

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

**Mejoramiento de Calidad: Aplicación de un Caso en una
Planta de Termoformado de Plástico en Quito**

Luis Edmundo Arellano Castillo

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título
de Ingeniería Química

Quito

Marzo 2005

© Derechos de Autor

Luis Edmundo Arellano Castillo

Marzo 2005

Dedicado a mis queridos padres

Edmundo

y

Noemí

Agradecimientos

La experiencia obtenida en este trabajo ha sido rica en lecciones importantes en muchos campos de mi vida: académico, profesional y humano. No pudo haber sido de esta manera sin el aporte significativo de muchas personas que estuvieron a mi lado y que me otorgaron el apoyo necesario para llevar a cabo con éxito la tesis presente.

Eric Mulder, director de mi tesis, fue la persona que principalmente me motivó a ser una investigación significativa y diligente durante el proyecto. Sus sugerencias, ideas y aporte profesional fueron muy valiosas para alcanzar resultados exitosos. Estimo en gran manera, el modo en que dedicó su tiempo y su especial interés para orientarme durante la tesis, le estoy profundamente agradecido.

La investigación efectuada no hubiera sido posible sin el aporte de la empresa que permitió realizar el proyecto en sus instalaciones. En particular deseo agradecer a Maria del Carmen que mostró genuina preocupación e hizo todo lo posible para que el proyecto marche adecuadamente. El grupo de ingenieros, en especial Alvaro, y el personal de operaciones también contribuyeron en forma representativa para proponer soluciones y efectuar pruebas para el mejoramiento de calidad. En general, extendiendo mis sinceros agradecimientos a todo el personal de dicha empresa que estuvo envuelto en la tesis realizada; tienen un grupo excelente de personas entregada a su labor.

En la universidad, también, quisiera agradecer a otros profesores por la manera en cómo desplegaron ayuda oportuna y ánimo en diversas etapas del proyecto. Carlos Fabara, Andrés Batallas, Nelson Herrera, Patricio Larrea son algunos de ellos.

Siempre me consideraré en deuda por el apoyo incondicional y esmerado de mi familia. La realización de este trabajo exigió mucha dedicación, esfuerzo y empeño constante. Agradezco a mis padres, Edmundo y Noemí, quienes efectuaron todo lo que estuvo a su

alcance para infundirme ánimo y promover el ambiente propicio para llevar a cabo la tesis. Esta solo una de las muchas muestras del amor profundo que tienen hacia mi persona. Los aprecio y quiero en gran manera. A mi hermano, Aleajndro, también estoy agradecido por los comentarios edificadores y ayuda sincera.

Sobre todo siento una inmensa gratitud por la persona que ha hecho posible que esté escribiendo, con una hermosa vida, este trabajo y que ha puesto de manifiesto su gran amor a todas las personas. A lo largo de todo el proyecto es quien me ha sostenido hasta en las épocas más difíciles. Mientras más comparto tiempo con Su Persona más cariño y reverencia siento por Él. Podríamos dedicar toda la vida para conocerlo y nunca terminaríamos de sorprendernos de lo maravilloso de Su Persona. A nuestro Creador, Jehová Dios, sean las gracias hasta tiempo indefinido.

Resumen

Los proyectos de mejoramiento de calidad en las empresas apuntan al incremento de eficiencia y efectividad de gran importancia ante las regulaciones de libre comercio. En toda empresa se presentan oportunidades de mejoramiento que deben ser resueltas bajo una cultura de calidad que incluya estos proyectos para satisfacer las necesidades de los clientes a costos cada vez menores. El trabajo presente es un caso aplicado a una empresa de plásticos que termoforma envases desechables e industriales.

Los principios del mejoramiento de calidad por proyectos son empleados en este trabajo, en el cual, desde la búsqueda de problemas de calidad hasta la propuesta de una mejora, se orientan esfuerzos y recursos para maximizar beneficios. La administración del proyecto se basa en la teoría de mejoramiento de calidad, sin embargo, la investigación para proponer la mejora incluye conocimientos de plásticos, extrusión, termofomado y tópicos específicos de calidad de control de espesor de lámina.

La tesis contiene tres partes. La parte I muestra la teoría para la comprensión y ejecución del proyecto con introducciones a: mejoramiento de calidad, plásticos, extrusión y termoformado. La parte II presenta la primera fase práctica del proyecto desde la búsqueda de problemas de calidad hasta la selección y estudio inicial de un problema relevante del peso del producto asociado al espesor de lámina. Se generaron teorías importantes relacionadas al control del espesor a partir de la experiencia del personal e información investigada en la literatura. La parte III contiene la fase experimental en la que se verificaron las teorías más importantes. Finalmente, se expone una solución al problema estudiado con una mejora del 33% en el indicador del peso del producto.

Abstract

Enterprises' quality improvement projects aim to better efficiency and effectiveness which have great importance in the presence of the free trade regulations. In every business, quality improvement opportunities appear and they should be solved under a quality culture that includes these kind of projects to satisfy customers' needs at lower costs. The present work is a case applied to a plastic thermoforming plant that manufactures disposable and industrial containers.

Quality improvement principles by projects were applied on this work, in which, efforts and resources were oriented to maximize benefits, ranging from the search of quality problems to a proposal of an improvement. Although the project's management basis lays on the quality improvement theory, the research to propose the improvement includes knowledge over plastics, extrusion, thermoforming, and specific sheet thickness quality control themes.

The thesis consists of three parts. Part I shows the theory basis for the project's comprehension and execution, with introductions to: quality improvement, plastics, extrusion and thermoforming. Part II presents the first practical phase of the project going from the search of quality problems through the selection and initial studies over a relevant weight product problem. This problem were related to the sheet thickness, therefore, important theories about sheet thickness control were generated, starting from personnel's field experience and literature researched information. Part III contains the experimental phase in which the most important theories were verified. Finally, a solution for the studied problem is emitted with a 33% improvement in the weight product index.

Tabla de Contenido

Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
Tabla de Contenido.....	ix
Tabla de Ilustraciones.	xiv
Gráficos.....	xiv
Tablas.....	xix
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Descripción de la Empresa, sus productos y necesidades	2
1.2 Definición del Proyecto	4
1.3 Objetivos del Proyecto.....	5
1.4 Visión General del Proyecto	5
PARTE I : INTRODUCCIÓN AL MEJORAMIENTO DE CALIDAD DE UNA PLANTA DE TERMOFORMADO	9
Capítulo 2: El Concepto de Calidad y las empresas de hoy.....	9
2.1 Definiciones importantes relacionadas a Calidad.....	9
2.1.1 Definición de Calidad.....	9
2.1.2 Definición de especificación.....	10
2.1.3 La Productividad.....	10
2.1.4 Costos de Calidad.....	10
2.1.5 Interacción calidad, costos y productividad.....	10
2.2 Mejoramiento Continuo de Calidad. Enfoque de Proyectos.....	11

2.2.1 Herramientas Básicas de Mejoramiento de Calidad.....	12
2.2.2 Metodología general de solución de problemas para mejoramiento de calidad en base a proyectos.....	15
Capítulo 3: Introducción a los polímeros.	21
3.1 Clasificación en la industria.....	21
3.2 Propiedades generales.....	22
3.3 Propiedades de desempeño	24
Capítulo 4. Introducción al proceso de Extrusión.	27
4.1 Generalidades del proceso de Extrusión.....	27
4.2 Extrusión de láminas.....	29
4.2.1 Tolva de alimentación.....	29
4.2.2 Motor y Sistema de Engranajes	31
4.2.3 Barril y Tornillo.	31
4.2.4 Sistema de calentamiento/enfriamiento.....	36
4.2.5 Mezclador Estático	36
4.2.6 Bomba de engranajes.....	37
4.2.7 Sistema de filtrado.....	38
4.2.8 Cabezal.....	38
4.2.9 Rodillos de pulido.....	42
4.3 Aspectos de calidad en la extrusión.....	43
4.3.1 Aspectos generales.....	43
4.3.2 El control de espesor en el proceso de extrusión de láminas.....	45
Capítulo 5: Introducción al Proceso de Termoformado.	55
5.1 Generalidades.....	55
5.1.1 Técnicas y tipos de Termoformado.	55

5.1.2 Breve descripción de los pasos del termoformado	56
5.2 Alimentación y sujeción.	57
5.3 Calentamiento de lámina.	58
5.3.1 Tipos de calentamiento de lámina	58
5.3.2 Perfil de temperatura para el calentamiento de lámina.....	58
5.4 Estiramiento y Formación.....	61
5.5 Enfriamiento	64
5.6 Corte y Apilado.....	66
5.6.1 Corte.....	66
5.6.2 Apilado.....	67
5.7 Aspectos de calidad en termoformado.....	68
PARTE II : ANÁLISIS DE OPORTUNIDADES DE MEJORAMIENTO DE CALIDAD	70
Capítulo 6. Identificación y Priorización de Oportunidades de Mejoramiento de Calidad.....	72
6.1 Búsqueda de problemas de calidad.	72
6.1.1 Recolección de la información:	72
6.1.2 Selección de problemas relevantes	73
6.1.3 Definición de problemas recurrentes.	73
6.2 Estudio de priorización en los problemas de calidad.....	75
6.2.1 Mal ajuste en las tapas.	75
6.2.2 Impurezas en la lámina para termoformado.	75
6.2.3 Lámina no corta (Producto B)	76
6.2.4 Variabilidad y exceso de peso.	78
6.2.5 Tapas industriales rotas.....	79

6.2.6 Selección del proyecto estudio	80
6.3 Estudio inicial del caso elegido	82
6.3.1 Monitoreo Inicial del problema y resultados	83
6.3.2 Determinación de la causa principal del problema del peso.....	89
6.3.3 Modelo para el control del peso promedio a través del espesor de lámina ...	91
6.4 Conclusiones en la identificación y priorización de oportunidades de mejoramiento de calidad.....	96
Capítulo 7. Aspectos de calidad para el control de espesor	98
7.1 Monitoreo inicial del espesor.....	98
7.2 Monitoreo de variables de operación en el espesor de lámina	100
7.2.1 Temperatura de zonas del cabezal	100
7.2.2 Abertura del labio del cabezal	102
7.3 Listado de causas posibles del problema del espesor.	104
7.3.1 Modelado de la teoría de doblado dinámico de rodillos.....	105
7.3.2 Selección de las causas posibles de la variación de espesor de lámina	108
7.4 Conclusiones del monitoreo de los aspecto de calidad.....	109
PARTE III. CONTROL DE CALIDAD DEL ESPESOR DE LÁMINA	111
Capítulo 8. Pruebas en los rodillos	113
8.1 Prueba para verificar la deformación en los rodillos	113
8.2 Prueba para determinar la deformación permanente en los rodillos.....	122
8.2.1 Planteamiento de pruebas para verificar la deformación permanente de los rodillos y su selección.	123
8.2.2 Prueba con Plastigage.....	125
8.3 Conclusiones de las pruebas en los rodillos.....	131
Capítulo 9:Pruebas en el Cabezal y de Flexión en Rodillos.....	133

9.1 Procedimiento de las pruebas en producción.....	134
9.1.1 Ajustes de variables.	134
9.1.2 Metodología del monitoreo de las pruebas.	134
9.2 Resultados de la pruebas.....	136
9.3 Conclusiones de la pruebas en producción.	146
9.3.1 Análisis de beneficio de la propuesta en la operación.	147
Conclusiones	149
Investigación Futura.....	152
Anexos.....	154
Anexo 1:Análisis de Peso para productos importantes.....	154
Anexo 2:Monitoreo de Peso del Producto A antes de las pruebas. “Extrs 3”	157
Anexo 3:Datos para la relación Peso–Espesor en el producto A. “Extrs.3”	161
Anexo 4:Datos en el Modelo de Control del Peso Promedio en el espesor de lámina. 162	
Anexo 5:Datos en el Monitoreo Inicial del Espesor de Lámina. “Extrs.3”	164
Anexo 6:Datos en modelado de Teoría de Flexión Dinámica de Rodillos.“Extrs 3”... 166	
Anexo 7:Prueba lámina 4 veces circunferencia rodillo. Prod A “Extrs 3”.....	170
Anexo 8:Prueba lámina 4 veces circunferencia rodillo. Prod A “Extrs 1”.....	177
Anexo 9:Resultados de las pruebas en el cabezal y flexión de Rodillos. “Extrs 3”	184

Tabla de Ilustraciones.

Gráficos

Fig. 2.1 Diagrama de Pareto.Caso quejas por defectos en una refrigeradora.....	13
Fig. 2.2 Ejemplos de diagrama de dispersión.....	14
Fig. 2.3 Ejemplo de gráficas de control. Gráficas X barra y R.	15
Fig. 2.4 Diferencia entre problemas crónicos y esporádicos.....	16
Fig. 2.5 Ciclo de Mejoramiento de calidad con control	19
Fig. 3.1 Esfuerzo y velocidad de corte	24
Fig. 4.1 Equipo Básico de Extrusión de lámina.....	30
Fig.4.2 Zonas básicas de un tornillo.....	32
Fig.4.3 Fundido en la Zona de compresión	33
Fig.4.4 Tornillo con zona de ventilación.....	34
Fig.4.5 Tornillo con zona de mezclado.	34
Fig. 4.6 Clases de extrusoras doble husillo	35
Fig. 4.7 Configuración de un modelo de mezclador estático	37
Fig. 4.8. Dos vistas de la bomba de engranajes	37
Fig. 4.9 Vista superior y frontal de un cabezal típico de extrusión de lámina con sus partes	39
Fig. 4.10 Varios tipos de cabezal según el colector.....	41
Fig. 4.11 Cabezal Autoflex y esquema de construcción	42
Fig. 4.12 Algunas configuraciones de rodillos de pulido	42
Fig. 4.13 Configuración de rodillos y cristalización de lámina	44

Fig. 4.14 Flujo de material sin aplicación de barra restrictora	46
Fig. 4.15 Barra de restricción ajustada.	46
Fig. 4.16 Presión en un sistema de rodillos para lámina	51
Fig. 4.17 Doblado dinámico de rodillo y paredes de rodillo	53
Fig. 4.18 Variables en la teoría de deformación dinámica de rodillos	53
Fig. 5.1 Pasos básicos del termoformado de Polipropileno	57
Fig. 5.2 Ventaja de empleo de calentados superior e inferior	59
Fig. 5.3 Factor de vista y calentadores de lámina.....	60
Fig. 5.4 Perfil de temperatura de lámina. Hornos a igual temperatura	60
Fig. 5.5 Molde multicavidad con núcleos de ayuda.	62
Fig. 5.6 Espesor de pared mejorado en formación con núcleo de ayuda	63
Fig. 5.7 Formación por núcleo asistido	64
Fig. 5.8 Ejemplo de corte en el molde.	67
Fig. 5.9 Apilado con rotación de molde	68
Fig. 6.1 Relación para estimar beneficios brutos al emplear material en producto B.	78
Fig. 6.2 Diagrama de Pareto para los problemas seleccionados.....	81
Fig. 6.3 Diagrama de Pareto del % del costo de exceso de peso para productos A,B,C,D	83
Fig. 6.4 Cavidades en molde de formación para el producto A.	83
Fig. 6.5 Perfil típico del peso promedio por cavidad del producto A. Caso 1.....	84
Fig. 6.6 Perfil típico del peso promedio por cavidad del producto A. Caso 2.....	84
Fig. 6.7 Perfil de peso promedio por cavidad para muestras de producto D.....	86
Fig. 6.8 Cavidades en molde de formación del producto B.	86
Fig. 6.9 Perfiles típicos de peso promedio por cavidad de producto B con lámina extr.1.	87

Fig. 6.10 Perfil típico de peso promedio por cavidad de producto B con lámina de extr.3	87
Fig. 6.11 Comparación de diferencia de peso promedio respecto al mínimo en el producto B para dos tipos de proveedores de lámina.	88
Fig. 6.12 Espesores de lámina para productos A y B procedentes de “extrusora 3”	89
Fig. 6.13 Posición transversal en la lámina del punto medio de las cavidades.	90
Fig. 6.14 Relación espesor de lámina (“extrusora 3”) vs peso promedio del producto A..	90
Fig. 6.15 Espesor de lámina en sentido transversal para una muestra de largo igual a la circunferencia del rodillo de acabado.....	92
Fig. 6.16 Espesor promedio para la figura anterior.	92
Fig. 6.17 Perfil del peso para cumplir nivel referencial.....	93
Fig. 6.18 Perfil del peso promedio por posición transversal.	94
Fig. 6.19 Relación entre espesor y peso promedio.....	94
Fig. 7.1 Rango trasversal vs promedio de espesor para varias muestras de lámina de la extrusora en estudio.	98
Fig. 7.2 Desviación estándar transversal vs promedio de espesor para varias muestras de lámina de la extrusora en estudio.	99
Fig. 7.3 Espesor de algunos productos en sentido transversal	99
Fig. 7.4 Datos de temperatura en las zonas del cabezal.	101
Fig.7.5 Datos encontrados de perfil de abertura de labio para distintos productos en las extrusoras.....	103
Fig. 7.6 Diagrama Causa-Efecto para el problema en la variación del espesor.	104
Fig 7.7 Resultados del modelado de la teoría de doblado dinámico (1).....	106
Fig 7.8 Resultados del modelado de la teoría de doblado dinámico (2).....	107
Fig. 7.9 Espesor de lámina para producto C realizado en la “extrs 1”.	109

Fig. 8.1 Divisiones realizadas para la medición de lámina como prueba de deformación de rodillos.....	114
Fig. 8.2 Espesor de la lámina en sentido máquina para extremo (2) (“extr3”).....	115
Fig. 8.3 Espesor de la lámina en sentido máquina para extremo (1) (“extr3”).....	116
Fig. 8.4 Espesor de la lámina de producto A en sentido máquina para el centro (“extr3”).	117
Fig. 8.5 Comportamiento del espesor de la lámina y el rango transversal para producto A en sentido máquina (“extr3”).....	118
Fig. 8.6 Variación en sentido máquina del rango transversal en la lámina de producto A (“extr3”).	119
Fig. 8.7 Relación entre rango transversal y espesor de los extremos para la prueba de lámina de varias veces la circunferencia de los rodillos (“extr3”).....	120
Fig. 8.8 Relación entre rango transversal y espesor de los extremos y centro para la prueba de lámina de varias veces la circunferencia de los rodillos (“extr1”).....	121
Fig. 8.9 Reloj comparador con guía.	123
Fig. 8.10 Procedimiento con Plastigage para determinar espacio entre superficies.....	125
Fig. 8.11 Empaque de plastigage y el filamento.	126
Fig. 8.12 Plastigage e indicador de comparación.....	126
Fig. 8.13 Relación para Plastigage. Espacio entre Superficies vs. Ancho de filamento....	126
Fig. 8.14 Posiciones en los rodillos para la prueba con plastigage	127
Fig. 8.15 Espacio entre rodillos para la extrusora 3. Prueba Plastigage.....	129
Fig.8.16 Diferencia de espacio entre rodillos respecto al mínimo por sección. Prueba Plastigage.....	129
Fig. 8.17 Espacio entre rodillos para la extrusora 1. Prueba Plastigage.....	130

Fig.8.18 Diferencia de espacio entre rodillos respecto al mínimo por sección. Prueba Plastigage.....	130
Fig. 8.19 Perfil del espesor transversal en la lámina para producto A que muestra mayor variabilidad en el lado centro- izquierda	131
Fig. 9.1 Perfil del remanente para prueba Rollo 92.....	136
Fig. 9.2 Un perfil del peso para la prueba rollo 92.....	137
Fig. 9.3 Perfil del remanente para prueba R121	137
Fig. 9.4 Perfil del peso para una muestra con el rollo 121.	138
Fig. 9.5 Variación del espesor de lámina en sentido máquina para muestra de lámina R 121	138
Fig. 9.6 Perfil del remanente para prueba R122.....	139
Fig. 9.7 Perfil del peso para una muestra con el rollo 122.	139
Fig. 9.8 Variación del espesor de lámina en sentido máquina para muestra de lámina R122	140
Fig. 9.9 Perfil del remanente para prueba R147.....	140
Fig. 9.10 Perfil del peso para una muestra con el rollo 147	141
Fig. 9.11 Variación del espesor de lámina en sentido máquina para muestra de lámina R147	141
Fig. 9.12 Perfil del remanente para prueba R164.....	142
Fig. 9.13 Perfil del peso para una muestra con el R164.....	142
Fig. 9.14 Variación del espesor de lámina en sentido máquina para muestra de lámina R164	143
Fig. 9.15 Perfil del remanente para prueba R16A.....	143
Fig. 9.16 Perfil del peso para una muestra con el R16A	144

Fig. 9.17 Variación del espesor de lámina en sentido máquina para muestra de lámina R16A.....	144
Fig. 9.18 Perfil del remanente para prueba R174.....	145
Fig. 9.19 Perfil del peso para una muestra con el rollo 174.....	145
Fig. 9.20 Variación del espesor de lámina en sentido máquina para muestra de lámina R.174	146

Tablas

Tabla 6.1 Lista Preliminar de problemas de calidad	72
Tabla 6.2 Estimación de costos por mal ajuste de tapas.....	75
Tabla 6.3 Estimación del problema de impurezas en la lámina	76
Tabla 6.4 Estimación de beneficios brutos al emplear material en producto B.	77
Tabla 6.5 Estimación del costo por exceso de peso.	79
Tabla 6.6 Estimación del costo asociado a las tapas rotas.....	80
Tabla 6.7 Resumen de problemas seleccionados y costos.....	80
Tabla 6.8 Análisis de exceso de peso para diversos productos	82
Tabla. 7.1 Resultados de espesores y rangos promedio para diversos productos	100
Tabla 7.2 Evaluación de variables en doblado dinámico	105
Tabla 9.1 Temperaturas en las zonas de cabezal Rollo 92.....	136
Tabla. 9.2 Temperaturas en las zonas de cabezal Rollo 121	137
Tabla. 9.3 Temperaturas en las zonas de cabezal Rollo 122.....	139
Tabla. 9.4 Temperaturas en las zonas de cabezal Rollo 147.....	141
Tabla. 9.5 Temperaturas en las zonas de cabezal Rollo 164.....	142
Tabla. 9.6 Temperaturas en las zonas de cabezal Rollo 16A	143
Tabla. 9.7 Temperaturas en las zonas de cabezal Rollo 174.....	145
Tabla 9.8 Resumen del indicador en el peso para las pruebas.	147

Introducción

1.1 Descripción de la Empresa, sus productos y necesidades

La empresa en la que se realizó el proyecto se especializa en la elaboración y comercialización de productos para el envasado de alimentos y productos industriales. Ofrece una amplia gama de productos plásticos, en su mayoría desechables, como son vasos, tarrinas, tapas y platos que están destinados a clientes nacionales y extranjeros.

La demanda actual de los productos es alta y a la vez creciente, lo que exige una mayor atención a la eficiencia y efectividad en los procesos. A pesar de que los reclamos no eran un asunto crítico ni recurrente, la administración de la empresa tuvo interés especial en establecer un Departamento formal de Calidad para asegurar mejor la calidad del producto y reducir los costos.

Uno de los objetivos de la empresa con el Departamento de Calidad es obtener los beneficios de un monitoreo sistemático de los atributos de los productos. Entre los beneficios están:

- Conocer si se está produciendo según parámetros de calidad
- Estimular a los operadores de planta la fabricación continua de productos de calidad.
- Establecer el primer paso en el control de calidad .

Conocer si se está produciendo según los parámetros de calidad. Los parámetros de calidad establecidos son las especificaciones del producto. Este criterio también se aplica a la materia prima. Por tal motivo, como trabajo preliminar al proyecto se establecieron, en base a la experiencia del personal y normas de calidad, los atributos principales de calidad de los productos. Se definieron y, en otros casos, verificaron los valores básicos de los atributos para documentar fichas técnicas de los productos. Luego se fijaron los atributos a monitorearse para una primera verificación de la calidad de los productos.

Estimular a los operadores de planta la fabricación continua de productos de calidad . El personal de la empresa estaba convencido del mejoramiento en el desempeño

del personal de planta, en especial de los operadores, al hacerles conocer que se está llevando a cabo un monitoreo sistemático de la calidad de los productos. Antes de iniciar el proyecto sí existía un monitoreo de la calidad del producto que efectuaba el personal de fabricación. Sin embargo, la empresa reconoce que la auditoría de calidad por parte de un ente distinto tiene sus ventajas.

Establecer el primer paso en el control de calidad. Es conocida la frase “se controla, lo que se mide”. El monitoreo de calidad es el primer paso en el control de calidad cuyo objetivo es mantener los atributos del producto dentro de las especificaciones determinadas. En ocasiones, para mantener los niveles de calidad, es necesario llevar a cabo ajustes que son parte del ciclo de control. El personal de la empresa confía en la experiencia del personal de planta para efectuar los ajustes necesarios para mantener la calidad.

Para implementar el Departamento de Calidad se deben conocer los procesos de la empresa. Básicamente existen dos procesos para la fabricación del producto: Extrusión y Termoformado. En el proceso de extrusión, a partir de materia prima y reprocesado, se fabrica la lámina destinada al termoformado. Para una mayor comprensión del flujo de material, se pueden definir algunas áreas funcionales: Recepción de materia prima, Preparación de materia prima (incluye molienda del reprocesado de termoformado y mezclado de materiales) , Extrusión, Termoformado, Embalaje y Almacenamiento. En base a estas áreas funcionales se presentó a la empresa un plan para el programa de calidad que podría seguir el Departamento de Calidad .

Con el conocimiento adquirido de la empresa, sus productos, procesos y requerimientos se determinó cuál sería el proyecto de estudio relacionado con el interés de la empresa de implementar criterios formales de calidad. A continuación se define el proyecto del presente trabajo.

1.2 Definición del Proyecto

El proyecto enfocó un caso de mejoramiento de calidad en el que se aplican tanto la teoría de calidad como los conocimientos de ingeniería de los procesos de fabricación de la empresa adquiridos a través de la literatura y la experiencia en planta. Los procesos industriales en la empresa, además, permiten la aplicación de técnicas de ingeniería química y, particularmente de plásticos, que tienen una demanda representativa en el país.

Mediante un proyecto de mejoramiento de calidad se lograría tener no solo una comprensión general de los procesos de fabricación de la empresa, sino la aplicación de conocimientos específicos investigados para lograr impactos positivos en la eficiencia y efectividad de la empresa.

Los proyectos de mejoramiento de calidad , generalmente, tienen el objetivo de reducir los costos de la compañía una vez que se ha logrado en buena medida la satisfacción de los clientes. Ya que la cantidad y gravedad de reclamos en la empresa no es un aspecto crítico, se puede percibir la necesidad de mejorar la productividad a través de proyectos como el efectuado en el trabajo presente. Hay que tener en cuenta que en toda empresa existe siempre algún aspecto en que mejorar. La empresas que tienen una cultura de mejoramiento continuo en sus procesos son aquellas que finalmente lograrán el éxito frente a los cambios y exigencias del sistema actual.

En el proyecto de estudio se mostrará la aplicación de una metodología básica de mejoramiento de calidad desde la búsqueda de problemas hasta la propuesta de una solución a un problema elegido. Ya que es complicado e inconveniente resolver en un proyecto todos los “problemas” de calidad percibidos en la empresa, es necesario centrar la atención en unos pocos importantes para definir qué estudios se efectuarán y asignar los recursos necesarios para el efecto.

1.3 Objetivos del Proyecto

- Conocer los procesos de fabricación de la empresa a través de la literatura y experiencia en planta como base para la investigación de problemas de calidad
- Determinar problemas de calidad importantes en la empresa.
- Escoger un problema de calidad en base a criterios de priorización para un estudio detenido del mismo .
- Determinar las causas principales del problema identificado mediante la experiencia del personal en planta y la literatura.
- Emitir un remedio o ajuste para el problema de calidad estudiado junto al análisis de beneficio de la solución propuesta.
- Establecer los beneficios de emplear criterios de mejoramiento de calidad con la participación conjunta del personal de la empresa.
- Diferenciar los criterios de calidad por monitoreo, mejoramiento y control.

1.4 Visión General del Proyecto

El trabajo presente se divide en tres partes: Introducción al Mejoramiento de Calidad en la Empresa , Análisis de Oportunidades de Mejoramiento de Calidad y Control de Calidad del Espesor de Lámina.

La primera parte presenta todo el marco teórico necesario para proponer mejoras de calidad. Los temas de interés son: mejoramiento de calidad, plásticos, extrusión y termoformado. El capítulo 2 contiene la teoría de mejoramiento de calidad con un enfoque particular de proyectos según Juran. La comprensión de los procesos de extrusión y termoformado requiere un conocimiento, al menos, básico de propiedades de plásticos que se analiza en el capítulo 3 . El capítulo 4 introduce el proceso de extrusión, y describe tanto el equipo de fabricación de láminas para termoformado como algunos aspectos de calidad

con especial interés en la teoría del control de espesor. El capítulo 5 abarca la descripción de los pasos del termoformado típico que se realiza en la empresa y algunos aspectos de calidad.

La segunda parte contiene la metodología empleada para la identificación de problemas de calidad, priorización y determinación de las posibles causas del problema elegido. En el capítulo 6, tras el listado de problemas calidad y su priorización, se estudia el más importante de éstos hasta determinar que el problema principal está en el proceso de extrusión. En el capítulo 7 se estudian los aspectos de calidad del problema de extrusión hasta definir las causas posibles que hacen ver la necesidad de efectuar pruebas en planta.

La tercera parte abarca los resultados de las pruebas efectuadas en planta para identificar la causa principal del problema elegido y la propuesta de un remedio con los beneficios potenciales de su implementación.

PARTE I: INTRODUCCIÓN AL MEJORAMIENTO DE
CALIDAD DE UNA PLANTA DE TERMOFORMADO

Un proyecto de mejoramiento de calidad requiere los conocimientos de los procesos en los cuales se va implementar la metodología. Sin embargo, previamente es necesario plantear los fundamentos teóricos de las técnicas de mejoramiento de calidad que se pueden aplicar al caso de estudio. Esta primera parte presenta el marco teórico introductorio para la comprensión de la metodología de mejoramiento de calidad y los procesos de fabricación de extrusión como de termoformado que se llevan a cabo en la compañía. Ya que los procesos de fabricación implican el tratamiento de plástico, se efectúa una breve descripción de polímeros. Al final de los capítulos de extrusión y termoformado se exponen aspectos generales de calidad en dichos procesos y una mayor explicación de la teoría especializada considerada para el planteamiento de mejora de calidad para el caso elegido durante el proyecto.

Capítulo 2: El Concepto de Calidad y las empresas de hoy

Calidad y Control de Calidad son palabras muy comunes en nuestro entorno. Se dice que la calidad es la que hace la diferencia entre el éxito y fracaso en la empresas (Soin 1). El enfoque del proyecto es aplicar criterios de calidad en una caso real. Se describirá una breve introducción de la teoría de la calidad empezando por definiciones importantes, hasta un análisis más detallado del *mejoramiento de proyectos* desde el punto de vista de proyectos.

2.1 Definiciones importantes relacionadas a Calidad.

Esta sección revisa conceptos importantes relacionados a calidad y la interacción del término con los costos para el beneficio empresarial.

2.1.1 Definición de Calidad.

El término ha evolucionado con el tiempo. Crosby considera que calidad es “ajustarse a las especificaciones” y Juran “adecuado para su uso”. Soin propone la definición de “productos y servicios que satisfacen las expectativas del cliente o las exceden” (6). Juran explica que la satisfacción del cliente se logra a través de dos puntos : (3-5)

- Características del producto: Relacionadas al diseño y tienden a elevar costos.
- Falta de deficiencias. Relacionadas a la calidad de conformancia (minimización de no conformancias respecto al diseño del producto) y pueden reducir los costos .

Estos elementos muestran que es posible pasar las expectativas del cliente a características de producto medibles directa o indirectamente. Así, juega un papel importante trasladar la “satisfacción del cliente” a las llamadas especificaciones de producto. La definición de Crosby, por tanto, es válida siempre que dichas especificaciones reflejen las expectativas del cliente.

2.1.2 Definición de especificación

Lester et al. expone que las “especificaciones representan las características detalladas que un producto tiene que tener.” (33). En forma práctica, menciona que las características importantes de un producto son las que tienen que estar especificadas. Se establecen límites superiores, inferiores o ambas para los parámetros importantes (26).

Las especificaciones son cruciales para traducir la calidad al producto, pero es necesario establecerlas de tal modo que armonicen con las expectativas del cliente externo como expectativas y limitaciones del cliente interno y los procesos.

Tanto Box como Besterfield hacen hincapié en que las especificaciones se aplican a las partes y no a los promedios de un conjunto de productos (Box 65, Besterfield 141). Hay ocasiones en que se aplican erróneamente los promedios de muestras a la especificación.

2.1.3 La Productividad.

Se refiere a cuán bien son empleados los recursos destinados para realizar un producto. Harrington considera a la productividad como medida de la *eficiencia*. Dicho autor dice que la eficiencia es “el punto hasta el cual los recursos se minimizan y se elimina el desperdicio en la búsqueda de la efectividad.”(83). Es por tanto un concepto importante que está relacionado estrechamente con los costos en una empresa. La *efectividad* es un sinónimo de calidad, y se define como “cuán bien se satisfacen las expectativas del cliente”. (127).

2.1.4 Costos de Calidad.

Juran agrupa los costos de calidad en cuatro clases: costos de fallas internas, costos de fallas externas y costos de evaluación. (Juran 16)

De este autor se resumen las cuatro categorías de costos:

El **costo de fallas internas** se asocian con defectos encontrados antes de transferir el producto al cliente. Desaparecen si no existieran defectos en productos antes de la entrega.

El **costo de fallas externas** están asociados con defectos que se encuentran después de mandar el producto al cliente. También desaparecen si no hubiera defectos.

Los **costos de evaluación** son los que se incurren al determinar el grado de conformidad con los requerimientos de calidad.

Los **costos preventivos** se [incurre para mantener] los costos de fallas y de apreciación al mínimo.

El **costo de baja calidad** es la suma de los costos en las categorías de fallas internas y externas(16-18)

Los costos de baja calidad son de especial interés debido a que están relacionados con proyectos de mejoramiento de calidad y reducen los costos. Ejemplos de estos costos son: desperdicio, retrabajo, pérdida de material, reposiciones a cliente por producto inaceptable.

2.1.5 Interacción calidad, costos y productividad.

Puede existir una interacción positiva como negativa entre éstos término

Interacción positiva: Lester menciona:

una mayor uniformidad en el producto supone (...) menos desechos, reprocesos, recuperaciones y reparaciones, de manera que los costes se reducirán y se ahorrarán materiales y energía. Los productos de mayor calidad (...) serán más fáciles de poner en el mercado, con (...) disminución de los esfuerzos de venta requeridos(Lester 30).

Dicho autor expone la ventaja de tener procesos y productos estandarizados. En dicho caso los costos de fallas serían mínimos y bajarían en cierto grado los de prevención

Interacción Negativa. Juran de manera realista dice que puede ocurrir que un esfuerzo mal dirigido por alcanzar la calidad cause problemas en costos y programación. Aspectos de diseño, como especificaciones con tolerancias irreales, y la inspección perfeccionista pueden repercutir negativamente en la eficiencia. Por otra parte, si se busca solo la eficiencia, como en reducción de costos, se puede hacer sufrir a la calidad. (10).

2.2 Mejoramiento Continuo de Calidad. Enfoque de Proyectos

El Mejoramiento Continuo de Calidad, pilar del Control Total de Calidad, tiene su origen con Shewhart quien propuso un ciclo para el mejoramiento de calidad que posteriormente lo popularizó Deming (Cantú 224). La técnica se mejoró hasta lo que se conoce como ciclo PHVA (Planear, Hacer, Verificar, Actuar). Basándose en este último ciclo, Juran estableció el “mejoramiento proyecto a proyecto”. (Cantú 225).

Dentro de la metodología de mejoramiento continuo se revisará:

- Herramientas básicas en el mejoramiento de calidad
- Pasos del enfoque de proyectos

2.2.1 Herramientas Básicas de Mejoramiento de Calidad

Según Soin, Ishikawa dice que las 7 herramientas básicas de mejoramiento de calidad se pueden utilizar para resolver el 95% de los problemas de calidad (291). Son siete herramientas básicas: Histograma, Diagrama de Causa y Efecto, Hojas de Verificación, Diagrama de Pareto, Gráficas de Dispersión, Estratificación, y Gráficas de Control.

Histogramas. Gráficas para visualizar “la distribución de un conjunto de datos”. Aplicadas a datos de un proceso son útiles para “sacar conclusiones sobre las posibilidades del proceso de cumplir la especificación, o de tendencias no deseadas”. Se los realiza en base a datos representativos recogidos de un proceso (Cantú 229). Usualmente se los aplica a *muestras individuales* y por ello son útiles para compararlas con especificaciones.

Diagrama de Causa y Efecto (o de Ishikawa). Con este diagrama se pretende visualizar las posibles causas de un problema en estudio para determinar la causa potencial. Cantú explica que el diagrama organiza las ideas emitidas de un grupo que analiza un problema. Dichas ideas se estratifican para después graficarlas en la “espina de pescado”. Ishikawa sugiere agrupar las ideas en 6 categorías principales (6 M's): materiales, maquinaria, mano de obra, métodos de trabajo, medición y medio ambiente (233).

La espina principal del gráfico apunta hacia el problema de interés. Hacia ella fluyen las flechas de las categorías principales. A estas categorías convergen las distintas causas detalladas con sus nombres y se puede ramificar hasta el nivel que sea necesario.

Diagrama de Pareto. Pareto en un estudio concluyó que el 80% de la riqueza estaba concentrado en el 20% de la nación (80/20). Juran lo aplicó atribuyendo el 80% de los efectos de un problema a un 20% de las causas (Cantú 231). El diagrama contiene en el eje horizontal las causas del problema ordenados de mayor a menor según las ocurrencias.. Como en el histograma, el eje vertical izquierdo es el de ocurrencias, pero se suele incluir un eje vertical derecho para graficar una línea de porcentaje acumulado.

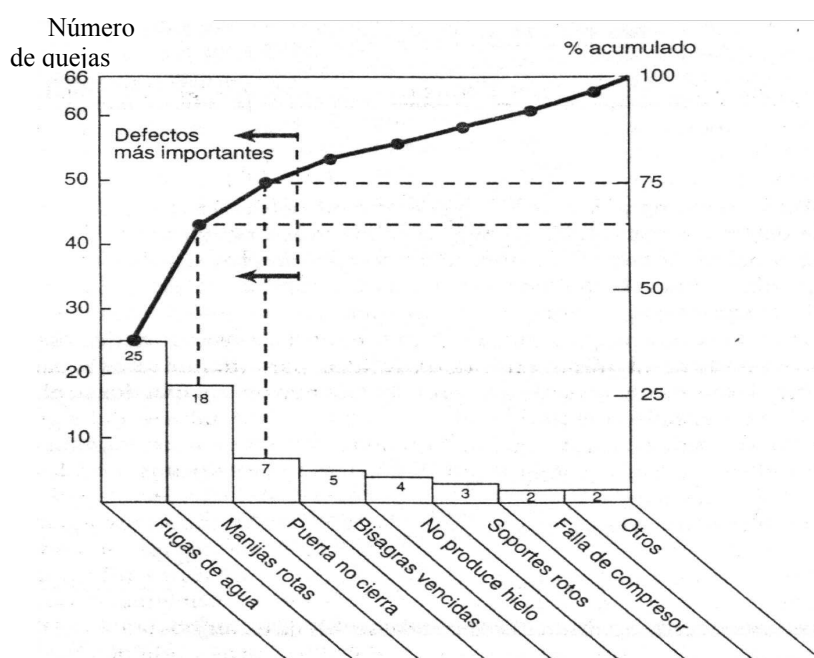


Fig 2.1 Diagrama de Pareto del número de quejas por tipo de defecto en una refrigeradora

Hojas de Verificación. Útiles para la recolección sistemática de datos. Permiten una recopilación precisa de datos del personal de operación. (Besterfiel 25)

Diagramas de dispersión. Técnica para ver la relación causa y efecto entre variables tanto en forma visual como estadística. Por ejemplo la relación entre: dos características de calidad, una característica de calidad y una factor que la afecta o entre dos factores con una sola característica (Cantú 236).

La relación entre las variables pueden ajustarse según modelos conocidos. El más común es el modelo lineal en el que los puntos se agrupan a manera de línea recta. Para

ajustar a un modelo específico se recurren a técnicas estadísticas que también permiten conocer cuán bien se ajustan los datos a un modelo dado.

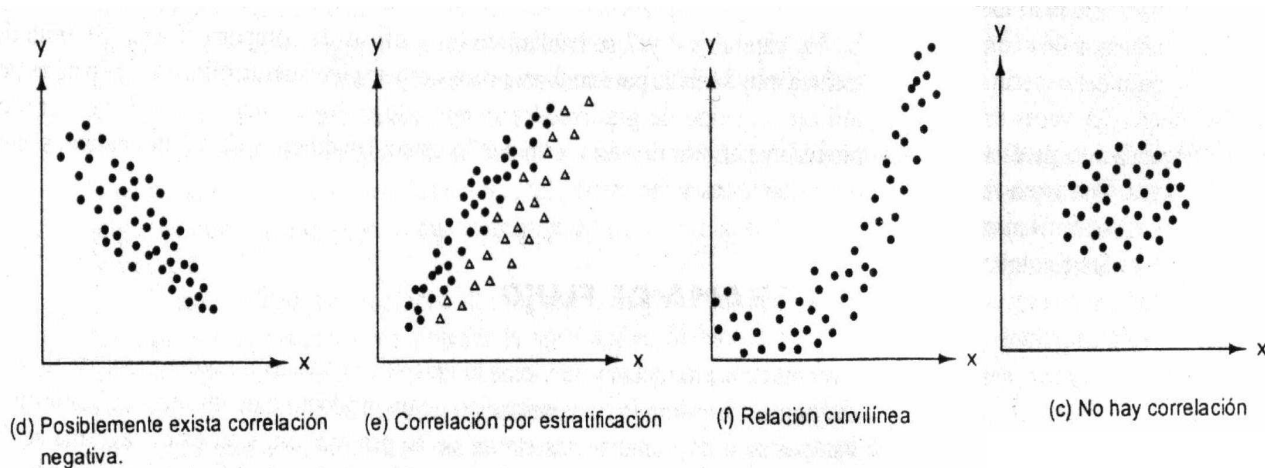


Fig.2.2 Ejemplos de diagrama de dispersión (Besterfield 33)

Estratificación. Se aplica para diferenciar en categorías los datos recogidos. La técnica consiste en “distinguir los diferentes estratos de donde proviene la información (...) Por ejemplo, (...) qué datos provienen de qué máquina o de qué operarios.”(Cantú 240). Puede ser que los defectos provengan de cierta máquina u operario.

Gráfica de Control: “Es una comparación gráfica de los datos de desempeño del proceso con los ‘límites de control estadístico’ calculados, dibujados como rectas limitantes sobre la gráfica” (Juran 379). La región entre los límites indica la variabilidad que se estima normal. Si los datos se salen de dicha región se considera una situación fuera de control. A continuación se describe su:

- Función en la teoría de calidad
- Utilidad en el mejoramiento de calidad.

Función: Box menciona que su función es ayudar a distinguir las causas comunes asociadas a la variabilidad en el comportamiento del sistema bajo un estado hipotético de control, de las causas especiales que son las que desvían al sistema de este estado “estable” (24). Una mala interpretación es confundir los límites de control con las

especificación de producto. Box explica que los límites de control “no tienen nada que hacer con los límites de especificación” (65).

Utilidad: En el mejoramiento continuo permite monitorear para saber si existe mejora y monitorear para mantener la mejora. La mejora puede ser evidente en la reducción de la variabilidad o el mejoramiento del nivel del indicador. En cuanto a su utilidad para mantener la mejora, Box expone que después de su descubrimiento, la mejora puede desaparecer si no se previene dicho resultado. “En el tiempo, las máquinas ajustadas de una manera cuidadosa, pueden ser desafinadas y la gente puede volverse menos cuidadosa en su trabajo.” (19).

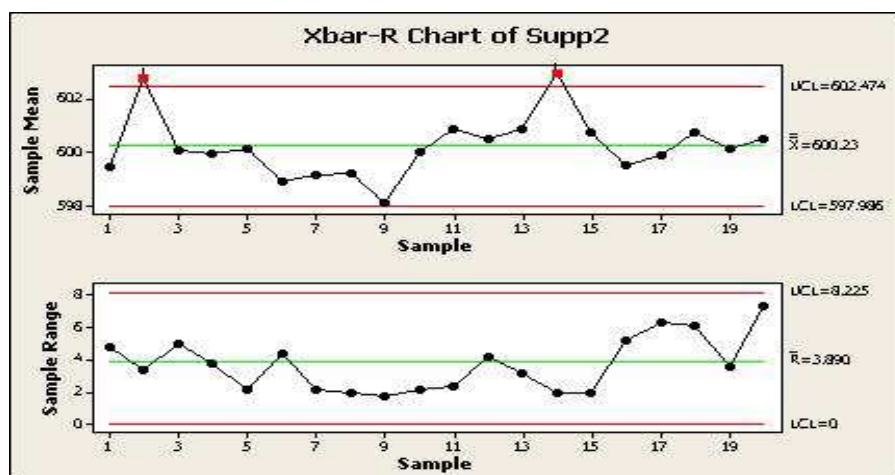


Fig 2.3 Ejemplo de gráficas de control. Gráficas X barra y R.

2.2.2 Metodología general de solución de problemas para mejoramiento de calidad en base a proyectos.

Juran asegura que el enfoque de mejoramiento de calidad más efectivo es de “proyecto a proyecto”(41). Para aplicar dicho enfoque se debe diferenciar los *problemas esporádicos* asociados con las variaciones especiales citadas en las gráficas de control, de los *problemas crónicos* que son situaciones adversas continuas que requieren de un cambio de un estado bajo control a un nuevo de mejor calidad. Juran sugiere el empleo de los métodos estadísticos de control de procesos para solucionar problemas esporádicos y el

enfoque de proyectos de mejoramiento de calidad para los problemas crónicos. Cada proyecto se relaciona con un problema crónico específico. (Juran 40,41)

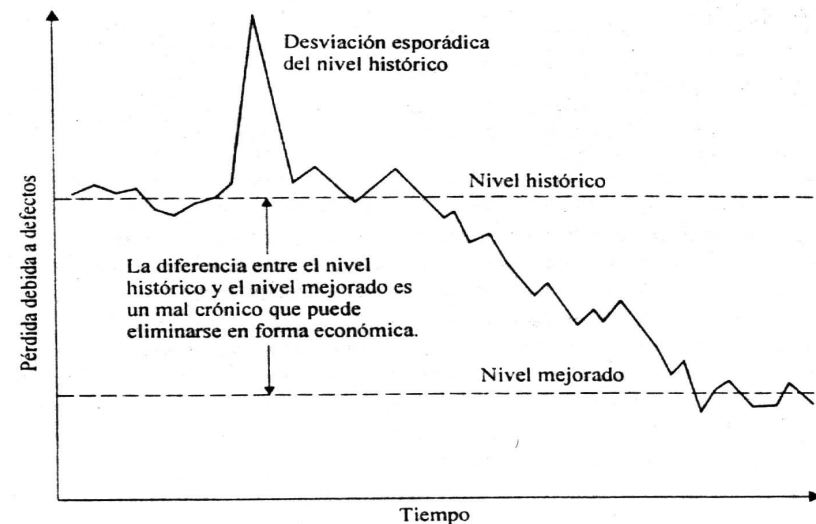


Fig. 2.4 Diferencia entre problemas crónicos y esporádicos.

Los pasos que considera Juran en el mejoramiento por proyectos son:

- 1) Establecer el enfoque de proyectos.
 - a. Probar la necesidad.
 - b. Identificar los proyectos
 - c. Organizar los equipos para el proyecto
- 2) Ejecución de proyectos individuales
 - a. Verificar la necesidad y la misión del proyecto
 - b. Diagnosticar las causas
 - c. Proporcionar un remedio y probar su efectividad
 - d. Manejar la resistencia al cambio
 - e. Instituir controles para mantener las ganancias (Juran 42)

Probar la necesidad. Se convence a la administración de la importancia del enfoque de mejoramiento de calidad a través de información pertinente de los problemas de calidad, como costos de baja calidad, y se muestran los beneficios potenciales de aplicar el mejoramiento continuo. El mejor lenguaje para transmitir la necesidad es a través de cifras monetarias. Se aplica también a proyectos individuales (Juran 45).

Identificación de proyectos Básicamente se efectúan 3 pasos: nominación, priorización y elección de un proyecto.

Nominación: Se listan los problemas en base a los datos de varias fuentes o departamentos de la empresa. Por ejemplo: Análisis realizados de costos de calidad, información de ventas, presupuesto anual, etc (Juran 47)

Priorización: Se puede emplear el principio de Pareto o un modelo en que se incluya el alcance del proyecto, el beneficio potencial, probabilidad de éxito, etc.. (Juran 49).

Selección: Se selecciona el proyecto inicial de mayor impacto. Entre algunas sugerencias están: manejar un problema crónico, ser factible con buena probabilidad de éxito, y la posibilidad de alcanzar resultados medibles en términos monetarios (Juran 50).

Finalmente, se establece el problema o proyecto elegido con una meta, misión y fecha tentativa de culminación. (Juran 50).

Organización de Equipo del Proyecto. El equipo se integra, generalmente, de 6 a 8 personas de varios departamentos involucrados. Se compone de un director, secretario (documentación) y otros miembros con habilidades y conocimientos pertinentes. A veces existe la necesidad de incorporar a especialistas en ramas específicas (Juran 50,51).

Verificar la necesidad y misión del proyecto. Se revisa el alcance del proyecto y la necesidad en números. Juran explica que se pueden emplear los indicadores del primer paso. El objetivo es asegurarse de que la inversión esté justificada y “ayudar a vencer la resistencia a aceptar e implementar el remedio” (Juran 53).

Diagnosticar las causas. En la ejecución de proyectos individuales se intenta llegar a la(s) causa(s) que provoca(n) el problema de calidad a través de técnicas apropiadas según el caso de calidad. Para determinar las causas se sugiere: estudiar los síntomas, proponer teorías, y recolar y analizar datos para probar las teorías (Juran 53, 54).

Estudio de síntomas como base a las teorías Pueden existir varios síntomas asociados a un problema. Se puede recurrir principio de Pareto para definir unos pocos síntomas vitales

Formulación de teorías: Se genera las teorías, ordena y elige las que se probarán.

Para *generar* las teorías el equipo puede realizar una lluvia de ideas de las causas posibles. En manufactura las teorías pueden consistir en las variables más importantes.

Luego, se *ordena* la teorías y ven interrelaciones. Puede usarse el diagrama de Ishikawa.

Al *elegir* las teorías que se van a probar se priorizan las teorías en base a la experiencia para decidir que teoría o teorías se probarán (Juran 55,56).

Recolección y análisis de datos para probar las teorías. Existen algunas herramientas que Juran menciona para probar las teorías y recolectar los datos : (Juran 58-67)

Estratificación: Se separa y estudia los productos de varias líneas, máquinas, etc .

Análisis de un periodo a otro: Se emplea series de tiempo, graficas de control, etc.

Búsqueda por asociación: Se analizan datos de síntomas con alguna teoría causal, un proceso señalado, herramientas, etc. Se puede emplear la gráfica de dispersión.

Experimentación.: Se hace un estudio ya sea en laboratorio, producción o simulación para determinar variables dominantes o evaluar variables sospechosas. Generalmente, tras la experimentación está la proposición de un modelo que relaciona las variables causa . Se debe proponer un plan para la experimentación en que se definan los ajustes en la variables a efectuar y el tipo de monitoreo. Acerca de los experimentos en producción, Juran dice que para “lograr el máximo desempeño en algún proceso de manufactura , el efecto de las variables clave sobre la producción del proceso o las propiedades del producto deben demostrarse en las condiciones de planta”. (Juran 65)

Proporcionar un remedio y probar su efectividad: Identificada la causa es necesario proporcionar un remedio. Juran menciona lo esencial de tomar en cuenta los costos de la compañía y los costos para el cliente. Cada alternativa tiene un costo asociado en el que se debe incluir los impactos en la eficiencia y la efectividad. (73,74).

Para probar la efectividad del remedio Juran sugiere que se efectúe una evaluación final en condiciones reales y normales de producción (74).

Manejar la resistencia al cambio. Una de las razones principales de la resistencia al cambio es el posible impacto en el patrón de hábitos, creencias, tradiciones u otros efectos sociales que es necesario conciliar para la conclusión exitosa (Juran 75).

La motivación del cambio exige experiencia, participación conjunta desde la planeación, y comunicación a las áreas interesadas sobre los beneficios individuales y globales a obtenerse. La puesta en marcha del remedio requiere un plan de implementación impulsado por un equipo que motive al cambio y la intervención de los empleados relacionados con la solución emitida.

Instituir controles para mantener las ganancias. Es necesario mantener el nivel mejorado por el proyecto. Entre algunas sugerencias están: automatización, estandarización mediante la elaboración de procedimientos de operación y entrenamiento, proporcionar sistemas de control por medio de un ciclo de retroalimentación y procedimiento de ajuste (Juran 77). Para monitorear las características de calidad y compararlos con estándares pueden ser útiles las gráficas de control. Cabe destacar que dichas gráficas no dicen la acción correctiva a realizar sino *cuando* se debería actuar.

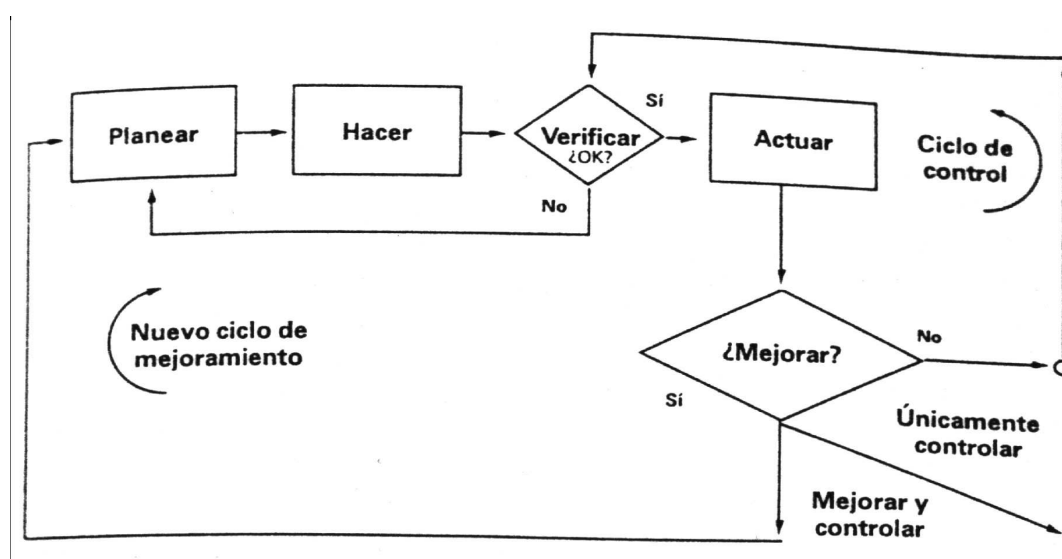


Fig 2.5 Ciclo de Mejoramiento de calidad con control (Soin 97)

Después de verificar los resultados exitosos de la mejora e implementar los controles se puede decidir en continuar con el proyecto para mejorar los resultados o empezar un proyecto nuevo diferente según sean las prioridades y recursos (Fig 2.5) (Soin 97, 108).

La teoría de mejoramiento de calidad expuesta es una buena guía para determinar el enfoque del proyecto. Uno de los principios útiles es el de priorización de problemas y causas que permiten centrar la atención y esfuerzos en aspectos de mayor impacto para la empresa . La secuencia presentada para formular teorías, probarlas y emitir un remedio es práctica para proyectos de manufactura en la que se presentan algunas variables importantes que repercuten en la calidad del producto. Sin embargo, para investigar las causas y soluciones es necesario tener conocimiento de los procesos envueltos. A continuación se presenta la base para comprender la fabricación de los productos plásticos en la planta en el Capítulo 3 de Introducción a los Polímeros.

Capítulo 3: Introducción a los polímeros.

Un polímero es una “molécula grande compuesta de muchas unidades más pequeñas” a las que se denomina monómeros (Wade 1240). La formación de las cadenas de monómeros se conoce como polimerización y al número de unidades de repetición en la molécula final se denomina grado de polimerización. (Crawford 8). La explicación más simple de este proceso es a través de la polimerización por adición. En este tipo de polimerización la molécula base contiene un doble enlace carbono-carbono ($-C=C-$) que es abierto con la ayuda de catalizadores, presión o calor.

Por ejemplo, para el caso del etileno ($H_2C=H_2C$) al polimerizarse resulta en polietileno ($H_2C-[CH_2-CH_2]_n-CH_2$) que está formado por “ n ” segmentos etilénicos. Throne explica que el grado de polimerización afecta las propiedades del polímero, así para el polietileno con “ n ” en el orden de 100 el polímero tendrá el aspecto de una cera, mientras que con n en el orden de 300 000 el polímero no se puede procesar con técnicas normales debido a su alta resistencia y dureza. (Throne (a) 9)

3.1 Clasificación en la industria

En la industria del plástico a los polímeros se los clasifica en: termoestables y termoplásticos.

Termoplásticos. Se pueden calentar y dar formar varias veces sin un cambio sustancial en sus características. Más de un 80% de los polímeros empleados en el mundo son termoplásticos(Throne(a) 10). “Estos polímeros se caracterizan por tener moléculas orgánicas bidimensionales excepcionalmente largas, cercanamente lineales”. La facilidad de moldeo de este tipo de material se debe a la estabilidad térmica y química bajo las condiciones de operación tradicional. La economía del termoformado depende de estas propiedades de los termoplásticos. (Throne (b) 55).

Termoestables. Estos plásticos después de haber sido calentados y dado forma la primera vez no puede ser formados de nuevo (Throne (a) 10). La estructura de estos materiales consta de redes tridimensionales relativamente pequeñas en forma de bloques (Throne (b) 55). Las moléculas en dichos bloques están unidas entre sí en puntos de entrecruzamiento que se denominan retículas (Michaeli 34). Se caracterizan por ser plásticos rígidos y sus propiedades mecánicas no son sensitivas al calor. (Crawford 9). Cuando el número de retículas es pequeña al polímero se lo conoce como elastómero.

3.2 Propiedades generales

Las propiedades generales de los polímeros que se revisarán son:

- Peso Molecular
- Cristalinidad
- Temperaturas de transición
- Viscosidad

Peso Molecular. El peso molecular del polímero dependerá de la longitud de las cadenas de las macromoléculas formadas en la polimerización. Ya que es imposible formar cadenas de una misma longitud, el tamaño y peso molecular de las cadenas siguen una distribución de probabilidad. Richardson explica que dicha distribución puede caracterizarse por dos parámetros: el peso molecular de media en número (“Mn” basada en la frecuencia de las longitudes moleculares) y el peso molecular en peso (“Mw” considera la contribución de las moléculas al peso total de la muestra). La relación entre Mw y Mn se conoce como índice de polidispersidad (IP) que es una medida de la variabilidad de la distribución de peso molecular (139).

Cristalinidad. Wade menciona que “los polímeros rara vez forman grandes cristales” pero sí pueden formar “regiones cristalinas microscópicas, llamadas cristalitos” (1256). Los

polímeros que pueden formar cristalitos se llaman *semicristalinos*. La cantidad de cristalitos que puede formar un polímero depende de las ramificaciones de las cadenas. Cuando éstas son pocas y cortas “es posible que determinadas regiones de las cadenas se ordenen y dispongan en forma compacta unas al lado de otras”. Si las cadenas moleculares tienen muchas ramificaciones o cadenas laterales largas difícilmente no pueden formar cristalitos y carecen de “orden estructural” por lo que se les llama *amorfos*. (Michaeli 33). El polipropileno es un polímero semicristalino.

Temperaturas de transición. Todo polímero a bajas temperaturas es quebradizo y duro a manera de vidrio. En este estado las moléculas “se sujetan unas a otras mediante fuerzas intermoleculares, y no pueden apenas moverse.”(Michaeli 39). Al aumentar la temperatura se llega a un estado en que las moléculas de orden amorfo tienen cierta movilidad. Esta temperatura se denomina de transición vítrea (T_g).

Michaeli dice que para el caso de polímeros amorfos, a partir de T_g las fuerzas intermoleculares son “tan pequeñas que las macromoléculas pueden deslizarse unas sobre otras cuando actúa una fuerza exterior”. A medida que se aumenta la temperatura, estos polímeros empiezan a fundirse poco a poco pero sin una temperatura de fusión definida. En el caso de los semicristalinos, sobre T_g las zonas amorfas adquieren movilidad mientras que los cristalitos mantienen su estructura y el plástico adquiere resistencia y tenacidad (39,41) . Los cristalitos finalmente se funden a la temperatura de fusión (T_m) y el “polímero es un líquido viscoso que se puede extruir” (Wade 1257). El termoformado es un proceso de deformación de un polímero en estado termoelástico sólido sobre la T_g en el caso de los polímeros y amorfos y cerca de T_m en el caso de los semicristalinos (Throne(b) 78).

Al rango de temperaturas en el cual se puede termoformar el plástico se conoce como ventana de termoformación que para los polímeros amorfos es más amplio que los semicristalinos y, particularmente, pequeño para el caso del polipropileno (Throne (a) 12).

Viscosidad. La viscosidad se define como “la resistencia de un fluido frente a cambios posicionales irreversibles”. La ley básica que describe la viscosidad es la ley de Newton en la que la viscosidad (η) es igual a la relación entre el esfuerzo cortante o de cizalla (τ) y la rapidez de deformación cortante o velocidad de corte ($\dot{\gamma}$). Παρα ελ χασο σιμπλε δε φλυιδος νεωτονιανος ταντο, τ χομο γ σιγυεν υνα ρελαχι (ν προπορχιοναλ ψ, πορ ταντο, λα ωισχοσιδαδ νο δεπενδε δελ εσφυερζο δε χορτε περο σ' δε λα τεμπερατυρα. Λοσ πολ'μεροσ, εν χαμβιο, σον φλυιδος νο νεω τονιανος ψ λα ωισχοσιδαδ παρ'α χον ελ εσφυερζο δε χορτε ο λα πελοχιδαδ δε χορτε αδεμ(σ δε λα τεμπερατυρα (U Valencia Mod.12). Richardson comenta que la viscosidad depende también del grado de polimerización y la densidad (95).

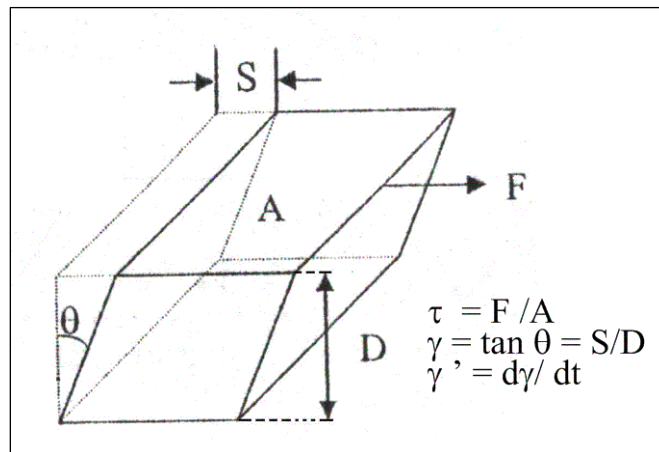


Fig 3.1 Esfuerzo y velocidad de corte

3.3 Propiedades de desempeño

Algunas propiedades de desempeño de los polímeros son:

- Orientación

- Índice de fundido
- Claridad
- Propiedades Mecánicas

Orientación. Throne define a la orientación como la cantidad de tensión o estiramiento residual en una lámina de plástico, usualmente en cierta dirección ((a) 147). Existen casos en los que el plástico es estirado durante la fabricación de productos para orientar en cierta dirección a las moléculas del polímero. De esta manera se pueden mejorar algunas propiedades del polímero como la resistencia a la tracción y el impacto (Throne (b) 70).

Índice de fundido. La determinación del peso molecular de un polímero es compleja por lo que usualmente se recurre al índice de fusión para tener una “estimación ‘rápida y somera’ de las longitudes moleculares medias de una muestra”. Este indicador es una medida de “la cantidad de material en gramos que se extruye a través de un pequeño orificio en 10 minutos a una presión y temperaturas determinadas” (Richardson 139,98) A mayor índice de fundido la viscosidad y peso molecular es menor.

Claridad. Al hablar de plásticos transparentes se hace “referencia a que absorbe muy poca luz en el espectro visible”. La claridad es una medida “de la distorsión observada al contemplar un objeto a través de plásticos transparentes”. Para su medición se puede recurrir a la técnica de transmitancia luminosa (Richardson 105). Esta propiedad tiene gran dependencia de la cantidad de zonas amorfas que tenga el polímero. Los plásticos amorfos son los más transparentes en su estado natural, mientras que los semicristalinos nunca son transparentes debido a la dispersión de la luz en las fronteras entre regiones amorfas y cristalina por lo que presentan un aspecto turbio (Michaeli 33).

Propiedades Mecánicas. Según la U. de Valencia los polímeros presentan “la mayor variedad y el mayor rango de propiedades mecánicas de todos los materiales”. Existen factores estructurales-moleculares y externos que influyen en las propiedades mecánicas.

Entre los primeros están: peso molecular, entrecruzamiento y ramificaciones, cristalinidad y morfología, orientación moleculares, entre otros. Se pueden citar factores externos como: temperatura, velocidad de esfuerzo, presión, historia térmica, tipo de fuerza aplicada, entre otros. Las propiedades mecánicas de los polímeros tienen gran dependencia de la temperatura y el tiempo debido a la naturaleza viscoelástica o comportamiento no newtoniano de los mismos (U Valencia Mod.12).

Para describir las propiedades mecánicas de un material se evalúa el desempeño ante distintos tipos de fuerzas o cargas. Las principales pruebas para determinar estas propiedades son: resistencia a la tracción, resistencia a la cizalla o esfuerzo de corte, y resistencia al impacto.

Se han revisado definiciones importantes sobre polímeros que permitirán la comprensión de algunos aspectos de los procesos de extrusión y termoformado. Es importante considerar la naturaleza no newtoniana de estos materiales y las propiedades descritas en el desarrollo del mejoramiento de calidad. A continuación se presenta la teoría básica de extrusión de lámina para entender el funcionamiento del equipo, el comportamiento del material durante el proceso y algunos aspectos de calidad relacionados con los objetivos del proyecto.

Capítulo 4. Introducción al proceso de Extrusión.

Una comprensión general de la extrusión es, al menos, necesario para el proceso de termoformado. De las propiedades de la lámina de extrusión dependerá la calidad del termoformado del producto final. En el proyecto la empresa extruye su lámina. De este modo, es necesario comprender el proceso de extrusión para tomar decisiones en cuanto a la calidad de la lámina que repercute en la calidad el producto final. Se expondrán algunas bases de extrusión.

4.1 Generalidades del proceso de Extrusión

El proceso de extrusión es el método más empleado en la fabricación de productos plásticos (Progelhof 405). En este proceso continuo, usualmente, se elaboran productos semiterminados para otros procesos. Básicamente, la extrusora (equipo de extrusión) funde la materia prima para hacerla pasar a través de una boquilla o cabezal y otorgarle una forma continua a un producto.

Las materias primas empleadas pueden ser polímeros termoplásticos o termoestables en forma de gránulos (pellets) o polvo. Si se tienen varios tipos de materias primas que se desea que formen un solo producto homogéneo, es necesario mezclar previamente las materias primas para tener un material de entrada lo más uniforme posible.

Tipos de Extrusión. La clasificación típica de extrusión es por el por el tipo de producto o semielaborado que se fabrica. Crawford explica que la “extrusión es un proceso extremadamente versátil ya que puede ser adaptado para producir una amplia gama de productos al emplear cabezales apropiados” (160). El tipo de extrusión, por tanto, depende del tipo de cabezal provisto . Entre los tipos comunes de extrusión están:

Perfiles: “Se aplica a la mayoría de los productos que no son tubos, películas, láminas o filamentos”(Richardson 194). Los perfiles tienen formas específicas y, por lo general, son

productos terminados como piezas de partes. En muchos casos la boquilla forma de manera aproximada el plástico para que en una fase siguiente se determine la forma final. (Richardson 194, Crawford 160,161).

Tubos: Se emplea el cabezal anular provisto de una pieza en el centro del eje denominado mandril que tiene una sección transversal circular a la salida del material y determina el radio interior de los tubos. El grosor de la pared de la tubería se controla mediante el mandril y el tamaño de la boquilla. (Richardson 195).

Película soplada Se emplea un mandril parecido al de extrusión de tubos. Richardson expone que una vez que pasa por el boquilla, el material a manera de tubo o “burbuja” “se expande (...) por soplado de aire por el centro del mandril hasta alcanzar el grosor de película deseado.” (199). La película se vende como tubos continuos, película continua o películas dobladas.”(200).

Filamentos: Se aplica a hebras de plástico únicas, largas y delgadas. Este tipo de extrusión se parece al de perfiles pero “la boquilla (...) contienen muchas aberturas pequeñas desde las que emerge el material fundido, y se emplean para producir pellets, granulados, monofilamentos y hebras de varios filamentos.” (Richardson 200,203). Para el caso de fabricación de pellets, Crawford dice que el filamento es enfriado por un baño de agua y después es cortado finamente (158).

Recubrimiento por extrusión Se divide en recubrimiento por lámina y de cables. Para láminas, los sustratos habituales son papel, tela, y plástico. Se coloca la lámina o película sobre el sustrato, y se prensa en un conjunto de rodillos (Richardson 205). En la aplicación de cables lo que se reviste son alambres. Richardson explica que el alambre precalentado es recubierto por plástico fundido a medida que pasa a través por la boquilla denominada de cruceta. El enfriamiento puede ser a través de canales de refrigeración o agua(206).

Láminas y películas. En esta clasificación se encuentra la lámina para termoformado. Se explicará con más detalle en la sección siguiente.

4.2 Extrusión de láminas.

El equipo básico de extrusión de lámina está compuesto por (Ver fig 4.1):

- Tolva de alimentación
- Motor y sistema de engranajes
- Tornillo(s) o husillo(s)
- Barril o cilindro;
- Sistema de calentamiento/enfriamiento
- Mezclador estático (opcional)
- Bombas de engranajes.
- Cabezal, dado o boquilla;
- Sistema de filtrado
- Rodillos de pulido
- Sistema de embobinado

4.2.1 Tolva de alimentación

La tolva es el punto de alimentación, tipo gravimétrica, de materia prima para la extrusora. El polímero puede alimentarse directamente en la tolva manualmente; sin embargo, en algunos equipos donde la tolva se encuentra a una altura a la que se podría acceder solo por escaleras, existen succionadores del material para alimentar desde la base de la extrusora. La tolva termina en una garganta que se conecta directamente al barril y el husillo.

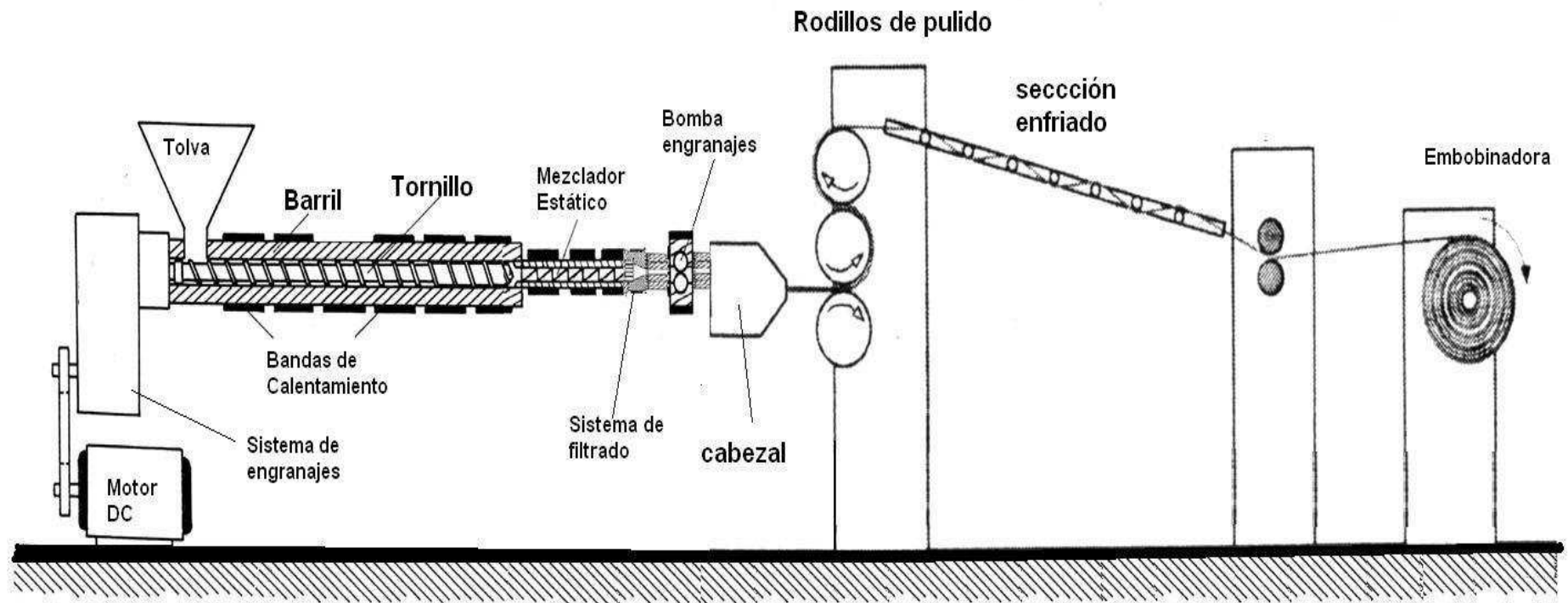


Figura 4.1. Equipo Básico de Extrusión de lámina (Adaptado de Throne(b) 588,595, Throne (a) 124, Richardson 191)

4.2.2 Motor y Sistema de Engranajes

El movimiento del tornillo es proporcionado por un motor DC. Lo más deseable es que el flujo a través del tornillo sea uniforme y controlado, por lo tanto, el motor usualmente es de velocidad variable y se añade un sistema de engranajes que efectúa la relación entre la velocidad de rotación del motor y la del tornillo.

4.2.3 Barril y Tornillo.

Progelhof explica que el *barril* consiste en un tubo de alta resistencia de un diámetro constante, en el cual, para el caso común de extrusora monohusillo, es montado un *tornillo* o husillo concéntrico. El material avanza a través del barril por los espacios entre el barril y los canales del tornillo que se forman entre las aletas y el centro de éste.(Progelhof 405). Mientras el polímero avanza por el barril éste se calienta y transforma en fluido. Básicamente el tornillo desempeña la función de “cargar, transportar, fundir y homogeneizar el plástico, y por ello es considerado como la pieza clave de la extrusora.”(Michaeli 77).

- En el conjunto barril-tornillo existen distintas zonas particulares con funciones específicas para la extrusión del material
- Comúnmente, se clasifican la extrusoras según el número de tornillos y su configuración.

Se revisarán estos dos puntos clave en la extrusión.

Zonas de Extrusión en el Barril y Tornillo

Generalmente, a lo largo del tornillo se tienen distintas zonas para tratar al plástico desde el sólido granulado hasta fundirlo. Las zonas comunes son (ver fig 4.2):

- Zona de alimentación.

- Zona de compresión, transición o fundido
- Zona de regulación, dosificación, descarga o plastificado.
- Zonas adicionales opcionales (mezclado, expulsado de aire, etc)6

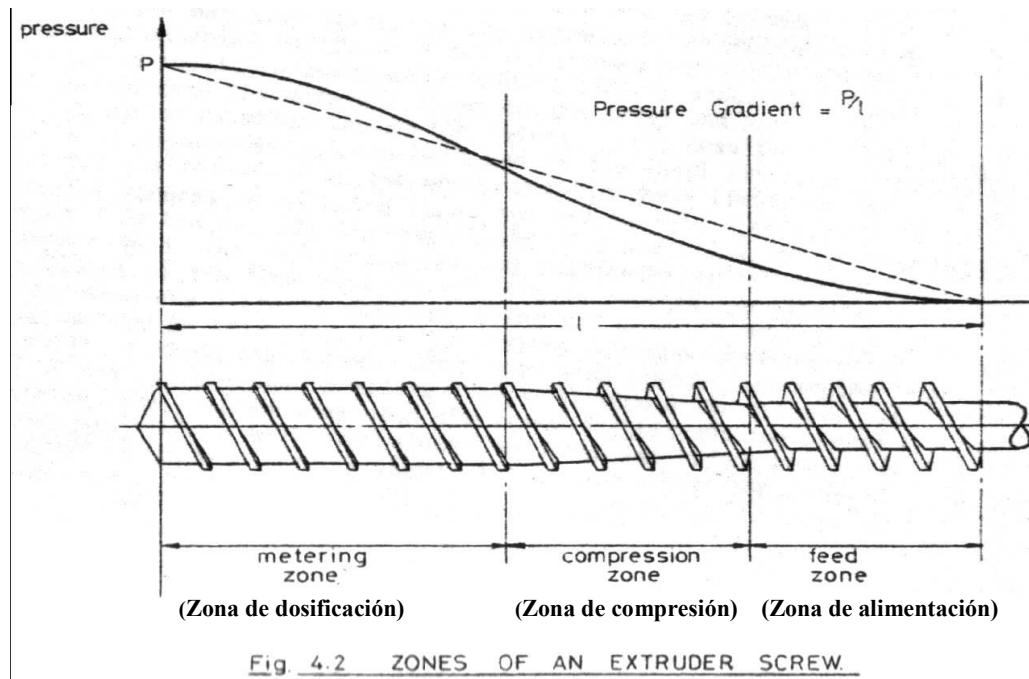


Fig. 4.2 ZONES OF AN EXTRUDER SCREW.

Fig. 4.2 . Zonas básicas de un tornillo. (Crawford 147)

Zona de alimentación: Crawford declara que en esta zona se precalienta y transporta el material a las zonas siguientes. El diseño es importante ya que una profundidad de canal del tornillo (espacio entre la raíz del tornillo y la parte de las aletas del tornillo más cercana a la superficie del barril) constante debería administrar a la zona de dosificación el material suficiente para que no se quede sin material o exceda el límite. Crawford explica que el diseño óptimo está relacionado con la naturaleza y forma de la materia prima, la geometría del husillo y las propiedades de fricción del tornillo y el barril relacionados con el polímero. (146). Throne, también asegura que es típico una zona de alimentación con dimensiones de tornillo constantes y que en esta zona lo que predomina es la fricción entre el material, y las superficies del tornillo y barril (Throne 589).

Zona de Compresión: Michaeli dice que “el material es fundido y compactado gracias a la profundidad de filete(tornillo) cada vez mayor” (Michaeli 77). Crawford explica que

esta forma del tornillo aumenta la transferencia de calor (Crawford 146). Esto se debe a que el material es empujado cada vez más hacia las paredes del cilindro con calefacción.

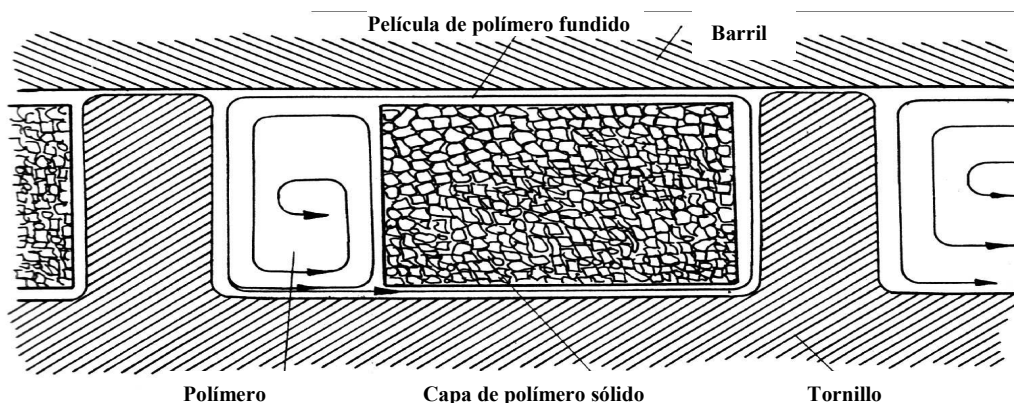


Fig. 4.3 Fundido en la Zona de compresión (Throne (b) 590)

Zona de Dosificación: Throne declara que en esta zona “el polímero fundido es homogeneizado y comprimido para crear la presión necesaria que le permita fluir a través del cabezal (...) El tamaño del husillo se mantiene constante” aunque con menor profundidad que en la zona de alimentación (Throne (b) 590).

Zonas Adicionales Crawford expone que algunos tornillos incorporan una *zona de mezclado* en la zona de dosificación. En esta zona el paso del tornillo es reducido o revertido con el propósito de asegurar uniformidad del fundido. (ver fig 4.5). Dicho autor explica que también se suele incorporar una zona con ventilación debido a que algunos polímeros absorben humedad o contienen otros volátiles. Antes era común que se pre-seque la materia prima para extrusión lo que llevaba tiempo y riesgo de contaminación. Los barriles con ventilación tienen una zona de descompresión para la expulsión de volátiles al final de una primera etapa de las tres zonas antes mencionadas. Luego se lleva a cabo una segunda compresión y dosificación (Crawford 147,148).

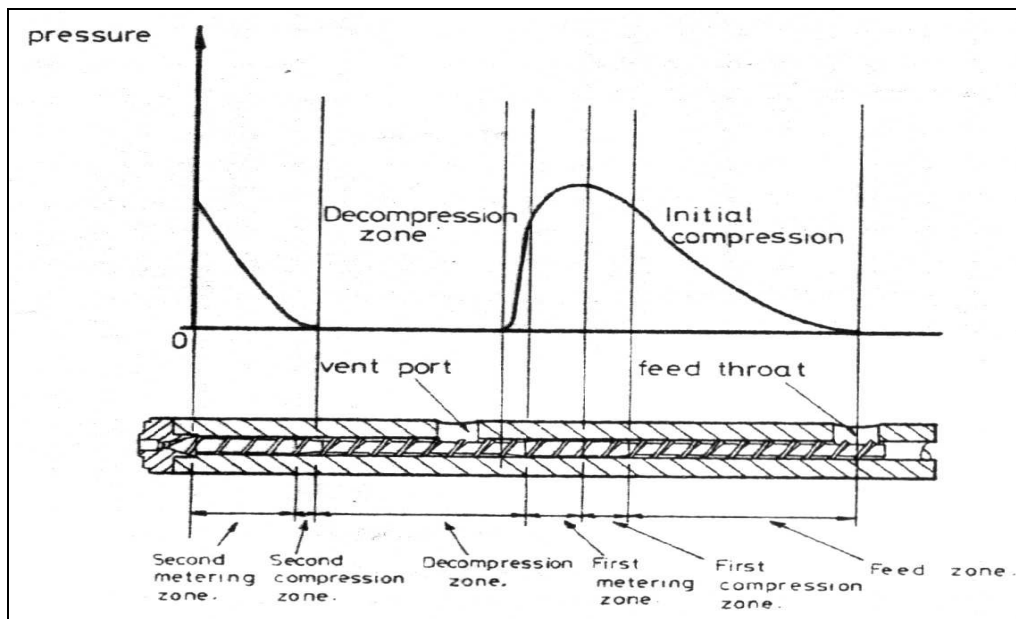


Fig. 4.4 Tornillo con zona de ventilación (Crawford 148)

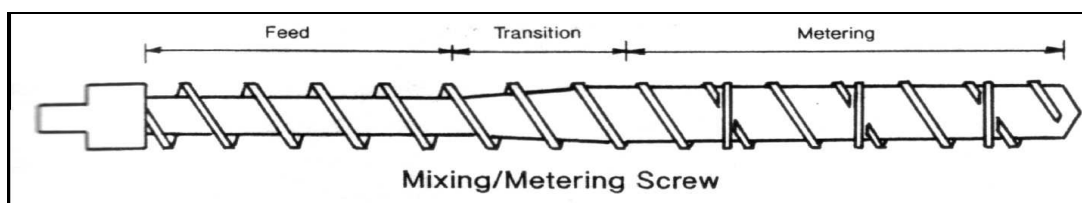


Fig 4.5 Tornillo con zona de mezclado. (Throne (b) 594)

Tipos de tornillos

Las extrusoras usualmente se tipifican por el número y tipo de tornillo que poseen.

La clasificación más común es:

- Extrusoras monohusillo (un tornillo)
- Extrusoras de doble husillo. (dos tornillos)

Extrusoras Monohusillo. Richardson clasifica a las extrusoras de monohusillo según el barril en extrusoras de (78) :

Cilindro convencional. Con barril de superficie interna lisa

Cilindro alto rendimiento. La zona de alimentación tiene unas ranuras longitudinales en la pared interior del barril que permite un mejor transporte y compactación del material

Robledo explica que en las extrusoras monohusillo “el material no debería girar junto con el husillo, o al menos, debería girar a una menor velocidad que el husillo”. La fuerza que permite el avance del material es la de fricción (Robledo 64).

Extrusoras de doble husillo. Robledo clasifica a las extrusoras de doble husillo según algunos criterios :

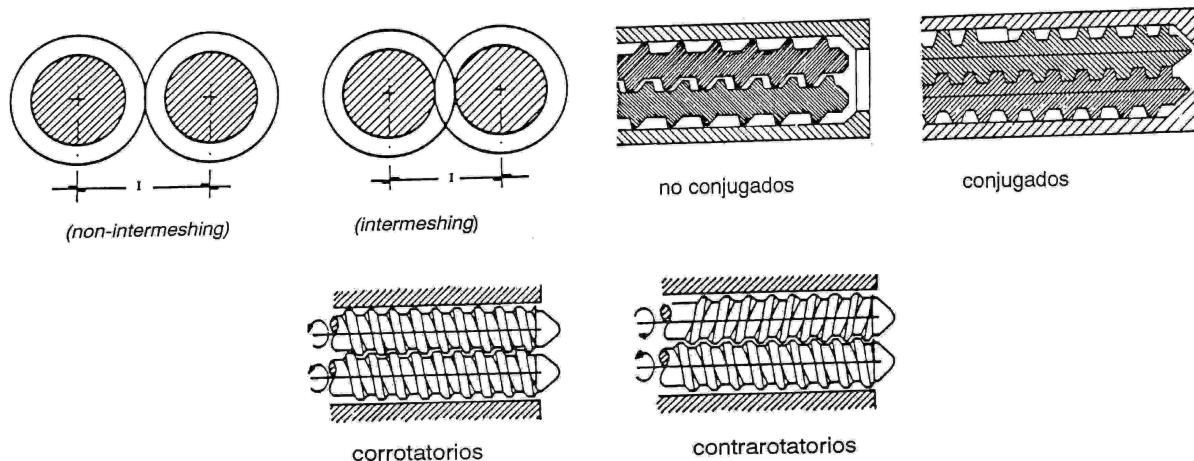


Fig 4.6. Clases de extrusoras de doble husillo (Robledo 68)

Non-Intermeshing. Como en los monohusillo, si no hay fricción no existe flujo . (69)

Intermeshing existe interacción de las hélices del husillo sobre el material contenido en el canal del otro husillo. (69)

Conjugación: A mayor conjugación se restringe el movimiento rotacional del material y es forzado a desplazarse hacia delante. Se tienen claros más pequeños, acción de bombeo positiva, reducción en la acción de mezclado y mayor esfuerzo de corte. A medida que se tiene una conjugación menor se reduce la acción de bombeo y de corte y aumenta la acción de mezclado (69,70).

Giro Corrotorios: El material que fluye por el canal de un husillo es barrido por la hélice del otro y transportado al canal de este otro husillo, a manera de ocho.(71).

Giro Contrarrotorios El material es transportado hacia delante en cámaras en forma de “C” (73).

4.2.4 Sistema de calentamiento/enfriamiento.

La fusión del material se debe a la temperatura aplicada al barril y a la fricción existente entre el material y las superficies del barril y tornillo. Usualmente, el barril es calentado mediante un sistema de calentamiento/enfriamiento para mantener la temperatura a un valor objetivo (setpoint) deseado. “El sistema se halla dividido en varias zonas, que pueden calentarse o refrigerarse de forma independiente.(...) De este modo puede conseguirse una determinada distribución de temperaturas dentro del cilindro”.(Michaeli 79). Progelhof explica sobre el sistema de calentamiento:

El barril es calentado por bandas concéntricas con resistencias eléctricas Las extrusoras pequeñas (...) usualmente tienen dos o tres zonas, demarcadas por la localización de las bandas de calentamiento. Las extrusoras más grandes o largas pueden tener de seis a ocho zonas. La temperatura del barril en una zona dada es medida por termocuplas incrustadas en las paredes del barril. Las temperaturas del barril son controladas proporcional e integralmente dentro de 3 °C del setpoint elegido. (406).

4.2.5 Mezclador Estático

Throne explica que son “equipos disipativos que mejoran el mezclado laminar por separación del flujo de material en varias capas, reorientación y luego recombinación de éstas en un orden diferente.” Este autor expone que es usual emplear este equipo cuando el diseño del tornillo no es el óptimo para el tipo de material, la zona de dosificación es corta o la relación típica L/D (longitud-diámetro del tornillo) es pequeña. (Throne(b) 594).

Cabe notar que a una mayor relación L/D los materiales son mezclados de mejor manera, sin embargo, Throne dice que también aumenta el tiempo de residencia lo que degrada las propiedades mecánicas de algunos polímeros (Throne(b) 614). Un modelo de mezclador estático se puede ver en la fig 4.7. En el caso del proyecto, los tornillos son diseñados para polipropileno, que es el plástico que se usa como materia prima y no se incluye este equipo.

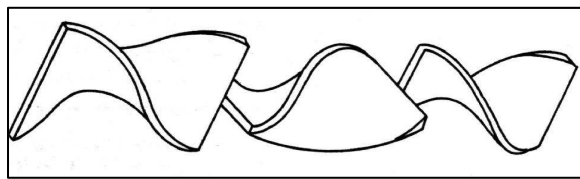


Fig 4.7. Configuración de un modelo de mezclador estático (Throne (b) 596)

4.2.6 Bomba de engranajes.

Hensen expone que esta bomba de caudal medido con características de regulación lineal proporciona un flujo de salida constante y estable. El motor shunt que mueve los engranajes es DC controlado por un tiristor que proporciona un control preciso de la velocidad de la bomba. Con esta bomba se puede mantener la presión de entrada al cabezal con variaciones menores al 1% (Hensen 194).

El sistema de engranajes consta de dos piñones conjugados y corrotatorios. Throne manifiesta que uno de los engranajes tiene tracción y acciona el movimiento del otro engranaje. El polímero es engranado por los dientes del sistema y forzado a las paredes de la bomba. Los dientes de nuevo se encargan de forzar al polímero desde la bomba.

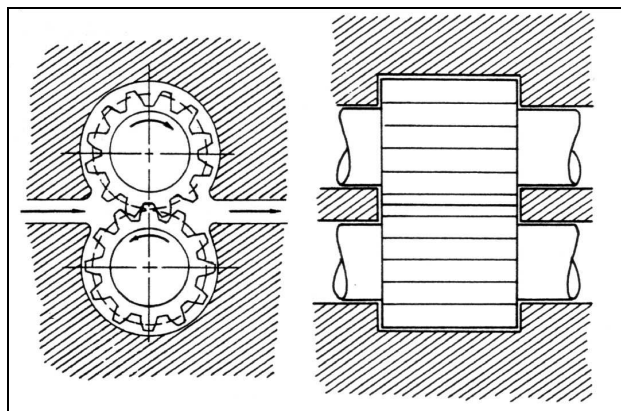


Fig 4.8. Dos vistas de la bomba de engranajes . (Throne 596)

Los objetivos iniciales de estas bombas fueron de contrarrestar el flujo no uniforme en sentido de la máquina. Ahora también se emplean para aumentar la presión del fundido antes del cabezal. (Throne (b) 596).

4.2.7 Sistema de filtrado.

Antes de pasar el material al cabezal, es usual que se ubique un sistema de filtrado que se compone de una placa rompedora y filtros. Richardson comenta que esta placa “actúa como sello mecánico entre el barril y la boquilla. Al mismo tiempo, la placa rompedora mantiene el paquete de filtros en la posición correcta”(190).

Funciones: Entre las funciones de este sistema están:

- “Filtrado de partículas contaminantes (partículas metálicas, óxidos, partículas poliméricas no fundidas).” (U Valencia 17.2).
- “Disminución de concentraciones de tensiones, ajuste de presión en la boquilla, mezclado adicional”(U Valencia 17.2).
- Transforma los flujos rotacionales en lineales (Robledo 31).

Throne dice que este tipo de sistemas es importante cuando se emplea altos porcentajes de reprocesado molido y cuando el polímero es intrínsecamente un formador de gel como el polipropileno. La caída de presión en el sistema debe monitorearse continuamente para determinar si está excesivamente sucio y reemplazar filtros. (Throne (b) 594).

4.2.8 Cabezal

El cabezal determina la forma transversal del producto de la extrusión y, por ende, el tipo de producto o semielaborado. De este modo, es un equipo de suma importancia para la calidad en fabricación de láminas. El objetivo del cabezal es esparcir el plástico fundido de manera eficiente y uniforme en la ranura a partir de la entrada de forma cilíndrica del material de la extrusora (Throne (b) 598).

Se describirá:

- Partes de un cabezal para láminas
- Tipos de cabezal para láminas

Partes de un cabezal.

Las partes de un cabezal típico son :

- “Land” o zona plana de desembarque
- Colector
- Barras de restricción
- Zonas de temperatura
- Labio

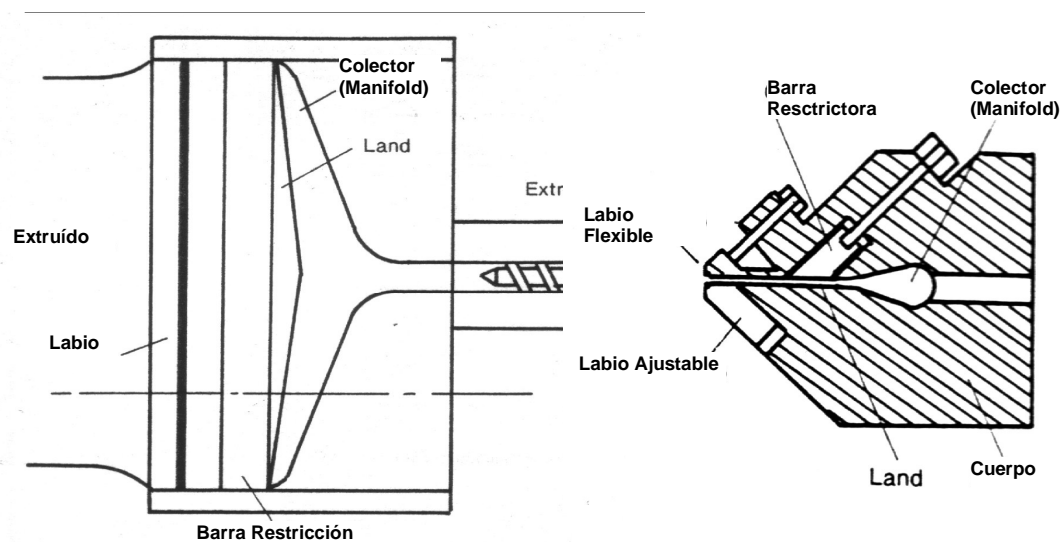


Fig. 4.9 Vista superior y frontal de un cabezal típico de extrusión de lámina con sus partes (Throne(b) 599)

Colector. Es el ente primario en la distribución del polímero en el cabezal. Está constituido por los canales que cambian la forma del flujo que viene del equipo previo a la forma deseada del producto. La distribución dependerá de la geometría de diseño aplicada al colector.

Para el diseño del colector se emplea información reológica del polímero y las condiciones de operación para aplicar la teoría reológica con la ayuda de métodos de modelado computarizados combinados con métodos tridimensionales de elementos finitos (FEM) y dinámica computacional de fluidos (CFD). En la construcción de las superficies

de contacto con el material, usualmente, se las reviste con cromo duro. Las superficies de alta calidad aseguran un flujo favorable libre de marcas del cabezal (Hensen 196).

Zona de desembarque. Antes de salir el material del cabezal, Hensen explica, que pasa por una *zona plana* la cual tiene la función de balancear las diferentes presiones a lo largo de las líneas de corrientes del fundido, de tal modo, que la caída de presión sea uniforme a lo largo de la trayectoria(254). El requerimiento es que exista una misma velocidad en todos los puntos a lo ancho del cabezal.

Barra de restricción. Para compensar ciertas diferencias de velocidad se emplea la barra de restricción por lo general antes de la zona plana. Hensen dice que con un diseño apropiado del colector la barra de restricción solo necesita un ajuste mínimo (254,255).

Labio. O'Brien dice que el labio flexible permite un ajuste del flujo para alcanzar un espesor uniforme de la lámina bajo diversas condiciones de operación.(230) “Una mitad del cabezal (generalmente la superior) es diseñada con un labio flexible para permitir que la abertura de labio sea ajustada de manera sensible al presionar o aflojar un juego de tornillos o pernos de pasos diferenciales.” (Hensen 195).

Zonas de temperatura. En el cabezal también se lleva a cabo un *control de temperatura* por zonas transversales. “El cabezal está dividido en su ancho en varias secciones de control; el calentamiento se lleva a cabo eléctricamente por cartuchos o por calentadores en forma de platos planos.” (Hensen 196).

Tipos de Cabezal

Se efectuará una clasificación según la ranura del cabezal, colector y la construcción.

Por la **ranura** los cabezales se clasifican en:

- Anular. Para espumas y películas por soplado
- Rectangular que el más común para láminas de termoformados

Por el **tipo de colector** los cabezales de **ranura rectangular** se dividen en:

- Cabezales en forma de T
- Cabezales en forma de armador
- Cabezales en forma de cola de pescado

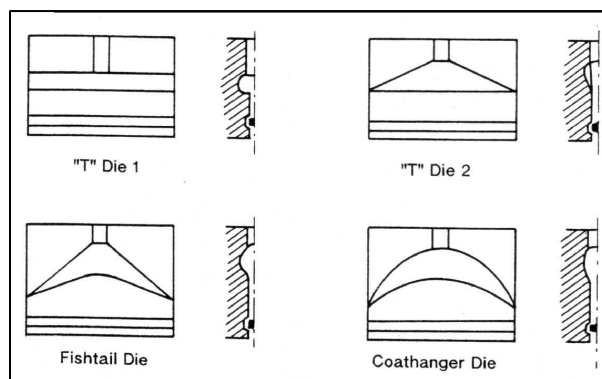


Fig 4.10 Varios tipos de cabezal según el colector. (Throne (b) 600)

El más empleado es cabezal en forma de armador (“coathanger”). O’Brien explica que en este tipo de cabezales el material es llevado al centro y, luego, uniformemente distribuido a lo largo de los hombros del cabezal. Originalmente, se empleaban los cabezales con colector en forma de “T” pero existían restricciones de uniformidad y flexibilidad en el proceso. En el diseño de los cabezales “coathanger” se puede ajustar el ángulo del “armador” y la profundidad. (O’Brien 230).

Por la **construcción** se pueden tener distintos casos:

- Cabezales estándar en varias formas con o sin barra de restricción.
- Cabezales con labio flexible sin barra de restricción para polímeros extremadamente sensibles
- Cabezales con labios flexibles con barra de restricción para un amplio rango de espesores
- Cabezales automáticos patentados Autoflex para corrección del espesor de manera automática y sensible a través de piezas térmicas de expansión. (Hensen 253)

El labio flexible puede controlarse manualmente o de forma automática como en el caso de los Autoflex. Throne explica que en el caso de los Autoflex se emplea un monitoreo del espesor de la lámina a través de rayos gamma o beta. Esta lectura se alimenta al sistema de control de pernos que de manera diferencial abren o cierra la abertura del labio en partes específicas a lo ancho del

cabezal.(Throne(b) 602). Hensen alude a pernos de expansión. Cada uno de estos pernos están provistos de calentadores que cambian con el voltaje aplicado por el sistema de control que recibe la señal del monitoreo del espesor. (196).

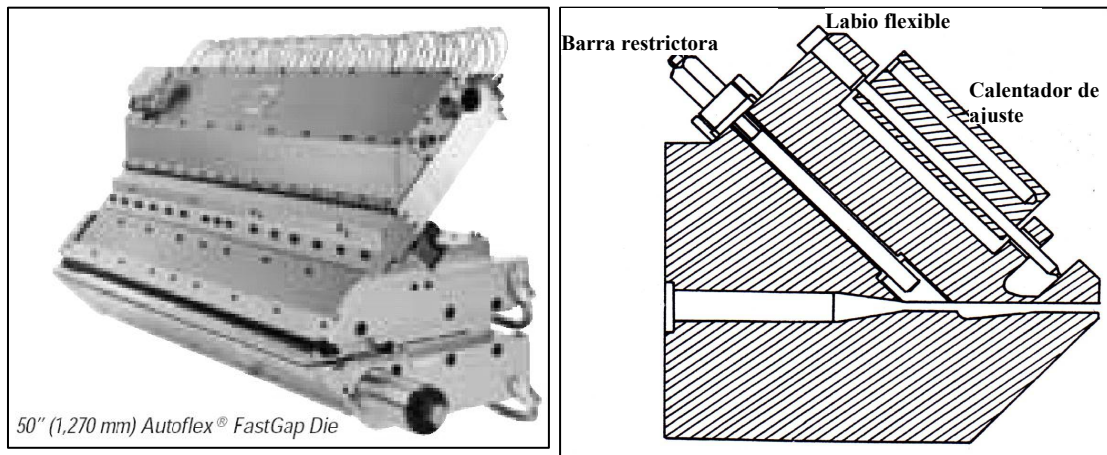


Fig 4.11 Cabezal Autoflex y esquema de construcción (EDI GP_English , Throne (b) 604)

4.2.9 Rodillos de pulido

El acabado final de la lámina se los efectúa en los rodillos de pulido, acabado enfriamiento o presión (Polishing stack rolls). La lámina que sale del cabezal se encuentra todavía en estado fundido. Se debe enfriar la lámina, mantener su forma, y otorgarle un acabado de brillo que repercutirá en las propiedades deseadas para el termoformado . “Clásicamente, el extruído se coloca directamente en el rodillo lo más cerca de la abertura de los rodillo que pueda el cabezal”.(Throne(b) 607). Tanto la abertura entre los rodillos y velocidad de giro de los rodillos puede ser ajustada para estos fines.

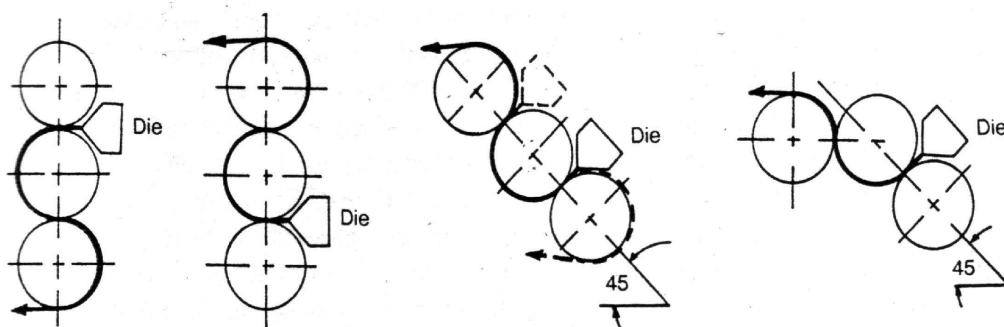


Fig. 4.12 Algunas configuraciones de rodillos de pulido (Throne(b) 608) .

Throne expone que existen algunas configuraciones de rodillos de pulido. Los más comunes son los rodillos verticales de igual tamaño con lámina que se mueve ya sea hacia abajo o arriba. (Ver fig 4.12).

Funciones. Entre las funciones importantes , Throne describe :

- Definir. El extruído puede no ser uniforme en espesor (...) Los rodillos ayudan a que sea más uniforme la lámina.
- Enfriar y otorgar rigidez. Para mantener la forma de la lámina se debe enfriar sustancialmente debajo de su temperatura de transición vítrea o temperatura de fundición cristalina . Los rodillos remueven el calor por conducción.
- Producir una lámina de temperatura uniforme y plana. Los efectos de una lámina ensortijada y otros efectos no planos pueden deberse a un enfriamiento no apropiado.
- Control del espesor. A pesar de que casi todo el control del espesor debe ser a través de la abertura del cabezal, algo del control de espesor puede ser alcanzado por la abertura entre los rodillos de acabado y presión.
- Textura de la superficie. Lo más común es tener rodillos con cromo altamente pulido para tener superficies lisas. Sin embargo, cuando las aplicaciones justifican el rodillo de pulido es reemplazado por uno de textura definida. (Throne(b) 607)

4.3 Aspectos de calidad en la extrusión

4.3.1 Aspectos generales

Se pueden enunciar tres grupos de variables que influyen en los aspectos de la calidad final de la lámina:

- Variables de operación como: temperatura de las zona de extrusión, revoluciones del tornillo, espesor y velocidad del material de entrada a los rodillos, temperaturas y abertura en el cabezal, abertura entre rodillos, temperatura de enfriamiento, presión en rodillos, velocidad de giro, etc.
- Aspectos de diseño de equipo tales como: zonas del tornillo, precisión de bomba de engranajes, configuración del colector de cabezal, configuración de rodillos, tipo de sistema de enfriado de rodillos, diseño de las paredes de los rodillos, sistema de rodamientos, etc

- Características del material de entrada: viscosidad, tipo de cristales que forma, pureza.

Entre algunos aspectos de calidad genéricos relacionados con la extrusión para termoformado tenemos (Throne (b) 634-342)

- Orientación de lámina
- Humedad.
- Apariencia (como color y brillo)
- Dimensiones de la lámina.(Particularmente el espesor)
- Propiedades mecánicas

A continuación se revisará brevemente un ejemplo en las propiedades mecánicas de lámina para PP y, como tópico especial en el proyecto se profundizará acerca del control de espesor.

Ejemplo en el brillo y la estructura cristalina. Hensen reporta que para el caso de polímeros semicristalinos se recomienda que exista un buen enfriamiento para prevenir la cristalización del material y evitar la opacidad.

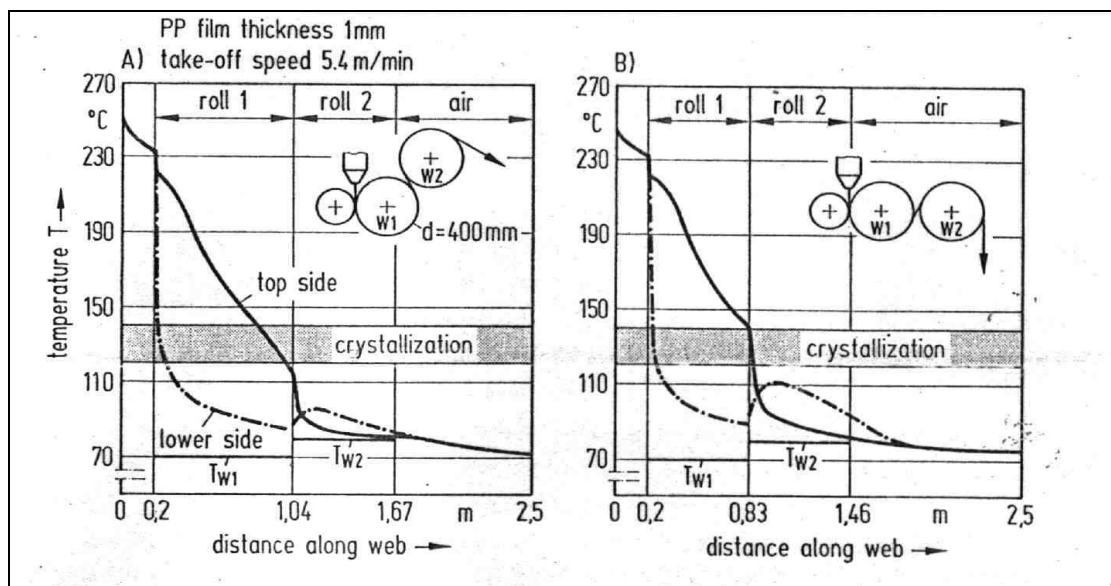


Fig. 4.13 Configuración de rodillos y cristalización de lámina (Hensen 265)

Sin embargo, también la configuración de los rodillos afectará la cristalización y propiedades mecánicas que se derivan de ella (ver fig: 4.13). Después de pasar por la abertura inicial entre rodillos, solo una de las caras (cara superior en la figura) está en contacto con la superficie del rodillo. Esta cara se enfría por conducción en forma rápida y cruza en poco tiempo la región de cristalización. En cambio, la otra superficie atraviesa lentamente dicha región y acumula un porcentaje mayor de cristales. Para restar este efecto, se reduce el tiempo de residencia de la lámina en el primer rodillo cambiando la configuración. (Hensen 262,265).

4.3.2 El control de espesor en el proceso de extrusión de láminas

Básicamente se detallará la teoría sobre las variables en el cabezal y rodillos de acabado que afectan el control de espesor.

El Cabezal y el control de espesor.

Las variables en la operación del cabezal se refieren a dos tipos de ajuste:

- Primario: Barra restrictora y labio.
- Secundario: Temperaturas en las zonas del cabezal.

Barra Restrictora: La compañía Extrusion Dies Inc (EDI) comenta que el ajuste de la barra de restricción es un ajuste grueso. La barra restrictora distribuye el flujo del polímero a través del ancho del cabezal y se hace necesaria ante diversas variables del proceso de extrusión como es la viscosidad del polímero y el de flujo de salida.

Generalmente, a mayor tasa de producción, o aumento de la viscosidad del polímero, mayor restricción será necesaria en el centro para forzar el polímero a fluir a los lados. Por esta razón la barra de restricción es ajustable, para permitir al operador compensar los cambios en la viscosidad y la tasa de producción (EDI "*Restrictor Bars*")

La barra de restricción se ajusta a través de un sistema de pernos que deben ser movidos de tal modo que no existan variaciones abruptas de la barra.

Procedimiento de Ajuste de la Barra : Para la primera operación EDI sugiere:

- Alcanzar las temperaturas de operación de extrusora con las temperaturas de las zonas del cabezal uniforme.
- Calibrar la abertura del labio a una abertura uniforme y obtener la tasa de producción normal
- Monitorear la uniformidad en el espesor de lámina. “Para láminas gruesas la observación del remanente en los rodillos es normalmente suficiente”.
- Efectuar decrementos en la abertura de la barra donde la lámina es más gruesa hasta que se alcance una uniformidad transversal de lámina entre 5 a 15 %
- Efectuar los ajustes finales en el labio para alcanzar la uniformidad final de espesor.

David Standard (DS) también menciona una calibración similar de la barra en el inicio a partir de muestras de lámina y al iniciar la operación mediante la observación del remanente en los rodillos y muestras finales de láminas. Sugiere que ningún ajuste fino se efectuó hasta haberse establecido la inicialización de la máquina que dura entre 10 a 30 minutos. (4-6,4-8,4-9) .

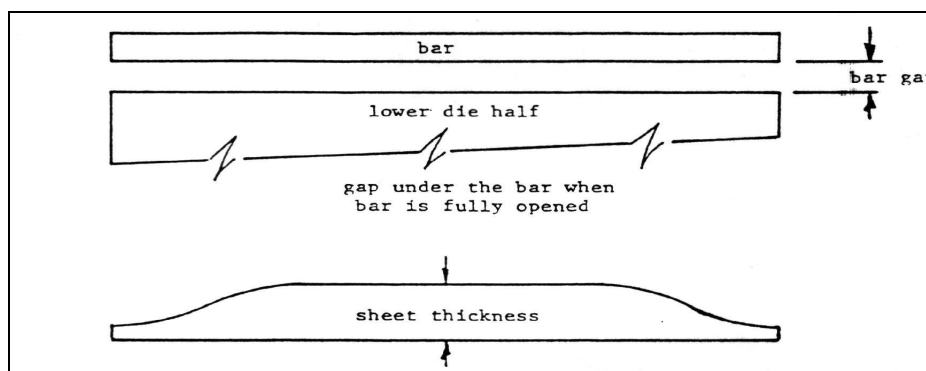


Fig 4.14 . Flujo de material sin aplicación de barra restrictora. (EDI “Restrictor Bars”)

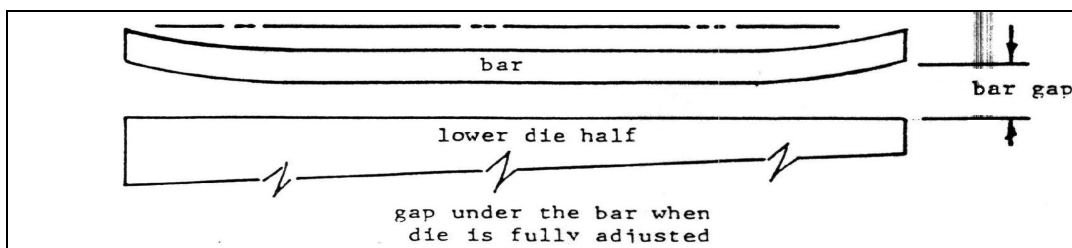


Fig 4.15 Barra de restricción ajustada. (EDI “Restrictor Bars”)

Labio del cabezal: Se lo considera un ajuste fino en el cabezal. DS explica que si no se ha obtenido un espesor apropiado con la barra, se debe usar el ajuste del labio (DS 4-9). Throne considera que la mayor parte del ajuste del espesor de la lámina viene dado por la abertura del labio. (Throne(b) 607). En el cabezal los “ajustes precisos son efectuados en el labio”. (EDI “Operation”).

Procedimiento de Ajuste en el labio. Varios fabricantes indican que en la preparación del cabezal se puede prefijar una abertura de labio mediante calibrador de láminas una vez que ha alcanzado la temperatura de operación. (DS 5-32, OMV TP001E, EDI “To prepare the die”).

Un preajuste sugerido del labio del cabezal por DS y Polystyrene Australia es de 120% del espesor final de la lámina (DS 6-48 ; Polystyrene Australia “Problem solving”). Incluso, DS reporta en ciertos casos valores para la abertura del labio del cabezal de 5 a 10 % sobre el grosor de la lámina deseado. (6-34,6-36)

DS y Polystyrene Australia consideran que un labio descalibrado puede ser la causa de una variación transversal del espesor de la lámina. (6-38,6-46; “Problem solving”).

Otra consecuencia que DS toma en cuenta debido a una abertura muy grande de labio es la orientación excesiva de la lámina. (6-34,6-36,6-48)

Zonas de temperatura en el cabezal DS expone que si no se ha alcanzado un espesor apropiado con la barra y el labio puede ser necesario subir o bajar las temperaturas de las zonas del cabezal. Una mayor temperatura provoca una lámina más gruesa (4-9).

EDI y OMV explican que la temperatura afecta de manera considerable el flujo del material. A mayor temperatura tendrá mayor fluidez el polímero. (EDI “Restrictor Bars”, OMV TP002E).

Polyestylene Australia sugiere que se podría mejorar la variación del espesor en sentido transversal de una manera limitada empleando las temperaturas del cabezal. Se debe enfriar en las zona más gruesas y calentar en donde es menor el espesor. (“Problem Solving”).

O’Brien para un caso del poliestireno, en sus modelos computacionales para diseño de equipo de extrusión, presenta que la corrección de un flujo no uniforme mayor en el centro del cabezal puede se corregido tanto por la barra de restricción (con un perfil curvo de menor abertura en el centro), como con un perfil de temperatura mayor en los lados. La variación del flujo es del 17% y se corrigió con una perfil de temperatura que va desde los 420°F en el centro hasta 433.75 °F en los lados (variación de 7.7 °C) La ventaja de emplear las temperaturas radica en que la caída de presión no aumenta como en el caso del ajuste con la barra restrictora(O’Brien 236-239). Sin embargo, también reporta que en el modelado para corridas de polietileno en el cabezal anterior diseñado para poliestireno, el flujo es diferente ya que disminuye en el centro. La corrección se puede efectuar tanto con la barra restrictora como con las temperaturas empleando un perfil inverso al indicado para el poliestireno. (O’Brien 240-243).

Procedimiento de Ajuste en la zonas de temperatura. Tanto EDI como OMV indican que las distintas zonas de temperatura en el cabezal deben ser similares.

EDI explica que, ocasionalmente, puede existir un incremento de las temperaturas de las zonas de los bordes respecto a las del centro de 5 a 10 °F. (2.8 a 5.6 °C) para compensar la pérdida de calor en los lados. (“Operation Tips”).

OMV expone que la variación máxima entre las temperaturas de las zonas del centro y la de los bordes debe ser de 10°C (TP002E).

Moore sugiere que para la extrusión de polipropileno las temperaturas en el cabezal deben ser entre 200 y 230 °C . (333)

Rodillos de pulido y el control de espesor.

Para entender la relación entre los rodillos y el espesor final de lámina se expondrá:

- Aspectos sugeridos en la literatura de la operación de rodillos.
- La teoría de presión en los rodillos.
- La teoría de doblado dinámico.

Operación en los rodillos. En la operación de los rodillos es útil conocer:

- El tipo de ajuste que representa en el control de espesor
- Consideraciones sobre el remanente
- Ajuste del espacio entre rodillos y velocidad

Tipo de Ajuste Throne y DS consideran que los rodillos son un ajuste fino.

DS expone: “ idealmente, debe existir un remanente del tamaño de la mina de un lápiz (...) [a la entrada del material en los rodillos]. Aunque algunos materiales pueden ser corridos con remanentes mayores para facilitar la calibración, el control del espesor debe ser en el cabezal y no por la presión de los rodillos”. (DS 4-8).

Throne dice que algún control de espesor puede alcanzarse en el espacio entre rodillos pero casi todo el control del espesor debe ser efectuado mediante la abertura del cabezal (Throne(b) 607).

O'Brien asevera que se puede mejorar la uniformidad de lámina los rodillos. Sin embargo, “se cree comúnmente que tal lámina es uniforme en el espesor sin importar [la uniformidad de la] entrada a los rodillos, pero no es realmente ese el caso” (345)

Consideraciones sobre el remanente. Usualmente se forma un exceso de material a la entrada de la abertura de rodillos que se lo llama remanente o cordón (fig. 4.16). La compañía Polyone hace referencia a que un remanente pequeño ayuda a prevenir la pérdidas de pulido o espesor debido a las variaciones longitudinales en el flujo del polímero que sale del cabezal (Polyone “Technical Service Report”).

DS reporta que un remanente muy grande puede provocar orientación excesiva, superficie rugosa y líneas parabólicas en sentido de la máquina. (6-29,33,36,27)

Throne dice que el empleo del remanente para polímeros como el PP es particularmente crítico. (Throne(b) 609,610).

Polyone expone que un remanente excesivo puede provocar marcas en la lámina y sugiere que el tamaño del remanente sea entre dos y tres veces del espesor de la lámina (“Technical Service Report”).

Ajuste del espacio entre rodillos y velocidad. Throne recomienda que no se emplee velocidades diferenciales con los rodillos, o el espacio entre los rodillos con la presión del rodillo para esparcir el extruído debido al impacto que tiene en la orientación del polímero. (Throne (b) 609)

En cuanto a la abertura del espacio entre rodillos , DS aconseja que antes de empezar la producción se emplee calibrador de láminas para chequear la abertura uniforme en ambos extremos. También se debe efectuar una calibración final similar del espacio entre rodillos, junto a la velocidad del rodillo, cuando la lámina tiene un espesor muy cercano al deseado. Además, DS reporta que la abertura entre rodillos debe estar entre 3 a 5% debajo del espesor de lámina final para asegurar un buen contacto con la superficie. (5-33,4-12,6-34).

Presión en un sistema de rodillos de pulido. Cuando la lámina, desde la extrusora, empieza a entrar en los rodillos es sometida a una presión que crece a medida que el espacio entre los rodillos disminuye. Sin embargo, Hensen reporta que la presión máxima no se alcanza en la menor abertura entre rodillos, sino antes de este punto. A partir del valor máximo la presión es relajada, de tal modo, que en el espacio de menor abertura entre rodillos se tiene una presión igual a la mitad del valor máximo (según estudios reológicos de fluidos no-newtonianos)(224). En el modelado de rodillos, O’Brien también reporta dicho efecto (248).

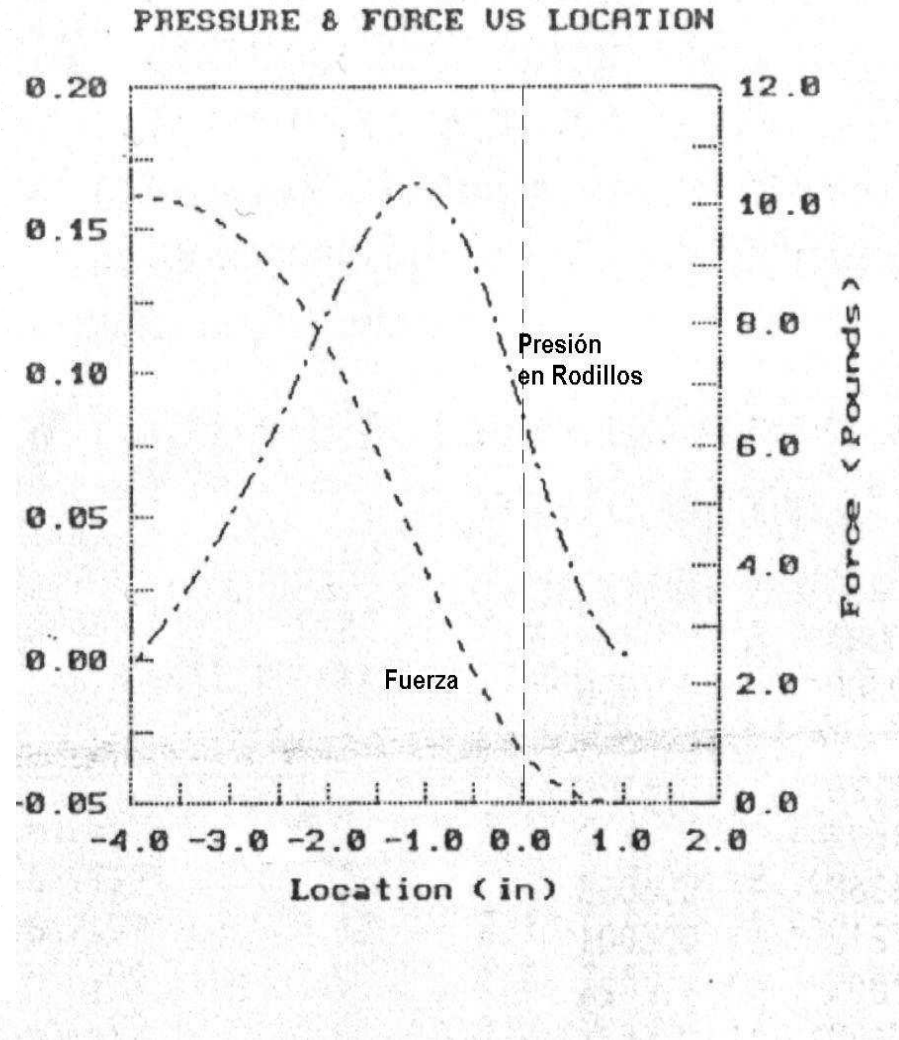
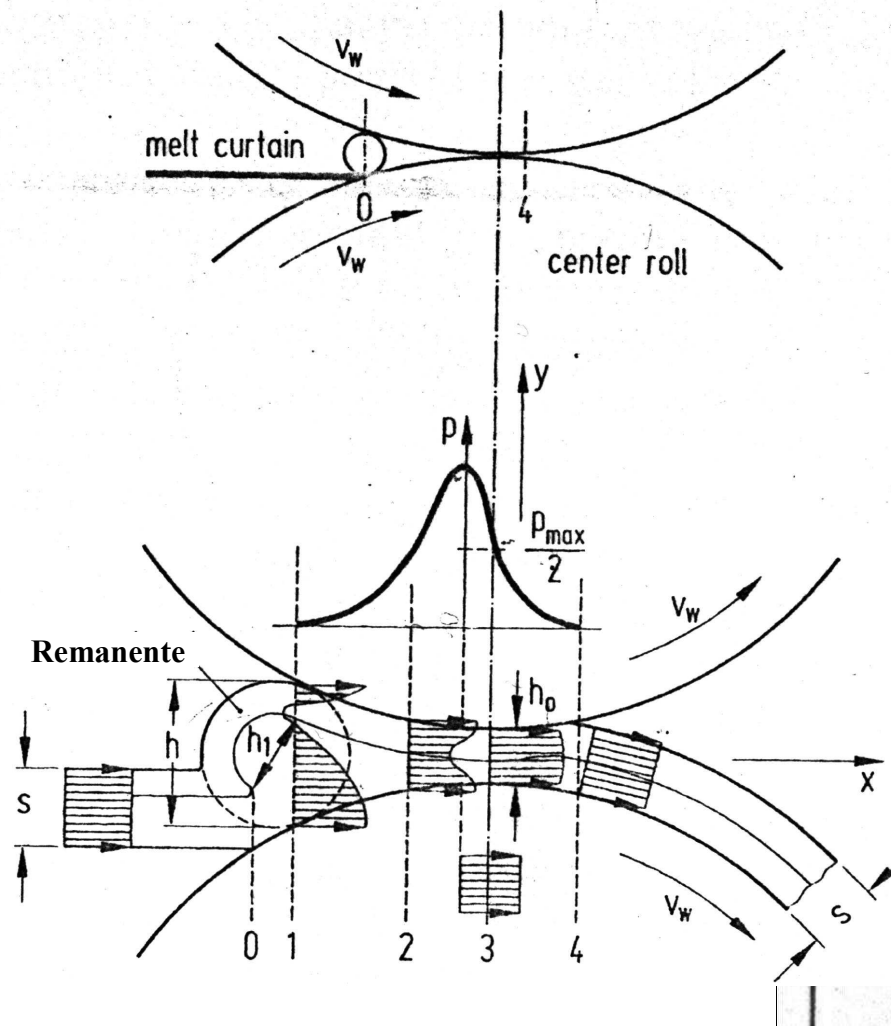


Fig 4.16 Presión en un sistema de rodillos para lámina(Hensen 225, O'Brien 248)

Hensen explica que la presión que ocurre en el espacio entre rodillos provoca una fuerza de abertura de los rodillos que debe ser limitada a 500 N/cm o, excepcionalmente a 800 N/cm ya que a “cargas mayores los rodillos son combados al grado que la diferencia de espesor a lo ancho del rodillo es técnica y económicamente inaceptable”.(225)

Existen muchos factores que afectan la presión en el espacio entre rodillos como viscosidad, conductividad térmica, estructura molecular que repercute en el tamaño del remanente y la temperatura de los rodillos. Un estimado de la fuerza asociada a la carga de separación entre rodillos es (Hensen 225):

$$F \approx \eta D_w l_q v_w (1/h_o - 1/h) \text{ N} \quad [1]$$

A partir de esta ecuación , la presión máxima resulta en

$$p \text{ max} \approx D_w^2 v_w \eta \left(\frac{x}{(x^2 + rho)^2} \right) \text{ Nmm}^{-2} \quad [2]$$

Donde h_o y h se definen en la fig 4.16

D_w = diámetro del rodillo

r = radio rodillo

x = posición en el eje vertical (avance de la lámina) ver fig 4.16

Se puede notar en la expresión que F (“fuerza de carga“) disminuye si aumenta la abertura de los rodillos “ h_o ”. En cambio, a medida que aumenta el tamaño del remanente “ h ”, disminuye el término $(-1/h)$ y aumenta F . Por el contrario, cuando h tiene el valor mínimo (caso excepcional sin remanente), sería igual a h_o , y la fuerza de carga es cero. Por tal motivo, podemos concluir que un remanente excesivo, además de los efectos mencionados, crea una “sobrecarga“ en los rodillos cuyo efecto se analiza a continuación.

Teoría de Doblado dinámico de rodillos de pulido. Se mencionó previamente que una carga excesiva en el rodillo puede provocar una variación indeseable en el espesor de la lámina debido a que se curvan los rodillos. Esto se debe al doblado dinámico que existe en un sistema de rodillos.

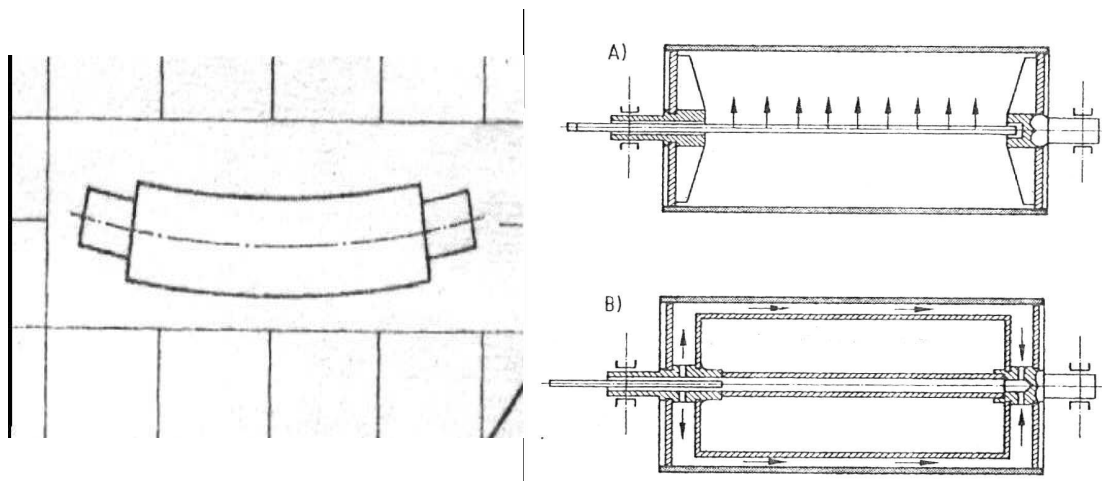


Fig. 4.17. Doblado dinámico de rodillo y paredes de rodillo (Hensen 229,,231)

Hensen reporta la teoría básica de deflexión en rodillos que sigue la ecuación:

$$y_{\max} = \frac{5ql_q^4}{384EL} (1 + (4.8l_a / l_q)) \quad [3]$$

Algunos parámetros se muestran en la fig.4.18. Los distintos parámetros son:

y_{\max} = Deformación máxima del rodillo (centro)
 l_q = Ancho de carga en los rodillos. (ancho de lámina en el rodillo)
 l_a = Longitud media entre el rodamiento y el borde de lámina en rodillo
 q = Fuerza de carga por longitud de carga

$$q = F / l_q \quad [4]$$

A partir de la figura 7.19 en Hensen (231) se desprende que

$$EL = 100 D^4 [5] \quad ; \quad \text{Donde: } D = Dw (1 - 1 / (Dw/d))^4 \quad [6]$$

Dw = diámetro exterior rodillo; d = diámetro interno rodillo (Ver fig. 4.18)

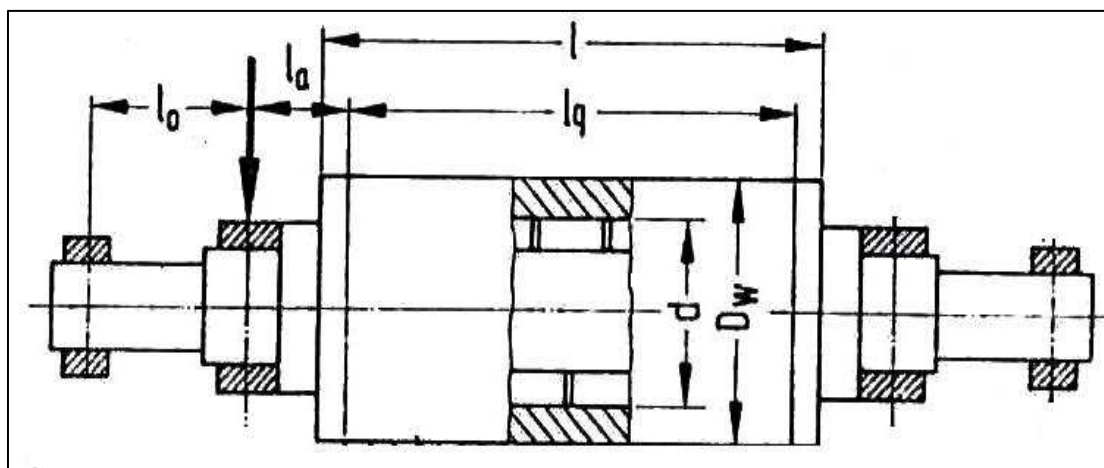


Fig. 4.18 Variables en la teoría de deformación dinámica de rodillos

Reemplazando [1] en [4] :

$$q \approx \eta D_w v_w (1/h_o - 1/h) \quad [7]$$

Sustituyendo de [5] a [7] en [3]

$$y_{\max} = k v_w l_q^4 (1 + (4.8 l_a / l_q)) (1/h_o - 1/h) ; \quad \text{Donde } k = \frac{5\eta D_w}{38400D^4} \quad [8]$$

El coeficiente k contiene los parámetros constantes D_w y D que dependen del diseño y la viscosidad que es una variable que cambia con la temperatura y el esfuerzo de corte principalmente.

La extrusión es el proceso que provee el material al termoformado y, por tanto, la calidad del producto final también depende de dicho proceso que se ha explicado en forma general. También se profundizaron algunos aspectos importantes de extrusión relacionados con la investigación del problema de mejoramiento de calidad priorizado que se expondrá en la parte segunda del trabajo presente. Las primeras fases del proyecto tienen que ver con el producto terminado y, por ende, también con el proceso de termoformado cuya introducción se describe a continuación.

Capítulo 5: Introducción al Proceso de Termoformado.

La industria del plástico en nuestros tiempos a cobrado gran importancia ya que ha sustituido, en muchos casos, ciertos materiales como son el vidrio para la fabricación de producto específicos. El termoformado es una de las técnicas de transformación del plástico en tales productos. Entre los productos que se realizan mediante esta técnica, según Richardson, están: cajones, cuadros de instrumentos, porta-herramientas, vajillas, parabrisas de barcos, señales, cabinas transparentes de aviones, entre otros ; y, sobre todo, predomina en el mundo de los envases como vasos, tarrinas, tapas, etc (267).

5.1 Generalidades

5.1.1 Técnicas y tipos de Termoformado.

El termoformado incluye una diversidad grande de técnicas que siguen los mismos pasos básicos pero que, generalmente, difieren en el modo en que se aplica la fuerza a la lámina para cambiar su forma. Entre las técnicas que Throne y Richardson exponen están: doblado mecánico, formado al vacío, formado con macho recubierto, formado con molde coincidente, formado con burbuja libre, formado con núcleo de ayuda , entre otros (Richardson 269;Throne (a) 1).

Generalmente, se clasifica al termoformado por el grosor de lámina empleada.

- **Termoformado de lámina delgada.** Aplicado a láminas de grosor menor a 1.5 mm
- **Termoformado de lámina gruesa** Aplicado a láminas de espesor mayor a 3.0 mm
- Para espesores de lámina entre 1.5 mm y 3.0mm. la lámina puede comportarse como delgada o gruesa dependiendo del caso (Throne (b) 12).

Esta división es útil debido a las particularidades que se aplican en los pasos del proceso para cada caso. La lámina delgada comúnmente se almacena en forma de rollos de lámina continua, mientras, que la gruesa en pedazos cortados de lámina apiladas en paletas (Throne (b) 12,13).

En el caso del proceso particular de estudio, se emplean láminas de polipropileno(PP) desde los 0.40 mm hasta los 1.90 mm. Por tal motivo, se puede decir que se aplican los principios del termoformado de lámina delgada. En todos los casos la lámina extruída se almacena en rollos. Para la formación de la lámina se emplea núcleos de ayuda (“plugs” también llamados machos o clavijas) y presión de aire.

5.1.2 Breve descripción de los pasos del termoformado

La materia prima para termoformado es la lámina de plástico extruída en un proceso anterior. Dicha lámina es ablandada y moldeada para adquirir una nueva forma estable. Throne explica de manera sencilla los pasos del termoformado ((b) 12-15):

- **Alimentación y Sujeción:** Se alimenta la lámina a la máquina termoformadora con un sistema de sujeción,
- **Calentamiento.** Se calienta la lámina hasta un rango de temperatura determinado para que se ablande.
- **Estiramiento y Formación.** Se estira la lámina caliente contra la superficie de un molde y forma el producto.
- **Enfriamiento y Corte** La lámina permanece en la superficie del molde, que está a una temperatura menor, hasta que el plástico tome la forma deseada y la retenga (*enfriamiento*). Luego se retira la lámina con la forma del molde y se *corta* el exceso de plástico(Throne(a) 1).
- **Apilado.** Se recoge el producto termoformado de tal modo que no se dañe.

A continuación se describen en forma más detallada los pasos del termoformado enfocado al proceso real estudiado en el proyecto.

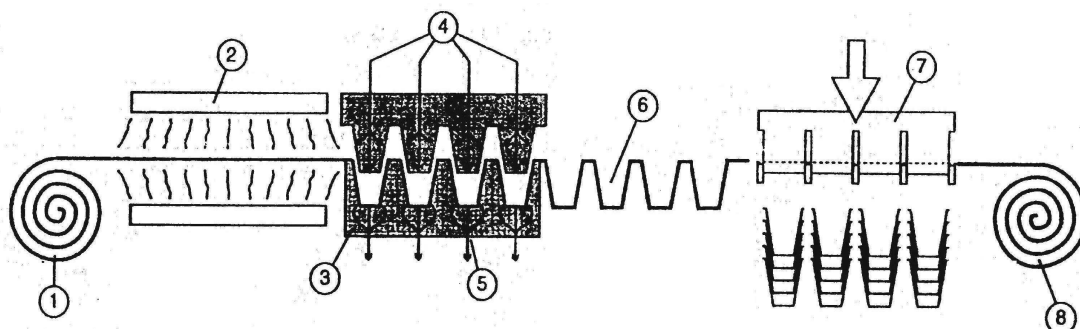


Figure 9.16 Melt phase thermoforming. 1: Sheet unwind. Sheet feeder for thicker sheets. 2: Infrared heating station. 3: Forming mold. 4: Air pressure plug assist. 5: Vacuum. 6: Transport and cooling station. 7: Cutting and stacking station. 8: Scrap winder

Fig 5.1. Pasos básicos del termoformado de Polipropileno (Moore 334)

5.2 Alimentación y sujeción.

La lámina de plástico, que viene de los rollos continuos, es alimentada a la máquina por cadenas, prácticamente paralelas, que se mueven en sentido de la alimentación y están provistas de dientes para sujetar la lámina. Los dientes de las cadenas atraviesan los bordes de la lámina. Throne reporta que el sistema de sujeción usualmente atraviesa la lámina a 25mm del borde a intervalos de 25mm (Throne (b) 12,13).

En algunas de las termoformadoras de la fábrica del proyecto, las cadenas divergen ligeramente o se abren a medida que pasan a los hornos de calentamiento para estirar la lámina en sentido transversal (sentido del ancho de la lámina). Esto se debe a que al calentarse la lámina tiende a colgarse en el centro (“sagging”)

Ciertas máquinas están provistas de rodillos de precalentamiento colocados antes del sistema de cadenas para preparar la lámina y procurar que la temperatura en toda la lámina sea más uniforme. Se recomienda este equipo para la formación de láminas de PP (Throne (a) 43).

5.3 Calentamiento de lámina.

Existen rangos de temperaturas específicos para la formación y un buen acabado del producto, por lo que se considera un paso clave. Para entender el calentamiento se presentan los tipos comunes de calentamiento de lámina y el perfil de temperatura que se aplica en el proceso

5.3.1 Tipos de calentamiento de lámina

Los tres tipos de transferencia de calor son: conducción, convección y radiación. Se puede emplear uno de estos tipos de transferencia como fuente primaria de calor. Es posible emplear contacto directo de la lámina con la fuente de calor (conducción), aire caliente (convección), o calor infrarrojo (radiación) emitido por resistencias metálicas, placas de cerámicas o combustión de gas. Para el caso de láminas delgadas lo más común es emplear radiación como transferencia principal de calor (Throne (b) 13).

En el caso de estudio se emplea radiación generada por placas cerámicas que se encuentran tanto arriba como debajo de la superficie de la lámina a manera de “sánduche”.

Esta configuración permite que la lámina pueda alcanzar la temperatura adecuada de formación cuatro veces más rápido que empleando simplemente un calentador, generalmente superior (fig 5.2) (Throne(a) 76).

5.3.2 Perfil de temperatura para el calentamiento de lámina

En el termoformado de lámina delgada, usualmente, se utilizan moldes multicavidad en los que se forman múltiples productos a la vez. Por tanto, lo más deseable es que toda la lámina, previa a la formación, se encuentre a una temperatura lo más uniforme posible. Esto contribuye a que no existan variaciones en secciones de las partes y entre las partes.

Para el efecto, se recurre a calentadores de distintas zonas en los que se puede aplicar temperaturas diferentes para equilibrar la temperatura en toda la lámina (Throne(a) 43). El perfil de temperatura y la cantidad de calor que se deben aplicar a la lámina depende de la manera y la eficiencia. en que se lleva a cabo la transferencia de calor en la zona de calentamiento

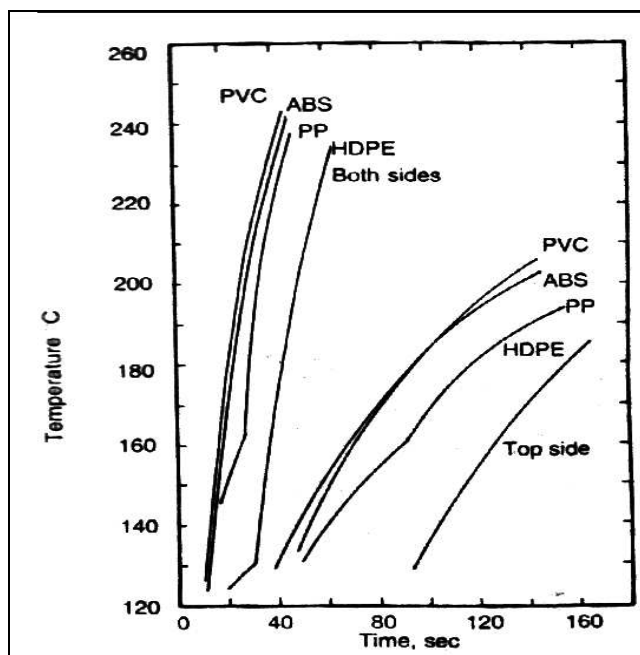


Fig 5.2 Ventaja de empleo de calentados superior e inferior (Throne (a) 76)

Transferencia de calor en la zona de calentamiento. Para entender este punto, vale tomar en cuenta que la lámina y los calentadores son finitos, además de la existencia de otros elementos como paredes, rieles y sujetadores que afectan la eficiencia de la energía entre los calentadores y la lámina.

Una definición útil es el de *factor de vista*. “La cantidad relativa de energía que recibe la lámina depende de la habilidad del horno o calentador de “ver” la lámina (...) Lo que el horno ve es lo que calienta” (Throne(b) 152). Este factor de vista depende, principalmente, del espacio entre la lámina y el horno, y las longitudes de lámina y hornos (Throne (a) 74). El factor de vista cambia en toda la lámina tanto en sentido transversal como longitudinal.

Es claro notar que los calentadores del centro “ven” mucho más lámina que los de los extremos (fig 5.3). Throne explica que los calentadores de los extremos ven una porción de

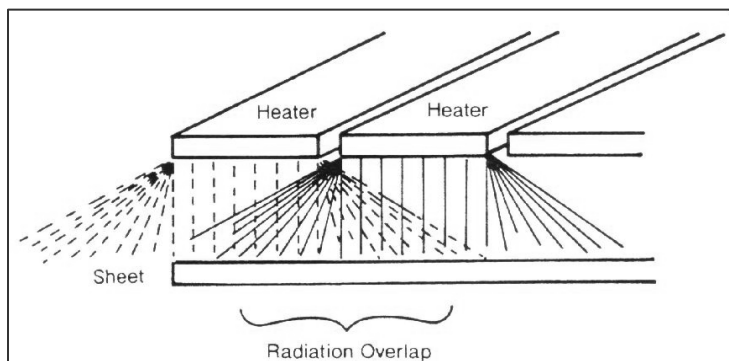


lámina y otras superficies ajenas a la misma, por lo que si se colocaría una misma temperatura en todas las zonas de calentamiento, los bordes de la lámina recibirían, sustancialmente, menos energía que en el centro (Throne(b) 155).

Fig. 5.3. Factor de vista y calentadores de lámina.(Throne (b) 155)

Si se emplea una misma temperatura en los hornos, la forma del perfil de temperatura a lo largo de la porción de lámina es como un domo (fig 5.4). El perfil de temperatura de la lámina puede ser corregida con un perfil de temperatura de los calentadores aumentada en los bordes y disminuida en el centro.

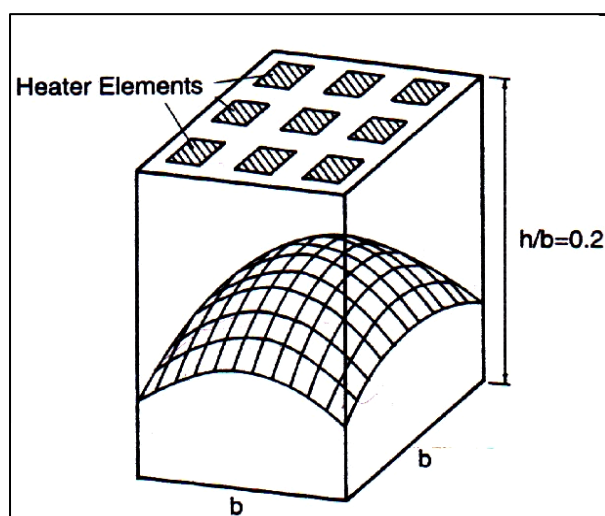


Fig 5.4 Perfil de temperatura de lámina. Hornos a igual temperatura (Throne (b) 155)

Throne explica que el patrón de temperatura también puede ser alterado debido a la tendencia de la lámina a colgarse en el centro, por lo que el horno inferior podría calentar la lámina más en dicha zona. En estos casos se podría colocar el horno inferior a una mayor distancia pero se altera también la eficiencia (Throne(a) 75). Como ya se mencionó, el sistema de sujeción de algunas termoformadoras reduce este efecto en la lámina.

Eficiencia en la transferencia de calor. Otro aspecto importante, es que no toda la energía emitida por los hornos es aprovechada por la lámina. De hecho, Throne reporta que de un 20% a 50% de la energía administrada por el horno es utilizada para los fines deseados. Del 100% de la energía del calentador se pierde: entre un 30% a 50%. por convección con el medio ambiente, de un 20% a 30% por la radiación absorbida por otras superficies ajenas a la lámina, y otro porcentaje menor por convección del calor ya recibido por la lámina (Throne(b) 140,141). En el proyecto se registraron temperaturas del horno sobre los 300°C hasta los 500°C para dos de los productos cuando la temperatura normal de formación que reporta la literatura está entre 154°C y 204°C (Throne(b) 69) .

5.4 Estiramiento y Formación.

Este paso tiene lugar en el molde de formación que es el que determina la forma final del producto deseado. Los moldes pueden ir desde los baratos de yeso hasta los más caros de acero enfriado con agua (Richardson 268) En el caso de estudio, las termoformadoras incluyen moldes de metal con enfriamiento de agua. Además, posee una herramienta superior con una forma parecida al molde, pero que incluye los núcleos de ayuda entre otras piezas. (Ver fig 5.5)

Una vez que la lámina ha alcanzado la temperatura adecuada de formación, pasa a la herramienta de moldeo y se aplican las fuerzas necesarias para estirar al plástico para que tome la forma de las cavidades del molde.

Una fuerza de formación esencial que se aplica en los equipos del proyecto es la presión de aire. La presión se obtiene gracias a la diferencia de presión de aire aplicada, que bien puede ser estrictamente presión de aire (mayor a 1 atmósfera) o vacío (Throne(a) 32). En el estudio el método empleado es presión de aire que está alrededor de 5 bar.

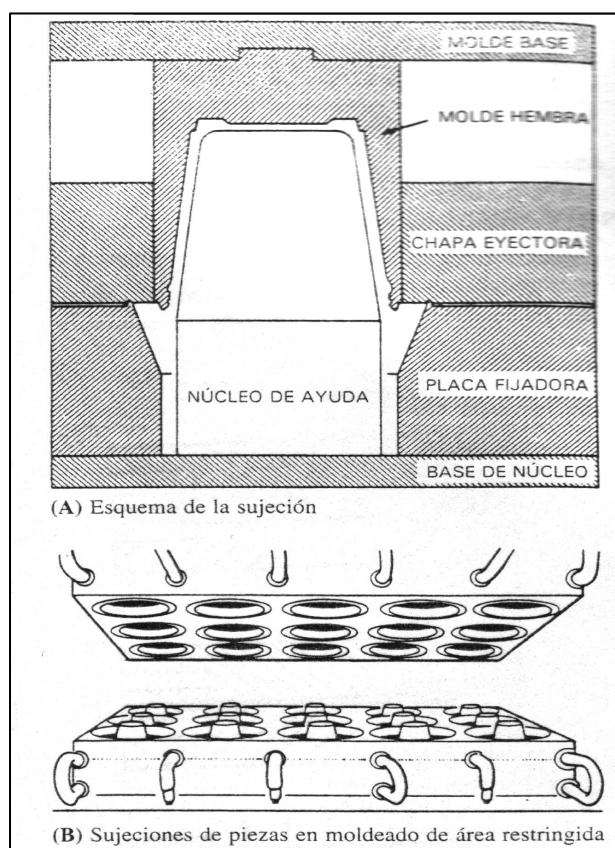


Fig 5.5 Molde multicavidad con núcleos de ayuda. (Richardson 274)

En los inicios del termoformado, las partes finales tenían una variación significativa en el espesor de pared. Entre estas técnicas están la de macho recubierto y simple vacío. Las técnicas actuales emplean la ayuda de elementos como núcleos para mejorar la formación.

Formación por núcleo asistido.

Desventajas de la formación sin núcleo. Throne explica que la lámina se estira diferencialmente en el molde, de tal forma, que si una porción de la lámina toca una porción del molde se pega a éste y no se estira más. Mientras tanto, la porción libre sigue

estirándose hasta que cubra toda la superficie del molde o la lámina se vuelva muy rígida para estirarse más ((a) 27).

El resultado es que las paredes del producto son más gruesa en las zonas que primero toca el molde (normalmente, los lados cerca de los bordes superiores del molde y, en ocasiones, también en la base del molde) que en las otras zonas (normalmente, las esquinas y cerca de la base).

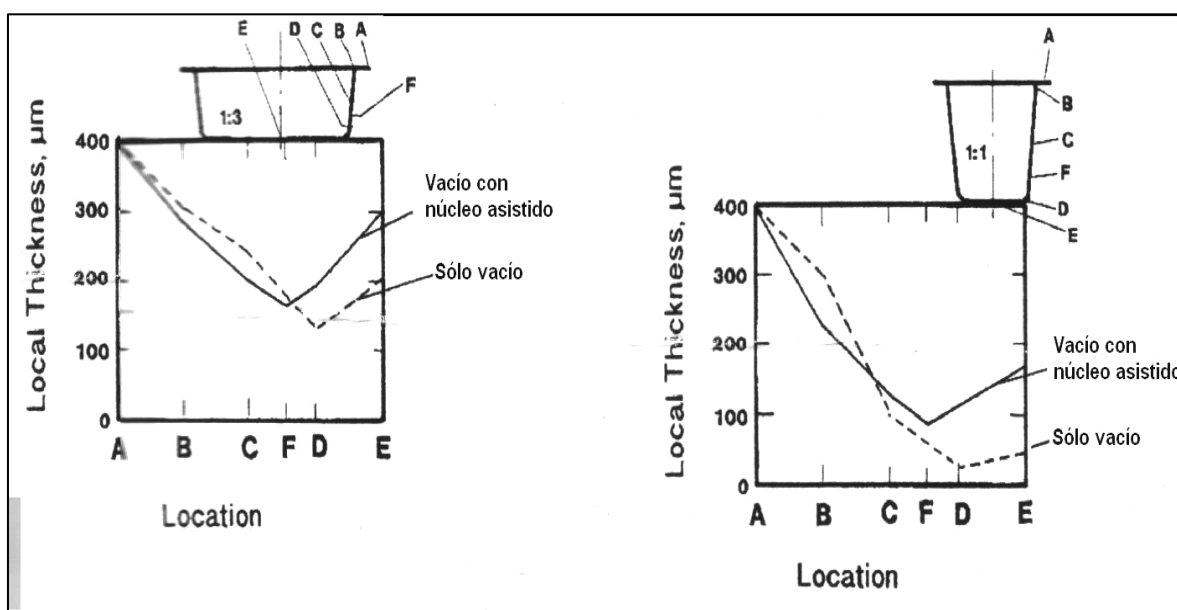


Fig 5.6 Espesor de pared mejorado en formación con núcleo de ayuda (Throne(b) 508)

Ventajas de la formación con núcleo asistido. Los núcleos se emplean para redistribuir el polímero a lo largo de las paredes del producto. Estiran, casi uniformemente, la lámina entre la base del núcleo y los bordes superiores del molde. El núcleo toca solo la parte que será la base del producto y, ya que los machos enfrían dicha sección y se hace más resistente al estiramiento, la base es algo más gruesa.(Throne(a) 84, Throne(b) 507). Se puede ver la diferencia entre el método de formación al vacío simple y al vacío asistido por núcleo en la figura 5.6

Pasos en la formación con núcleo asistido

El sistema conjunto se puede explicar de la siguiente manera:

- Se coloca sobre la cavidad de molde la lámina caliente(...).
- Cuando la clavija (núcleo) toca la lámina, se deja salir el aire desde la parte inferior de la misma [aire entre la lámina y la cavidad del molde].
- Cuando la clavija completa su recorrido (...) se aplica presión de aire desde el lateral de la clavija que empuja el plástico contra el molde” (Richardson 275).

A estos métodos asistidos también se los llama de multietapa. La primera etapa está dado por el núcleo y la segunda por la presión de aire.

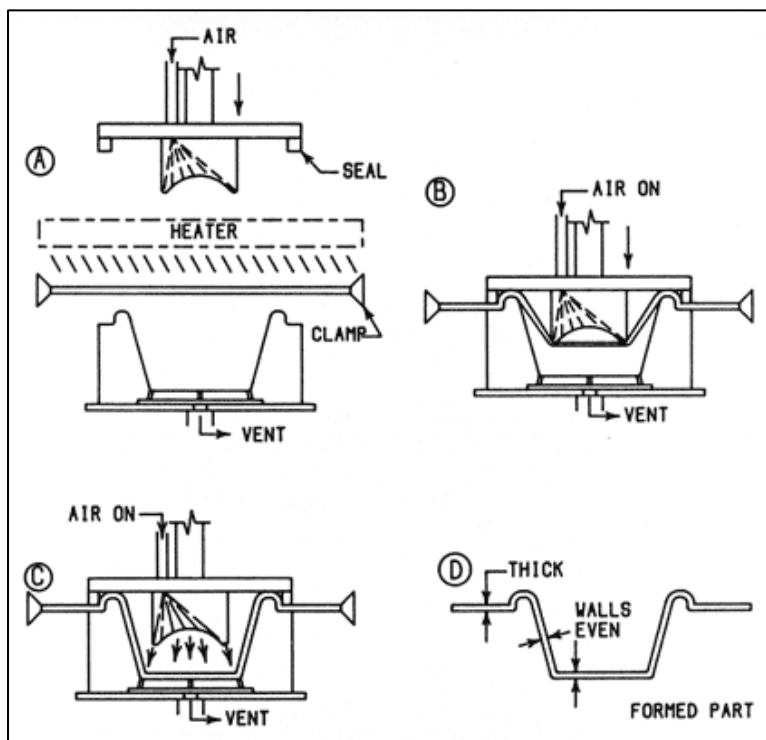


Fig 5.7 Formación por núcleo asistido(Empire West “Forming Methods”)

En el proyecto, la herramienta superior se acopla con el molde inferior, pero además contiene piezas sujetadoras para cada cavidad, denominadas presinos, que sujetan y afirman la lámina a base de presión de aire. Estas piezas bajan inmediatamente en el acople para que no se mueva la lámina cuando baje el núcleo y se expulse presión. Una vez que se enfría suben dichas piezas para pasar al corte.

5.5 Enfriamiento

En el caso del proyecto el enfriamiento se lleva a cabo en el propio molde. Por tanto, este paso está relacionado, principalmente, con el material y el diseño del

molde. El material más empleado para la construcción de los moldes es aluminio debido a su gran conductividad térmica (Throne (a) 90).

En el caso del proyecto, los moldes metálicos son multicavidad provistos de canales internos por donde circula agua de refrigeración. El diseño del molde es tal, que el flujo de agua pasa por todo el contorno externo de cada una de las cavidades del molde. Throne expone que para este tipo de herramienta, la mayor parte del calor en el plástico formado es removido por el flujo del refrigerante en los canales del molde. El medio más común para enfriamiento es agua debido a su economía, disponibilidad y eficiencia para remover el calor. En casos donde las temperaturas del molde exceden los 90°C se suele emplear aceite (Throne(a) 89).

En los moldes multicavidad se busca que no existan variaciones entre las partes de las distintas cavidades. Es importante, por tanto, que exista una transferencia de calor lo más uniforme posible a través de toda la superficie del molde. De este modo,

“es necesario que el flujo sea turbulento en todo el recorrido de los canales de enfriamiento, independientemente del tipo de fluido (...) La temperatura a través la superficie del molde no debe variar más que 1°C y el incremento de la temperatura del refrigerante no debe ser mayor que 3 °C.” (Throne (a) 90)

Según Throne, la falta de uniformidad entre las partes de un molde multicavidad puede deberse a la desigualdad de la temperatura del molde((a) 90).

En cuanto a la relación entre el calentamiento y enfriamiento, es útil tomar en cuenta que el enfriamiento se facilita más de lo que tal vez se pensaría si se considera al menos dos factores: (Throne (a) 90)

- El tiempo de enfriamiento en conducción es proporcional al cuadrado del grosor de la parte. Ya que la lámina se estira, el espesor de la lámina disminuye y la superficie de contacto también aumenta.
- No es necesario enfriar la parte hasta la temperatura ambiente. Es suficiente con enfriarla hasta una temperatura en que la parte sea lo suficientemente rígida para

removerla del molde sin distorsión. Solo de un 60% a 70% de la energía añadida en el calentamiento es removida en el molde.

Un tercer factor que puede considerarse es que la convección a través de la superficie libre de la parte es incrementada al aplicar aire turbulento o incluso agua atomizada (Throne (a) 91). En el caso del proyecto, este factor no es tan relevante ya que el diseño de la maquinaria no incorpora dicho equipo.

5.6 Corte y Apilado.

5.6.1 Corte

El corte es el paso en el que se separa la parte deseada y el exceso de material, que en muchos de los casos es el “esqueleto” de plástico que será posteriormente empleado como reprocesado. Throne considera al corte como un proceso mecánico en fase sólida de propagación de fisura por fractura dúctil o quebradiza. (Throne (b) 285). En el caso de lámina delgada, el corte usualmente se efectúa automáticamente, mientras que productos de gran grosor son cortadas manualmente (Throne (b) 329).

Es común que las partes que provienen de lámina delgada sean cortadas ya sea en una estación en línea después de desmoldear el conjunto o en el propio molde. Las termoformadoras en el proyecto están diseñada para cortar las partes en el propio molde enseguida después de la formación y el enfriamiento.

Corte en el propio molde. En algunos sistemas de corte en el propio molde, el sistema proporciona la sujeción de la lámina antes de la aplicación de las fuerzas para la formación. Tanto los bordes de la cavidades como la herramienta superior están provistas de “cuchillas” que se juntan para otorgar la sujeción., y posteriormente, el corte.

Previa a la formación, la herramienta superior y el molde se acoplan pero sin completar la trayectoria de avance. Throne dice que esto provoca una efecto de aislamiento de

cavidad (Throne(a) 94) Es decir, se asegura que cada cavidad reciba su porción de lámina respectiva y no se mueva en la formación. Una vez que se completan los ciclos de formación y enfriamiento, las herramientas concluyen la trayectoria y las cuchillas separan definitivamente el producto del esqueleto (Ver fig 5.8). Además de esta ventaja, “la cuchillas cortan fácilmente a través del plástico caliente sin una substancial generación de fibras o polvo de corte” (Throne(a) 94). Por supuesto, esta premisa es válida siempre y cuando se tenga un apropiado enfriamiento y cuchillas en buen estado ya que de lo contrario el plástico se encontraría demasiado elástico que no completaría el corte.

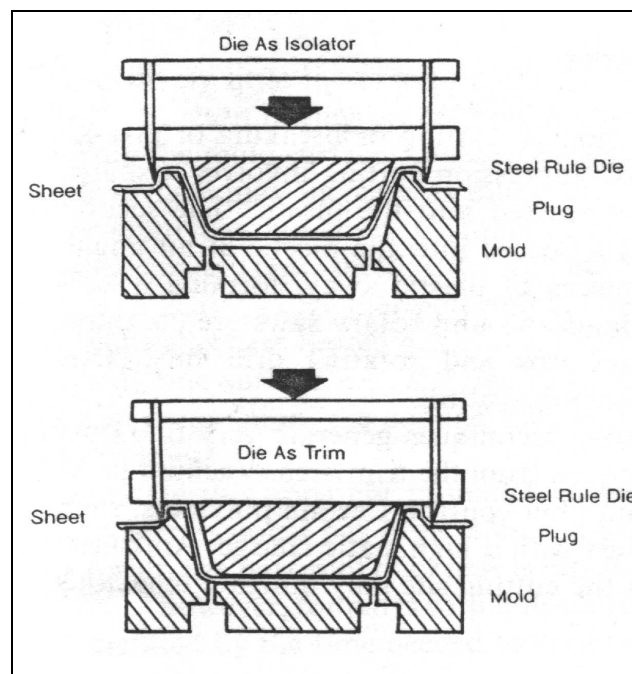


Fig 5.8. Ejemplo de corte en el molde. (Throne (a) 94)

5.6.2 Apilado

Una vez que el producto han sido separado del esqueleto es necesario emplear métodos apropiados para “remover las partes de la región de moldeo lo más pronto y minuciosamente posible. Los métodos comunes son succión al vacío, removimiento mecánico de la parte y rotación de molde ” (Throne(b) 333).

Esto se debe a que para empezar un nuevo ciclo completo para la elaboración de otros productos el molde debe estar libre y , ya que el producto todavía se encuentra caliente, una fuerza mal aplicada podría deformarlo.

En el caso del proyecto, se emplea apilado por rotación de molde y la expulsión de las partes es ayudada por un pistón neumático que es la base de la cavidad. “En la rotación de molde, el molde con las partes baja del plano del esqueleto [o lámina], luego rota para descargar las partes en un equipo de apilación”(Throne(b) 333). Además, existe un equipo de apilamiento que recibe las partes horizontalmente como en la fig 5.9.

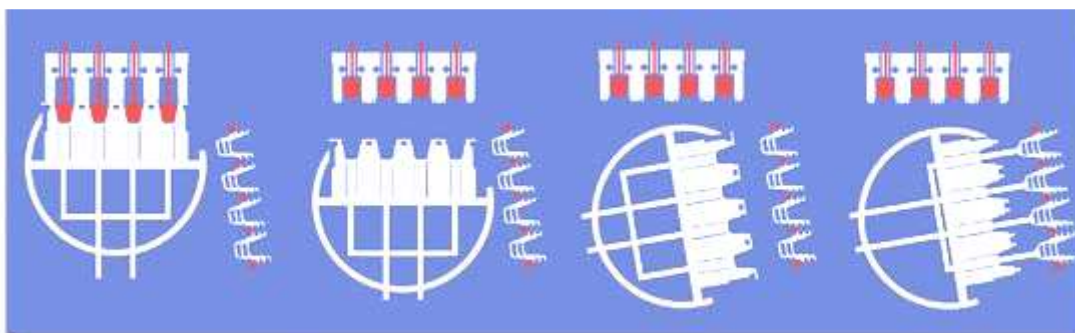


Fig 5.9 Apilado con rotación de molde (Gabler)

Throne dice que se deben considerar algunos aspectos en este tipo de apilado:

- Una incompleta separación de todas las partes del esqueleto puede ocasionar problemas en pasos posteriores y dichas partes no son útiles para vender.
- Algunas partes pueden quedarse en las cavidades por un fallo en el apilamiento.
- Puede haber polvo y microfibras que queden en la superficie del molde lo que cause defecto en las próximas partes formadas . (Throne (b) 333,334)

5.7 Aspectos de calidad en termoformado

Básicamente la calidad de la lámina y el monitoreo de producción son dos aspectos principales del termoformado (Throne (a) 123,128) . La calidad de la lámina se revisó en el capítulo de extrusión, se describirá el monitoreo de producción de termoformado.

Existen cuatro puntos importantes relacionados con el monitoreo de producción

- **Medición de temperatura.** Para asegurar que la lámina esté a una temperatura apropiada de formación. (Throne (a) 128)
- **Formabilidad de lámina.** Se desea tener una lámina de estiramiento homogéneo en toda su superficie para cumplir las tolerancias del espesor de pared. Está relacionada con las propiedades de estiramiento de lámina y la dependencia con la temperatura. Un buen indicador de que la lámina se puede formar es el cuelgue (“sag”) ante la temperatura. (Throne (a) 128, 129)
- **Superficies de corte.** La eficiencia de corte se puede verificar a través de la inspección visual de la superficie de corte del producto terminado.(Throne (a) 130).
- **Desempeño del producto terminado.** Básicamente se desea que se cumpla las especificaciones de diseño como dimensiones y espesor local. (Throne (a) 131).

La teoría expuesta es el fundamento para el desarrollo del caso de mejoramiento de calidad del proyecto. Se han presentado aspectos generales y temas particulares para la exploración de problemas de calidad y la investigación de causas y soluciones de un problema de estudio elegido. La parte siguiente muestra el desarrollo práctico del proyecto desde la búsqueda de problemas de calidad hasta el planteamiento de las causas de uno de ellos.

PARTE II. ANÁLISIS DE OPORTUNIDADES
DE MEJORAMIENTO DE CALIDAD

La parte práctica del proyecto empieza con la búsqueda de oportunidades de mejoramiento de calidad como se plantea en la metodología revisada en la parte I. El objetivo es seleccionar un caso de estudio que tenga un impacto potencial importante mediante criterios que aseguren maximizar los beneficios. En esta parte se presenta el estudio efectuado para encontrar oportunidades de mejoramiento de calidad en la empresa, la priorización de los problemas más importantes y la selección de uno en particular. Además, se expone la investigación realizada del problema elegido para el planteamiento de las causas posibles.

Capítulo 6. Identificación y Priorización de Oportunidades de Mejoramiento de Calidad.

A partir de los principios de mejoramiento por proyectos de Juran se establecerán las oportunidades de mejoramiento de calidad. Posteriormente, se enfocará un problema específico que sea de impacto significativo para determinar la causa del mismo. El primer paso será la búsqueda de los problemas de calidad, particularmente, en el proceso de fabricación.

6.1 Búsqueda de problemas de calidad.

En la búsqueda se establecieron algunos pasos:

- Recolección de Información
- Selección de problemas relevantes.
- Definición de problemas recurrentes.

6.1.1 Recolección de la información:

Se recabó información de problemas de calidad a partir del personal de ventas, producción, mantenimiento, bodega, clientes, además de una reunión conjunta con el personal de calidad y producción para exponer los problemas que perciben los empleados que existe en la fabricación. La lista preliminar se describe en la tabla 6.1.

<i>Lista preliminar de problemas de calidad</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Materia prima con impurezas • Mayor capacitación de operadores • Equivocación de color al despachar • Mal despacho en bodega • Variación en el color de lámina al sacar ciertos colores • Variación y exceso en el peso del producto. • Polifán mal sellado. • Tapas rotas 	<ul style="list-style-type: none"> • Producto con incrustaciones • Algunos productos mal formados. • Mal ajuste de las tapas • Mal contado • Necesidad de mejor planificación de mantenimiento • Cajas Rotas, abiertas o deterioradas • Lámina no corta (producto B) • Huecos en tarrinas y vasos.
Tabla 6.1 Lista Preliminar de problemas de calidad	

6.1. 2 Selección de problemas relevantes

Para reducir el tamaño de la lista se excluyeron de la misma dos tipos de problemas:

- Aquellos que se habían originado en ese tiempo (semana o mes) y eran esporádicos,
- Aquellos en los que ya se habían tomado medidas.

Entre los problemas *esporádicos* o de recurrencia eventual que se excluyeron están :

- Polifán mal sellado
- Huecos en tarrina. (solo fue 1 lote)
- Huecos en vasos
- Mal despacho en bodega y equivocación de color al despachar
- Variación en el color de la lámina al sacar colores específicos
- Algunos productos mal formados.

Por otro lado la capacitación de los empleados ya estaba en marcha.

6.1.3 Definición de problemas recurrentes.

En cuanto a éstos problemas se trató de precisar la ocurrencia de los mismos y su importancia para elegir los más importantes.

Conteo de producto . Se determinó que los productos que no tienen apilado automático son los que presentan el problema. En éstos se estimó que de 100 cajas, 10 cajas presentan errores de conteo (cajas incompletas) De éstas cajas incompletas cada 5000 productos faltarán de 4 a 10 productos totales. Los reclamos que se han presentado son cada 3 meses (sobrestimado). Lo que quiere decir un máximo de 4 veces al año. Cuando existe reclamo se repone el producto faltante.

Problema con las cajas. Se reportó que de 400 cajas 10 tenían dicho estado pero una gran parte tenía remedio. El problema radicaba en que las que no tenían arreglo despamarraba el producto.

Mal ajuste en las tapas. Se comentó que se había mejorado notablemente en relación al 2002 . Antes de ese año las quejas eran unas 14 veces al año y se redujeron a 3 ó 4. Solo algunas cavidades presentaban problemas. Existieron devoluciones (2 a 3 al año). Ya que este problema era un problema común que trataron todos los departamentos se intentó estimar una cifra significativa.

Materia prima con impurezas e incrustaciones en el producto terminado. Ambos problemas se asociaron para estimar según los datos de operación diaria en las termoformadoras. Se definió finalmente a este problema como impurezas en la lámina de termoformado.

Necesidad de mejor planificación de mantenimiento. Dicha planificación estaba siendo tomado en cuenta por el departamento de mantenimiento y producción. El asunto tiene que ver con un trabajo conjunto entre dichos departamentos y la programación de producción.

Variación y exceso del peso en el producto. Se procedió a recolectar datos en producción para conocer los valores y la variabilidad del peso .

Tapas industriales rotas. Aunque este problema no era tan recurrente y se estimó que en los lotes con problema cada 100 000 unidades 500 presentaban el problema (0.5%) las ventas del producto habían disminuido de manera evidente.

Lamina no corta (producto B). De manera preliminar parece que el problema se repetía al mes y se recolectaron datos para verificar la ocurrencia a partir de las hojas de operación.

De estos problemas se escogió cinco problemas relevantes para analizarlos más a fondo y efectuar la priorización para la elección de proyecto en base a datos más específicos. Los problemas elegidos son: tapas rotas, lámina no corta, mal ajuste en las tapas, impurezas en la lámina de termoformado, variación y exceso del peso en el producto. A continuación se presenta el análisis y priorización de los problemas elegidos.

6.2 Estudio de priorización en los problemas de calidad

La priorización se lleva a cabo para escoger un problema de calidad y estudiar una mejora. El indicador clave de elección es el “costo de baja calidad” en términos monetarios. Se revisará el procedimiento para llegar a la estimación monetaria en cada caso.

6.2.1 Mal ajuste en las tapas.

Para el cálculo tomamos en cuenta las devoluciones de 3 veces al año y que dos cavidades presentan el problema. Se asume que la devolución representa la producción de un día por parte de esas cavidades. A partir de la producción total se saca la producción promedio diaria de las dos cavidades. Este valor se lo anualiza multiplicando por tres y se

estima el costo que representa perder esa producción con el precio de venta del producto.

Los resultados se hallan en la Tabla 6.2

Costo Estimado por Mal Ajuste de Tapas	
Producción Total Anual (unidades)	3 931 693
Produccion promedio diaria (6 cavidades) (u)	10 921
Promedio producción por cavidad (u)	1 820
Producción anual con problema según supuestos (u)	10 921.37
Precio por Unidad (\$/u)	0.0182
Estimación total pérdida caso canje / año	\$ 199

Tabla 6.2. Estimación de costos por mal ajuste de tapas

6.2.2 Impurezas en la lámina para termoformado.

Para estimar los costos asociados a las impurezas en la lámina se efectuó un estudio de dos de los productos que más se producen. Se revisaron las hojas de operación diarias para tres meses. Los pasos para el cálculo son:

- Estimar la cantidad de producto producido bajo condiciones normales tanto en el turno del día como la noche.
- Revisar los casos de disminución de producción en que el operario comente sobre impurezas en lámina y calcular la diferencia de producción en relación a la producción normal estimada.
- Calcular el costo relacionado a dicha disminución de producción empleando los precios de venta de los productos.
- Proyectar para un año el cálculo de costo de disminución de producción debido a impureza de lámina en los tres meses para cada producto.
- Estimar el costo para toda la producción al año de este problema en base al porcentaje que los dos productos calculados representan del total. (Se asume que el resto de la producción solo tiene en proporción un 75 % de este problema)

Estimación de los costos debido a impurezas en la lámina					
		Análisis para 3 meses			
Producto	Precio por unidad	% del total de producción	Disminución de la produc. (u)	Costo de disminución de la producción	Estimación costo anual
A	\$ 0.007	16%	11976	\$ 86.23	\$ 345
B	\$ 0.045	18%	1370	\$ 61.78	\$ 247
Total 2 productos		34%	13346	\$ 148.00	\$ 592

Se considera que el resto de la producción tiene este problema en un 75%

Costo para el resto de la producción	\$ 862
Costo total del problema	\$ 1 454

Tabla 6.3 Estimación del problema de impurezas en la lámina

6.2.3 Lámina no corta (Producto B)

Este problema está asociado con el empleo de una materia prima que otorga mayor flexibilidad al producto y mejora los costos de materia prima en el producto B. La disponibilidad de esta materia prima es limitada.

El ahorro bruto aumenta mientras más se emplea dicha materia prima. Así, el máximo ahorro bruto vendría por el total empleo de dicha materia prima de disponibilidad limitada. Sin embargo, los problemas de corte aparecen mientras se aumenta el porcentaje de empleo de este material.

Al parecer, el tema es de maximización de ganancias al emplear un porcentaje óptimo del total disponible de dicha materia prima. Sin embargo, antes de analizar el problema se estimaron los ahorros brutos para distintos porcentajes de empleo de dicha materia prima. Para el modelo de estimación de ahorros brutos se procedió a obtener el valor de algunas variables:

- Cantidad máxima disponible de la materia prima anual.
- Cantidad anual producida del producto en cuestión.
- Ahorro por unidad de materia prima empleada
- Niveles de porcentajes de materia prima empleados del total de producción

- Niveles de porcentajes de materia prima empleada del total de dicha materia prima disponible.

Los resultados se muestran a continuación:

Estimación de costos para problema de corte en lámina		
Material Total Disponible (kg/año)		3 464
Cantidad Total Producida de B (kg/año)		40 858
Ahorro por unidad de Material Empleado (\$/kg)		0.81
Porcentaje Material Empleado del Total Producido	Porcentaje Material Empleado	Beneficio Bruto (ahorro)(\$)
8.48%	100%	\$ 2 806
7.63%	90%	\$ 2 525
6.78%	80%	\$ 2 245
5.93%	70%	\$ 1 964
5.09%	60%	\$ 1 684
4.24%	50%	\$ 1 403
3.39%	40%	\$ 1 122
2.54%	30%	\$ 842
1.70%	20%	\$ 561
0.85%	10%	\$ 281
0.00%	0%	\$ -

Tabla 6.4 Estimación de beneficios brutos al emplear material en producto B.

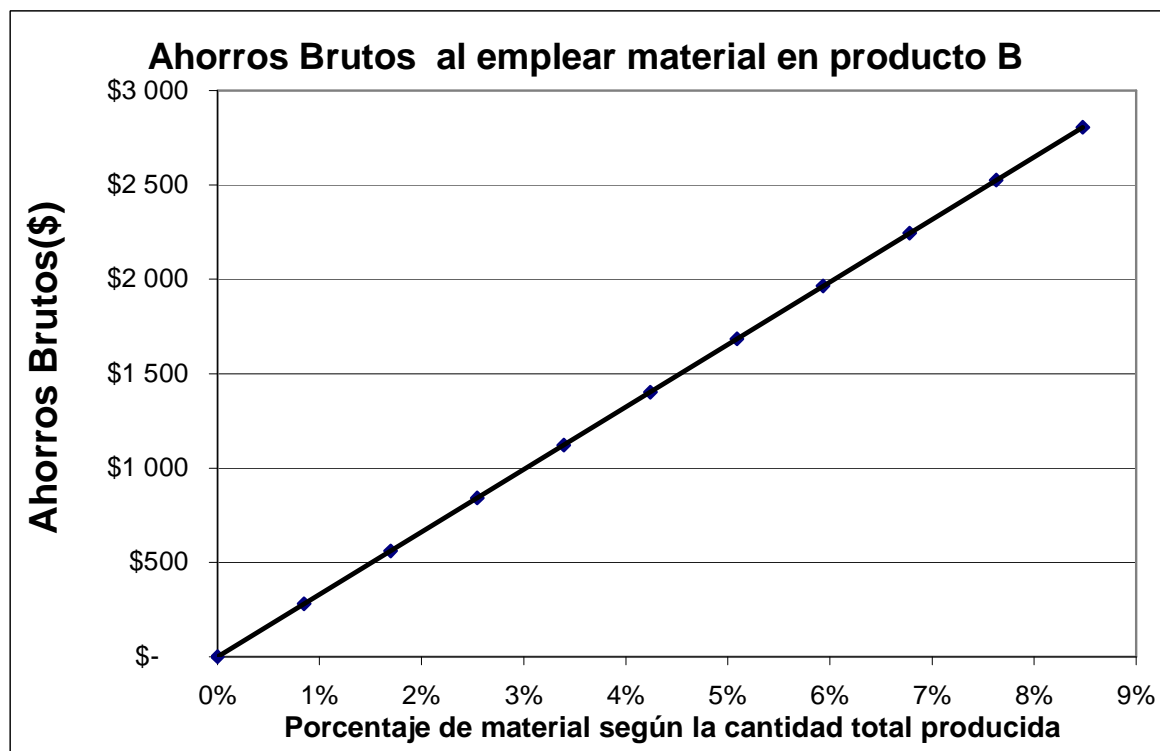


Figura 6.1 Relación para estimar beneficios brutos al emplear material en producto B.

Los beneficios brutos máximos resultaron ser de \$ 2800. Sin embargo, un estudio similar a las impurezas en la lámina de los datos de operación diaria mostró que los costos de tres meses por las disminución de producción al emplear dicho material fue de \$ 410 que proyectados a un año los costos ascenderían a \$ 1640. Así, los beneficios de emplear este material serían menores a \$1200 ya que incluso no se estaba empleando el 100% de dicho material .

6.2.4 Variabilidad y exceso de peso.

El exceso de peso se mide a partir de un valor referencial que tiene la empresa sobre el peso de los productos. Se toma como exceso la cantidad de producto que pasa dicho nivel referencial en cada tipo de producto. Para ello, se recogieron algunas muestras de los productos más importantes o que se fabrican en mayor cantidad. El muestreo se lo llevó en todas las cavidades del molde de formación de cada producto. Se recogieron grupos entre

25 y 50 unidades por cavidad. Se calculó el promedio del peso por unidad de producto en cada cavidad y se obtuvo un perfil de peso promedio unitario por cavidad. Para las distintas muestras se obtuvieron perfiles de peso similares. Se estimó un perfil promedio de peso en las cavidades del molde a partir de los datos. De este perfil de peso en cada producto, se calculó el exceso de peso promedio para un ciclo de formación (formación simultánea de tantas unidades como permita el molde en una vez) y se proyectó el exceso de peso al año según la producción anual de cada tipo de producto. Para hallar los costos de exceso de peso multiplicamos el total de peso en exceso por el precio de venta por unidad de peso. Los resultados se muestran en la tabla 6.5

Producto	Exceso de Peso anual (g)	Precio (\$/kg)	Costo de Exceso de Peso	% del total de producido
A	1980296	\$ 3.13	\$ 6 198.33	16%
B	170310	\$ 3.76	\$ 640.37	18%
C	440567	\$ 2.57	\$ 1 132.89	9%
D	687085	\$ 3.43	\$ 2 359.42	11%
Total			\$ 10 331.00	53%

% Total que Representan los Productos A,B,C,D	53%
Costos por Exceso de Peso para A,B,C y D	\$ 10 331
Costos del exceso de peso para resto de productos (asume que tienen solo en un 50% el problema)	\$ 5 166
Estimación de Costo Total por Exceso de Peso	\$ 15 497

Tabla 6.5. Estimación del costo por exceso de peso.

6.2.5 Tapas industriales rotas.

Aunque el problema era del 0.5% del producto, se calculó la disminución de ventas que puede estar asociado a este problema. Las ventas disminuyen no solo en tapas. Ya que este producto es el complemento de tarrinas fabricadas en la empresa la venta de éstas también disminuye. Una comparación entre las ventas de los productos en cuestión del último año (año 2) y el anterior a éste (año 1) muestra la disminución en ventas. El análisis se efectúa

desde el tercer mes ya que es el mes del último año en que el cliente empezó a bajar las ventas. Los resultados fueron:

mes	Ventas (dólares)	
	Año 2 suma ventas de los productos	Año 1 suma ventas de los productos
3	\$ 1 655	\$ 2 385
4	\$ 1 322	\$ 3 278
5	\$ 981	\$ 3 175
6	\$ 22	\$ 2 517
7	\$ 1 364	\$ 2 076
8	\$ 2 705	\$ 1 384
9	\$ 1 244	\$ 2 980
10	\$ 181	\$ 4 277
11	\$ 1 387	\$ 1 056
12	\$ 196	\$ 2 068
Total	\$ 11 056	\$ 25 194
Diferencia	\$ 14 138	

Tabla 6.6. Estimación del costo asociado a las tapas rotas.

6.2.6 Selección del proyecto estudio

La tabla siguiente muestra el resumen de los análisis de costos.

Problema	Costo estimado	%	% acumulado
Peso	\$ 15 500	48%	48%
Tapas rotas	\$ 14 200	44%	92%
Impurezas en la lámina	\$ 1 500	4%	96%
lámina no corta (producto B)	menor a \$ 1 200	4%	99%
Mal ajuste de tapas	\$ 200	1%	100%

Tabla 6.7. Resumen de problemas seleccionados y costos.

Los problemas relacionados al peso y de tapas rotas son los más importantes de los cinco seleccionados. Ahora es necesario seleccionar un problema como proyecto inicial para la mejora de calidad. Se tomarán dos sugerencias de Juran para seleccionar el proyecto de estudio:

- Debe ser un problema crónico
- Ser factibles de estudio.

Deber ser un problema crónico Se determina que el peso es evidentemente un problema crónico tanto por exceso como variabilidad . En el caso de las tapas rotas según las referencias de ocurrencia no es persistente o al menos no tanto como el peso. Tal vez el problema crónico asociado a las tapas es de disminución de ventas de manera indirecta.

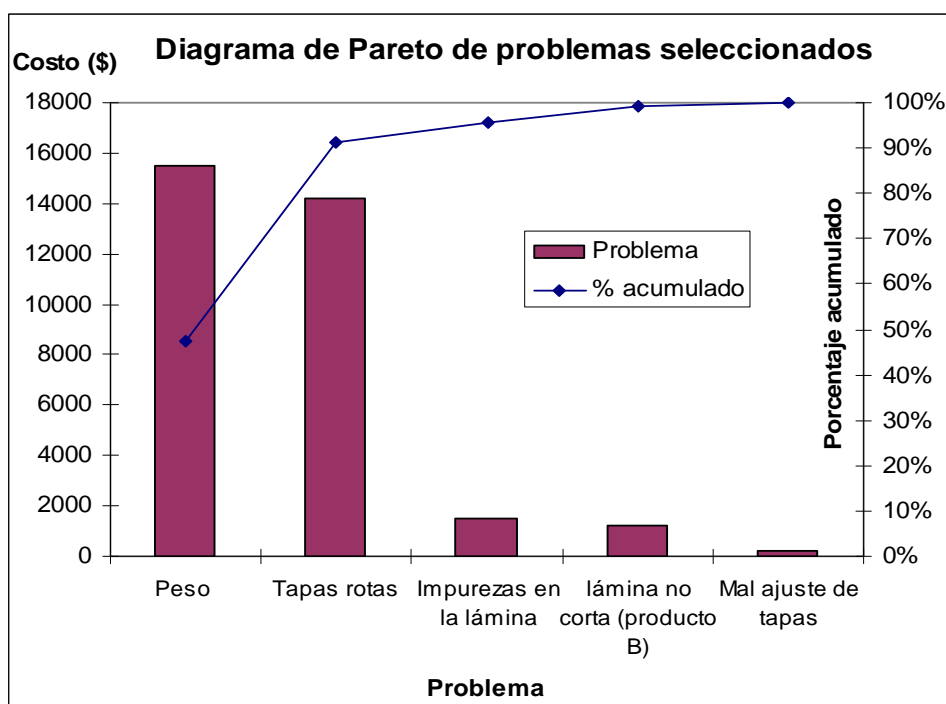


Fig 6.2. Diagrama de Pareto para los problemas seleccionados

Factibilidad de estudio . En cuanto a la factibilidad de los dos proyectos sería deseable analizar los ítems defectuosos con las condiciones de operación y otras variables relacionadas a la fabricación de los productos o alguna característica asociada al problema de calidad.

Factibilidad caso de tapas rotas: La proporción de ítems reportados con defecto es baja (0.5 % ó 1 cada 200) e incluso no se cumple en todos los lotes sino en los que se reporta con defecto. El muestreo para analizar dicho problema tendría que ser riguroso y el producto no se lo fabrica con tanta frecuencia. Además, el problema se dimensionó a partir de las ventas, así que se tendría que estudiar la venta o demanda del producto final

que emplea dicha tapa y tarrina ya que de esto depende la demanda de dichos envases plásticos. Por otra parte, se tiene que identificar si el problema es en verdad de fabricación o del empleo industrial que se da al producto. Un estudio preliminar mostró que el problema se presentaba tanto antes como después del proceso del cliente industrial. Por lo tanto, es posible que se tenga que efectuar algún test para evaluar la condiciones de resistencia del producto final y de la lámina de termoformado para el muestreo riguroso. Los equipos para los test por el momento no están disponibles. Dichos factores hacen notar que la factibilidad del proyecto de las tapas no es muy alta.

Factibilidad caso del peso: En la mayoría de muestras se notaron perfiles de peso o variabilidades similares que están relacionados con un problema crónico. Se pueden recoger los valores de un número significativo de variables de operación de las muestras. Los equipos necesarios para llevar el muestreo están disponibles. La administración también está interesada en el problema. Por tal motivo, la factibilidad de estudio es alta y las posibilidades de éxito parecen ser buenas.

Se escogerá como proyecto de estudio al problema de exceso y variabilidad del peso del producto que es el que encabeza la lista de costos, es crónico y factible.

6.3 Estudio inicial del caso elegido

Una vez seleccionado este problema se procede a definirlo de manera más precisa para identificar las causas posibles y estudiarlas o priorizarlas para proponer un remedio.

El muestreo inicial mostró que el producto A era el que presentaba mayor problema en el peso(ver fig. 6.8). Se estimó el porcentaje del costo total de los cuatro productos por cada uno de los cuatro productos..

Producto	Costo de exceso de peso	% del total de costo de A,B,C,D	% acumulado
A	\$ 6 198.33	60%	60%
D	\$ 2 359.42	23%	83%
C	\$ 1 132.89	11%	94%

B	\$ 640.37	6%	100%
Total	\$ 6 198.33	100%	

Tabla 6.8. Análisis de exceso de peso para diversos productos

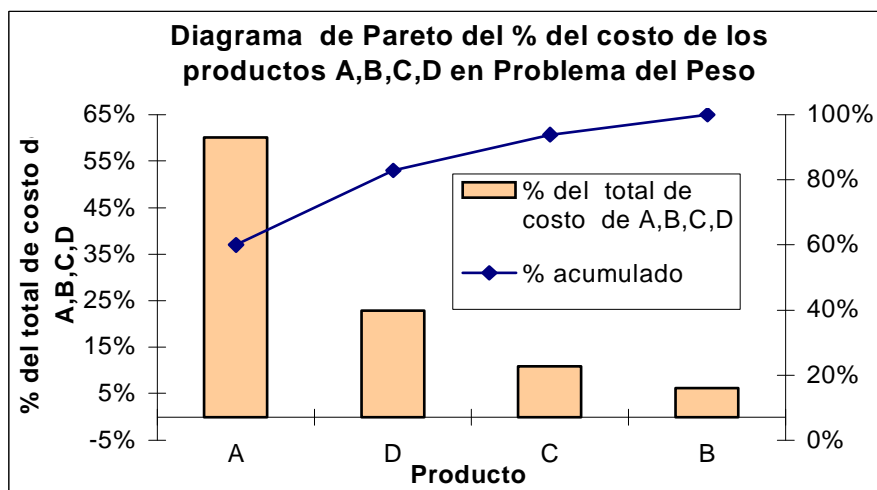


Fig 6.3 Diagrama de Pareto del % del costo de exceso de peso para productos A,B,C,D

6.3.1 Monitoreo Inicial del problema y resultados

Se efectuó un muestreo más exhaustivo del producto A. En cada muestra se recogieron los datos de algunas variables de operación en el termoformado y una muestra de lámina con el número de la extrusora en que se fabricó. De igual manera, se recolectaron algunas muestras para el caso D, que es el segundo producto que contribuye al problema y de B, por ser el producto que más se produce.

Monitoreo del peso en el producto A

Metodología del muestreo: El molde que fabrica este producto consta de 28 cavidades agrupados en 4 filas de 7. En un ciclo de formación, por tanto, se producen 28 productos.

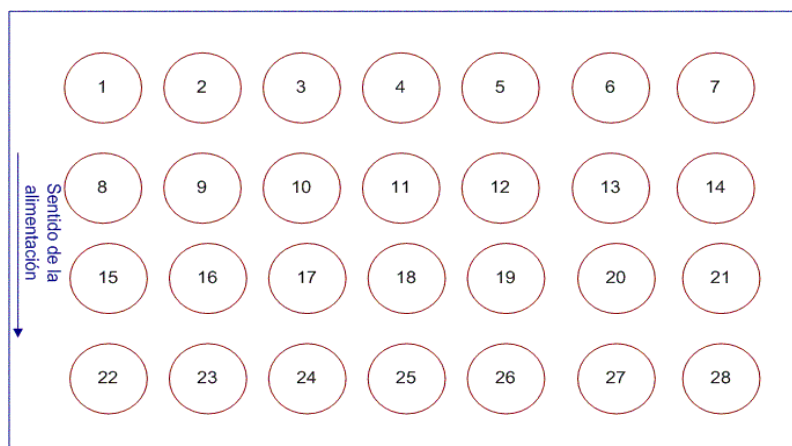


Fig 6.4 Cavidades en molde de formación para el producto A.

Cada muestra consta de una parada. Una parada normalmente se compone de 50 ciclos de formación, es decir, de 28 paquetes (1 por cavidad) de 50 productos cada uno. Se pesa cada paquete y se saca el promedio del peso de cada producto por cavidad.

Resultados del monitoreo: Se encontraron dos perfiles de peso.

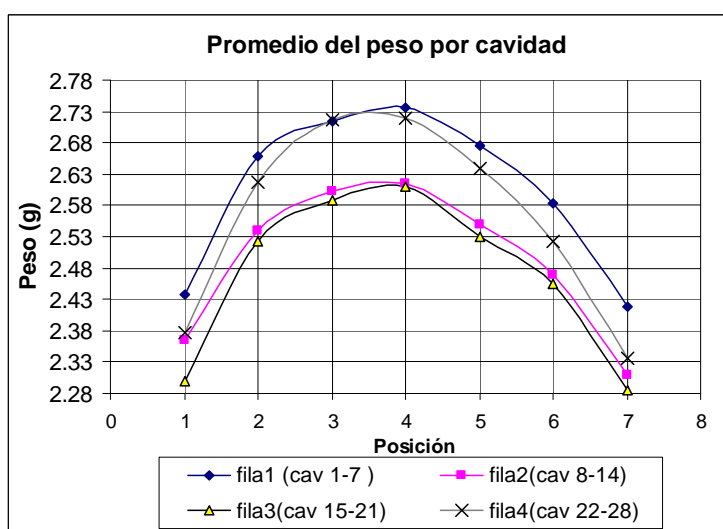


Fig 6.5 Perfil típico del peso promedio por cavidad del producto A. Caso 1.

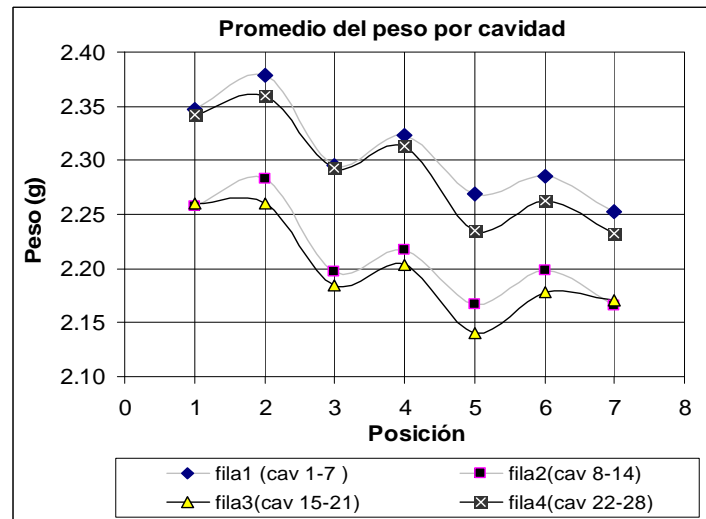


Fig. 6.6 Perfil típico del peso promedio por cavidad del producto A. Caso 2.

El caso 1 es el más frecuente. La lámina en este caso provenía de una extrusora que la denominaremos “extrusora 3”. Pocas muestras de peso resultaron ser como el caso 2. La lámina provenía de la extrusora que llamaremos “extrusora 1”.

Existen dos problemas del peso del producto claramente identificados.

- Exceso de peso según el nivel referencial
- Variabilidad del peso.

Exceso de peso según el nivel referencial. Se determinó que el exceso de peso en el caso 1 es mayor que el caso 2. Al menos gran parte del producto en el caso 1, excedía el nivel referencial de peso. Además se calculó que el promedio total de peso para todas muestras sobrepasaba dicho nivel referencial.

Variabilidad en el peso. En cuanto a la variabilidad en el peso se identifican dos problemas:

- Variabilidad del perfil del peso en sentido transversal.
- Variabilidad del peso entre filas. Las filas 1 y 4 (filas de los extremos) son las de mayor peso en contraste con las filas 2 y 3 (filas del centro).

Variación transversal: Se calculó el rango (máximo valor menos el mínimo valor) por cada fila del peso promedio. Los cálculos mostraron que el rango en el caso 1 era alrededor de 0.30 g en las cuatro filas. Para el caso 2 dicho rango fue de 0.10 g.

Variación entre filas: Se encontró el peso promedio mínimo de cada fila. Se evalúa el promedio de los pesos mínimos de las filas (1 y 4) de los extremos. De igual manera se procede con los pesos mínimos de las filas del centro (2 y 3). Se compara los dos promedios de los pesos mínimos por grupos de filas. La diferencia se establece como el rango. Dicho cálculo muestra que el rango entre grupos de filas para el caso 1 y 2 es un poco menos de 0.10g.

De este breve análisis se prioriza que el *problema más importante en el producto A es el de la variación en sentido transversal del producto*

Monitoreo del peso del producto D

El molde que fabrica este producto consta de 6 cavidades agrupadas en 2 filas de 3. En un ciclo de formación, por tanto, se producen 6 productos.

El muestreo es similar al efectuado en el producto A. En cada muestra se recogen 6 paquetes (uno por cavidad) de 50 unidades cada uno. Se encontraron básicamente dos tipos de perfiles simétricos entre sí.

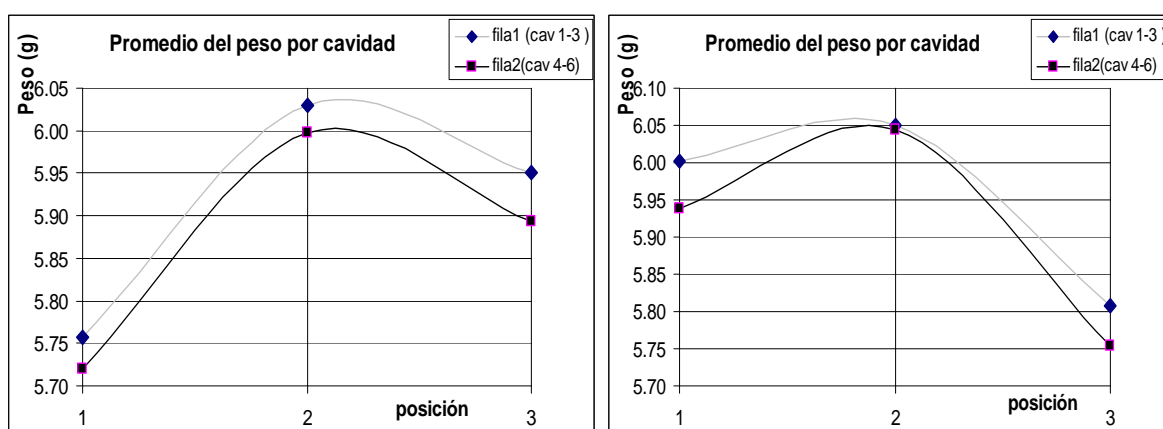


Fig 6.7 . Perfil de peso promedio por cavidad para muestras de producto D.

El personal de producción, sin embargo, explicó que la producción de este producto no provenía normalmente de esta extrusora. Cuando se efectuaron los muestreos, la extrusora que provee normalmente la lámina para termoformar este producto estaba parada. El porcentaje de lámina que provenía de la “extrusora 1” para este producto era bajo (entre 10 a 20% del total). Aunque los datos obtenidos por este muestreo no son representativo de la producción anual, posteriormente fueron valiosos para conclusiones posteriores.

Monitoreo del peso del producto B

El molde en que se termoforma el producto B consta de 10 cavidades agrupadas en 2 filas de 5. En cada ciclo se elaboran 10 productos. El muestreo fue similar pero ahora cada paquete por cavidad tiene 25 productos. La muestra representa 25 ciclos de formación.

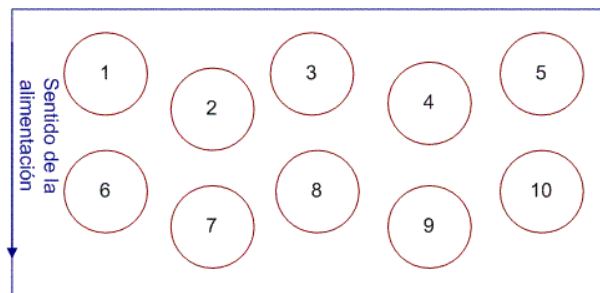


Fig. 6.8 Cavidades en molde de formación del producto B.

A pesar de que la estimación del exceso de peso inicial se efectuó en base a los productos elaborados a partir de lámina de la “extrusora 1” existe una parte de la producción de lámina que se realiza en la “extrusora 3” (del 15 a 35%). Los perfiles encontrados para ambos casos se muestran en la figuras 6.14 y 6.15

Para los productos de B que se termoforman con lámina de la “extrusora 3” el efecto en el peso es el mismo que se discutió con el producto A. El perfil es muy similar para ambos productos y la variabilidad en el peso es mucho mayor para la lámina de la “extrusora 3”

que la “extrusora 1”. La figura 6.16 muestra la comparación del perfil de la variación del peso respecto al mínimo para láminas de extrusoras distintas.

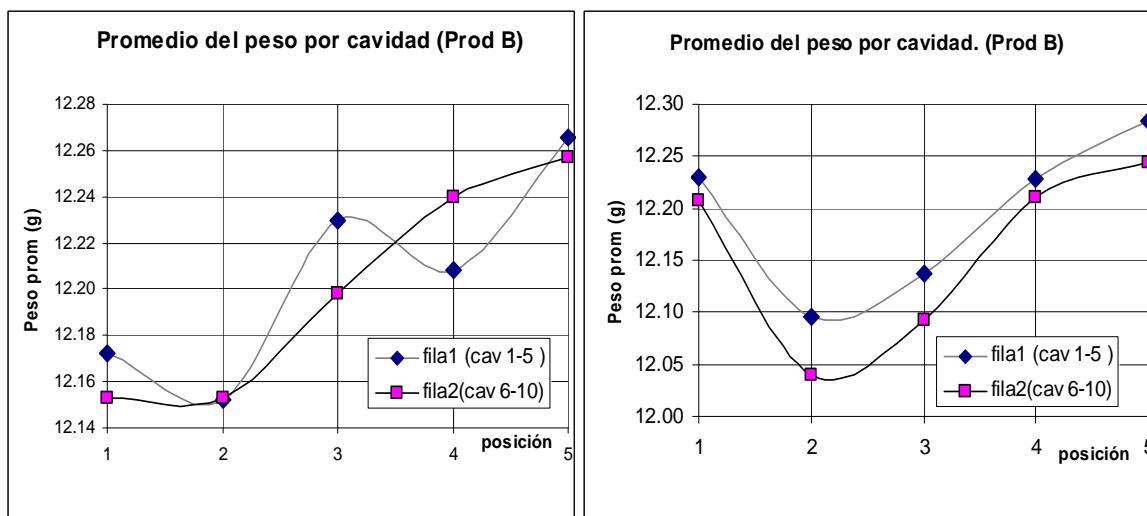


Fig. 6.9 Perfiles típicos de peso promedio por cavidad de producto B con lámina extr. 1

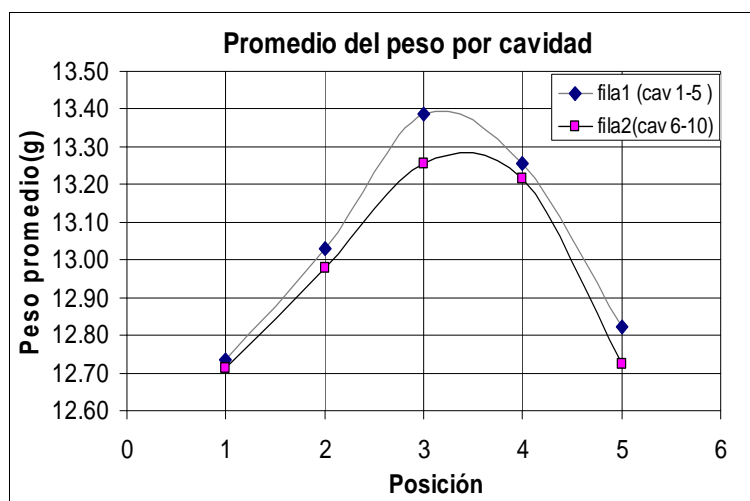


Fig.6.10 Perfil típico de peso promedio por cavidad de producto B con lámina de extr.

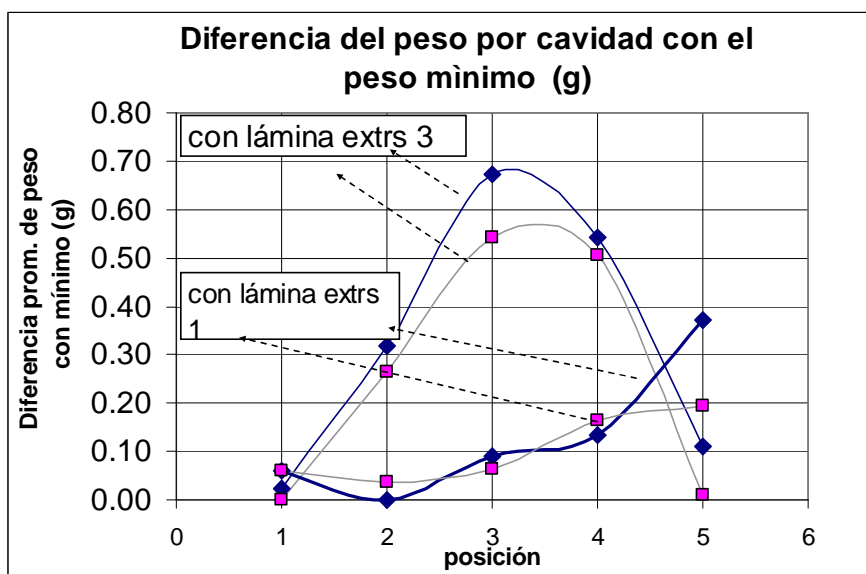


Fig. 6.11 Comparación de diferencia de peso promedio respecto al mínimo en el producto B para dos tipos de proveedores de lámina.

Conclusiones del monitoreo inicial del peso.

- Se verificó el exceso de peso en los productos importantes monitoreados .
- La estratificación del producto por extrusora que elaboró la lámina fue muy importante para separar las causas de la variabilidad en el peso.
- La variabilidad de peso entre filas para el producto A es un problema asociado con el proceso de termoformado ya que se presentó en igual magnitud para láminas de distintas extrusoras.
- El problema más importante de variabilidad en el peso está asociado a la lámina de la “extrusora 3”. Se presentó el problema en los productos A y B con lámina fabricada en dicha extrusora.
- Se debe analizar lámina de la “extrusora 3” y encontrar la variable en la lámina que provoca la variación del peso en sentido transversal.

6.3.2 Determinación de la causa principal del problema del peso.

El producto A es que el presenta mayor problema en el peso y la variación del peso se debe principalmente a la lámina de la “extrusora 3”. Por tanto, el estudio de la causas del problema del peso se centró en la lámina de la “extrusora 3” para fabricar el producto A.

El atributo principal de la lámina que debe estar relacionado con el peso es el espesor de la misma. Se midió el espesor de lámina para las muestras de peso recogidas empleando micrómetro. Los perfiles de espesor de lámina de la “extrusora 3” muestran una forma parecida al perfil de peso promedio encontrado (fig 6.17) Una manera concluyente de mostrar la relación entre el peso y el espesor de lámina es a través de un gráfico de dispersión entre estas variables.

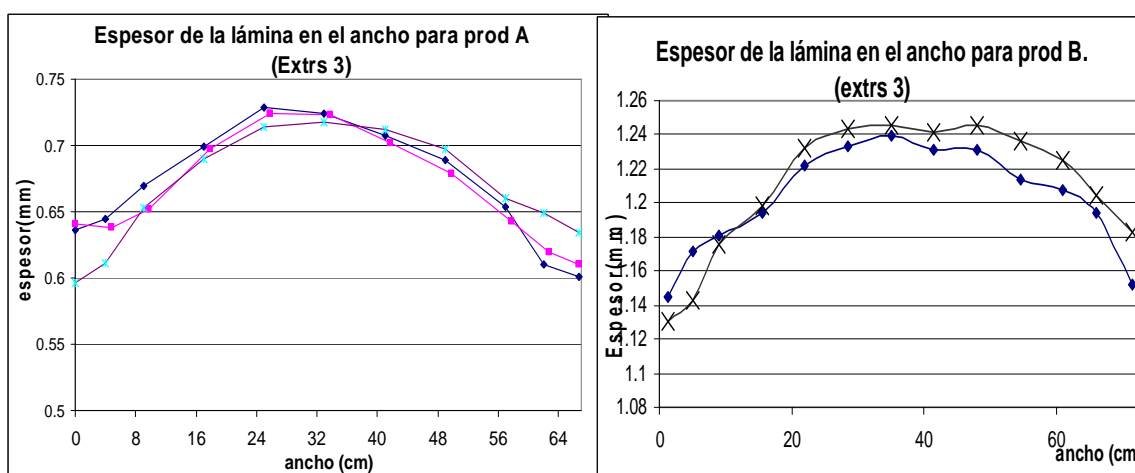


Fig 6.12 Espeores de lámina para productos A y B procedentes de “extrusora 3”.

Metodología : La metodología para efectuar la relación fue la siguiente

- A partir de la forma de los esqueletos (lámina que queda después de la termoformación) y el molde, estimar la posición transversal del punto medio de las cavidades en la lámina y medimos con micrómetro las muestras recogidas en dichas posiciones. (ver Fig 6.13)

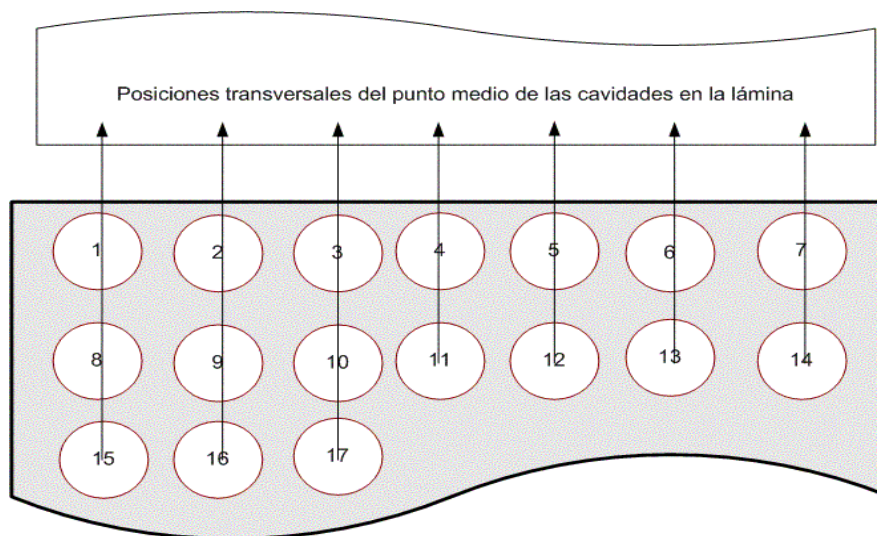


Fig 6.13 Posición transversal en la lámina del punto medio de las cavidades.

- Calcular el promedio del peso para cada posición transversal (4 valores por posición).
- Graficar los valores obtenidos. En el eje horizontal se coloca el espesor (variable causal) y en el eje vertical el peso promedio por posición transversal. (Ver fig 6.19)

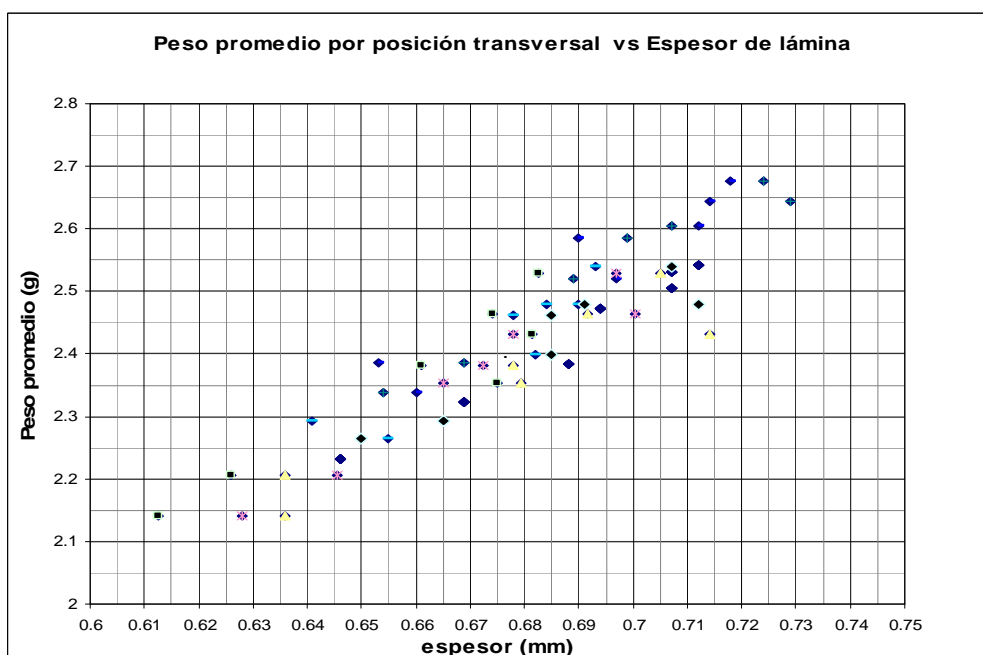


Fig 6.14. Relación espesor de lámina (extrusora 3) vs peso promedio del producto A.

El gráfico muestra que existe una potencial relación lineal positiva entre el peso y el espesor de lámina. Por tal motivo, se puede concluir que se debe efectuar un estudio más profundo del espesor de lámina de la “extrusora 3” para mejorar la variabilidad el peso y el promedio del peso en general que supera los niveles referenciales de la empresa.

El problema del promedio del peso se analizará en este capítulo, mientras que el estudio de la variabilidad del espesor de lámina se estudiará más a fondo en los restantes.

6.3.3 Modelo para el control del peso promedio a través del espesor de lámina

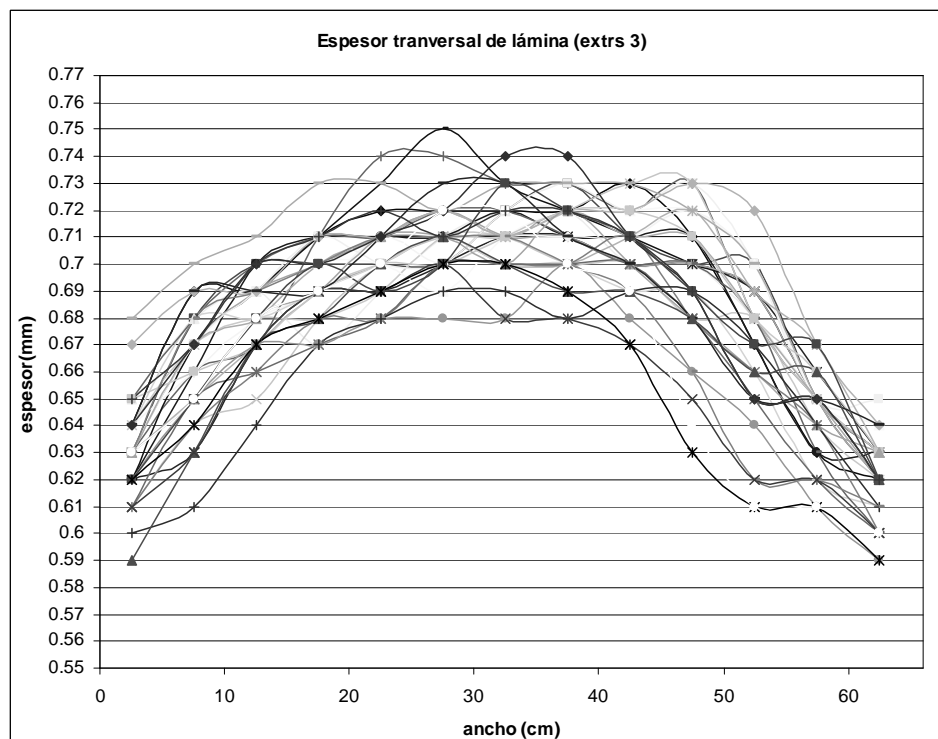
Definición del modelo El modelo determina el espesor de lámina de la “extrusora 3” que el operador debe calibrar para obtener un perfil de peso de tal modo que se cumplan ciertas expectativas de la empresa en cuanto al peso promedio del producto. Por ejemplo: que el promedio del peso no supere el nivel referencial.

Se advierte que este modelo incluye la variabilidad ya detectada de la lámina pero no la mejora. Ya que el operador solo calibra el espesor a los lados de la lámina, se desea conocer el espesor que debe tener en esta posición.

Para determinar este modelo se debe establecer:

- Perfil transversal de espesor de la lámina.
- Perfil transversal del peso del producto.
- Relación lineal entre peso y espesor de lámina.
- Espesor de calibración de lámina.

Perfil transversal de espesor de la lámina. El muestreo de espesor previo peso mostró que la variación transversal de la misma no era constante en un mismo lote. Es necesario, por tanto, tener datos suficientes para estimar un perfil significativo del espesor.



Se recogió un pedazo de lámina de longitud igual a la circunferencia de los rodillos de acabado (aprox 165 cm). Las mediciones se efectuaron cada 5 cm tanto en sentido transversal como longitudinal (sentido máquina) empezando a 2.5 cm de los bordes.

Los resultados de las mediciones muestran que en sentido transversal existe un patrón similar en todas las medidas: el centro presenta mayor espesor que los bordes. Se estimó el espesor promedio para cada posición en sentido transversal. Se empleó éste espesor promedio transversal para el modelo a estimarse.

Perfil transversal del peso del producto. Para el caso del peso se estimó un perfil de peso promedio por cavidad para que en promedio cumpla el nivel referencial de la empresa dado para el producto. Este perfil de peso promedio se encontró a partir de los datos obtenidos de las diversas muestras. Ya que en cada muestra se obtuvieron promedios distintos y lo que interesa saber es el perfil relacionado a la variabilidad entre las

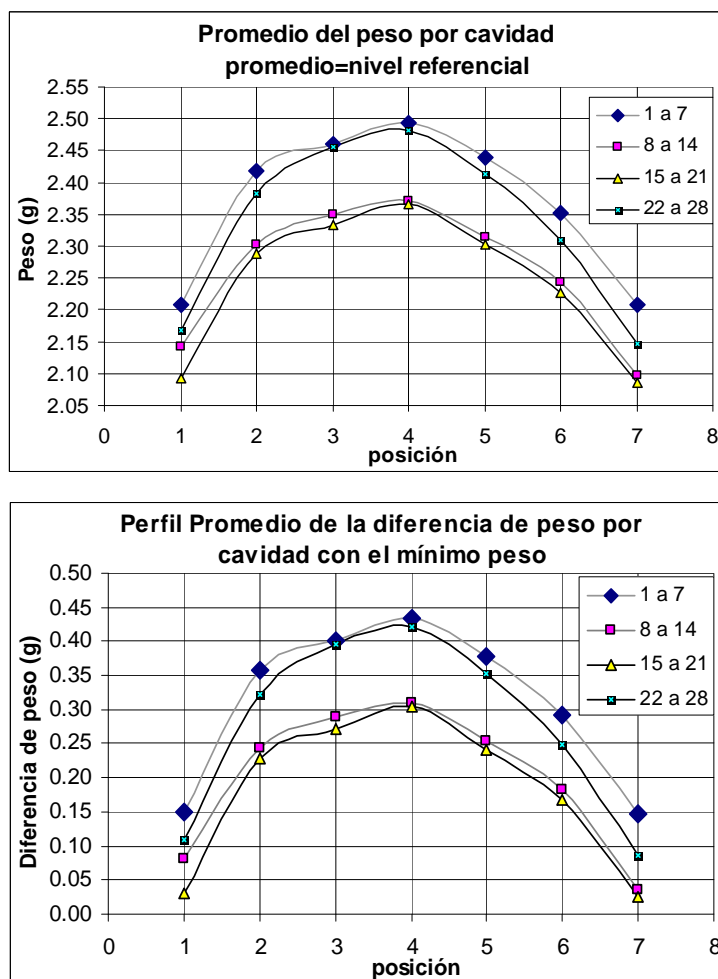


Fig 6.17. Arriba. Promedio del peso por cavidad para cumplir en promedio el nivel referencial. Abajo.

cavidades, se calculó para cada muestra las diferencias de peso de cada cavidad con el peso promedio mínimo en cada muestra . Se promediaron los perfiles encontrados para estimar un perfil promedio incremental de las diferencias de peso entre cavidades. A partir de este perfil promedio de peso incremental se estimó el peso promedio que debería tener cada cavidad para que el promedio del peso total cumpla el nivel referencial de la empresa. (Ver fig 6.17)

Para saber el espesor correspondiente de este perfil promedio de peso se tiene que hallar el promedio de peso por posición transversal que es el siguiente:

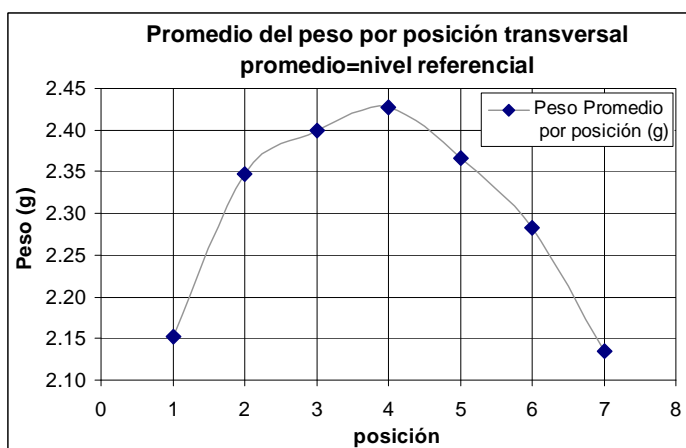


Fig. 6.18 Perfil del peso promedio por posición transversal.

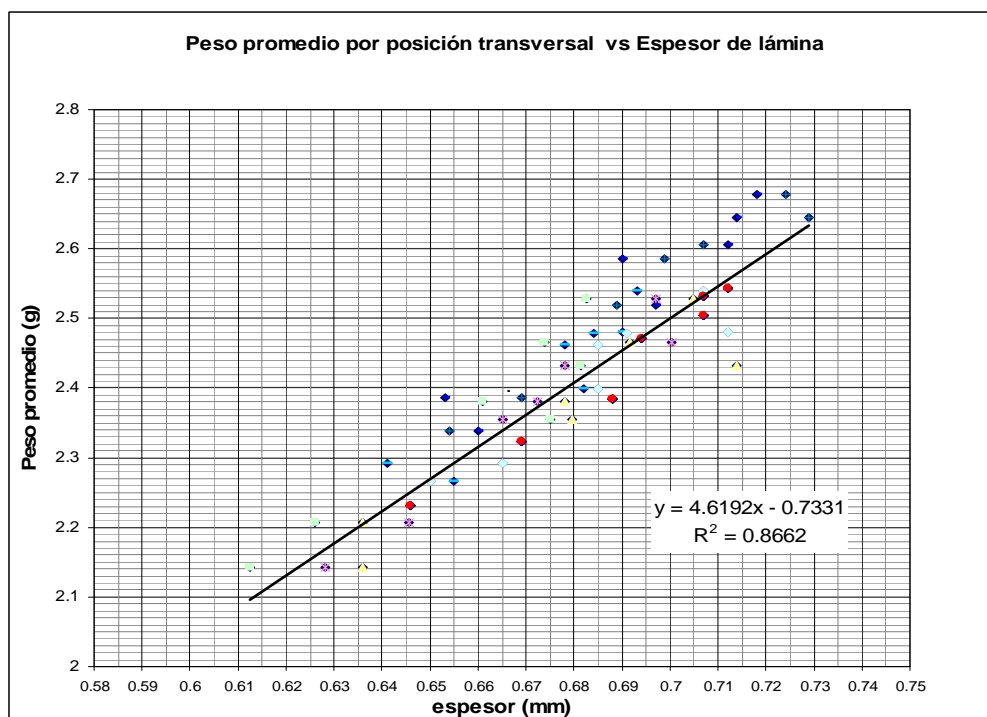


Fig. 6.19 Relación entre espesor y peso promedio

Relación lineal entre peso y espesor de lámina. Se comprobó la existencia de la relación lineal para la muestra de lámina de longitud igual a la circunferencia del rodillo y el peso de producto respectivo. Se incluyeron estos datos promedio en la gráfica de dispersión anterior y obtuvo la regresión lineal entre las variables. El modelo lineal se muestra en la fig 6.19

Espesor de calibración de lámina Ya que los operadores miden el espesor en los bordes de la lámina es necesario saber el espesor que tendrá la lámina a dicha posición. El peso promedio en la *posición 1*, que es una cercana al borde, es de 2.15 g. El espesor de lámina correspondiente a este peso, por la regresión lineal de la relación peso promedio-

espesor , es de 0.624 mm. La posición 1 corresponde a las cavidades 1,8,15 y 21 que se encuentran aproximadamente a 9 cm del borde izquierdo de la lámina.

Esta es todavía una posición a la que el operador no puede calibrar la lámina. Para estimar el valor que debe tener la lámina a unos 2.5 cm del borde se puede recurrir al gráfico de espesor promedio encontrado para la prueba de longitud de lámina igual a la circunferencia del rodillo. A este perfil promedio de espesor lo subimos o bajamos según el valor de la *posición 1* para después conocer el espesor que debería tener la lámina a 2.5 cm del borde. Para el efecto se tomará el lado izquierdo de dicho perfil.

A 9 cm del borde, la fig 6.21 muestra un espesor de 0.668 mm. Ya que el espesor a dicho nivel se estimó que debe ser 0.624 mm, se calcula que la curva debe ser movida 0.044 mm (0.668mm -0.624mm) hacia abajo. A 2.5 cm en la fig 6.21 se tiene un valor de 0.63 mm. Si restamos los 0.044 mm de 0.63 mm tenemos que el espesor a 2.5 cm del borde de la lámina el espesor tiene que ser de 0.59 mm para que se cumpla el objetivo propuesto.

Por tanto, se sugiere que se la lámina sea calibrada con un promedio de espesor en el borde de 0.59 ó 0.60 mm.

6.4 Conclusiones en la identificación y priorización de oportunidades de mejoramiento de calidad

- Se recolectó la información necesaria para identificar los problemas de calidad en la empresa y se seleccionaron los problemas relevantes para efectuar un análisis económico de los mismos.
- Mediante el análisis económico de los problemas relevantes, recurrencia y criterios de factibilidad de investigación (herramientas disponibles, posibilidad de muestreo, interés de la administración, etc.) se eligió al problema del exceso y variabilidad de peso para un estudio más detenido para emitir una solución al mismo.

- En el problema de peso, se seleccionaron los productos de mayor producción y relacionados al problema para un monitoreo inicial que mostró que existe un mayor impacto en el producto A. Se eligió el producto A para mayor investigación.
- El problema de la variabilidad en el peso del producto A se debe a un 25% al proceso de termoformado (aprox 0.1g /ciclo) y a un 75 % al proceso de extrusión (aprox 0.3 g/ciclo). El problema de variabilidad en el peso asociado al proceso de extrusión se detectó también en otros productos.
- Se determinó que el problema principal en el proceso de extrusión tenía que ver con la variabilidad del espesor de lámina para una de las extrusoras.
- Se estudió la relación entre el espesor y el peso del producto lo que resultó en una relación lineal.
- A partir de la relación peso-espesor y un muestreo representativo del espesor de lámina se estableció un modelo para corregir el exceso de peso promedio del producto.
- Mediante la aplicación del modelo en el producto A, se determinó que la lámina debía ser calibrada por los operadores a 0.60 mm para que el promedio de peso del producto cumpla el nivel referencial que tiene la empresa.

A pesar de que el problema de peso promedio se puede resolver por este método, existe especial interés en mejorar el perfil o variabilidad de peso y del espesor. En el siguiente capítulo se muestra un estudio más profundo del control de espesor para mejorar la variabilidad de este atributo de calidad.

Cap 7. Aspectos de calidad para el control de espesor .

Se ha definido como causa fundamental de la variabilidad del peso a la variación en el espesor de lámina de la “extrusora 3”. De este modo, la causa encontrada llega a ser un síntoma de una causa raíz que provoca la variabilidad en el espesor de la lámina. Para determinar a la raíz de la variabilidad del espesor de lámina se efectuaron algunos pasos:

- Monitoreo del espesor de lámina
- Monitoreo de variables de operación en el espesor de lámina
- Listado de causas posibles y priorización.

7.1 Monitoreo inicial del espesor.

Se recogieron datos de láminas de la “extrusora 3” de algunos productos para ver el comportamiento de la variación del espesor a distintos espesores. Los resultados mostraron

que, a pesar de que en todos los productos se tiene un perfil curvo de espesor transversal, a mayor espesor dicha variación disminuye. Es decir, las láminas más delgadas presentaron una variación transversal mayor que las gruesas. (Ver fig 7.1)

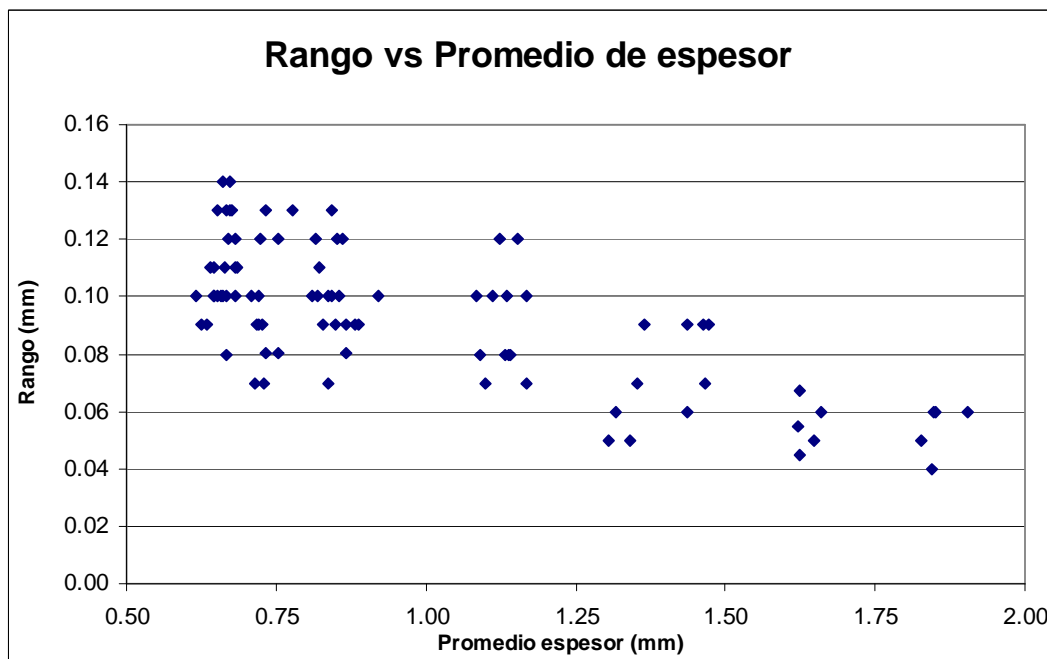


Fig. 7.1 Rango trasversal vs promedio de espesor para varias muestras de lámina de la extrusora en estudio.

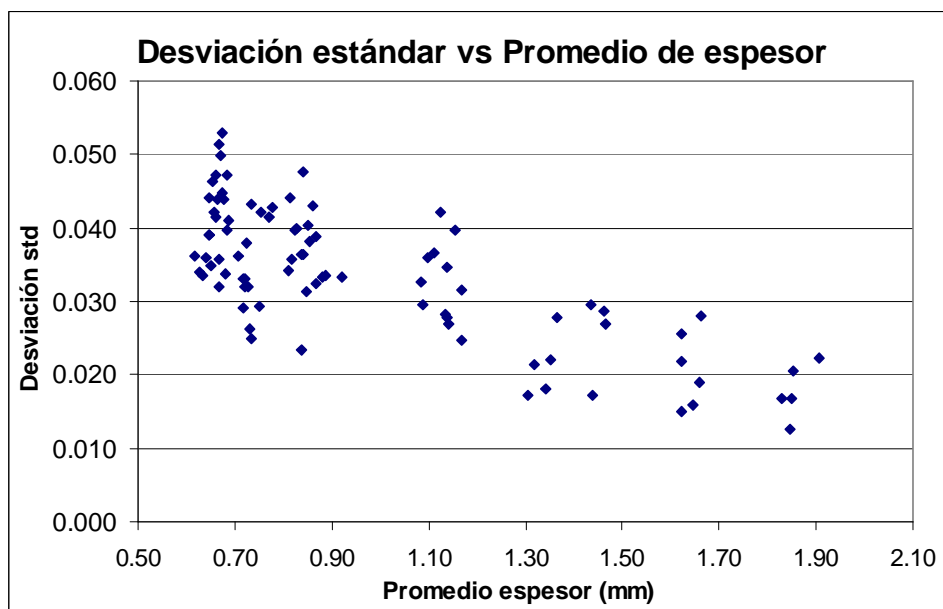


Fig. 7.2 Desviación estándar trasversal vs promedio de espesor para varias muestras de lámina de la extrusora en estudio.

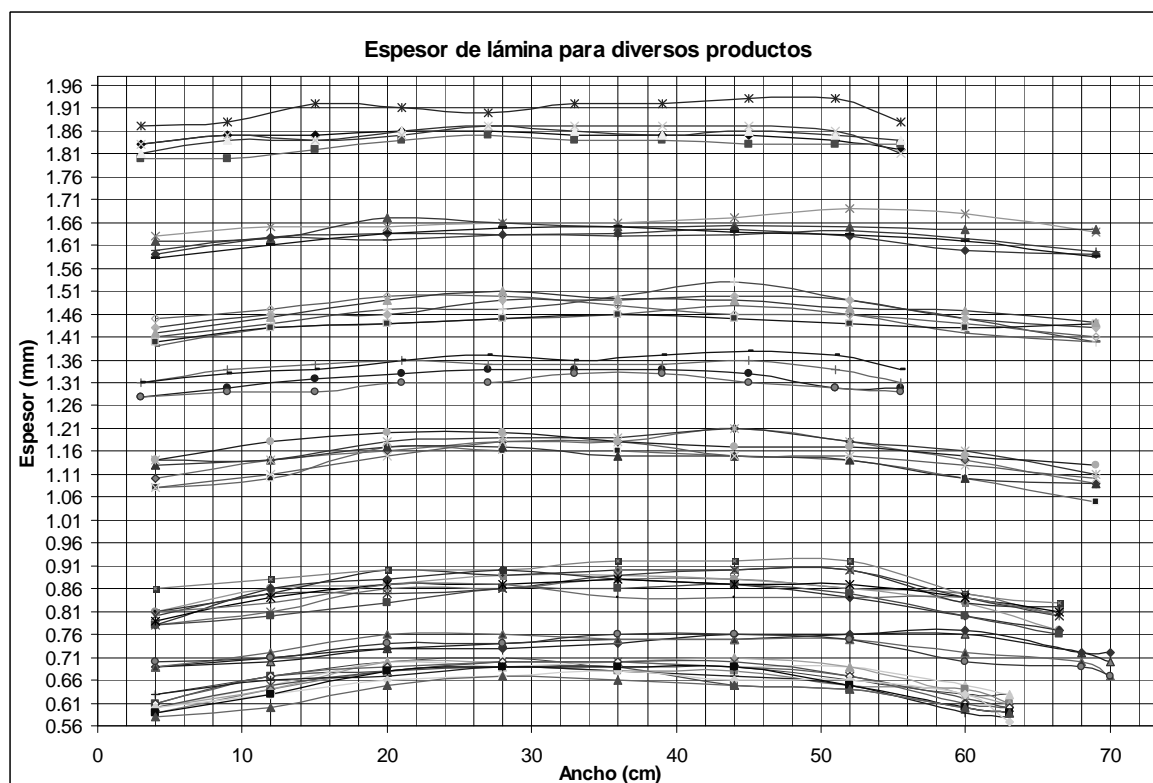


Fig. 7.3 Espesor de algunos productos en sentido transversal .

Se encontró también el rango porcentual transversal promedio para cada producto (razón entre el rango transversal promedio para el promedio de espesor). Este indicador mostró una variación desde el 3% para láminas de espesor de 1.85 mm hasta 17% para láminas de 0.66 mm de espesor(Tabla 7.1). Throne indica que lo deseable sería tener una variación en sentido transversal del 2% (Throne(b) 637). Una empresa de termoformado también recomienda una variación transversal de lámina de +/- 1% (2%) (Empire West)

PRODUCTO	Espesor Promedio (mm)	Rango promedio transversal (mm)	% Rango promedio transversal
X	1.85	0.054	2.91%
Y	1.33	0.058	4.33%
Z	1.64	0.063	3.40%
W	1.46	0.080	5.50%
B	1.13	0.092	8.12%
U	0.84	0.101	11.96%
V	0.86	0.098	11.40%
A	0.66	0.110	16.74%
C	0.73	0.092	12.52%

Tabla. 7.1. Resultados de espesores y rangos promedio para diversos productos

7.2 Monitoreo de variables de operación en el espesor de lámina

Principalmente, se recogieron datos de las siguientes variables relacionadas a la operación del cabezal tanto en la “extrusora 1 y 3” para efectos de comparación :

- Temperatura de las zonas en el cabezal
- Abertura de labio del cabezal.

7.2.1 Temperatura de zonas del cabezal

Se registraron algunos perfiles de temperatura en distintas fechas a partir de los valores encontrados en los controladores de temperatura. El cabezal se compone de cinco zonas de temperatura enumeradas de 1 al 5 transversalmente. Los datos encontrados fueron:

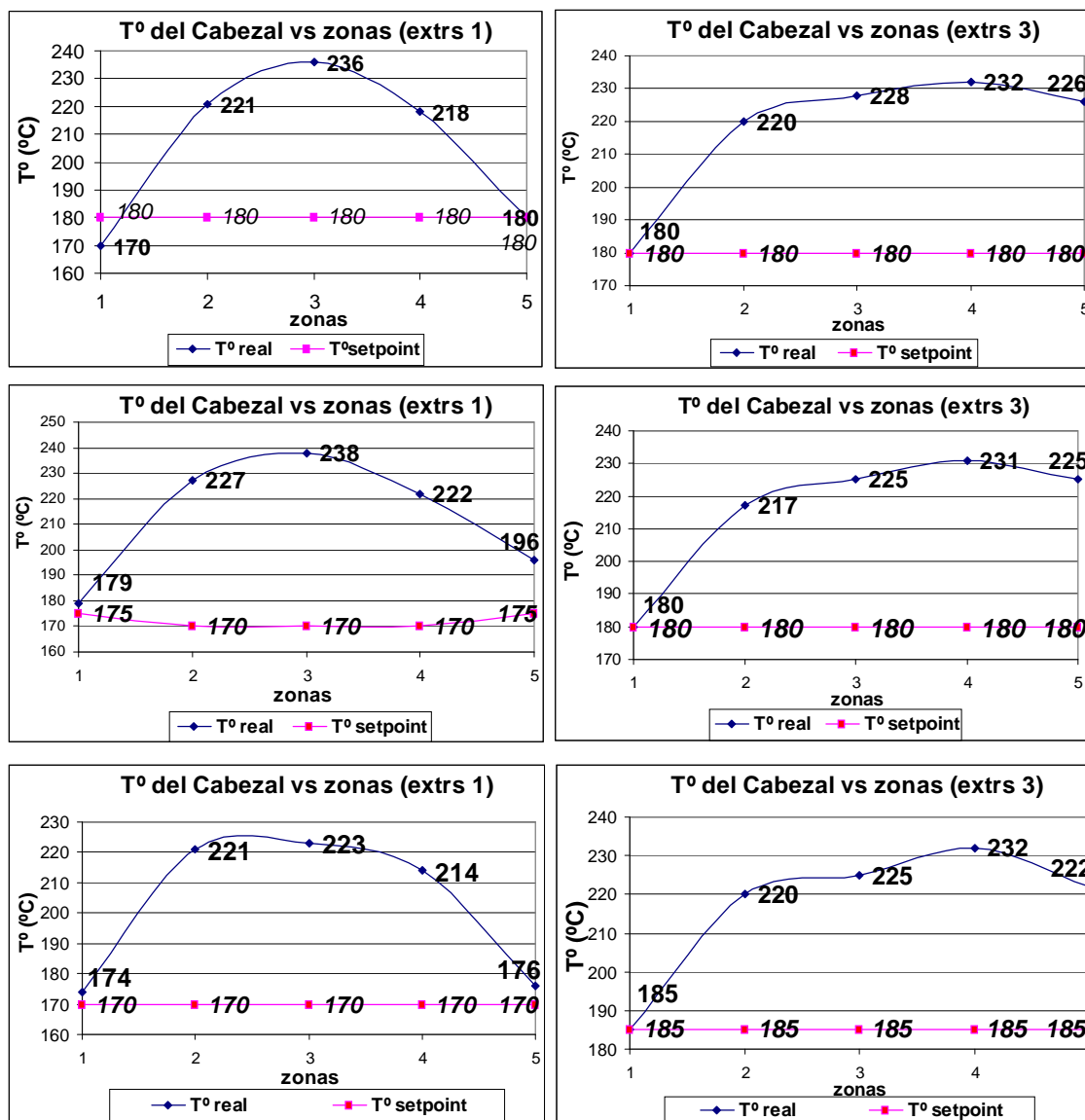


Fig 7.4 Datos de temperatura en las zonas del cabezal.

Es evidente que el ajuste de temperaturas es diferente a lo revisado en la literatura. Lo deseable sería tener temperaturas similares en todas las zonas. Las temperaturas del centro parecen estar fuera de control ya que distan mucho del valor objetivo. Esto se debe a que la temperatura del flujo de la lámina en el centro es mayor que en los bordes. Ya que el sistema de control solo es de calefacción, a lo mucho, los calefactores pueden estar apagados para reducir la temperatura y, por tanto, no existe control en las zonas donde la temperatura de ingreso es mayor al valor objetivo determinado por los operadores.

El perfil de temperatura del cabezal en la “extrusora 3” es mayor en el centro pero no es simétrico. En la zona 5 la temperatura es mayor que el otro extremo. En contraste, el perfil de temperatura de la “extrusora 1” es más simétrico pero con una calibración en el valor objetivo (setpoint) parecido al de la “extrusora 3”. Ya que en la “extrusora 1” no se ha observado el problema en estudio no se puede concluir que la temperatura, en forma decisiva, sea la que provoque el problema del espesor. Sin embargo, se sugiere que se calibre en forma más uniforme la temperatura de las zonas en ambas extrusoras aumentando el valor objetivo de las temperaturas en la zonas, especialmente, en los lados.

7.2.2 Abertura del labio del cabezal

Para trazar un perfil estimado de la *abertura del cabezal* se tomaron datos de la abertura del labio empleando un calibrador digital (apreciación 0.01mm). Una vez terminada la corrida de producción, se efectuaron las mediciones en varias secciones transversales del labio. El porcentaje de abertura del labio se encontró a partir del valor objetivo del espesor de la lámina que había sido fabricada ($100\% \times \text{Espesor Lámina Objetivo} / \text{Abertura Labio}$). Las medidas se realizaron en las “extrusoras 1 y 3” en distintas fechas para productos de diversos espesores. Los resultados se registran en la fig 7.5.

Es evidente que el movimiento del labio es restringido en ambas extrusoras. La abertura de labio supera en una cantidad considerable el espesor de la lámina final para el caso de productos finos. A pesar de que en ambos casos se registraron perfiles no uniformes, en la “extrusora 3” el perfil de labio es más curvo que en la “extrusora 1”. A primera vista, se podría pensar en mejorar el perfil de abertura del labio para la “extrusora 3” (más plana) y disminuir el porcentaje de abertura de labio.

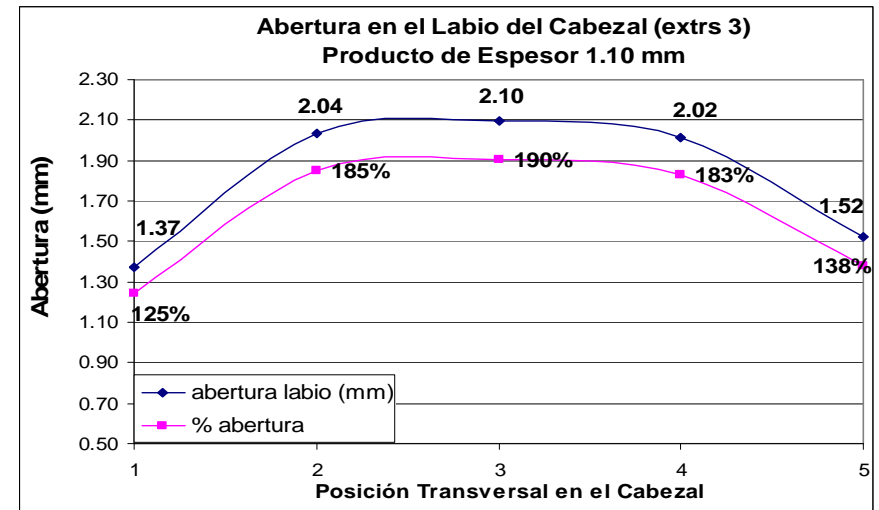
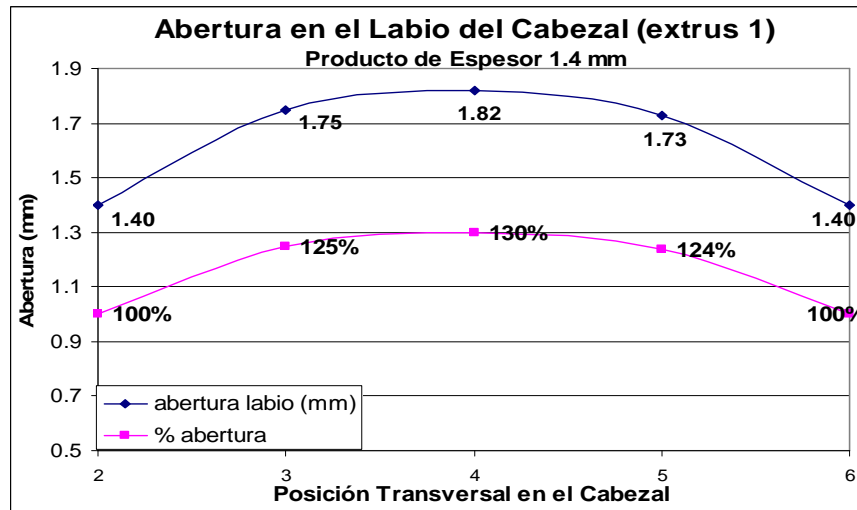
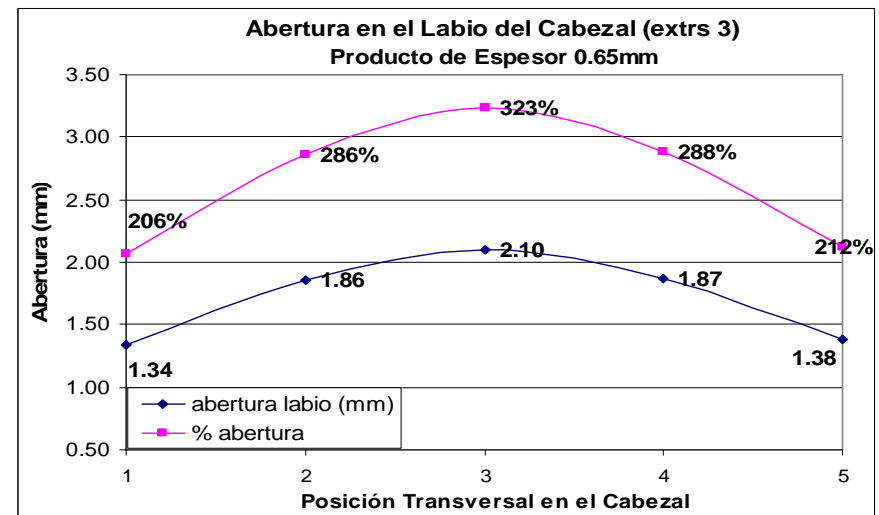
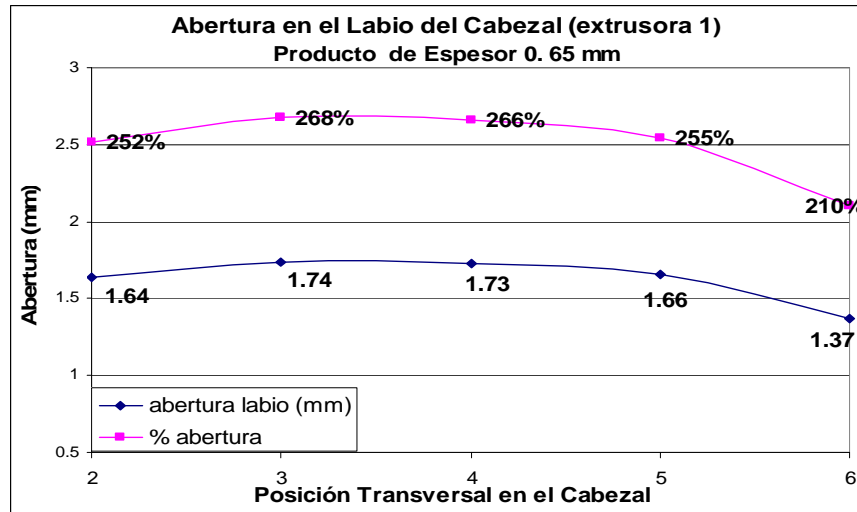


Fig. 7.5 Datos encontrados de perfil de abertura de labio para distintos productos en las extrusoras

Con el personal de planta se revisó la operación normal del cabezal. Fue evidente que en la “extrusora 3” se apretaba más el labio en los lados. El fin era evitar derramar el material en estas posiciones. Al parecer, el sistema de empaques y topes del labio (deckles) no se encontraban en el mejor estado. En la “extrusora 1” se había incorporado unas platinas de metal maleable en los lados del labio que mejoraban el ajuste y evitaban que se cierre demasiado a los extremos. Se pensó en tomar medidas parecidas en la “extrusora 3”.

En cuanto a la **barra restrictora** no se reportó ningún uso de la misma en la operación normal. Ya que la posición es interna, es difícil determinar el perfil de la misma.

7.3 Listado de causas posibles del problema del espesor.

A partir de la teoría, datos de variables de operación y espesor, reunión con el personal de la empresa e información de los operadores se resumieron en un diagrama causa-efecto las siguientes causas probables de la variación del espesor.

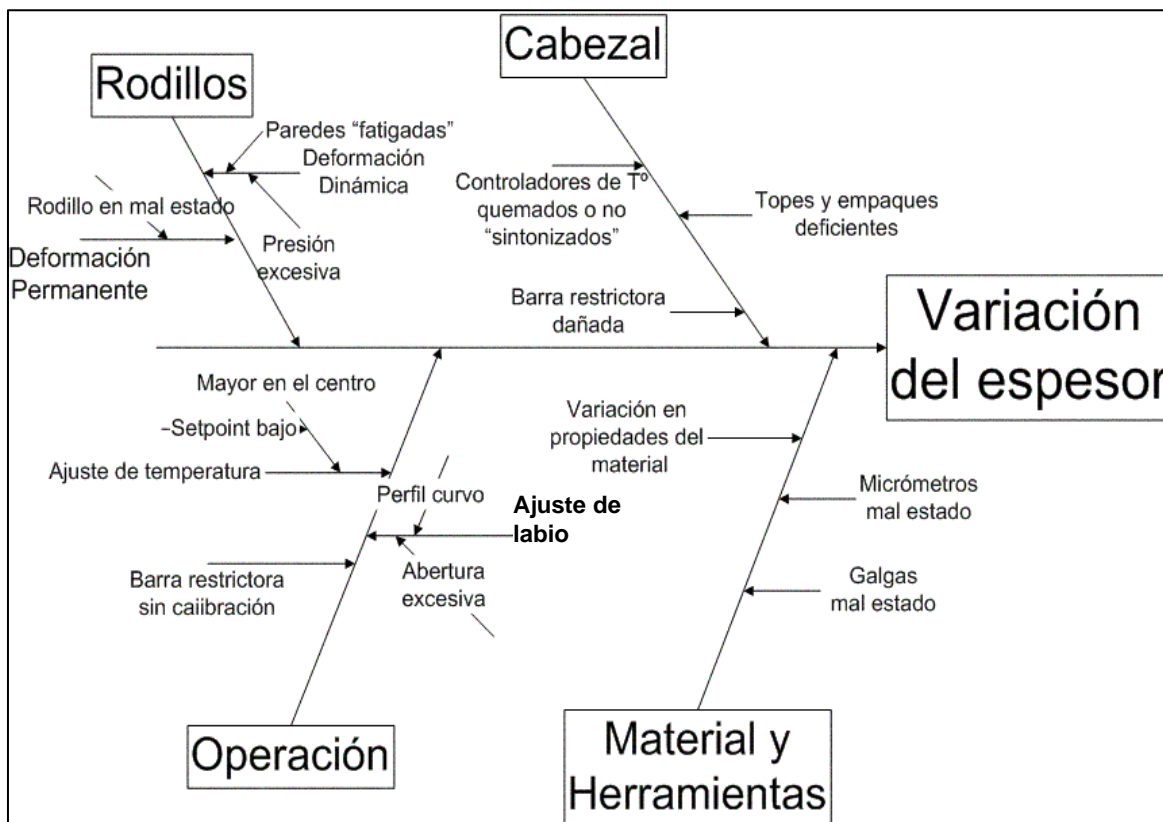


Fig. 7.6 Diagrama Causa-Efecto para el problema en la variación del espesor.

Se tomó en cuenta la teoría de doblado dinámico de rodillos debido a la forma en que varía la lámina. A continuación se presenta el modelado de los datos de la planta según esta teoría importante.

7.3.1 Modelado de la teoría de doblado dinámico de rodillos

La ecuación que se dedujo para la deformación máxima en el centro (y_{max}) es:

$$y_{max} = kv_w l_q^4 (1 + (4.8 l_a / l_q)) (1/h_o - 1/h) ; \quad \text{Donde } k = \frac{5\eta D_w}{38400D^4} \quad [8]$$

La tabla siguiente muestra como se evaluó cada parámetro del modelo a partir de los datos del proceso en la planta

Variable modelo	Se evaluó como..
h_o	Espesor Promedio de Lámina.
v_w	Promedio de la Velocidad de Rodillos para cada Producto (a partir de las hojas de operación de extrusoras)
l_q	Ancho de lámina más un estimado del tamaño de refilo (borde de la lámina que se corta en el proceso después de pasar por los rodillos)
l_a	Medida en el rodillo. (ver fig 4.18)
y_{max}	Rango observado en la lámina
h	2.1mm (máxima abertura encontrada en cabezal)

Tabla 7.2 Evaluación de variables en doblado dinámico

Se grafican los datos de las siguiente manera:

- Rango vs $v_w l_q^4 [1+(4.8 l_a / l_q)] (1/\text{espesor prom})$
- Rango % vs $v_w l_q^4 [1+(4.8 l_a / l_q)] (1/\text{espesor prom})$
- Rango vs $v_w l_q^4 [1+(4.8 l_a / l_q)] (1/\text{espesor prom} - 1/2.1)$
- Rango % vs $v_w l_q^4 [1+(4.8 l_a / l_q)] (1/\text{espesor prom} - 1/2.1)$

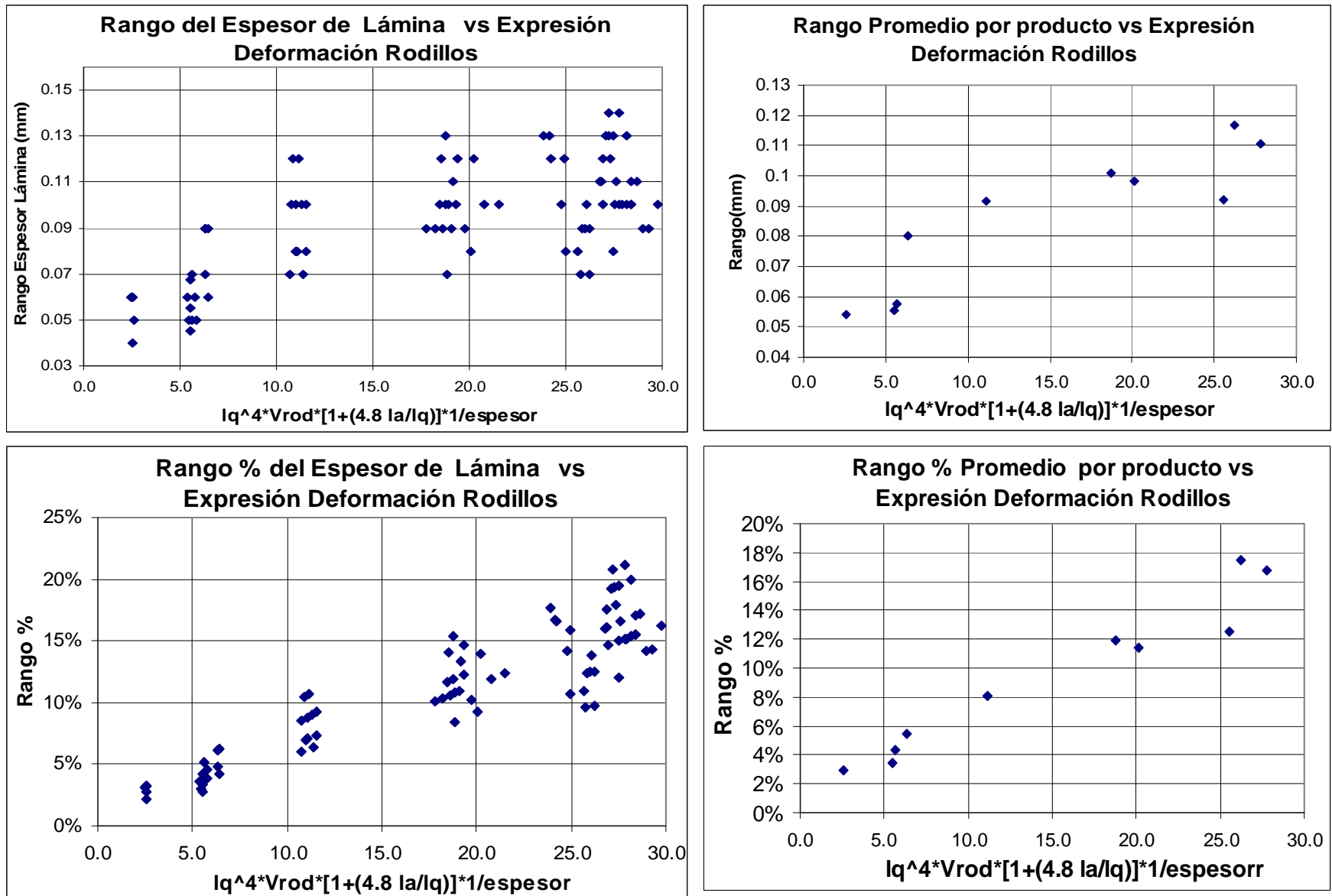


Fig 7.7 Resultados del modelado de la teoría de doblado dinámico (1).

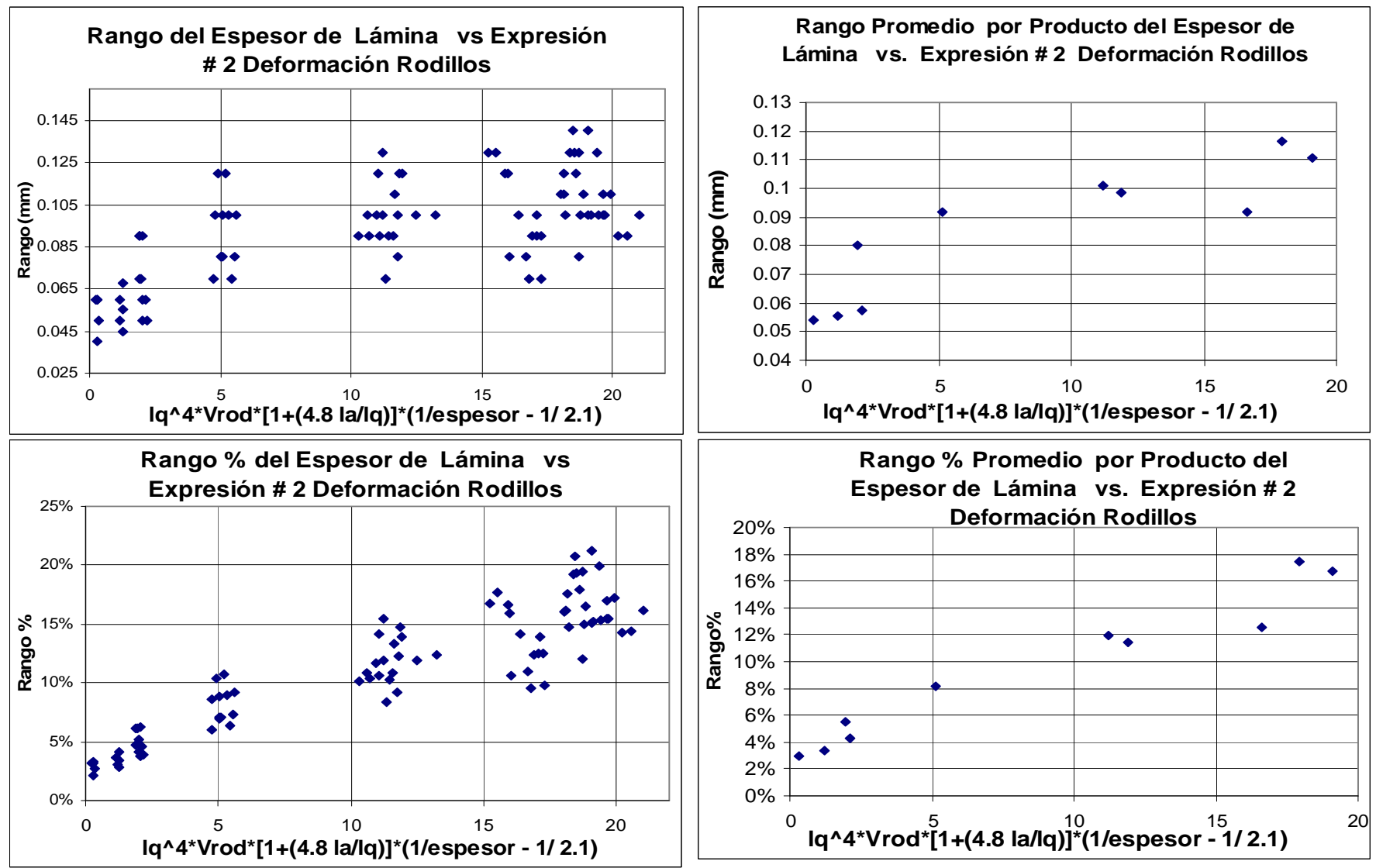


Fig 7.8 Resultados del modelado de la teoría de doblado dinámico (2).

7.3.2 Selección de las causas posibles de la variación de espesor de lámina

Para determinar la causa más importante en la variación de espesor de lámina es necesario seleccionar las causas más probales del listado de causas. Dichas causas escogidas son verificadas posteriormente mediante pruebas en la planta.

Finalmente, se consideraron tres aspectos para determinar las causas más probables.

- El personal de la empresa tenía una fuerte creencia de que los rodillos tienen un defecto permanentemente.
- Existe una evidencia significativa del doblado dinámico de los rodillos. En las figuras 7.8 y 7.9 se puede notar una tendencia que se esperaría según la teoría expuesta.
- La flexión dinámica de los rodillos está relacionado con la operación.

Cabe notar que la teoría de doblado dinámico expuesta representa solo un primer estimado del comportamiento de los rodillos, como se puede notar al no incluir el modelo las variables relacionados con el material de los mismos. Además, no se tomó en cuenta el valor de la viscosidad en cada caso ya que es difícil determinarla, principalmente, por su dependencia de la velocidad de corte aplicado en la zona del remanente.

Otro dato importante que apunta al doblado dinámico es el comportamiento de la lámina para el producto C que viene de la “extrusora 1”. Se debe recordar que para corridas de este producto se divide la lámina por la mitad para tener dos rollos a la vez. Aunque en la mayoría de láminas de la “extrusora 1” no se reportaron perfiles similares al de la “extrusora 3”, en el caso particular de la lámina delgada (0.45 mm) para el producto C el comportamiento es diferente. (Ver fig. 7.9)

Vale la pena mencionar que tanto la “extrusora 1” como la “3” tienen una operación similar en cuanto al tamaño del remanente. Sin embargo, el problema es evidente en la

“máquina 3” lo que sugiere que las condiciones de los rodillos no son iguales en ambas extrusoras. Incluso, podría ser que el doblado dinámico afecte mayormente a los rodillos de la “extrusora 3” debido al estado de las paredes de los mismos. (ver fig 4.17)

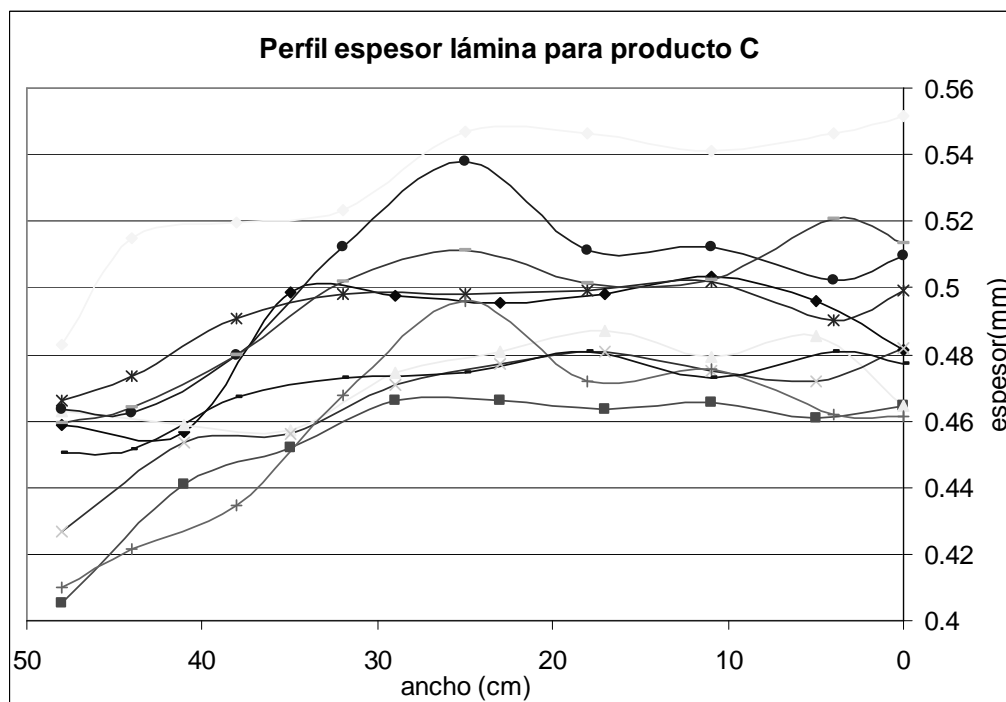


Fig. 7.9 Espesor de lámina para producto C realizado en la “extrs 1.”

7.4 Conclusiones del monitoreo de los aspecto de calidad

- El monitoreo inicial del espesor de lámina de la “extrusora 3” mostró que a mayor grosor de lámina la variabilidad transversal disminuye.
- El monitoreo de las temperaturas de las zonas de cabezal tanto en la “extrusora 1” como la “3” mostraron que en el centro la temperatura real era mayor que los lados debido a que los valores objetivo eran menores a la temperatura de entrada del polímero en cada una de las zonas a excepción de uno de los lados para la “extrusora 3” y en ambos lados para la “extrusora 1”.
- A pesar de que el ajuste de temperaturas en la zonas del cabezal no corresponde al sugerido en la literatura no se puede concluir que sea la causa principal de la

variabilidad transversal en el espesor de la lámina de la “extrusora 3” ya que se efectúa un ajuste similar en la “extrusora 1” que no presenta el problema. Se podría estudiar el impacto de una regulación más uniforme en la “extrusora 3”.

- El monitoreo de labio del cabezal mostró que el movimiento del mismo es restringido en las “extrusoras 1 y 3”, y supera en bastante porcentaje el espesor de lámina final para productos finos.
- El perfil del labio en la “extrusora 3” es un tanto más curvo que en la “extrusora 1” pero no se puede concluir que sea una causa principal del problema en estudio por el ajuste similar en ambas extrusoras. Se debe podría verificar el impacto de una calibración más uniforme y menor abertura.
- El modelado de datos de espesor de lámina para la “extrusora 3” según la teoría de doblado dinámico mostró una tendencia importante que apunta hacia la existencia de dicho fenómeno.
- Del listado de causas posibles se seleccionaron la deformación permanente y flexión dinámica de los rodillos como causas más probables del problema en estudio.
- Los datos de lámina de la “extrusora 1” para el producto C mostró la posible existencia de doblado dinámico en dicha extrusora que no presenta usualmente el problema en estudio
- Es posible que las condiciones de los rodillos en ambas extrusoras no sean iguales y el fenómeno de doblado dinámico afecte en mayor grado a la “extrusora 3”.

Se determinó que las causas más importantes en el problema del espesor de lámina son la operación del cabezal relacionada al doblado dinámico y la condición de los rodillos. A continuación, en la siguiente parte se presenta un estudio de las pruebas posibles para determinar las causas reales, la selección y puesta en marcha de las pruebas, y los resultados encontrados para proponer una solución viable.

Parte III. Control de Calidad del Espesor de

Lámina

En esta parte se estudian las causas posibles elegidas en la variación de lámina para concluir cuáles son las más importantes y proponer una solución. Se presentan las pruebas realizadas para verificar el estado del rodillo asociado a la deformación estática que condujeron a posteriores pruebas en producción sobre la operación del cabezal y cambio en el remanente.

En resumen las causas elegidas para efectuar las pruebas son:

- Deformación en los rodillos
 - Defecto permanente.
 - Doblado dinámico presión excesiva y/o paredes débiles
- Operación en el cabezal: temperaturas y labio no ajustados.

Cabe notar que las causas posibles no son excluyentes sino que puede existir una combinación de todas ellas.

Las pruebas para conocer si existe deformación en los rodillos y verificar la deformación estática de los mismos se trata en el capítulo . Las pruebas relacionadas tanto a la operación en el cabezal como la deformación dinámica son analizadas en el capítulo 9.

En cuanto a la barra restrictora, el personal de la empresa previó que no sería deseable moverla debido a que el técnico de la compañía fabricante no reparó ni sugirió que se efectuaran modificaciones en el perfil de la misma cuando la instaló, además del riesgo de que exista una ruptura de la misma.

Capítulo 8. Pruebas en los rodillos

El estudio en los rodillos implica la proposición de pruebas y la puesta en marcha de las mismas para conocer si los rodillos influyen de manera importante en la variación de la lámina, además, verificar la existencia de deformación en los mismos.

En éste capítulo se presentan dos pruebas efectuadas para verificar :

- La influencia de los rodillos en el espesor de lámina y la deformación de los rodillos.
- La deformación permanente en los rodillos y su magnitud.

8.1 Prueba para verificar la deformación en los rodillos

Una prueba sencilla para comprobar la existencia de deformación en los rodillos es mediante la medición del espesor de una lámina de longitud igual a “ n ” veces la circunferencia del rodillo para identificar si se repite su perfil en sentido máquina con una longitud de onda igual a la circunferencia del rodillo.

Aunque esta prueba permitiría saber la influencia del rodillo en el espesor de lámina no sería concluyente respecto a la deformación estática, ya que, ante una deformación dinámica también se podría tener un mismo perfil de espesor de lámina.

Se detallará la manera en como se efectuaron:

- El muestreo
- Análisis de datos y resultados.

Muestreo. El diámetro de los rodillos corresponde a 21” y su circunferencia, por tanto, es de 167.6 cm. Se muestreó una lámina de la “extrusora 3” para el producto “A” bajo condiciones normales de operación de una longitud de 7 m que corresponde a más de 4 veces la circunferencia de los rodillos.

Las mediciones se realizaron en sentido máquina (longitudinal) cada 7 cm (aprox 24 divisiones por circunferencia) y en sentido transversal cada 6 cm. Se marcó la lámina en estas posiciones y se efectuaron los cortes en sentido transversal para poder medirla empleando micrómetro.

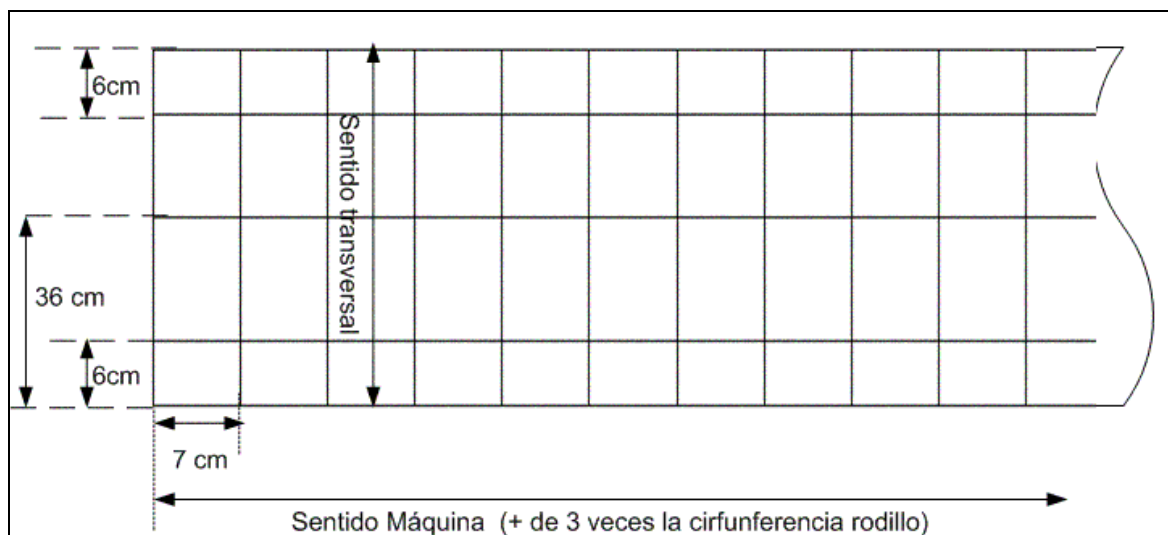


Fig 8.1 Divisiones realizadas para la medición de lámina como prueba de deformación de rodillos

En total se efectuaron 100 divisiones en sentido máquina y 11 en sentido transversal. Para efectos prácticos se analizaron datos en los extremos, a 6 cm de los bordes; y el centro, a 36 cm del borde.

Análisis de datos y resultado. Se graficaron los datos en sentido máquina de los extremos y el centro. Para ver si existe una frecuencia de longitud de onda igual a la circunferencia del rodillo en los datos de espesor encontrados, se empleó promedios móviles que permiten reconocer visualmente la tendencia de los datos a lo largo de la lámina. (Ver fig. 8.2 a 8.6)

Por este método se pudo reconocer fácilmente la periodicidad de la variación del espesor de la lámina en sentido máquina en correspondencia con la circunferencia de los

rodillos tanto a 6 cm de los bordes como en el centro. En los extremos dicha periodicidad es más notoria que en el centro.

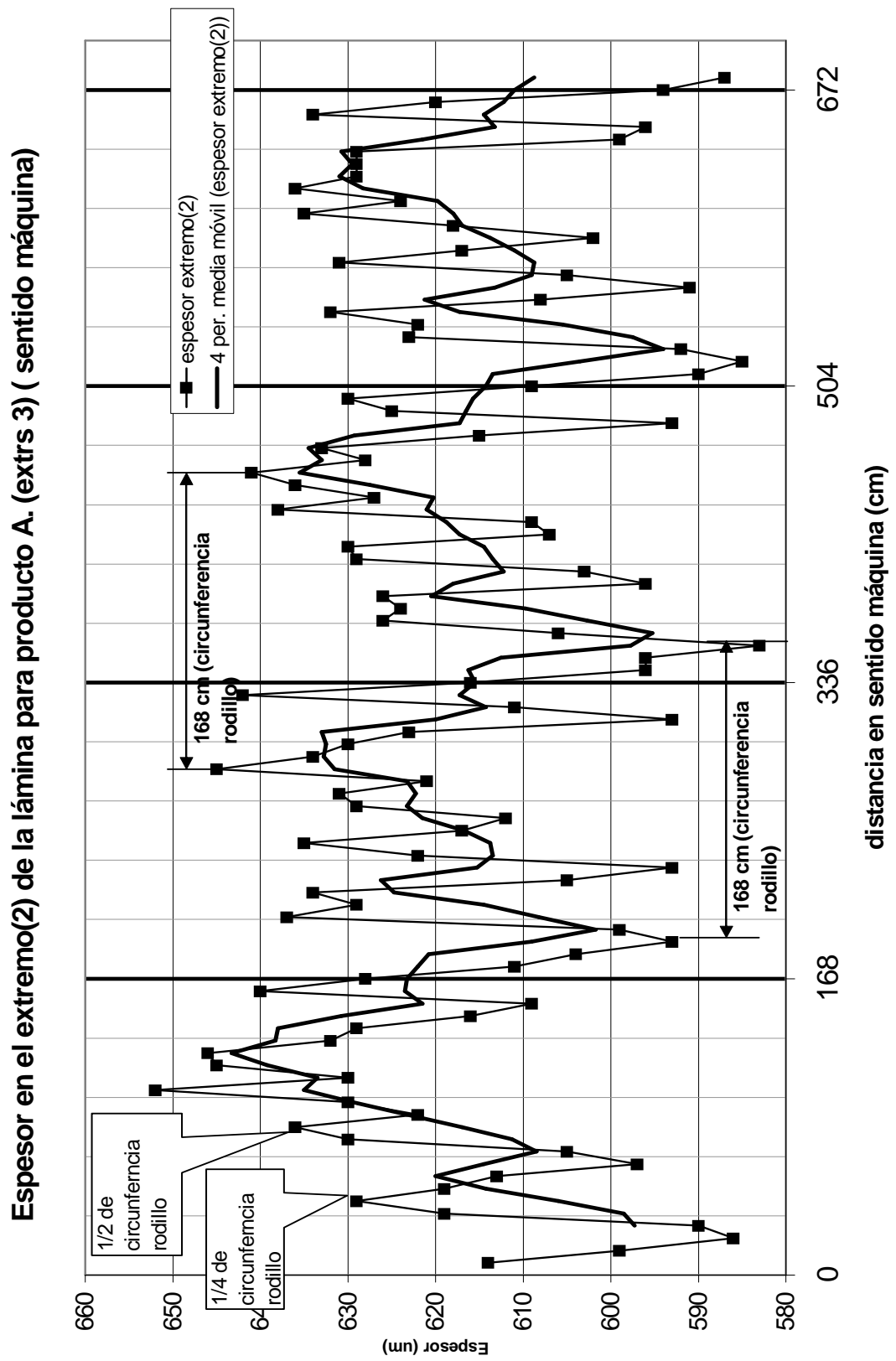


Fig 8.2 Espesor de la lámina en sentido máquina para extremo (2) (“extrs3”)

Espesor en el extremo(1) de la lámina para producto A. (extr3) (sentido máquina)

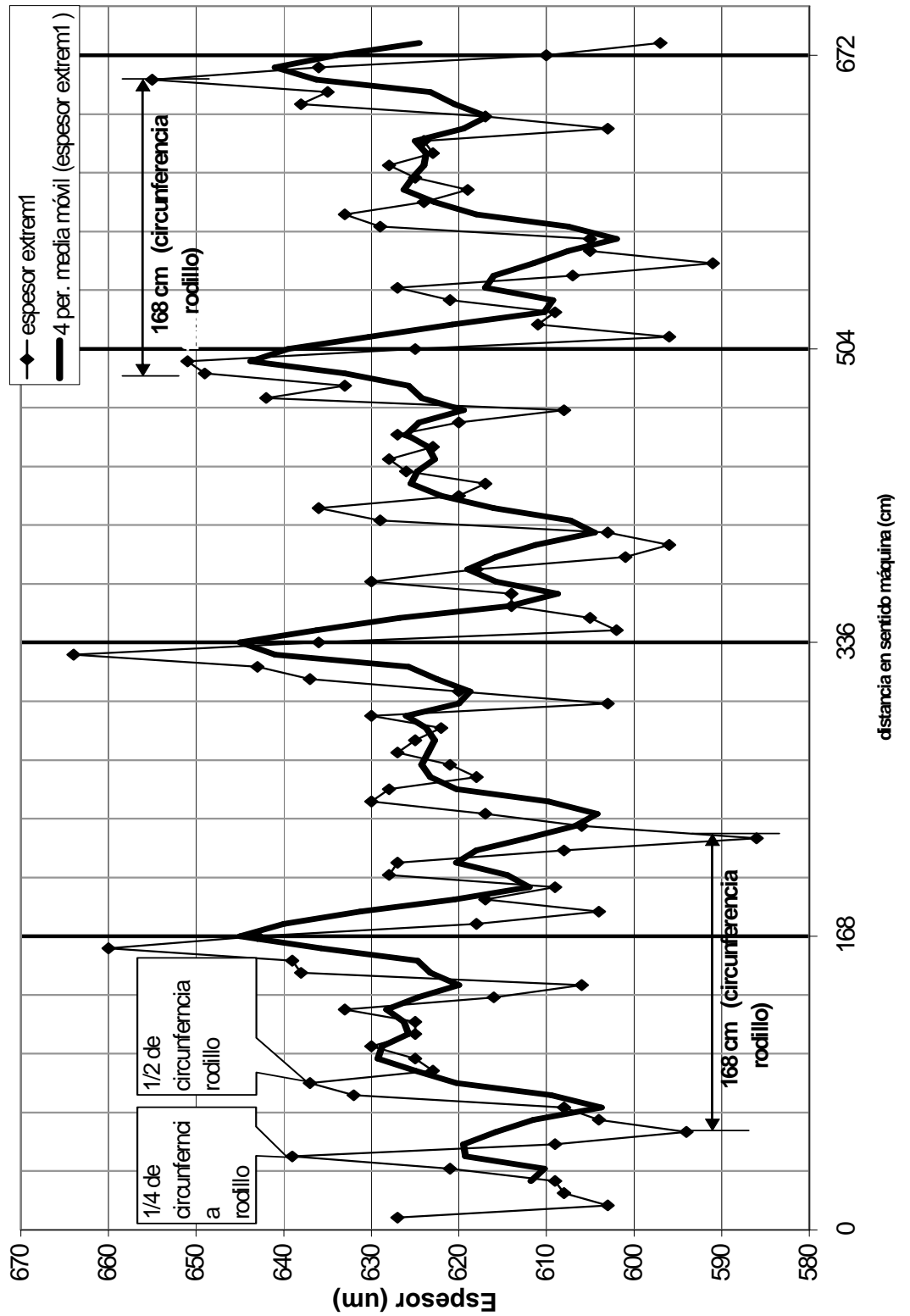


Fig 8.3 Espesor de la lámina en sentido máquina para extremo (1) (“extr3”)

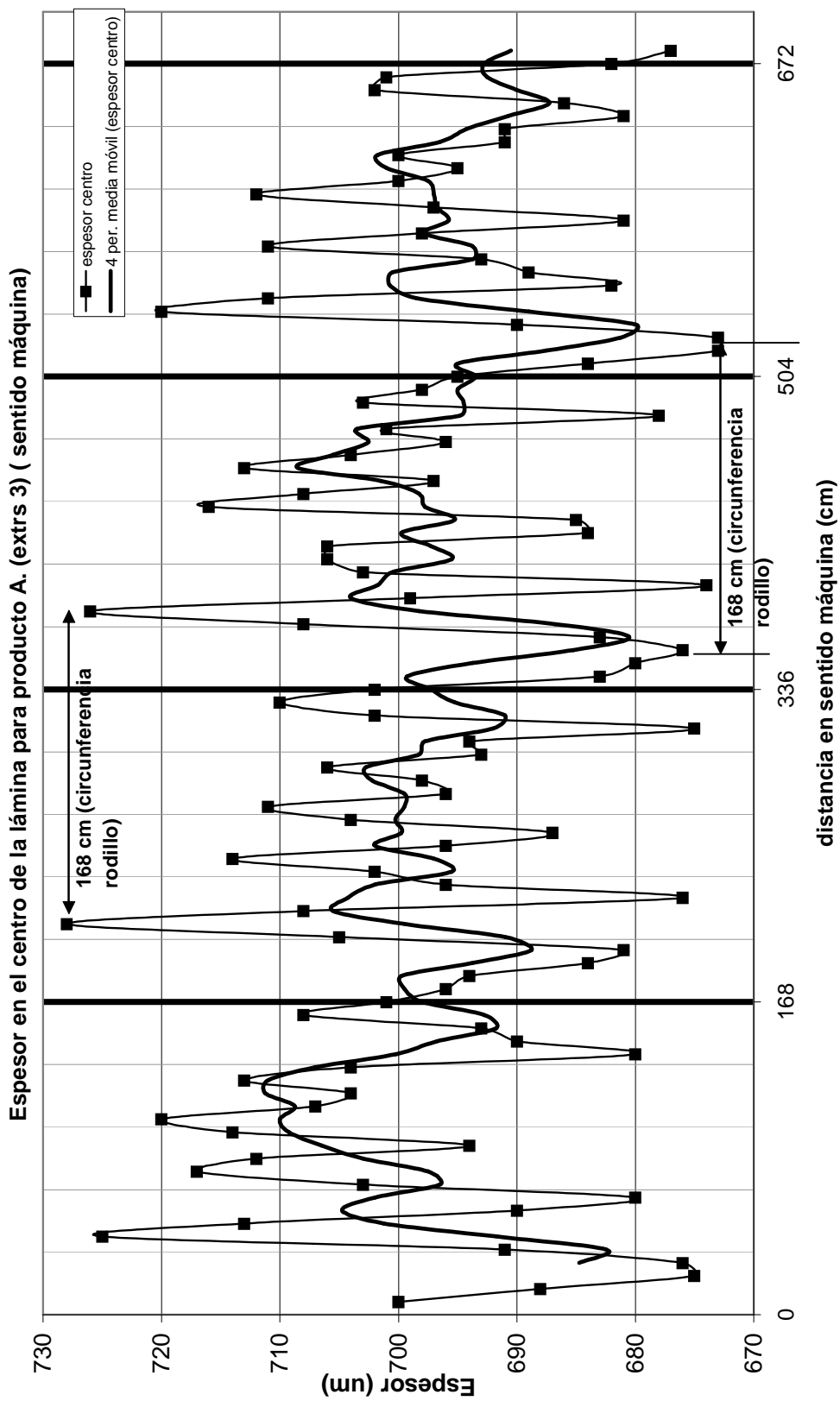


Fig 8 4 Espesor de la lámina de producto A en sentido máquina para el centro (“extrs
3”).

Comportamiento espesor de lámina para producto A en sentido máquina (um) (extrs 3)

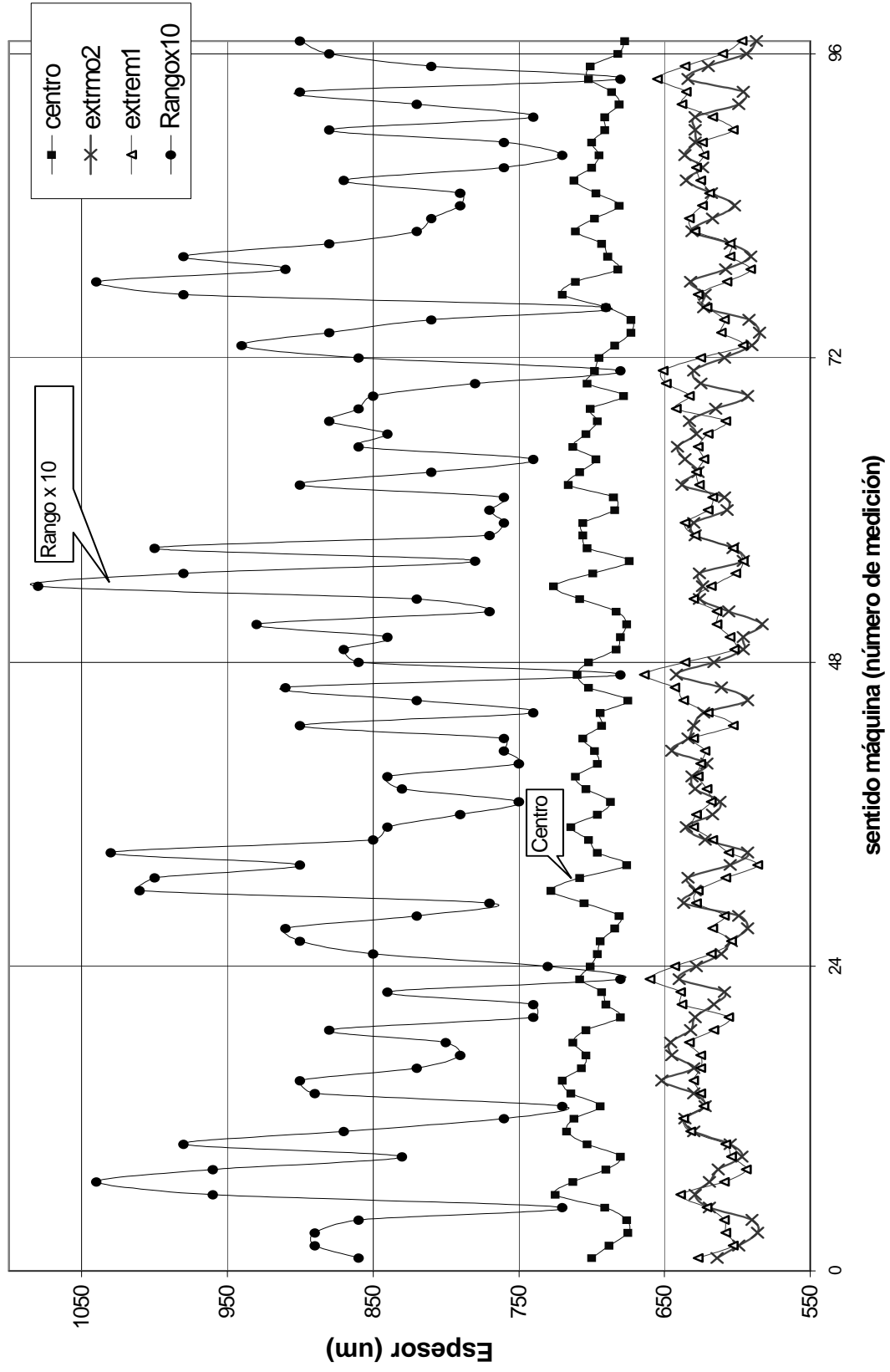


Fig. 8.5 Comportamiento del espesor de la lámina y el rango transversal para producto
A en sentido máquina (“extrusora 3”)

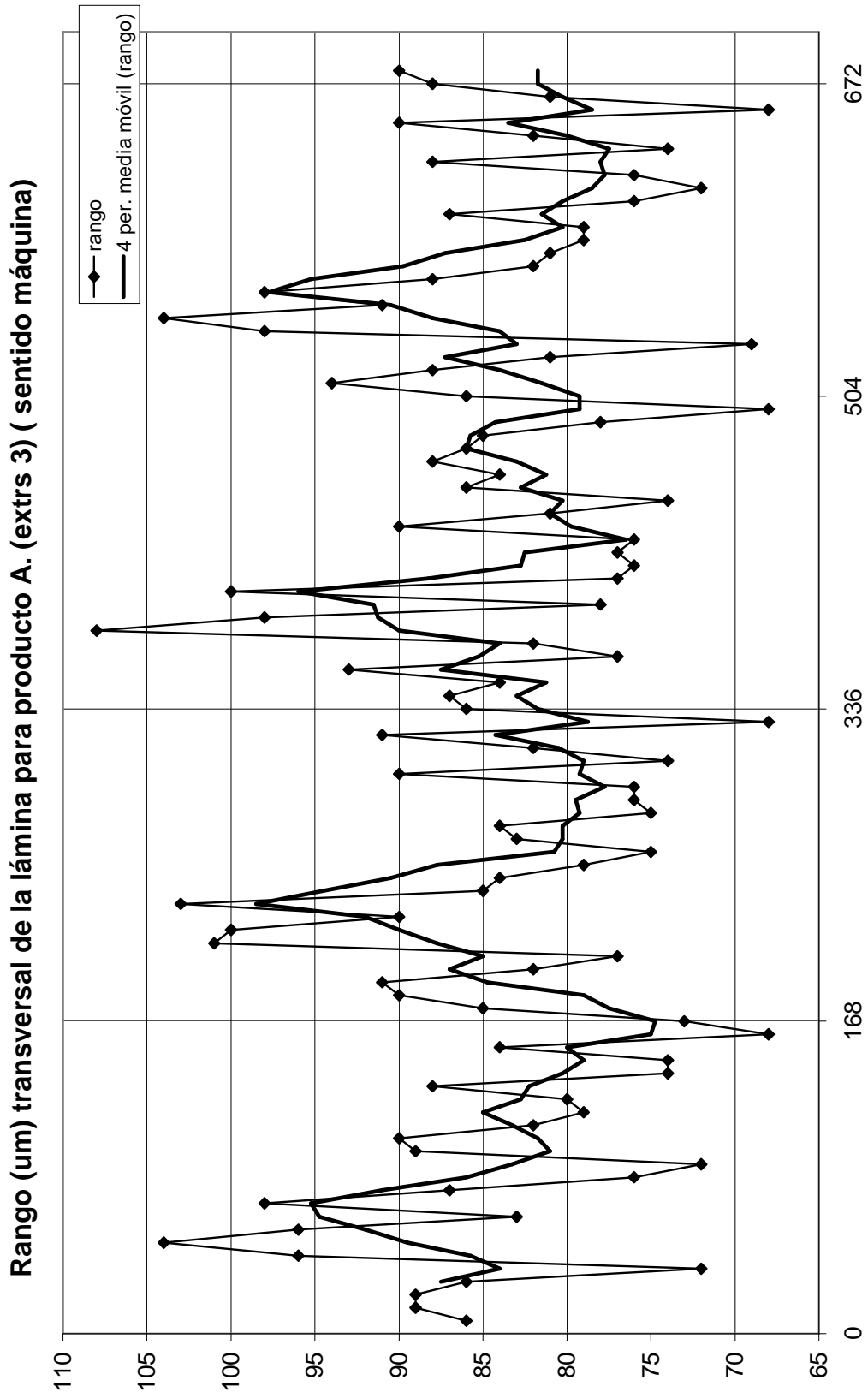


Fig 8.6 Variación en sentido máquina del rango transversal en la lámina de producto A (“extrs 3”).

Entre los indicadores que se calcularon se tiene:

- Rangos transversales a lo largo de la lámina . Son los graficados en la figs 8.5 y 8.6
- Rangos en sentido máquina por posición transversal , es decir, los rangos de variación longitudinal en el centro y los extremos.

Rangos transversales. Corresponden a la magnitud de la variación transversal en el espesor de la lámina que repercute en el perfil del peso revisado (curvo mayor en el centro). Los datos muestran que el espesor en el centro siempre es mayor que los extremos pero la variación no es constante en sentido máquina. Existe un desfase entre los valores máximos de los extremos y el centro. En los puntos mínimos del rango transversal los extremos tienen un valor alto y en el centro un valor intermedio.

Para ver si existe alguna relación entre el rango transversal y el espesor en los extremos se efectuó un gráfico de dispersión que muestran cierta tendencia.

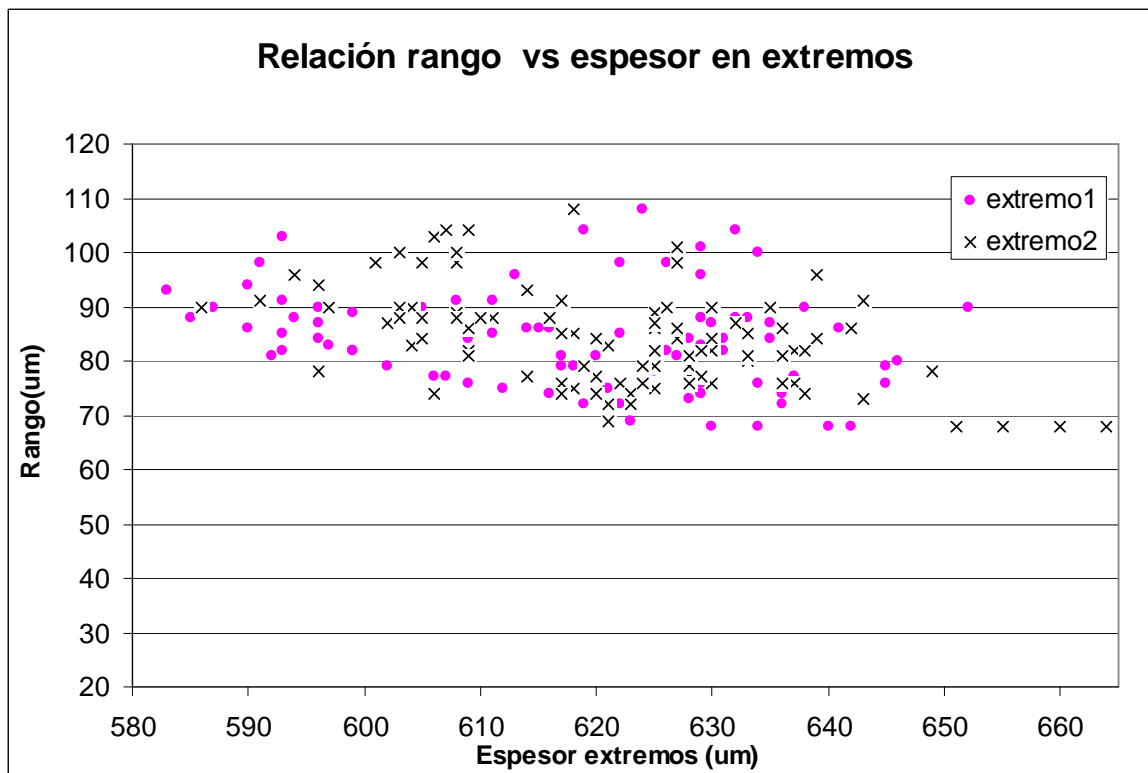


Fig 8.7 Relación entre rango transversal y espesor de los extremos para la prueba de lámina de varias veces la circunferencia de los rodillos (“extrs 3”)

Rangos en sentido máquina. Por posición transversal fueron de 78 μm y 69 μm en los extremos , y de 55 μm en el centro. Esto que indica que la mayor variación en sentido máquina está en los extremos y , especialmente en uno de éstos. (Ver Anexo7)

Se realizó una prueba similar en la “extrusora 1” (Ver Anexo 8). La variación del espesor de la lámina en sentido de la máquina sigue la misma correspondencia con la circunferencia de los rodillos pero de una manera más clara.

Un diagrama de dispersión entre el espesor de las distintas posiciones transversales con el rango transversal presentó que no existe ninguna relación entre estas variables como se pudo evidenciar en la “extrusora 3”.

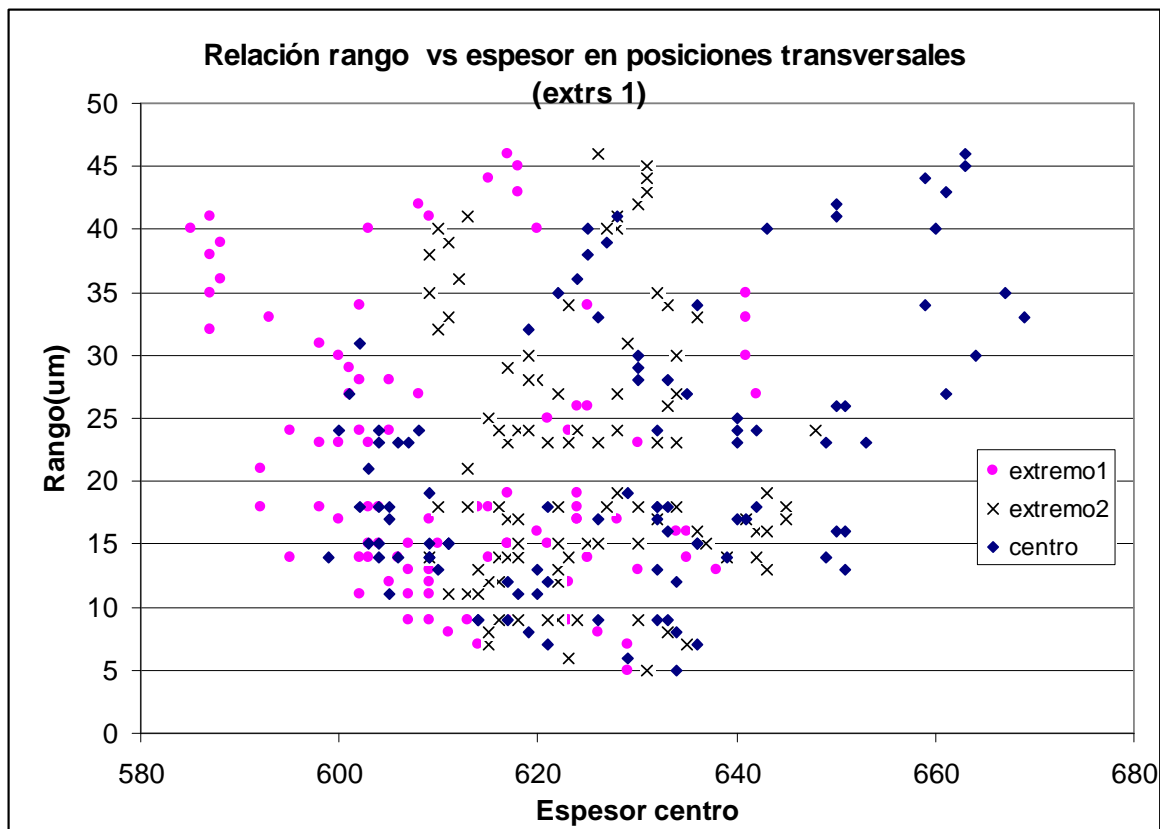


Fig 8.8. Relación entre rango transversal y espesor de los extremos y centro para la prueba de lámina de varias veces la circunferencia de los rodillos (“extrs 1”)

Esta prueba muestra que :

- Por la periodicidad en la variación de la lámina en sentido máquina con la circunferencia de los rodillos se concluye que los rodillos influyen de manera decisiva en el espesor final de la lámina .
- La deformación de los rodillos son una causa principal del problema del espesor transversal de lámina en la “extrusora 3”, pero no se establece todavía el tipo de deformación
- Por el tipo de variación del espesor en sentido máquina es posible que exista movimiento en los rodillos (balanceo) por un algún problema en las sujeciones o ejes de los rodillos. (por ejemplo: rodamientos desgastados).

No se ha determinado el tipo de deformación que presentan los rodillos. Se presenta a continuación una prueba para verificar si existe deformación permanente o estática en los rodillo y su magnitud.

8.2 Prueba para determinar la deformación permanente en los rodillos.

Para conocer si existe deformación permanente o estática se debe establecer el perfil de la superficie de los rodillos sin operar, principalmente de los rodillos de presión, (primeros que entran en contacto con la lámina) . Ya que se desea detectar variaciones de centésimas de milímetro, se presentó el reto de precisar una prueba fiable que permita conocer el perfil de la superficie de los rodillos.

Se efectuó una primera prueba sencilla de tipo cualitativa. Se cerró la abertura entre los rodillos de presión lo mayor posible de tal modo que puedan estar en contacto. Se pasó luz a través de los rodillos para conocer el tipo de abertura existente entre los mismos. Dicha luz permitió notar que no era uniforme el defecto. A veces pasaba más luz en el centro otras veces no. Dicha prueba no fue concluyente respecto al defecto esperado en el rodillo. Se revisarán las opciones encontradas para la prueba.

8.2.1 Planteamiento de pruebas para verificar la deformación permanente de los rodillos y su selección.

Las opciones para medir el defecto de los rodillos que se plantearon fueron:

- Verificar en un torno la deformación individual de los rodillos.
- Emplear una regla rígida de tolerancia mínima de ± 0.005 mm (llamada “escuadra de pelo”) para colocarla sobre la superficie del rodillo y medir el defecto con galgas (calibrador de láminas) de precisión de 0.01 mm.

- Empleo de reloj comparador de precisión de 0.01 mm con una guía que permita el recorrido del equipo paralelo al eje del rodillo. (Ver fig. 8.9)

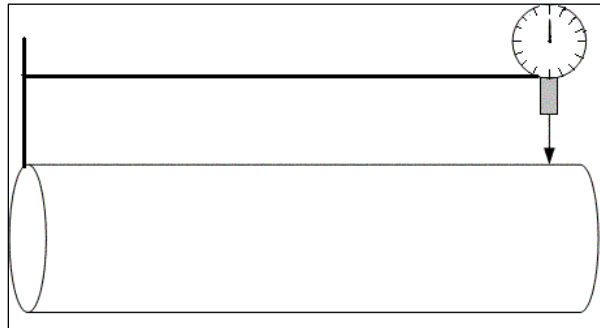


Fig. 8.9 Reloj comparador con guía.

- Utilización de Plastigage (plástico empleado para mediar las tolerancias en la rectificación de partes de motores).

Medición en un torno. Tiene una excelente precisión y permite conocer el defecto individual de cada rodillo para luego estimar el espacio entre éstos. Sin embargo, se tendría que desmontar los rodillos del equipo y llevarlos a un torno de precisión menor a 0.01 mm. Tanto el desmontaje de los rodillos como el transporte es de alto riesgo. Los rodillos son de un peso considerable y su superficie requiere cuidado especial. Por tal motivo, esta alternativa no resulta atractiva.

Regla rígida (Escuadra de pelo). El costo de la manufactura oscilaba entre 200\$ a 300\$. Tendría que ser de las dimensiones apropiadas para que no se doble mientras se efectúan las mediciones. Para medir sería necesario comprar un nuevo calibrador de láminas con la precisión requerida. Se consultó a los proveedores por la apreciación de la galga más fina y fue de 0.02 mm. El costo de esta herramienta sería de alrededor de 50 \$. Para una medida correcta se requiere que se coloque la regla lo más paralelo posible al eje del rodillo y asentarla sobre las mayores elevaciones de la superficie efectiva del rodillo (teóricamente cerca de los lados) para que sirva de nivel de referencia. Este método se debe aplicar para cada rodillo y estimar el espacio entre los mismo a partir del defecto

individual o en partes estimadas de contacto entre rodillos y sumar los defectos individuales.

Prueba con reloj comparador. Es de la precisión deseada siempre y cuando exista una guía con tolerancia mínima. Lastimosamente, la fabricación de la guía se consideró complicada para los requerimientos de la prueba.

Prueba con plastigage. Plastigage es un filamento de un material muy dúctil que permite medir la distancia entre dos superficies de metal que se las pueda alejar y acercar nuevamente a la distancia en que se acoplan. La distancia entre las dos superficies depende de la deformación que presenta el material cuando las dos superficies se acercan. La medida de deformación necesaria para hallar la distancia entre las dos superficies es el ancho final del filamento que se puede medir con un calibrador. La precisión de la prueba entonces depende de la precisión del calibrador. En la planta se dispone de un calibrador digital que aprecia desde 0.01 mm. El costo del material para la prueba se estima de 40 \$ y las herramientas para la prueba se encuentran disponibles en la planta.

La prueba con plastigage mostraría el defecto *entre* los dos rodillos que en primera instancia es lo que se requiere para compararla con la variación en el espesor observado. Tanto por disponibilidad de herramientas, costos, tiempo requerido y precisión se aprobó efectuar esta prueba.

A continuación se presentan una explicación más detallada de las pruebas con plastigage

8.2.2 Prueba con Plastigage.

Procedimiento general y funcionamiento del material: Se puede considerar que el filamento del material tiene dos medidas iniciales “Ho” y “ao” (Fig. 8.10). Primero, las superficies están alejadas y el material sin deformación se coloca sobre una de la superficies. Luego, se acercan las dos superficies a la distancia de acople normal y después

se alejan nuevamente para tomar la medida respectiva. El material es esparcido entre las dos superficies y el “ancho” del filamento aumenta mientras que la “altura” disminuye. Se toma la medida del ancho final. (“ af ”)

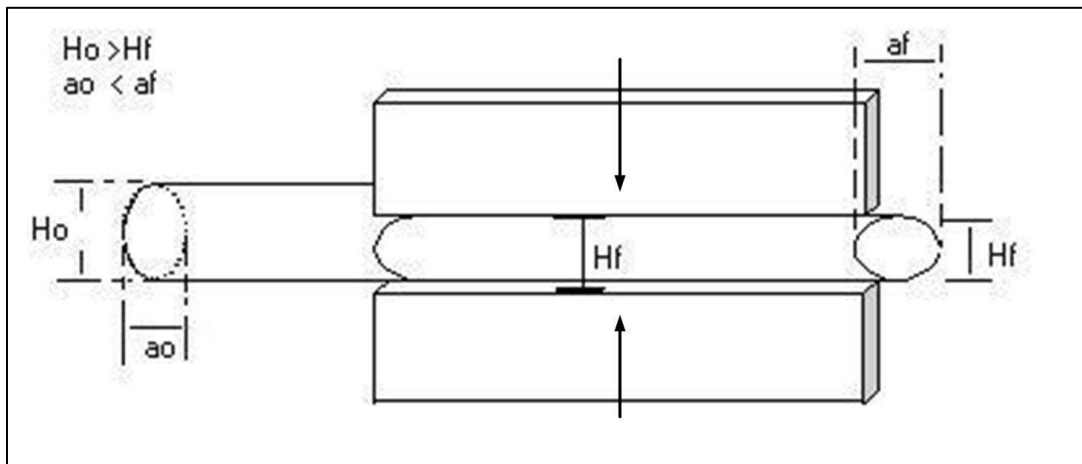


Fig. 8.10 Procedimiento con Plastigage para determinar espacio entre superficies

En el empaque de plastigage vienen marcados distintos anchos de filamento en los que se indican las medidas correspondientes de espacio entre superficies que han sido establecidas por el fabricante (Ver Fig 8.11 y 8.12). El procedimiento regular es comparar el ancho del material final con los anchos de banda dados en el empaque para conocer entre que valores estaría el espacio entre superficies.

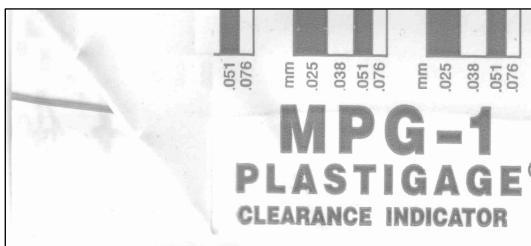


Fig. 8.11 Empaque de plastigage y el filamento de comparación

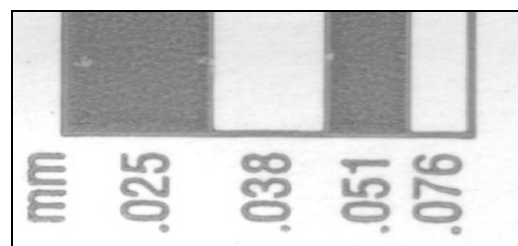


Fig 8.12 Plastigage e indicador

Mediante este procedimiento no se tendría mucha precisión en la medida. Por tanto, se investigó la relación existente entre ancho de filamento con el espacio entre superficies a partir de los datos del fabricante. Los datos muestran que a un mayor ancho de filamento el espacio entre superficies es menor. Esto es lo que se esperaría por la metodología que se sigue con el material. Empleando micrómetro se tomaron las medidas de los anchos de filamento (af) dados por el fabricante (fig 8.12). Se verificó si existe una relación inversa proporcional entre Hf y af graficando las dos variables Hf vs. $1/af$. (Verf Fig. 8.13)

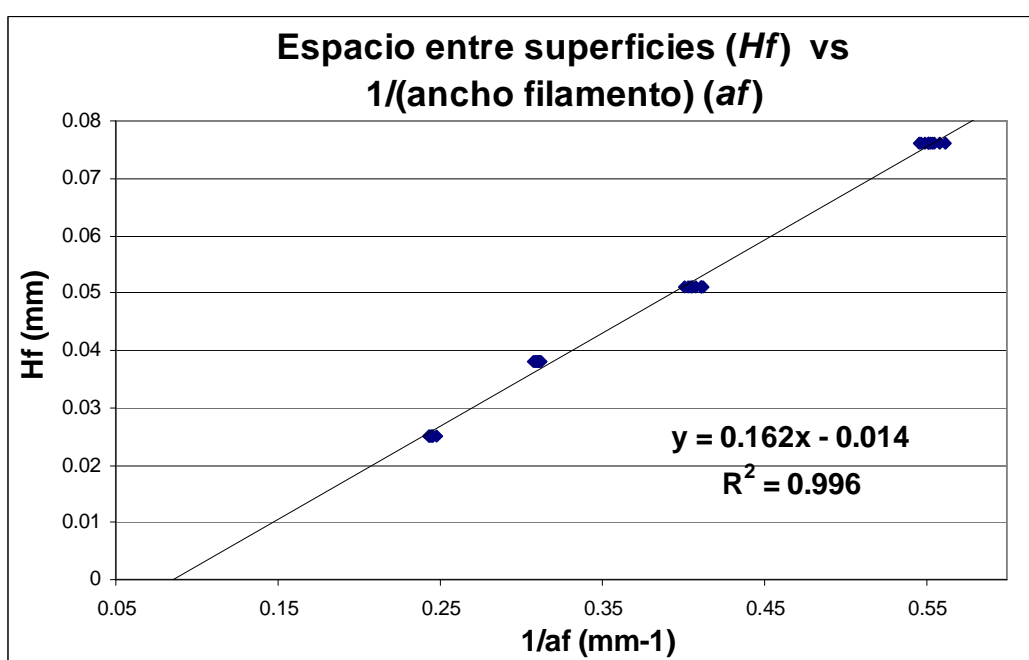


Fig. 8.13 Relación para Plastigage. Espacio entre Superficies vs. Ancho de filamento.

Al parecer se considera que el área transversal del filamento es constante y sigue la relación del área de una elipse en el que:

$$A = \frac{Dd\pi}{4} = \frac{af * Hf * \pi}{4} \therefore af = \frac{4A}{\pi} \frac{1}{Hf} = k \frac{1}{Hf}$$

Donde A = área de la elipse; D=diámetro mayor de la elipse; d=diámetro menor de la elipse.

De este modo, es posible emplear la relación encontrada en la fig 8.13 para determinar el espacio entre superficies para cualquier ancho de filamento según lo permita el material.

Por tanto, basta tener un instrumento de la precisión requerida que mida el ancho final del filamento. Plastigage es un producto que viene en tres tipos: verde, rojo y azul. Se planificó trabajar con el verde y rojo que miden una separación de superficies para los rangos en los que se estima que estaría el defecto los rodillos.

Metodología empleada: Se planificó realizar las mediciones en ochos secciones de la superficie del rodillo (seccionado a $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ, 360^\circ$ de la circunferencia del rodillo). En posición transversal cada sección se dividió en 9 puntos: uno en el centro y cuatro a cada lado del centro (fig. 8.14) Se marcó el rodillo en cada uno de los puntos mencionados. Las mediciones se efectuaron en la superficie efectiva del rodillos ya que cerca de los bordes no se pasa ninguna lámina.

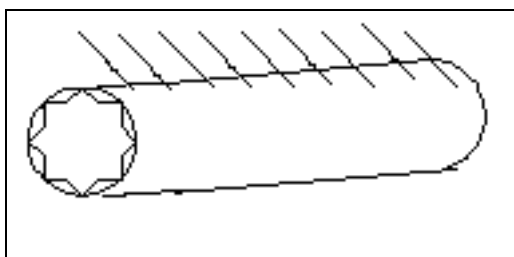


Fig 8.14. Posiciones en los rodillos para la prueba con plastigage

En la prueba, se prefijó la abertura de los rodillos a una distancia pequeña. Los 9 filamentos de plastigage se ubicaron en la primera posición (0° ó 360°) con los rodillos abiertos. Después se cerraron los rodillos con plastigage y se abrieron para tomar las medidas del ancho final de los filamentos en cada división empleando el calibrador digital. Se repitió el proceso para las 7 secciones restantes. La prueba se llevó a cabo sin dificultades

Resultados obtenidos: Para estimar la abertura de los rodillos en cada punto transversal de las 8 secciones, se emplea la relación encontrada de la figura 8.13. Se graficaron la Abertura de los Rodillos vs. la Posición Transversal en cada Sección y la Diferencia de la

Abertura de los Rodillos con el Valor Mínimo en Cada Sección vs. la Posición Transversal en cada Sección.(Ver Fig. 8.15 y 8.16). Las conclusiones fueron:

- Sí existe un defecto permanente en los rodillos pero no es comparable con el esperado. Los rangos observados son bastante menores a los presentados por los distintos productos. El rango máximo fue de 0.036 mm.
- Existe un defecto persistente en los rodillos de la extrusora 3 pero mayor hacia la izquierda del centro de los rodillos (según el sentido de la alimentación). Cabe señalar que en uno de los lados de la lámina de longitud mayor a 4 veces la longitud del rodillo la variabilidad fue mayor (ver Fig. 8.19)
- El defecto permanente de magnitud variable alrededor de los rodillos de la “extrusora tres” no corresponde totalmente al problema de la variabilidad de espesor en la lámina identificado.

Se efectuó el mismo procedimiento con los rodillos de la “extrusora 1” para comparación. Los resultados en la “extrusora 1” muestran un perfil diferente a la de la “extrusora 3”. Se notó cierto defecto en éstos rodillos de magnitud comparable en la 3 pero no es tan persistente como en ésta última.

Fig. 8.16 Diferencia de espacio entre rodillos respecto al mínimo por sección. Prueba
Plastigage

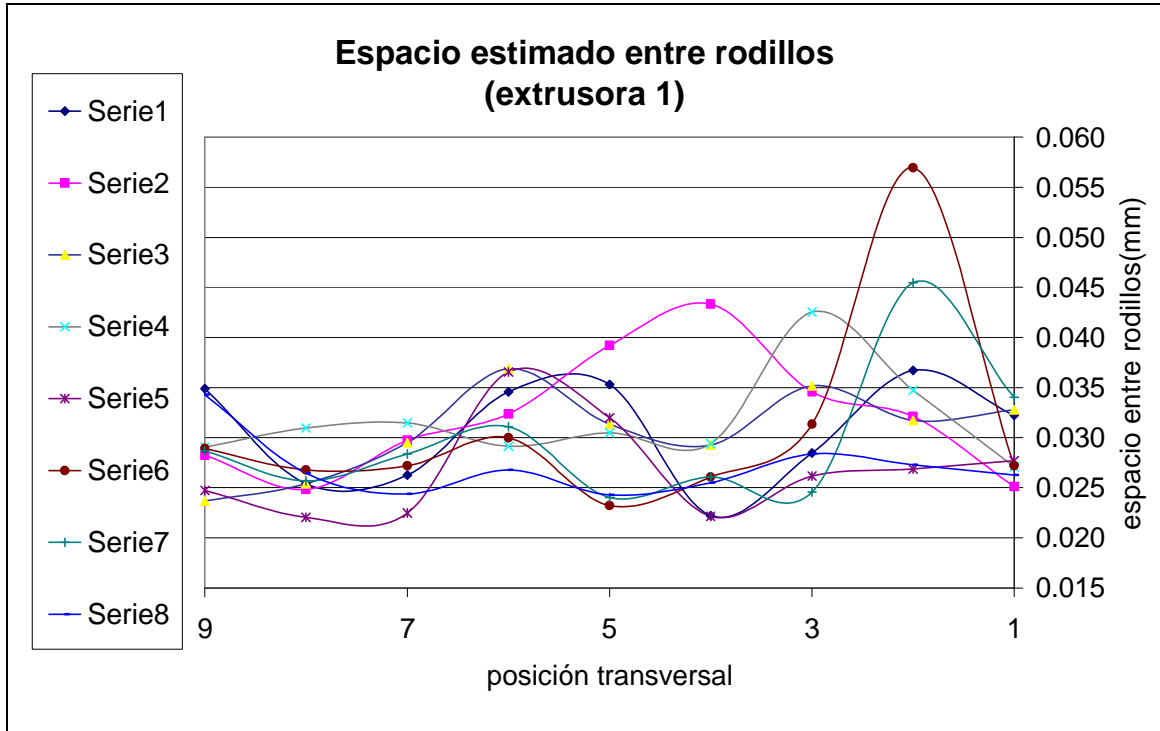


Fig. 8.17 Espacio entre rodillos para la extrusora 1. Prueba Plastigage.

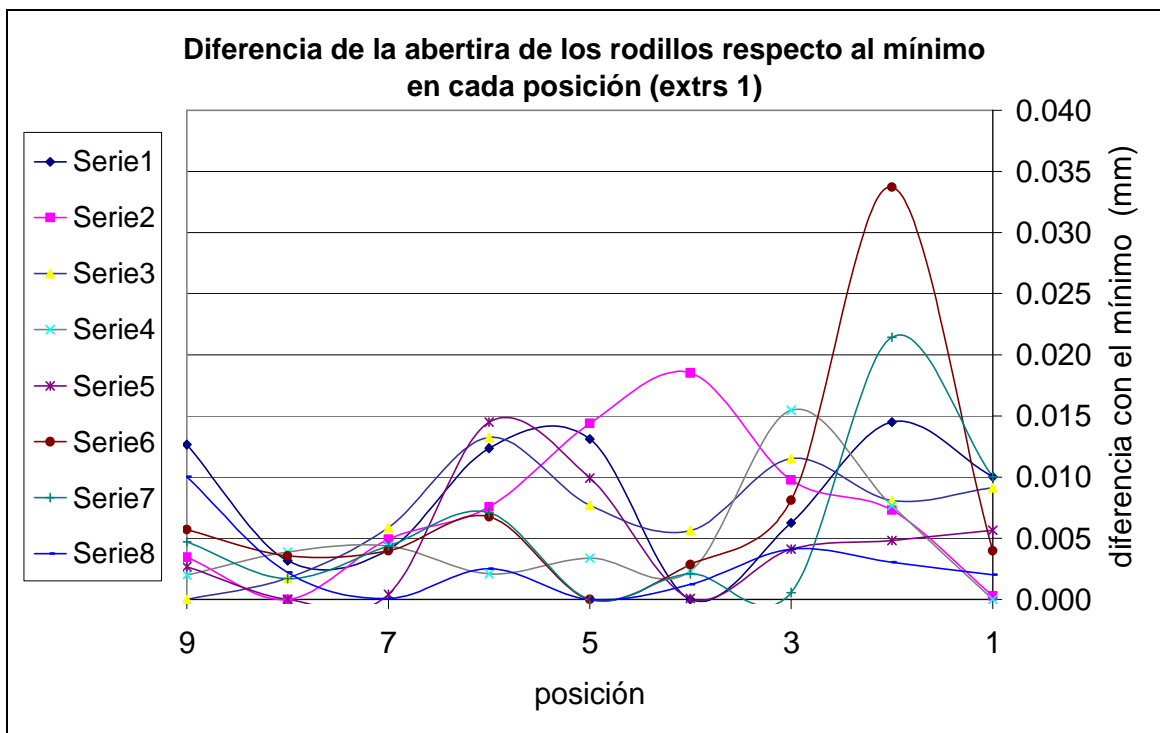


Fig. 8.18 Diferencia de espacio entre rodillos respecto al mínimo por sección. Prueba Plastigage.

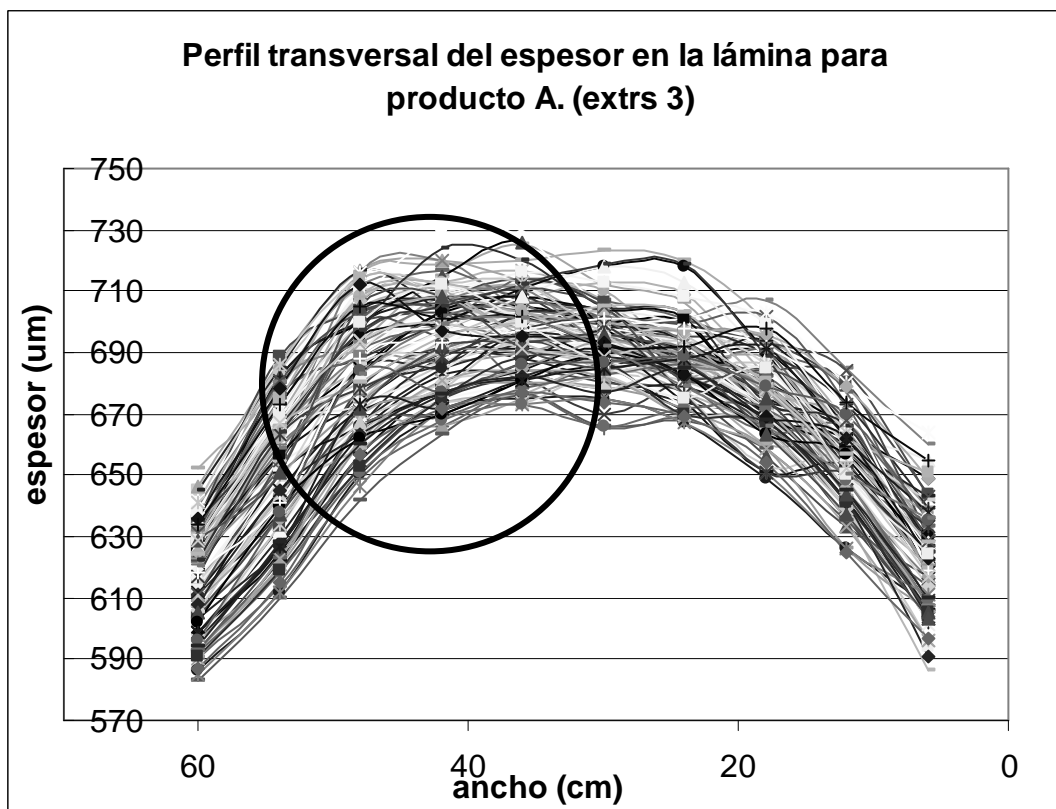


Fig. 8.19 Perfil del espesor transversal en la lámina para producto A que muestra mayor variabilidad en el lado centro- izquierda

8.3 Conclusiones de las pruebas en los rodillos

- La medición de una lámina de longitud de 4 veces la circunferencia de los rodillos mostró que los rodillos influyen de manera decisiva en el espesor final de lámina ya que la variación en sentido máquina se repite periódicamente según la circunferencia de los rodillos.

- Debido a la manera en como se presenta la variación del espesor en sentido máquina es posible que exista movimiento en los rodillos (balanceo) por un algún problema en las sujeciones o ejes de los rodillos. (por ejemplo: rodamientos desgastados).
- La prueba con plastigage mostró ser la mejor alternativa para determinar la deformación permanente de los rodillos debido a precisión, disponibilidad de herramientas, procedimiento y costos.
- Se determinó que sí existe una deformación permanente de los rodillos que tiende a ser mayor desde el centro hacia un lado del rodillo pero que no corresponde a toda la variación transversal en el espesor de lámina registrado.

Por tal motivo, se procedió a realizar algunas pruebas según la teoría de doblado dinámico para confirmar dicha teoría y proponer una solución que se describe en el capítulo siguiente.

Capítulo 9: Pruebas en el Cabezal y de Flexión en Rodillos.

Mediante estas pruebas se pretende verificar la teoría de doblado dinámico de rodillos y el efecto en el espesor de lámina de las variables de temperatura y porcentaje de abertura de labio en el cabezal.

Las pruebas se efectuaron en producción y se verificaron simultáneamente los dos puntos. Se establecieron las variables que serán movidas a partir de estos objetivos.

Análisis de variables en la teoría de doblado dinámico. El doblado dinámico principalmente depende de la presión que se aplique sobre los rodillos. La expresión final a la que se llegó por la teoría fue la siguiente:

$$y_{\max} = kv_w l_q^4 (1 + (4.8l_a / l_q)) (1/h_o - 1/h) ; \quad \text{Donde } k = \frac{5\eta D_w}{38400D^4} \quad (8)$$

Los parámetros l_a y l_q se pueden considerar constantes en cada producto ya que dependen del ancho de la lámina (especificación). La velocidad de los rodillos influye en la tasa de producción y es un parámetro que difícilmente se lo podría mover en producción ya que está establecido para cada producto. La variable h_o es fija por ser prácticamente el espesor de lámina. En el parámetro k todas las variables son constantes excepto la viscosidad que depende de la temperatura aplicada y de la velocidad de corte o cizalla. La variable “ h ” depende directamente del tamaño del remanente en los rodillos y está relacionado con la calibración en el cabezal.

Las pruebas se realizarían, principalmente, sobre el tamaño y la forma del remanente (h) Ya que se desea una menor presión en los rodillos y, especialmente en la parte central del rodillo, se estudió el efecto de la forma y tamaño del remanente en la variabilidad

transversal de la lámina y el peso. También se efectuaron algunas pruebas variando la magnitud de la abertura de labio y las zonas de temperatura.

9.1 Procedimiento de las pruebas en producción

El seguimiento de las pruebas se lo efectuó en la lámina para el producto A. Cada prueba se realizó para un rollo o lote de producción continuo (3 ½ a 4 hrs de producción)

9.1.1 Ajustes de variables.

Se procedió a efectuar ajustes en:

- Labio del cabezal.
- Zonas de temperatura del cabezal.

Ajustes en el labio del cabezal. En las pruebas que se calibró el porcentaje de abertura del labio del cabezal, antes de producir se preestableció la abertura del labio mediante calibrador de láminas. Una vez que se inició la operación, se efectuaron pequeños ajustes en el labio para obtener el perfil deseado en el remanente.

Ajustes en la zonas de temperatura del cabezal. En las pruebas que se calibraron las zonas de temperatura, gradualmente se incrementaron para tener un perfil más uniforme. Cuando se inicia la operación, las zonas de temperatura tardan en tomar una temperatura estable (estado estacionario). Si se colocan desde el principio valores objetivo altos, las temperaturas se incrementan más de lo deseado. Esto se debe a que el proceso, independientemente de la calefacción en el cabezal, aumenta gradualmente la temperatura durante horas hasta llegar al estado estacionario y las pérdidas de calor son pequeñas.

9.1.2 Metodología del monitoreo de las pruebas.

El monitoreo de las pruebas se las llevó a cabo tanto en el espesor de la lámina como el peso del producto final. Se identificó cada prueba con un número dado.

Monitoreo en el espesor de lámina. En la mayoría de casos se recogió una muestra de lámina al final de cada lote. Las muestras de lámina debían ser representativas debido a la variabilidad longitudinal conocida de la lámina. Por tal motivo, se muestrearon láminas de longitud comparable a la circunferencia del rodillo. Se adoptaron las posiciones transversales de la prueba de algunas veces la longitud del rodillo (Cap.8). En sentido longitudinal o máquina las medidas fueron cada 14 cm.

El indicador de comparación para verificar la mejora en el espesor fue el rango promedio transversal para las muestras. Se encontró el rango transversal en cada posición longitudinal y se calculó su promedio. El rango transversal promedio se comparó con el rango promedio de la muestra anterior mencionada para monitorear la mejora. El rango transversal promedio para la muestra de 4 veces la longitud del rodillo fue de 0.084 mm (indicador antes de las pruebas).

Monitoreo en el peso del producto. Se comprobó el peso del producto para cada prueba al recoger algunas muestras o “paradas” (de generalmente 50 ciclos de formación ó 50 x 28 productos) del producto termoformado una vez que pasó el rollo o lote a éste proceso siguiente.

El indicador de comparación para verificar la mejora en el peso fue el exceso de peso promedio por ciclo o golpe respecto al peso promedio mínimo en cada parada (en cada golpe o ciclo se forman 1 producto por cavidad o 28 productos totales). Para calcular en cada muestra el indicador de comparación, se estableció primero en cada parada la cavidad con el peso mínimo. Fue calculado el exceso de peso de las demás cavidades respecto a este mínimo peso y se efectuó la sumatoria. Un análisis similar se realizó previamente en el monitoreo inicial de peso del producto A (sección 6.3.1). De este modo, empleando el precio del producto por unidad de peso y la diferencia en el exceso de peso por ciclo antes

y durante las pruebas se puede establecer la comparación para estimar cuantitativamente la mejora en términos monetarios .

El exceso de peso por ciclo o golpe para las muestras en el monitoreo inicial de peso fue de 6.76 g en promedio. Es decir, en cada ciclo (28 productos) en promedio existe un exceso de peso en relación al mínimo de 6.76 g .

9.2 Resultados de la pruebas

Las prueba se identifican con número dado. Para visualizar la forma del remanente en cada caso se dibujó un perfil del mismo.

Rollo 92 (R92)

Ajustes:

- Se preestableció el cabezal a una abertura de 1.2 mm de espesor.
- El remanente tuvo la siguiente forma:

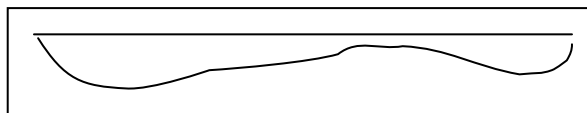


Fig. 9.1 Perfil del remanente para prueba Rollo 92

- Las temperaturas del cabezal se ajustaron de tal manera que la temperaturas inicial y final fueron:

		Zonas de temperatura en el cabezal				
		1	2	3	4	5
<i>Inicial</i>	<i>real</i>	215	218	210	217	208
	<i>set</i>	215	195	200	195	205
<i>Final</i>	<i>real</i>	224	232	225	234	226
	<i>set</i>	224	195	200	195	205

Tabla 9.1 Temperaturas en las zonas de cabezal Rollo 92

Resultados:

El efecto del remanente en el peso se puede notar en el perfil del peso. (Ver fig. 9.2)

En la zona donde el remanente es menor el peso disminuyó por lo que se concluye que en esta parte existe un decremento del espesor de la lámina.

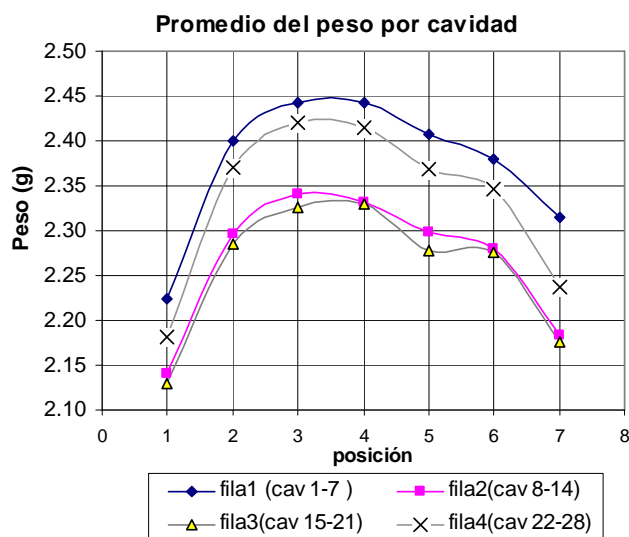


Fig 9.2 Un perfil del peso para la prueba rollo 92.

El indicador en el peso tuvo un promedio de 4.90 g que señala alguna mejora.

Rollo 121 (R121).

- Abertura del labio preestablecida a 0.7 mm los lados y 0.85 mm el centro. En la operación se cerró el centro y abrió los lados.
- El remanente tiene el siguiente perfil:

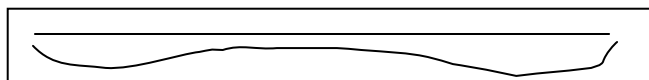


Fig. 9.3 Perfil del remanente para prueba R121

- Las temperaturas del cabezal se ajustaron de tal manera que la temperaturas inicial y final fueron:

		Zonas de temperatura en el cabezal				
		1	2	3	4	5
Inicial	real	215	218	210	217	208
	set	215	195	200	195	205
Final	real	224	232	225	234	226

	<i>set</i>	224	195	200	195	205
--	------------	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla. 9.2 Temperaturas en las zonas de cabezal Rollo 121

Resultados.

Un perfil de peso de las muestras es el siguiente:

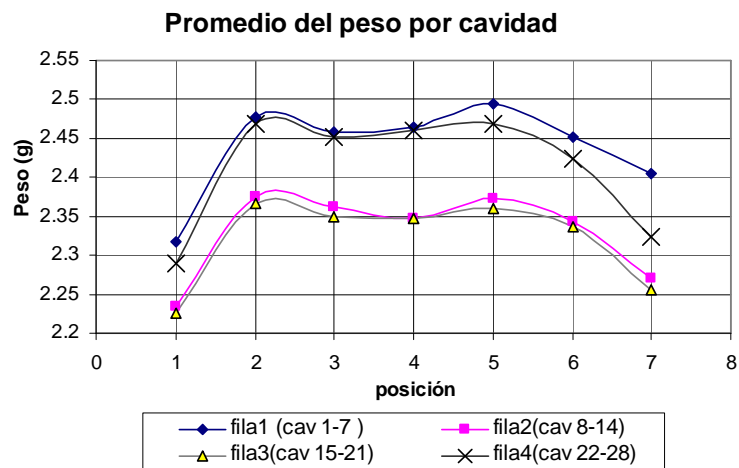


Fig. 9.4 Perfil del peso para una muestra con el rollo 121.

Esto confirma el efecto que tiene el remanente en el espesor de lámina y consecuentemente en el peso. El indicador de peso tuvo un promedio de 4.34 g. Existió una mejora incluso sobre la prueba anterior.

La muestra de lámina presentó la siguiente variación en sentido máquina:

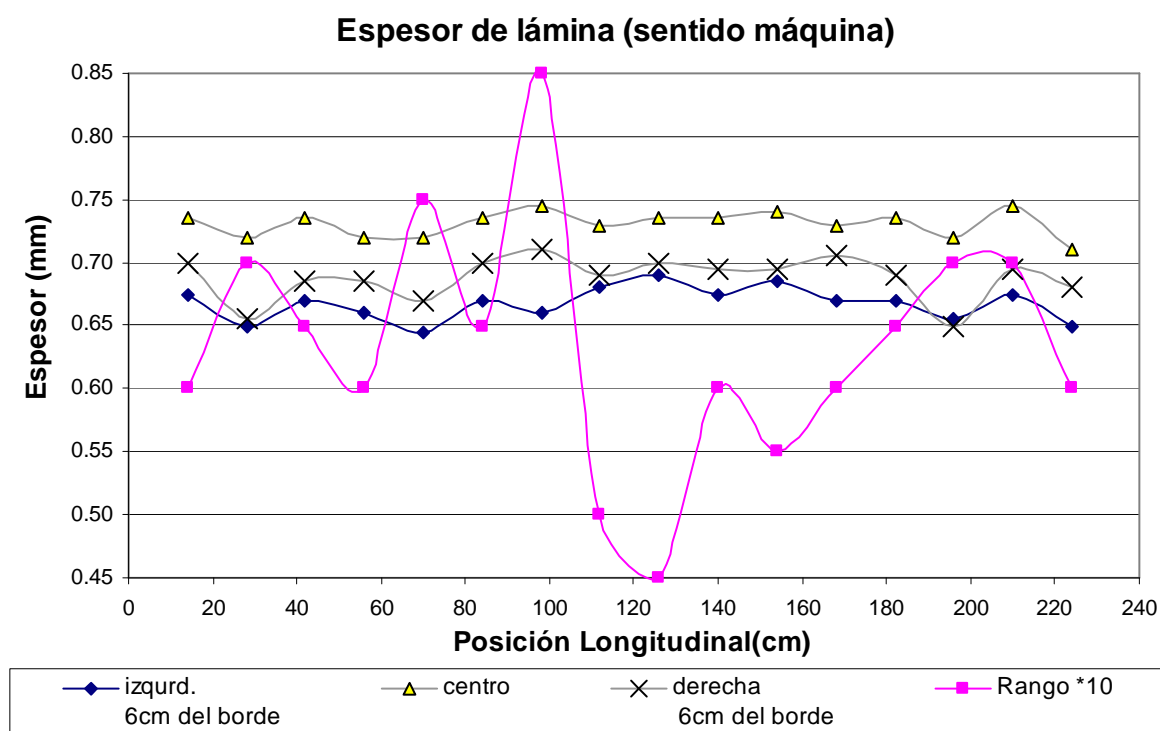


Fig 9.5 Variación del espesor de lámina en sentido máquina para muestra de lámina R. 121

El rango promedio fue 0.063 mm con una mejora del 24.7%.

Rollo 122 (R122)

Ajustes:

- Labio preestablecido a 0.71 mm en los lados y 0.76 mm en el centro. En la operación se tuvo que hacer ajustes en el labio ya que en el centro el remanente era nulo y la lámina salía con defecto.
- El remanente tuvo el perfil:

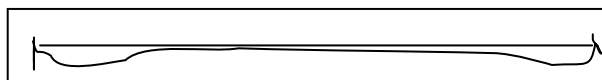


Fig 9.6 . Perfil del remanente para prueba R122

- El ajuste de temperatura fue:

		Zonas de temperatura en el cabezal				
		1	2	3	4	5
<i>Inicial</i>	<i>Real</i>	210	225	217	225	218
	<i>set</i>	218	218	218	218	218
<i>Final</i>	<i>real</i>	225	232	224	233	225
	<i>set</i>	226	195	200	195	226

Tabla. 9.3 Temperaturas en las zonas de cabezal Rollo 122

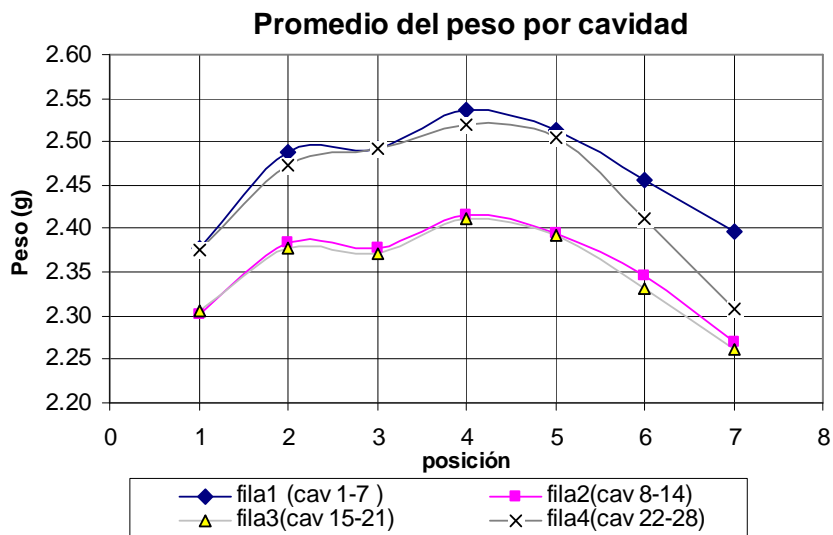


Fig. 9.7 Perfil del peso para una muestra con el rollo 122.

Resultados

Nuevamente se confirma la correspondencia entre el perfil de peso y la forma del remanente en los rodillos (fig 9.7) El indicador del peso en promedio fue de 4.20 g y la lámina tuvo un rango promedio de 0.063 mm con una mejora de 25.1 % (Debido a los decimales) (fig 9.8).

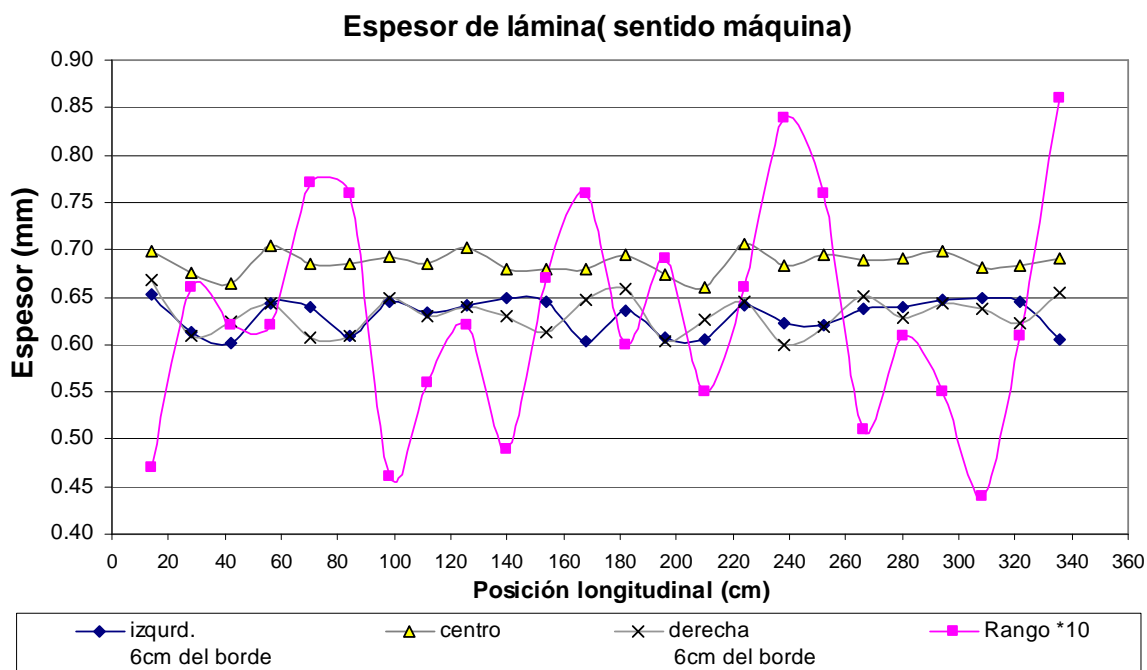


Fig 9.8 Variación del espesor de lámina en sentido máquina para muestra de lámina R122

Rollo 147 (R147)

Ajustes

- El labio se preestableció uniformemente a 0.71 mm. En la operación se cambió la abertura de labio de tal modo que se tenga un remanente lo más pequeño posible y menor en el centro sin alterar mucho el acabado de lámina. La lámina presentó ciertas rayas en el acabado pero no es muy notorio. Se evaluó en el producto final.
- Perfil remanente

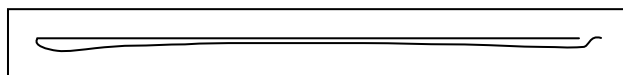


Fig. 9.9 Perfil del remanente para prueba R147

- Las temperaturas del cabezal se ajustaron de la siguiente forma:

		Zonas de temperatura en el cabezal				
		1	2	3	4	5
<i>Inicial</i>	<i>real</i>	217	215	207	215	216
	<i>set</i>	217	195	200	195	215
<i>Final</i>	<i>real</i>	229	232	225	233	229
	<i>set</i>	229	195	200	195	229

Tabla. 9.4 Temperaturas en las zonas de cabezal Rollo 147

Resultados

El indicador en el peso fue en promedio de 4.36g y de la lámina un rango promedio de 0.062 mm con una mejora del 26.5%. El producto no presentó variaciones significativas en el aspecto debido al acabado mencionado en la lámina.

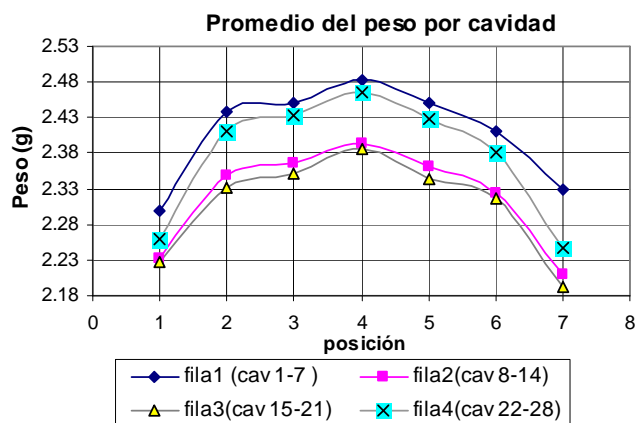


Fig. 9.10 Perfil del peso para una muestra con el rollo 147

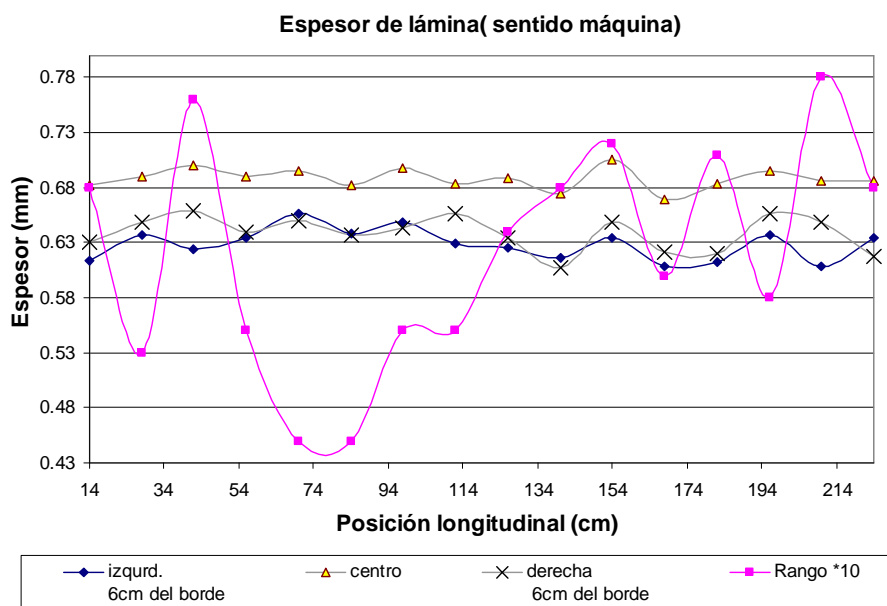


Fig. 9.11 Variación del espesor de lámina en sentido máquina para muestra de lámina R. 147

Rollo 164 (R164)

Ajustes:

- Se decidió cambiar el ajuste del labio a una abertura mayor. En los lados se calibró a 1.40 mm y en el centro a 1.78 mm.
- El remanente fue cambiándose hasta tener uno pequeño.

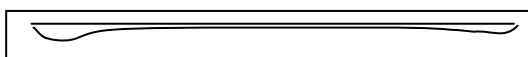


Fig. 9.12 Perfil del remanente para prueba R164

- Las temperaturas se ajustaron a :

		Zonas de temperatura en el cabezal				
		1	2	3	4	5
<i>Inicial</i>	<i>real</i>	200	206	202	206	203
	<i>set</i>	200	195	195	195	200
<i>Final</i>	<i>real</i>	218	226	217	224	217
	<i>set</i>	217	195	195	195	214

Tabla. 9.5 Temperaturas en las zonas de cabezal Rollo 164

Resultados

En la lámina el rango promedio fue de 0.065 mm con una mejora del 22.5% y en el peso del producto el indicador en promedio se calculó en 4.75 g.

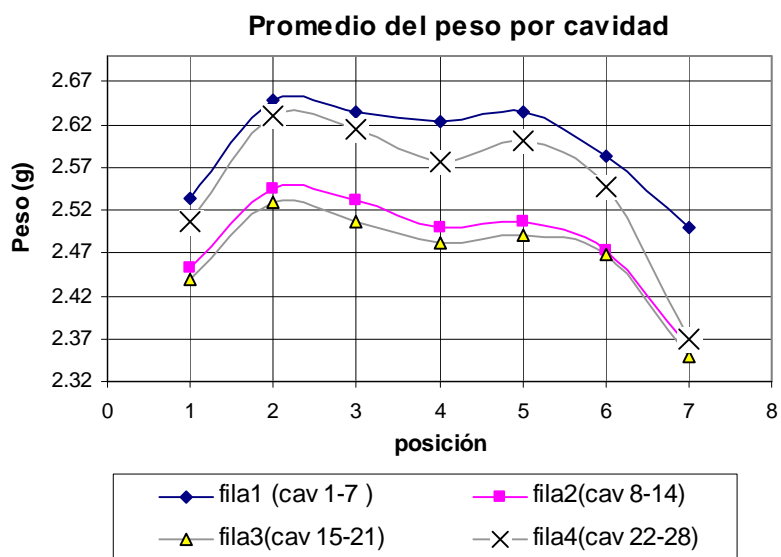


Fig. 9.13 Perfil del peso para una muestra con el R164

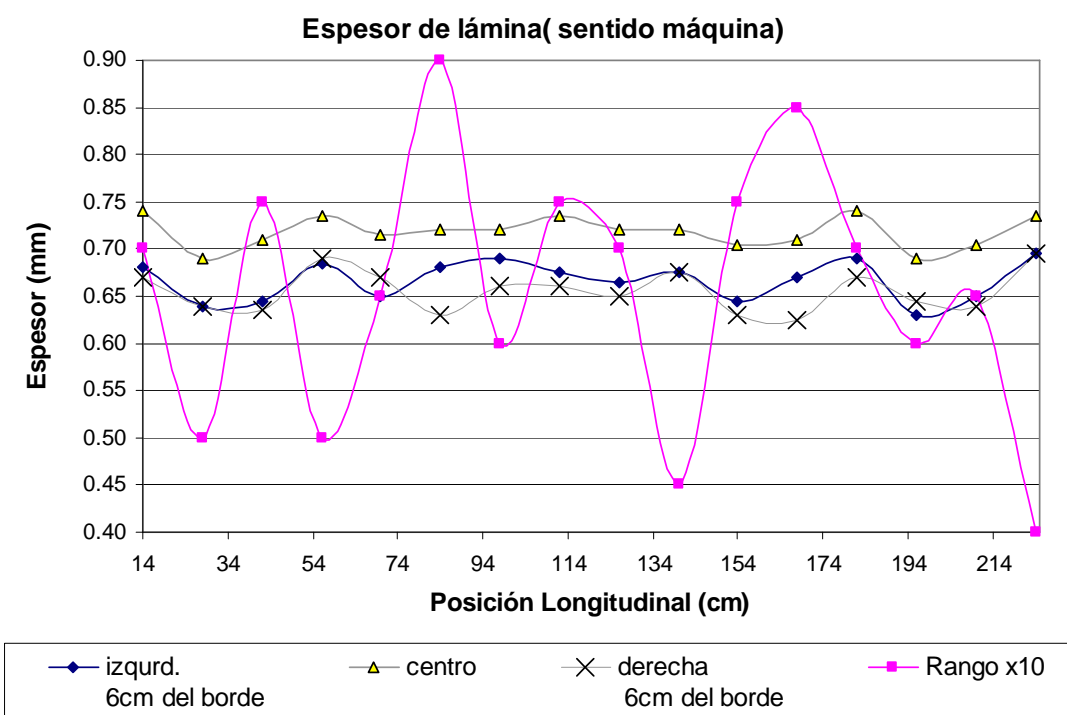


Fig. 9.14 Variación del espesor de lámina en sentido máquina para muestra de lámina R. 164

Rollo 16A.

- No se preestableció a ninguna abertura el labio. Se dejó la operación tradicional sin efectuar cambios iniciales. Se ajustó el labio mientras se operaba para adquirir la forma deseada de remanente
- Remanente menor en el centro hacia el lado del defecto de los rodillos con perfil:

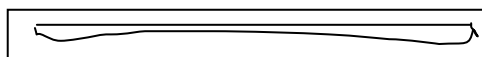


Fig. 9.15 Perfil del remanente para prueba R16A

- En las temperaturas tampoco se hicieron mayores cambios.

		Zonas de temperatura en el cabezal				
		1	2	3	4	5
<i>Inicial</i>	<i>real</i>	180	219	226	234	225
	<i>set</i>	180	180	180	180	180
<i>Final</i>	<i>real</i>	185	219	225	233	225
	<i>set</i>	185	180	180	180	180

Tabla. 9.6 Temperaturas en las zonas de cabezal Rollo 16A

Resultados

El indicador del peso en promedio fue de 4.41 g que es comparable a las pruebas anteriores. El rango promedio en el espesor de lámina fue de 0.08 mm que representa una mejora del 8 %. Esta muestra al parecer no es representativa ya que el operador antes de coger la muestra efectuó algunos movimiento en el cabezal para la lámina siguiente que se iba a realizar.

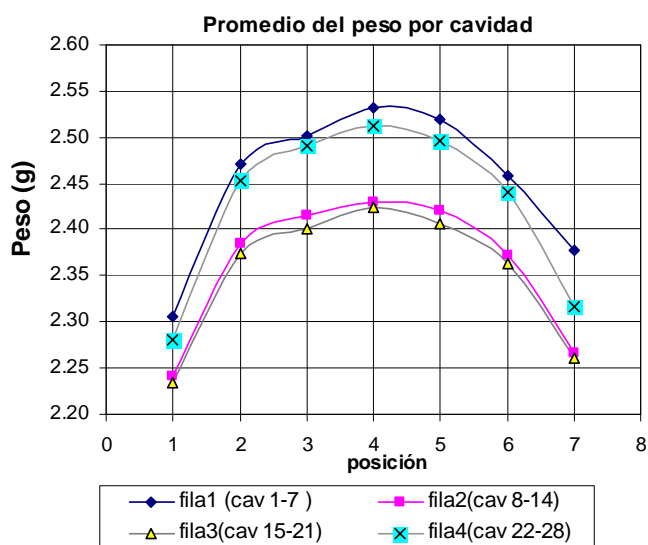


Fig. 9.16 Perfil del peso para una muestra con el R16A

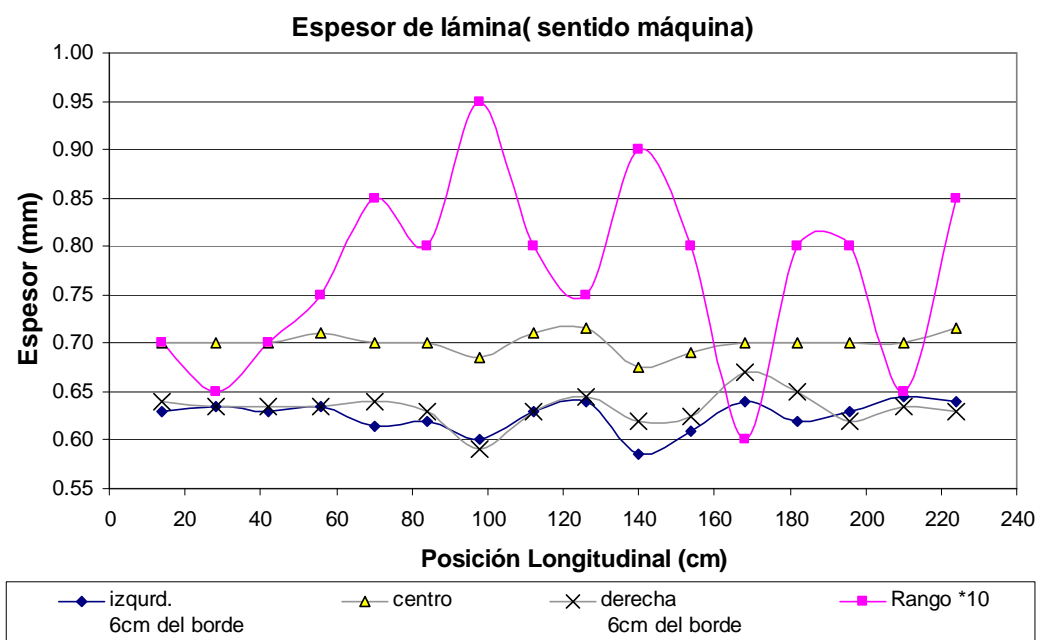


Fig. 9.17 Variación del espesor de lámina en sentido máquina para muestra de lámina R. 16A

Rollo 174 (R174)

Mediante esta prueba se quiso verificar la mejora.

- El remanente fue grande y prácticamente uniforme.

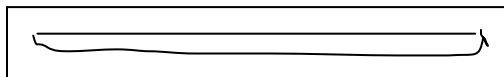


Fig 9.18. Perfil del remanente para prueba R174

- Se aumentó un poco la temperatura en los extremos

Zonas de temperatura en el cabezal					
	1	2	3	4	5
<i>real</i>	205	226	221	226	217
<i>set</i>	205	195	195	195	217

Tabla. 9.7 Temperaturas en las zonas de cabezal Rollo 174

Resultado

El indicador del peso fue de 6.31 g y la lámina tuvo un rango promedio de 0.087 mm que prácticamente es similar al de la muestra de comparación antes de las pruebas.

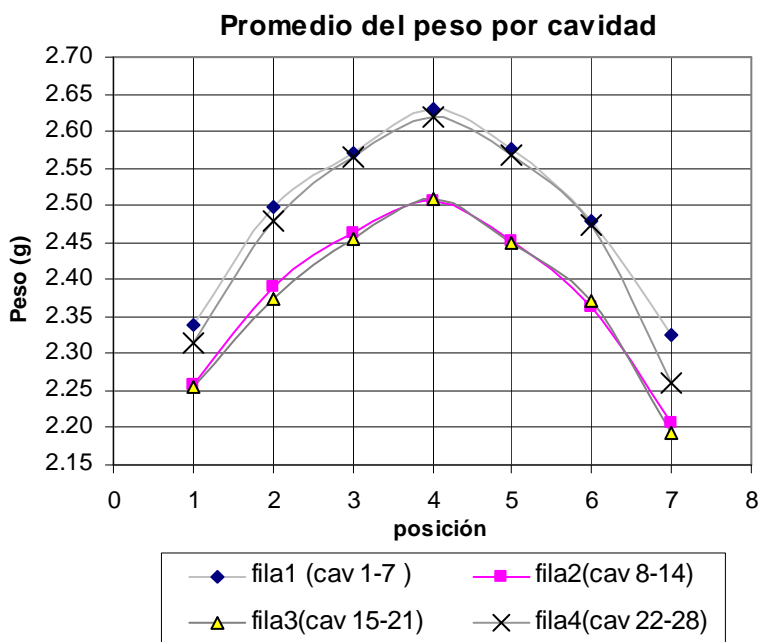


Fig. 9.19 Perfil del peso para una muestra con el rollo 174

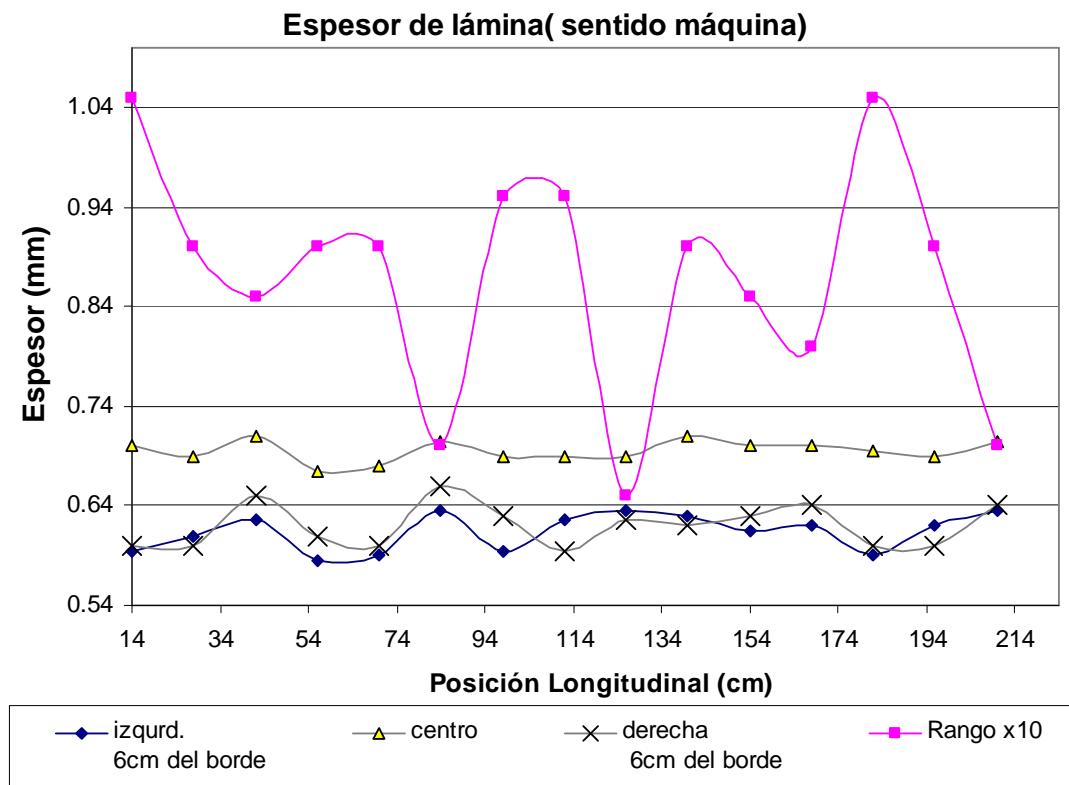


Fig. 9.20 Variación del espesor de lámina en sentido máquina para muestra de lámina R.174

9.3 Conclusiones de la pruebas en producción.

- Se concluye que la variabilidad en el espesor se debe a las condiciones en que se encuentran los rodillos en la “extrusora 3”
- A pesar de la existencia de una deformación permanente de los rodillos, la causa principal del problema se debe a la flexión dinámica de los mismos.
- Es muy probable que las paredes de los rodillos de la “extrusora 3” no tengan la resistencia necesaria para soportar la presión del material de entrada en la operación.
- Para reducir el efecto del doblado dinámico en los rodillos se recurrió al movimiento de algunas variables de operación.

- Los resultados muestran que la variable de operación de mayor impacto en el control de espesor es el tamaño y forma del remanente.
- La abertura del labio y calibración de las zonas de temperatura no tuvieron mayor impacto para brindar una solución al problema transversal del espesor de lámina.
- **Propuesta:** Se sugiere que en la operación normal se calibre el remanente lo más pequeño posible sin que afecte mayormente el acabado de lámina con una forma tal que sea gradualmente menor en el centro.

Como una conclusión importante se detallará el análisis de beneficio de la propuesta de operación.

9.3.1 Análisis de beneficio de la propuesta en la operación.

El análisis de beneficio de la operación sugerida se basa en la comparación del valor del indicador en el peso (exceso de peso por ciclo) antes de las pruebas con el valor encontrado en la operación sugerida.

Establecimiento del exceso de peso por ciclo antes de las pruebas. Se puede estimar este indicador a través de las muestras recogidas en el monitoreo inicial. Los cálculos mostraron que en promedio este indicador fue de 6.76 g. El indicador calculado para la prueba R174 también puede ser un nivel de referencia para la comparación (6.31 g). Se decidió estimar el exceso de peso por ciclo antes de las pruebas en 6.45g.

Establecimiento del exceso de peso por ciclo con la operación sugerida

El valor promedio del indicador para las muestras de cada prueba es el siguiente:

<i>Prueba</i>	Promedio del exceso de peso por ciclo o golpe respecto al mínimo peso (g)
R121	4.34
R122	4.20
R147	4.36
R16A	4.41
Promedio (g)	4.33

Tabla 9.8 Resumen del indicador en el peso para las pruebas.

Para efectos de comparación se tomará el valor promedio del indicador para las pruebas de 4.33 g que representa un 33% de mejora sobre el valor del indicador antes de las pruebas.

Cálculo del beneficio anual.

Se debe recordar que el exceso de peso por ciclo es un estimado de la suma del exceso de peso por cavidad respecto al peso mínimo por golpe; y es calculado a través de los pesos promedios individuales por cavidad para cada parada (50 ciclos de formación).

Comparando el valor promedio antes de las pruebas y el valor promedio durante las pruebas se tiene un ahorro de 2.12 g (6.45g – 4.33 g) en cada ciclo o golpe. Hay que recordar que en cada ciclo se forman 28 productos individuales o 1 producto por cavidad (molde de 28 cavidades).

Para hallar el beneficio anual de la operación sugerida para el caso del producto A, se tiene que recurrir a la producción anual de dicho producto. Se asigna el 76% de la producción anual a la fabricación del producto a partir de lámina de la “extrusora 3” (según datos de producción de láminas). Se calculó cuántos grupos de 28 productos individuales se realizaron en un año con lámina de la “extrusora 3” para estimar el número de ciclos o golpes fabricados anualmente de esta extrusora. Fueron de 421273 grupos de 28 unidades al año ó ciclos anuales

A través de la comparación del indicador de peso ya presentado, se conoce que por cada ciclo, golpe o grupo de 28 unidades el ahorro es de 2.12 g . Al año, por tanto, el ahorro resultaría en :

$$421273 \text{ ciclos/año} \times 0.00212 \text{ kg /ciclo} = 893 \text{ kg/año.}$$

Empleando el precio del producto por kilogramo se estima que el ahorro es de **2800 \$/año.**

El ahorro con la operación sugerida se justifica ya que los costos de poner en marcha el remedio son realmente bajos por lo que solo sería necesario estandarizar el procedimiento analizado en las pruebas y asegurar que se mantengan las mejoras.

Conclusiones

- A partir de la información de problemas de calidad en la empresa se seleccionaron problemas relevantes para efectuar un análisis económico que mostró que el problema de exceso y variabilidad de peso era el problema de mayor impacto monetario.
- Se seleccionó al problema de peso para estudiar una solución considerando el análisis económico, la recurrencia de problemas y criterios de factibilidad de investigación (herramientas disponibles, posibilidad de muestreo, probabilidad de éxito, etc.)
- Un monitoreo inicial del problema de peso de los productos de mayor producción mostró que se debía elegir al producto A para una mayor investigación
- El problema de la variabilidad en el peso del producto A se debió en un 25% al proceso de termoformado y a un 75 % al proceso de extrusión. Se decidió estudiar el problema relacionado a la extrusión de lámina que también se evidenció en el producto B.
- Se determinó que el problema principal en el proceso de extrusión tenía que ver con la variabilidad del espesor de lámina para una de las extrusoras (“extrusora 3”).
- A partir de un muestreo representativo del espesor de lámina y la relación lineal encontrada entre peso y espesor, se estableció un modelo aplicado al producto A mediante el cual se estableció que la lámina debía ser calibrada por los operadores a 0.60 mm para que el promedio de peso del producto cumpla el nivel referencial que tiene la empresa.
- Un monitoreo de espesores de lámina de la “extrusora 3” mostró que la variabilidad transversal de lámina disminuye a mayor espesor.

- El monitoreo en las “extrusoras 1 y 3” de las variables de operación, que según la literatura estaban relacionadas al control de espesor, mostró que a pesar de que las temperaturas en el cabezal y abertura de labio no son calibradas según las sugerencias revisadas no se puede concluir que sean la causa principal del problema en estudio. Solo una de las dos extrusoras del mismo modelo presenta el problema de la variabilidad transversal de espesor a pesar de una operación similar.
- Las sugerencias de la literatura en cuanto a la calibración de las variables de operación relacionadas al espesor de lámina se tomaron en cuenta en las pruebas posteriores.
- Se modelaron los datos de espesor de lámina según la teoría de doblado dinámico e indicó una tendencia esperada a dicha teoría.
- De una lista de las causas posibles del problema en estudio realizada a partir de la información de variables y el personal en planta, se eligió la deformación permanente y flexión dinámica de los rodillos (relacionada a la operación) como causas más probables.
- La medición de una lámina de la “extrusora 3” de longitud igual a 4 veces la circunferencia de los rodillos mostró que los rodillos influyen determinantemente en el espesor final de lámina ya que la variación en sentido máquina se repite periódicamente según la circunferencia de los rodillos.
- La prueba con plastigage mostró ser la mejor alternativa para determinar la deformación permanente de los rodillos debido a precisión, disponibilidad de herramientas, procedimiento y costos.
- Se determinó la existencia de una deformación permanente de los rodillos de la “extrusora 3” que tiende a ser mayor desde el centro hacia un lado del rodillo pero que no corresponde a toda la variación transversal en el espesor de lámina registrado.

- Las pruebas en planta mostraron que la variabilidad en el espesor se debe principalmente a un fenómeno de doblado dinámico en los rodillos de la “extrusora 3” debido a las condiciones en que se encuentran los mismo.
- Es muy probable que las paredes de los rodillos de la extrusora 3 no tengan la resistencia necesaria para soportar la presión del material de entrada la operación.
- Para reducir el efecto del doblado dinámico en los rodillos se recurrió al movimiento de algunas variables de operación.
- Los resultados muestran que la variable de operación de mayor impacto en el control de espesor transversal es el tamaño y forma del remanente.
- Tanto la abertura del labio como la calibración de las zonas de temperatura no tuvieron mayor impacto para brindar una solución al problema transversal del espesor.
- Se sugiere que en la operación normal se calibre el remanente lo más pequeño posible sin que afecte mayormente el acabado de lámina con una forma tal que sea gradualmente menor en el centro.

Resultados finales

- El mejoramiento del promedio del peso para distintos productos se hizo evidente a lo largo del proyecto e incluso durante el monitoreo. En cuanto al producto A se estableció el espesor en 0.60 mm y se cumple razonablemente en promedio el nivel de referencia de peso de la empresa según los datos del departamento de calidad actual.
- Se estimó, en un análisis de beneficio de la propuesta de operación sobre el remanente, que tan solo en el producto A los ahorros serían de un 33%.

Finalmente, se pudo experimentar la diferencia entre los términos de monitoreo, mejoramiento y control de calidad. El monitoreo es un paso inicial fundamental pero no suficiente para asegurar la calidad en una empresa. Solo en base al monitoreo se puede llegar a conocer el estado y desempeño de un sistema. El control incluye el monitoreo de

las variables pero va más allá del registro de las variables. Principalmente, tiene que ver con los ajustes y medidas que se llevan a cabo para mantener una característica, valor o estándar definido como valor objetivo. El mejoramiento de calidad, en cambio, se enfoca a la investigación de problemas de calidad, preferentemente crónicos, que resulta en los ajustes necesarios en el sistema y mantenerlos mediante el control. En sí la metodología del mejoramiento de calidad se ajusta a los lineamientos del control siempre y cuando se implemente un sistema para mantener las mejoras.

Investigación Futura

Según el ciclo de mejoramiento de calidad se puede decidir continuar la investigación del problema del peso para mejorar los resultados o dedicar esfuerzos a otros problemas.

En cuanto a la continuación del proyecto presente se debe implementar los controles apropiados para mantener las mejores propuestas a través del tiempo. Se conoce el indicador apropiado y su valor estimado para el remedio emitido. De este modo, la elaboración de cartas de control son una herramienta útil para monitorear que dicho indicador se mantenga dentro de los valores razonables y motivar a los operadores que continúen calibrando el remanente según lo sugerido.

Existen otros dos aspectos en cuanto a la variabilidad del peso que todavía no se ha corregido. De éstos, el más importante se refiere a la variabilidad del peso en sentido longitudinal o máquina debido a la variación del espesor en dicha dirección. Se tiene información útil para este problema con la medidas efectuadas en la lámina de longitud mayor a 3 veces la circunferencia del rodillo tanto en la “máquina 1” como “3”. En primera instancia se ha establecido que una causa posible está asociado a un defecto en el eje o apoyos de los rodillos (p ej. los rodamientos). La empresa espera efectuar cambios en los rodamientos el año siguiente. Se puede realizar un seguimiento e investigación más

detenida respecto a este problema en un nuevo proyecto que incluya la evaluación del cambio futuro de rodamientos en las extrusoras.

La variabilidad del peso entre filas del molde de formación para el producto A también es un aspecto que se puede estudiar con mayor detenimiento. Para el efecto, se requiere un conocimiento apropiado de todas las variables del proceso de termoformación como son las relacionadas a los ciclos de formación. En un nuevo proyecto se pueden realizar movimientos de las variables sospechosas y monitoreo del peso según un diseño de experimentos.

Una solución importante que se podría estudiar respecto a la variabilidad del peso es una programación de la producción. Dicha programación debe asignar la elaboración de láminas gruesas a la extrusora 3 ya que son las que presenta menor variabilidad de espesor o, al menos fabricar menos porcentaje la elaboración de productos delgados en ésta máquina.

Por otro lado, puede decidirse estudiar un nuevo proyecto que bien puede elegirse entre los problemas seleccionados en la priorización de problemas de calidad ya identificados.

Bibliografía

Besterfield, Dale. *Control de Calidad*. 4ta ed. México: Prentice Hall, 1995.

Box, George y Alberto Luceño. *Statistical Control by Monitoring and Feedback Adjustment*, EUA: Wiley –Interscience Publication,1997.

Cantú, Humberto. *Desarrollo de una cultura de calidad*. México. McGrawHill,1997

Crawford, R.J. *Plastics Engineering*. Great Britain-London: Pergamon Press,1983

DS Corporation. *Operational an Technical Iinstructions for Sheet Extrusion System. Roll Stand*.US- Pawcatuck: Junio 1996

EDI. *Operation an Maintenance (Manual)*.US-Winsconsin:1996

--- “Our Name Says It All “. GP_English.pdf. sales@extrusiondies.com (24 Jun 2004)

Empire West. “Thermoforming Tech Academy”. *Forming Methods*.
<http://www.empirewest.com/academy/tooling-formingmethods.html> (17 Nov. 2003)

---. “Thermoforming Tech Academy”. *The Sheet Extrusion Process*.
<http://www.empirewest.com/academy/materials-extrusion.html> (17 Nov. 2003)

Gabler. “Gabler Thermoform Technology”. *Machines*.<http://www.gabler-maschinenbau.de/homepage/index.php?lg=en&faction=maschinen&option=m92>. (12 Oct. 2004)

Harrington, H.J. *Mejoramiento de los procesos de la empresa*. Bogotá: McGrawHill,1993.

Hensen,ed. *Plastic Extrusion Technology*. 2da ed. New York: Hanser, 1992

Juran, Joseph y F.Gryna . *Análisis y Planeación de la Calidad*.. México: Mc Graw-Hill ,1995

Lester, Ronald; Norbert Enrick y Harry Mottley. *Control de Calidad y Beneficio Empresarial*. Madrid: Ed. Díaz de Santos, 1989

Michaeli, Walter ,et al. *Introducción a la Tecnología de los Plásticos*. Barcelona :Hanser, 1992

Moore, Edward P. *Polypropylene Handbook*. New York : Hanser, 1996

O’Brien, Keith T. *Computer Modeling for Extrusion and other Continuous Polymer Processes*. New York: Hanser,1992

OMV. *Operation an Maintenance Handbook.Flat Die*. Italia:1993

Polyone, "Technical Service Report." *Sheet Extrusion of Geon® Rigid PVC Compounds*. <http://www.psa.com.au/Problem%20Solving/Extrusion/Extrusion%20Problems-01.htm> (6 Jun. 2004)

Polystyrene Australia. "Problem Solving". *Extrusion Problems*. <http://www.psa.com.au/Problem%20Solving/Extrusion/Extrusion%20Problems-01.htm>. (6 Junio 2004)

Progelhof, Richard y James Throne. *Polymer Engineering Principles*. New York; Hanser Publication, 1993

Richardson, Terry & Eric Lokensgard, *Industria del Plástico*. Madrid: Paraninfo, 2000

Robledo, Juan G. *Curso de Extrusión de Resinas Plásticas*. IX Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Tampico- México: Agosto 2003

Soin, Sarv. *Control de Calidad total. Claves, Metodologías y administración para el éxito*. México: McGraw-Hill, 1997.

Throne, James. *Understanding Thermoforming*. New York: Hanser, 1999 (a)

----. *Technology of Thermoforming*. New York: Hanser, 1996 (b)

Universidad de Valencia. *Curso de Postgrado: Materiales Polímeros*. Tomo 1. 2001

Wade, L.G. Jr. *Química Orgánica*. 2da ed. México: Pearson Educación, 1993

