada la Temperatura del Aire y Manteniendo la Presión del Aire Constante

5.6. Recomendaciones para la Verificación del Sello

Para una máquina selladora de ampollitas diseñada utilizando las recomendaciones de diseño resultado de la presente investigación, la eficiencia (η) esperada se encuentra alrededor de 99.9999% si la ampollita se encuentra libre de defectos de manufactura, esto tomando en cuenta la experimentación realizada. Esta eficiencia esperada libera la necesidad de instalar un sistema de verificación del sello de la ampollita, pero a cambio exige un programa de mantenimiento estricto y periódico. Este pronóstico está basado en la experimentación realizada, sin embargo no ha sido comprobado experimentalmente en un banco de pruebas para validar los parámetros de los procesos correspondientes.

6. Discusión

El resultado de los experimentos que se ilustran en la figura 28 (página 85) muestra que la tendencia del valor de la presión mecánica aplicada a la boquilla de la ampollita es descendiente conforme la temperatura de la boquilla asciende. Dicho comportamiento hace pensar que es posible lograr el sellado de la ampollita con presiones mecánicas mínimas (cercasas a cero) cuando la temperatura de la boquilla de la ampollita se encuentra cercana a los 170°C. Sin embargo como se explicó, el diseño del banco de pruebas une el material que se encuentra en la boquilla de la ampollita con un solo impacto. La fuerza de impacto la proporciona un cilindro neumático que trabaja con una presión de aire que el autor pudo disminuir hasta un mínimo de 0.05 MPa (0.5 bar). Las fuerzas de fricción que existen entre el émbolo y la camisa del cilindro neumático impiden realizar pruebas en el rango (0 – 0.05 MPa). Por otro lado, el diseño del banco de pruebas ejerce incrementos de presión hidrostática sobre el sello de la ampollita de manera abrupta. Los incrementos de presión son ejercidos de manera manual a través de una palanca conectada a un cilindro hidráulico que trabaja a altas presiones. El autor pudo disminuir la magnitud de los incrementos de presión hidrostática hasta un mínimo de 0.7 MPa. De la misma manera que en el caso del cilindro neumático, las fuerzas de fricción que existen entre el émbolo y la camisa del cilindro hidráulico impiden ejercer incrementos de presión menores a 0.7 MPa (7 bar). Dadas las presentes circunstancias el autor considera que el diseño de un

banco de pruebas con mayor resolución permitiría encontrar con precisión el límite de resistencia del sello.

Asimismo el banco de pruebas utilizó como fuente de calor una resistencia eléctrica. A la luz del trabajo de investigación y de los resultados obtenidos puede afirmarse que la resistencia eléctrica representa una fuente de calor que permite contar con un correcto control de la temperatura de la boquilla de la ampolleta, sin embargo la utilización de una resistencia eléctrica como fuente de calor incrementa el tiempo de exposición del material a la fuente de calor. Esto se debe a que la resistencia eléctrica radia calor en todas direcciones calentando cualquier elemento o cuerpo que se encuentre a su alrededor y no únicamente la boquilla de la ampolleta. Como ejemplo de la anterior afirmación se plantea que si la consideración para la fuente de calor del banco de pruebas se hubiera basado en el principio de calentamiento de convección (flujo de aire caliente) probablemente existiría una disminución del tiempo de calentamiento destinando un flujo de aire caliente dirigido hacia la boquilla de la ampolleta.

El tamaño de la muestra ensayada en cada uno de los experimentos es pequeño (cuatro muestras por experimento), sin embargo se observa que los resultados obtenidos son congruentes en general con la información recabada en la planta industrial y caen dentro de los rangos reportados por diferentes autores que han realizado investigaciones afines. Normalmente los autores que trabajan con un tamaño de muestra representativo recomiendan un tamaño de muestra con al menos 30 elementos.

La geometría del dado de conformado utilizado en el paso 4 (presión mecánica) es semiesférica. Esta geometría se copió de la geometría final deseada (en la

planta industrial) para la boquilla de la ampollita. Se estima sin embargo que el diseño y prueba de diferentes geometrías del dado, que induzcan flujos plásticos del material en distintas direcciones, arrojará información que permitirá reducir aún más los tiempos y eficiencias de sellado. Como ejemplo de esto, se plantea una geometría alterna que se muestra en la figura 37. Esta geometría del dado presentará un flujo plástico del material cuyas fuerzas se pronostican tangenciales a la superficie de unión y propone una cavidad de alivio para liberar esfuerzos normales en la parte central del dado.

Información Confidencial
Para mayor información comuníquese al CDMIT
con los Profesores:
Dr. Ramírez Reivich y Dr. López Parra
y/o con el Autor al correo:
gustavo_olivaresmx@yahoo.com.mx

Figura 37, Diferente geometría del dado

Por último, el ensayo de tracción realizado al sello de la ampollita, si bien no fue realizado con muestras normalizadas y tampoco con la certeza de contar con resina base de PVC, se realizó con muestras diseñadas por el autor y presentó resultados que se encuentran cercanos a los resultados publicados por autores que han realizado pruebas de tracción a muestras normalizadas de resina base de PVC.

7. Conclusiones

Los tres objetivos planteados para esta investigación se lograron satisfactoriamente.

El primer objetivo planteado expresa: “Definir un proceso de sellado de ampollitas de PVC”. Este objetivo se logró proponiendo un proceso para el sellado de ampollitas de PVC. El proceso propuesto incluye seis pasos básicos que se muestran en la figura 1 (página 9). El proceso establecido para el sellado de ampollitas permitió dar seguimiento y reportar de manera estructurada la investigación.

El segundo objetivo planteado expresa: “Establecer rangos de operación para producir un sello de ampollita de PVC resistente y hermético”. Los resultados obtenidos durante la etapa experimental de la investigación permitieron alcanzar este objetivo. Los resultados obtenidos establecen que la temperatura de sellado corresponde al rango de 170 – 210°C y que cuando la temperatura se encuentra en dicho rango las presiones mecánicas deberán ser de 0.238 MPa o menores.

Finalmente el tercer objetivo planteado expresa: “Producir una lista de recomendaciones para el diseño del cabezal de sellado que se integrará en un sistema continuo de llenado y sellado de ampollitas, que se integrarán en la siguiente máquina llenadora-selladora, la cual será desarrollada por el grupo de diseñadores del CDMIT-UNAM”. El establecimiento de los rangos de operación para producir un sello de ampollita de PVC resistente y hermético permitió

especificar la lista de recomendaciones para el diseño del cabezal de sellado. Esta lista de recomendaciones es mostrada en el capítulo 5 de la presente Tesis.

El desarrollo de una investigación basada en experimentación, ha permitido la generación de conocimiento útil para sustentar la toma de decisiones durante el desarrollo de nueva tecnología referente al sellado de ampollitas de PVC. Conocimiento que ofrece la posibilidad de lograr mayor mérito tecnológico con respecto a la tecnología existente. El conjunto de resultados obtenidos a partir de la presente investigación representa guías concretas para el desarrollo de tecnología de vanguardia para el sellado de ampollitas de PVC.

7.1. Trabajo a Futuro

La presente investigación plantea un conjunto de elementos para profundizar en la generación de conocimiento sobre el sellado de ampollitas de PVC. Dichos elementos son:

- a) El rediseño del banco de pruebas para la experimentación sobre el sellado de la ampollita. El objetivo de rediseñar el banco de pruebas es obtener una mayor resolución para encontrar con precisión el límite de resistencia del sello, así como se mencionó anteriormente en la discusión.
- b) Continuar la búsqueda de diferentes principios de calentamiento para el sellado de ampollitas, por ejemplo la utilización del principio de convección térmica (aire caliente) para el sellado de ampollitas, tal como Olivares y Ramírez [23] lo han reportado. Explorar métodos de sellado de ampollitas que impliquen ahorro de energía y buscar la posibilidad de evaluar dichos

métodos mediante nuevas ideas para el sellado de ampollitas que se basen en técnicas actuales de evaluación del sellado de materiales termoplásticos, como por ejemplo las técnicas de evaluación del sellado de materiales termoplásticos reportados por Kamweld Technologies [2] y Lilian y Fritz [22]. Otra opción para verificar el sellado de materiales termoplásticos la ofrecen Jarus et al. [10], Dodin [13] y Leighton et al. [14], que reportan la inspección microscópica y estereoscópica del sello de materiales termoplásticos, (técnicas actuales de evaluación del sello).

- c) Diseñar y ensayar diferentes geometrías del dado, que induzcan flujos plásticos del material en distintas direcciones con el fin de reducir aún más los tiempos y eficiencias de sellado, así como se mencionó anteriormente durante la discusión.
- d) Se recomienda aumentar el tamaño de las muestras ensayadas a tamaños de muestras de 30 elementos o más para incrementar la confiabilidad de los resultados de los experimentos a realizar, así como se mencionó anteriormente durante la discusión.
- e) Con el fin de validar los conceptos propuestos en las secciones 5.4 y 5.5 correspondientes a las recomendaciones para la aplicación mecánica y para el enfriamiento del sello respectivamente se proponen las siguientes actividades:
 1. Realizar una búsqueda bibliográfica en revistas especializadas, patentes y equipos y maquinaria especializada.

2. Basado en la revisión bibliográfica diseñar y desarrollar al menos tres iteraciones de prototipos.
3. Basado en la revisión bibliográfica diseñar y elaborar experimentos con el prototipo resultante.
4. Proponer un modelo y calibrarlo con los experimentos realizados.
5. Patentar el sistema desarrollado.
6. Reportar el conocimiento generado.

8. Aportaciones del Autor al Estado del Arte

Las aportaciones del presente trabajo de investigación representan el avance que muestra el estado del arte al problema del sellado de ampollitas de PVC con calor después de la realización del presente trabajo de investigación. Las aportaciones realizadas se presentan a continuación:

- a) Definición de un proceso de sellado de ampollitas de PVC que es útil para proponer nuevos procesos de sellado de ampollitas de materiales termoplásticos.
- b) Se establecieron rangos de los parámetros de sellado:
 - a. Temperatura de la boquilla de la ampollita.
 - b. Período de tiempo de exposición de la boquilla de la ampollita a una fuente de calor, (resistencia eléctrica de 3000W a una distancia fija de 3 mm de la boquilla de la ampollita).
 - c. Presión mecánica aplicada a la boquilla de la ampollita.

Dichos rangos representan un elemento fundamental para el desarrollo de tecnología innovadora para el sellado de ampollitas de PVC.

- c) Basado en los rangos obtenidos de los parámetros de sellado se generó un conjunto de recomendaciones para el diseño del cabezal de sellado de una máquina novedosa selladora de ampollitas de PVC.
- d) Desarrollo de un banco de pruebas innovador que dio luz para establecer los rangos de los parámetros de sellado: temperatura de la boquilla de la ampollita, período de tiempo de exposición a la fuente de calor y presión

mecánica aplicada a la boquilla de la ampolleta. El banco de pruebas es susceptible de mejoras para obtener mayor resolución y precisión en los rangos de operación de los parámetros de sellado obtenidos.

La recopilación y análisis detallado de vasta y novedosa información bibliográfica relacionada con el sellado de PVC y materiales termoplásticos diversos, es la base de información que justifica las aportaciones y la identificación de posibles trabajos futuros.

Las aportaciones del autor al Estado del Arte son analizadas con detalle en el anexo A: “Comparaciones del Autor con el Estado del Arte” de la presente Tesis. Este análisis se referenció tomando en cuenta las aportaciones de diferentes autores al Estado del Arte.

Referencias

- [1] **Hishinuma, K.**, Heat Sealing Technology and Engineering for Packaging Principles and Applications, first ed., DEStech Publications, Pennsylvania USA, 2009.
- [2] **Kamweld Technologies.**, Manual for Plastic Welding, <http://www.kamweld.com>; 2003.
- [3] **Balkan, O., Demirer, H., Ezdesir, A. and Yildirim, H.**, Effects of Welding Procedures on Mechanical and Morphological Properties of Hot Gas Butt Welded PE, PP, and PVC Sheets, Journal of Polymer Engineering and Science, 2008, **48** (4) 732-746.
- [4] **Kitagawa, M.**, Power law relationship between yield stress and shear modulus for glassy polymers, Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition, 1977, **15** (9) 1601-1611.
- [5] **Tadmor, Z. and Gogos, C.G.**, Principles of Polymer Processing, second ed., John Wiley & Sons, New York, U.S.A, 2006.
- [6] **Hitt, D.J. and Gilbert, M.**, Tensile properties of PVC at elevated temperatures, Materials Science and Technology, 1992, **8**, 739-744
- [7] **Merhar, C.F., Beiter, K.A. and Ishii, K.**, Weld-line strength in injection, molded PVC parts, in: Proceedings of the 52nd SPE Annual Techn. Conference, 1994, pp. 3450-3454.
- [8] **Merah, N., Irfan-ul-Haq, M. and Khan, Z.**, Temperature and weld-line effects on mechanical properties of CPVC, Journal of Materials Processing Technology, 2003, **142**, 247-255.
- [9] **Van de Ven, J.D. and Erdman, A.G.**, Hot pin welding of thin poly(vinylchloride) sheet, Journal of Vinyl and Additive Technology, 2007, **13** (2) 110-115.
- [10] **Jarus, D., Summers, J.W., Hiltner, A. and Baer, E.**, Weld line strength of poly(vinyl chloride)/polyethylene blends, Polymer Journal, 2000, **41**, 3057-3068.

- [11] **Lin, C.B.** and **Cheng, L.**, Friction welding of similar and dissimilar materials: PMMA and PVC, *Journal of Polymer Engineering & Science*, 2000, **40** (8) 1931-1941.
- [12] **Weier, J. E.**, The influence of acrylic impact modifiers on the weld strength of extruded rigid PVC, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 1997, **3** (1) 21-27.
- [13] **Dodin, M.**, Relationship of welding technology to degree of plasticization in the PVC films, *Journal of Vinyl Technology*, 1987, **9** (4) 67-70.
- [14] **Leighton, J., et al.**, RF welding of PVC and other thermoplastic compounds, *Journal of Vinyl Technology*, 1993, **15** (3) 188-192.
- [15] **Hammer, S., Tchoudakov, R., Mechrez, G., Cohen, Y. and Narkis, M.**, Modification of porous PVC particles with PS and P(St-co-MMA) using a surfactant-free aqueous dispersion polymerization technique, *Journal of Polymers for Advanced Technologies*, 2008, **19** (6) 578-587.
- [16] **Johnson, F. A., Radon, J. C.**, Effect of molecular relaxations on the fracture behavior of poly(vinyl chloride), *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*, 1975, **13** (2) 495-516.
- [17] **Lillis, R.**, Review of Pulmonary Effects of Poly(vinyl Chloride) and Vinyl Chloride Exposure, *Environmental Health Perspectives*, 1981, (41) 167-169.
- [18] **Rohe, F.P.**, Eliminating costly tests for PVC geomembranes by using new ASTM D 7177 air channel test for field seams, in: *Proceedings of the First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition*, 2008.
- [19] **Stokes, V. K.**, Hot-tool and vibration welding of poly(vinyl chloride), *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2000, **6** (3), 158-165.
- [20] **Wypych, G.**, *PVC Degradation and Stabilization*, second ed., ChemTec Publishing, Toronto, Canada, 2008.
- [21] **Chaves, F.J.P., da Silva, L.F.M. and de Castro, P.M.S.T.**, Adhesively bonded T-joints in polyvinyl chloride windows, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2008, 222, 159-174.

- [22] **Lilian, L.** and **Fritz, Y.**, Effects of Heat-seal Variables on Water Vapor Ingress in Small High-Barrier Pharmaceutical Blisters, *Journal of Applied Packaging Research*, 2009, **3**, (2) 75-90.
- [23] **Olivares, G.** and **Ramírez, A.C.**, Análisis y Elaboración de Esquemas como Solución a Problemas de Diseño, Proceedings of the XIII Conference of the Mexican Society of Mechanical Engineering (SOMIM), 2007, pp. .
- [24] **Glegg, G.**, *The Selection of Design*, first ed., Cambridge University Press, England, 1971.
- [25] **Pahl, G.** and **Beitz, W.**, *Engineering Design*, third ed., Springer-Verlag, London, England, 2007.
- [26] **French, M.**, *Conceptual Design for Engineers*, third ed., The Design Council, Springer-Verlag, London, England, 1998.
- [27] **Hollins, et al.**, *Successful Product Design*, first ed., Butterworth & Co, England, 1994.
- [28] **Sandler, B.**, *Creative Machine Design*, first ed., Paragon House Publishers, New York, 1985.
- [29] **Beer, F.**, **Johnston, E.** and **DeWolf, J.**, *Mecánica de Materiales*, first ed., McGraw-Hill, México, 2007.
- [30] **French, M.** and **Ramírez, A.C.**, Towards A Comparative Study of Pneumatic Quarter-Turn Valve Actuators 1995, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, 1996, **210** (B6) 543-552.
- [31] **Olivares, G.** and **Ramírez, A.C.**, Diseño de un Banco de Pruebas para la Evaluación del Sello en Ampolletas, Proceedings of the XV Conference of the Mexican Society of Mechanical Engineering (SOMIM), 2009, pp. 173-180.
- [32] **Olivares, G.** and **Ramírez, A.C.**, Investigación de Esquemas Paramétricos de Diseño Conceptual para el Sellado de Ampolletas Plásticas, Proceedings of the XIV Conference of the Mexican Society of Mechanical Engineering (SOMIM), 2008, pp. 417-434.

- [33] **Wypych, G.**, PVC Degradation and Stabilization, second ed., ChemTec Publishing, Toronto, Canada, 2008.
- [34] **ISO**, Plastics-Vocabulary, ISO 472, International Organization for Standardization, Switzerland, 1999.
- [35] **Isotani, M.**, Japón. Patente. 2006. *Sealing Apparatus for Bag-Making, Packaging and Filling Machine*. JP2006131265.
- [36] **Bernd, H.**, EUA. Patente. 2005. *Moulding Method, in Particular a Blowing or Vacuum Moulding Method for Production of a Dispensing Container Filled with a Medium for Dispensing*. US 2005/0156360 A1.
- [37] **Wang, S.M.**, China. Patente. 2005. *Sealed Driving Mechanism of Heating Unit in Use for Filling Machine*. CN1696017.
- [38] **Varlet, J-P.**, España. Patente. 2004. *Máquina y Procedimeinto para el Llenado y el Precintado de Recipientes*. B65B31/02,B65B31/16.
- [39] **Willstumpf, E.**, EUA. Patente. 2003. *Method of Venting a Filled Bottle which is Closed by Means of an Elastic Stopper, and Apparatus for Implementing the Method*. US 2003/0221395 A1.
- [40] **Gómez, L.V.**, España. Patente. 2003. *Máquina para la Fabricación de Envases de Contenido Consumible*. B65B9/04,B29C51/00.
- [41] **Lee, D.**, Corea. Patente. 2002. *Method for Packing Drug Type Medical Supplies and Dual Packing System*. KR20020004505.
- [42] **Bullinger, S.**, Alemania. Patente. 2002. *Sealing Ampoules by Means of a Laser Beam*. DE29824611U
- [43] **Odell, R.B.**, EUA. Patente. 2001. *Method and Apparatus for Manufacturing, Filling and Packaging Medical Devices and Medical Containers*. US6263641B1.
- [44] **Kato, T.**, Japón. Patente. 1997. *Sealing Agent Filling Device for Grommet*. JP9182254.
- [45] **Bernd, H.**, EUA. Patente. 1997. *Blow Molding Sealed Container System*. US005687550.
- [46] **Rosen, R.**, EUA. Patente. 1996. *Disposable Rolling Diaphragm Filling Unit*. US005540568.

- [47] **Shimizu, K.**, EUA. Patente. 1995. *Filling/Sealing Apparatus for Ampoule or the Like and Method for Monitoring this Apparatus*. US5390469(A1).
- [48] **Betts, R.E.**, EUA. Patente. 1993. *Sterilizable Hermetically-Sealed Substantially Glass Container*. US005230427.
- [49] **Baruffato, R.**, EUA. Patente. 1993. *Device for Sealing Open Ends of Monodose Containers Already Filled with Liquid or Viscous Solutions*. US005207049
- [50] **Gianelly, G.C.**, México. Patente. 1990. *Mejoras en aparato para empaquetar productos al vacío*. MX 161008.
- [51] **Yamada, Y.**, Japón. Patente. 1989. *Sealing Apparatus for Filling Mouth of Packaging Bag*. JP1308725
- [52] **Redmond, S.**, España. Patente. 1989. *Máquina Compacta de Conformado-Llenado-Sellado para la Producción Automática de Envases Herméticos*. B65B3/00,B65B7/00
- [53] **Asada, T.**, Japón. Patente. 1988. *Sterilization of Aseptic Filling and Sealing Apparatus and Removal of Sterilizing Liquid*. JP63272643.
- [54] **Yonemochi, Y.**, Japón. Patente. 1987. *Melt-Sealing Ampoule and Its Melt-Sealing Method*. JP62007644
- [55] **Kovacs, L.**, EUA. Patente. 1985. *Method of an Apparatus for Forming, Filling and Sealing Packages*. US4532753.
- [56] **Eli Lilly and Company.**, España. Patente. 1985. *Método para Sellar una Cápsula de Gelatina Ingerible*. A61J3/07
- [57] **Kovacs, L.**, Gran Bretaña. Patente. 1984. *Forming, Filling and Sealing Packages*. GB2135646.
- [58] **Bausch & Strobel Maschf.**, Gran Bretaña. Patente. 1977. *Bottle or Ampoule Filling and Closing Machine*. GB1492595.
- [59] **Bausch, W.L.**, EUA. Patente. 1976. *Apparatus for Filling and Sealing Ampoules*. US3986320.
- [60] **Bausch, W.L.**, Alemania. Patente. 1975. *Ampullenfuell-Und-Verschliessmaschine*. DE2352646.

- [61] **Armando, R.J.**, España. Patente. 1968. *Dispositivo Llenador y Sellador de Ampolleta Destinadas a Contener Productos Medicinales*. A61J5/00.
- [62] **Cozzoli, F.J.**, Gran Bretaña. Patente. 1952. *Improvements in Combined Ampoule Filling and Sealing Machine*. GB671952.
- [63] **Meyer, F.**, Gran Bretaña. Patente. 1952. *Improvements in or Relating to the Manufacture of Plastic Fluid Containers, Especially Ampoules*. GB670313.
- [64] **Meyer, A.**, Gran Bretaña. Patente. 1932. *Apparatus for Sealing Ampoules and the Like*. GB380384.
- [65] **Ramírez, A.C., López-Parra, M. and Olivares, G.**, 2006. *Estudio de Mercado para el CONACYT*, (Propuesta AVANCE-Investigadores de CDMIT para el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México). México Distrito Federal: CONACYT.
- [66] **Byung-Gil Jeong., Suk-Jin, H., Ghang-Youl, M. and Byung-Sung, K.**, Reliability Verification of Hermetic Package With Nanoliter Cavity for RF-Micro Device, IEEE Transactions On Advanced Packaging, 2009.
- [67] **SangWook Park., Byung Chul, K. and Dai Gil, L.**, Tensile Strength of Joints Bonded With a Nano-particle-Reinforced Adhesive, Journal of Adhesion Science and Technology, 2009, **23**, 95-113.
- [68] **Das Neves, P.J.C., da Silva L.F.M. and Adams, R.D.**, Analysis of Mixed Adhesive Bonded Joints Part I: Theoretical Formulation, Journal of Adhesion Science and Technology, 2008, **23**, 1-34.
- [69] **Graner Solana, A., Crocombe, A.D. and Ashcroft, I.A.**, Fatigue Life and Backface Strain Predictions in Adhesively Bonded Joints, International Journal of Adhesion & Adhesives, 2010, **30**, 36-42.
- [70] **Sylvain Chataigner., Caron, J-F., Diaz, A.D., Aubagnac, C. and Benzarti, K.**, Non-Linear Failure Criteria for a Double Lap Bonded Joint, International Journal of Adhesion & Adhesives, 2010, **30**, 10-20.
- [71] **Ageorges, C. and Ye, L.**, Resistance Welding of Metal/Thermoplastic Composite Joints, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2001, **14**, 449-475.

- [72] **Aithani, D., Lockhart, H., Auras, R. and Tanprasert, K.**, Predicting The Strongest Peelable Seal For 'Easy-Open' Packaging Applications, *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 2006, **22** (4) 247-263.
- [73] **De Baere, I., Voet, E., Van Paepegem, W., Vlekken, J., Cnudde, V., Masschaele, B. and DgriECK, J.**, Strain Monitoring in Thermoplastic Composites with Optical Fiber Sensors: Embedding Process, Visualization with Micro-tomography, and Fatigue Results, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2007, **20** (5) 453-472.
- [74] **Cava, D., Giménez, E., Gavara, R. and Lagaron, J.M.**, Comparative Performance and Barrier Properties of Biodegradable Thermoplastics and Nanobiocomposites versus PET for Food Packaging Applications, *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 2006, **22** (4) 265-274.
- [75] **Drzal, L. T. and Raghavendran, V. K.**, Adhesion of Thermoplastic Matrices to Carbon Fibers: Effect of Polymer Molecular Weight and Fiber Surface Chemistry, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2003, **16** (1) 21-30.
- [76] **Fan, X., Verpoest, I., Pflug, J., Vandepitte, D. and Bratfisch, P.**, Investigation of Continuously Produced Thermoplastic Honeycomb Processing _ Part I: Thermoforming, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2009, **11** (2-3) 151-178.
- [77] **Fan, X., Verpoest, I., Pflug, J., Vandepitte, D. and Bratfisch, P.**, Investigation of Continuously Produced Thermoplastic Honeycomb Processing _ Part II: Fusion Bonding, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2009, **11** (2-3) 179-198.
- [78] **Gupta, V., Mathur, R.B., Dhama, T.L. and Bahl, O.P.**, Carbon/Kevlar/PEEK Thermoplastic Composites, *High Performance Polymers*, 2002, **14** (3) 292.
- [79] **Sage Publications**, Industry News, *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 2002, **18** 5-15.
- [80] **Sage Publications**, Industry News, *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 2004, **20** 7-30.

- [81] **Kagan, V. A., Bray, R. G. and Kuhn, W. P.**, Laser Transmission Welding of Semi-Crystalline Thermoplastics—Part I: Optical Characterization of Nylon Based Plastics, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2002, **21** (12) 1101-1122.
- [82] **Kagan, V.A. and Woosman N.M.**, Efficiency of Clearwelding Technology for Polyamides, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2004, **23** (4) 351-359.
- [83] **Kagan, V.A. and Nichols, R.J.**, Benefits of Induction Welding of Reinforced Thermoplastics in High Performance Applications, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2005, **24** (13) 1345-1352.
- [84] **Kumar, G. and Ramani, K.**, Characterization of Wood-Polypropylene Composite Sandwich System, *Journal of Composite Materials*, 2000, **34** (18) 1582-1599.
- [85] **Van Malsen, J., Tenpierik, M.J., Looman, R.M.J. and Cauberg, J.J.M.**, Heat Seal Strength of Barrier Films Used in Vacuum Insulation Panels At Room Temperature and At -130°C, *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 2008, **24** (1) 35-52.
- [86] **Mantell, S.C. and Linstrom, E.J.**, Nondestructive Evaluation of Interlaminar Bonding for in Situ Consolidation of Polymer Composites, *Journal of Composite Materials*, 1999, **33** (2) 124-157.
- [87] **Messler, Jr, R.W.**, Joining Composite Materials and Structures: Some Thought-Provoking Possibilities, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2004, **17** (1) 51-75.
- [88] **Mitschang, P., Velthuis, R., Emrich, S. and Kopnarski, M.**, Induction Heated Joining of Aluminum and Carbon Fiber Reinforced Nylon 66, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2009, **22** (6) 767-801.
- [89] **Mueller, D.H. and Krobjilowski, A.**, New Discovery in the Properties of Composites Reinforced with Natural Fibers, *Journal of Industrial Textiles*, 2003, **33** (2) 111-130.
- [90] **Sage Publications**, Patent Digest, *Journal of Cellular Plastics*, 2006, **42** 433-444.

- [91] **Sage Publications**, Patents, Journal of Elastomers and Plastics, 2006, **38** 277-290.
- [92] **Sage Publications**, Patents, Journal of Elastomers and Plastics, 2009, **41** 387-400.
- [93] **Bratfisch, J.P.** and **Vandepitte, D.**, Development and Validation of a Continuous Production Concept for Thermoplastic Honeycomb, Journal of Sandwich Structures and Materials, 2007, **9** (2) 113-122.
- [94] **Pickering, K.L.** and **Ji, C.**, The Effect of Poly[methylene(polyphenyl isocyanate)] and Maleated Polypropylene Coupling Agents on New Zealand Radiata Pine Fiber–Polypropylene Composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2004, **23** (18) 2011-2024.
- [95] **Potente, H.** and **Schnieders, J.**, Influence of Process Parameters on the Phenomenon of Stress Cracking during Hot Plate Welding, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2002, **21** (6) 489-496.
- [96] **Rahman, R., Hasan, M., Huque, M.** and **Islam, N.**, Physico-mechanical Properties of Maleic Acid Post Treated Jute Fiber Reinforced Polypropylene Composites, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2009, **22** (4) 365-381.
- [97] **Karakuzu, R., Aslan, Z.** and **Yucel, U.K.**, Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Fully Clamped Laminated Thermoplastic Composite Plates, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2003, **22** (6) 549-561.
- [98] **Sea Cheon, O., Hae Pyeong, L., Sung-Chul, Y.** and **Kyong Ok, Y.**, The Nonisothermal Decomposition Kinetics of Poly(vinyl Chloride), Journal of Fire Sciences, 1999, **17** (4) 266-280.
- [99] **Seong, G.K., Chul, B.P.** and **Sain, M.**, Foamability of Thermoplastic Vulcanizates Blown with Various Physical Blowing Agents, Journal of Cellular Plastics, 2008, **44** (1) 53-67.
- [100] **Shivakumar, K.N.** and **Smith, S.A.**, In Situ Fracture Toughness Testing of Core Materials in Sandwich Panels, Journal of Composite Materials, 2004, **38** (8) 655-668.

- [101] **Tierney, J.** and **Gillespie Jr, J.W.**, Modeling of In Situ Strength Development for the Thermoplastic Composite Tow Placement Process, *Journal of Composite Materials*, 2006, **40** (16) 1487-1506.
- [102] **Viana, G.M.** and **Carlsson, L.A.**, Influences of Foam Density and Core Thickness on Debond Toughness of Sandwich Specimens with PVC Foam Core, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2003, **5** (2) 103-118.
- [103] **Wei-Ching, S.**, **Mantell, S.C.** and **Stelson, K.A.**, Demonstration of Bond Quality Improvement for Closed Loop Control of Thermoplastic Tape-Laying, *Journal of Composite Materials*, 2001, **35** (1) 57-76.
- [104] **Wang, X.**, **Yan, Jiuchun.**, **Li, R.** and **Yang, S.**, FEM Investigation of the Temperature Field of Energy Director During Ultrasonic Welding of PEEK Composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2006, **19** (5) 593-607.
- [105] **Yang, F.** and **Pitchumani, R.**, Fractal Description of Interlaminar Contact Development during Thermoplastic Composites Processing, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2001, **20** (7) 536-546.
- [106] **Kwon, Y.**, **Wu, T.** and **Ochoa, S.J.**, SMWA: A CAD-based Decision Support System for the Efficient Design of Welding, *Concurrent Engineering*, 2004, **12** (4) 295-304.
- [107] **Yousefpour, A.**, **Mehrdad, N.** and **Nejhad, G.**, Effects of Geometric Optimization of Plug-Supported End-Caps on the Performance of Thick Thermoplastic Composite Pressure Vessels Under External Hydrostatic Pressure, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2002, **15** (5) 403-428.
- [108] **Yousefpour, A.**, **Mehrdad, N.** and **Nejhad, G.**, Design, Analysis, Manufacture, and Test of APC-2/AS4 Thermoplastic Composite Pressure Vessels for Deep Water Marine Applications, *Journal of Composite Materials*, 2004, **38** (19) 1701-1732.
- [109] **Yousefpour, A.**, **Hojjati, M.** and **Immarigeon, J-P.**, Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2004, **17** (4) 303-341.

- [110] **Seyhan, Z.C., Onder, F.S. and Kalenderoglu, V.**, Process Modeling and Optimization of Resistance Welding for Thermoplastic Composites, Journal of Composite Materials, 2002, **36** (6) 721-744.
- [111] **Zurn, B. and Mantell, S.C.**, Nondestructive Evaluation of Laminated Composites Using Rayleigh Waves, Journal of Composite Materials, 2001, **35** (12) 1026-1044.

Anexo A

A. Comparaciones del Autor con el Estado del Arte

A.1. El Proceso de Sellado de Ampolletas

Se han realizado diferentes estudios sobre el proceso de sellado de materiales termoplásticos con calor, por ejemplo Balkan et al. [3] define el proceso de sellado de materiales termoplásticos con calor en 4 pasos básicos: preparación de la superficie del material, adición de calor, aplicación de una presión mecánica y enfriamiento, Tadmor y Gogos [5] afirman que la mayoría de las operaciones de conformado para materiales termoplásticos consisten en el flujo y deformación de polímeros deformados o suavizados con calor y Hishinuma [1] utiliza 3 pasos para sellar películas de polipropileno: calentamiento de la película para derretimiento del material, aplicación de una presión entre películas y un enfriamiento rápido. Basado en el estudio de estos investigadores el autor estima que para el caso del sellado de ampolletas termoplásticas de PVC con calor, el proceso debería incluir seis pasos básicos, (figura 1, página 9). La tabla 9 sintetiza las aportaciones realizadas por diferentes investigadores al proceso de sellado de materiales termoplásticos.

Tabla 9. Aportaciones del Autor sobre el Proceso de Sellado de Materiales Termoplásticos

Investigadores	Proceso de Sellado de Materiales Termoplásticos con Calor	Contribución de los Investigadores al Estado del Arte	Aportaciones del Autor al Estado del Arte
Balkan [3] (2008)	Balkan [3] describe el proceso de sellado por calor: 1) Preparación de la superficie del material. 2) Adición de calor. 3) Aplicación de una presión mecánica. 4) Etapa de enfriamiento del sellado.	Descripción del proceso de sellado del material termoplástico requerido para la difusión de las cadenas moleculares del material a través de la interfase.	<p>Para el caso del sellado de ampollitas termoplásticas de PVC con calor, el proceso deberá incluir seis pasos básicos, mismos que se muestran en la figura 1, (página 9):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Preparación de la superficie. 2) Exposición del material a una fuente de calor. 3) Exposición del material a la fuente de calor un período de tiempo. 4) Aplicación de una presión mecánica. 5) Enfriamiento del sello. 6) Verificación del sello.
Tadmor y Gogos [5] (2006)	Tadmor y Gogos [5] afirman que la mayoría de las operaciones de conformado para materiales termoplásticos consisten en el flujo y deformación de polímeros deformados o suavizados con calor.	Tadmor y Gogos [5] generalizan el comportamiento de los materiales termoplásticos ante la presencia de calor.	
Hishinuma [1] (2009)	Hishinuma [1] utiliza 3 pasos para sellar películas de polipropileno: 1) Calentamiento de la película para derretimiento del material. 2) Aplicación de una presión entre películas. 3) Etapa de enfriamiento rápido del sellado.	Identificación de dos tipos de sellado por calor: 1) Sellado "Peel". Las moléculas del material no se encuentran completamente difusas a través de la interfase de la unión. El rango de temperatura se encuentra entre T_g y T_m . Éste es un sellado de fácil apertura ó rompimiento. 2) Sellado "Tear". Las moléculas de material se entrelazan entre sí. El rango de temperatura se encuentra entre T_m y la temperatura de degradación. Éste sellado es más resistente que el material sin sellar o virgen.	
Kamweld Technologies [2] (2003)	Kamweld Technologies [2] presenta dos procesos de sellado de materiales termoplásticos con calor: a) Sellado con placa caliente. Consiste en tres pasos: calentamiento del material mediante dos placas de metal calientes, se ejerce una presión mecánica placa vs placa y el material sellado es enfriado. b) Sellado con gas caliente. Consiste en cuatro pasos: Calentamiento del material con un flujo de gas que es aplicado a la superficie del material, aplicación de una presión mecánica, el material sellado es enfriado.	Contribución para cada proceso de sellado por calor: a) Proceso industrial de sellado por calor ampliamente utilizado para superficies planas. b) Es un proceso industrial de sellado de materiales termoplásticos con calor efectivo que consume una mayor cantidad de energía que la energía que consume el proceso de sellado de materiales termoplástico por placa caliente.	

A.2. Pasos Propuestos para el Proceso de Sellado de Ampolletas

A continuación se presentan las aportaciones realizadas en cada uno de los seis pasos propuestos por el autor para el proceso de sellado de ampolletas.

A.2.1. Preparación de la Superficie de la Boquilla de la Ampolleta

La tabla 10 muestra la aportación de la definición del procedimiento de la preparación de la superficie de la ampolleta a la luz del procedimiento para la preparación de la superficie presentado por dos diferentes investigadores: Kamweld Technologies [2] y Hishinuma [1], sobre el paso 1 del proceso de sellado de ampolletas de PVC propuesto por el autor.

Tabla 10. Aportaciones del Autor sobre la Preparación de la Superficie

Investigadores	Preparación de la superficie	Contribución de los Investigadores al Estado del Arte	Aportaciones del Autor al Estado del Arte
Hishinuma [1] (2009)	Hishinuma [1] presenta implicaciones sobre los elementos volátiles que se encuentran en las cercanías de la superficie de sellado.	Las implicaciones son: a) T se mantiene a la presión de vapor hasta que las partículas de vapor son estalladas. b) Las partículas atrapadas toman la forma de burbujas en el sello. c) El tiempo de calentamiento para alcanzar una T adecuada para un sello de ampolleta resistente y hermético es mayor que el requerido para una superficie seca. d) El retraso de T varía en función de P .	El análisis del procedimiento de los investigadores permitió definir un procedimiento que impide la presencia de partículas sólidas, y líquidas en la superficie de la boquilla de la ampolleta. Este procedimiento se realiza de manera manual a través de la aplicación de un flujo de aire a presión a la boquilla de la ampolleta mediante un aspersor conectado a la línea de aire a presión.
Kamweld Technologies [2] (2003)	Kamweld Technologies [2] presenta reglas de práctica en el campo industrial para evitar la presencia de partículas sólidas líquidas y gaseosas localizadas sobre la superficie de sellado.	Las reglas son: a) Limpieza de la superficie de sellado. b) Secado de la superficie de sellado. c) Evitar la grasa sobre la superficie de sellado.	

A.2.2. Temperatura de la Boquilla de la Ampolleta

A continuación se muestra la tabla 11 que muestra la aportación de los resultados obtenidos por el investigador sobre la temperatura de la boquilla de la ampolleta (7) a la luz de las afirmaciones sobre temperatura presentadas por Hishinuma [1], Hitt [6], Merhar [7], Merah [8], Tadmor y Gogos [5], Lilian [22], Van de Ven y Erdman [9] y los Investigadores del CDMIT. La temperatura del material es el parámetro de sellado que corresponde al paso 2 del proceso de sellado de ampolletas de PVC propuesto por el autor. La investigación sobre el rango de temperatura que debe ser utilizado para sellar ampolletas de PVC llevó al autor a encontrar una serie de trabajos de investigación que reportan la temperatura y otros parámetros de sellado. Dichos trabajos de investigación involucran la utilización de diferentes materiales tal como el policloruro de vinilo (PVC), polipropileno (PP), polietileno (PE) y PVC-clorinado (CPVC).

Tabla 11. Aportaciones del Autor a la Exposición del Material Termoplástico a una Fuente de Calor y el Parámetro de Sellado Correspondiente (T)

Investigadores	Exposición a una Fuente de Calor (T)	Contribución de los Investigadores al Estado del Arte	Aportaciones del Autor al Estado del Arte
Hishinuma [1] (2009)	<p>Hishinuma [1] menciona los tres parámetros de sellado para la metodología que sigue para el sellado por calor de materiales polímeros, (T, P y t). Ya que T es considerada el principal factor del proceso de sellado de materiales termoplásticos por calor, Hishinuma [1] propone controlar la temperatura de la superficie en vez de la temperatura de la fuente de calor como se practica actualmente a nivel industrial. Es por esta razón que Hishinuma [1] desarrolló una metodología para medir y controlar la temperatura de derretimiento de la superficie del material. Esta metodología incluye el diseño de un sistema de procesamiento de señales de alta velocidad.</p>	<p>Presentación para el caso general de tres diferentes tipos de superficies de derretimiento (calentamiento insuficiente, rango adecuado de calentamiento y sobrecalentamiento) y propone aplicar P durante el rango adecuado de calentamiento.</p> <p>Hishinuma [1] propone controlar la T perteneciente a la superficie del material termoplástico en vez de la temperatura de la fuente de calor como se realiza actualmente en la industria.</p> <p>Presentación de cuatro condiciones relacionadas con T con el fin de obtener un sellado resistente y hermético:</p> <ol style="list-style-type: none"> T que pertenece a la superficie del material. Confirmación de que T alcanzó T_m. t requerido para lograr T. Limitar T para que se encuentre dentro del rango adecuado de calentamiento para mantener la superficie del material lejos de la fase de degradación. <p>Hishinuma [1] critica los estándares Japonés y Americano para el ensayo de materiales (JIS) y (ASTM) respectivamente debido a que como el sellado por calor tiene lugar controlando un fenómeno termo-físico la temperatura de sellado no es un parámetro de evaluación de los procedimientos para ensayar el material.</p>	<p>La configuración del banco de pruebas utilizada por Hishinuma está basada en el principio de conducción de calor a través de una placa caliente como fuente de calor para elaborar sus muestras para ensayo, situación que causa que los pasos 2, 3 y 4 del proceso de sellado propuestos por el autor tengan lugar en el mismo instante en el banco de pruebas de Hishinuma. Hishinuma [1], reporta el incremento de temperatura de una película de 77 μm de Al-deposited CPP/OPP (Cast-Polypropylene/Oriented-Polypropylene) desde 30°C hasta 130°C con la placa caliente a 140°C, lográndolo en un tiempo que se encuentra en el rango de 0.15 a 0.4 segundos. La configuración del banco de pruebas de Hishinuma resulta en ensayos cuyos resultados difieren con respecto a los resultados obtenidos por el autor que utilizó una fuente de calor basada en radiación y que operó en el rango de los 475°C – 535°C calentando la boquilla de la ampolleta durante 6.3 segundos.</p> <p>a)</p>
Hitt [6] (1992)	<p>Hitt [6] correlaciona la temperatura ambiente a la que es probada a tensión una muestra sellada de PVC (23°C – 180°C) con las propiedades mecánicas obtenidas de la prueba a tensión de la muestra sellada de PVC.</p>	<p>La resistencia mecánica de la muestra sellada de PVC se presenta en proporción inversa a la temperatura ambiente a la que fue realizada la prueba de tracción de la muestra.</p>	<p>La relación entre la temperatura ambiente a la que fue probada a tracción la muestra sellada de PVC y la resistencia de la muestra sellada de PVC no proveen información sobre el desempeño de la T a la que fue realizada (sellada) la muestra de PVC y la resistencia a tracción que presenta dicha muestra.</p>

Investigadores	Exposición a una Fuente de Calor (<i>T</i>)	Contribución de los Investigadores al Estado del Arte	Aportaciones del Autor al Estado del Arte												
<p>Merhar et al [7] (1994)</p>	<p>Merhar et al [7] correlacionan para una muestra de PVC sellada por inyección la temperatura de inyección del material <i>T_i</i>, (195.5°C-210°C), con la resistencia mecánica de la muestra.</p>	<p>La línea de sellado se torna frágil y la resistencia mecánica de la muestra se incrementa en tanto la <i>T</i> de moldeo de la muestra se incrementa de 195.5°C a 203°C y Merhar et al [7] correlacionan este resultado con la variación de la cristalización de la línea de sellado. La resistencia mecánica de la muestra decrece en tanto la <i>T</i> de moldeo de la muestra se incrementa de 203°C a 210°C y Merhar correlaciona este resultado con el ligamiento cruzado de moléculas del material debido a la degradación.</p>	<p>Los hallazgos del autor obtenidos con los resultados del ensayo de tracción al sello de la ampollita son corroboradas con los resultados obtenidos por Merhar et al. [7], tal como se describe a continuación:</p> <p>a) La configuración de las muestras es equivalente. La muestra de PVC elaborada por Merhar et al [7] con línea de sellado elaborada mediante inyección con molde (ver figura 37) y la muestra de PVC elaborada por el autor con línea de sellado elaborada mediante la unión de dos boquillas de ampollita (ver figura 34).</p> <p>b) La relación que existe entre los parámetros de sellado de Merhar et al [7] y del autor:</p> <p>Tabla 8, Relación Existente entre los Parámetros de Sellado de Merhar et al [7] y del Autor</p> <table border="1" data-bbox="1068 884 1373 1115"> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Merhar et al [7]</th> <th>Autor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><i>T</i> (°C)</td> <td>195, 203 y 210°C</td> <td>190, 200 y 210°C</td> </tr> <tr> <td><i>P</i> (MPa)</td> <td>13.78, 27.57 y 41.36 MPa</td> <td>0, 0 y 0 MPa</td> </tr> <tr> <td>Esfuerzos de cedencia (MPa)</td> <td>38.26, 38.75 y 38.66 MPa</td> <td>41.84, 42.48 y 42.63 MPa</td> </tr> </tbody> </table> <p>c) La evidencia que ofrecen los resultados de Merhar et al. [7] sobre los parámetros de sellado <i>T</i> y <i>P</i>, basada en el correspondiente decremento en el esfuerzo de cedencia de 38.75 MPa a 38.66 MPa para las muestras de PVC con línea de sellado elaboradas con un incremento en la temperatura de sellado respectiva de 203°C a 210°C y con un incremento en la presión de inyección respectiva de 27.57 MPa a 41.36 MPa. Este resultado sugiere que la muestra ensayada se encontraba cercana a la fase de degradación del material y confirma que la presión no es un parámetro significativo para el sellado de muestras de PVC.</p> <p>d) En el caso del autor los esfuerzos de cedencia obtenidos para cada muestra ensayada son incrementales y confirman que la presión no es un parámetro significativo para el sellado de ampollitas de PVC.</p>	Parámetro	Merhar et al [7]	Autor	<i>T</i> (°C)	195, 203 y 210°C	190, 200 y 210°C	<i>P</i> (MPa)	13.78, 27.57 y 41.36 MPa	0, 0 y 0 MPa	Esfuerzos de cedencia (MPa)	38.26, 38.75 y 38.66 MPa	41.84, 42.48 y 42.63 MPa
Parámetro	Merhar et al [7]	Autor													
<i>T</i> (°C)	195, 203 y 210°C	190, 200 y 210°C													
<i>P</i> (MPa)	13.78, 27.57 y 41.36 MPa	0, 0 y 0 MPa													
Esfuerzos de cedencia (MPa)	38.26, 38.75 y 38.66 MPa	41.84, 42.48 y 42.63 MPa													

Investigadores	Exposición a una Fuente de Calor (T)	Contribución de los Investigadores al Estado del Arte	Aportaciones del Autor al Estado del Arte
Merah [8] (2003)	Merah [8] correlaciona la temperatura ambiente a la que se desarrolla una prueba de tracción para una muestra sellada de CPVC ¹⁶ , (-10°C, 0°C, 23°C, 50°C and 70°C) con la resistencia mecánica de la muestra.	La muestra sellada de CPVC muestra una resistencia mecánica menor al de una muestra de CPVC sin sellar (virgen). Tanto la resistencia de la muestra de CPVC sellado como de la muestra de CPVC virgen se encuentran en proporción inversa a la temperatura ambiente a la que son realizadas las respectivas pruebas de tracción.	La relación entre la temperatura ambiente de la muestra sellada de CPVC y su resistencia mecánica no provee información sobre el desempeño de la resistencia de la muestra de CPVC sellada con una T determinada. (Los resultados de Merah [8] son comparables con los resultados de Hitt [6]).
Tadmor y Gogos [5] (2006)	Tadmor y Gogos [5] reportan trabajo de investigación realizado en el área de inyección de plásticos. Tadmor y Gogos [5] definen para polímeros semicristalinos como lo es el PVC, el paso de derretimiento como la elevación de la temperatura del material a la temperatura de derretimiento (T_m), temperatura que corresponde a la temperatura de procesamiento del polímero. La temperatura de derretimiento es mayor que la temperatura de transición vítrea (T_g). El paso de derretimiento es un paso de control que consume entre el 70 y 80% del monto de energía de procesamiento y determina la homogeneidad y estabilidad finales del producto obtenido del proceso de inyección del polímero.	Tadmor y Gogos [5] establecen la zona de procesamiento para polímeros semicristalinos como el PVC como sigue: Zona de derretimiento: $T_m < T < T_{Deg}$ T_m es un valor que no se encuentra muy bien definido para el PVC, ya que el derretimiento de los cristales de PVC ocurre en un rango que se encuentra de 10 – 30°C por debajo de T_m tal y como lo afirman Tadmor y Gogos [5]. Finalmente Tadmor y Gogos [5] afirman que es importante tomar en cuenta el valor de conductividad térmica del PVC (0.18 W/mK a 20°C) que muestra una pobre conductividad térmica y una alta sensibilidad a la temperatura, presentando un alto riesgo de degradación térmica y acorta el gradiente de temperatura para las operaciones de conformado.	Tomando en cuenta los lineamientos establecidos por Tadmor y Gogos [5], el autor dio paso a la búsqueda del rango de T_m para el sellado de ampollitas de PVC, encontrando que Van de Ven y Erdman [9] reportan un valor experimental aproximado para el T_m del PVC de 175°C. Por otro lado el autor encontró experimentalmente que la temperatura de degradación para la ampollita de PVC se encuentra en el rango de los 210 – 220°C.

¹⁶ PVC clorado para elevar la temperatura de transición vítrea (T_g)

Investigadores	Exposición a una Fuente de Calor (T)	Contribución de los investigadores al Estado del Arte	Aportaciones del Autor al Estado del Arte
Lilian [22] (2009)	Lilian [22] estudia el efecto de la temperatura en el sello de láminas de aluminio, PVC y nylon con un espesor de 25 micrómetros, que son utilizados para el sellado de blísteres en la industria farmacéutica; (estas láminas son impermeables excepto en la zona de sellado por calor y representan una barrera contra la humedad). La estrategia de investigación fue ensayo de tracción para grupos de prueba (150°C, 170°C y 190°C).	Lilian [22] encuentra lo siguiente: a) No se presentaron muestras resistentes y herméticas para 190°C. b) Se presentaron muestras resistentes y herméticas para 150 y 170°C. Las conclusiones del investigador son: a) Un exceso o una deficiencia de calor provocarán un sello deficiente. b) La Resistencia del sello es directamente proporcional a la temperatura del material termoplástico.	Se puede apreciar que los resultados obtenidos por Lilian [22] difieren de los resultados obtenidos por el autor ya que el autor encontró muestras de ampollitas con sello correcto para 190°C. Existe la posibilidad de que los resultados de Lilian [22] y del autor hayan diferido sustancialmente debido a que Lilian [22] utilizó muestras de material híbrido entre aluminio, PVC y nylon.
Van de Ven y Erdman [9]	Van de Ven y Erdman [9] reportan el desarrollo de un banco de pruebas (figura 11, página 42) para establecer la relación entre la temperatura de sellado y la resistencia mecánica del sellado de láminas de PVC (de 0.102 mm de espesor) selladas mediante un punzón caliente. Afirman que desarrollaron un enfoque experimental debido al complejo comportamiento del PVC.	Van de Ven and Erdman [9] utilizaron un modelo numérico de transferencia de calor para relacionar la temperatura del punzón caliente utilizado en el experimento con la temperatura del material sellado después de 1 segundo de contacto con el punzón caliente. Van de Ven y Erdman [9] exploraron la presión mecánica a lo largo del rango de presión de 0.11 – 1.84 MPa para la temperatura del punzón en el rango de 167 – 307°C, calculando con su modelo numérico de transferencia de calor el rango de temperatura del material sellado de 134 – 242°C.	El rango de temperatura para un sellado correcto de la boquilla de la ampollita encontrado por el autor se extiende desde 170°C a 210°C. Dicho rango de temperatura se encuentra incluido en el rango de temperatura que fue explorado por Van de Ven y Erdman [9] que exploraron un rango de temperatura calculado con un modelo numérico de transferencia de calor de 134 – 242°C. Al igual que el autor, Van de Ven y Erdman [9] reportan que el parámetro determinante para el sello del PVC es la temperatura del material, a la vez que la presión mecánica aplicada no es un parámetro determinante para el sello del PVC.
Investigadores del CDMIT (2010)	Los investigadores del CDMIT diseñaron y desarrollaron máquinas selladoras de ampollitas de PVC que exponen la ampollita de PVC a una fuente de calor.	Las máquinas del CDMIT se basan en los principios de convección y radiación térmica. La máquina desarrollada tomando en cuenta el principio de convección térmica opera su fuente de calor (aire caliente) en el rango de 400 – 500°C y la máquina basada en el principio de radiación térmica opera su fuente calor (resistencia eléctrica) en el rango de 300 – 600°C	El banco de pruebas diseñado por el autor presenta un principio de calentamiento basado en radiación térmica. El banco de pruebas opera su fuente de calor (resistencia eléctrica) en el rango de 475 – 535°C. Este rango de temperatura se definió previendo que para iniciar los experimentos la utilización de un mayor grado de temperatura a las utilizadas industrialmente por el grupo de investigación del CDMIT permitirá sellar la boquilla de la ampollita utilizando presiones mecánicas significativamente menores a las utilizadas industrialmente. Una temperatura máxima de la resistencia de calentamiento del banco de pruebas de 535°C representa una temperatura que permitirá calentar la boquilla sin correr el riesgo de que la boquilla de la ampollita alcance su fase de degradación.

Los rangos de temperatura del material reportados por Hishinuma [1] fueron estudiados tomando en cuenta el principio de calentamiento de su banco de pruebas y los reportados por Tadmor y Gogos [5], Van de Ven y Erdman [9] y los Investigadores del CDMIT se convirtieron en los valores de referencia de la temperatura de la boquilla de la ampolla y basados en ellos el autor diseñó y desarrolló el banco de pruebas para la experimentación del sello de la ampolla. El método de investigación utilizado permitió a lo largo del rango de interés para la temperatura de la boquilla de la ampolla de (80-210°C), la identificación de tres rangos de temperatura de la boquilla de la ampolla para el rango de interés para la presión mecánica (0.238-3.332 MPa):

- a) Primer rango de temperatura detectado para la boquilla de la ampolla: (80 – 110°C). Este rango de temperatura no presentó sello en la boquilla de ampolla.
- b) Segundo rango de temperatura detectado para la boquilla de la ampolla: (110 – 170°C). Este rango de temperatura es válido únicamente para aquellas presiones mecánicas que cumplan con la siguiente desigualdad:

$$\left(P > -\frac{T^2}{1440.5} + \frac{T}{7.415} - 2.85 \right) \quad (14)$$

Los 110°C (valor inferior del rango de temperatura) se localizan en la vecindad de la T_g para el PVC que Merah et al. [8] reportan con un valor de 95°C, mientras que los 170°C (valor superior del rango de temperatura) se localizan en la vecindad de la T_m experimental para el PVC reportada por Van de Ven y Erdman con un valor de 175°C [9]. Cabe resaltar que los resultados del experimento sobre la velocidad de calentamiento muestran que para el banco

de pruebas desarrollado existe la posibilidad de alcanzar el rango de temperatura (110 - 170°C) en un período de tiempo que se encuentra entre 0.4 y 1.4 s, período de tiempo que corresponde a una producción de 2700 a 770 ampollitas selladas por minuto, lo que representa una razón de producción de 15.8 a 4.5 veces la producción de ampollitas selladas que han reportado los investigadores del CDMIT (170 ampollitas selladas por minuto).

- c) Tercer rango de temperatura detectado para la boquilla de la ampollita: (170 – 210°C). Este representa el rango de temperatura de mayor conveniencia para lograr un sello de ampollita correcto. Los 170°C (valor inferior del rango de temperatura) se localiza en la vecindad de T_m para el PVC (175°C como se mencionó previamente), mientras que los 210°C (valor superior del rango de temperatura) se localizan en la vecindad de la fase de degradación para el sellado de la ampollita de PVC que fue detectada experimentalmente por el autor (210 - 220°C). Cabe resaltar que los resultados del experimento sobre la velocidad de calentamiento muestran que para el banco de pruebas desarrollado existe la posibilidad de alcanzar el rango de temperatura (170 – 210°C) en un período de tiempo que se encuentra entre 1.4 y 5.9 s, período de tiempo que corresponde a una producción de 770 a 180 ampollitas selladas por minuto, lo que representa una razón de producción de 4.5 a 1.05 veces la producción de ampollitas selladas que han reportado los investigadores del CDMIT (170 ampollitas selladas por minuto). Asimismo se subraya el hecho de que el autor estima, con base en la experimentación realizada, que es posible lograr el sellado de la ampollita con presiones mecánicas mínimas

(cerca a cero) cuando la temperatura se encuentra en este rango. Finalmente se puede afirmar que el conocimiento adquirido indica que esta región de temperatura de la boquilla de la ampollita es la de mayor conveniencia para obtener ampollitas con sello correcto.

A.2.3. Período de Tiempo de Exposición de la Boquilla de la Ampollita a la Fuente de Calor.

La siguiente tabla es la tabla 12 que muestra las contribuciones presentadas por diferentes investigadores sobre el paso 3 del proceso propuesto por el autor para el sellado de ampollitas de PVC que se muestra en la figura 1 (página 9), “período de tiempo de exposición a la fuente de calor”, paso al que le corresponde el parámetro de sellado t . El período de tiempo de exposición es importante debido al hecho de que los resultados del presente trabajo de investigación representan el fundamento para el desarrollo de nueva tecnología para el sellado de ampollitas de PVC y un menor tiempo de calentamiento representa una mayor producción de ampollitas selladas de PVC. El autor encontró trabajos de investigación que reportan tanto temperaturas como períodos de exposición requeridos para realizar de manera exitosa diferentes procesos, por ejemplo, empaque de blísteres, sellado de películas de PVC, sellado de ampollitas con aire caliente, sellado de láminas de PVC con un punzón caliente y sellado de geomembranas de PVC.

Tabla 12. Aportaciones del Autor al Período de Tiempo de Exposición del Material Termoplástico a una Fuente de Calor y el Parámetro de Sellado Correspondiente (t)

Investigadores	Período de Tiempo de Exposición a la Fuente de Calor	Contribución de los Investigadores al Estado del Arte	Aportaciones del Autor al Estado del Arte
Hishinuma [1] (2009)	Hishinuma [1] reconoce el período de tiempo de exposición del material a una fuente de calor como uno de los tres parámetros convencionales del proceso de sellado de materiales termoplásticos con calor. Hishinuma [1], reporta el incremento de temperatura de películas de 77 μm de Al-depositado CPP/OPP (Cast-Polypropylene/Oriented-Polypropylene) desde 30°C hasta 130°C utilizando placa caliente a 140°C. Los resultados obtenidos por Hishinuma se muestran en la figura 12, (página 43).	Hishinuma [1] explora la relación entre la presión mecánica y la temperatura de derretimiento de la superficie de la muestra. Encuentra que el período de tiempo de exposición para incrementar la temperatura de la superficie del material de 30°C a 130°C corresponde a un rango de 0.4 - 0.15 segundos para el rango de presión de 0.05 – 0.3 MPa. Un dibujo del sistema de placa caliente utilizado por Hishinuma es mostrado en la figura 13, (página 43).	Puede observarse que el rango de tiempo de exposición a la fuente de calor obtenido por Hishinuma [1] es significativamente menor al del autor (6.3 s), esto debido al principio de calentamiento del banco de pruebas utilizado por Hishinuma (conducción) y debido a que sus muestras son de un material diferente al PVC y cuentan con un espesor menor (77 μm) al de la boquilla de la ampollita de PVC (1000 μm)
Van de Ven y Erdman [9]	Van de Ven y Erdman [9] reportan el desarrollo de un banco de pruebas (figura 11, página 42) para establecer la relación entre la temperatura de sellado y la resistencia mecánica del sellado de láminas de PVC (de 0.102 mm de espesor) selladas mediante un punzón caliente, afirmando que un enfoque experimental era requerido debido al complejo comportamiento del PVC.	Van de Ven and Erdman [9] utilizaron un modelo numérico de transferencia de calor para relacionar la temperatura del punzón caliente utilizado en el experimento con la temperatura del material sellado después de 1 segundo de contacto con el punzón caliente. Van de Ven y Erdman [9] exploraron la presión mecánica a lo largo del rango de presión de 0.11 – 1.84 MPa para la temperatura del punzón en el rango de 167–307°C, calculando con su modelo numérico de transferencia de calor el rango de temperatura del material sellado de 134–242°C.	Al igual que con Hishinuma [1] el rango de tiempo de exposición a la fuente de calor obtenido por Van de Ven y Erdman [9] es significativamente menor al del autor (6.3 s), esto debido al principio de calentamiento del banco de pruebas utilizado por Van de Ven y Erdman (conducción) y por el espesor de las muestras utilizadas por Van de Ven y Erdman, (102 μm).
Investigadores del CDMIT (2010)	Los investigadores del CDMIT estudiaron la velocidad de calentamiento de las ampollitas de PVC.	Los investigadores del CDMIT reportan un rango de período de tiempo que se extiende sobre los 3 -5 segundos, que son necesarios para incrementar la temperatura de la boquilla de la ampollita desde 20°C hasta 190°C utilizando un flujo de aire caliente como fuente de calor que se extendió en el rango de 400 – 500°C. También reportan un rango de período de tiempo que se extiende sobre los 4.9 – 12.4 segundos, que son necesarios para incrementar la temperatura de la boquilla de la ampollita desde 20°C hasta 190°C utilizando una resistencia eléctrica como fuente de calor que se extendió en el rango de 300 – 600°C.	El período de tiempo de exposición a la fuente de calor propuesto por el autor (6.3 s) para la boquilla de la ampollita depende del rango de temperatura de la fuente de calor del banco de pruebas (resistencia de 3000 W) que fue definido para realizar los experimentos. Estudiando y analizando los resultados de los investigadores del CDMIT el autor pudo darse cuenta que mayores temperaturas implican necesariamente períodos de exposición a la fuente de calor menores.

El período de tiempo de exposición del material a la fuente de calor reportado por Van de Ven y Erdman [9], Hishinuma [1] y los investigadores del CDMIT representan valores de referencia para el período de tiempo de exposición de la ampollita de PVC a la fuente de calor del banco de pruebas diseñado por el autor (resistencia eléctrica).

A.2.4. Presión Mecánica Aplicada a la Boquilla de la Ampollita

La tabla 13 muestra las contribuciones presentadas por tres diferentes investigadores, Merhar [7], Van de Ven [9], Hishinuma [1] e investigadores del CDMIT sobre el paso 4 del proceso propuesto para el sellado de ampollitas de PVC que se muestra en la figura 1, “aplicación de una presión mecánica”, paso al que le corresponde el parámetro de sellado P .

Tabla 13. Aportaciones del Autor a la Aplicación de una Presión Mecánica y el Parámetro de Sellado Correspondiente (P)

Investigadores	Aplicación de una Presión Mecánica	Contribución de los Investigadores al Estado del Arte	Aportaciones del Autor al Estado del Arte
Merhar [7] (1994)	Merhar [7] correlaciona para una muestra de PVC sellada por inyección la presión de inyección del material P , (13.78 MPa – 41.36 MPa), con la resistencia mecánica de la muestra.	La línea de sellado se torna frágil y la resistencia mecánica de la muestra se incrementa en tanto la P de moldeo de la muestra se incrementa de 13.78 MPa a 27.57 MPa y Merhar correlaciona este resultado con la variación de la cristalización de la línea de sellado. La resistencia mecánica de la muestra decrece en tanto la P de moldeo se incrementa 27.57 MPa a 41.36 MPa y Merhar [7] correlaciona este resultado con el ligamiento cruzado de moléculas del material debido a la degradación. Merhar [7] interpreta sus resultados como una restricción en la cadena molecular debido a la aplicación de presión mecánica que inhibe la formación cristalina.	Los resultados de Merhar [7] son análogos a los de Van de Ven y Erdman [9] y a los resultados del autor en el sentido de que la presión ejercida sobre el material (la boquilla de la ampollita) no es determinante en el sellado del material.

Investigadores	Aplicación de una Presión Mecánica	Contribución de los Investigadores al Estado del Arte	Aportaciones del Autor al Estado del Arte
Van de Ven y Erdman [9] (2007)	Van de Ven y Erdman [9] desarrollaron el sellado de láminas de PVC utilizando un punzón caliente y para ello establecieron el período de tiempo de exposición del material a la fuente de calor constante y con valor de 1 s. Van de Ven y Erdman [9] ensayaron a tracción las muestras para evaluar los parámetros de sellado T y P , midiendo la resistencia de las muestras obtenidas.	Van de Ven y Erdman [9] lograron detectar que P no es parámetro determinante para el sellado del PVC.	El autor estima con base en la experimentación realizada que es posible lograr el sellado de la ampollita con presiones mecánicas mínimas (cerca de cero) cuando la temperatura es cercana a los 170°C. Esta afirmación se confirma con el hallazgo de Van de Ven y Erdman [9] referente a la presión mecánica aplicada al material.
Hishinuma [1] (2009)	Hishinuma [1] utiliza una placa caliente para calentar el material termoplástico y a la vez para ejercer una P sobre el mismo.	Hishinuma [1] explica que P es necesaria para reducir el espacio entre las superficies del material para obtener unión intermolecular. También Hishinuma [1] afirma que existe un rango de P (0.08 – 0.2 MPa) adecuado para lograr dicha unión intermolecular y explica que una presión menor a 0.08 MPa no tendrá la capacidad para sellar el material mientras que una presión mayor a 0.2 MPa presentará un riesgo de derramamiento.	Para la presente investigación sobre el sellado de ampollitas, P no es significativa para el rango de T adecuado para obtener un sello de ampollita correcto. Este resultado del autor se ubica por debajo del rango de P que presenta Hishinuma [1]. Una posible explicación en la disparidad de resultados entre Hishinuma [1] y el autor se deba a que Hishinuma [1] ejerce contacto en la parte exterior de la muestra para sellar la parte interna de la misma, mientras que en la presente investigación se utiliza radiación para calentar de manera uniforme la parte interna y externa de la muestra.
Investigadores del CDMIT (2010)	Los investigadores del CDMIT diseñaron y desarrollaron máquinas selladoras de ampollitas de PVC que ejercen una presión mecánica sobre la boquilla caliente de la ampollita de PVC.	Los investigadores del CDMIT diseñaron un mecanismo para ejercer presión mecánica a través de un dado semicircular (que trabaja en frío) que está acoplado a un cilindro neumático. El dado ejerce una presión constante de 3.33 MPa a la boquilla de la ampollita.	Conforme a lo encontrado por el autor, el valor de presión mecánica ejercido en la boquilla caliente de la ampollita por el sistema diseñado por los investigadores del CDMIT se encuentra por encima del valor correcto cuando la temperatura de la boquilla de la ampollita se encuentra entre 170°C y 210°C.

A.2.5. Enfriamiento del Sello de la Ampollita

La tabla 14 muestra las contribuciones presentadas por Hishinuma [1], sobre el paso 5 del proceso propuesto para el sellado de ampollitas de PVC que se muestra en la figura 1, “enfriamiento del sello”.

Tabla 14. Aportaciones del Autor al Enfriamiento del Material Sellado

Investigadores	Enfriamiento del sello	Contribución de los Investigadores al Estado del Arte	Aportaciones del Autor al Estado del Arte
Hishinuma [1] (2009)	Hishinuma [1] afirma que existen problemas de interfase en la superficie del sello cuando una fuerza externa es aplicada al sello del material antes de la completa solidificación del sello, (un valor de T cercano a T_g).	Las recomendaciones de Hishinuma [1] son: a) Forzar el enfriamiento del sello. b) Establecer un sistema de enfriamiento después del sellado del material. c) Utilizar una placa fría de metal para ejercer una P después de que la placa caliente haya sellado el material, esto con el fin de: a. Permite realizar un enfriamiento forzado del material b. Ofrece un mejor acabado al sello del material. c. Ofrece la oportunidad de una reparación a alguna imperfección del sello debido a un esfuerzo de distorsión	El autor tomó en cuenta la recomendaciones de Hishinuma [1] y las de otros investigadores para definir un dispositivo para ejercer la presión mecánica sobre el material (dado semiesférico) que gracias a un revólver giratorio trabaja en frío con el objetivo de forzar el enfriamiento del sello. Posteriormente a esta operación el sello de la ampollita es enfriado por convección natural.

A.2.6. Verificación del Sello de la Ampolleta

La tabla 15 muestra las contribuciones presentadas por seis diferentes investigadores, Jarus [10], Lin [11], Kamweld Technologies [2], Rohe [18], Hishinuma [1] y Lilian [22], sobre el paso 6 del proceso propuesto para el sellado de ampollitas de PVC que se muestra en la figura 1, “verificación del sello realizado”.

Tabla 15. Aportaciones del Autor a la Verificación del Sello Realizado

Investigadores	Verificación del Sello	Contribución de los Investigadores al Estado del Arte	Aportaciones del Autor al Estado del Arte
Jarus [10] (2000)	Jarus [10] desarrolla fractografía utilizando un microscopio electrónico de barrido en muestras 30/70 de PVC/HPDED	Jarus [10] desarrolla un modelo matemático y un modelo esquemático de la deformación en el sitio de iniciación de la fractura para las líneas de sellado.	El autor exploró diversos cortes del sello de la ampollita al estereoscopio tomando como base el trabajo de Jarus. Los cortes hechos por el autor se discuten en el Anexo D de la presente Tesis.

Investigadores	Verificación del Sello	Contribución de los Investigadores al Estado del Arte	Aportaciones del Autor al Estado del Arte
Lin y Cheng [11] (2000)	Lin y Cheng [11] desarrollan la verificación del sello de materiales termoplásticos que fueron sellados mediante fricción rotatoria, misma que realizaron mediante el análisis de fractura de muestras ensayadas a tracción.	<p>Lin y Cheng [11] establecen tres diferentes tipos de regiones conforme a la morfología de la fractura:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Región no plastificada. Localizada en la región central de la fractura. b) Región plastificada. Localizada en la región periférica de la fractura. c) Región parcialmente plastificada. Localizada entre las regiones plastificada y no plastificada. 	El modelo de Lin y Cheng [11] es considerado por el autor para trabajo a futuro sobre el análisis del sello de la ampollita de PVC.
Kamweld Technologies [2] (2003)	Kamweld Technologies [2] describe las prácticas industriales comunes para la verificación del sellado en materiales termoplásticos.	<p>Kamweld Technologies [2] recopila y categoriza las prácticas industriales para la verificación del sellado de materiales termoplásticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Métodos destructivos. <ul style="list-style-type: none"> a. Ensayo de tracción. b. Ensayo de flexión. b) Métodos no destructivos. <ul style="list-style-type: none"> a. Líneas de flujo continuo de sellado. b. Haz de luz dirigido al sello c) Métodos químicos. <ul style="list-style-type: none"> a. Exposición del sello a un medio de contraste. 	El autor resalta la relevancia de la verificación del sello para la práctica industrial, tal como lo recomienda Kamweld Technologies [2] y considera la exposición del sello ante un haz de luz para profundizar el presente trabajo de investigación a futuro.
Rohe [18] (2008)	Rohe [18] desarrolla la verificación del sello de geomembranas de PVC utilizando canales de aire.	Rohe [18] correlaciona la temperatura de trabajo del sello de la geo-membrana con la resistencia del sello a la presión del aire suministrado.	El trabajo de Rohe, además de los trabajos de investigación de diversos investigadores como Van de Ven y Erdman [9] sirvió como referencia para diseñar el experimento y diseñar el banco de pruebas de la presente investigación.
Hishinuma [1] (2009)	Hishinuma [1] afirma que la mayoría de los ensayos de verificación de sello son empíricas y que se encuentran enfocados en la detección de los modos de falla y la correlación de las pruebas mecánicas entre las T_s de sellado para diferentes velocidades de procesamiento y el sello obtenido.	<p>Hishinuma [1] presenta tres factores de falla para el sellado:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) El acabado de la superficie calentada. b) Fuentes de esfuerzo para el sellado. c) Fuentes de concentración de esfuerzo. 	El autor resalta la necesidad de trabajar en la resolución del banco de pruebas para poder prevenir la falla del sello, tal como lo recomienda Hishinuma [1].
Lilian [22] (2009)	Lilian [22] afirma que los blísteres para la industria farmacéutica demandan un sello hermético y resistente y la asunción general es que el sello es bueno si éste es hermético. El investigador explica que el camino usual para verificar el sello es establecer un valor de hermeticidad para el sello y posteriormente realizar un ensayo de tracción para verificar la resistencia del sello.	<p>Lilian [22] refiere diferentes métodos para evaluar el sello:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) No destructivo: ultrasonido. b) Métodos destructivos. c) Ensayo de vacío bajo el agua. d) Espectrómetros de helio de masa calibrada. e) Prueba de sellado ante una carga de diferencia de potencial. f) Secretos industriales farmacéuticos. 	El autor resalta la relevancia de la verificación del sello para la práctica industrial, tal como lo recomienda Lilian [22] y considera la exposición del sello ante una carga de diferencia de potencial para trabajo de investigación a futuro.

De esta manera concluye la descripción de las aportaciones del autor a lo luz de las aportaciones de los investigadores estudiados. Las investigaciones estudiadas por el autor representan un conjunto de trabajos útiles y de valor en los aspectos tecnológico y científico y dan pie a la presente investigación. En la presente Tesis se extiende y se profundiza en algunas de las teorías y experimentos planteados por los diferentes investigadores estudiados y así mismo se profundiza y realizan aportaciones importantes en aspectos de diversos temas que los investigadores citados no pudieron desarrollar en su totalidad y probablemente por falta de tiempo las conclusiones que ofrecen sobre los mismos son generales.

Cabe señalar que la investigación bibliográfica realizada le permite al autor afirmar que actualmente el grado de solución para problemas de sellado de materiales termoplásticos se encuentra en función del análisis del proceso de sellado en una dimensión y la verificación del sellado se realiza en un paso posterior al fenómeno de sellado, mientras que el problema en estudio por la presente investigación (sellado de ampollitas termoplásticas) involucra un proceso de sellado en tres dimensiones e idealmente requiere de una verificación que se aproxime al momento mismo en que sucede el fenómeno de sellado en la ampollita dadas las necesidades actuales de producción. Asimismo la investigación bibliográfica realizada muestra muchos elementos de apoyo para el desarrollo y elaboración de guías o recomendaciones específicas para el desarrollo de nueva tecnología para el sellado de materiales termoplásticos, sin embargo, no existen guías o recomendaciones como tal de para el diseño y

desarrollo de un sistema automático para el sellado de ampollitas hechas de PVC y por lo tanto se puede afirmar que el proceso continuo de investigación y desarrollo de máquinas selladoras de ampollitas continuará ofreciendo la oportunidad de desarrollar y elaborar dichas guías o recomendaciones. Este es un proceso continuo de búsqueda para facilitar la labor del diseñador de dichos sistemas y a su vez ofrecer un mayor mérito tecnológico al producto final.

Anexo B

B. Trabajo de Experimentación Realizado en el CDMIT

El autor estimó conveniente incluir este Anexo B debido a que la información teórica y experimental que aquí se incluye sirvió para integrar un marco de referencia conveniente para el desarrollo exitoso de la Tesis.

Una parte importante de las labores de trabajo previo de experimentación para comprender el proceso de sellado de la ampolleta está basado en las siguientes actividades:

- a) Análisis funcional del problema del sellado de ampolletas; Pahl y Beitz [25].
- b) Desarrollo de un banco de pruebas para simular las cuatro funciones estudiadas durante el análisis funcional.
- c) Recopilación de datos experimentales obtenidos con el banco de pruebas; French [26].
- d) Recopilación de datos de campo con máquinas en funcionamiento.
- e) Análisis de datos experimentales y de campo.
- f) Desarrollo de gráficas paramétricas utilizando la información recabada experimentalmente y en campo, Hollins [27].

B.1. Análisis Funcional del Problema del Sellado de Ampolletas.

Dentro de la investigación exploratoria se realizó un análisis funcional para transitar de una ampollita abierta a una ampollita sellada, el proceso comprende al menos cuatro funciones principales, y deben tomarse en cuenta para llevar a cabo el sellado de la ampollita. Las funciones se presentan en la figura 38.

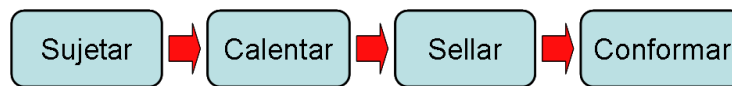


Figura 38, Diagrama Funcional para el Sellado de Ampollitas.

A continuación se exponen cada una de las funciones:

- a) *Sujeción*. Implica posicionar de forma rígida y precisa la ampollita durante el proceso de sellado.
- b) *Calentamiento*. Su finalidad es llevar el material a condiciones de fundición y moldeo. Para realizar esta función, el plástico es expuesto a los tres principios de transferencia de calor: contacto, convección y radiación.
- c) *Sellado*. Es hacer que el material fundido de la punta de la ampollita se pegue y como resultado se tenga un solo componente de material en todo el perfil de la punta de la ampollita.
- d) *Conformado*. Es dar la forma deseada a la punta de la ampollita.

B.2. Desarrollo de un Banco de Pruebas para Simular las Cuatro Funciones Estudiadas Durante el Análisis Funcional.

Se construyó un banco de pruebas que permitiera realizar experimentos exploratorios relacionados con cada una de las cuatro funciones requeridas para sellar ampollitas plásticas termo-formables, banco de pruebas que es presentado en la figura 39. Se realizaron en el banco de pruebas experimentos utilizando diferentes fuentes de calor, (contacto, convección y radiación).

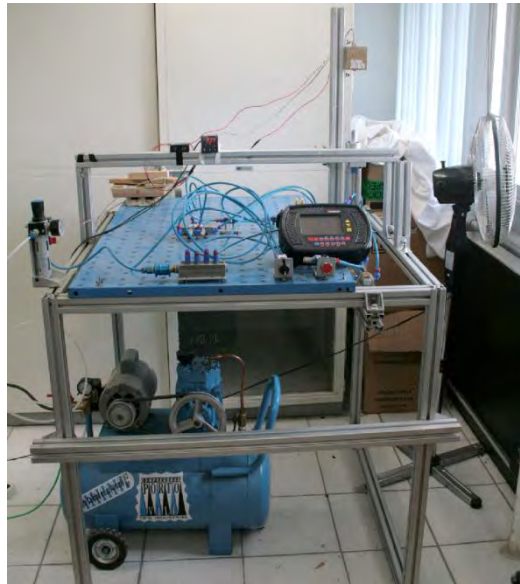


Figura 39. Banco de Pruebas de Sellado de Ampolletas de PVC de la Etapa Exploratoria.

Los elementos del banco de pruebas exploratorio se muestran en la figura 40 y se presentan a continuación:

- a) Una estructura que soporta los elementos y sistemas que sujetan, calientan, sellan y conforman una ampolleta a la vez.

- b) Un sistema de sujeción que se encuentra integrado por un soporte en el cual se asienta la ampolla y es desplazado horizontalmente por un pistón neumático.
- c) Un sistema de calentamiento ya sea por radiación (utilizando una resistencia) o convección (utilizando una pistola de aire caliente) y para el caso de contacto se agrega una resistencia al molde que en este caso particular cubre las funciones de calentado, sellado y conformado a la vez.
- d) Un sistema de sellado y conformado que consiste en un molde que es desplazado verticalmente hacia la punta del cuello de la ampolla por un pistón, sellando y conformando de manera semiesférica la ampolla.

Información Confidencial

Para mayor información comuníquese al CDMIT
con los Profesores:
Dr. Ramírez Reivich y Dr. López Parra
y/o con el Autor al correo:
gustavo_olivaresmx@yahoo.com.mx

Figura 40. Figura Esquemática del Banco de Pruebas de Sellado de Ampollas de PVC de la Etapa Exploratoria.

La construcción del banco de pruebas y el desarrollo de experimentos en el mismo permitió de manera inicial y exploratoria la obtención de información que permitió comenzar a entender las relaciones entre los diversos parámetros que intervienen en el fenómeno del sellado de las ampollas.

B.3. Trabajo Experimental en el Banco de Pruebas de Sellado de Ampolletas de PVC.

Las experiencias llevadas a cabo en el banco de pruebas exploratorio fueron diversas y arrojaron información valiosa para la etapa formal de la presente investigación, algunos de los experimentos desarrollados en el presente banco de pruebas son:

- a) Utilización de diferentes tipos de fuente de calentamiento, utilizando contacto, convección y radiación.
- b) Desarrollo de presión mecánica sobre la ampollita utilizando diferentes moldes de sellado o dados.
- c) Calentamiento de la ampollita a diferentes temperaturas, (experimento valioso para la investigación ya que colaboró en la detección del rango de temperatura en el que ocurre la fase de degradación de la ampollita, que tiene lugar cuando el sello de la ampollita presenta zonas de color café).
- d) Pruebas de sujeción de ampollitas.

Experimentos de este tipo promovieron el diseño y desarrollo de los experimentos que sustentan la presente Tesis y serán presentados en el capítulo tercero correspondiente a experimentación.

B.4. Trabajo de Campo Exploratorio Sobre el Diseño, Desarrollo y Operación de Tecnología Previa a la Presente Investigación

La parte que correspondiente al trabajo de campo involucra mediciones in situ del desempeño de tres máquinas selladoras de ampollitas plásticas termoformables, que a lo largo de la última década fueron diseñadas y construidas por el grupo de investigación al que el autor de la presente Tesis pertenece (CDMIT). Dichas máquinas se encuentran en operación, (operan en la industria de los cosméticos en el estado de Querétaro).

B.4.1. Máquina Selladora de Ampollitas de PVC Pionera

La primera máquina desarrollada para sellado de ampollitas se muestra en la figura 41 y cuenta con las siguientes características:

- a) Calentamiento por contacto.
- b) Consumo de 3000 Watts.
- c) Sellado de ampollitas por lotes de 105 ampollitas.
- d) Cada ciclo de sellado toma 135 segundos.
- e) Conformado de manera plana.
- f) Eficiencia de sellado $[\eta]$ 95.23%, (razón de ampollitas no selladas con respecto al total de ampollitas procesadas).
- g) Costo de \$180,000 pesos.
- h) Tiempo de desarrollo de 3 semanas

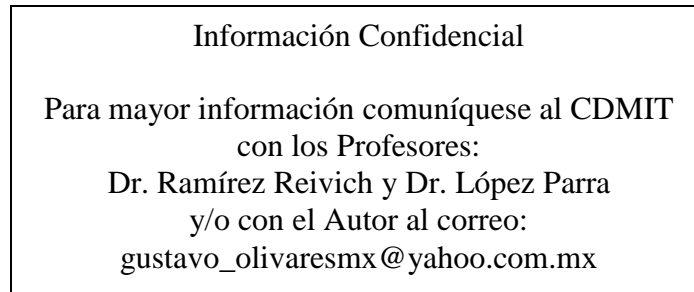


Figura 41, Primera Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada.

B.4.2. Conocimiento Adquirido sobre la Primera Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada:

- a) El sellado de conformado semiesférico aumenta de forma significativa de costo si se requiere abatir tiempos de sellado, lo que involucra una disminución en las operaciones.
- b) El sellado de conformado plano es significativamente de menor costo al sellado semiesférico y sus posibilidades de abatir tiempos de sellado son relativamente de menor costo a las del sellado semiesférico.

B.4.3. Segunda Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada.

La segunda máquina desarrollada para el sellado de ampollitas se muestra en la figura 42 y cuenta con las siguientes características:

- a) Calentamiento por convección.
- b) Consumo de 4500 Watts.
- c) Sellado de ampollitas por lotes de 105 ampollitas.

- d) Cada ciclo de sellado toma 75 segundos.
- e) Conformado de manera semiesférica.
- f) Eficiencia de sellado $[\eta]$ 99.97%.
- g) Costo de \$1,800,000 pesos.
- h) Tiempo de desarrollo de 32 semanas.

Información Confidencial

Para mayor información comuníquese al CDMIT
con los Profesores:
Dr. Ramírez Reivich y Dr. López Parra
y/o con el Autor al correo:
gustavo_olivaresmx@yahoo.com.mx

Figura 42, Segunda Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada.

B.4.4. Conocimiento Adquirido sobre la Segunda Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada:

- a) Existe una proporción entre la producción real de ampolletas y el costo total de la máquina.
- b) La proporción antes mencionada para el caso del conformado semiesférico es aproximadamente cinco veces que para el caso plano.
- c) Se logró detectar la gran importancia de la función calentamiento para el sellado de ampolletas.

B.4.5. Tercera y Última Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada.

La tercera y última máquina desarrollada para sellado de ampolletas se muestra en la figura 43 y cuenta con las siguientes características:

- a) Calentamiento por radiación.
- b) Consumo de 3000 Watts.
- c) Sellado de ampolletas de manera continua, (i.e. una por una).
- d) Cada ciclo de sellado toma 1/4 segundos.
- e) Conformado de manera semiesférica.
- f) Eficiencia de sellado $[\eta]$ 99.995%.
- g) Costo de \$2,600,000 pesos.
- h) Tiempo de desarrollo de 104 semanas

Información Confidencial

Para mayor información comuníquese al CDMIT
con los Profesores:
Dr. Ramírez Reivich y Dr. López Parra
y/o con el Autor al correo:
gustavo_olivaresmx@yahoo.com.mx

Figura 43, Tercera Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada.

La repetibilidad de la tercera máquina desarrollada para sellado de ampolletas es uno de los aspectos de mayor cuidado y detalle para lograr una eficiencia del 99.995% y para ello se han realizado pruebas para lograr una temperatura de calentamiento estable.

B.4.6. Conocimiento Adquirido sobre la Tercera Generación de Máquina Selladora de Ampolletas de PVC Desarrollada:

- a) Para el caso de conformado plano la eficiencia de sellado es significativamente inferior a los casos de sellado semiesférico.

- b) El tiempo de desarrollo es inversamente proporcional a la eficiencia entregada.
- c) El número de piezas es directamente proporcional al tiempo de desarrollo y a la eficiencia entregada.
- d) Se infiere que para las máquinas que entregan mayor eficiencia de sellado los sistemas y subsistemas con que cuentan son de mayor complejidad y debido a esto requieren un mayor tiempo de desarrollo y cuentan con un mayor número de piezas.

B.4.7. Recopilación y Análisis de Datos Experimentales y de Campo

Las máquinas selladoras de ampollitas plásticas termoformables que fueron desarrolladas y que son objeto de estudio del trabajo de campo de esta investigación poseen un esquema de diseño conceptual que integra las funciones de la manera que se muestra en la figura 44:

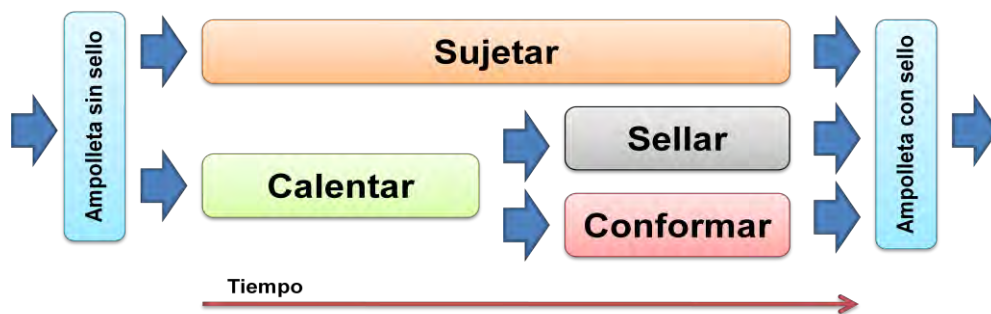
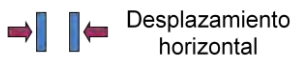
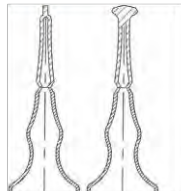
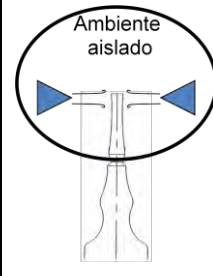
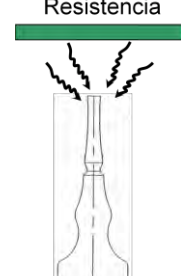





Figura 44, Secuencia e Integración de las Funciones de las Maquinas Estudiadas.

Para adquirir entendimiento sobre el fenómeno de sellado de ampollitas termoformables de PVC se recopilaron y analizaron los datos experimentales y de campo y se construyó una tabla comparativa entre máquinas desarrolladas para el

sellado de ampollitas. La tabla 16 es un concentrado de diversos parámetros para cada una de las maquinas en estudio y en ella se presentan para los casos de conformado semiesférico y plano las siguientes relaciones:

Tabla 16, Tabla Comparativa de Parámetros de las Máquinas Desarrolladas para el Sellado de Ampollitas de PVC.

Parámetros	1ª. Máquina	2ª. Máquina	3ª. Máquina
Esquema de calentamiento	Radiación	Convección	Radiación
Instalación en la máquina	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> Información Confidencial Para mayor información comuníquese al CDMIT con los Profesores: Dr. Ramírez Reivich y Dr. López Parra y/o con el Autor al correo: gustavo_olivaresmx@yahoo.com.mx </div>		
Máquina			
Dibujo	<p>Placa plana</p>  <p>Desplazamiento horizontal</p> 		<p>Resistencia</p> 
Conformado	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> Información Confidencial Para mayor información comuníquese al CDMIT con los Profesores: Dr. Ramírez Reivich y Dr. López Parra y/o con el Autor al correo: gustavo_olivaresmx@yahoo.com.mx </div>		
Configuración de alimentación	Por lote de 105 ampollitas	Por lote de 105 ampollitas	Continuo con un cabezal de calentamiento rotatorio de 24 ampollitas

Parámetros	1ª. Máquina	2ª. Máquina	3ª. Máquina
Figura correspondiente a configuración de alimentación	Información Confidencial Para mayor información comuníquese al CDMIT con los Profesores: Dr. Ramírez Reivich y Dr. López Parra y/o con el Autor al correo: gustavo_olivaresmx@yahoo.com.mx		
Calidad de apariencia	Media (Plana)	Alta (Semiesfera)	Alta (Semiesfera)
Figura correspondiente a la calidad de apariencia			
Número total de piezas	30	376	1500
Costo [Pesos]	150,000	1,800,000	2,600,000
Consumo de energía, [Watts]	3000	4500	3000
Control del calor	Alto	Regular	Regular
Eficiencia de sellado (η) (máquina con ajuste) [%]	95.23	99.97	99.995
Tiempo del ciclo de sellado [seg]	135	75	6
Tiempo total de sellado por cada ampollita [ampollitas/seg]	$135/105=1.28$ (15)	$75/105=0.71$ (16)	$6/24=0.25$ (17)
Número de eventos por ampollita sellada	4	8	1
Tiempo de desarrollo [Semanas]	3	32	104
Costo por unidad de eficiencia de sellado [$\$/\eta$]	1575.13	18005.4	26001.3
Relación ($\$/\eta$ vs. η)	$\frac{\$}{\eta^2} = 16.54$ (18)	$\frac{\$}{\eta} = -31.956 \times 10^6 + 31.98 \times 10^4 \eta$	$\frac{\$}{\eta} = -31.956 \times 10^6 + 31.98 \times 10^4 \eta$
Relación (Tiempo de desarrollo vs. \$)	$\frac{Sem}{\$} = 2 \times 10^{-5}$ (21)	$Sem = -130 + \frac{\$}{11110}$ (22)	$Sem = -130 + \frac{\$}{11110}$ (23)

El análisis funcional del molde que aplica la presión requerida para sellar la ampollita y cuyas funciones son el sellado y conformado de la ampollita reveló que el conformado final del sello (semiesférico o plano) tiene implicaciones importantes en la forma y configuración del sistema de sellado, sin embargo si se logran separar las funciones de sellado y conformado se pronostica que los resultados finales serán distintos y el sistema de sellado de ampollitas modificará su forma y configuración.

De manera empírica los operarios han observado que si calibran la temperatura, el desplazamiento de los actuadores del cabezal de sellado y la alineación del dado de cada actuador del cabezal de sellado obtienen menos de 200 ampollitas con fuga para una producción de sellado de 24,000 ampollitas, de lo contrario obtienen alrededor de 3,000 ampollitas con fuga para el mismo volumen de producción.

De esta manera se concluye la investigación inicial exploratoria a la presente investigación.

Anexo C

C. Diseño del Banco de Pruebas para Ensayar Ampolletas ante Presión Hidrostática “Blow Out”

Una vez que las ampolletas han sido selladas utilizando el banco de pruebas para sellar ampolletas, se requiere de alta presión manométrica para desenvolver el sello de las ampolletas selladas y para ello se diseñó y elaboró un banco de pruebas específico para tal propósito que se denomina banco de pruebas “blow out”. El diseño del banco de pruebas “blow out” está basado en la necesidad de contar con un dispositivo que pueda sostener la ampolleta y a su vez ser capaz de simular alta presión manométrica interna en la boquilla sellada de la ampolleta, dicho desarrollo ha sido previamente reportado por Olivares y Ramírez [31].

Para lograr la versión final del banco de pruebas “blow out”, apropiada para realizar los ensayos de las muestras de ampolletas selladas previamente fue necesario diseñar y desarrollar tres prototipos previos. Cada prototipo hasta llegar al banco de pruebas fue desarrollado tomando como base el desarrollo de la versión previa al mismo. El proceso de evolución del banco mostró sustanciales mejoras en diseño y desempeño, lo que permitió obtener cada vez datos más confiables. El estado del arte de bancos de pruebas no contempla dispositivos con características para los fines que se buscan, sin embargo muestra el desarrollo de diferentes bancos de pruebas (e.g. para evaluación del desempeño de un dispositivo como lo demuestran French y Ramírez [30] y para el sellado de

materiales bajo diferentes condiciones tal como lo diseñaron y desarrollaron autores como Van de Ven y Erdman [9] que diseñaron y desarrollaron un banco de pruebas para el sellado de láminas de PVC con boquilla caliente o Rohe [18] que desarrolló un banco de pruebas para ensayar con aire a presión la resistencia del sello de costura de geomembranas de PVC.

C.1. Primer Prototipo.

El primer prototipo se muestra la figura 45:

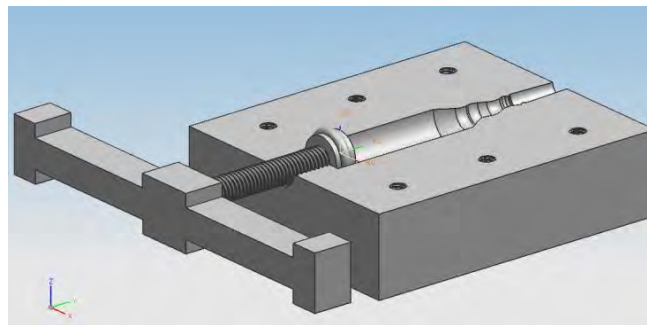


Figura 45, Primer Prototipo Elaborado para Desarrollar el Banco de Pruebas “Blow Out”

Este prototipo es conceptual y virtual y cuenta con una configuración que permite visualizar la colocación de la ampollita completa, la cual deberá ser comprimida mediante una carga ejercida por un pistón al hacer girar el tornillo sinfín, con el fin de incrementar la presión interna de la ampollita y lograr el ensayo de la falla del sello de la ampollita.

Tabla 17. Ventajas y Desventajas del Prototipo 1 para el Banco de Pruebas "Blow Out"

Ventajas	Desventajas
Al ser un prototipo virtual permite visualizar las diferentes implicaciones del diseño y desarrollo del mismo.	Maquinado, costo elevado y maquinado complicado (requiere CNC)
	Alta precisión en la manufactura
	Dificultad de ensamble
	Problema funcional debido a que el embolo deforma la ampolleta en si misma impidiendo observar el fenómeno deseado (Esto se visualizó con el prototipo 2)

C.2. Segundo Prototipo.

Este prototipo surge dada la necesidad de realizar un modelo físico considerando las ventajas y desventajas obtenidas del prototipo 1. Para su elaboración se buscaron elementos comerciales de adquisición viable. El resultado es un prototipo que logra generar una presión manométrica para generar la falla en la boquilla de la ampolleta. El desarrollo del segundo prototipo permite al igual que en el prototipo 1 introducir la ampolleta entera al dispositivo y permite la aplicación de una carga mediante un émbolo que es empujado por un tornillo sinfín. El dispositivo usado cuenta varias partes desmontables como son: cuatro barras roscadas de acero, así como sus respectivas tuercas, un tubo de cobre, un pistón, un tornillo sinfín que impulsa al pistón y dos partes montables, las cuales contienen al tubo de cobre y este a la vez contiene al pistón que genera la presión manométrica.

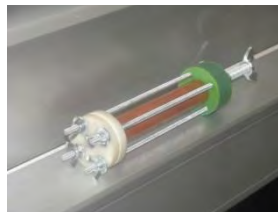


Figura 46, Segundo Prototipo Elaborado para Desarrollar el Banco de Pruebas "Blow Out".



Figura 47, Explosivo del Segundo Prototipo Elaborado para Desarrollar el Banco de Pruebas “Blow Out”.

Información Confidencial

Para mayor información comuníquese al CDMIT con los Profesores:
 Dr. Ramírez Reivich y Dr. López Parra
 y/o con el Autor al correo:
 gustavo_olivaresmx@yahoo.com.mx

Figura 48, Detalle de la Muestra para Ensayo del Segundo Prototipo Elaborado para Desarrollar el Banco de Pruebas “Blow Out”.

Tabla 18. Ventajas y Desventajas del Prototipo 2 para el Banco de Pruebas “Blow Out”

Ventajas	Desventajas
Se reduce considerablemente la complejidad de manufactura	Al aplicar la carga se genera una falla en la base de la ampollita, debido a la colocación de esta.
Se reducen costos de material	Alto número de piezas
	Dificultad de ensamble
	Problemas de repetibilidad ocasionado por el gran número de elementos a ensamblar
	Problemas de linealidad, ensambles y ajustes
	Problemas de limpieza debido a fugas

C.3. Tercer Prototipo.

El desarrollo del tercer prototipo surge a partir de las observaciones del segundo prototipo, por lo que se eliminó el cuerpo de la ampollita, ensayando únicamente el cuello de la ampollita que incorpora el objeto de estudio que es el sello de la ampollita. Para lograr esto se agregó un elemento de sujeción basado

en el principio de unidad por el contacto entre superficies cónicas, como lo refiere Sandler [28].

El dispositivo usado cuenta con varias partes desmontables como son: cuatro barras roscadas de acero, así como sus respectivas tuercas, un tornillo con terminación cónica lisa, un tubo de cobre, un pistón, un tornillo sinfín que impulsa al pistón y dos partes montables, una de ellas modificada con una perforación cónica para contener el cuello, estas dos partes contienen al tubo de cobre y este a la vez contiene al pistón que genera la presión manométrica.

El cuello de la ampollita se introduce en la perforación cónica para posteriormente fijarlo con la barra roscada. Por medio de la presión manométrica generada por el pistón que es impulsado manualmente se obtiene la falla en la boquilla de la ampollita.

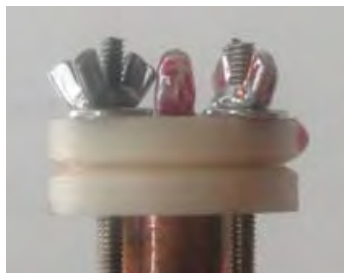


Figura 49, Tercer Prototipo Elaborado para Desarrollar el Banco de Pruebas "Blow Out".



Figura 50, Explosivo del Tercer Prototipo del Banco de Pruebas "Blow Out".

Información Confidencial

Para mayor información comuníquese al CDMIT
con los Profesores:
Dr. Ramírez Reivich y Dr. López Parra
y/o con el Autor al correo:
gustavo_olivaresmx@yahoo.com.mx

Figura 51, Detalle de la Muestra para Ensayo del Tercer Prototipo Elaborado para Desarrollar el Banco de Pruebas “Blow Out”.

Tabla 19. Ventajas y Desventajas del Tercer Prototipo 2 para el Banco de Pruebas “Blow Out”

Ventajas	Desventajas
Mismas que la etapa 1 del prototipo 2	Se observó que el diseño del prototipo no era el adecuado debido a que la presión es superior a la soportada por este prototipo.
Se logró obtener un prototipo que nos muestra que el sello es mucho más resistente que el cuerpo de la ampollita.	Alto número de piezas
	Dificultad de ensamble
	Problemas de repetibilidad ocasionado por el gran número de elementos a ensamblar
	Problemas de linealidad, ensambles, ajustes y problemas de limpieza debido a fugas

C.4. Versión Final del Banco de Pruebas “Blow Out”.

Tomando en cuenta las observaciones hechas a los prototipos anteriores, tanto ventajas como desventajas, se decidió construir la versión final del banco de pruebas “blow out”; el cual consta de un número mínimo de piezas para lograr realizar los ensayos de las muestras selladas exitosamente y con gran repetibilidad. Además se le agregó un manómetro para cuantificar la presión que es generada por un gato hidráulico. El gato hidráulico facilita el control de la presión manométrica dentro del prototipo induciendo la falla del sello.

Para la versión final del banco de pruebas “blow out” la muestra sigue siendo el cuello de las ampollitas. Esta versión de banco de pruebas ejerce la presión mediante un gato hidráulico, el cual es accionado manualmente e incorpora un

manómetro que cuenta con un rango de medición de 0 hasta 5000 psi para sensar la presión manométrica. El dispositivo desarrollado cuenta con un menor número de piezas que los prototipos anteriores debido al acoplamiento de varios elementos en una sola pieza, por ejemplo: el cuerpo cuenta con una forma más compleja que permite la conexión de más elementos, toma de presión, cabezal con una perforación cónica donde se coloca el cuello de la ampolleta y un tornillo con terminación cónica lisa y con una perforación interna.

Con el objeto de realizar el ensayo el cuello de la ampolleta sellada se introduce en la perforación cónica del cabezal para posteriormente fijarlo con la barra roscada, el cabezal se acopla al cuerpo y este a su vez se acopla a la cámara que recibe la presión del gato hidráulico. Por medio de la presión manométrica generada se obtiene la falla en la boquilla de la ampolleta. Este banco de pruebas ofrece la posibilidad de cuantificar la presión en la que se presenta la falla y poder evaluar la fatiga del material ya sea con una presión elevada durante un periodo de tiempo corto o una presión menor durante un periodo de tiempo prolongado.



Figura 52, Versión Final del Banco de Pruebas “Blow Out”

Información Confidencial

Para mayor información comuníquese al
CDMIT
con los Profesores:
Dr. Ramírez Reivich y Dr. López Parra
y/o con el Autor al correo:
gustavo_olivaresmx@yahoo.com.mx

Figura 53, Explosivo del Dispositivo Principal de la Versión Final del Banco de Pruebas “Blow Out”



Figura 54, Detalle del Banco de Pruebas “Blow Out” que Muestra el Instrumento para la Medición (Manómetro) de la Carga Hidrostática



Figura 55, Dispositivo Ensamblado del Banco de Pruebas “Blow Out”.

Tabla 20. Ventajas y Desventajas del Banco de Pruebas “Blow Out”

Ventajas	Mejoras a futuro
Número de piezas reducidas	Recuperación de aceite perdido
Experimentación más eficiente	Sistema de adquisición de datos
Ensamble más sencillo	Diseño más adecuado a las presiones manejadas
Mayor repetibilidad de la experimentación	Dispositivo que permita manejar la presión de manera gradual
Diseño óptimo para las presiones a manejar	Contar con una cámara de alta velocidad
Cuantificación de la presión	

C.5. Observaciones Finales

En el estudio de cada etapa del diseño de los prototipos se obtuvo información útil para el desarrollo de los prototipos posteriores. Se obtuvieron diversos prototipos, tanto virtuales como físicos, los cuales aportaron información de diseño, reconociendo las ventajas y desventajas de cada dispositivo.

Al comparar los tres prototipos y la versión final del banco de pruebas “blow out” se puede apreciar disminución de elementos y de ensambles (ver tabla 21 y figura 56), lo que se traduce en reducción de costos, de optimización de experimentación y un mayor número de pruebas realizadas con el banco.

Tabla 21. Número de Piezas y de Ensamblajes de Cada Prototipo

Prototipo	Piezas	Ensamblajes
Prototipo 1	11	12
Prototipo 2	33	30
Prototipo 3	36	32
Versión final	4	3

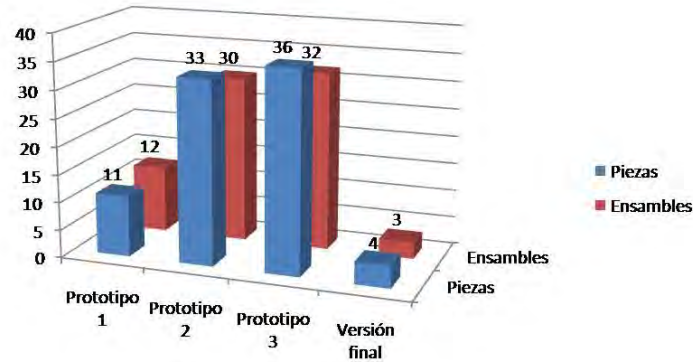


Figura 56, Número de Piezas y de Ensamblajes para los Diversos Prototipos y la Versión Final del Banco de Pruebas “Blow Out”

El análisis de cada etapa de los prototipos también permitió la evolución del experimento, al no buscar solamente una variable sino otras como la magnitud de la presión, el tiempo de precarga y los diversos tipos de fallas de las ampolletas, debido a que el cuello es una capa delgada de forma cilíndrica se comprobó que la falla es debido al esfuerzo tangencial o de costilla, tal como se aprecia en la figura 49. Para contar con mayor detalle al respecto refiérase a Beer et al. [29].

El diseño propuesto es susceptible de posibles mejoras, tanto de índole mecánica como de funcionamiento y operación, lo cual debe ser considerado en alternativas de diseños futuros. Entre estas mejoras se encuentra la incorporación de un sistema de adquisición de datos, una cámara de alta velocidad, un contenedor de acero y un sistema automático de control de presión.

Anexo D

D. Análisis de Esfuerzos a Partir de los Resultados del Experimento para Medir la Resistencia del Sello de la Ampolleta ante una Carga de Presión Hidrostática

El análisis de esfuerzos de la muestra (la boquilla de la ampolleta) suponen un recipiente semiesférico. Dado que el análisis de esfuerzo corresponde a un análisis de esfuerzo plano, los esfuerzos resultantes en un elemento de la pared estarán contenidos en un plano tangente a la superficie de la muestra, así como lo refiere Beer et al. [29].

Se considera que el recipiente de la muestra es un recipiente esférico que tiene un radio r y un espesor de pared t y se sabe contiene un fluido que ejerce una presión p que es la presión manométrica del fluido, (i.e. el exceso de la presión interior sobre la presión atmosférica exterior). Deben determinarse los esfuerzos normales sobre un elemento de pared cuyos lados pertenecen a la esfera. Debido a la simetría axial de la esfera y su contenido no se ejercen esfuerzos cortantes sobre el elemento, ver la figura 57.

Considerando el caso de un recipiente esférico, de radio interior r y espesor de pared t y se sabe contiene un fluido que ejerce una presión manométrica p . Deben determinarse los esfuerzos normales sobre un elemento de pared y por simetría deben ser iguales, es decir $\sigma_1 = \sigma_2$, ver la figura 57.

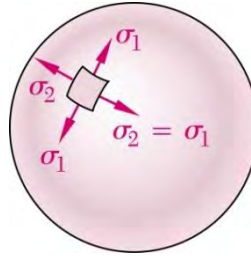


Figura 57. Esfuerzo Plano en Recipiente Esférico de Pared Delgada que Modela el Sello de la Ampolleta

En la figura 57 σ_1 y σ_2 representan los esfuerzos principales:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pr}{2t} \quad (24)$$

Dadas las condiciones de la prueba de falla por presión manométrica es necesario dar los valores de r , t y p para obtener el esfuerzo para un recipiente esférico y para el análisis del caso de estudio en cuestión los valores de r , t y p son los siguientes:

$$r = 2 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (25)$$

$$t = 1 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (26)$$

$$p = 13.79 \text{ MPa} \quad (27)$$

Se sustituyen los valores en la ecuación correspondiente al esfuerzo σ_1 y σ_2 , obteniéndose:

$$\sigma_{1,} = \sigma_{2,} = 14.5 \text{ [MPa]} \quad (28)$$

Si se compara este resultado con el esfuerzo de cedencia (47.84 MPa) obtenido para una muestra de ensayo para tracción de ampolleta virgen (es decir que no contiene línea de sello) se puede observar que el sello de la ampolleta en condiciones de operación ante presencia de presión hidrostática posee un 30% de la resistencia nominal de la ampolleta, situación que permite estimar un factor de seguridad de 3.3 para el sello de la ampolleta ante presión hidrostática.

Anexo E

E. Inspección Estereoscópica del Sello de la Ampolleta

Diferentes autores han examinado muestras de la línea de sello utilizando en estéreo-microscopio para inspeccionar las fracturas en diferentes regiones. Balkan et al. [3] examinó en el estéreo-microscopio las superficies de fractura de muestras para ensayo de tracción.

La inspección de la muestra para el ensayo de tracción del sello de la ampolleta utilizando el estéreo-microscopio, (figura 58), permite un mejor entendimiento de las condiciones de sellado por calor, haciendo posible identificar la distribución morfológica del material ubicada en la línea de sellado de la muestra para el ensayo de tracción del sello de la ampolleta y por analogía en el sello de la ampolleta.



Figura 58, Estéreo-Microscopio Wild Heerbrug Photomakroskop M400

E.1. Inspección de Muestras para el Ensayo de Tracción del Sello de la Ampolleta

Un conjunto de muestras para el ensayo de tracción del sello de la ampolleta fueron preparadas con el fin de realizar inspecciones con el estéreo-microscopio de diferentes condiciones de sellado de la ampolleta. Las muestras para el ensayo de tracción del sello de la ampolleta examinadas con el estéreo-microscopio se muestran en la figura 59.

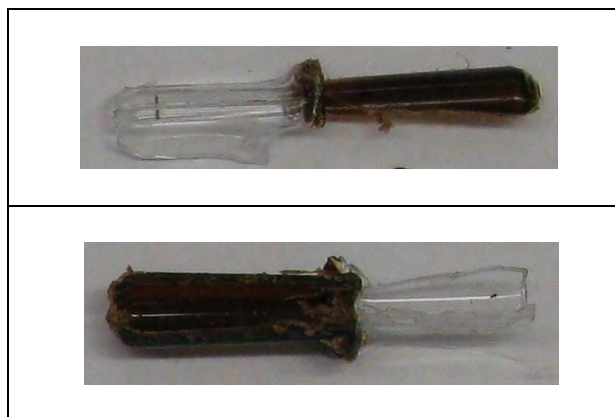


Figure 59, Corte Longitudinal de Muestras para el Ensayo de Tracción del Sello de la Ampolleta Examinadas con el Estéreo-Microscopio

Las muestras para el ensayo de tracción del sello de la ampolleta examinadas con el estéreo-microscopio están compuestas por el corte longitudinal de la muestra para el ensayo de tracción del sello de la ampolleta (ver figura 31, página 91), corte que permite examinar en el estéreo-microscopio la interfase de la línea de sello de las diferentes muestras.

Las muestras se realizaron con ampolletas de diferentes colores (transparente y café oscuro), con la finalidad de facilitar las condiciones de inspección de la muestra en el estéreo-microscopio.

Las figuras 60, 61 y 62 muestran las inspecciones realizadas a 3 diferentes muestras y presentan zonas de sellado exitoso, zonas de ausencia de sellado y zonas de degradación del material.

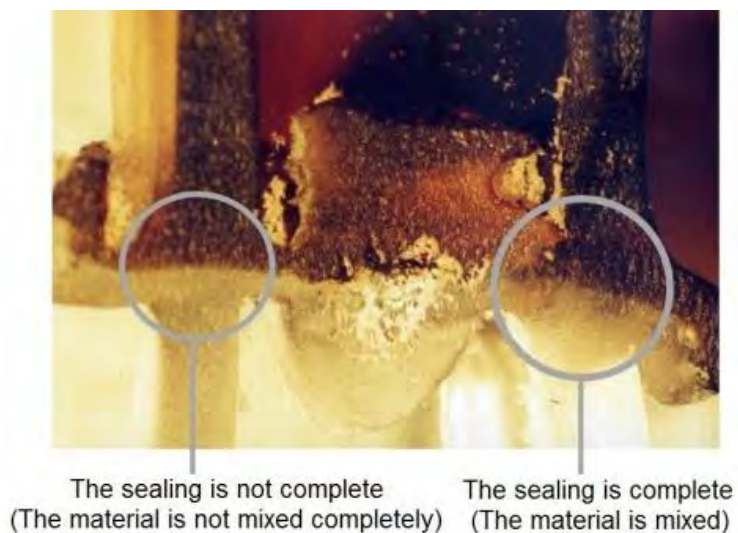


Figura 60, Primera Muestra de Inspección para el Estereomicroscopio

Las condiciones de sellado para la muestra 1 son:

- a) Temperatura de la boquilla de la ampolleta: 160°C.
- b) Número de aumentos de la imagen: 250X

La muestra de inspección 1 muestra dos diferentes zonas de unión y que se discuten en la siguiente tabla 22:

Tabla 22, Características del Sello Obtenidas de la Inspección a la Primera Muestra

Zona	Ubicación en la imagen	Características relacionadas con el sello
Color café difuso alrededor de la interfase del sello	Zona ubicada en la parte central derecha de la imagen	Se relaciona con un sello homogéneo "tearing"
Interfase del sello sin color difuso	Zona ubicada en la parte central izquierda de la imagen	Se relaciona con un sello de baja calidad "peeling"



Successfully Sealed Ampoule
(The sealing area has a mixed color)

Figura 61, Segunda Muestra de Inspección para el Estereomicroscopio

Las condiciones de sellado para la muestra 2 son:

- a) Temperatura de la boquilla de la ampolleta: 190°C.
- b) Número de aumentos de la imagen: 250X

La muestra de inspección 2 muestra una única zona de unión y que se discute en la siguiente tabla 23:

Tabla 23, Características del Sello Obtenidas de la Inspección a la Segunda Muestra

Zona	Ubicación en la imagen	Características relacionadas con el sello
Color café difuso alrededor de la interfase del sello	Zona ubicada en la parte central derecha e izquierda de la imagen	Se relaciona con un sello homogéneo "tearing"

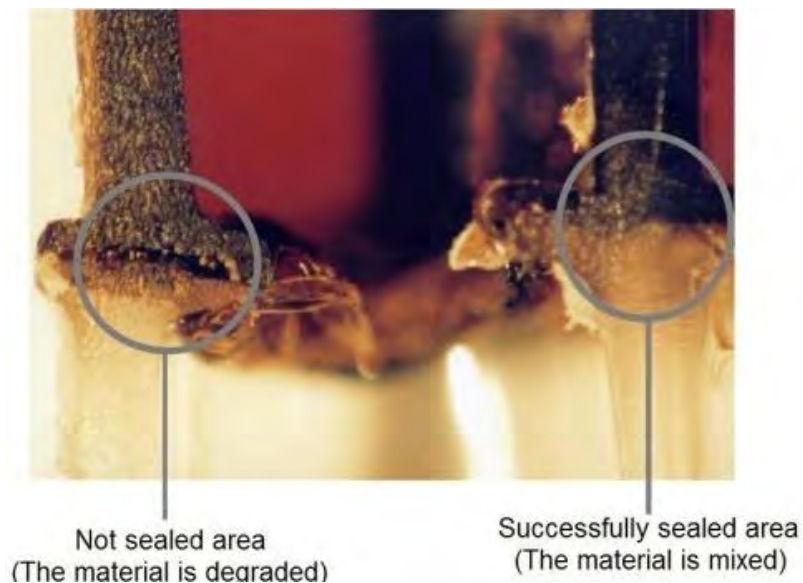


Figura 62, Tercera Muestra de Inspección para el Estereomicroscopio

Las condiciones de sellado para la muestra 3 son:

- a) Temperatura de la boquilla de la ampolleta: 220°C.
- b) Número de aumentos de la imagen: 250X

La muestra de inspección 3 muestra dos diferentes zonas de unión y que se discuten en la siguiente tabla 24:

Tabla 24, Características del Sello Obtenidas de la Inspección a la Tercera Muestra

Zona	Ubicación en la imagen	Características relacionadas con el sello
Color café difuso alrededor de la interfase del sello	Zona ubicada en la parte central derecha de la imagen	Se relaciona con un sello homogéneo "tearing"
Interfase del sello degradada	Zona ubicada en la parte central izquierda de la imagen	Se relaciona con una ausencia de sello

E.2. Inspección de una Muestra Obtenida del Experimento para Sellar Ampolletas

Una muestra obtenida mediante el experimento para sellar ampolletas fue examinada al estéreo-microscopio, haciendo posible describir la morfología de la trayectoria del flujo del material que sigue una trayectoria bidimensional de herradura, tal como se muestra en la figura 63.

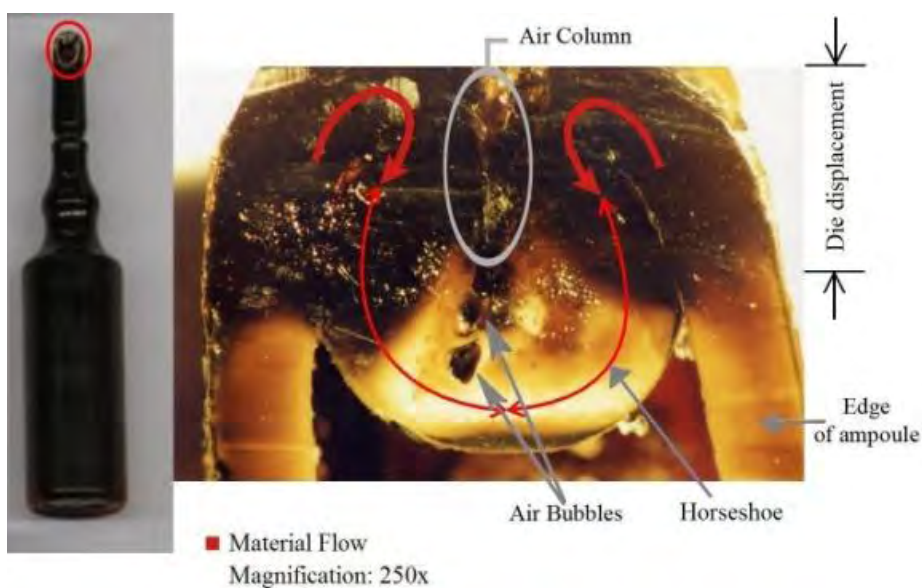


Figura 63, Muestra Obtenida del Experimento para Sellar Ampolletas

Las condiciones de sellado para la muestra obtenida del experimento para sellar ampolletas son:

- Temperatura de la boquilla de la ampolleta: 210°C.
- Número de aumentos de la imagen: 250X

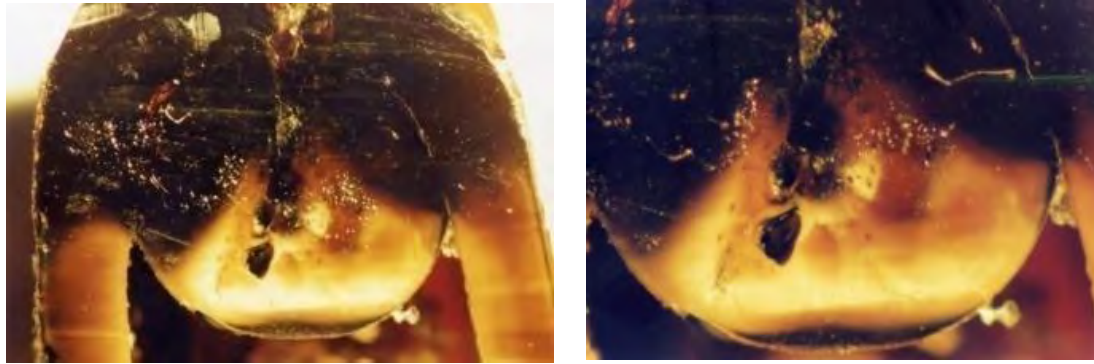


Figura 64, Detalle de la Muestra Obtenida del Experimento para Sellar Ampolletas

Las imágenes correspondientes a la figura 64 muestran una vista estereoscópica que muestra el flujo del material al interior del dado que tiene la función de ejercer presión mecánica. El flujo tiene una trayectoria de una herradura invertida; que provoca que la parte interior de la herradura permanezca lejos de la degradación térmica como puede apreciarse en las figuras 63 y 64. A través de dichas imágenes logró apreciarse que el tamaño de la herradura es proporcional al desplazamiento del dado. Este comportamiento del material produce en la parte interior de la herradura un sello homogéneo “tearing” del material y además muestra un calentamiento adecuado del mismo, mientras que en la parte exterior de la herradura el material se encuentra degradado y deformado formando un tipo de agujero profundo que le ofrece una forma peculiar al sello de la ampolleta, es decir, el sello contiene un “ombligo”. Lo que se infiere de estas imágenes es que el sello del material al interior del dado ocurre de manera favorable durante la etapa inicial de la aplicación de presión mecánica, ya que es el momento cuando la presión mecánica tiende a cero ó tiene un valor muy pequeño (alrededor de 0.2 MPa) debido a que el material no opone resistencia a la presión mecánica y simplemente se encuentra en una etapa de desplazamiento,

sin embargo, una vez que la aplicación de presión mecánica se encuentra en su etapa final se presenta un valor de presión mecánica muy grande (alrededor de 3.3 MPa) debido a que el material debe oponer resistencia ante la presencia de presión mecánica y el material sufre un efecto que algunos autores, por ejemplo Hishinuma [1], denominan como “pouring out”, es decir, el material se derrama ante dicho valor de presión mecánica y finalmente el material comienza a derramarse y también a sobrecalentarse, provocando un sello poco eficiente que tiene una alta demanda de material y energía.

E.3. Observaciones Finales.

La capacidad de observar al estereoscopio muestras de unión de boquillas de PVC con distintas condiciones de calentamiento y tiempo de exposición permite analizar y comprender mejor el comportamiento del material y las características de unión que se presentan en cada caso.

El análisis estereoscópico ayudó a determinar diversas características del sello de la ampolleta que son consecuencia de la geometría interna del molde; ejemplo de ello son la forma del sello y los ángulos que sigue la unión del mismo. También ayudó a identificar los efectos del sobrecalentamiento en diferentes zonas de la unión del material en el sello.

Anexo F

F. La Ampolleta de PVC

Las actuales exigencias económicas, comerciales y normativas han desalentado el uso de contenedores de vidrio, provocando que las empresas que tienen la necesidad de contener sus productos en envases estén migrando paulatinamente a la utilización de contenedores de plástico. El cambio en el material del contenedor de vidrio a plástico presenta diferentes retos a superar y problemas a resolver, entre ellos se encuentran el llenado y el sellado del mismo.

Un elemento de relevancia en la presente investigación es la ampolleta, que representa una clase determinada de contenedor para la industria de los cosméticos. El contenedor debe contar con un diseño atractivo y funcional, atributos indispensables en la industria de los cosméticos hoy en día.

Las empresas productoras y empacadoras de shampoo, acondicionador y tratamientos para el cabello se encuentran constantemente investigando y desarrollando nuevos materiales y geometrías que ofrezcan una imagen refinada y estética para los diversos contenedores que utilizan sin comprometer costos de manufactura, empaque y embalaje.

Anteriormente las ampolletas se fabricaban con vidrio y eran selladas con flama de gas, con el paso del tiempo la seguridad en su transportación y uso y el costo en su manufactura se volvieron factores determinantes para buscar nuevas opciones para cubrir las funciones que satisfacía la tradicional ampolleta de vidrio.

La tabla 25 que se muestra a continuación presenta la comparación de diversas características entre las ampollitas de vidrio y las ampollitas termoplásticas de PVC.

Tabla 25, Tabla Comparativa entre Ampollitas de Vidrio y Ampollitas de Plástico.

Ampollitas de vidrio	Ampollitas de PVC
En un medio ideal para contener elementos estériles debido a que la flama es un medio estéril.	Generalmente contiene elementos que no requieren estar esterilizados, debido a que el proceso no es un medio estéril.
Es un producto adecuado para productos elaborados a base de alcohol ya que es 100% permeable para el oxígeno.	Este producto no es recomendable para productos elaborados con alcohol ya que no es 100% permeable para el oxígeno.
El sellado de este tipo de ampollita es de alta calidad y el proceso requiere de un control de calidad moderado.	El sellado de ampollitas de PVC es de alta calidad, sin embargo el proceso requiere de un alto control de calidad.
La ampollita de vidrio tiene un proceso de manufactura complejo y de alto costo.	El proceso de manufactura de la ampollita de PVC es mediante soplado y molde, lo que hace que para una gran cantidad de unidades sea un proceso económico y eficaz.
Están hechas de materia prima que es de difícil adquisición, ya que están fabricadas a partir de un tubo de alta precisión. Son tubos que son fabricados por pocas empresas a nivel mundial.	La ampollita de PVC ahorra hasta el 65% del costo de la ampollita de vidrio. Su proceso de manufactura es accesible para muchos fabricantes y proveedores de materia prima.
El nivel de seguridad tanto de uso como de transportación es bajo.	Ofrece seguridad y la posibilidad de elaborar geometrías caprichosas, colores diversos.

Cabe señalar que el PVC es una sustancia sumamente tóxica y existen diversos estudios al respecto que empezaron a realizarse desde la década de los 70's. En 1974 se identifica como una sustancia que al estar en contacto con los seres humanos presenta un aumento significativo en la incidencia de casos con cáncer (hemangiosarcoma del hígado). Reportes más recientes se han centrado en la ocurrencia de anomalías radiológicas pulmonares que indican como principal síntoma dificultad para respirar. También se ha identificado al polvo de PVC como un agente etiológico en un tipo peculiar de fibrosis pulmonar intersticial asociado con una reacción granulomatosa, que se debe a los efectos del monómero de cloruro de vinilo (gas) sobre las moléculas proteínicas y los mecanismos inmunológicos activados por las proteínas alteradas, Lilis [17].

La figura 65 muestra las características de la boquilla de la ampolleta.

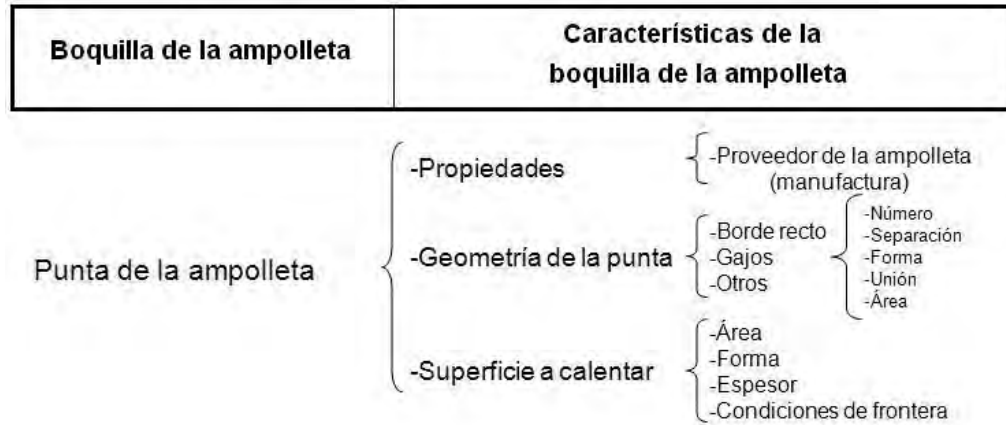


Figura 65. Características de la Boquilla de la Ampolleta.

La figura 66 se muestra la ampolleta que cuenta con un diámetro exterior de la boquilla de la ampolleta de 6 [mm] y un espesor de 0.5 [mm].

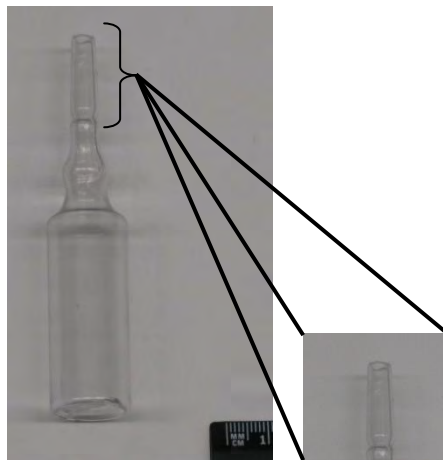


Figura 66. La Ampolleta y su Boquilla.

Anexo G

G. El Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica CDMIT

Como se explicó empresa multinacional de cosméticos, que se encuentra establecida en México, tomó la decisión de desarrollar tecnología en México para poder satisfacer las necesidades de su mercado y continuar siendo competitiva globalmente. Para lograrlo la empresa trabajó conjuntamente con la UNAM a través de su Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica (CDMIT) durante los últimos diez años.

La colaboración Universidad-Empresa permitió proponer diversas soluciones a los problemas del llenado y sellado del contenedor, que en lo sucesivo se denominará ampolleta plástica termo-formable; Olivares y Ramírez [23, 32], y se desarrollaron equipos cuyas innovaciones tecnológicas para el llenado y sellado de ampolletas plásticas termo-formables han posicionado a la empresa a la vanguardia en la producción industrial de ampolletas termoformables y a la Universidad en el estado del arte en cuanto al llenado y sellado de ampolletas plásticas termoformables se refiere.

El CDMIT representó un apoyo invaluable para el desarrollo de la misma, enriqueciendo la investigación con una retroalimentación objetiva, clara y precisa en todo momento.

La importancia de la presente investigación motivó la búsqueda para determinar los factores más relevantes del proceso de sellado y también motivó el establecimiento de una estrategia de arranque para iniciar un proceso de investigación formal. Parafraseando a Glegg [24], se puede afirmar lo siguiente: “Si se empieza en cualquier punto, no se llegará a ningún lugar”.

Las etapas correspondientes al trabajo previo de experimentación realizado en el CDMIT y el trabajo de campo exploratorio fueron fundamentales para la planeación y el desarrollo de la experimentación formal del presente trabajo de investigación que se tradujo en el diseño y desarrollo de experimentos precisos y repetibles que fueron necesarios para generar conocimiento que no existe y es necesario para el desarrollo de nueva tecnología de sellado de ampollitas termoplásticas de PVC.