

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISIÓN DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

Desarrollo de herramientas analíticas para apoyar el proceso de diseño de piezas hechas de
plástico

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS DE MANUFACTURA

POR

FRANCISCO ALBERTO AGUIAR VÁZQUEZ

MONTERREY, N.L.

DICIEMBRE DE 2008

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

**DIVISIÓN DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que el presente proyecto de tesis presentado por el Ing. Francisco Alberto Aguiar Vázquez sea aceptado como requisito parcial para obtener el grado académico de:

Maestro en Ciencias en Sistemas de Manufactura

Comité de Tesis:

Dr. Horacio Ahuett Garza
Asesor

Dr. Mario A. Martínez Hernández
Sinodal

Dr. Víctor Hugo Ponce Ibarra
Sinodal

Aprobado:

Dr. Joaquín Acevedo Mascarúa
Director de Investigación y Posgrado

Diciembre, 2008



A DIOS
A MI FAMILIA
A MIS AMIGOS

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi asesor académico el Dr. Horacio Ahuett Garza, por aceptar ser mi asesor, así como haberme dado la oportunidad de participar en el proyecto de Jonson Controls como becario de investigación. Gracias por estar siempre dispuesto a guiar mi trabajo y por dedicarme su tiempo. Agradecimientos al Dr. Mario Alberto Martínez, por haber dado lo necesario para poder desarrollar el proyecto de Jonson Controls. Por aportar sus comentarios en este trabajo de tesis. Y por haber aceptado ser parte del equipo evaluador como sinodal. Agradecimientos especiales a Jonson Controls por haber donado fondos para que personas como yo tengamos la oportunidad de superarnos.

También quiero expresar mi agradecimiento al Dr. Víctor Ponce, mi asesor industrial. Por estar siempre disponible en las necesidades del proyecto. Agradecimiento a Gerald Cummins por habernos compartido su amplia experiencia en el diseño de moldes de inyección de plástico, por habernos dedicado su tiempo a sabiendas de que es una persona muy ocupada. Gracias por habernos recibido en Florence, Kentucky. Por habernos mostrado la empresa durante la visita y por aquella cena inolvidable en el restaurante Jeff Ruby's. También, agradecimientos al Ing. Luis Francisco Vázquez del Mercado, al Lic. Carlos Manuel Aguilar y Glenn Andersen por apoyar la cátedra de Johnson Controls con sus comentarios.

Agradecimientos a mis Padres por que han sido una fuerza constante durante mi superación personal y profesional. Muchas Gracias, ¡los quiero mucho! A mi amigo del alma, casi hermano, el sacerdote Juan Carlos, por brindarme su amistad y su ayuda en todos los aspectos de mi vida. A mis hermanos, hermanas, cuñados, cuñadas, sobrinos, sobrinas, tías, tíos, primos, primas por ser parte de mi existencia.

Agradecimiento a todos aquellos compañeros y amigos con los que conviví durante la maestría: a Oziel, Luís Hernández, Pedro Nel, Luís Martel, Paulo, José Luís, Marco Polo, Alejandra, Blanca, Ivonne, Oscar, Olga, Carolina, Citlalli, Mayra, Ericka, Wilmer, Francisco Medina, Alejandro Aguirre, Mauricio Hincapié, Francisco Javier y muchos otros compañeros que no menciono. Gracias por brindarme su compañerismo.

Agradecimientos a todo el personal del CIDyT con el que me involucré en todo el proceso de la maestría, desde el contador hasta el director del departamento.

Agradecimientos a Amine Ammar por que desinteresadamente me compartió información de su artículo que utilicé para este trabajo, me ahorraste 250 pesos. Mil Gracias!

RESUMEN

El uso de herramientas de ingeniería asistida por computadora (CAE) para evaluar diseños reduce problemas potenciales; porque identifican problemas que no se pueden ver a priori. Es sabido que, hoy en día, el uso de estas herramientas es un estándar para las empresas porque reducen el tiempo de introducción de nuevos productos al mercado. Cuando se hablan de herramientas CAE para el proceso de inyección de plásticos se estima que el tiempo de análisis típico para un caso particular requiere horas; y en ciertos casos hasta días. El uso de estas herramientas para realizar el diseño del producto puede encarecerse debido a que se requiere de un tiempo prolongado para desarrollar modelos validados y porque se requieren de caracterizaciones de los materiales utilizados. Debido a que el proceso de diseño con herramientas CAE en etapas tempranas de diseño es caro, diferentes autores han propuesto herramientas para reducir el esfuerzo de diseño tales como: herramientas cualitativas.

Este trabajo parte del análisis de la metodología de diseño de un caso de diseño particular para proponer herramientas analíticas en aquellos cuellos de botella identificados durante el análisis, y apoyar el proceso de diseño en etapas tempranas de diseño. La herramienta propuesta en este trabajo apoyará el uso de herramientas CAE en etapas tempranas de diseño; así el CAE se utilizará en etapas tardías de diseño para validar el diseño del producto. La herramienta desarrollada sirve para predecir la deformación de las paredes de productos con forma de contenedor, así como predecir el perfil de deformación.

La formulación matemática de la herramienta propuesta fue desarrollada mediante métodos energéticos; 1er. y 2do. Teorema de Castigliano. La expresión matemática fue validada con análisis de elementos finitos (ANSYS), así como con datos experimentales de casos reales y simulaciones en Mold-Flow. Los resultados del modelo desarrollado tienen un máximo de 8% de variación de las predicciones con respecto a simulaciones de ANSYS; Los resultados del modelo son del mismo orden de magnitud que los datos experimentales. Se encontró que el perfil de deformación que predice el modelo es muy similar al perfil de los casos reales. La deformación de las paredes se debe en mayor parte a la contracción térmica desde la temperatura de expulsión de la pieza hasta la temperatura ambiente.

CONTENIDO

	Página
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	3
1.2 Definición del problema	6
1.3 Perspectivas de otros autores	7
1.4 Hipótesis	9
1.5 Objetivos	10
1.6 Alcance	11
2. Análisis del proceso de diseño e identificación de cuellos de botella: Caso tapa BCI 42	12
2.1 Diagrama de flujo del proceso de diseño	13
2.2 Análisis del proceso de diseño del caso tapa BCI 42	14
2.2.1 Descripción y análisis de funcionalidad del producto tapa BCI 42	15
2.2.2 Generación de Modelos CAD de la tapa BCI 42	19
2.2.3 Desarrollo de modelos CAE	21
2.2.3.1 Revisión de literatura	24
2.2.3.2 Caracterización del PP	26
2.2.3.3 Obtención de datos de campo del proceso	28
2.2.3.3.1 Pruebas de Calidad	31
2.2.3.4 Simulaciones CAE del producto actual	33
2.2.3.5 Validación de simulaciones	35
2.2.3.6 Costos	38
2.2.4 Modificaciones propuestas al producto	38
2.2.4.1 Resultados y comparación de simulaciones CAE	41
2.2.4.2 Problemas potenciales de las modificaciones del producto ...	43
2.2.4.3 Estimación de ahorros	45
2.3 Análisis de ensamble	46
2.4 Identificación de cuellos de botella	51
2.5 Investigación paralela al proyecto BCI 42	53
2.6 Propuesta de herramienta	54

	Página
3. Desarrollo del modelo analítico	55
3.1 Revisión de literatura sobre modelos analíticos	57
3.2 Características del modelo desarrollado	64
3.4 Formulación matemática del modelo analítico	65
3.4.1 Ajuste a las ecuaciones	71
4 Validación del modelo analítico	73
4.1 Validación del modelo analítico con elemento finito	73
4.2 Obtención de datos experimentales	80
4.2.1 Mediciones en máquina de coordenadas de las muestras	82
4.2.2 Mediciones de temperatura de expulsión	86
4.2.3 Caracterización de los Coeficientes de Expansión Térmica	88
4.3 Modelación Analítica de la deformación de los casos experimentales	89
4.4 Modelación de la contracción térmica en ANSYS de los casos experimentales	91
4.5 Modelación en Mold-Flow de la caja MC30H	95
4.6 Comparación de datos experimentales con modelo analítico, ANSYS y Mold-Flow	97
4.7 Discusión de resultados	101
4.8 Curvas de diseño para la caja MC30H	103
5 Conclusiones y trabajo futuro	106
5.3 Conclusiones	106
5.4 Trabajo futuro	107
REFERENCIAS	108
ANEXO 1	110
ANEXO 2	116
ANEXO 3	122

INDICE DE FIGURAS

Página

FIGURA 1 Deformación de las paredes del producto, caja para tarjetas de presentación.....	3
FIGURA 2 Problema de funcionalidad debido a deformación del producto, contenedor para discos	4
FIGURA 3 Batería grupo 30H	5
FIGURA 4 Metodología del proceso de diseño	13
FIGURA 5 Características del producto seleccionado en el caso de diseño.....	15
FIGURA 6 Buje y mamelón, diseño original tapa BCI 42	15
FIGURA 7 Postes para estibado, diseño original tapa BCI 42	16
FIGURA 8 Poste para estibado en la esquina, diseño original tapa BCI 42.....	17
FIGURA 9 Ensamble de la caja con la tapa, batería BCI 42.....	17
FIGURA 10 Vista transversal de pista y guía, diseño original tapa BCI 42	18
FIGURA 11 Vista isométrica del hoyo de carga, diseño original tapa BCI 42	19
FIGURA 12 Medición de la tapa BCI 42 en máquina de coordenadas	20
FIGURA 13 Modelo CAD del diseño actual de la tapa BCI42	20
FIGURA 14 Modelo CAE del molde de la tapa BCI 42	23
FIGURA 15 Resultado de la prueba de tensión, PP Formolene 2510A virgen	26
FIGURA 16 Probeta ASTM D 638 Tipo 1	26
FIGURA 17 Velocidad de corte vs viscosidad de Polipropileno virgen y reciclado	27
FIGURA 18 Zonas de temperaturas del cañón de inyección	28
FIGURA 19 Instrumento para medir temperatura, Pistola Infrarroja Raytek	29
FIGURA 20 Cavidades macho y hembra del molde tapa BCI 42.....	29
FIGURA 21 Espacios donde se midió la temperatura de expulsión, Tapa BCI 42.....	30
FIGURA 22 Perfil de llenado de la tapa BCI 42	31
FIGURA 23 Prueba de fuga interna durante el proceso de ensamble	32
FIGURA 24 Arreglo para medir deformaciones, Batería ensamblada BCI 42.....	32
FIGURA 25 Resultado de temperatura de expulsión de simulación CAE de Tapa BCI 42	34
FIGURA 26 Localización de deformación máxima, Tapa BCI42.....	35
FIGURA 27 Localización del máximo esfuerzo en la tapa BCI42	35
FIGURA 28 Perfil de llenado simulación CAE, tapa BCI42.....	36

FIGURA 29 Validación del llenado de cavidad de la tapa BCI42	37
FIGURA 30 Diseño propuesto de postes para estibado, tapa BCI 41	39
FIGURA 31 Geometría propuesta de pista y guiador, tapa BCI 41	39
FIGURA 32 Geometría propuesta de mamelón, tapa BCI 41	40
FIGURA 33 Geometría propuesta de guidores de flujo, tapa BCI 41	40
FIGURA 34 Modelo CAD del diseño propuesto de la tapa BCI 42.....	41
FIGURA 35 Prueba de estibado con modificaciones a la tapa BCI42.....	44
FIGURA 36 Proceso de Ensamble de la batería BCI 42	47
FIGURA 37 Caja de la batería BCI 42	48
FIGURA 38 Posicionamiento de las lápidas en la caja BCI42	48
FIGURA 39 Esquema de posicionamiento en el proceso de ensamble de batería BCI42	49
FIGURA 40 Mediciones de posicionamiento del proceso de ensamble de caja BCI42.....	50
FIGURA 41 Alineación entre caja y tapa de batería grupo BCI 30.....	52
FIGURA 42 Mecanismo de Cristalización de los agentes nucleantes.....	53
FIGURA 43 Deformación de las paredes de productos en forma de contenedor	55
FIGURA 44 Estructura en forma de U.....	56
FIGURA 45 Demostración del caso en los productos de ENERTEC	56
FIGURA 46 Geometría usada por Zahlan et. al. [9]	57
FIGURA 47 Geometrías usadas por Jansen et. al. [10]	58
FIGURA 48 Geometría usada por Akkerman et. al. [11]	59
FIGURA 49 Geometría usada por Mlekusch [12].....	59
FIGURA 50 Geometría usada por Ammar et. al. [13].....	61
FIGURA 51 Geometría usada por Hsiao et al [14].....	62
FIGURA 52 Estructura en forma de U.....	64
FIGURA 53 Viga curvada con restricciones frontera.....	64
FIGURA 54 Diagrama de cuerpo libre	66
FIGURA 55 Modelo de viga curvada en ANSYS 10.0.....	74
FIGURA 56 Comparación resultados ecuación 7 con ANSYS, ecuación 7, Caso 1	74
FIGURA 57 Comparación modelo analítico con ANSYS, ecuación 7, caso 2.....	75
FIGURA 58 Comparación modelo analítico con ANSYS, ecuación 7, caso 3.....	75
FIGURA 59 Comparación ANSYS vs Analítico, Ecuación 11, caso 1.....	76

FIGURA 60 Comparación ANSYS vs Analítico, Ecuación 11, caso 2.....	77
FIGURA 61 Comparación ANSYS vs Analítico, Ecuación 11, caso 3.....	77
FIGURA 62 Comparación ANSYS vs Analítico por rangos, Ecuaciones 7 y 11, caso 1	78
FIGURA 63 Comparación ANSYS vs Analítico por rangos, Ecuaciones 7 y 11, caso 2	79
FIGURA 64 Comparación ANSYS vs Analítico por rangos, Ecuaciones 7 y 11, caso 3	79
FIGURA 65 Caja para batería MC30H.....	80
FIGURA 66 Caja para batería ACUMEX P-47	81
FIGURA 67 Caja para batería GR-31	81
FIGURA 68 Mediciones de la caja MC30H en máquina de coordenadas	82
FIGURA 69 Gráfica de los resultados de las mediciones de la caja MC30H	84
FIGURA 70 Gráfica de los resultados de las mediciones de la caja ACUMEX P-47 molde 1	85
FIGURA 71 Gráfica de los resultados de las mediciones de la caja GR-31	85
FIGURA 72 Gráfica de los resultados de las mediciones de la caja GR-31	86
FIGURA 73 Localización de mediciones de temperatura de expulsión en la caja MC30H	87
FIGURA 74 Resultados de modelación analítica caja MC30H, Deformación vs longitud a lo largo de la pared	90
FIGURA 75 Resultados de modelación analítica caja ACUMEX P-47, Deformación vs longitud a lo largo de la pared	90
FIGURA 76 Resultados de modelación analítica caja GR-31, Deformación vs longitud a lo largo de la pared	91
FIGURA 77 Simulación en ANSYS de la contracción térmica de la caja MC30H	92
FIGURA 78 Resultados de simulación en ANSYS de los puntos medidos en las muestras físicas de la caja MC30H.....	92
FIGURA 79 Simulación en ANSYS de la contracción térmica de la caja ACUMEX P-47	93
FIGURA 80 Resultados de simulación en ANSYS de los puntos medidos en las muestras físicas de la caja ACUMEX P-47	93
FIGURA 81 Simulación en ANSYS de la contracción térmica de la caja GR-31.....	94
FIGURA 82 Resultados de simulación en ANSYS de los puntos medidos en las muestras físicas de la caja GR-31	94
FIGURA 83 Resultados de la simulación de Mold-Flow de la deformación de la caja MC30H	95
FIGURA 84 Resultados simulación de Mold-Flow de la deformación de la caja MC30H.....	96

FIGURA 85 Resultados simulación de Mold-Flow de la distribución de temperaturas de expulsión de la caja MC30H	96
FIGURA 89 Curva de diseño de un producto, tres temperaturas de expulsión y un radio definidos y el espesor como variable dependiente	103
FIGURA 90 Curva de diseño de un producto, una temperatura de expulsión y tres espesores definidos y el espesor como variable dependiente	104
FIGURA 91 Curva de diseño de un producto, una temperatura de expulsión y tres espesores definidos y el espesor como variable dependiente	105
FIGURA 92 Propuesta de nuevo desarrollo para compensación de cavidades de moldes de inyección de plástico para piezas con forma de contenedor	107

INDICE DE TABLAS

	Página
TABLA 1 resultados de las 5 pruebas de tensión del Formolene 2510A y 2510W	27
TABLA 2 Propiedades térmicas del polipropileno virgen	28
TABLA 3 Resultados medición de deformación bajo cargas de prueba de fuga externa en la batería BCI 42	33
TABLA 4 Comparación de resultados de simulación y datos de campo del proceso de inyección, Tapa BCI42	36
TABLA 5 Comparación de resultados de simulación y datos de campo de pruebas de fuga externa	37
TABLA 6 Comparación de resultados CAE entre diseño original y propuesto, TAPA BCI42	41
TABLA 9 Comparación de geometrías y materiales para validación experimental	82
TABLA 10 Mediciones en máquina de coordenadas de la caja MC30H	83
TABLA 11 Mediciones en máquina de coordenadas de la caja ACUMEX P-47 molde 1	83
TABLA 12 Mediciones en máquina de coordenadas de la caja ACUMEX P-47 molde 2	83
TABLA 13 Mediciones en máquina de coordenadas de la caja GR-31	84
TABLA 14 Mediciones de la temperatura de expulsión de la caja MC30H	87
TABLA 15 Caracterización del coeficiente de expansión térmica de PP80%20% y PP Moplen	88
TABLA 16 Deformación y posición de los nodos de la simulación de Mold-Flow, Caja MC30H	95

Capítulo 1 Introducción

El uso de herramientas de ingeniería asistida por computadora (CAE) para evaluar diseños reduce problemas potenciales porque identifican problemas que no se pueden ver a priori. Es sabido que, hoy en día, el uso de estas herramientas es un estándar para las empresas porque reducen el tiempo de introducción de nuevos productos al mercado. Al utilizar herramientas CAE, la versión introductoria del producto final tiende a ser de alta calidad, es decir, el diseño tiene mayor probabilidad de ser funcionalmente robusto ante variaciones de las condiciones del entorno, por ejemplo en parámetros de fabricación, en propiedades del material, en su geometría o inclusive en las condiciones de uso del mismo.

Aunque las ventajas del uso de herramientas CAE son muchas, su implementación durante el proceso de diseño y manufactura es muy costoso. Esto se debe a que se requiere del uso de equipos muy sofisticados; además, el personal que utiliza el software debe de estar muy bien capacitado. Cuando se utilizan estas herramientas para realizar el diseño del producto, el proceso de diseño puede encarecerse debido a que se requiere de un tiempo prolongado para desarrollar modelos validados. En particular, el uso de estas herramientas en las etapas tempranas del proceso de diseño, es decir, cuando este está todavía lejos de ser definido, no es económicamente conveniente. En esos momentos, es recomendable utilizar otras herramientas, como reglas empíricas o modelos analíticos.

Para ilustrar esta problemática se puede considerar los productos de plástico inyectado. Cuando se hablan de herramientas CAE para el proceso de inyección de plásticos se estima que el tiempo de análisis típico para un caso particular requiere horas; y en ciertos casos hasta días. El tiempo de análisis depende del número de elementos del modelo desarrollado, del tipo de análisis que se hace, así como de la capacidad computacional del equipo utilizado.

La modelación computacional del proceso de inyección se encarece debido a que el software de elemento finito para el proceso de inyección requiere de caracterización exacta del material que se está utilizando, lo cual implica realizar pruebas reológicas, térmicas y mecánicas del mismo. Si la

empresa o institución que realiza las simulaciones no tiene la capacidad de caracterizar lo materiales, tendrá que adquirir servicios de caracterización a externos incrementando el costo de las simulaciones.

Debido a que el proceso de diseño con herramientas CAE es caro, diferentes autores han propuesto herramientas para reducir el esfuerzo de diseño tales como: herramientas cualitativas, que describen problemas potenciales; manuales de diseño para manufactura y ensamble que están basados en reglas de dedo y datos experimentales; y herramientas de visualización que evalúan el diseño de la pieza y responden a problemas potenciales de manufacturabilidad.

Las herramientas propuestas no reemplazan el uso de herramientas CAE, sino más bien deberían complementarlo para una aproximación más rápida al diseño óptimo. Existen pocas herramientas analíticas que describan cualitativa y cuantitativamente problemas potenciales de diseño. El presente trabajo parte del análisis de un caso particular para proponer soluciones analíticas y lograr describir de manera cuantitativa y cualitativa los potenciales de diseño de un producto. Como se demostrará, aunque el caso es particular en la profundidad de su análisis, el problema abordado es general en el contexto del tipo de geometría del producto y los defectos de calidad asociados con el diseño de éste.

1.7 Antecedentes

Todo producto hecho de plástico por medio de inyección tiende a deformarse debido a consideraciones del proceso, del material y de la geometría del producto (Figura 1). En muchos casos se le añaden restricciones geométricas para reducir la deformación del producto. En algunos otros casos, se utilizan herramientas estadísticas para reducir el efecto de pandeo en las piezas manufacturadas. Cuando el producto se ensambla con otro producto, la deformación de las paredes es un tema que se debe de considerar minuciosamente. No existen herramientas analíticas que ayuden al diseñador a saber la magnitud y la forma en la que se deformará la pieza.

Hoy en día, las herramientas CAE son capaces de evaluar y predecir las deformaciones que sucederán después de que se haya expulsado la pieza en el proceso de inyección. Sin embargo, no es posible diseñar el producto utilizando las herramientas CAE de una manera iterativa. Lo ideal sería tener una herramienta analítica que ayudara a entender las tendencias de la deformación tomando en consideración aspectos del proceso, del material y de la geometría de la pieza. Y después poder evaluar el diseño con la herramienta CAE. Este trabajo analiza la deformación que sucede en los productos con forma de contenedor; el análisis puede aplicarse a otro tipo de casos.

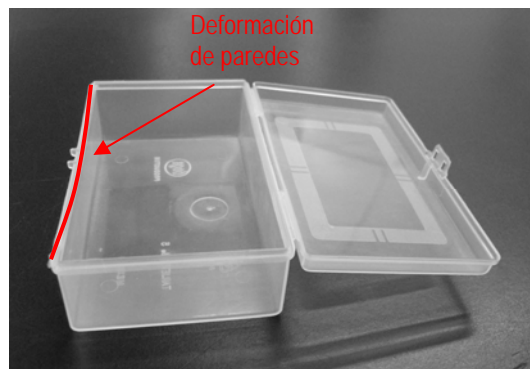


FIGURA 1 Deformación de las paredes del producto, caja para tarjetas de presentación

Un caso de producto deformado es un contenedor para discos de computadora (Figura 2), el producto presenta, generalmente, la deformación en las paredes; Existe una característica que permite mantener cerrada las dos tapas del contenedor. Si la deformación de ese producto es muy

grande, entonces tendrá problemas de ensamble. La caja no va a cerrar; por lo tanto el producto ya no es funcional. Es por eso que el estudio de la deformación es importante.



FIGURA 2 Problema de funcionalidad debido a deformación del producto, contenedor para discos

En el año 2006, Johnson Controls (JCI) inició un proyecto con el Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, en el cual se estableció el uso de herramientas CAE para analizar algunos productos de una de sus plantas y explorar posibles ahorros en volumen de material, tiempo de ciclo, sin sacrificar desempeño estructural. El desarrollo de propuestas validadas requirió de alrededor 1600 horas, considerando cuestiones de logística.

Durante el proyecto se realizaron análisis de elementos finitos del proceso de inyección y del desempeño estructural bajo cargas para evaluar las modificaciones. Los modelos fueron validados con datos de campo del proceso de inyección. Diseñadores expertos en JCI-USA y ENERTEC aprobaron las modificaciones. Al término del proceso de re-diseño de la pieza seleccionada se propusieron modificaciones a la pieza; tal que ahorran costos de material, tiempo de ciclo y reduce la deformación de la pieza. La información generada durante el proyecto ITESM-JCI fue analizada para la realización de este trabajo; partiendo del análisis de la metodología de diseño.

JCI es una empresa que tiene presencia internacional. Una de las actividades de JCI es la manufactura de baterías para el sector automotriz. Cerca del 80% de las baterías manufacturadas por JCI se venden a través del mercado de repuesto para automóviles y el 20% restante se vende como equipo original. Las marcas que manufactura son: LTH, Optima, Cronos, America Racing y Diener.

JCI tiene presencia en Nuevo León, en las plantas ENERTEC, Escobedo, Ciénega de Flores y otras. Las baterías automotrices en general están compuestas de tres partes principales que son: celdas, tapa y caja. Figura 3.



FIGURA 3 Batería grupo 30H

1.8 Definición del problema

Como se mencionó anteriormente, el proceso de diseño basado en herramientas CAE es costoso, debido a eso, el uso de la herramientas tiene que ser lo más óptimo posible para tener resultados confiables y hacer el proceso lo menos costoso posible. Diseñar un producto a manera de prueba y error es prolongado, es decir, evaluar todos los casos posibles e ir descartando y seleccionando los casos óptimos hasta llegar al diseño final.

Durante el proyecto JCI-ITESM se tuvieron que evaluar varias versiones del producto para poder estimar la dimensión mínima a la que se podía reducir una característica. El tiempo de diseño durante el proyecto pudo haberse reducido si hubiera herramientas que redujeran el número de iteraciones en el proceso de diseño para apoyar las herramientas CAE.

Existen herramientas que se utilizan para reducir el tiempo de diseño. Estas herramientas se derivarán del caso de estudio. Por esto, se requiere de analizar la metodología llevada a cabo durante el proyecto para detectar cuellos de botella y proponer soluciones analíticas a los problemas potenciales de diseño.

1.9 Perspectivas de otros autores

Rebello, et. al. [1] indican que las herramientas computacionales no han sido diseñadas para las primeras etapas del proceso de diseño, debido a que varios de los parámetros iniciales en el diseño tiene que ser adivinados y los resultados de las simulaciones pueden ser de poca confiabilidad. Están conscientes de que las herramientas numéricas requieren de muchas horas y en algunos casos un par de días. Proponen el uso de herramientas de evaluación rápida para responder a aspectos de manufactura en etapas tempranas de diseño. Desarrollaron dos herramientas cualitativas para soportar el proceso de diseño: una herramienta cualitativa para analizar el flujo en el proceso de vaciado a alta presión y otra para analizar cualitativamente el aspecto térmico del proceso de vaciado a alta presión. Concluyen su trabajo diciendo que las herramientas desarrolladas facilitan el proceso en etapas tempranas de diseño.

Ren [2] propone una herramienta para evaluar la manufacturabilidad de piezas hechas mediante vaciado por gravedad. Expone que si un diseño es pasado a los ingenieros de manufactura sin las evaluaciones correspondientes de manufacturabilidad, muy probablemente el diseño tiene que ser regresado a los ingenieros de diseño para hacer las modificaciones correspondientes. Para prevenir esta labor iterativa que consume mucho tiempo y recursos; la evaluación del diseño, durante el proceso de diseño, debe ser apoyada simultáneamente por los conceptos de manufactura para poder identificar las situaciones en que ciertas características del producto no pueden ser manufacturadas; La herramienta propuesta se llama "STL toolkit" y esta basado en la evaluación cualitativa de manufacturabilidad de la geometría del producto mediante el proceso de vaciado.

Fischer [3] presenta un manual dedicado al pandeo y encogimiento de piezas hechas de plástico por medio del proceso de inyección. En su manual expone las causas que provocan que las piezas se pandeen; expone cuestiones de diseño para prevenir el pandeo. Propone métodos para controlar el pandeo y el encogimiento de piezas enfocados en cuatro cosas: en las condiciones del proceso de inyección, en las consideraciones del material, en las consideraciones del herramental y en la geometría de la parte de diseñada. En su manual no propone ninguna herramienta

analítica que prediga la magnitud y la forma de la deformación de las piezas. En su manual refiera al uso de herramientas CAE como herramientas que pueden dar información muy valiosa, como pueden dar información que no sirve para nada.

Malloy [4] presenta un manual de diseño para manufactura y ensamble de piezas hechas de plástico mediante el procesote de inyección de plásticos. En su manual propone herramientas analíticas para evaluar el desempeño estructural de las piezas diseñadas durante su periodo de vida útil. En su manual no propone herramientas analíticas para evaluar el impacto del proceso en la configuración final del producto. Las formulaciones matemáticas que utiliza para evaluar el desempeño estructural del producto son muy sencillas y en dos dimensiones. En su metodología de diseño propone la aplicación de los conceptos expuestos antes de evaluar el diseño en software de elemento finito.

De la perspectiva de otros autores se puede decir que las herramientas de evaluación rápida responden a aspectos de manufactura que están enfocados a describir cualitativamente el problema potencial. Los manuales de diseño responden a aspectos del desempeño del producto durante su vida útil; y otros exponen causas del pandeo y cómo controlarlo mediante procesos, material, diseño del herramental de la pieza. Otros manuales de diseño de producto generalmente dan reglas de dedo empíricas, es decir basados en datos empíricos. Las herramientas analíticas que existen están enfocadas en mejorar la manufactura. Un camino alternativo sería desarrollar herramientas analíticas que rescriban cualitativamente y cuantitativamente al caso analizado.

1.10 Hipótesis

Las herramientas analíticas combinadas con herramientas CAE pueden reducir los esfuerzos de diseño de piezas hechas de plástico mediante el proceso de inyección. En particular, los modelos termoelásticos pueden dar información cualitativa y cuantitativa acerca de la deformación de piezas hechas con plástico en zonas particulares de geometrías específicas.

1.11 Objetivos

De acuerdo a la problemática planteada y a las perspectivas de otros autores, los objetivos de este trabajo son:

- Analizar el proceso de diseño del caso tapa BCI 42
- Identificar cuellos de botella durante este proceso
- Desarrollar herramientas analíticas que permitan reducir el esfuerzo de diseño

1.12 Alcance

El alcance de este trabajo fue desarrollar herramientas analíticas para ayudar al proceso de diseño de piezas inyectadas en plástico con forma de contenedor.

El presente trabajo:

- Propone una herramienta analítica basada en modelos termoelásticos
- Valida esta herramienta analítica con datos experimentales y con análisis de elementos finitos.
- Establece las capacidades y limitaciones del modelo desarrollado

Como se demostrará, la herramienta analítica no suplirá el uso de herramientas CAE. El modelo desarrollado complementa a las herramientas CAE y podrá utilizarse en etapas tempranas de diseño, así el diseñador tendrá una idea del comportamiento del diseño al variar parámetros geométricos de un producto en forma de contenedor. Al usar la herramienta analítica, el proceso de iteración de diseño se simplifica, y permitirá aplicar las herramientas CAE en una etapa en que se puede maximizar su uso, es decir, cuando se puede pensar en optimizar el diseño del producto.

Capítulo 2 Análisis del proceso de diseño e identificación de cuellos de botella: Caso tapa BCI 42

Debido a la problemática definida se requirió de analizar el proceso de diseño de un caso particular. Durante el análisis del proceso se detectaron cuellos de botella y se propusieron herramientas analíticas para apoyar el proceso de diseño en uno de los cuellos de botella encontrados. Como paso inicial se identificó un producto que ocupara más material que el promedio, además que tuviera una demanda alta y que fuera ideal para poder optimizar, tanto la geometría del producto como el proceso de inyección. El producto identificado fue la tapa para batería BCI 42.

En el proyecto se estableció el uso de herramientas CAE para evaluar el impacto de los cambios de la geometría en el proceso de inyección y en el desempeño estructural. Para evaluar el proceso de inyección se utilizó Mold-Flow Plastics Insight (MPI) y para el desempeño estructural se utilizó CATIA.

Los objetivos trazados en el proyecto fueron:

- Mejorar el desempeño térmico del molde para la tapa BCI 42 reduciendo el tiempo de ciclo mediante la modificación del diseño
- Reducir el volumen de material utilizado en el producto
- Mantener la funcionalidad del producto
 - Sin perjudicar las características para estibado
 - Sin perjudicar el ensamble de la pieza
- Mantener buen desempeño estructural del producto
 - El producto modificado pase con éxito las pruebas de calidad aplicadas

En este capítulo se presenta el análisis de la metodología del caso de diseño de la tapa para batería. El capítulo empieza por la descripción de la metodología del proyecto; después se explica cada paso de la metodología. Una revisión de literatura es realizada para ver las problemáticas y soluciones que presentan otros autores. Por último se identifican cuellos de botella y se explica la necesidad requerida para lo que convendría tener herramientas analíticas.

2.1 Diagrama de flujo del proceso de diseño

Se representa a manera de diagrama de flujo la metodología llevada durante el proyecto de la tapa BCI 42. Los pasos llevados durante el proceso se muestran en el figura 4 y se explican en la siguiente parte.

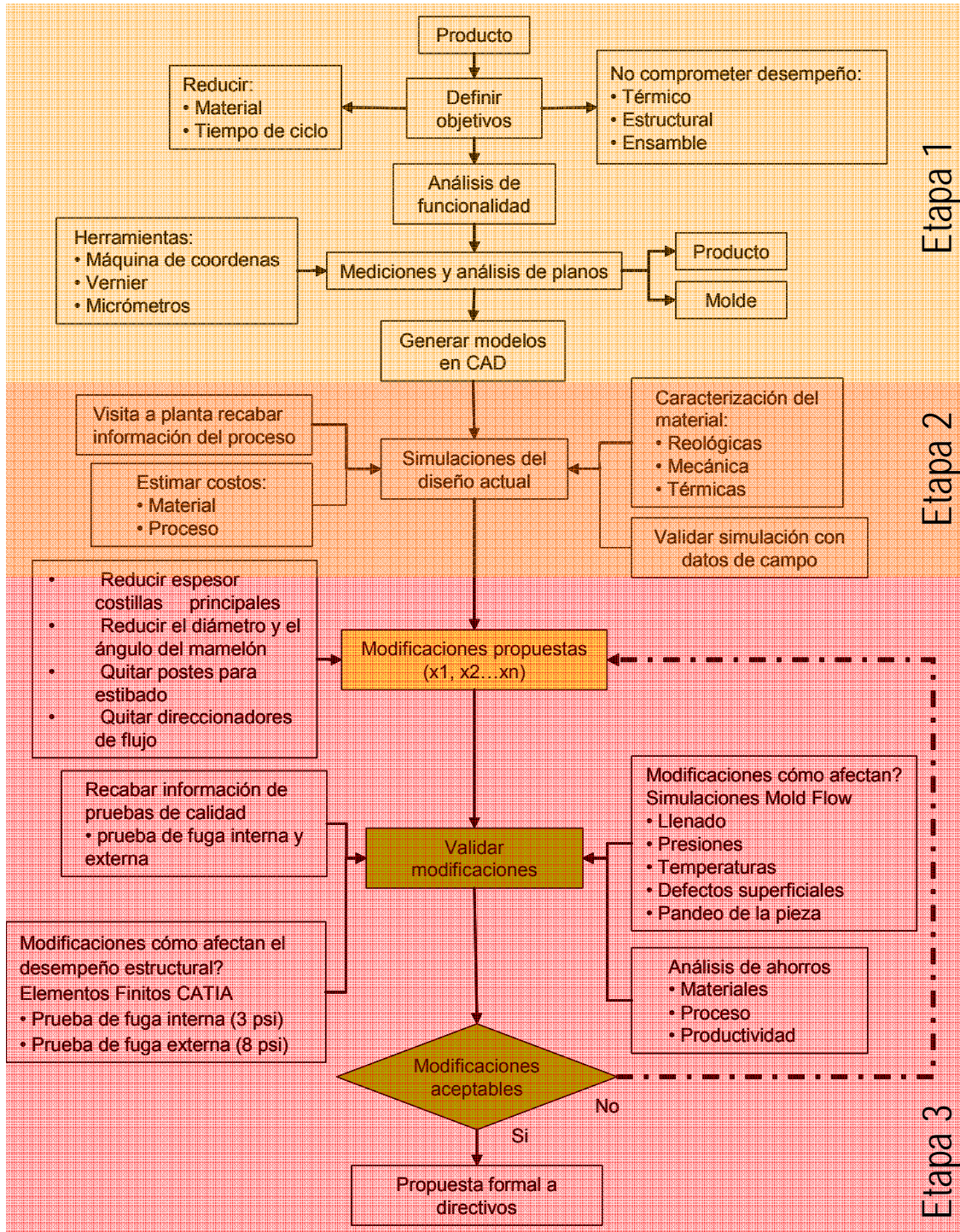


FIGURA 4 Metodología del proceso de diseño

2.2 Análisis del proceso de diseño del caso tapa BCI 42

En general la metodología del proyecto se divide en tres partes (Figura 4). En la primera parte se seleccionó el caso de estudio y se realizó un análisis de funcionalidad de todas las características del producto para entender el diseño. En el análisis se establecieron los cambios potenciales que se le pudieran hacer al producto, se obtuvieron planos y muestras del producto. Las muestras se midieron para su posterior modelación en CAD.

En la segunda parte se desarrollaron modelos de elementos finitos para simular el proceso de inyección del producto actual; las simulaciones requirieron de caracterizaciones del material. Las caracterizaciones requeridas fueron: propiedades mecánicas, reológicas y térmicas. Los resultados de las simulaciones del diseño actual se compararon con datos de campo recavados durante visitas a la planta. La validación de los modelos fue exitosa con un rango de error de alrededor de un 15%.

En la tercera parte se realizaron cambios al diseño de una manera iterativa, es decir, se iban reduciendo dimensiones por pasos hasta llegar a concluir la máxima disminución; las modificaciones se evaluaron mediante las simulaciones en CAE. En algunos otros casos se propusieron quitar características tales que no afectaban la funcionalidad ni desempeño estructural del producto. Las modificaciones se validaron con: datos de campo de pruebas de calidad que se la hacen al diseño actual, con la comparación de los resultados de las simulaciones en CAE del diseño actual y de la versión re-diseñada. Se realizó un análisis de ahorros del producto en el que se estimó el costo de producción del diseño actual, el ahorro del nuevo diseño y las prestaciones en el proceso. Cuando las modificaciones fueron aceptables para el equipo del proyecto, las modificaciones fueron propuestas formalmente ante los directivos de la planta.

A continuación se explica a detalle cada pasó de la metodología para hacer evidentes las necesidades durante el proceso de diseño.

2.2.1 Descripción y análisis de funcionalidad del producto tapa BCI 42

La tapa BCI 42 tiene las siguientes características generales: esta hecha de polipropileno tanto de reciclado como de PP virgen, pesa alrededor de 183 gramos sin los bujes de plomo y sus dimensiones generales son 237 x 173 x 36.3 mm.



FIGURA 5 Características del producto seleccionado en el caso de diseño

El producto contiene dos bujes de plomo; estos bujes van soldados a los postes que comunican con las celdas internas de la batería. En este producto, el buje que va en el lado positivo tiene un diámetro mayor que el de lado negativo. La manera de incrustar el plomo en la tapa es en el proceso de inyección. Cada vez que el molde se abre para sacar las piezas inyectadas, el operador toma el buje positivo y negativo y los inserta dentro del molde. Una vez insertados los bujes se inyecta la pieza y quedan adheridos a la pieza. La característica que hace que los bujes queden incrustados en el plástico se denomina “mamelón” marcado como 1 en la figura 5 y en ingles se denomina “bushing”. Figura 6.

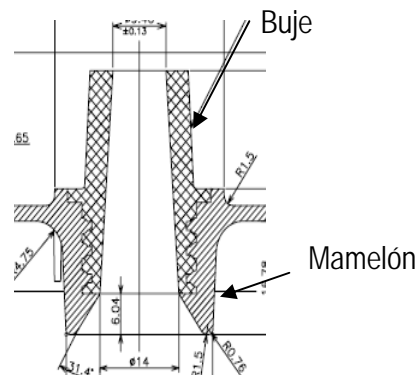


FIGURA 6 Buje y mamelón, diseño original tapa BCI 42

El mamelón tiene un ángulo de incidencia que sirve para que, al momento del ensamble de la batería, el poste de las celdas internas se introduzca hasta llegar a hacer contacto con el buje. La magnitud de este ángulo de incidencia permite agregar o quitar material en el mamelón, así como el diámetro del mamelón.

Otras características del producto son los postes para estibado, marcados como 2 en la figura 5. Los postes permiten que se puedan apilar una tapa arriba de otra para propósitos de transporte. Los detalles de los postes se muestran en la figura 7. El poste no es hueco por lo que le añade una cantidad considerable de material a la pieza. La parte hueca que se muestra en la figura tiene dos propósitos: el primero es que sirve para que al momento de estibar las tapas, el extremo de los postes se insertan en la parte hueca de la tapa contigua para prevenir que no se deslicen las tapas en la columna de estibado; el segundo propósito es que sirven para insertar un tapón de plástico que cubre para los bujes de plomo. Esto; y así, previene cortos debido a contactos entre los polos una vez que la batería ya esta en funcionamiento. Los postes tienen costillas para reforzar la estructura en la zona.

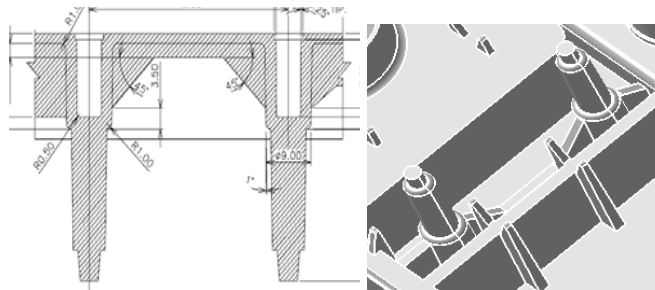


FIGURA 7 Postes para estibado, diseño original tapa BCI 42

Hay otras características para el estibado que son los dos postes en las esquinas de la tapa, marcados con el número 5 en la figura 5. Los postes hacen contacto con la superficie externa de la tapa contigua permitiendo nivelar la posición de la tapa y promover una buena estabilidad en la columna de tapas estivadas. Figura 8.

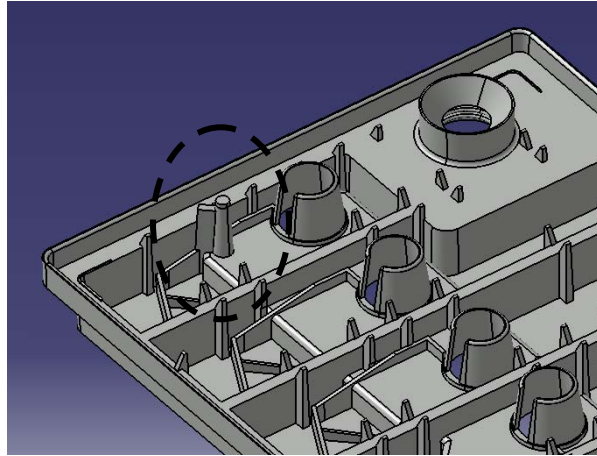


FIGURA 8 Poste para estibado en la esquina, diseño original tapa BCI 42

La tapa se ensambla con la caja de la batería, cada celda debe de tener un sellado hermético para prevenir que cada intercelda este en contacto con las celdas de cada lado, por lo general las baterías que se manufacturan en ENERTEC tienen 6 celdas. Si las interceldas están en contacto físico, ya sea por el medio acuoso, la batería sufre una pérdida de potencial eléctrico; reduciendo la vida de la batería. Figura 9.

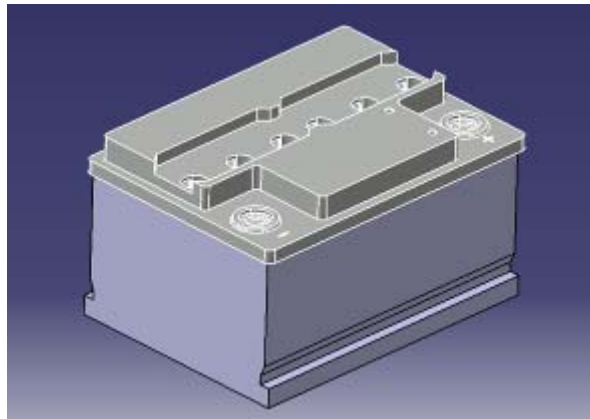


FIGURA 9 Ensamble de la caja con la tapa, batería BCI 42

La característica geométrica que permite que cada intercelda quede sellada herméticamente se le nombra "pista"; está marcada como número 3 en la figura 5. La tapa tiene 7 pistas que hacen contacto con las paredes de internas de la caja para sellar la batería. Para que exista un buen sellado entre la tapa y la batería no debe haber errores en el posicionamiento.

Las pistas del diseño original tienen un espesor de 3.8 mm y el espesor de pared de la caja es de alrededor de 1.5 mm, dejando un rango de 2.3 mm para el error de posicionamiento, se puede apreciar en la figura 10. Además las pistas tienen un ángulo de inclinación que provoca que el espesor en la parte baja de la pista sea mayor. Esto hace que en las zonas de las pistas haya una concentración de material. Junto a las pistas se encuentran las guías que sirven para apoyar al proceso de ensamble de la batería. Las guías obligan a la pared de la caja de batería a hacer contacto con la pista de la tapa

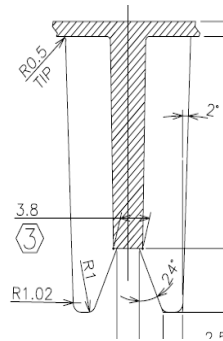


FIGURA 10 Vista transversal de pista y guía, diseño original tapa BCI 42

Una vez que ya esta ensamblada la batería, se llena de ácido y se deja reposar, después se vacía el ácido y se vuelve a llenar. La causa de porqué se llena dos veces la batería es que las placas de óxido de plomo absorben el ácido sulfhídrico reduciendo la concentración de ácido en el medio acuoso, debido a eso se debe de rellenar la batería de liquido con al concentración de ácido correspondiente. Existe una característica de diseño de la tapa que permite que el flujo del ácido sea más eficiente, esta característica se nombra guiador de flujo. Hay un guiador de flujo en cada intercelda de la tapa. El guiador de flujo se muestra en la figura 5 marcado con el número 4. Otra función de los guidores de flujo es que al momento de vaciar el contenido de la batería; si existen residuos materiales, estos quedan atrapados en los guidores y así previenen que se tape el orificio por donde se drena el ácido.

La tapa tiene 6 orificios que se muestran en la figura 5 con el número 6. Los orificios sirven para poder introducir el ácido dentro de cada celda. A cada orificio corresponde una campana de la parte inferior de una tapa, que permite sellar el orificio cuando la batería esta en uso. La tapa BCI 42 lleva dos tapas pequeñas, cada tapita permite sellar 3 orificios de la tapa BCI 42.

Por último, existe una característica en la tapa que puede ser aplicada o no. Esta característica, que se muestra en la figura 5 con el número 7, se añade a petición del cliente y se le denomina "hoyo de carga". En la imagen solo se muestra el lugar donde va el inserto del hoyo de carga. Cuando la tapa es inyectada con el hoyo de carga se le añade un orificio y un cilindro en la parte inferior de la tapa, figura 11.

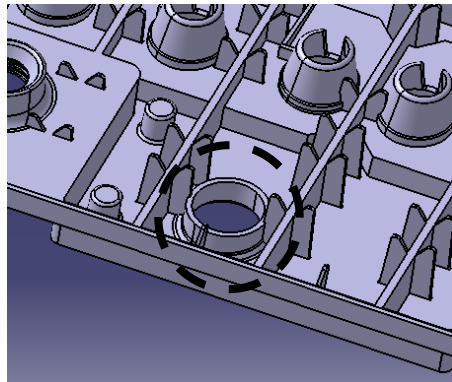


FIGURA 11 Vista isométrica del hoyo de carga, diseño original tapa BCI 42

Las características del diseño de la tapa BCI 42 descritas anteriormente son las que se consideran como críticas para tener buena funcionalidad del producto. Del análisis de funcionalidad hecho se identifica que las dimensiones de algunas de las geometrías pueden ser reducidas, y algunas otras geometrías pueden ser eliminadas.

El tiempo requerido para conceptualizar la funcionalidad de todas las características del producto fue de alrededor de 150 horas; distribuidos en un mes y medio, esta actividad se realizó en paralelo con la actividad de medición y generación de los modelos CAD del producto.

2.2.2 Generación de Modelos CAD de la tapa BCI 42

Para realizar los modelos CAD de las piezas, se analizaron los planos de la tapa 42 en versión 882. Dado que no todas las dimensiones aparecen en los planos, se tomaron muestras de la tapa las características complejas como diámetros, radios y ángulos de inclinación se midieron en una máquina de coordenadas (Figura 12). Otras características sencillas se midieron con vernier. El plano de la tapa BCI 42 no se pudo revisar debido a que no se pudo conseguir.



FIGURA 12 Medición de la tapa BCI 42 en máquina de coordenadas

Para modelar el producto en CAD se tuvo que trazar una estrategia de modelación; la estrategia permite rastrear de una manera eficiente los cambios hechos al modelo. El diseño de la pieza es paramétrico, es decir, si se modifica una dimensión las otras dimensiones son modificadas automáticamente en el dibujo. El modelo CAD de la tapa se muestra en la figura 13.

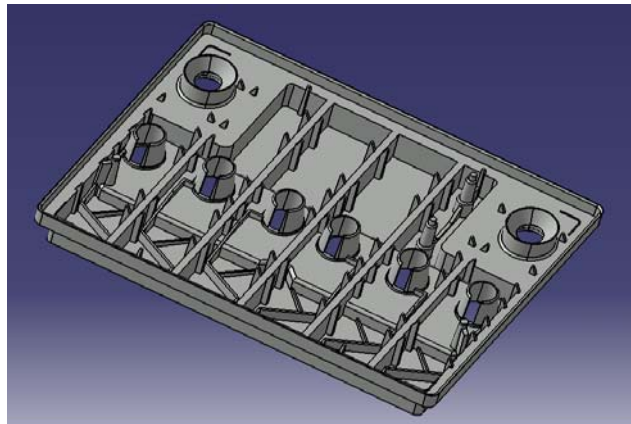


FIGURA 13 Modelo CAD del diseño actual de la tapa BCI42

El tiempo que se llevo medir las muestras y hacer los modelos en CAD fue de alrededor de un total de 400 horas; distribuidos en 4 meses. Un factor que hizo más lento el proceso fue la logística, es decir, para poder obtener la información requerida, se tenía que esperar un tiempo. Por eso las actividades se fueron realizando combinadamente.

2.2.3 Desarrollo de modelos CAE

Para poder validar los diseños se tuvieron que desarrollar modelos en elementos finitos. Primeramente se simuló el proceso de inyección del diseño actual de la tapa, posteriormente se evaluaron las diferentes versiones del producto. El software utilizado fue Mold-Flow Plastics Insight 6.1 (MPI 6.1). Este software tiene la capacidad de simular el llenado de la cavidad de la pieza, el enfriamiento de la pieza y el encogimiento y pandeo (deformación) de la pieza.

En principio MPI se puede utilizar en tres etapas del proceso de diseño de un producto: en el diseño del molde; es decir, en el diseño de la configuración del sistema de colada, la configuración del sistema de enfriamiento, la localización del punto de inyección, etc. Otra etapa en la que se utiliza MPI es en el diseño de la pieza para determinar si el diseño es óptimo o no. Y la tercera etapa en la que se utiliza MPI en el diseño es en la determinación de parámetros de procesos para un producto-molde específico.

MPI cuenta con una base de datos de materiales que se pueden utilizar en simulaciones. Una de las ventajas de MPI es que se pueden crear nuevas bases de datos de materiales; estas bases de datos contienen información de las propiedades térmicas, mecánicas, reológicas, de encogimiento y caracterizaciones de presión-volumen-temperatura. Si se incluyen las propiedades del material utilizado a las simulaciones del proceso de inyección de un producto pueden asegurar resultados muy confiables, es decir, que los resultados de las simulaciones son muy parecidos al proceso real en un rango de error menor.

El procedimiento para hacer un análisis de elementos finitos en MPI es el siguiente:

1. Se importa el modelo CAD en formato STL al MPI
2. Se discretiza la pieza en elementos y nodos (malla de la pieza); los elementos y nodos definen matemáticamente el espacio ocupado por el modelo, sirven para poder resolver un análisis. El elemento en el caso de MPI es un elemento triangular que está definido por tres nodos en sus esquinas. La creación de la malla es un proceso lento debido a que se tienen que obtener ciertas propiedades en la discretización para poder asegurar un análisis confiable.

-
-
3. Se definen los puntos de inyección de la pieza, se re-malla la zona en las que van a estar localizados los puntos de inyección con un tamaño de elemento menor al utilizado en la malla general. En este momento se puede definir el número de cavidades que tendrá el molde; si el molde tiene más de una cavidad, entonces se duplica el modelo hasta obtener las cavidades deseadas, con la configuración deseada.
 4. Se modela el sistema de enfriamiento; en la modelación se definen el tipo de canales utilizados en el modelo. Se pueden modelar elementos de enfriamiento como "baffles" y "bubblers ó fuentes". El modelamiento del sistema de enfriamiento puede hacerse de manera automática o de manera manual. Cuando ya se terminó de modelar el sistema de enfriamiento se definen las entradas del líquido de enfriamiento.
 5. Se modela el sistema de colada; el sistema de colada es el canal por donde pasará el plástico fundido para llegar a la cavidad del molde. Se pueden modelar sistemas de colada fría y de colada caliente. Al igual que el sistema de enfriamiento, el sistema de colada se puede modelar de manera manual o de manera automática. Cuando ya está terminado el sistema de colada se inserta un cono que define la localización por donde va a entrar el plástico derretido desde el cañón de la máquina inyectora.
 6. Se define el material a utilizar para el análisis; el material puede ser uno de los incluidos en la base de datos del programa o se pueden utilizar nuevos materiales mediante la creación de una nueva base de datos.
 7. Se define el tipo de análisis que se desea hacer; MPI hace los siguientes análisis: enfriamiento, flujo, llenado, encogimiento, pandeo, ventana de operación, diseño de experimentos, localización del punto de inyección, etc.
 8. Dependiendo del análisis a realizar se definen los parámetros de proceso
 9. Se corre el análisis

Para desarrollar el modelo para la tapa BCI 42 se analizó la configuración del molde; se visitó la planta ENERTEC para ver físicamente el herramental y se analizaron planos del molde. Se descifró la configuración del sistema de colada y de enfriamiento.

La configuración del molde de la tapa BCI 42 es la siguiente:

- El molde esta hecho de acero H-13
- Tres placas, dos cavidades
- Colada fría
- Tres puntos de inyección en cada cavidad
- 4 circuitos de enfriamiento
 - i. Dos circuitos en la parte macho del molde; un circuito tiene 6 baffles y el otro tiene 3 baffles
 - ii. Un circuito que rodea los lados de la cavidad
 - iii. Un circuito en la parte inferior de la cavidad hembra

De acuerdo con la descripción del molde de la tapa BCI 42 se modeló el molde en MPI, figura 14. Con este modelo se pudieron correr los análisis preliminares para tener un punto de partida en la validación de los resultados.

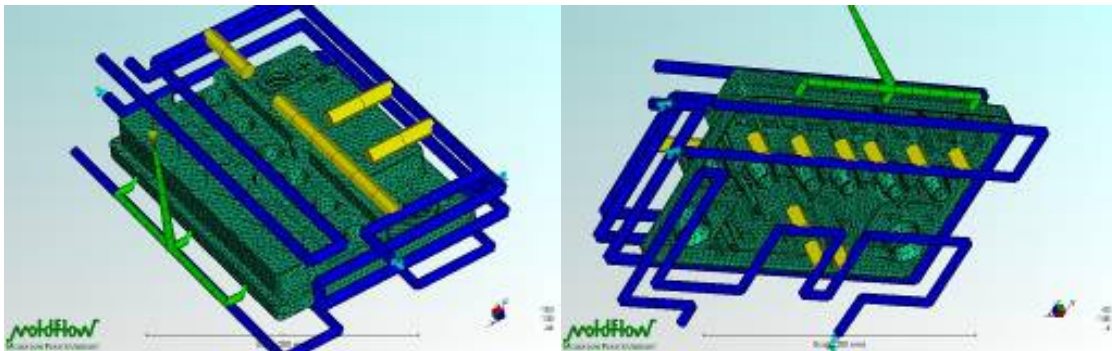


FIGURA 14 Modelo CAE del molde de la tapa BCI 42

El tiempo que requiere para preparar un modelo para hacer un análisis del elementos finitos en MPI es de alrededor de 50 horas; el total días fue de alrededor 10 días. La preparación de la malla tardó alrededor 25 horas y la preparación del sistema de inyección tardó alrededor 25 horas. Considerando que se realizaron 10 simulaciones el total de horas requeridas para la preparación de modelos es de alrededor de 500 horas.

2.2.3.1 Revisión de literatura

Con el propósito de ver las problemáticas que exponen otros autores, se hace una revisión de literatura para entender el tipo de herramientas que se pueden crear para apoyar el proceso de diseño en conjunto con las herramientas CAE. Hay autores que proponen herramientas de identificación de geometrías para análisis de manufacturabilidad. Hay otros autores que proponen herramientas de diseño de moldes de inyección de plástico; el propósito de las herramientas es apoyar el uso de las herramientas CAE, promoviendo el uso de CAE solo para validar los diseños creados con las herramientas propuestas. Hay otros autores que proponen algoritmos de optimización de la creación de mallas para el análisis de elemento finito. A continuación se describen los trabajos de los autores revisados.

Li [5] desarrolló una herramienta que apoya al diseño de sistemas de enfriamiento para moldes de inyección de plástico. El problema que resuelve es la creación inicial de un diseño de un sistema de enfriamiento mediante un algoritmo; los beneficios no son explicados en términos de ahorro de tiempo, sino más bien en ahorro de esfuerzo de diseño. El sistema primeramente descompone la pieza compleja en varias partes sencillas, después el sistema de enfriamiento es generado para cada parte discretizada. Y por último todas las partes son juntadas para formar el sistema de enfriamiento de la pieza compleja. La herramienta se desarrolló con la generación de un algoritmo de reconocimiento de características específicas para el diseño de un sistema de enfriamiento. La herramienta fue utilizada para generar diseños iniciales de sistemas de enfriamiento para un producto y fueron analizados en C-Mold para verificar los diseños; los resultados muestran que los diseños creados por el sistema son aceptables.

Lockett et. al. [6] proponen herramientas para ayudar al diseñador de partes moldeadas a incorporar consideraciones de manufactura en los diseños en etapas tempranas del proceso de diseño. El problema a resolver fue la creación de un algoritmo de reconocimiento de características de piezas hechas de plástico. Así, se pueden analizar los problemas potenciales de manufacturabilidad. No definen beneficios en el proceso de diseño ni ahorros. Desarrollaron una herramienta de reconocimiento de modelos CAD para piezas de inyección de plásticos en la que características del molde son reconocidas mediante una abstracción de superficies llamadas "mid-

surface" de la geometría del producto. El sistema es capaz de detectar costillas, contrafuertes, agujeros y paredes. La herramienta propuesta no se desarrolló, se desarrolló el algoritmo de reconocimiento, que sienta las bases para la herramienta propuesta.

García et. al. [7] exponen que las herramientas CAE para el proceso de inyección de plásticos es usado por muy pocas empresas, debido a que tienen más confianza a la experiencia adquirida. Utilizaron C-MOLD para estimar el espesor crítico de un producto. Corrieron varias simulaciones del producto para poder estimar el espesor crítico. Concluyen que las herramientas CAE predicen con un rango de error considerable la configuración final del producto. Durante el uso de CAE se hicieron validaciones de los parámetros de proceso. El trabajo solo depende de los resultados de las simulaciones, no se identifica el uso de CAE como una herramienta iterativa. El trabajo reportado por ellos no propone herramientas de solución. Sin embargo, es un caso de análisis exitoso; el herramental se manufacturó para producción.

Chen et. al. [8] desarrollaron una herramienta para evaluar la manufacturabilidad de productos moldeados por inyección de plástico. El problema a resolver fue hacer visibles aquellos cambios en el diseño que tuvieran problemas potenciales de manufacturabilidad. La herramienta funciona mediante la detección de relaciones espaciales entre las características que describen al producto. Proponen mejoras en el proceso de diseño como reducciones de tiempo y costo, sin embargo en el reporte no presentan resultados de ahorros. Exponen que la interacción de una característica positiva con una negativa induce a un cambio en el diseño que pueden causar defectos en la pieza; la detección del cambio en el diseño mediante la interacción entre las características es una herramienta que ayuda a evaluar la moldabilidad del producto diseñado. La herramienta fue implementada en un sistema de ingeniería concurrente asistida por computadora así como en un ambiente de desarrollo de procesos para ayudar en la evaluación del diseño de un producto moldeado por inyección de plásticos.

2.2.3.2 Caracterización del PP

El material utilizado en las tapas es Polipropileno Istotáctico virgen, es la marca Formosa en su línea Formolene 2510A y 2510W. Se realizaron caracterizaciones mecánicas, térmicas y reológicas del material utilizado en ENERTEC. Las propiedades mecánicas fueron obtenidas en el laboratorio global de la planta ENERTEC. Los resultados se muestran en la figura 15.

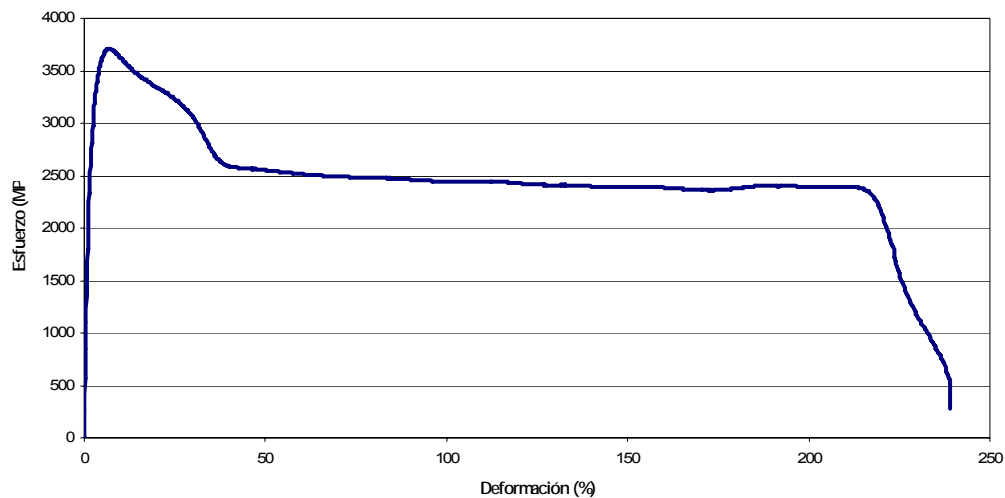


FIGURA 15 Resultado de la prueba de tensión, PP Formolene 2510A virgen

Las pruebas se realizaron de acuerdo a la norma ASTM D 638. En total fueron 5 probetas para cada tipo de material. Las medidas de las probetas en su sección transversal fueron 19.952 mm de ancho por 3.178 mm de espesor y 165 mm de largo. Figura 16.

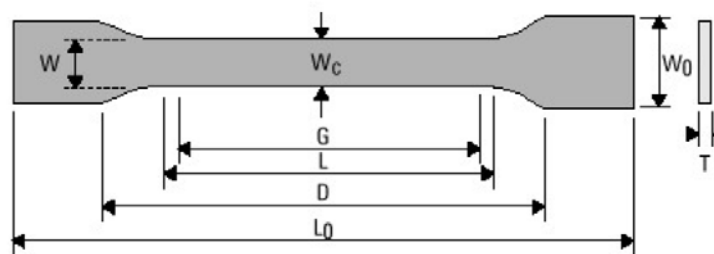


FIGURA 16 Probeta ASTM D 638 Tipo 1

Los resultados de las propiedades mecánicas indicaron que el módulo de Young para el Formolene 2510 A es de 1529.72 MPa y el esfuerzo de cadencia fue de 25.78 MPa. Para el Formolene 2510W el módulo de Young fue de 1523.79 MPa y el esfuerzo de cadencia fue de

25.61 MPa. Las propiedades de ambos productos son muy similares por lo que para efectos de análisis de desempeño estructural no es diferencia. Tabla 1.

TABLA 1 resultados de las 5 pruebas de tensión del Formolene 2510A y 2510W

	Specimen #	Width	Thickness	Strain At Break	Modulus	Strain At Yield	Stress At Yield
		mm	mm	%	Mpa	%	Mpa
Formolene 2510A Virgin	1	12.952	3.178	234.559	1473.6161	6.806	25.599801
	2	12.952	3.178	112.388	1649.9645	6.699	25.917691
	3	12.952	3.178	136.154	1581.3102	6.863	25.888788
	4	12.952	3.178	90.177	1479.3405	6.787	25.742536
	5	12.952	3.178	430.242	1464.4005	6.985	25.754127
	Mean	12.952	3.178	200.704	1529.7264	6.828	25.780589
	Std. Dev.	0	0	139.657		0.106	
Formolene 2510W Virgin	1	12.954	3.175	228.803	1459.0504	6.946	25.543113
	2	12.954	3.175	256.125	1542.2429	6.4	25.577056
	3	12.954	3.175	524.066	1551.2301	6.619	25.608289
	4	12.954	3.175	208.499	1524.6237	6.833	25.682263
	5	12.954	3.175	290.015	1541.8312	6.701	25.659096
	Mean	12.954	3.175	301.602	1523.7957	6.7	25.613963
	Std. Dev.	0	0	128.122		0.209	

Las pruebas reológicas y térmicas del material fueron obtenidas del personal de JCI-USA, además se realizaron pruebas en reómetro de departamento de química a cargo del Dr. Jaime Bonilla; los resultados recibidos fueron para el formolene 2510A y polipropileno reciclado. Los datos fueron comparados con el modelo que presenta el Mold-flow para el polipropileno genérico; los datos de todos los materiales fueron comparados gráficamente. Figura 17. Se puede observar que el comportamiento reológico del PP Formolene 2510A y el PP reciclado son muy parecidos, por lo que para efectos de simulación del flujo dentro de la cavidad no hace diferencia. La comparación de los dos perfiles con el perfil del modelo de MPI es también muy similar, por lo que para efectos prácticos se utilizó el modelo que el software utiliza para el PP.

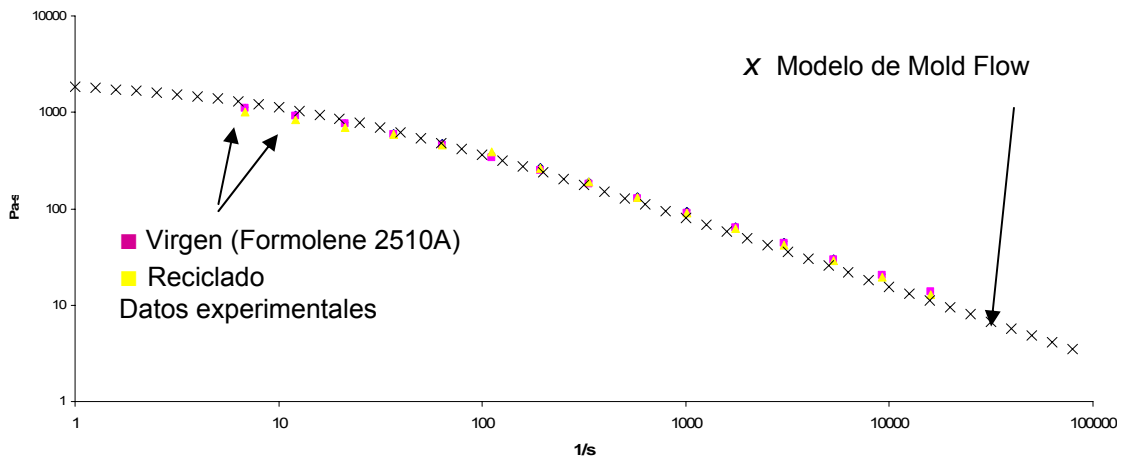


FIGURA 17 Velocidad de corte vs viscosidad de Polipropileno virgen y reciclado

Los resultados de las propiedades térmicas fueron la conductividad térmica y la capacidad calorífica del PP virgen. Los resultados se muestran en la tabla 2

TABLA 2 Propiedades térmicas del polipropileno virgen

		PP Normal
Melt Density (g/cm ³)		0.7641
Thermal Conductivity (Btu/h in °F)		0.07080 ± 0.0015
Heat Capacity (J/g°C)	10°C	1.1405
	20°C	1.1460
	30°C	1.1540
	40°C	1.1650
	50°C	1.1780
	60°C	1.1905
	70°C	1.2030
	80°C	1.2155
	90°C	1.2270
	100°C	1.2410
110°C	1.2520	

2.2.3.3 Obtención de datos de campo del proceso

Los parámetros de proceso que se introdujeron en las simulaciones fueron obtenidos de mediciones del proceso real. Se requirió de visitar la planta ENERTEC para tomar mediciones del proceso de inyección. Se tomaron lecturas de las 4 zonas de la maquina de inyección, las zonas se muestra en la figura 18. Las temperaturas que reportaron los termopares de las 4 zonas son las siguientes:

- Zona 1: 451 Fahrenheit (232.7 Celsius)
- Zona 2: 402 Fahrenheit (205.55 Celsius)
- Zona 3: 416 Fahrenheit (213.33 Celsius)
- Zona 4: 112 Fahrenheit (44.44 Celsius)

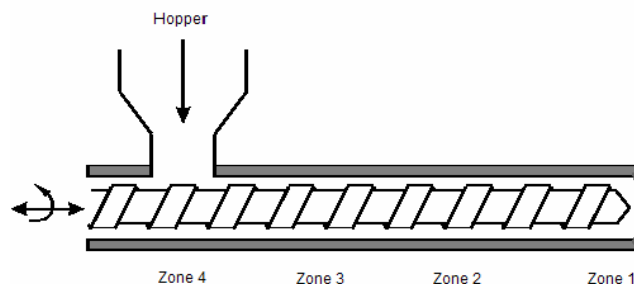


FIGURA 18 Zonas de temperaturas del cañón de inyección

La temperatura de la masa fundida es la de la zona 1, durante las simulaciones preliminares se utilizó el valor de la zona 1. Sin embargo, se encontró que la temperatura real de la masa fundida era diferente. Para validar el valor de la temperatura se utilizó una pistola infrarroja Raytek especial para medir temperatura (Figura 19). Se tomó lectura de la temperatura de la masa en la nariz del cañón; se hicieron tres mediciones que fueron: 184 C, 190 C, 185 C. Las mediciones se hicieron en la planta ENERTEC en marzo de 2007.



FIGURA 19 Instrumento para medir temperatura, Pistola Infrarroja Raytek

También se tomó la temperatura de la superficie de las cavidades del molde. Se utilizó el mismo instrumento para medir la temperatura de las paredes de las cavidades del molde (Figura 20). Las temperaturas medidas fueron las siguientes: 40 y 40.2 Celsius en la superficie de pared de la parte macho del molde y 41.3 Celsius en la pared de la parte hembra del molde. Estas mediciones demuestran que la cavidad completa se puede asumir que esta alrededor de los 40 Celsius. Esta es la temperatura utilizada para las simulaciones de elementos finitos.



FIGURA 20 Cavidades macho y hembra del molde tapa BCI 42

La temperatura de la pieza al momento de ser expulsada de la cavidad también fue medida; se midieron dos espacios en la pieza. El primer lugar medido fue la superficie superior de la pieza; se muestra marcado con 1 en la figura 21 mostrada abajo. El segundo lugar medido fueron las costillas principales; marcadas como dos en la figura 21. Se realizaron 3 mediciones en cada zona; los resultados de las mediciones fueron:

- 64.5, 65 y 66 C en el lugar (1)
- 80, 78 y 81.5 C en el lugar (2)

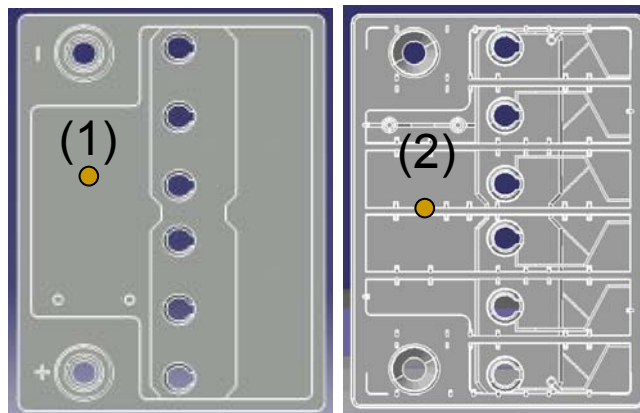


FIGURA 21 Espacios donde se midió la temperatura de expulsión, Tapa BCI 42

Se toman lecturas de las presiones y tiempos de llenado y empaquetado de la pieza; durante el proceso de inyección la pieza es llenada al 90% de la cavidad en la primera inyección, el tiempo que se tarde en llenar la cavidad es de 3.5 segundos con 1100 psi de presión hidráulica. Después se llena el 10% restante en 6.5 segundo a una presión de 900 psi de presión hidráulica. Las distancias que recorre el barril son en total 6.5 pulgadas de las cuales, 5 son recorridas en la primera inyección y las 1.5 restantes se recorren en el empaquetamiento de la pieza.

El líquido utilizado para enfriar las cavidades es agua enfriada por medio de torres de enfriamiento. La temperatura del agua según mediciones fue de 22.3 Celsius. La forma de medir la temperatura del líquido de enfriamiento fue apuntando el instrumento a la tubería donde se distribuye el agua a todos los circuitos del sistema de enfriamiento. El flujo del sistema de enfriamiento no pudo ser medido con algún instrumento porque no había instrumentos disponibles en el momento, sin embargo se estimó que el flujo total en todas los circuitos de enfriamiento era de 52 litros por

minuto; dividiendo el flujo total entre el número de circuitos se obtiene el flujo estimado de cada circuito; el flujo en cada circuito es de 13 litros por minuto.

Se obtuvo también el perfil de llenado de la pieza (Figura 22) mediante la técnica de “disparos parciales” (short shots). La manera de obtener el perfil de llenado es modificar la distancia que recorre el barril de la máquina inyectora; se modificó 6 veces la distancia recorrida por el barril; desde 0 a 6.5 pulgadas. El resultado fue obtener 6 piezas con diferentes llenados de la cavidad que muestran el perfil de llenado de la cavidad.

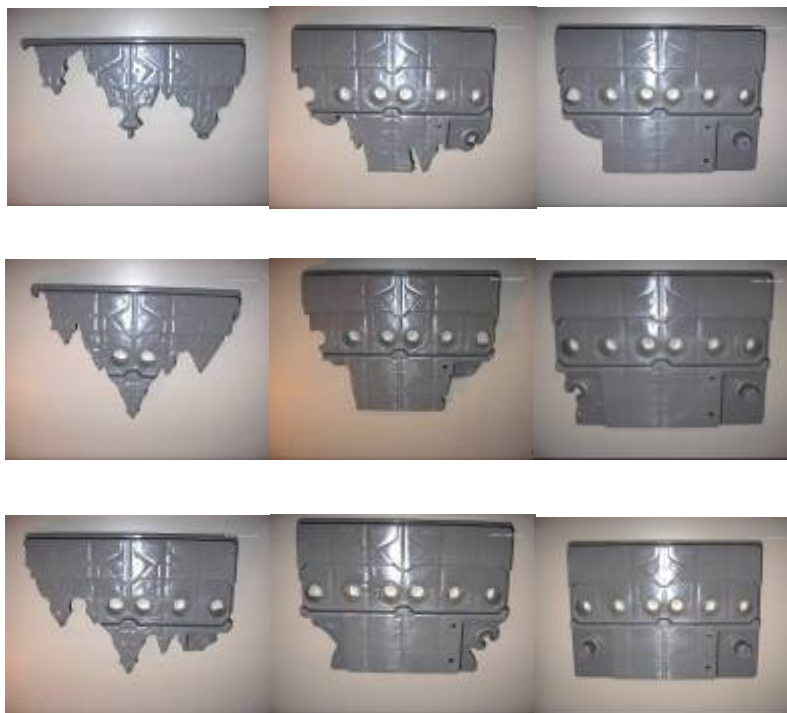


FIGURA 22 Perfil de llenado de la tapa BCI 42

2.2.3.3.1 Pruebas de Calidad

Se visitaron las líneas de ensamble de la planta ENERTEC en Enero de 2007 nuevamente para obtener información de pruebas de calidad que se realizan al producto. La prueba que se analizó fue la prueba de fugas internas y fugas externas. Una vez que las baterías ya están ensambladas, se pasan por un módulo dentro de la línea de producción en la que se les aplica aire a presión en cada celda de la batería para detectar si existe un mal sellado entre la tapa y la caja de la batería (Figura 23). La empresa define como fuga interna al defecto de mal sellado entre celdas y nombra

fuga externa al defecto de mal sella de las celdas con el exterior. En la prueba de fuga interna se aplica una presión interna de 3.0 psi y en la prueba de fuga externa se aplica 8.0 psi.

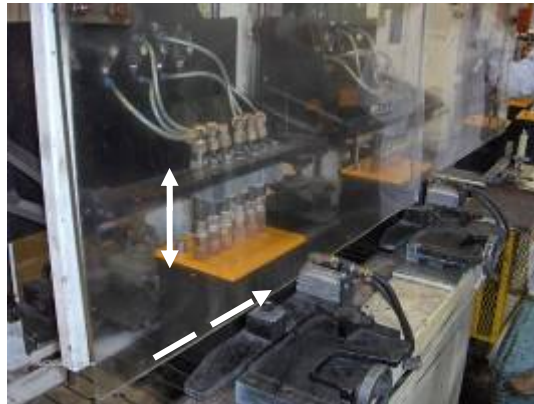


FIGURA 23 Prueba de fuga interna durante el proceso de ensamble

Se midieron experimentalmente las deformaciones máximas que sufrían las tapas durante las pruebas de fugas internas y externas; con el propósito de validar las simulaciones de elementos finitos. La manera de tomar las mediciones fue con dos indicadores de carátula como se muestra en la figura 24.



FIGURA 24 Arreglo para medir deformaciones, Batería ensamblada BCI 42

Sólo se pudo realizar la prueba de fuga externa debido a la disponibilidad del equipo en la planta. Los resultados esperados eran que se deformara hacia el exterior en todos los casos, sin embargo, cuando se le aplicó presión a solo una celda, la deformación fue hacia el interior. Cuando se le aplicaron presión a todas las celdas al mismo tiempo la deformación obtenida fue hacia el exterior del la pieza. Los resultados se muestran en la tabla 3.

TABLA 3 Resultados medición de deformación bajo cargas de prueba de fuga externa en la batería BCI 42

Medición	Indicador 1	Indicador 2
Presión en una sola intercelda (8 psi)	- 0.93 mm	0.0 mm
Presión en todas las celdas al mismo tiempo (8 psi):		
1	0.24 mm	0.04 mm
2	0.24 mm	0.04 mm
3	0.24 mm	0.04 mm

2.2.3.4 Simulaciones CAE del producto actual

Un paso importante en la metodología es la generación de modelos que representen la realidad del proceso. No se puede tomar decisiones de diseño si los resultados obtenidos no son confiables. En el proceso de simulación se evaluaron dos aspectos: el proceso de inyección y el desempeño estructural de las tapas en pruebas de calidad. El Proceso de inyección se evaluó en MPI y el desempeño estructural se evaluó en CATIA.

Para las situaciones del proceso de inyección el análisis requerido fue "Fill+Flow+Cool+Warp"; el tiempo que se tarda hacer los cálculos para la tapa BCI 42 fue de alrededor de 12 horas en una estación de trabajo con procesador Pentium IV de 2,8 Ghz y 2 Mega bites de RAM. Los resultados que se pueden obtener de las simulaciones son el tiempo de llenado de la cavidad, perfil de llenado de la cavidad, presión de inyección en el punto de inyección al final del proceso, tiempo de enfriamiento, temperaturas, fuerza requerida de cierre.

Los resultados de la simulación del proceso de inyección del diseño original son:

- Tiempo de enfriamiento: 47.66 segundos
- Tiempo de llenado: 4.02 segundos
- Presión máxima en el punto de inyección: 38 MPa
- Máxima fuerza de cierre requerida: 138 Toneladas fuerza
- Máxima deformación de la pieza: 0.668 mm

- Líneas de soldadura: la mayor concentración se encuentra en la parte media de la pieza
- Aire atrapado: la distribución de los puntos de aire atrapado es en las zonas donde se encuentran las costillas principales.

De los resultados se puede decir que las zonas más calientes son los postes de estibado, las costillas principales, los postes de las esquinas para estibado y lo mamelones (Figura 25). Si se quiere reducir el tiempo de ciclo, se requiere de modificar estas características.

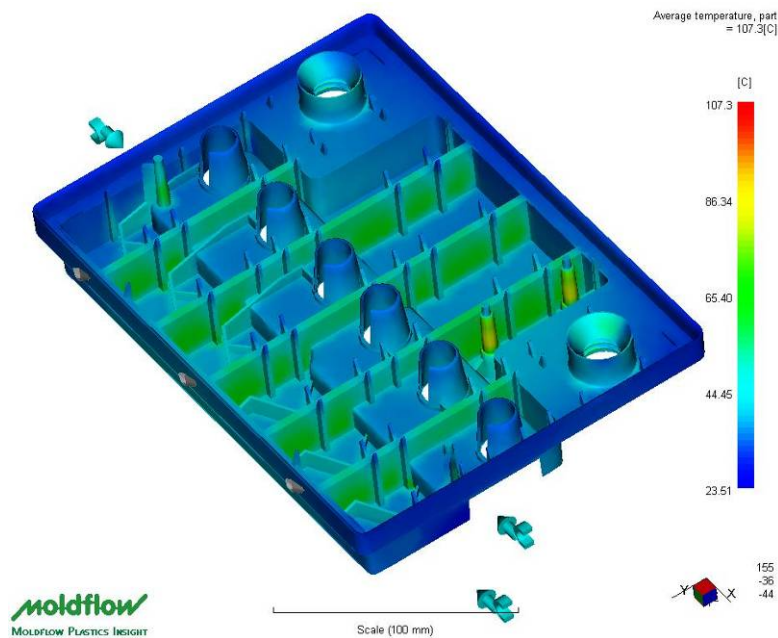


FIGURA 25 Resultado de temperatura de expulsión de simulación CAE de Tapa BCI 42

De los resultados de las simulaciones de temperatura de la tapa al final del ciclo, se tomaron datos de la temperatura de la pieza en dos zonas diferentes: una en la superficie superior de la tapa y la otra en la zona de las costillas principales. Las temperatura fueron: 41.33 Celsius y 62.32 Celsius respectivamente.

Para el análisis del desempeño estructural de la pieza se hizo un análisis estático con cargas distribuidas sobre todas las superficies internas de la batería. Se simularon las condiciones tanto la prueba de fuga interna como las condiciones de prueba de fuga externa. Los resultados de las simulaciones fueron: el desplazamiento máximo de 0.17 mm y el esfuerzo máximo generado fue de 9940 KPa para la prueba de fuga externa; para la prueba de fuga interna los resultados fueron:

0.059 mm de desplazamiento máximo y 3479 Kpa de esfuerzo. La localización de las deformaciones máximas se encuentra en la mitad de la superficie entre dos pistas, se muestra en la siguiente figura 26.

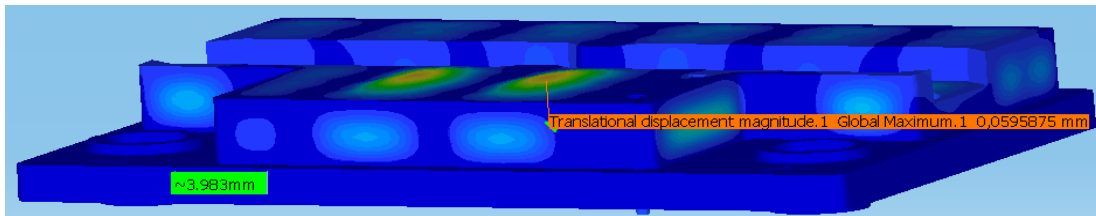


FIGURA 26 Localización de deformación máxima, Tapa BC142

El esfuerzo generado durante la aplicación de las cargas se encuentra en la base de las guías; en la segunda guía de la parte media de la pieza, la localización se muestra en la figura 27.

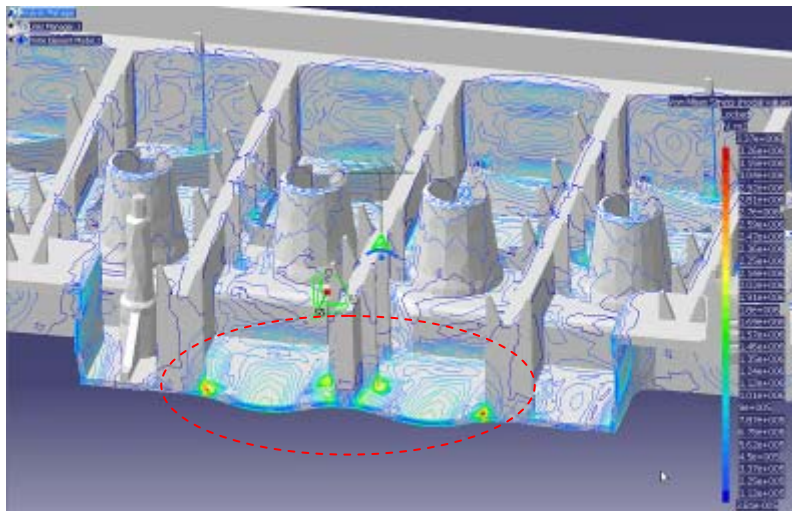


FIGURA 27 Localización del máximo esfuerzo en la tapa BC142

2.2.3.5 Validación de simulaciones

Se corrieron muchas simulaciones hasta lograr que los resultados tuvieran concordancia con los datos de campo; durante las diferentes simulaciones se fueron cambiando los parámetros hasta llegar a simular el proceso real. La tabla 4 muestra la comparación de los resultados de la simulación que concuerda con los datos de campo del proceso.

TABLA 4 Comparación de resultados de simulación y datos de campo del proceso de inyección, Tapa BCI42

Comparación resultados de simulación y datos de campo		
Parámetro	Simulación	Datos de Campo
Temperatura en la costilla	62.33 C	80, 78, 81.5 C
Temperatura en la superficie superior	37.64, 41.33 C	64.5, 65, 66 C
Tiempo de llenado	4.02 seg	3.5 seg
Tiempo de Enfriamiento	47.66 seg	45 seg
Deformación <i>lado puntos de inyección</i>	0.58 mm	0.566 mm
Deformación <i>lado de los bujes</i>	0.664 mm	0.68 mm

El perfil de deformación de las simulaciones es parecido al perfil obtenido durante la visita a la empresa. Se obtuvieron 6 imágenes de los resultados de las simulaciones con diferentes porcentajes de llenado y se compararon con las muestras físicas (figura 28). La comparación de los resultados muestran que los perfiles son similares por lo que se valida es aspecto del flujo del plástico dentro de la cavidad.

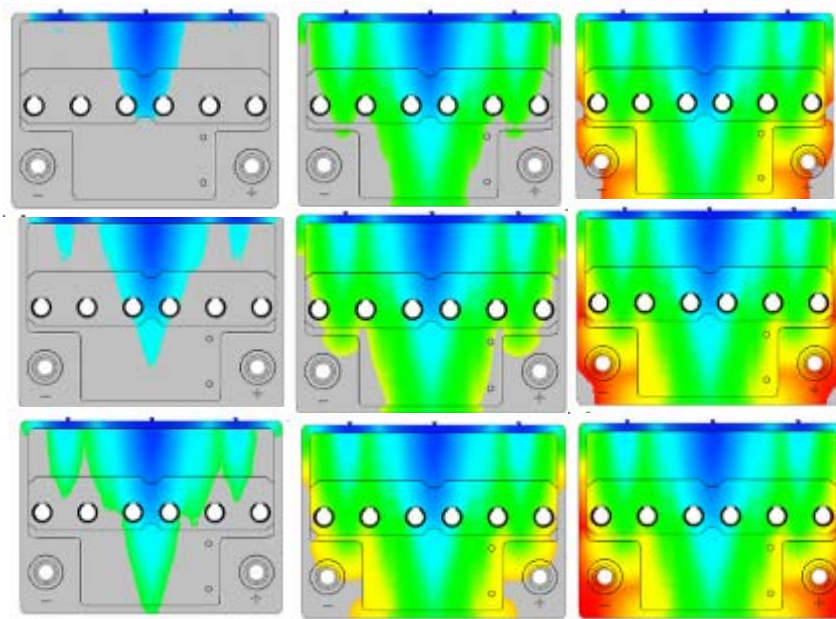


FIGURA 28 Perfil de llenado simulación CAE, tapa BCI42

Otro factor que valida las simulaciones es la comparación de la imagen que se muestra en la figura 29 con la muestra física. En la muestra física se muestra encerrado con un círculo rojo un pequeño orificio, el orificio se generó debido a que los frentes de flujo se encontraron; comparando

la muestra con la imagen equivalente de la simulación, se puede apreciar que el software tiene la capacidad de predecir esos pequeños aspectos.

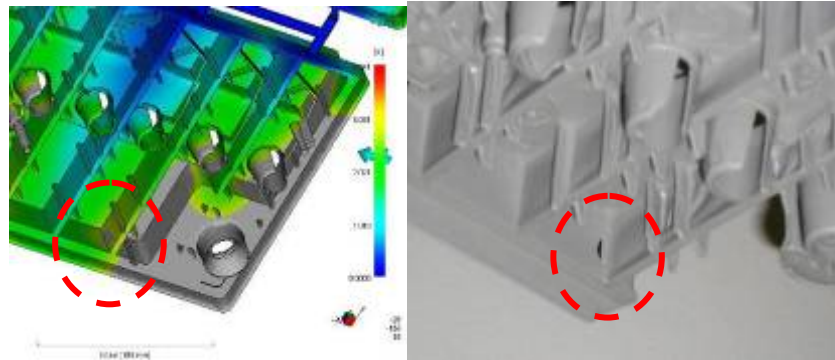


FIGURA 29 Validación del llenado de cavidad de la tapa BC142

La validación de los resultados de las deformaciones en las simulaciones de las condiciones de presión las pruebas de fugas solo fue posible hacerse para la prueba de fuga externa, debido a que solamente se tiene información de campo para esa prueba. Los resultados se muestran en la tabla 5. Comparando los resultados se muestra que el rango de variación es considerable, por lo que las simulaciones quedan validadas.

TABLA 5 Comparación de resultados de simulación y datos de campo de pruebas de fuga externa

Prueba	Medición	Simulación
Presión en la 4ta celda (8psi)	-0.930 mm	-0.66 mm
Presión en todas las celdas (8psi)	0.20 mm	0.17 mm

El proceso de validar la información es lento debido a que se tiene que visitar el campo y tomar las mediciones correspondiente, también hay que analizar la información recabada y la información obtenida de las simulaciones. El tiempo total estimado fue de 400 horas.

2.2.3.6 Costos

Es necesario traducir el proceso de la tapa BCI 42 a términos económicos; uno de los beneficios de la optimización del producto son los ahorros económicos que conllevan. Para poder estimar los ahorros del producto rediseñado, se tienen que estimar los costos del diseño actual. La información fue recabada del personal de la planta ENERTEC. Por cuestiones de confidencialidad los costos de producción no pueden ser publicados en este trabajo, sin embargo se describen los costos en base en relaciones, sin mencionar el costo real. Los costos obtenidos fueron el costo de producir una tapa BCI 42; este costo incluyó el costo de la energía, del material, de mantenimientos, depreciación y otros.

No se pudieron obtener todos los costos por separado, los costos separados obtenidos fueron: el del material virgen y reciclado y el costo de la energía requerida para manufacturar cada tapa. El costo del PP Formolene virgen es el doble del costo del PP reciclado por cada kilogramo. El costo por cada tapa inyectada en términos de cantidad de material de PP Formolene virgen es de alrededor del doble del costo que el PP reciclado. El costo de la energía requerida para manufacturar una tapa es de 0.16 veces el costos de energía por kilogramo de plástico procesado. En este análisis los demás costos se asumen constantes para la estimación de ahorros.

2.2.4 Modificaciones propuestas al producto

Como resultado del proceso de modelación, análisis y validación anterior, se propusieron cambios al diseño original. Primeramente se propuso la modificación del espesor de las costillas principales. Se modelaron reducciones de 20 y 33% de la magnitud del espesor, utilizando tanto MPI como Catia. Los resultados de las simulaciones de las reducciones mostraron que a menor espesor menor el tiempo de enfriamiento así como menores deformaciones de la pieza. Después se fueron modificando otras características al producto hasta llegar a la versión final del diseño.

Las modificaciones propuestas al producto tapa BCI 42 fueron las siguientes:

1. Quitar los postes de estibado
2. Reducir el espesor de la costilla principal en un 33%
3. Reducir el ángulo y diámetro del mamelón

4. Quitar los guidores flujo
5. Se recomienda incluir el hoyo de carga como cambio de análisis para evaluar el producto con esta característica, aunque solamente se requiera cuando el cliente lo desee.

Los postes para estibar las tapas se quitaron, así como las costillas para reforzar la zona, solamente se deja la parte hueca de los postes, para no afectar la función de espacio para insertar la tapa para buje. En la siguiente figura 30 se muestra la nueva geometría propuesta para esta característica:

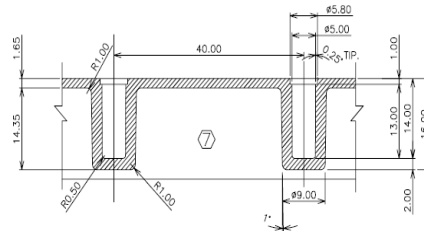


FIGURA 30 Diseño propuesto de postes para estibado, tapa BCI 41

Se propuso reducir el espesor de las costillas principales a 2.5 mm, el espesor actual es de 3.8 mm (Figura 31). El espesor de las paredes de la caja es de 1.5; el nuevo rango de error de posicionamiento es de 1 mm. También se propone cerrar el espacio entre guidores, actualmente esta en 2.9mm y la dimensión propuesta es de 2 mm. Se propone esta dimensión porque así obligaría a que la pared de la caja tenga contacto con la pista.

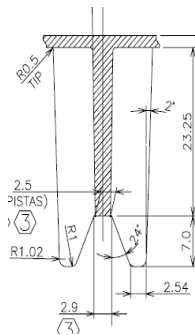


FIGURA 31 Geometría propuesta de pista y guía, tapa BCI 41

También se propusieron cambios a la geometría del mamelón, los cambios propuestos son: reducir a 23.4 mm el diámetro del mamelón; el diámetro del diseño actual es de 26 mm. Reducir el ángulo de inclinación de la base del mamelón de 31.4 a 29.5 y reducir la altura de la base del

mamelón de 6.04 a 5.64 mm (Figura 32). Esta modificaciones aseguran que el espesor del mamelón se menor y por lo tanto se pueda generar una optimización en el tiempo de ciclo.

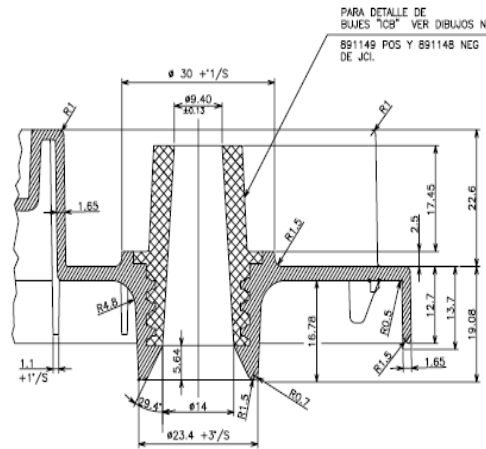


FIGURA 32 Geometría propuesta de mamelón, tapa BCI 41

La última modificación propuesta fue la remoción de la mayor parte de los guidores de flujo (Figura 33). Se dejó solamente una pequeña pestaña pegada a las campanas de los orificios, se dejó esa parte para no afectar el proceso de drenado del ácido.

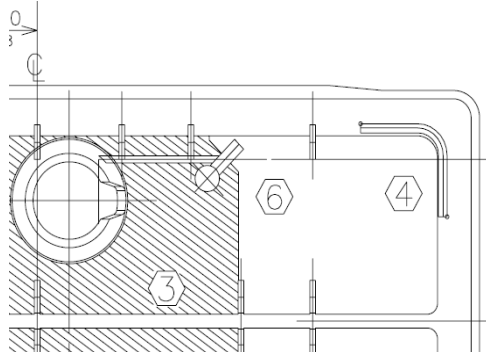


FIGURA 33 Geometría propuesta de guidores de flujo, tapa BCI 41

El total de horas trabajadas en el proceso de modificaciones fue de alrededor de 300 horas, debido a que se tuvieron que probar los cambios gradualmente

El modelo CAD de tapa modificada se muestra en la figura 34.

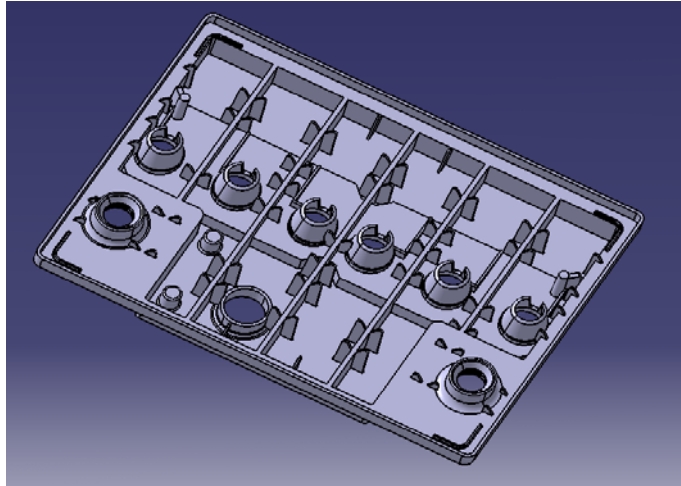


FIGURA 34 Modelo CAD del diseño propuesto de la tapa BCI 42

Todas las personas involucradas en el proyecto revisaron y aceptaron las modificaciones propuestas; se realizó un check-list de las propuestas, se muestra en la tabla 7.

2.2.4.1 Resultados y comparación de simulaciones CAE

A este punto de la metodología se requiere de comparas los resultados de las simulaciones de los cambios propuestos con las simulaciones del diseño actual; debido a que existe la confianza necesaria para poder tomar decisiones de diseño. Los resultados de las simulaciones de los cambios propuestos se muestran en la tabla 6.

TABLA 6 Comparación de resultados CAE entre diseño original y propuesto, TAPA BCI42

Característica	Diseño actual	Diseño propuesto
Temperatura de inyección	230 C	230 C
Tiempo de enfriamiento	47.66 seg	34.21 seg
Tiempo de llenado	4.02 seg	1.392 seg
Presión en los puntos de inyección	38 MPa	48.71 MPa
Fuerza de cierre	138 Ton	190 Ton
Deformación	0.664 mm	0.6164 mm
Deformación absoluta	1.621 mm	1.145 mm
Aire atrapado	Normal	Menos
Líneas de soldadura	Normal (2 líneas grandes localizadas entro los puntos de inyección)	Un poco menos, el patrón igual que el diseño actual

TABLA 7 Check-list de las modificaciones propuestas a la tapa BCI 42

Característica/cambio propuesto	Comentarios	Acciones	Resultados	Gerald Cummins	Glenn Andersen	Horacio Ahuett	Fracisco Aguiar	Victor Ponce	Jorge Montes	Carlos Rivera	Eduardo Sanchez	Ruben Cruz
1a. Poste de estibado / quitar	<ul style="list-style-type: none"> Se requieren para estibado; Observar problemas potenciales 	<ul style="list-style-type: none"> Probar los cambios en campo: quitar 1 postet, el otro, ambos. Cortar 1.3mm en la bandera del poste de la esquina. Observar porblemas potenciales 	<ul style="list-style-type: none"> No se encontraron problemas de estibado cuando se cortaron los dos postes y se redujo la altura de la bandera Quitar solo un poste resulta en problemas de inestabilidad Quitar los dos postes de estibado no se sostiene el estibado 	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	NR
1. b Poste de estibado en las esquinas / aumentar la altura	<ul style="list-style-type: none"> Reducir 1.3 mm la altura de la bandera 		<ul style="list-style-type: none"> La estabilidad del estibado se mejora cuando se quitan los dos postes de estibado y se reduce la bandera 	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	NR
2. Hoyo de carga / añadir	<ul style="list-style-type: none"> Depende de las necesidades del cliente 	<ul style="list-style-type: none"> Simular con MoldFlow 	<ul style="list-style-type: none"> No se ecntraron problemas de proceso cuando se añadió el hoy de carga: no afecta considerablemente las líneas de soldadura, tiempo de enfriamiento. 	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	NR
3. Pistas / Reducir espesor	<ul style="list-style-type: none"> Porblema potencial con el sellado Guías deberían de ser del esperso de las pistas La reducción puede reducir problemas de deformación 	<ul style="list-style-type: none"> Simular con MoldFlow Pruebas físicas: en el molde prototipo se puede empezar con el espesor propuesto e ir abriendo Obtener datos histórico para asegurar que no haya problemas de sellado 	<ul style="list-style-type: none"> Pendiente 	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	NR
4. Mamelones / Reducir diametro y anngulo	<ul style="list-style-type: none"> Siempre hay una tendencia a fugar el acido Posiblemente se puede utilizar para expulsion Problemas potenciales en la prueba de impacto 	<ul style="list-style-type: none"> Simular con MoldFlow 	<ul style="list-style-type: none"> Se encontró una mejora cuando se redujo el diámetro del mamelón y el ángulo: se redujo el tiempo de ciclo a 30 seg 	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	NR
5. Guidores de flujo / quitar	<ul style="list-style-type: none"> Esto es solo relevante para JCI-México Arturo Perez está de acuerdo con el cambio propuesto 	<ul style="list-style-type: none"> Simular efectos 	<ul style="list-style-type: none"> No se encontraron problemas cuando se quitaron los guidores de flujo 	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	NR

Las condiciones de proceso de simulación para el diseño actual y el diseño propuesto fueron las mismas. El tiempo de enfriamiento del diseño propuesto es de 34.21 segundos; esto indica un ahorro de tiempo de alrededor 13 segundos. El tiempo de de llenado se redujo debido a que, antes las mismas condiciones de simulación, la cavidad a llenar del diseño propuesto es menor a la cavidad a llenar del diseño actual. La fuerza de cierre requerida en el material es mayor debido a que la sección transversal del diseño propuesto es menor a la sección transversal del diseño actual. Debido a esto el área efectiva por la que puede pasar el flujo es menor provocando una presión mayor sobre las cavidades.

Según los resultados, las deformaciones del diseño propuesto son menores a las del diseño actual debido a que los esfuerzos térmicos residuales son menores. Las posibilidades de que existan defectos superficiales son menores en el diseño propuesto, debido a que los resultados muestran que la distribución de líneas de soldadura es menor a la distribución del diseño actual. Esto se debe a que probablemente existan menos frentes de flujo que se encuentren entre sí. Los resultados indican que la distribución de defectos por aire atrapado son menores en el diseño propuesto.

El tiempo requerido para hacer las modificaciones y simulaciones del producto propuesto fue de alrededor de 500 horas.

2.2.4.2 Problemas potenciales de las modificaciones del producto

Las modificaciones propuestas mejoran el tiempo de ciclo y el material requerido. Sin embargo, existen problemas potenciales en algunas de las modificaciones propuestas al producto. Una de las modificaciones propuestas son las pistas; el problema potencial de esta modificación es que se redujo el rango de error de posicionamiento entre las pistas y el espesor de pared de la caja. La reducción puede provocar que el sellado de la tapa con la caja no sea aceptable. La propuesta hecha fue que se redujera el espesor hasta 2.5 mm, como se había propuesto anteriormente; y si en dado caso de que hubiera problemas de sellado, se pudiera abrir gradualmente hasta estabilizar el proceso.

Quitar los postes para estibado provoca que la columna de estibado no se pueda sostener; debido a que las tapas ya no están alineadas en su centro. Para arreglar este problema se aumentó la altura de la bandera del poste de estibado en las esquinas de la tapa. Ahora, los soportes en los que se asentará la tapa son los bujes con los mamelones y los postes de estibado en las esquinas de las tapas. Se hizo una prueba con muestras del diseño actual (Figura 35); se cortaron los postes de estibado y se niveló la tapa con la altura de la bandera de los postes en las esquinas; la prueba fue hecha para probar si se podía arreglar el problema. Los resultados de la prueba fueron exitosos, quitando los postes y aumentando la altura de la tapa del diseño propuesto se asegura que el estibado sea estable.



FIGURA 35 Prueba de estibado con modificaciones a la tapa BCI42

Las modificaciones hechas al mamelón pueden tener problemas potenciales de fuga de ácido; así como problemas potenciales para la prueba de impacto. El único problema potencial con la modificación de los guías de flujo es que el drenado sea más lento; estas hipótesis no fueron probadas con experimentos.

Los cambios propuestos mejoran algunos aspectos pero empeoran otros; los cambios están validados y aseguran que habrá mejoras y ahorros económicos considerables. Sin embargo, las modificaciones hacen más robusto el proceso de inyección, pero entorpecen un poco otros procesos, como es el proceso de ensamblaje. La gerencia de la planta no está muy convencida de reducir el espesor de las pistas a 2.5 mm; porque los comentarios del área de producción son:

“que si así como esta el diseño tienen problemas, con menor espacio van a tener mayor índice de rechazo”. Hay una propuesta por parte de la planta de procesos de aumentar el espesor de la pistas; para no tener problemas de ensamble. La propuesta va totalmente en contraposición con la propuesta hecha en este trabajo.

A partir de los comentarios de la gerencia el proyecto se enfoca en analizar el proceso de ensamble de las tapas con la caja para obtener información de campo de errores de posicionamiento y proponer posibles mejoras.

2.2.4.3 Estimación de ahorros

Los ahorros se estiman en base a los costos del diseño actual. En general los ahorros son del 7.27 % del costo actual. Esto se deriva en lo siguiente: el material utilizado en el diseño propuesto será de 170 gramos sin los bujes de plomo, se eliminaron alrededor de 13.5 gramos. El ahorro en costo de material para cada pieza será de 0.92 veces el costo del diseño actual. En cuanto a la energía requerida por cada tapa, el nuevo costo para el diseño propuesto será de 0.924 veces el costo de energía del diseño actual.

Para hablar de costos anuales y de ahorros anuales, se tiene que hacer un análisis tomando en consideración la producción anual del producto. Por eso, se asumieron datos como los días de trabajo por año y el total de horas al día de trabajo.

De la producción de la tapa actual se tiene que:

- El ciclo total es de 65 segundos
 - 7 segundos son para abrir y cerrar el molde
 - 13 segundos para inyección y empaquetado
 - 45 segundos para el enfriamiento
- En cada ciclo se obtienen 2 tapas
- El número total de días de trabajo por año es de 300
- El número de horas de trabajo por día es de 16

Por lo tanto, la producción estimada al año es de 531,692 piezas. Si se consideran los cambios en la pieza los tiempos de proceso cambian por lo tanto la producción va a cambiar, se tiene que:

- El ciclo total es de 50 segundos
 - 7 segundos son para abrir y cerrar el molde
 - 14 segundo para inyección y empaquetado
 - 29 segundo para el enfriamiento (de acuerdo con los resultados de las simulaciones)

Tomando en cuenta esta información se tiene que la producción es de 691,200 piezas al año. La capacidad de producción anual se aumento en un 30 %.

El beneficio del diseño propuesto también puede ser explicado en términos de disponibilidad para la producción. Por ejemplo, si se requiere un lote de 100,000 piezas. Para el proceso del diseño actual se requieren de 57 días para manufacturar todas las piezas. Ese mismo lote para el proceso del diseño propuesto sería de 44 días para manufacturar todas las piezas. Hay una diferencia de 13 días en el tiempo de manufactura total. Es decir, la manufactura del mismo número de piezas para el diseño propuesto es 1.73 veces más rápido que la capacidad de producción del diseño actual.

2.3 Análisis de ensamble

Durante el análisis de diseño de la tapa 42 no se consideraron aspectos de ensamble, es decir, no se relacionó el aspecto de a deformación de las cajas con el rango de posicionamiento de las pistas de la tapa. Para el diseñador es importante tener una idea de cómo se deforma la caja después de que fue expulsada del molde, y poder diseñar la tapa en función de la caja. Es por eso que a continuación se presenta el análisis de ensamble de caja y tapa, para establecer las fuentes de error de posicionamiento y entender qué herramientas se pueden generar para ayudar el proceso de diseño.

El proceso de ensamble se realiza en una línea de producción; la línea de producción anexa todas las partes de la batería y las sella. El proceso inicia cuando un operario pone cajas al principio de la línea de producción; las cajas pasan primeramente por una máquina que agujera las celdas

internas. En cada celda se hace un agujero, que sirven para que se interconecten las lápidas de plomo. Las celdillas hacen contacto unas con otras por medio del agujero; para sellar herméticamente el agujero se sueldan las lápidas de las celdillas.

Después las cajas son invertidas sobre su eje, para propósitos de posicionamiento. Las cajas pasan por la selladora térmica, soldando la tapa con la caja. En este paso los postes sobresalen de los bujes de plomo de la tapa. Las terminales son pasadas un soldador de terminales, donde suelda la terminal con el buje de plomo. Por último, las baterías ensambladas pasan por la estación de pruebas de fuga. Si el producto pasa se libera para su posterior llenado de ácido y empaque, si no pasa, la batería se recicla. Figura 36

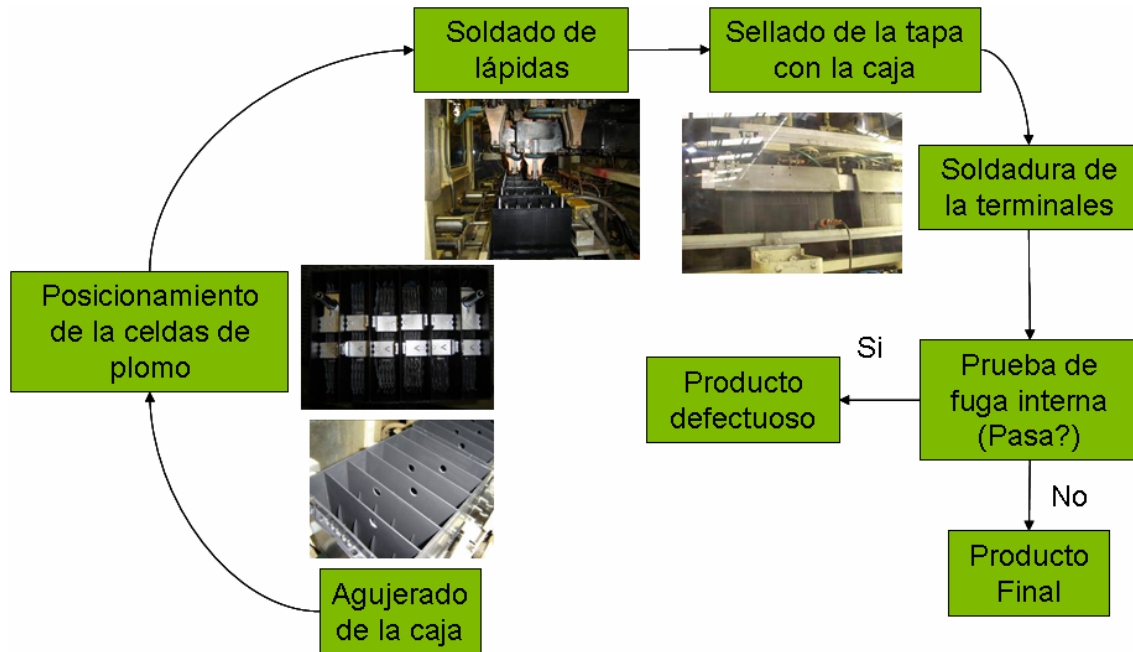


FIGURA 36 Proceso de Ensamblaje de la batería BCI 42

Las cajas y tapas de la batería BCI 42 son inyectadas en la planta ENERTEC, después se mandan a la planta Escobedo para ser ensambladas. El estado en el que llegan las cajas de la planta donde se inyectan es bueno. Las piezas no muestran deformaciones en las paredes internas. La única deformación considerable es en los extremos laterales de la caja. Figura 37

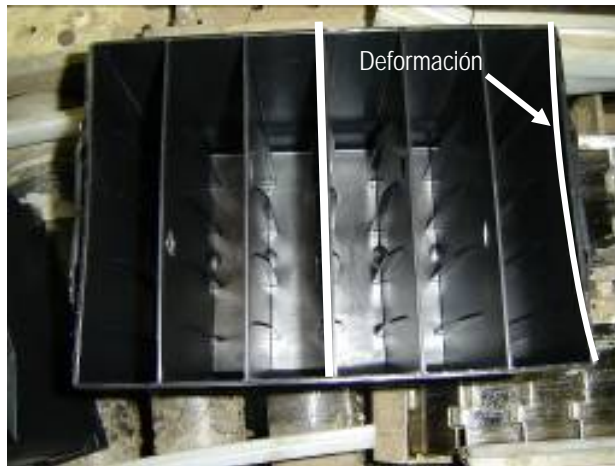


FIGURA 37 Caja de la batería BCI 42

Se observó que en el proceso de agujerado de las paredes internas no se generaron deformaciones considerables de las paredes. Existe un error aleatorio del posicionamiento de las lápidas de las celdillas internas (Figura 38). Estas lápidas pueden provocar que las paredes internas se deformen a la hora de ser soldadas.



FIGURA 38 Posicionamiento de las lápidas en la caja BC142

También se observó que después de la soldadura de las lápidas, las paredes internas de la caja se deformaban. Durante la soldadura de las lápidas el posicionamiento es de la siguiente manera (Figura 39): un extremo de la caja topa un riel, después dos topes salen del otro extremo de la caja presionándolo contra el riel; los topes hacen contacto con las esquinas de la caja.

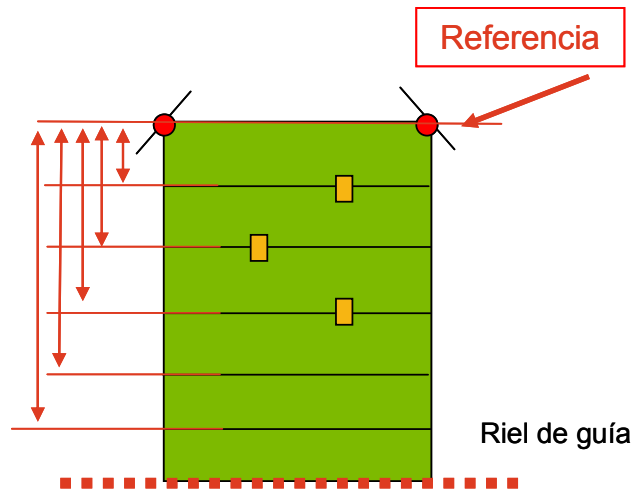


FIGURA 39 Esquema de posicionamiento en el proceso de ensamble de batería BCI42

La batería sale de la estación de soldado de lápidas y es invertida en las bandas de transferencia; ahora el punto de referencia es el otro extremo de la caja. La batería llega a la estación de sellado de tapa con caja, la herramienta de posicionamiento que se utiliza tiene forma de gancho. Durante la transferencia de la baterías la herramienta de posicionamiento sale de la parte de bajo obstruyendo el paso. Después se detiene la banda y comienza el proceso de sellado.

Se detectan cuatro variables que pueden afectar el posicionamiento de las paredes internas de la caja con las pistas de la tapa que son: la variación propia del proceso de inyección de la tapa y de la caja, la contribución de la deformación de las paredes en el proceso de soldado de lápidas, el sellado de la tapa con la caja y el posicionamiento del herramental en el proceso de ensamble. Estas contribuciones al error de posicionamiento se muestran a manera de expresión matemática, que a continuación se presenta:

$$Deformacion = \sum d_i = d_v + d_{TWE} + d_{HS} + d_{tool}$$

donde:

d_v = Variación dimensional (proceso de inyección)

d_{TWE} = Soldadura de las lápidas

d_{HS} = Sellado de la tapa con la caja

d_{tool} = Herramientas de posicionamiento en el proceso de ensamble

Para determinar la variación del posicionamiento de la pieza se preparó una prueba. El propósito de la prueba fue determinar si la posición de la caja con referencia en un extremo, es igual a la posición de la misma caja con la referencia del otro extremo. Las pruebas simulan el posicionamiento del herramental durante las estaciones de soldado de lápidas y sellado de tapa con caja. En las mediciones se utilizaron dos referencias de posicionamiento para la caja mostradas en rojo en la figura 40; En la prueba de soldado de lápida una de las referencias hace contacto en las esquinas de las paredes de los extremos de la caja. Y para el posicionamiento de la caja en la estación de sellado térmico se utilizó una referencia que topa con el centro de la pared en los extremos de la caja. De los resultados de las pruebas se encontró que no es lo mismo colocar una caja de un extremo que del otro extremo de la caja.



FIGURA 40 Mediciones de posicionamiento del proceso de ensamble de caja BCI42

De acuerdo con el análisis de ensamble realizado, se puede decir que existen muchos errores de posicionamiento durante el ensamble de la pieza. También, las paredes de la caja de batería son deformadas durante el proceso de soldado. Es por eso que la propuesta de modificación de la geometría de la tapa BCI 42 no es aceptada. Aunque el problema no está en el diseño de la tapa, el problema es adjudicado al proceso de ensamble. Por eso la ingeniería de planta de la empresa quiere ampliar el espesor de las pistas. El diseño entonces es un juego de fuerzas para obtener el funcionamiento normal de la empresa y no ven soluciones de problemas a largo plazo, es decir, el problema de diseño se pudo haber extendido para el ensamble y para la manufactura.

La deformación de las paredes de los extremos de la caja es un tema que se debe de tratar porque es el lugar donde existe la mayor deformación. Esta deformación puede causar un mal sellado provocando fugas externas en el ensamble de la batería.

2.4 Identificación de cuellos de botella

Uno de los problemas que se detectaron durante la metodología de diseño fue que los cambios fueron hechos gradualmente, es decir, se modificaba la parte y se evaluaba en elementos finitos, una y otra vez hasta llegar a la versión óptima del diseño. Durante el rediseño de la tapa se modificó el espesor de la pista en varios pasos; no se sabía a ciencia cierta cuanto era la máxima magnitud en la que se podía reducir el espesor. Aunque se pudieran intuir las tendencias, no se podían estimar magnitudes. El problema de hacer muchas simulaciones es que se requiere de una capacidad de almacenamiento de datos muy grande debido a que por cada simulación requiere de alrededor de 1 Gb de memoria; El tiempo requerido de cada simulación es de 12 horas. Es por esto que las modificaciones al producto son lentas y costosas.

Un problema dentro de la metodología fue la generación de malla de los modelos CAE, es un proceso lento y tedioso. Durante la generación de malla se tenía que refinar hasta que se tuvieran valores de convergencia estables. Sin embargo, en el proceso de generación se debió corregir la malla hasta adquirir las propiedades necesarias para que el sistema fuera convergente y dar resultados confiables, numéricamente hablando. Hubiera sido de ayuda, tener herramientas que ayuden el proceso de generación de mallas; una herramienta que esté automatizada y que pueda reconocer errores en la malla y corregirlos, hasta llegar al punto de tener las características necesarias para correr una simulación.

Otro problema fue que se requirieron hacer varias simulaciones del diseño actual hasta lograr concordancia entre los resultados y los datos de campo, esto es de relevancia porque ante un número mayor de simulaciones, un mayor costo durante el proceso de diseño. Lo ideal es correr el menor número de simulaciones para no encarecer el proceso. Para esto, hubiera sido de ayuda tener herramientas que nos ayudaran a obtener simulaciones confiables en el menor número de simulaciones.

Adicional al tiempo de preparación del modelo, el proceso de diseño se encarece debido a que se requiere de recolección de datos de campo, este requiere de tiempo y disponibilidad de las máquinas. Por lo general no se monta un molde solo para hacer pruebas, sino más bien al

momento de que el molde esta en producción se tiene que aprovechar la ocasión para recabar la información requerida. El proceso de adquisición se hubiera hecho más fácil si las máquinas estuvieran más instrumentadas y así tener acceso fácil a la información.

Existen herramientas de diseño, tales como monogramas, que ayudan a decidir en que magnitud modificar el diseño, así como entender que efectos esperar de las modificaciones. Estas herramientas están basadas en análisis dimensionales que parten de formulaciones matemáticas sencillas. No se utilizaron monogramas durante el proceso porque no se tuvo registro de tales herramientas. En el caso analizado, tampoco se utilizaron reglas empíricas durante el proceso de rediseño; Las herramientas empíricas, por lo general, están orientadas a casos de geometrías muy particulares y condiciones de proceso particulares; por lo que no pueden ser aplicadas en otros contextos. Lo ideal es que hubieran sido utilizadas herramientas empíricas para estimar la magnitud en la que se pudiera modificar las características del diseño.

De los comentarios de la gerencia del diseño propuesto, se redirigió el objetivo del problema al análisis de la deformación de las paredes de las cajas. A este punto del análisis se identificó una geometría particular para la que convendría tener una herramienta analítica, Figura 41. Las paredes internas de la caja deben de tener una buena alineación para permitir un buen sellado. Del análisis de ensamble se concluyó que del proceso de inyección las paredes internas de la caja no están deformadas. La deformación máxima de las cajas se encuentra en los extremos, como se muestra en la Figura 41.

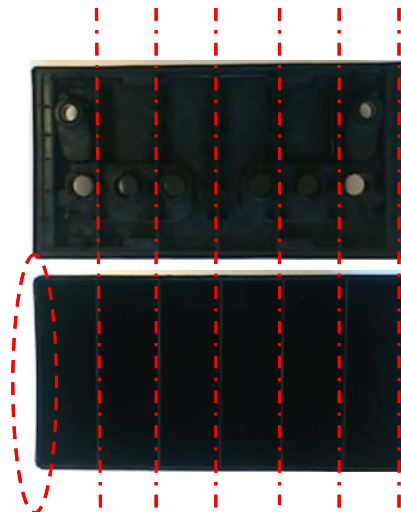


FIGURA 41 Alineación entre caja y tapa de batería grupo BCI 30

2.5 Investigación paralela al proyecto BCI 42

Durante el rediseño de la tapa no se consideraron aditivos en el material para explorar posibles mejoras en el proceso. En ese sentido, se inició una investigación en paralelo al proyecto de la tapa BCI 42 que tiene que ver con agentes nucleantes. Los agentes nucleantes son sales minerales que promueven la temprana nucleación del plástico durante su transición de estado fundido a estado sólido. Cuando un material es inyectado sin ningún agente nucleante, la temperatura de cristalización es menor que cuando se inyecta un material con agente nucleante añadido. El mecanismo de cristalización se puede observar en la figura 42. El beneficio de una temperatura de cristalización mayor es que la temperatura de expulsión de la piezas sea mayor, reduciendo el tiempo de ciclo del proceso de inyección

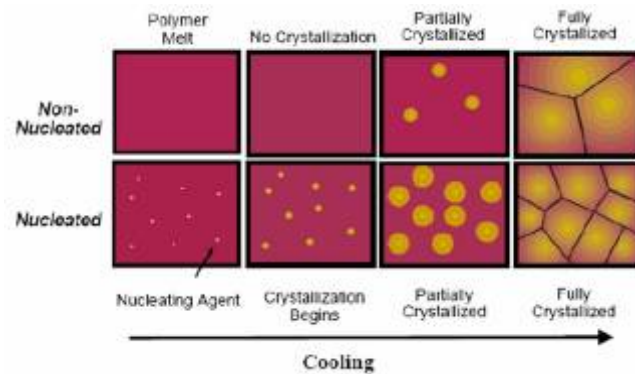


FIGURA 42 Mecanismo de Cristalización de los agentes nucleantes

Se dice que los agentes nucleantes pueden reducir o eliminar el pandeo de las piezas inyectadas, también pueden reducir rechupes de la pieza y el encogimiento de la pieza. Para las cajas de las baterías los beneficios que se pueden tener es la reducción de la deformación de las paredes en los extremos de las cajas, así como la reducción del tiempo de ciclo.

2.6 Propuesta de herramienta

De acuerdo a la problemática definida en la parte de la identificación de los cuellos de botella, se propone una herramienta analítica que apoye el proceso de diseño. Así, el diseñador podrá establecer los parámetros iniciales en el diseño y estimar la magnitud en la que puede modificar el diseño para obtener el efecto deseado. Con la herramienta propuesta, el proceso de evaluación con CAE ya no se vuelve una herramienta de diseño, sino más bien una herramienta de validación. La herramienta analítica resulta en una mejora en el proceso de diseño, más no provee la solución a todos los problemas de diseño. Entre las características deseables esta que sea una herramienta sencilla; una ecuación simplificada de un caso particular que puede ser aplicado en un problema que aparezca con frecuencia.

Para explorar la deformación de los productos con forma de contenedor se puede desarrollar un modelo analítico. La herramienta que se propone ayuda a predecir la deformación final de la pared, y ayuda a evitar problemas de ensamble. Toma en consideración los efectos de los aspectos geométricos y la temperatura de expulsión de la pieza. La herramienta podrá predecir la forma en que se deformará la pared; así como la magnitud en la que se deforma la pared. El diseñador del producto podrá tomar decisiones de diseño en etapas tempranas del proceso de diseño, tales como aumentar o disminuir el radio de la esquina, el espesor y/o la longitud de la pieza.

Esta herramienta conectará al diseñador del producto con el ingeniero de ensamble, es decir, la herramienta arrojará datos de deformación y el ingeniero de ensamble podrá validar el diseño; determinando si se puede ensamblar o no. Los datos que predice la herramienta podrán ser utilizados por el ingeniero de ensamble para analizar el contacto de las paredes de los extremos de la caja con las pistas de la tapa para detectar posibles errores de sellado.

La herramienta, además, pudiera ayudar al análisis de los efectos de los agentes nucleantes; el argumento de los agentes nucleantes es que la temperatura de expulsión de la pieza es mayor. En ese sentido, la herramienta podrá cuantificar el efecto que tendría el agente nucleante en la deformación final de la pieza con una temperatura de expulsión mayor.

Capítulo 3. Desarrollo del modelo analítico

En este capítulo se presenta el desarrollo del modelo analítico, el capítulo se distribuye de la siguiente manera: se realiza una breve introducción del desarrollo, posteriormente se muestra trabajos similares a este trabajo en la revisión de literatura; seguido de la descripción del modelo a desarrollar y por último se presenta la formulación matemática del modelo.

De acuerdo a la identificación de la necesidad de entender la deformación de productos en forma de contenedor. La importancia del modelo a desarrollar es que ayude al diseñador a entender las deformaciones de las paredes en términos de la geometría y de la contracción del material. El propósito del modelo analítico es calcular las deformaciones que suceden en las paredes de los extremos de cualquier producto con forma de contenedor y que comprometa radios en las esquinas; así como de otro tipo de productos que comprometan paredes con radios (Figura 43). El modelo servirá para estimar la deformación tanto del lado derecho del contenedor como del lado izquierdo. En el caso de los productos de la planta ENERTEC, la caja para batería tiene la forma particular del modelo a desarrollar, por lo que podrá aplicarse a las características del producto para estudiar su deformación.

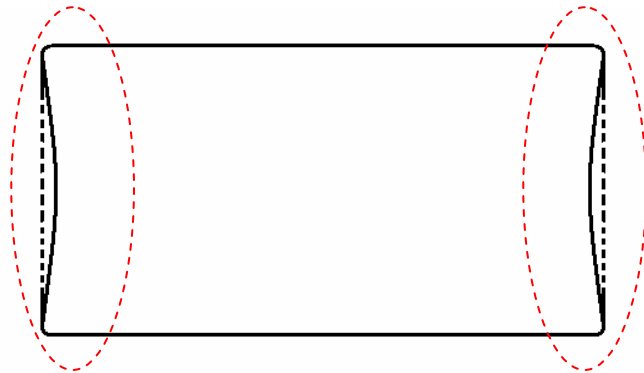


FIGURA 43 Deformación de las paredes de productos en forma de contenedor

El modelo se desarrolló utilizando métodos energéticos; el 1er y 2do. Teorema de Castigliano fueron usados. La geometría de la pared del contenedor se puede aproximar a una estructura en forma de U (figura 44).

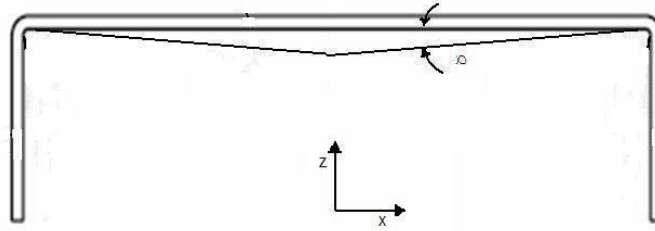


FIGURA 44 Estructura en forma de U

Definiendo el caso en los productos particulares de ENERTEC, la estructura en forma de U en las cajas para batería se presenta en las paredes en los extremos del producto y en las paredes de los lados. Figura 45. En este trabajo se enfoca en la estructura U en las paredes de los extremos del producto debido a la problemática presentada en el capítulo pasado.

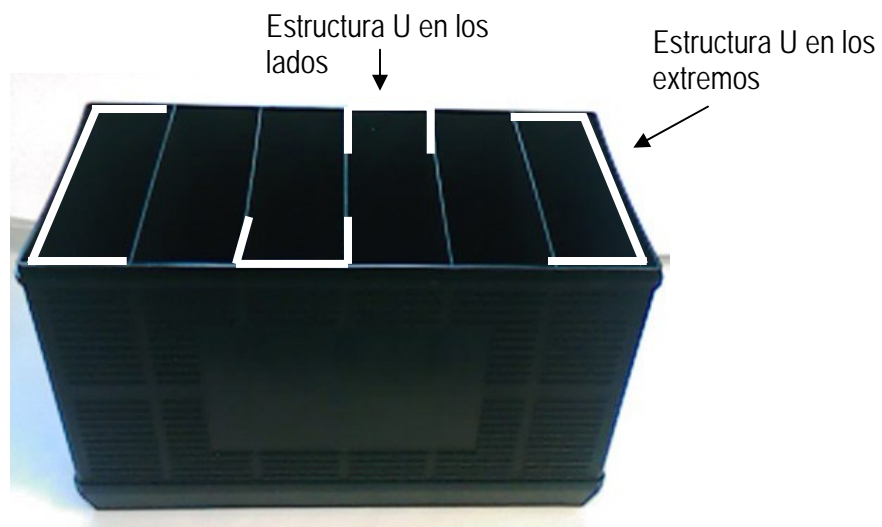


FIGURA 45 Demostración del caso en los productos de ENERTEC

3.1 Revisión de literatura sobre modelos analíticos

Se revisaron los trabajos de otros autores para ver que técnicas, materiales y tipo de geometrías utilizaron en sus modelos. A continuación se describe el trabajo de los diferentes autores que se revisaron en la literatura.

Zahlan et. al. [9] analizaron el fenómeno de deformación de geometrías en forma de U hechas de termoplástico polieteretercetona (PEEK) reforzado con fibras de carbón (Figura 46). El trabajo de ellos fue describir y cuantificar el fenómeno de "Spring-Forward" de manera teórica y numérica, es decir, con elementos finitos. El fenómeno lo explican analíticamente con modelos termo-elásticos mediante una resta de coeficientes de expansión térmica en sentido tangencial y sentido radial de la esquina de la estructura, esa resta representa el porcentaje de cambio del ángulo. En su modelo analítico no consideran la geometría debido a las simplificaciones hechas durante el desarrollo. Realizaron mediciones experimentales; la mediciones muestran que la máxima deformación de la pieza está entre 0.4 y 0.6 mm. Para el caso estudiado el resultado del modelo analítico fue un cierre de ángulo de la esquina de 1.28 grados, comparado con los resultados de mediciones se tienen que el ángulo se cerró de 1 a 1.5 grados. Utilizaron el software LUSAS para modelar numéricamente el efecto de cierre de ángulo; el resultado numérico que reportaron fue de 0.4 mm, comparado con las mediciones el resultado es consistente. Demuestran que se pueden utilizar expresiones sencillas para estimar la magnitud de la deformación.

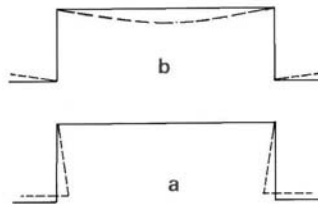


FIGURA 46 Geometría usada por Zahlan et. al. [9]

Jansen et. al. [10] presentaron un trabajo sistemático sobre el pandeo de placas sencillas y placas en forma de L, las placas fueron moldeadas por inyección (Figura 47). El pandeo de ambos casos de placas se estudió en función de la diferencia de temperaturas en las mitades del molde y de la presión de empacamiento. El material utilizado fue policarbonato de la marca Makrolon CD2000

de Bayer. Desarrollaron un modelo termoelástico que describe de manera cualitativa y cuantitativa el pandeo de las placas moldeadas hechas de materiales amorfos. Explican que durante el proceso de solidificación de las piezas inyectadas se generan esfuerzos térmicos y esfuerzos inducidos por la presión de empacamiento. Estos esfuerzos generan un estado de esfuerzos final en la pieza que al ser liberados de la restricción física del molde producen que la pieza inyectada se pandee o deforme. El modelo que desarrollaron considera la geometría de la pieza, sin embargo, la geometría es un caso de deformación libre que permite predecir el cierre del ángulo de la esquina de la pieza para el caso de placas en forma de L; y para el caso de placas sencillas estima la deformación. El modelo desarrollado no funcionaría para calcular la deformación de una estructura en forma de U.

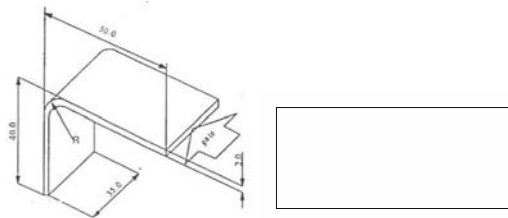


FIGURA 47 Geometrías usadas por Jansen et. al. [10]

Utilizaron C-MOLD para comparar el modelo analítico desarrollado aplicado a las placas sencillas así como las mediciones experimentales. No reportan comparación del modelo analítico de la deformación de la placa en forma de L con datos numéricos y experimentales; aunque definen dos geometrías en el reporte se enfocaron más en la placa sencilla. Sin embargo, explican los resultados experimentales del caso de la placa en forma de L; explican que para reducir el pandeo de la placa L se debe de diseñar el producto con radios pequeños, pero se deben de prevenir esquinas muy pronunciadas debido a que aumenta el área efectiva en la sección transversal y por ende el encogimiento es mayor. Concluyen que el fenómeno de pandeo de piezas en forma de L pueden ser modeladas con ecuaciones termoelásticas bajo las condiciones de presión de empacamiento y el diferencial de temperaturas en las cavidades del molde.

Akkerma et. al. [11] estudiaron el fenómeno de "Spring-Forward" de piezas en forma de L hechas de materiales termofijos reforzados con fibras (Figura 48). El material utilizado fue Ciba 6376, el reforzador fue carbón HTA y como iniciador epóxico unidireccional. En su análisis definen que el encogimiento térmico y el encogimiento químico (reacciones de curado del material) provocan

deformación de la pieza. Exponen que el fenómeno de “Spring-Forward” es debido principalmente por la anisotropía del material, sin embargo, el fenómeno no es explicado considerando solo la anisotropía, por lo que incluyen efectos de reacción de curado. Desarrollaron un modelo analítico (termoelástico) basado en las ecuaciones orto-trópicas de elasticidad en coordenadas cilíndricas para predecir el cierre de ángulo que sucede en la esquina debido a la contracción térmica considerando anisotropía. Después extendieron el modelo para incluir el efecto de curado del material así como efectos visco elásticos del material. El modelo extendido fue programado en un software llamado DIEKA. De los resultados que obtuvieron de sus modelos concluyen que el 60% del fenómeno de “Spring-Forward” es causado por el efecto de encogimiento térmico, debido al enfriamiento de las piezas desde la temperatura de esfuerzos libres hasta la temperatura ambiente.

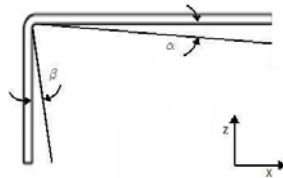


FIGURA 48 Geometría usada por Akkerman et. al. [11]

Mlekusch [12] estudió el pandeo de piezas inyectadas hechas de material termo plástico reforzado con fibras de carbón. Desarrolló un modelo multi-capa para predecir la deformación tomando en consideración propiedades ortotrópicas del material. La geometría utilizada fue una esquina con radio (Figura 49). Los materiales utilizados fueron poliamida (PA), polietirensulfato (PES) y PEEK. Se apoyó del tensor de esfuerzos para materiales ortotrópicos para poder resolver su modelo; el tensor utilizado representa las propiedades del material y consideraciones geométricas. Preparó un experimento para comparar su modelo con mediciones experimentales. El modelo desarrollado lo comparó con la ecuación que uso Zahlan et. al. en su trabajo.

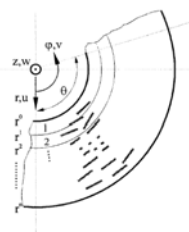


FIGURA 49 Geometría usada por Mlekusch [12]

De los resultados de la comparación expone que el modelo desarrollado predice 1.13 grados de cierre de ángulo y la predicción de la ecuación sencilla fue de 1.16 grados. Concluye textualmente que el cierre de ángulo que sucede en las esquinas de las piezas con forma de L es casi independiente de la geometría y de las condiciones del flujo durante el proceso de llenado. Además, demuestra que las piezas se deforman más debido a la incorporación de fibras. El problema del modelo de Mlekush es que requiere de un método numérico para resolver su ecuación, convirtiendo su modelo analítico en un modelo numérico. El modelo termoelástico sencillo predice tan bien como el modelo sofisticado de Mlekush.

Comparando el trabajo que hizo el autor con el trabajo hecho por Zahlan et. al., llegan a la misma conclusión de que la deformación del ángulo de las esquina de piezas con forma de L es casi independiente de la geometría y lo estiman mediante la resta de los coeficientes de expansión térmica en sentido del radio de la esquina y del coeficiente de expansión térmica en sentido tangencial al radio. En ambos trabajos explican que la causa de que la deformación del ángulo sea casi independiente de la geometría es porque el material compuesto tiene propiedades anisotrópicas u ortotrópicas. Provocando que los parámetros geométricos no aparezcan en la formulación.

Ammar et. al. [13] estudiaron la deformación de esquinas de piezas inyectadas hechas de termoplástico debido a la extracción asimétrica de calor. La geometría utilizada fue una estructura en forma de L (Figura 50). El material utilizado fue polipropileno Eltex HV de Solvay y utilizaron mica en algunos casos. Explican que el enfriamiento asimétrico es la principal causa de la deformación de las esquinas debido a la inhabilidad de extraer calor en la zona de las esquinas. Utilizaron el mismo estimador de deformación de ángulo de esquinas para piezas en forma de L que Zahlan et. al. y Mlekusch, en el que las características geométricas de la pieza no son consideradas en la ecuación. También desarrollaron un análisis numérico tomando en consideración propiedades viscoelásticas del material, el modelo lo desarrollaron en software de elemento finito ANSYS. Exponen que el efecto de la geometría de la esquina, de acuerdo con los resultados experimentales, tiene un efecto en la deformación, sin embargo el argumento va en contraposición al de Jansen et. al., al declarar que de los resultados experimentales a menor radio mayor la deformación.

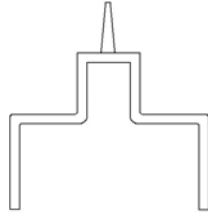


FIGURA 50 Geometría usada por Ammar et. al. [13]

De los resultados, el modelo termoelástico predijo 11 grados de cierre, el dato experimental fue de poco más de 6 y el resultado de la simulación numérica considerando viscoelasticidad fue de 5. Concluyen que el fenómeno de “Spring-Forward” se debe en mayor parte a que el encogimiento en sentido longitudinal de la pieza, debido a que durante el enfriamiento de la pieza el movimiento está restringido, por lo tanto, provoca que el encogimiento en sentido del espesor de la pieza sea mucho mayor haciendo que el material en las esquinas se comporte de manera anisotrópica.

Hsiao et. al. [13] investigaron el fenómeno de pandeo de estructuras en forma de L hechas de materiales compuestos mediante transferencia de resina al vacío (Figura 51). El material compuesto utilizado fue una mezcla de poliéster, fibra de vidrio, fibras de nanocarbono (CNF) y como catalizador MEKP al 1% en volumen. Desarrollaron un modelo analítico basado en ecuaciones termo-elásticas, el modelo asume que la estructura en forma de L está formada de capas interpuestas de fibra de vidrio y de CNF, el modelo toma en consideración aspectos geométricos de la estructura. Además desarrollaron un modelo numérico en ANSYS para validar las simulaciones y datos experimentales. El modelo desarrollado utiliza una técnica de capas para considerar materiales compuestos, los datos experimentales y los datos del modelo analítico, así como los resultados de elementos finitos tienen un rango de error razonable; los resultados los presentan en forma de gráfica. La predicción para 0wt% de CNF en la matriz polimérica del modelo analítico, ANSYS y datos experimentales es de alrededor de 2.4 grados de cierre de ángulo. Conforme aumenta el porcentaje de CNF, el error de predicción aumenta. Los autores exponen que para mejorar las predicciones de su modelo se requieren de datos de materiales más exactos.

En su estudio mostraron una aproximación para controlar y reducir el fenómeno de pandeo incorporando una cantidad pequeña de nanofibras de carbono (CNF) junto a una resina líquida en

fibra de vidrio usando el proceso de transferencia de resina asistida por vacío. Sus resultados experimentales demostraron que añadiendo nanofibras de carbón a la matriz polimérica se puede restringir la deformación del ángulo de la esquina de la estructura en forma de L. Concluyen que agregando 1.5 wt% de CNF a la matriz polimérica (en porcentaje de peso) el cierre del ángulo de la estructura L se reduce en un 73%. El modelo desarrollado predice que con un 10 wt% de CNF en la matriz polimérica el cierre del ángulo de la estructura en forma de L es prácticamente 0.

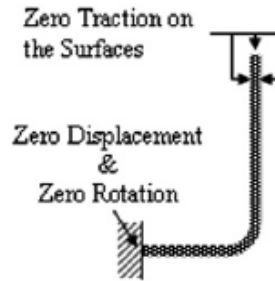


FIGURA 51 Geometría usada por Hsiao et al [14]

De la literatura revisada se puede concluir que es posible utilizar modelos termoelásticos para describir y cuantificar el fenómeno de pandeo de piezas hechas de termoplásticos. Comparando el modelo propuesto en este trabajo con los modelos revisados de la literatura se diferencian en que el modelo propuesto es para una estructura en forma de U, la cual se puede simplificar a una viga curva con restricciones de frontera. El modelo propuesto como algunos de la literatura consideran el efecto de aspectos geométricos como son: el radio, espesor y longitud. Según Akkerman et. al. el 60% del pandeo de una estructura en forma de L es debido al encogimiento térmico. En ese sentido, el modelo propuesto considera la contracción térmica, al igual que Akkerman, solamente que el modelo propuesto considera la contracción térmica desde la temperatura de expulsión de la piezas hasta la temperatura ambiente.

De la literatura revisada seis autores presentan trabajos similares al propuesto aquí. Cinco de los seis autores desarrollaron modelos termo-elásticos; tres de los cinco autores que desarrollaron modelos termo-elásticos, proponen modelos independientes de la geometría para explicar el efecto de la anisotropía del material. Los otros dos autores de los cinco que propusieron modelos termoelásticos, proponen modelos dependientes de la geometría para piezas en forma de L, sin embargo, no consideran efecto de simetría en el modelo, es decir, que representen la deformación de una pieza en forma de U. Solo un autor utiliza una geometría en forma de U; igual a la que se

utiliza en este trabajo, sin embargo, utiliza una formulación muy sencilla sin que afecte los efectos de la geometría. De los seis autores revisados tres desarrollaron además modelos numéricos considerando: un autor consideró la viscoelasticidad del material, otro desarrolló un modelo numérico considerando efectos de reacción química del material y otro desarrolló un modelo tomando en consideración efectos de presión de empaquetamiento. Tabla 8.

TABLA 8 Comparación de modelos revisados en la literatura

Autor	Año	Geometría	Modelos		Modelo dependiente de la geometría	Extensión del modelo	FEA
			Termo-elástico	Visco-elástico			
Zahlan, et. al.	1989	U	x*				LUSAS
Jansen, et. al.	1998	L	x		x	considera empíricamente presión de solidificación	C-MOLD
Akkerman, et. al.	1998	L	x	x*	x	considera reacciones de curado	DIEKA
Mlekusch	1999	L	x				
Ammar, et. al.	2001	L	x	x*		considera relajación de material	ABAQUS
Hsiao, et. al.	2008	L		x*	x	considera materiales compuestos	ANSYS
Aguiar et. al.	2008	U	x ¹		x		ANSYS

Nota: * modelos desarrollados en elementos finitos
¹ modelos con suposición de simetría

3.2 Características del modelo desarrollado

Como se mencionó anteriormente, la deformación de los contenedores se puede representar mediante una estructura en forma de U (Figura 52). Una hipótesis de este trabajo es que el análisis matemático en dos dimensiones puede predecir la deformación de la parte alta de las cajas para batería. La hipótesis se basa en el uso de modelos termoelásticos para el modelamiento de la contracción de una pieza. La estructura en forma de U supone simétrica, es decir, lo que sucede en una mitad de la U, sucede en el otro lado de la U.

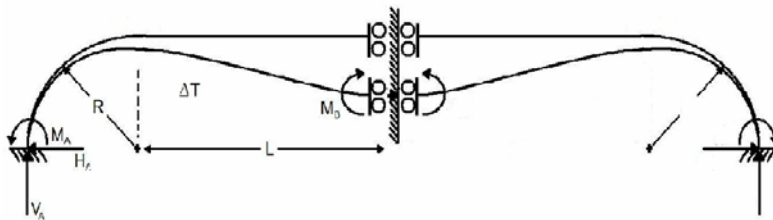


FIGURA 52 Estructura en forma de U

El modelo analítico es capaz de predecir cualitativamente el perfil de la deformación de la caja para batería, así como predecir la magnitud de la deformación a lo largo de la longitud "L"; esta capacidad del modelo desarrollado permite hacer estimar posibles problemas de ensamble de la caja con la tapa de la batería. Para fines de modelación matemática la estructura en forma de U puede ser simplificada a una viga curvada con restricciones frontera, las características de las restricciones se exponen en la parte de la formulación matemática. Figura 53

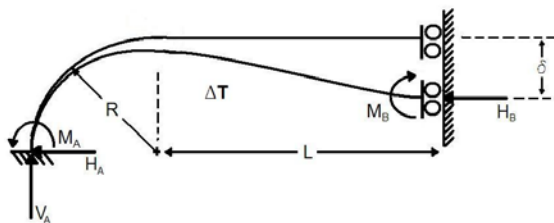


FIGURA 53 Viga curvada con restricciones frontera

El modelo analítico asume que las propiedades del material son lineales, y requiere de un coeficiente de expansión térmica y un modulo de Young. El modelo depende de los siguientes

aspectos geométricos: radio medio, espesor de pared y longitud. El modelo considera la contracción térmica desde la temperatura de expulsión de la pieza hasta la temperatura ambiente, debido a que la estrategia tomada para calcular la deformación no puede registrar lo que sucede dentro de la cavidad cuando la pieza esta siendo enfriada. Considera un material isotrópico, es decir, sus propiedades como el coeficiente de expansión térmica es el mismo en sentido longitudinal que en sentido transversal.

El modelo desarrollado ayuda al ingeniero de diseño a entender las tendencias de la deformación en función de los aspectos geométricos y de la temperatura de expulsión de la pieza, permitiendo optimizar el diseño para reducir la deformación. En algunos casos, las cajas son diseñadas con características en las paredes de las orillas de la caja que permiten reforzar la estructura reduciendo la deformación. El modelo propuesto no considera estos refuerzos geométricos.

Una de las ventajas de usar el coeficiente de expansión térmica es que pueden contemplarse aspectos como: cristalización del material y parámetros del proceso. Es por eso que dentro de la formulación matemática para calcular la deformación de las cajas no incluye modelos de cristalización del material. Aún sabiendo que el polipropileno es uno de los materiales termoplásticos con mayor tiene un porcentaje de cristalización (alrededor de un 60%), estos efectos pueden ser evaluados intrínsecamente en el coeficiente de expansión térmica.

3.4 Formulación matemática del modelo analítico

Se utilizó el método de Castigliano para formular la expresión matemática. Una de las ventajas del método es que puede aplicarse a situaciones donde existe no linealidad, es decir se puede aplicar en formulaciones de elementos finitos. En este caso se busca una solución analítica. Para formular matemáticamente la expresión que predice la deformación en las paredes de las orillas de las cajas de batería se realizó un diagrama de cuerpo libre de la geometría definida. En el diagrama se definió que las fuerzas que actúan en la estructura son: H_B , H_A , M_B , M_A y V_A (figura 54). El lado derecho de la geometría esta definida como "B" y el lado izquierdo como "A". Las reacciones del lado A son: un la fuerza Horizontal (H_A), la fuerza vertical (V_A) y un momento de flexión (M_A); en el lado "B" las reacciones son: una fuerza horizontal (H_B) y momento de flexión

(M_B). La fuerza en sentido vertical nombrada "V" es una fuerza virtual que se utiliza para poder conocer la deformación de la estructura en la posición "I".

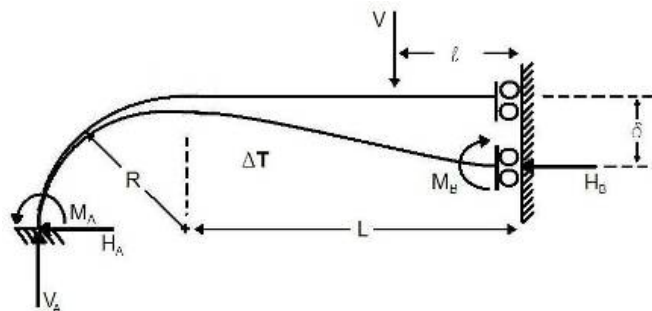


FIGURA 54 Diagrama de cuerpo libre

La estructura está definida por dos secciones: una sección recta y una sección curva. Ambas secciones tienen un perfil rectangular en la sección transversal. La sección recta está definida por una longitud "L" y por un espesor "t", y la sección curva está definida por un radio medio "R" y por el espesor "t", que es el mismo de la sección recta. La sección curva está definida por un cuarto de círculo, es decir va de 0 a 90 grados. Toda la estructura está sometida a un cambio de temperatura definido por " ΔT ". El cambio de temperaturas puede ser un cambio positivo, es decir, calentar la estructura, o un cambio negativo, es decir, enfriar la estructura.

En el lado "A" de la estructura se define que la deformación en los sentidos horizontal y vertical son igual a 0 y por lo tanto el ángulo de deformación en "A" es 0. Todos los grados de libertad del lado "A" para las dos direcciones están restringidos. En el lado "B" existe una condición de simetría, por lo que el grado de libertad restringido es la dirección horizontal, es decir, solo existe deformación en el sentido vertical. Por la misma razón, el ángulo de deformación en ese extremo "B" es igual a 0.

Según los métodos energéticos, las fuerzas que actúan sobre una estructura representan una energía potencial elástica. Esta se modela mediante la ecuación de la energía para el caso particular que se está analizando. En el caso de análisis de este trabajo las fuerzas que se incluyen en la ecuación de la energía son las fuerzas axiales, momentos de flexión y una reacción debido a un cambio de temperatura. Para obtener la ecuación de la energía se definen las

aportaciones energéticas en diferentes secciones de la estructura que son: la aportación de la sección recta y de la sección curva. La aportación energética en la sección recta de la estructura es:

$$U_{0 \rightarrow L} = \frac{H_B^2 L}{2AE} + H_B \alpha \Delta T L + \int_0^L \frac{(M_B)^2}{2EI} dx$$

Donde:

A = área de la sección transversal

E = modulo de Young del material

α = coeficiente de expansión térmica lineal

I = momento de Inercia de la sección transversal

La aportación energética en la sección curva de la estructura se define a continuación:

$$U_{0 \rightarrow \frac{\pi}{2}} = H_B \alpha \Delta T R + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(M_B - H_B R (1 - \cos(\theta)))^2}{2EI} R d\theta$$

La ecuación de la energía es entonces la suma de las dos aportaciones energéticas:

$$U_{Total} = U_{0 \rightarrow L} + U_{0 \rightarrow \frac{\pi}{2}}$$

Por lo tanto, la ecuación es:

$$U_{Total} = \frac{H_B^2 L}{2AE} + H_B \alpha \Delta T (L + R) + \int_0^L \frac{(M_B)^2}{2EI} dx + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(M_B - H_B R (1 - \cos(\theta)))^2}{2EI} R d\theta$$

La estrategia para establecer la ecuación que rige el comportamiento de la pared es obtener las reacciones H_B y M_B , para luego obtener la expresión de la deformación de la estructura con estas reacciones. De acuerdo con el segundo teorema de Castigliano:

“Si la energía de deformación de un sistema lineal puede ser expresado como una función de las fuerzas que actúan sobre ella, entonces la derivada parcial de la ecuación de la energía con respecto a esas fuerzas definidas resuelve el desplazamiento en el punto donde esta aplicada la fuerza y en el sentido de la fuerza”,

En este caso, el segundo teorema de Castigliano se aplicó en la ecuación de la energía total para aplicar las restricciones geométricas de la estructura antes mencionadas. Entonces, la derivada de la ecuación de la energía total con respecto a la fuerza H_B es igual al desplazamiento de ese punto en la dirección de esa fuerza. Sin embargo, como existen restricciones de que no se puede deformar en sentido horizontal, ni puede girar en su propio eje, el resultado de la derivada con respecto a esa fuerza se iguala a 0. Ecuación 1.

$$\frac{\partial U_{Total}}{\partial H_B} = \delta_{H_B} = 0 \quad (1)$$

La derivada queda entonces como sigue:

$$H_B \left[\frac{L}{AE} - \frac{2R^3}{EI} + \frac{3\pi R^3}{4EI} \right] + M_B \left[\frac{\pi R^2}{2EI} - \frac{R^2}{EI} \right] = -\alpha \Delta T (L + R)$$

La ecuación resultante de la derivada es de dos incógnitas, para poder resolver las reacciones H_B y M_B se requiere de al menos dos ecuaciones, por lo que se obtuvo una segunda ecuación. Esta segunda ecuación se obtuvo de aplicar la restricción del ángulo de deformación en el lado "B" de la estructura. Según los métodos energéticos en analogía con el segundo teorema de Castigliano se dice que la derivada de la ecuación de la energía con respecto al momento que se aplica en un punto específico es igual al ángulo de deformación de ese punto. Por lo tanto, al derivar la ecuación de la energía total con respecto al momento en B (Ecuación 2), " M_B " es igual al ángulo de deformación de ese punto, pero como existe restricción de que el ángulo en ese punto es nulo debido a que, físicamente, la estructura no se puede deformar, esto representa la simetría supuesta en la estructura en forma de U. La derivada se iguala a 0:

$$\frac{\partial U_{Total}}{\partial M_B} = \theta_{M_B} = 0 \quad (2)$$

La derivada queda como sigue:

$$H_B \left[\frac{\pi R^2}{2EI} - \frac{R^2}{EI} \right] + M_B \left[\frac{L}{EI} + \frac{\pi R}{2EI} \right] = 0$$

Se tiene un sistema de ecuaciones con dos incógnitas. Por lo tanto se pueden resolver y obtener los valores de H_B y M_B . La reacción M_B es (3):

$$M_B = \frac{-4EIR^3(\kappa+1)(\pi-2)\alpha\Delta T}{\frac{1}{3}t^2LR(2\kappa+\pi)+R^4(\pi^2+6\pi\kappa-16\kappa-8)} \quad (3)$$

La reacción H_B (4)

$$H_B = \frac{-4EIR^2(2\kappa+\pi)(\kappa+1)\alpha\Delta T}{\frac{1}{3}t^2LR(2\kappa+\pi)+R^4(\pi^2+6\pi\kappa-16\kappa-8)} \quad (4)$$

κ = relación entre L y R

Las reacciones obtenidas ayudan a encontrar la expresión de la deformación de la estructura. De acuerdo con el segundo teorema de Castigliano se requiere de una fuerza en un punto específico para poder obtener la deformación en ese punto donde está aplicada la fuerza y en el sentido de la fuerza, pero como no existe fuerza en sentido vertical en la estructura definida, se utilizó el método energético de fuerza virtual para obtener la deformación. El método establece que es posible agregar una fuerza virtual al caso de análisis para obtener la deformación en el punto que se desea saber. Entonces, para saber la deformación en el punto específico se deriva la ecuación de la energía con respecto a la fuerza virtual.

Se añadió una fuerza virtual nombrada "V" en la estructura como se muestra en la figura 54. La fuerza virtual se colocó a lo largo de la sección recta de la estructura para calcular la deformación en cada punto de la longitud total de la sección. Esta fuerza virtual se añade en la ecuación de la energía. La ecuación de la energía ahora esta compuesta por tres secciones que son: la parte recta, que se divide en dos secciones, la sección antes de la fuerza virtual (de 0 a l) y la sección en donde esta la fuerza virtual hasta donde se une con la sección circular (de l a L). Entonces, la sección que va de 0 a l queda de la siguiente manera:

$$U_{0 \rightarrow l} = \frac{H_B^2 l}{2AE} + H_B \alpha \Delta T l + \frac{1}{2EI} \int_0^l (M_B)^2 dx$$

La aportación energética de la sección que va de l a L es:

$$U_{l \rightarrow L} = \frac{H_B^2 (L-l)}{2AE} + H_B \alpha \Delta T (L-l) + \int_l^L \left(M_B + \frac{V}{2}(x-l) \right)^2 dx$$

En la sección circular se tiene que la aportación energética es:

$$U_{0 \rightarrow \frac{\pi}{2}} = H_B \alpha \Delta T R + \frac{1}{2EI} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(M_B - H_B R (1 - \cos(\theta)) - \frac{V}{2} (L-l + R \sin(\theta)) \right)^2 R d\theta$$

La energía total con la fuerza virtual incluida ahora es la suma de las aportaciones energéticas en las tres secciones definidas:

$$U_{Total} = U_{0 \rightarrow l} + U_{l \rightarrow L} + U_{0 \rightarrow \frac{\pi}{2}}$$

De acuerdo con el segundo Teorema de Castigliano, la deformación se puede obtener derivando la nueva ecuación de la energía con respecto a la fuerza virtual "V", Ecuación 5:

$$\frac{\partial U_{Total}}{\partial V} = \delta_B \quad (5)$$

El resultado de la derivada con respecto a la fuerza virtual queda en términos de la misma fuerza virtual, de H_B y M_B . Pero como la fuerza es "virtual" la magnitud de esa fuerza es 0. Por lo que se eliminan los términos que contengan "V" de la ecuación derivada, juntando los términos se obtiene la expresión de la deformación (Ecuación 6):

$$\delta_B = \frac{1}{2EI} \left[H_B \left(R^3 + R^2 (L-l)(\pi-2) \right) + M_B \left(-2R^2 + \pi R (l-L) - (l-L)^2 \right) \right] \quad (6)$$

Reacomodado términos en la ecuación queda de la siguiente manera (Ecuación 7):

$$\delta_B = 2\alpha \Delta T R^5 \left[F \left(1 + \frac{(L-l)(\pi-2)}{R} \right) + G \left(2 - \frac{\pi(l-L)}{R} + \frac{(l-L)^2}{R^2} \right) \right] \quad (7)$$

La ecuación está definida por los siguientes valores:

α = coeficiente de expansión térmica lineal

R = radio medio de la sección curva

L = longitud total de la sección recta

l = posición en la que se desea saber la deformación

F (8) y G (9) son constantes definidas por la geometría de la estructura, sus valores son:

$$F = \frac{-(2\kappa + \pi)(\kappa + 1)}{\frac{1}{3}t^2LR(2\kappa + \pi) + R^4(\pi^2 + 6\pi\kappa - 16\kappa - 8)} \quad (8)$$

$$G = \frac{(\kappa + 1)(\pi - 2)}{\frac{1}{3}t^2LR(2\kappa + \pi) + R^4(\pi^2 + 6\pi\kappa - 16\kappa - 8)} \quad (9)$$

Donde:

κ = relación entre L y R

3.4.1 Ajuste a las ecuaciones

De acuerdo con los resultados de elementos finitos el modelo desarrollado tiene que ser ajustado para que las predicciones, cuando se varían los parámetros, sean más exactas; Se encontró que el modelo predice con un rango de error del 8% para la relación de R/t entre 1 y 1.3, también para la relación 4 en adelante. Para el rango de 1.3 entre 4 el rango de error es un poco más del 10%; se buscó un ajuste a las ecuaciones para reducir el rango de error encontrado.

El ajuste que se hizo fue quitar la aportación energética del radio en la parte de la contracción del material debido a un cambio de temperaturas (Ecuación 10); El radio se quitó directamente de la ecuación de la energía. El efecto que tiene quitar o poner el Radio es que, cada vez que el radio se hace más grande, el efecto de contracción térmica se hace más grande, por lo tanto debe de ser considerado dentro de la ecuación de la energía; y cuando el radio es pequeño la aportación

energética es pequeña, por lo tanto, puede ser quitado de la ecuación. La ecuación original se muestra a continuación:

$$U_{Total} = \frac{H_B^2 L}{2AE} + H_B \alpha \Delta T (L + R) + \int_0^L \frac{(M_B)^2}{2EI} dx + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(M_B - H_B R (1 - \cos(\theta)))^2}{2EI} R d\theta$$

La ecuación de la energía modificada se muestra a continuación:

$$U_{Total} = \frac{H_B^2 L}{2AE} + H_B \alpha \Delta T L + \int_0^L \frac{(M_B)^2}{2EI} dx + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(M_B - H_B R (1 - \cos(\theta)))^2}{2EI} R d\theta \quad (10)$$

Se quitó el radio, se volvieron a hacer todos lo arreglos para encontrar una expresión que pueda ser manejable para calcular la deformación. La ecuación ajustadas para R/t entre 1.3 y 4, se muestra a continuación:

$$\delta_b = 2\alpha \Delta T L \left[F (R^3 + R^2 (L-l)(\pi - 2)) + G (2R^2 + \pi R (l-L) - (l-L)^2) \right] \quad (11)$$

Y sus nuevas constantes son:

$$F = \frac{-(2\kappa + \pi)}{\frac{1}{3} t^2 L (2\kappa + \pi) + R^3 (\pi^2 + 6\pi\kappa - 16\kappa - 8)} \quad (12)$$

$$G = \frac{(\pi - 2)}{\frac{1}{3} t^2 L (2\kappa + \pi) + R^3 (\pi^2 + 6\pi\kappa - 16\kappa - 8)} \quad (13)$$

Donde

κ = es la misma relación; L / R

Capítulo 4 Validación del modelo analítico

Introducción

En este capítulo se presenta la validación del modelo analítico desarrollado. En la validación del modelo se evaluó la capacidad que este tiene para predecir la deformación de la pared de productos con forma de contenedor. Primeramente se validó el modelo desarrollado con simulaciones de elementos finitos (FEA). Se compararon los resultados que arroja el modelo analítico con los resultados que arrojan las simulaciones de elemento finito. El motivo de esta parte fue validar si la formulación termo elástica fue desarrollada correctamente.

Como segunda parte de la validación, se utilizaron 3 productos diferentes de la planta ENERTEC para comparar las deformaciones de las muestras de cada producto con las deformaciones que predice el modelo. Los productos utilizados durante la validación fueron cajas para batería. Por último, se utilizó uno de los tres casos para compararlo con los resultados que arroja Mold-Flow. Para estas validaciones se requirieron de hacer caracterizaciones de los materiales utilizados en las cajas, también se requirieron mediciones de campo.

4.1 Validación del modelo analítico con elemento finito

Se utilizó ANSYS versión 10.0 para validar el modelo analítico. La idea es que los modelos analíticos predigan valores similares a los que arroja el modelo de FEA. La viga curvada se modeló directamente en el software; el tipo de elemento utilizado fue "solid82", es un elemento que tiene capacidad para hacer análisis de contracción térmica en 2 dimensiones.

Se asumió la misma condición de simetría que en el desarrollo matemático; todos los grados de libertad restringidos al finalizar la parte curva de la estructura y restricción de movimiento en el eje X y de giro al final de la parte recta de la estructura (Figura 55). Con fines de validar el modelo con ANSYS, los valores de alfa utilizados fueron obtenidos de la base de datos de material del software MPI; para la validación experimental se utilizaron los valores de CTE reales. El valor de

CTE fue de 9.05×10^{-5} m/m C, el valor del modulo de Young utilizado fue de 1340×10^6 Mpa. Se utilizó un solo cambio de temperaturas, que fue de 50.

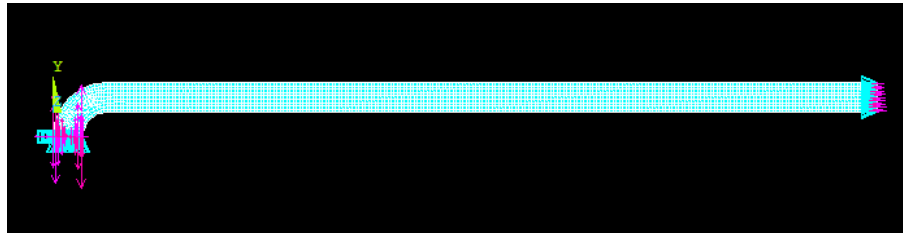


FIGURA 55 Modelo de viga curvada en ANSYS 10.0

Para la validación del modelo analítico desarrollado se utilizaron tres longitudes en la estructura; estas geometrías se definen en tres casos, todos diferentes a los utilizados en la parte de la validación experimental. Se utilizó la ecuación 7. El primer caso tiene una longitud de 83 milímetros, el espesor fue de 2.284 milímetros y el radio se vario de 3 a 23 milímetros. Se realizaron 12 simulaciones en ANSYS para ser comparados con el modelo desarrollado (Anexo 3). Los resultados muestran que para los parámetros utilizados el porcentaje de error esta por 1.5 y 5 R/t. Cada punto en la gráfica muestra la deformación que sucede en el extremo de la parte recta de la estructura. El máximo rango de error encontrado en la comparación de los resultados fue de 6.8 %.

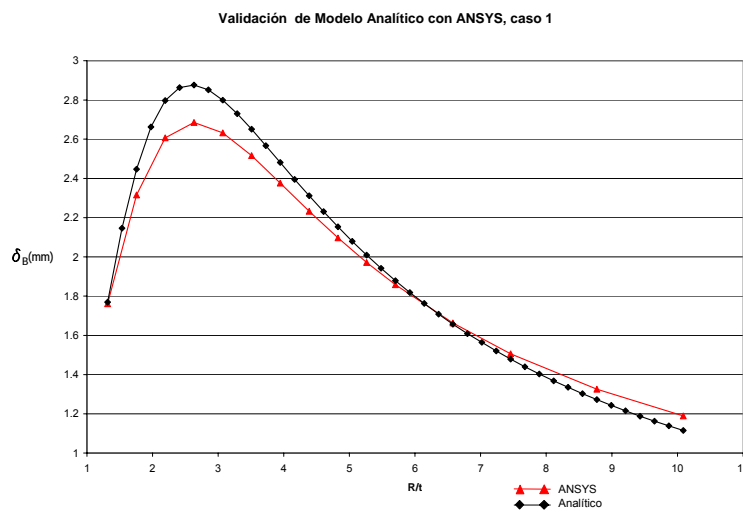


FIGURA 56 Comparación resultados ecuación 7 con ANSYS, ecuación 7, Caso 1

El segundo caso tiene una longitud de 63 milímetros, el espesor fue de 2.284 milímetros y el radio se vario de 3 a 23 milímetros. Se realizaron 21 simulaciones en ANSYS para ser comparados con

el modelo desarrollado. Los resultados muestran que para los parámetros utilizados el máximo porcentaje de error esta entre 1.5 y 5 R/t. En la figura 57 se muestra en negro el modelo analítico y en rojo ANSYS. En la gráfica se muestra que el porcentaje de error es mayor que el primer caso, de 12.73%.

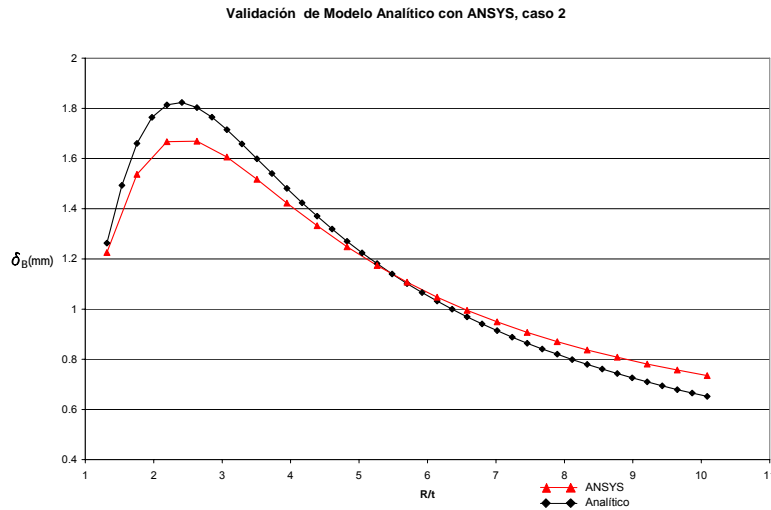


FIGURA 57 Comparación modelo analítico con ANSYS, ecuación 7, caso 2

El tercer caso tiene una longitud de 103 milímetros, el espesor fue de 2.284 milímetros y el radio se vario de 3 a 23 milímetros. Se realizaron 21 simulaciones en ANSYS para ser comparados con el modelo desarrollado.

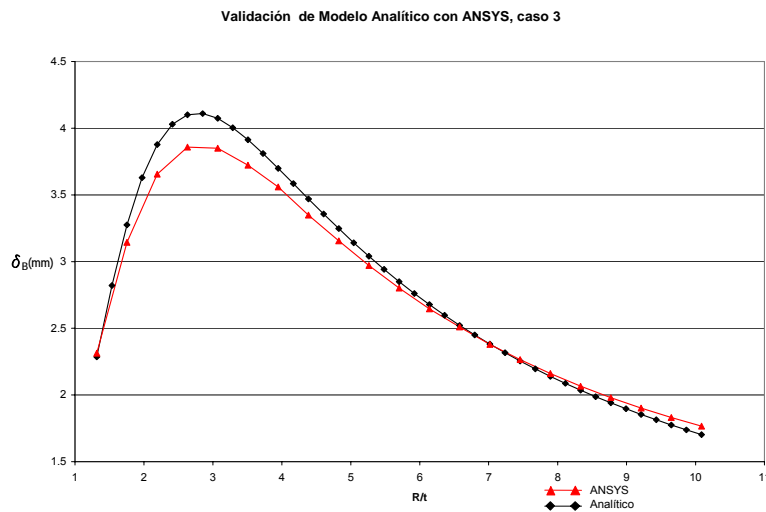


FIGURA 58 Comparación modelo analítico con ANSYS, ecuación 7, caso 3

Los resultados muestran que para los parámetros utilizados el porcentaje de error esta entre 1.5 y 5 R/t. En la figura 58 se muestra en negro el modelo analítico y en rojo ANSYS. En la gráfica se muestra que el porcentaje de diferencia entre ecuación 7 y ANSYS es de 5.9%, menor que el primer y segundo caso.

De acuerdo con los casos analizados se puede deducir que mientras sea más grande la longitud el modelo desarrollado predecirá mejor las deformaciones, de acuerdo con el modelo de elemento finito. En los tres casos se encontró que el rango de error más grande estaba entre 1 y 5 R/t, por eso, se requirió de hacer los ajustes mencionados anteriormente en la parte 3.4.1, resultado la ecuación 11. La ecuación 11 se modeló y se compararon las mismas geometrías con ANSYS.

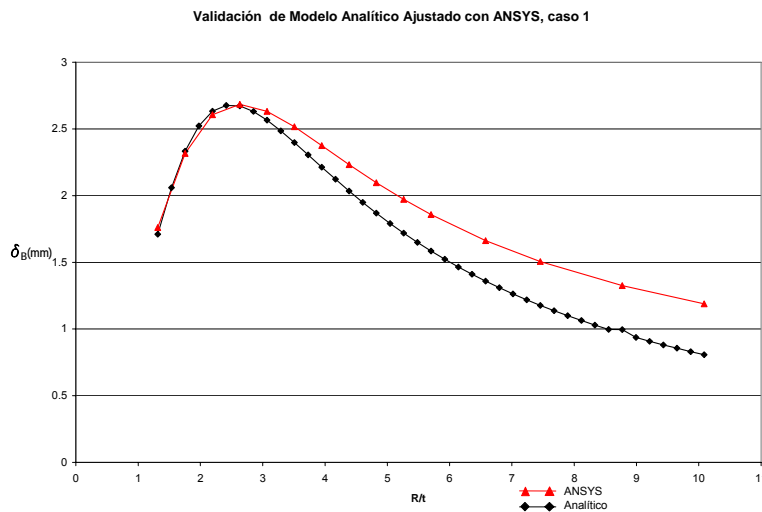


FIGURA 59 Comparación ANSYS vs Analítico, Ecuación 11, caso 1

El primer caso del modelo ajustado muestra que el rango de error es del 3 R/t en adelante (Figura 59). En este caso se utilizó una longitud de 83 milímetros, un espesor de 2.284 milímetros y el radio se vario de 3 a 23 milímetros. Se realizaron 21 simulaciones en ANSYS. En el rango de 1 a 3 R/t se puede apreciar que el modelo ajustado predice las deformaciones con un rango de error pequeño. Por lo que se puede utilizar para el rango mencionado. El máximo porcentaje de error fue de 32 % con respecto a las simulaciones de ANSYS.

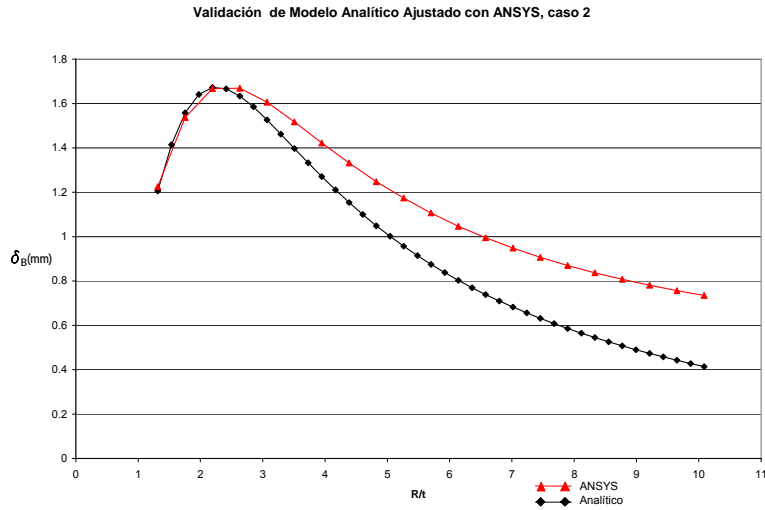


FIGURA 60 Comparación ANSYS vs Analítico, Ecuación 11, caso 2

En los resultados del modelo de la ecuación 11 para el caso 2 (Figura 60) se puede apreciar que el máximo porcentaje de error se encuentra entre 3 R/t y en adelante. El máximo porcentaje de error en comparación con las simulaciones de ANSYS fue de 43%.

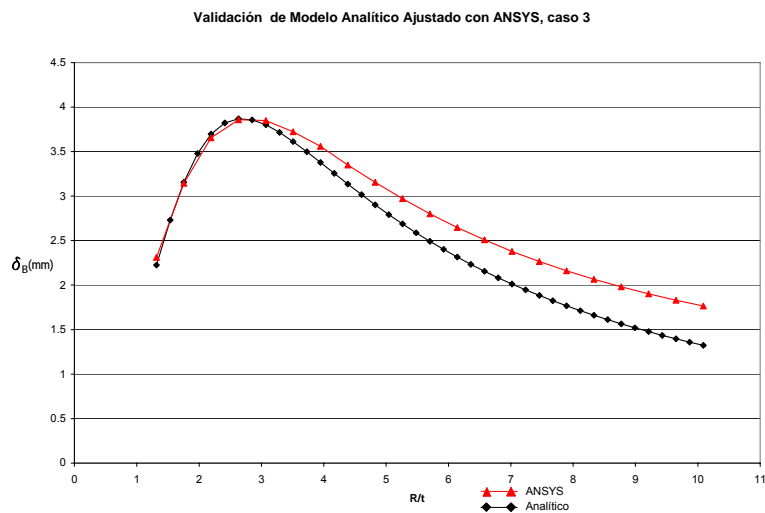


FIGURA 61 Comparación ANSYS vs Analítico, Ecuación 11, caso 3

En el caso 3 del modelo de la ecuación 11 (Figura 61) se puede apreciar que el rango de error se encuentra en la misma zona que el caso 1 y 2 de la ecuación 11. Sin embargo, el porcentaje error de predicción es menor que el caso 1 y 2, en comparación con las simulaciones en ANSYS. Analizando los datos de las predicciones analíticas y numéricas se definen los siguientes rangos de operación para las ecuaciones 7 y 11: para el rango de 1 a 1.3 R/t se utiliza la ecuación 11,

para el rango de 1.3 a 4 R/t se utiliza la ecuación 7 y para el rango de 4 R/t en adelante se utiliza la ecuación 11.

Las ecuaciones 7 y 11 se graficaron para los rangos de operación definidos para las geometrías definidas en los tres casos. De los resultados del caso 1 se puede decir que el porcentaje de error máximo en toda la curva es de menos del 6.8%. Lo que valida el uso de las ecuaciones en sus rangos. Las predicciones se muestran en la figura 62.

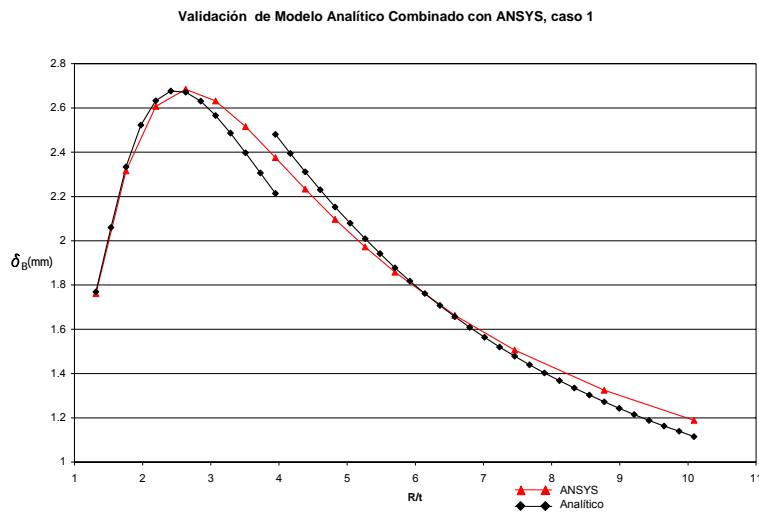


FIGURA 62 Comparación ANSYS vs Analítico por rangos, Ecuaciones 7 y 11, caso 1

De los resultados del segundo caso de las ecuaciones por rangos se puede decir que el error máximo es del 12 %, por lo que valida el modelo. El error máximo se encuentra entre 8 R/t a 10. Las condiciones de simulación fueron las mismas que se utilizaron para los casos. Figura 63.

Para el tercer caso del modelo de las ecuaciones por rangos, el máximo porcentaje de error es de 5 %. Los resultados se muestran en la figura 64. En comparación con los resultados de las ecuaciones 7 y 11 (graficadas solas), la reducción de error fue de 8 % en comparación con la ecuación 11 sola y en comparación con la ecuación 7 sola tiene un porcentaje de error similar, 5.9%.

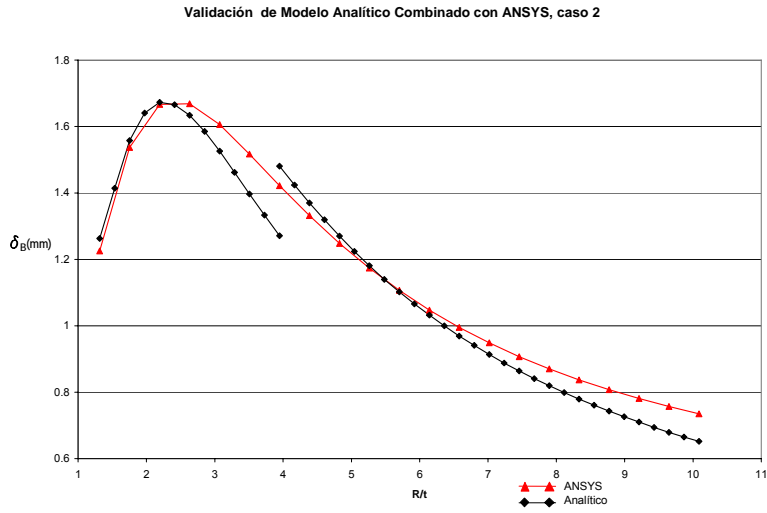


FIGURA 63 Comparación ANSYS vs Analítico por rangos, Ecuaciones 7 y 11, caso 2

En general, todos los modelos predicen con mayor exactitud aquellos casos en los que la longitud de la estructura es por arriba de lo 83 milímetros. Se percibe que hay una tendencia, en los tres casos, a reducir el porcentaje de error conforme la longitud era mayor. Los resultados numéricos de las simulaciones, de la ecuación 7 y 11, ANSYS, así como los porcentajes de error se muestran en las tablas 1, 2 y 3 del anexo 3.

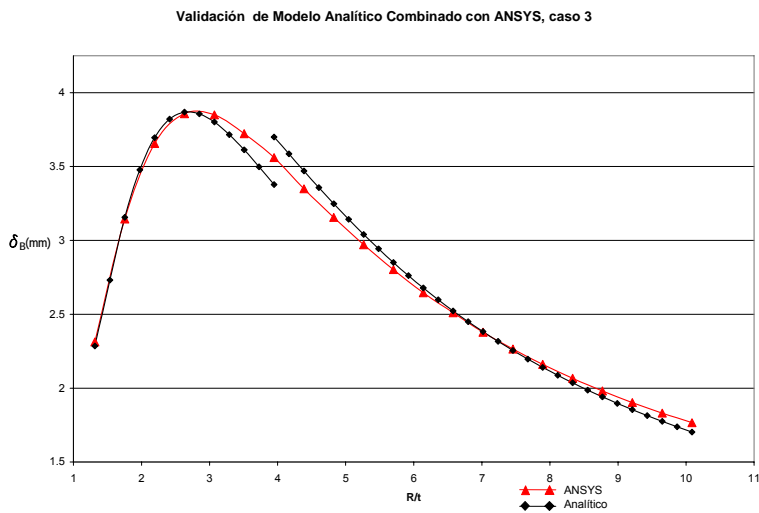


FIGURA 64 Comparación ANSYS vs Analítico por rangos, Ecuaciones 7 y 11, caso 3

4.2 Obtención de datos experimentales

Los datos experimentales se obtuvieron de tres cajas para baterías que se manufacturan en la planta ENERTEC. Los casos escogidos son caja MC30H, caja ACUMEX P-47 y caja GR-31. La obtención de los datos experimentales es de suma importancia para la validación del modelo desarrollado.

La caja MC30H tiene 5 interceldas (Figura 65); en las paredes de la caja tiene una textura en forma de rectángulos. Los rectángulos refuerzan la estructura en general, previniendo defectos superficiales como rechupes. Las medidas generales de la caja son: 166.5 x 340 x 190 mm. Los radios en las esquinas miden: 4.35 mm de radio externo y 2.06mm de radio interno; el radio medio es de 3.209 mm. El dato de longitud para las predicciones es de 83.245 mm. El espesor de pared es de 2.284 mm. La batería está hecha de 80% Polipropileno virgen mezclado con 20% de polipropileno reciclado. La relación de R/t es de 1.9. Se tomaron 7 muestras de la caja.



FIGURA 65 Caja para batería MC30H

La caja ACUMEX también tiene 5 interceldas (Figura 66); en las paredes de la caja no tiene texturas. Tienen reforzadores estructurales en las paredes a los extremos de la caja. Las medidas generales de la caja son: 165.774 x 249 x 150 mm. Los radios en las esquinas miden: 4.59 mm de radio externo y 2.31 mm de radio interno; el radio medio es de 3.45 mm. El dato de longitud para las predicciones es de 82.887 mm. El espesor de pared es de 2.28 mm. La batería está hecha de Polipropileno virgen denominado Moplen. La relación R/t es de 1.51. Se tomaron 5 muestras de la caja de un molde (molde 1) y 3 muestras de otro molde (molde 2).

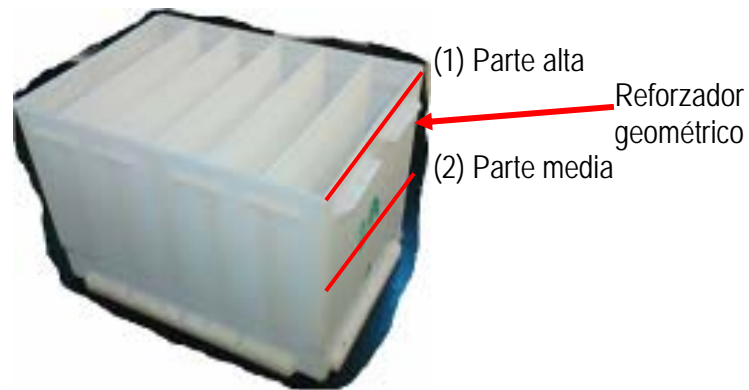


FIGURA 66 Caja para batería ACUMEX P-47

La caja GR-31 al igual de los otros dos casos tiene 5 interceldas (Figura 67); en las paredes externas de la caja tiene texturas en forma de ondas que ayudan a reforzar estructuralmente la pieza. Las medidas generales de la caja son: 165.774 x 340 x 190 mm. Los radios en las esquinas miden: 3.48 mm de radio externo y 1.57 mm de radio interno; el radio medio es de 2.53 mm. El dato de longitud para las predicciones es de 82.85 mm. El espesor de pared es de 1.904 mm. La batería está hecha de Polipropileno virgen con un porcentaje de reciclado. La relación R/t es de 1.3. Se tomaron 2 muestras de la caja.



FIGURA 67 Caja para batería GR-31

La relación R/t de la caja MC30H y la ACUMEX P-47 está en el rango de operación para la ecuación 11. La relación de la caja GR-31 esta en rango de R/t para la ecuación 7. Estas ecuaciones se encuentran en el capítulo 3. Los espesores de la caja MC30H y ACUMEX P-47 son iguales, el espesor de la caja GR-31 es el menor de los tres casos, así como su radio medio. La longitud total es muy parecida en los tres casos. Tabla 9.

TABLA 9 Comparación de geometrías y materiales para validación experimental

Producto	R/t	R (mm)	t (mm)	L (mm)	Material
MC30H	1.9	3.209	2.284	83.245	Polipropileno (80% Virgen 20% Reciclado)
ACUMEX P-47	1.51	3.45	2.28	82.887	Polipropileno Moplen
GR-31	1.3	2.53	1.904	82.85	Polipropileno (80% Virgen 20% Reciclado)

4.2.1 Mediciones en máquina de coordenadas de las muestras

Las muestras tomadas se midieron en máquina de coordenadas (Figura 68). La manera de medir fue la siguiente: se utilizaron las esquinas de la caja para tomar la referencia y poder medir la deformación total. Para poder medir en la máquina de coordenadas se tuvo que haber especificado el cero de la pieza. El cero de pieza se define mediante la creación de tres planos que intersectados forman un punto de referencia en el espacio. Se midieron 7 puntos en la caja MC30H (como se muestra en la figura 65), 7 puntos en la caja ACUMEX P-47 y 5 puntos en la caja GR-31.



FIGURA 68 Mediciones de la caja MC30H en máquina de coordenadas.

Los resultados de las mediciones se clasificaron en máximo, mínimo y promedio. De los resultados de las mediciones de la caja MC30H se identifica que la máxima deformación se encuentra en la mitad de la pared y en la parte más alta, la posición está marcada como número 4 en la tabla 10. Todas la deformaciones son menores a 2.5 milímetros.

TABLA 10 Mediciones en máquina de coordenadas de la caja MC30H

Posición	Lado														Max	Min	Promedio
	A							B									
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7			
1	1.094	1.31	1.274	1.201	1.264	1.229	1.229	1.168	1.153	1.104	1.114	1.05	1.196	1.147	1.31	1.05	1.18
2	1.559	1.907	1.913	1.829	1.856	1.876	1.855	1.605	1.763	1.713	1.725	1.531	1.783	1.743	1.91	1.53	1.76
3	1.833	2.276	2.258	2.208	2.225	2.241	2.209	1.843	2.125	2.042	2.103	1.845	2.141	2.079	2.28	1.83	2.10
4	1.906	2.386	2.375	2.33	2.343	2.348	2.332	1.91	2.263	2.113	2.239	1.977	2.288	2.226	2.39	1.91	2.22
5	1.827	2.222	2.238	2.206	2.187	2.228	2.205	1.783	2.155	2.053	2.143	1.895	2.188	2.142	2.24	1.78	2.11
6	1.574	1.845	1.86	1.812	1.864	1.848	1.824	1.53	1.83	1.65	1.793	1.599	1.844	1.81	1.86	1.53	1.76
7	1.053	1.178	1.255	1.19	1.276	1.206	1.176	1.019	1.264	1.081	1.19	1.076	1.18	1.218	1.28	1.02	1.17

Las mediciones de la caja ACUMEXP-47 molde 1 se muestran en la tabla 11. Al igual que la caja MC30H, la máxima deformación se encontró en la mitad de la pared y en la parte más alta. Las deformaciones no son mayores a 2.5 milímetros.

TABLA 11 Mediciones en máquina de coordenadas de la caja ACUMEX P-47 molde 1

Posición	Lado										Max	Min	Promedio
	A (Izquierdo)					B (Derecho)							
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5			
1	0.472	0.322	0.377	0.384	0.326	1	0.508	0.431	0.522	0.464	1.00	0.32	0.48
2	0.666	0.925	0.907	0.96	0.876	1.62	0.92	0.941	1.008	0.962	1.62	0.67	0.98
3	1.164	1.5	1.515	1.536	1.456	2.184	1.58	1.488	1.572	1.496	2.18	1.16	1.55
4	1.368	1.95	1.92	1.937	1.877	2.5	1.954	1.825	1.88	1.821	2.50	1.37	1.90
5	1.156	1.819	1.779	1.79	1.76	2.15	1.667	1.553	1.562	1.54	2.15	1.16	1.68
6	0.713	1.42	1.413	1.41	1.403	1.597	0.823	1.04	1.039	1.02	1.60	0.71	1.19
7	0.408	1.05	0.928	1.013	1.039	0.943	0.629	0.557	0.527	0.545	1.05	0.41	0.76

Se midieron las muestras de la caja ACUMEX-P47 molde 2. La máxima deformación se encontró a la mitad de la altura (marcado como 1 en la figura 66) a la mitad de la pared. A diferencia del molde 1. La deformación en la parte alta es casi nula y no se muestra un patrón definido. Tabla 12.

TABLA 12 Mediciones en máquina de coordenadas de la caja ACUMEX P-47 molde 2

Posición	ACUMEX P-47 Molde 2											
	Parte Alta (1)			Max	Min	Promedio	Parte media (2)			Max	Min	Promedio
	1	2	3				1	2	3			
1	0.232	0.204	0.311	1	0.322	-0.25	-0.528	-0.639	-0.529	-0.528	-0.639	-0.57
2	0.33	0.386	0.473	1.62	0.666	-0.40	-1.222	-1.225	-1.187	-1.187	-1.225	-1.21
3	0.163	0.291	0.381	2.184	1.164	-0.28	-1.634	-1.641	-1.577	-1.577	-1.641	-1.62
4	0.205	0.043	0.03	2.5	1.368	-0.09	-1.846	-1.762	-1.737	-1.737	-1.846	-1.78
5	0.035	0.178	0.189	2.15	1.156	-0.13	-1.685	-1.577	-1.55	-1.55	-1.685	-1.60
6	0.118	0.264	0.265	1.597	0.713	-0.22	-1.248	-1.137	-1.122	-1.122	-1.248	-1.17
7	0.059	0.165	0.143	1.05	0.408	-0.12	-0.667	-0.555	-0.458	-0.458	-0.667	-0.56

Las mediciones de la caja GR-31 se muestran en la tabla 13. Al igual que la caja MC30H y la ACUMEX P-47, la máxima deformación se encontró en la mitad de la pared. Las deformaciones son mayores a 2.5 milímetros, con un máximo de 2.66 milímetros de deformación en la mitad de la pared. Tabla 4.5

TABLA 13 Mediciones en máquina de coordenadas de la caja GR-31

Posición	Lado				Max	Min	Promedio
	A (Izq)		B (Der)				
	1	2	1	2			
1	0.898	1.752	1.322	0.921	1.75	0.90	1.22
2	1.364	2.445	2.071	1.471	2.45	1.36	1.84
3	1.497	2.657	2.208	1.609	2.66	1.50	1.99
4	1.132	2.56	2.017	1.467	2.56	1.13	1.79
5	0.801	1.735	1.215	0.932	1.74	0.80	1.17

Los resultados de las mediciones de la caja MC30H se muestran gráficamente en la figura 69, la gráfica muestra que el rango de variación es pequeño, el máximo rango de variación encontrado en los datos es de 0.48 milímetros y se localiza en la zona de máxima deformación.

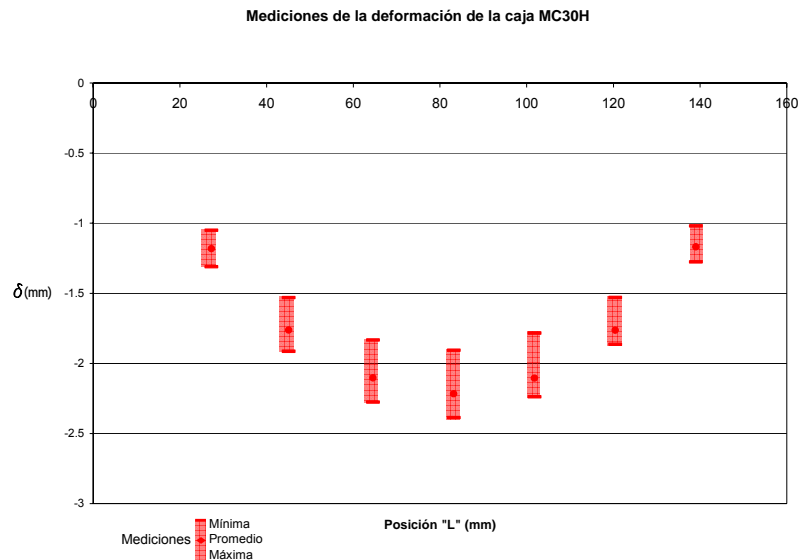


FIGURA 69 Gráfica de los resultados de las mediciones de la caja MC30H

Los resultados de las mediciones de la caja ACUMEX P-47 se muestran gráficamente en la figura 70, la gráfica muestra que tiene un rango de variación más amplio que el de la caja 30H. El máximo rango de variación encontrado en los datos es de 0.54 y se localiza en la zona de máxima deformación.

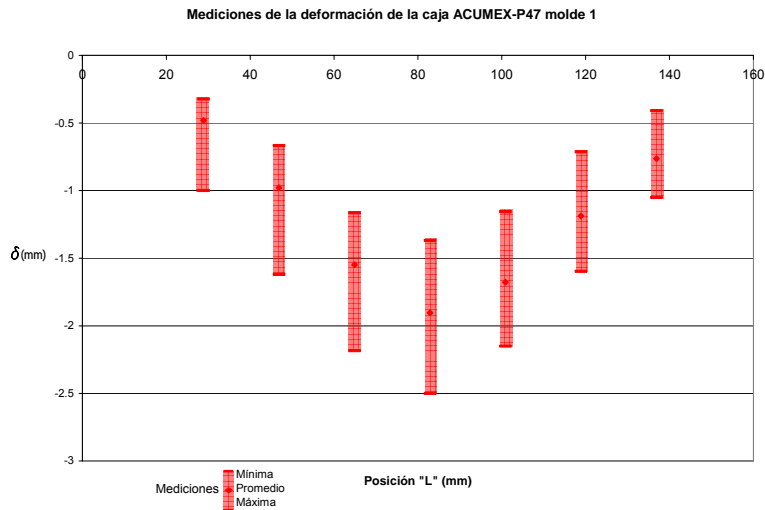


FIGURA 70 Gráfica de los resultados de las mediciones de la caja ACUMEX P-47 molde 1

Las mediciones de las muestras de la caja ACUMEX P-47 molde 2 se hicieron en el lado izquierdo de la caja. Se midieron las deformaciones de los mismos 7 puntos que el molde 1; en la parte alta. Y además en la parte media de la caja (Figura 66). Los resultados muestran que las cajas del molde 2 se deforman muy poco en la parte alta de las muestras; esto se debe a que se modificaron las dimensiones del diseño del reforzador geométrico (Figura 66). Sin embargo, la deformación máxima se encuentra a la mitad de la altura y a la mitad de la pared, estas deformaciones son del orden de magnitud de las deformaciones del molde 1. Los rangos de medición son pequeños debido a que se midió un solo lado de la caja. Figura 71

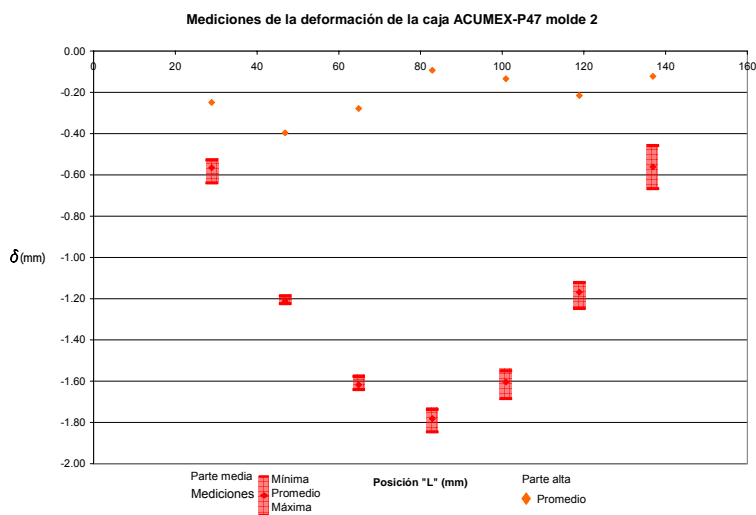


FIGURA 71 Gráfica de los resultados de las mediciones de la caja GR-31

Los resultados de las mediciones de la caja ACUMEX P-47 se muestran gráficamente en la figura 72, la gráfica muestra que el rango de variación pequeño, el máximo rango de variación encontrado en los datos es de 1.43 y se localiza a un lado de la zona de máxima deformación.

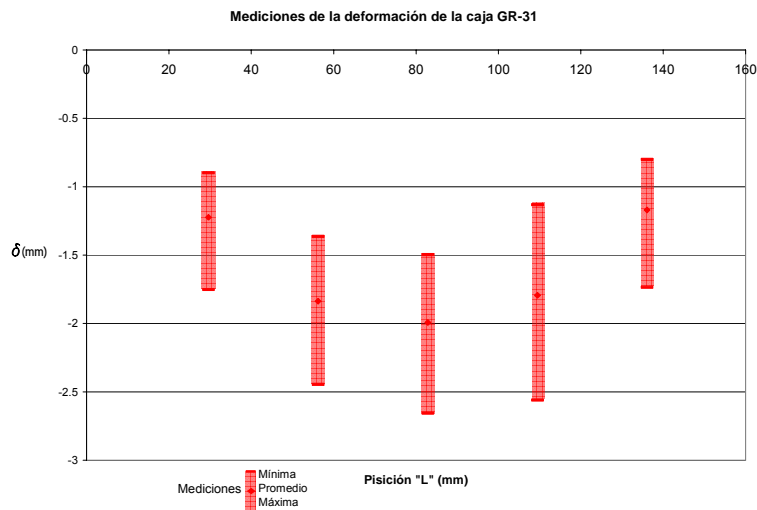


FIGURA 72 Gráfica de los resultados de las mediciones de la caja GR-31

4.2.2 Mediciones de temperatura de expulsión

Para modelar la deformación de las cajas se requirió de hacer mediciones de la temperatura de expulsión de las piezas. La temperatura de expulsión es la temperatura a la que se encuentra la pieza al momento de ser expulsada de la cavidad del molde. La única temperatura de expulsión medida fue la temperatura de la caja MC30H. Las temperaturas de expulsión de las otras cajas no pudieron ser medidas debido a que no estaban en producción. Se utilizó el mismo instrumento usado para medir la temperatura del molde (figura 73).

Se hicieron tres mediciones a diferentes cajas, es decir, del proceso de inyección de la caja MC30H se tomaron las cajas de tres ciclos diferentes; en cada caja se midió la temperatura en la parte alta, en la parte media y en la base de la batería (Figura 66). Los resultados de las temperaturas de expulsión se muestran en la tabla 14.

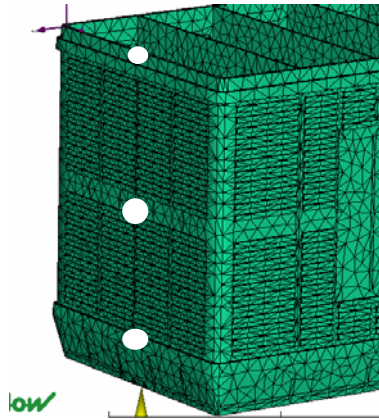


FIGURA 73 Localización de mediciones de temperatura de expulsión en la caja MC30H

En promedio la temperatura de expulsión de la pieza en la parte alta de la caja es de 65 Celsius; el rango de temperaturas es de 6 Celsius. Las temperaturas que se utilizaron para modelar la deformación fueron las de la parte alta. Como no se tienen datos experimentales de la temperatura de expulsión para las cajas ACUMEX P-47 y GR-31. Partiendo de los datos tomados y la similitud se puede suponer que el rango de temperaturas seguramente estará entre 60 y 70 grados Celsius y con una media de alrededor de 65. Tabla 14

TABLA 14 Mediciones de la temperatura de expulsión de la caja MC30H

Mediciones de la temperatura de expulsión de la caja MC30H (Celsius)		
Parte alta	Parte media	Base
63	80	90
65	79	91
68	75	93

4.2.3 Caracterización de los Coeficientes de Expansión Térmica

A este punto se requiere de utilizar datos más reales de las propiedades de los materiales que se utilizan para manufacturar cada una de las cajas. El material utilizado para las cajas MC30H y GR-31 es una mezcla de polipropileno virgen con reciclado. Y el material de la caja ACUMEX P-47 es polipropileno denominado Moplen. El índice de fluidez del material Moplen es de 2, por lo que se requiere de mayor presión para poder llenar la cavidad del molde. El índice de fluidez del polipropileno virgen-reciclado es de alrededor de 10, por lo que hace que en el proceso las presiones de inyección sean menores.

Se requirió de pedir servicios a externos para obtener las propiedades de coeficiente de expansión térmica. La empresa que realizó las pruebas fue el Centro de Investigación en Química Aplicada. Los CTE fueron obtenidos mediante una prueba de análisis termomecánico, el método de prueba de referencia fue el ASTM-E-821-2006 (Anexo 1). El equipo utilizado fue un analizador termomecánico denominado CCQ-03 por la empresa. Las condiciones particulares de la prueba fueron: 10 Celsius por minuto de velocidad de calentamiento; el flujo de nitrógeno fue de 53 centímetros cúbicos por minuto; y la temperatura de prueba fue de temperatura ambiente a 120 Celsius (Tabla 15). La temperatura ambiente promedio utilizada fue de 23 Celsius. Los resultados completos y gráficas de las pruebas se muestran en el anexo 2.

TABLA 15 Caracterización del coeficiente de expansión térmica de PP80%20% y PP Moplen

Rango de temperaturas	Moplen m/m C	Virgen+reciclado m/m C
T amb to 40 C	0.00010875	0.00008505
T amb to 45 C	0.000115125	0.00009705
T amb to 50 C	0.0001215	0.00010905
T amb to 55 C	0.00012125	0.000118025
T amb to 60 C	0.000121	0.000127
T amb to 65 C	0.0001245	0.00013625
T amb to 70 C	0.000128	0.0001455
T amb to 75 C	0.000133	0.00015575
T amb to 80 C	0.000138	0.000166
T amb to 90 C	0.000154	0.0001855

Para las modelaciones de las cajas ya sea analítico, ANSYS y Mold-Flow se tuvieron que obtener los valores de CTE para las temperaturas de expulsión descritas anteriormente. En el caso de la caja MC30H, los valores de los coeficientes de expansión térmica utilizados fueron: $12.9 \times 10^{-5} \text{ m/m }^\circ\text{C}$ para la temperatura de 63 grados, $13.625 \times 10^{-5} \text{ m/m }^\circ\text{C}$ para la temperatura de 65 grados Celsius y de $13.9 \times 10^{-5} \text{ m/m }^\circ\text{C}$ para la temperatura de 68 grados Celsius.

Para el caso de la caja ACUMEX P-47, los valores de los coeficientes de expansión térmica utilizados fueron: $12.1 \times 10^{-5} \text{ m/m }^\circ\text{C}$ para la temperatura de 60 grados, $12.45 \times 10^{-5} \text{ m/m }^\circ\text{C}$ para la temperatura de 65 grados Celsius y de $12.8 \times 10^{-5} \text{ m/m }^\circ\text{C}$ para la temperatura de 70 grados Celsius.

En el caso de la caja GR-31, los valores de los coeficientes de expansión térmica utilizados fueron: $12.7 \times 10^{-5} \text{ m/m }^\circ\text{C}$ para la temperatura de 60 grados, $13.625 \times 10^{-5} \text{ m/m }^\circ\text{C}$ para la temperatura de 65 grados Celsius y de $14.55 \times 10^{-5} \text{ m/m }^\circ\text{C}$ para la temperatura de 68 grados Celsius.

4.3 Modelación Analítica de la deformación de los casos experimentales

Se modelaron los tres casos experimentales con las ecuaciones analíticas 7 y 11, según es el caso R/t. Para la caja MC30H y ACUMEX P-47 se utilizó la ecuación 11 y para la caja GR-31 se utilizó la ecuación 7. Se utilizaron los valores de caracterizaron del CTE para los diferentes casos descritos anteriormente.

En el caso de la caja MC30H, se utilizó un cambio de temperaturas de 40 para la temperatura de expulsión de 63 Celsius, un cambio de temperaturas de 42 para la temperatura de expulsión de 65 Celsius y un cambio de temperaturas de 45 para la temperatura de expulsión de 68 Celsius. Figura 74.

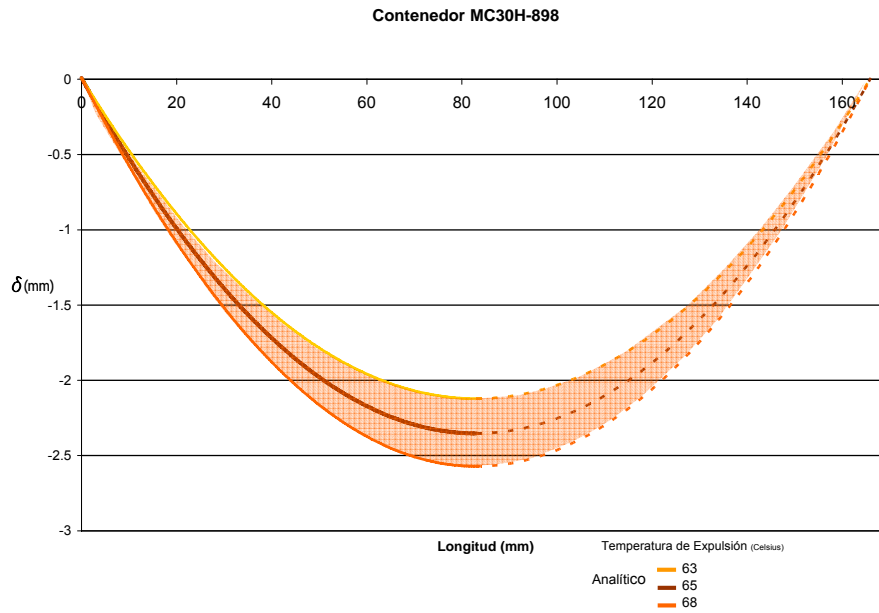


FIGURA 74 Resultados de modelación analítica caja MC30H, Deformación vs longitud a lo largo de la pared

En el caso de la caja ACUMEX P-47, se utilizó un cambio de temperaturas de 37 para la temperatura de expulsión de 60 Celsius, un cambio de temperaturas de 42 para la temperatura de expulsión de 65 Celsius y un cambio de temperaturas de 47 para la temperatura de expulsión de 70 Celsius. Figura 75.

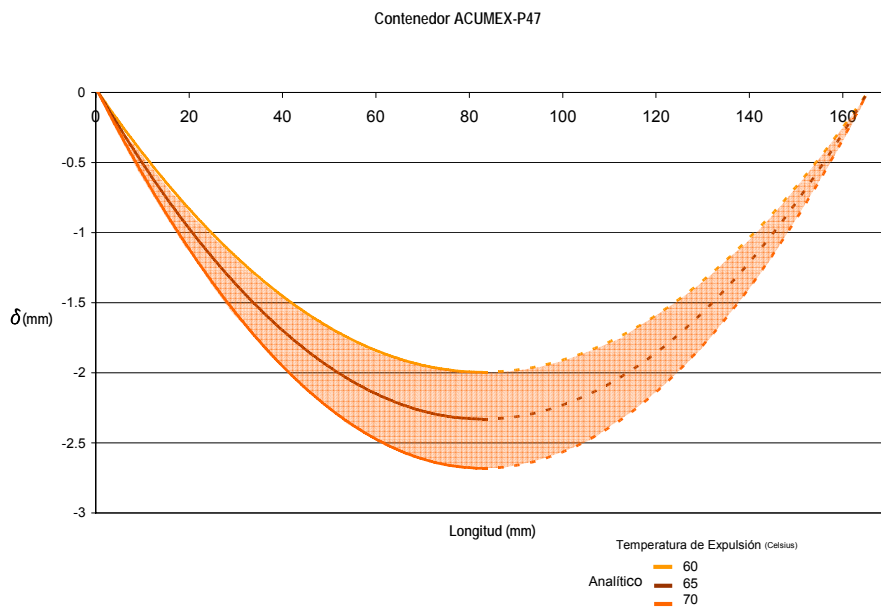


FIGURA 75 Resultados de modelación analítica caja ACUMEX P-47, Deformación vs longitud a lo largo de la pared

En el caso de la caja GR-31, a igual que la caja ACUMEX P-47, se utilizó un cambio de temperaturas de 37 para la temperatura de expulsión de 60 Celsius, un cambio de temperaturas de 42 para la temperatura de expulsión de 65 Celsius y un cambio de temperaturas de 47 para la temperatura de expulsión de 70 Celsius. Figura 76.

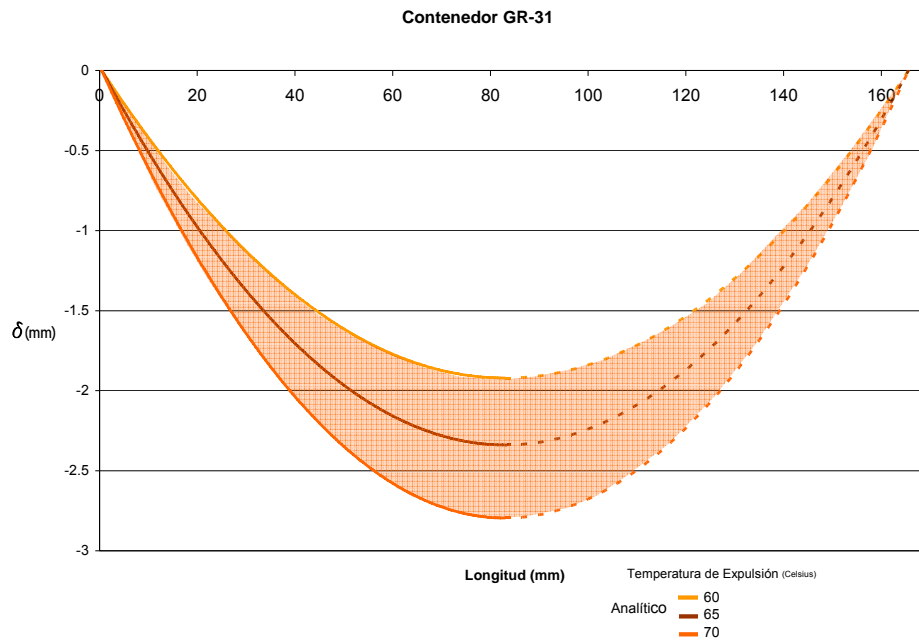


FIGURA 76 Resultados de modelación analítica caja GR-31, Deformación vs longitud a lo largo de la pared

4.4 Modelación de la contracción térmica en ANSYS de los casos experimentales

Se utilizaron las dimensiones de las características geométricas de las cajas MC30H, ACUMEX P-47 y GR-31 para modelar la contracción térmica desde la temperatura de expulsión, medida experimentalmente, hasta la temperatura ambiente (temperatura ambiente de los resultados de caracterización). Estas modelaciones se hicieron para comparar todos los datos disponibles (predicción analítica, mediciones, ANSYS, MoldFlow) de cada producto escogido de la planta ENERTEC. En el caso de la caja MC30H, el resultado de ANSYS de la contracción muestra una

deformación máxima de 2.398 mm (Figura 77). Las condiciones de simulación son las mismas descritas en la parte 4.1.

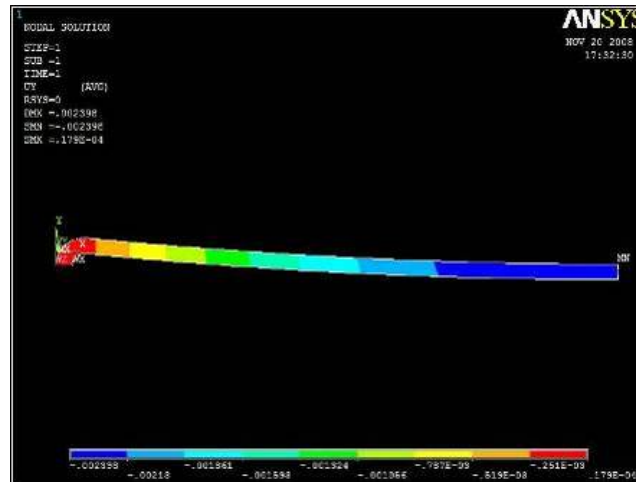


FIGURA 77 Simulación en ANSYS de la contracción térmica de la caja MC30H

De los resultados de ANSYS se obtuvo la deformación en aquellos puntos donde se midieron las muestras físicamente para efectos de comparación. Figura 78

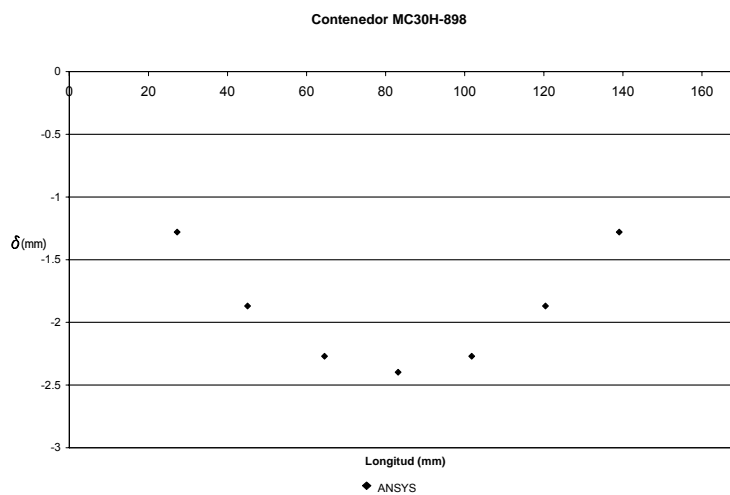


FIGURA 78 Resultados de simulación en ANSYS de los puntos medidos en las muestras físicas de la caja MC30H

En el caso de la caja ACUMEX P-47, el resultado de ANSYS de la contracción muestra una deformación máxima de 2.342 mm (Figura 79)

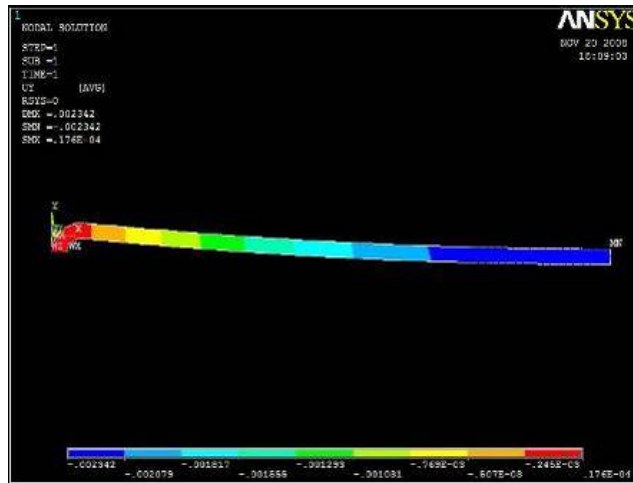


FIGURA 79 Simulación en ANSYS de la contracción térmica de la caja ACUMEX P-47

De los resultados de ANSYS se obtuvo la deformación en aquellos puntos donde se midieron las muestras físicamente para efectos de comparación. Figura 80

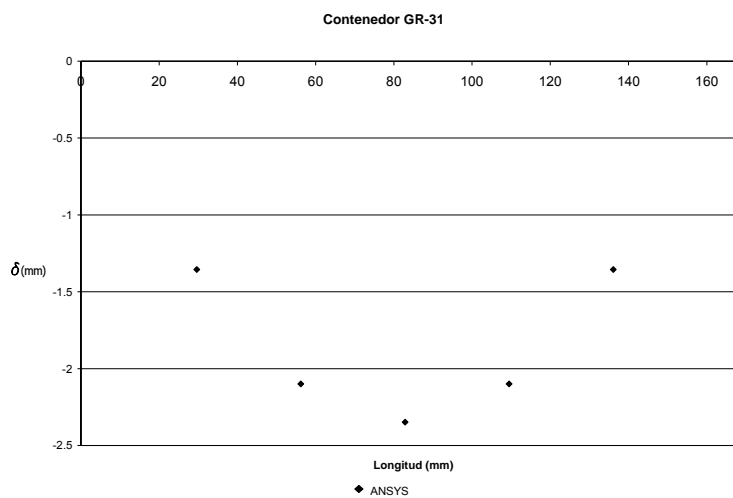


FIGURA 80 Resultados de simulación en ANSYS de los puntos medidos en las muestras físicas de la caja ACUMEX P-47

En el caso de la caja GR-31, el resultado de ANSYS de la contracción muestra una deformación máxima de 2.348 mm (Figura 81)

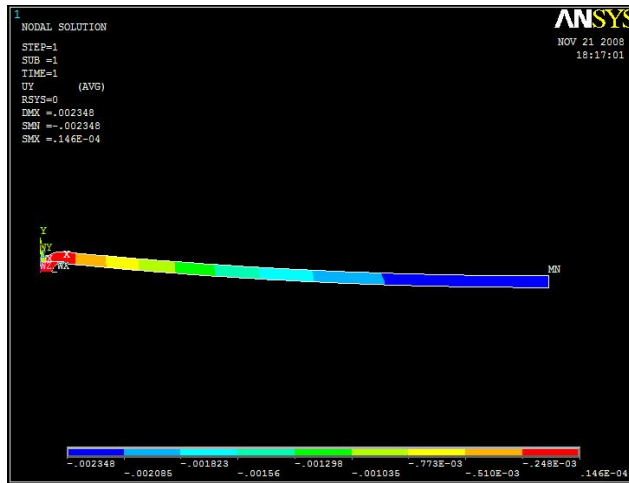


FIGURA 81 Simulación en ANSYS de la contracción térmica de la caja GR-31

Al igual que los otros resultados se obtuvo la deformación en aquellos puntos donde se midieron las muestras físicamente para efectos de comparación. Figura 82

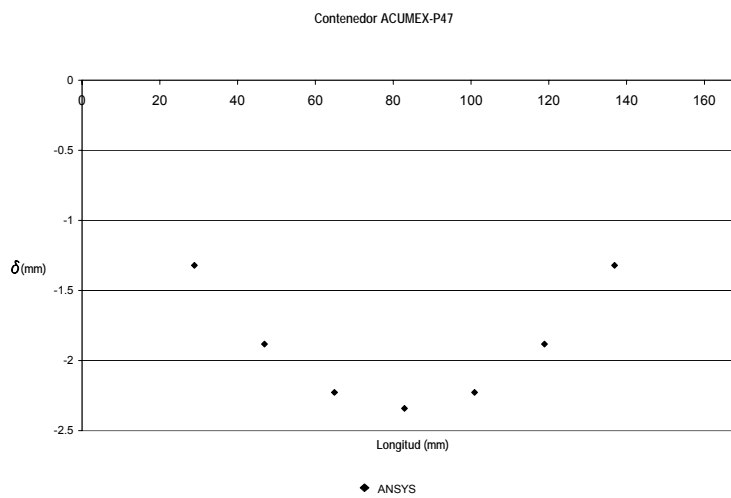


FIGURA 82 Resultados de simulación en ANSYS de los puntos medidos en las muestras físicas de la caja GR-31

4.5 Modelación en Mold-Flow de la caja MC30H

Para conocer las deformaciones que Mold-flow puede predecir, se corrió una simulación de la caja MC30H. Los resultados de la simulación ayudaron a comparar los datos empíricos y analíticos. De los resultados se puede decir que la deformación máxima se encuentra en la parte alta de la caja y a la mitad de la pared (Figura 83). La máxima deformación fue de 2.203 mm. Solo se modeló la caja MC30H debido a cuestiones de logística y costos.

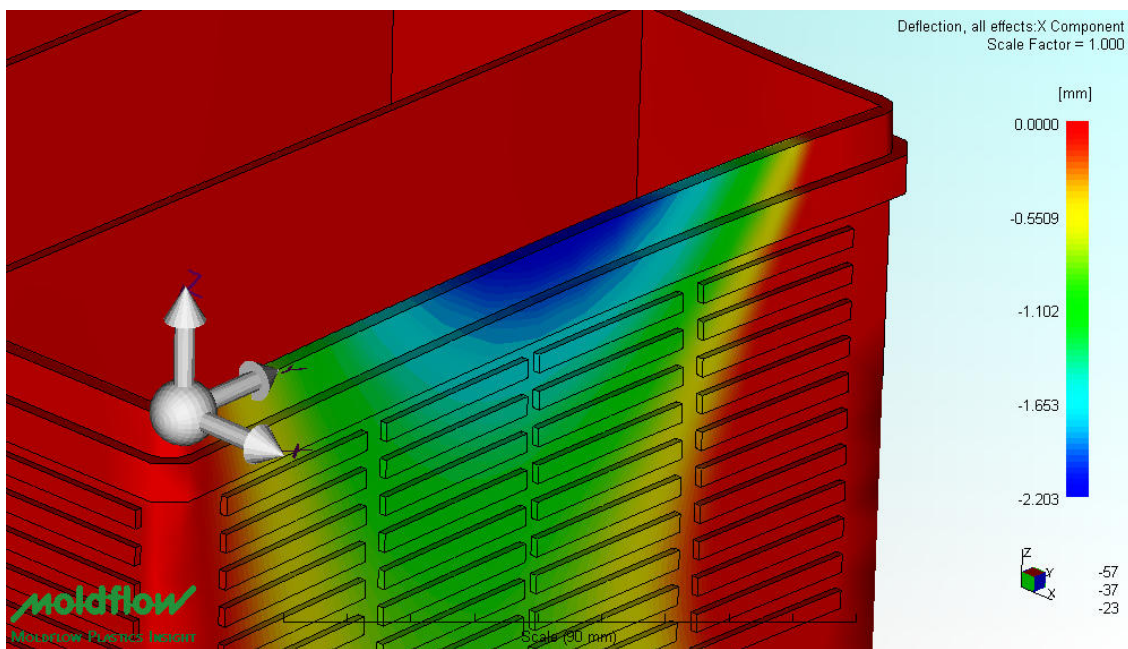


FIGURA 83 Resultados de la simulación de Mold-Flow de la deformación de la caja MC30H

Se obtuvo el perfil de deformaciones para comparar con los perfiles de los modelos analíticos, ANSYS y con los datos experimentales (Tabla 16). El perfil de deformación de la caja se muestra de manera gráfica en la figura 84.

TABLA 16 Deformación y posición de los nodos de la simulación de Mold-Flow, Caja MC30H

ID Nodo	324	306	14080	12841	14748	9396	14414	13465	15082	7285	14247
L [mm]	0.00	4.78	11.19	19.86	30.90	40.75	50.02	60.46	70.32	80.17	83.16
δ [mm]	0.00	-0.21	-0.45	-0.77	-1.14	-1.44	-1.68	-1.92	-2.09	-2.19	-2.20

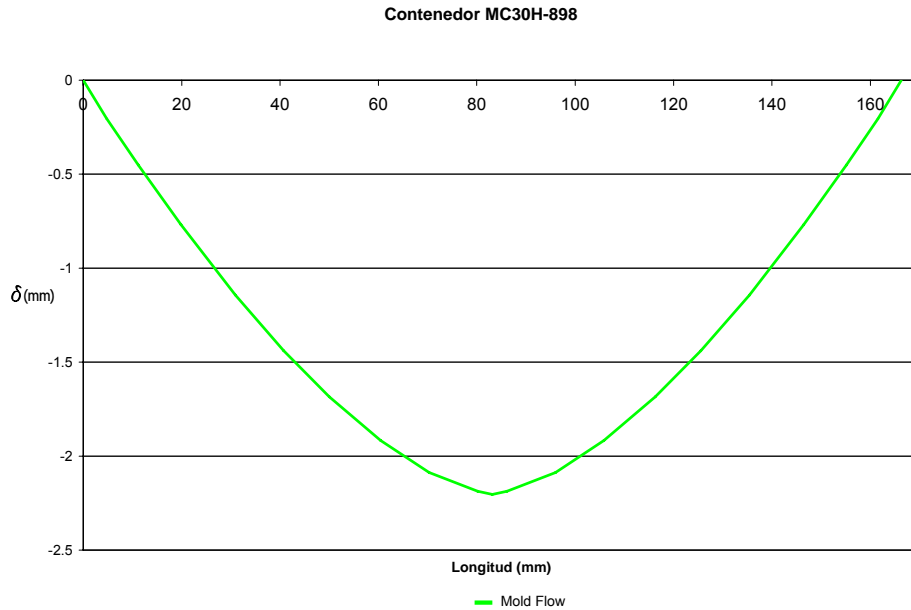


FIGURA 84 Resultados simulación de Mold-Flow de la deformación de la caja MC30H

Para validar las simulaciones se obtuvo la distribución de las temperaturas de la caja al momento de la expulsión. La distribución muestra que la temperatura de expulsión en la parte alta es de entre 66 y 71 grados Celsius (Figura 85); Y el valor experimental es de entre 63 y 68 Celsius (Tabla 4.6).

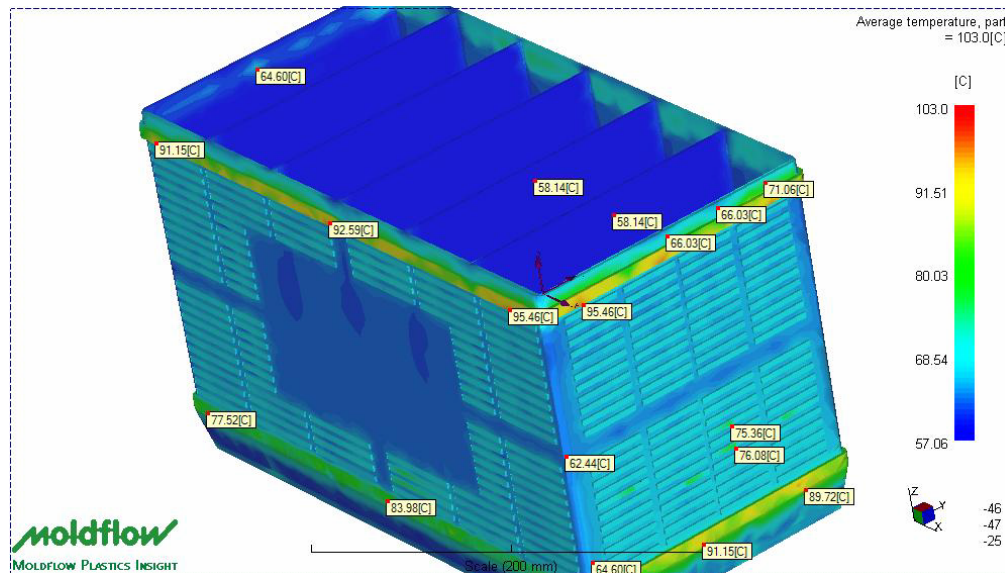


FIGURA 85 Resultados simulación de Mold-Flow de la distribución de temperaturas de expulsión de la caja MC30H

4.6 Comparación de datos experimentales con modelo analítico, ANSYS y Mold-Flow

Los resultados de las mediciones de las deformaciones de las cajas, los resultados de la modelación analítica y los resultados de la modelación de la contracción térmica se integraron para poder ser comparados en una sola figura. La gráfica de comparación de los resultados de la caja MC30H se muestra en la figura 86. Para la caja ACUMEX P-47 se muestra en la figura 87 y la caja GR-31 se muestra en la figura 88.

Contenedor MC30H-898

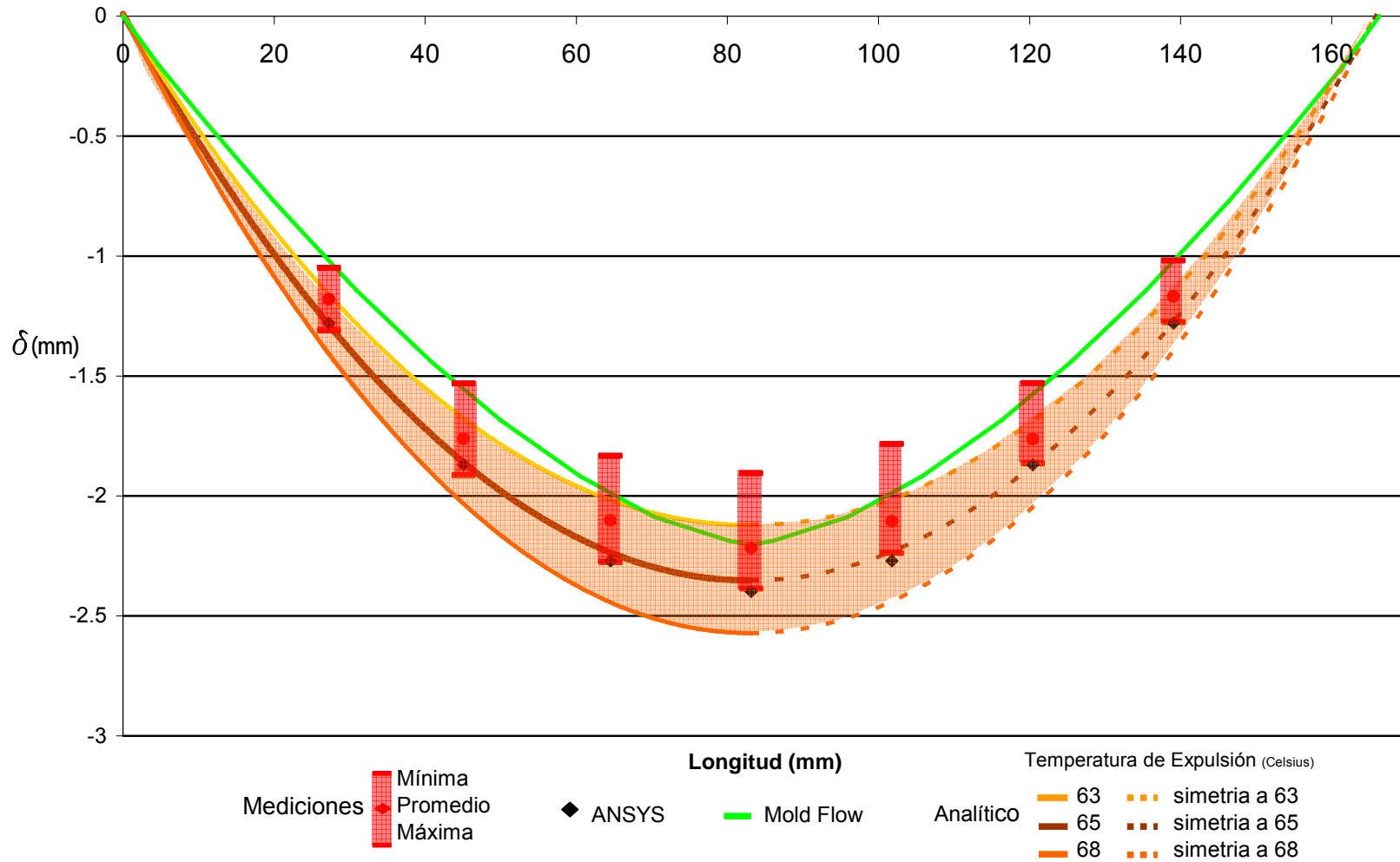


FIGURA 86 Comparación resultados experimentales, modelo analítico y ANSYS, contenedor MC30H

Contenedor ACUMEX-P47

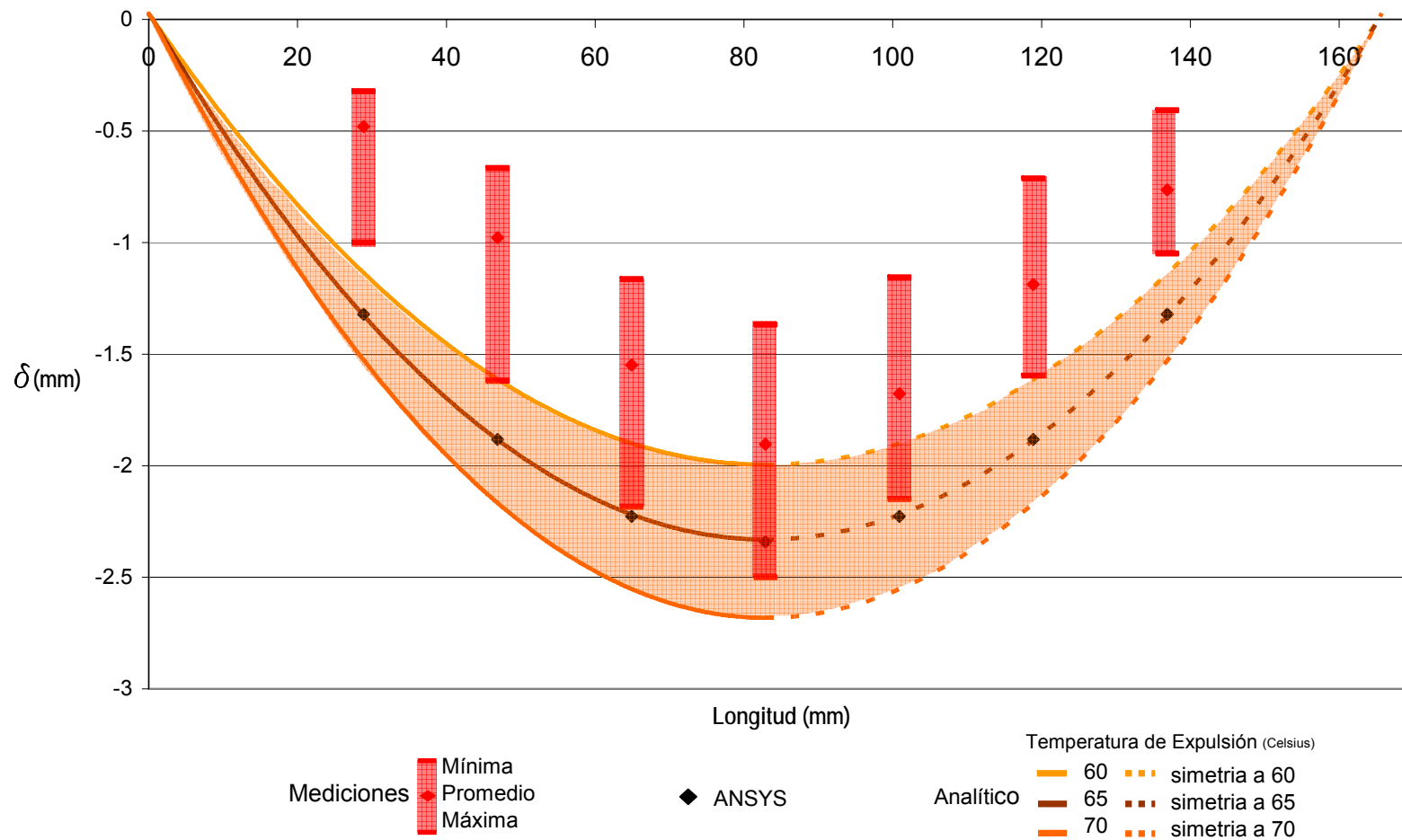


FIGURA 87 Comparación resultados mediciones, modelo analítico y ANSYS, Contenedor ACUMEX-47

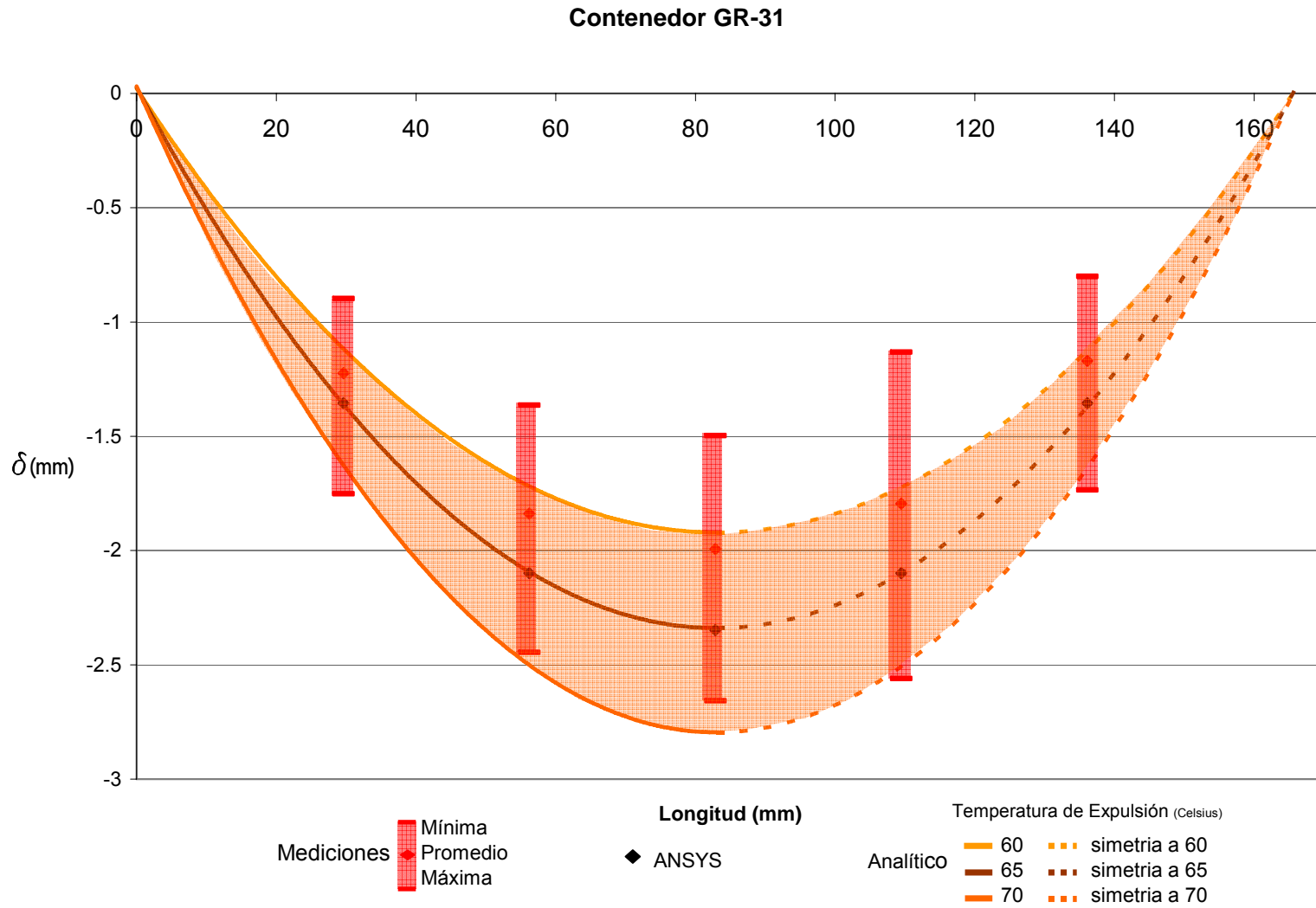


FIGURA 88 Comparación Resultados experimentales, modelo analítico y ANSYS, contenedor GR-31

4.7 Discusión de resultados

Los resultados que arroja el modelo desarrollado están en un rango de error del 8% en comparación con los resultados que arrojan las simulaciones de elementos finitos (ANSYS). A partir de la validación de la formulación matemática con FEA se definieron los rangos de operación de las ecuaciones desarrolladas; de 1 a 1.3 R/t y de 4 a 10 R/t se utiliza la ecuación 7; Y, mayor a 1.3 hasta menor a 4 R/t se utiliza la ecuación 11.

De la obtención de datos experimentales se comprobó que las mediciones presentan simetría en las deformaciones de la estructura, es decir, lo que sucede de un lado de la U, sucede del otro lado. Además, todas las cajas medidas se deforman más de un lado que del otro. Esto se debe, probablemente, a que una de las paredes está más caliente. Según el modelo desarrollado, a mayor temperatura de expulsión mayor es la deformación, por lo que la variación de la deformación entre los dos extremos de las cajas se puede explicar en términos de diferencias en temperaturas de expulsión en los extremos de las cajas. Durante la obtención de datos experimentales, las mediciones de temperatura fueron hechas solamente en un lado de la caja debido a la posición que se encuentran dentro de las cavidades del molde; Por eso, fue difícil medir la temperatura de expulsión del otro extremo de las cajas.

También se encontró que en la caja ACUMEX P-47 el espesor de pared no es constante, por lo que afecta el perfil de deformación. Las mediciones de las deformaciones del molde 2 indican que casi no se deforma en la parte alta del contenedor. Sin embargo, se deforma a la altura media de la mitad de la pared del contenedor. La causa de que no se deforme es que tiene un reforzador geométrico que provoca que se genere un momento de giro contrario a la dirección de la deformación, compensando los esfuerzos generados y promoviendo que la pared no se deforme.

De la caracterización del coeficiente de expansión térmica, el material con mayor CTE es el polipropileno con 80% virgen y 20% reciclado. Una posible razón del porqué es mayor, es que el polipropileno 80% V y 20% R tiene un índice de fluidez cinco veces mayor que el índice de fluidez del polipropileno Moplen. Esto impacta las condiciones del procesado; a menor índice de fluidez, mayor son los requerimientos de presión, por lo que se requiere una mayor presión para poder empacar el material.

Las predicciones del modelo analítico se evaluaron en el rango de temperaturas de expulsión medidas; los resultados analíticos se presentan a manera de rango de predicciones debido a la variación encontrada de las temperaturas de expulsión durante el proceso. De la comparación de los resultados del modelo analítico, mediciones experimentales, ANSYS y Mold-Flow se encontró que las deformaciones de las cajas analizadas son muy similares, del mismo orden de magnitud. La comparación de los resultado analíticos de todos los casos, en comparación con las mediciones de deformación, están entre la media y la máxima.

El perfil de deformación predicho por el modelo analítico es muy similar al perfil de deformación de las mediciones experimentales. El perfil de deformación obtenido de las simulaciones de Mold-Flow difiere del modelo analítico y de las mediciones de experimentales debido a que al momento de construir el modelo se tuvieron que hacer simplificaciones al dibujo CAD para reducir tiempos de preparación. Se eliminó el radio interno, quedando una esquina cuadrada. Sin embargo, las predicciones de Mold-Flow en el centro de la pared son muy exactas, y conforme se acerca a la esquina el perfil de deformación se desfasa.

Akkerman et. al. [11] reportaron que el 60% del fenómeno de "Spring-Forward" es causado por el efecto de encogimiento térmico, debido al enfriamiento de las piezas desde la temperatura de esfuerzos libres hasta la temperatura ambiente de piezas con forma de L hechas de termofijos. Al igual que Akkerman et. al. en este desarrollo se puede decir que la mayor parte de la deformación de las paredes de lo productos analizados, con el modelo desarrollado, se debe al encogimiento de la pieza desde su temperatura de expulsión hasta la temperatura ambiente. El orden de magnitud de las predicciones analíticas es muy parecido al orden de magnitud de las deformaciones medidas en las cajas.

4.8 Curvas de diseño para la caja MC30H

Una vez que el desarrollo del modelo ha sido validado se pueden crear curvas de diseño. Estas curvas ayudarán al ingeniero de diseño del producto a determinar las dimensiones de la geometría en función de la deformación de las paredes. Un ejemplo de gráfico es la figura 89. En la gráfica se muestra un diseño que de acuerdo al modelo desarrollado, la pared del producto se deformará alrededor de 1.75 mm. Si la deformación provoca problemas de ensamble, entonces el diseñador podrá tomar acciones de diseño tales que puede jugar con las dimensiones para poder reducir la deformación. De acuerdo con el diseño, el espesor es de alrededor de 2.5 mm y la el cambio de temperaturas es de 50 Celsius. El modelo dicta que a mayor espesor menor es la deformación, por lo que se podrá aumentar el espesor de pared 0.5 milímetros, quedando 3 mm de espesor. Ahora la deformación será de alrededor de 1.45, logrando reducir 0.3 milímetros. Ahora, si la temperatura de expulsión se disminuye se podrá disminuir la deformación; si se reduce de una cambio de temperaturas de 50 a 40, entonces la deformación será 1.15 milímetros, entonces la disminución total es de 0.6 milímetros.

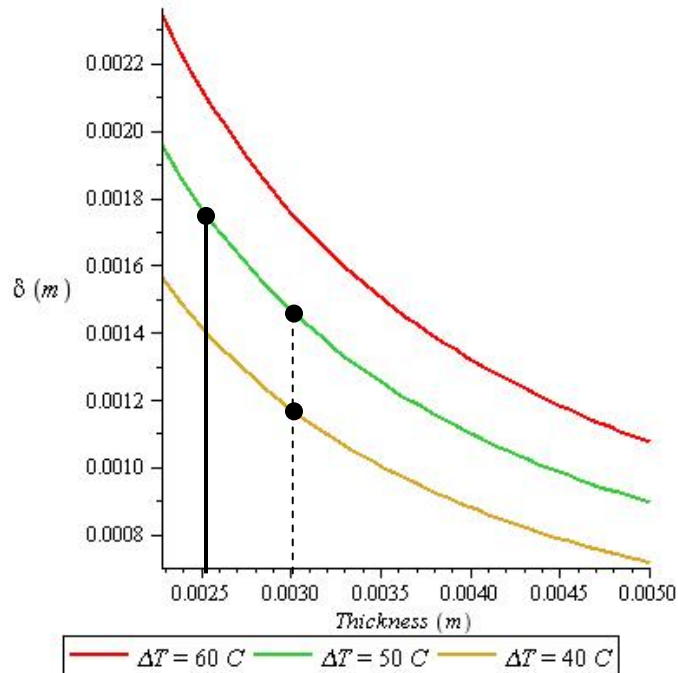


FIGURA 89 Curva de diseño de un producto, tres temperaturas de expulsión y un radio definidos y el espesor como variable dependiente

Otro ejemplo es la gráfica que se muestra en la figura 90. En esta curva de diseño se muestra el efecto de tres espesores de pared con un solo cambio de temperaturas y el radio medio como variable. La figura muestra que a menor radio medio, menor será la deformación. Sin embargo, hay un punto máximo en el que el aumento del radio empieza a afectar positivamente la deformación, es decir, ante una aumento del radio una disminución en la deformación. También existe un radio medio en el que el efecto del espesor se maximiza, es decir, para el radio de alrededor 4 mm, si hay un cambio de espesor de 2.28 mm a 1.14 mm, la deformación será mucho más grande que si el radio fuera 2 mm o mayor a 6 mm. En ese mismo sentido, si el diseño tiene un radio medio mayor a 8 mm entonces el efecto del espesor tiende a uniformarse.

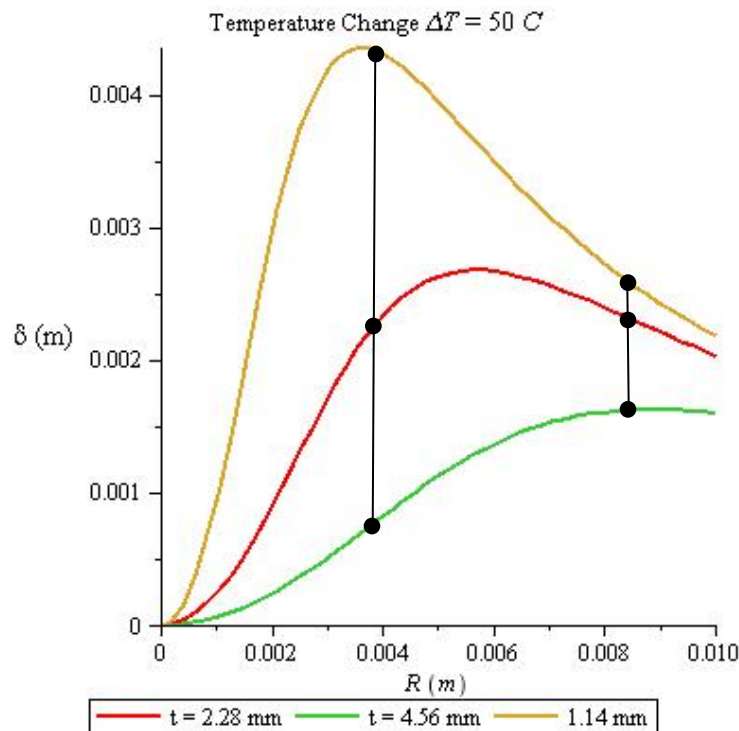


FIGURA 90 Curva de diseño de un producto, una temperatura de expulsión y tres espesores definidos y el espesor como variable dependiente

Por último, la figura 91 muestra la gráfica de diseño de un producto con tres diferentes cambios de temperatura, un espesor y el radio medio como variable. En esta gráfica, el modelo indica que a menor radio el efecto del cambio de temperatura tiende a uniformarse. También, existe un punto máximo entre las tres curvas que hacen que el efecto de la temperatura se maximice, es decir, para el radio medio alrededor de 6 mm y con un espesor de 2.28 mm, si se modifica el cambio de temperaturas de 50 a 60 la deformación tiene su máximo aumento, alrededor de 3.3 mm. Comparado con el diseño actual la deformación aumentó alrededor de 0.7 milímetros.

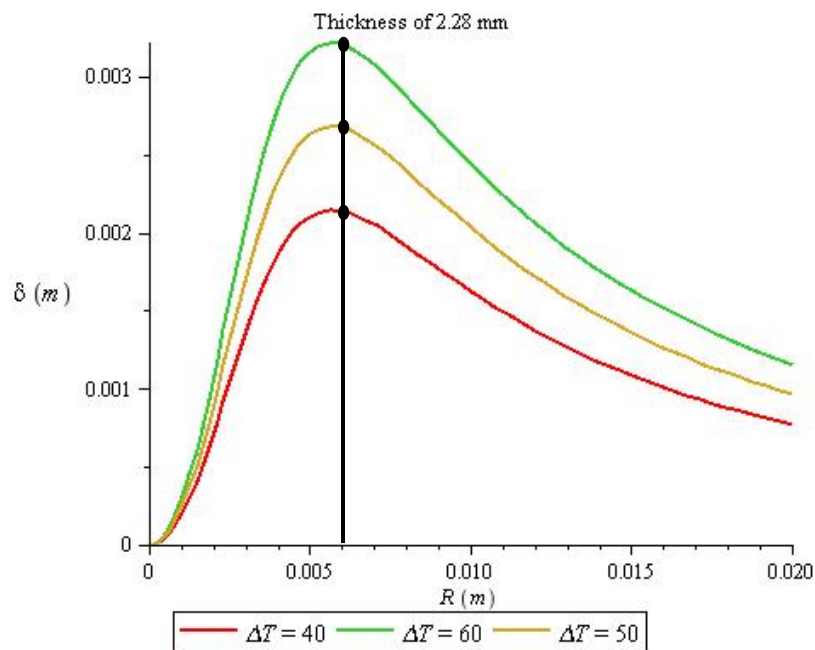


FIGURA 91 Curva de diseño de un producto, una temperatura de expulsión y tres espesores definidos y el espesor como variable dependiente

Capítulo 5 Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

En este trabajo se lograron desarrollar herramientas analíticas para apoyar el proceso de diseño de productos hechos de plástico. Para tal efecto, se analizó el proceso de diseño de un producto típico con la finalidad de identificar pasos en los que una herramienta analítica, específicamente una fórmula, pudo ayudar a establecer características geométricas. La fórmula en cuestión predice la deformación de la pared de piezas con geometría de caja.

Se analizó la metodología de diseño del caso tapa BCI 42 logrando identificar diferentes cuellos de botella dentro de la metodología. De los cuellos de botella identificados, se hizo notar que el uso de una herramienta analítica pudo haber reducido esfuerzos de diseño. El cuello de botella identificado fue que la deformación de las paredes de las cajas para batería podía afectar el ensamble de las baterías; Esto es de suma importancia para la calidad del producto final.

Conforme a la identificación de herramientas potenciales se propuso una solución analítica al cuello de botella identificado; Se logró desarrollar un modelo analítico validado para predecir la deformación de las paredes de productos hechos de plástico con forma de contenedor. El modelo está basado en una estructura en forma de U, que supone simetría, es decir, lo que sucede en una mitad de la U, sucede en la otra mitad. Además, se introdujo una manera gráfica de ver los efectos de las características geométricas y de temperatura.

El modelo desarrollado se validó satisfactoriamente con los datos de campo; logrando obtener un modelo que predice la deformación del mismo orden de magnitud que las deformaciones encontradas en las muestras físicas y también en los resultados de las simulaciones de Mold-Flow. El modelo desarrollado predice con un 8% de error en comparación con los resultados de simulaciones en ANSYS de la contracción térmica de la estructura en forma de U.

5.2 Trabajo futuro

El trabajo futuro de esta investigación es buscar correcciones del modelo analítico desarrollado considerando:

- Diferencias de deformación entre lados de la caja
- Diseño del molde
 - Posición de la cavidad, estudiar el efecto que tendría la localización de la cavidad (horizontal o vertical)
 - Posición del punto de inyección, estudiar el efecto de la dirección del flujo en el pandeo de la piezas
- Parámetros de proceso, ver el efecto que tienen las presiones en la configuración final de producto
- Incluir muestras con diferentes R/t y longitudes en el proceso de validación

En este trabajo se sientan las bases para argumentar la posibilidad de diseñar una cavidad compensada en términos de la contracción y de las dimensiones de las características de productos hechos de plástico con forma de contenedor. Es decir, las correcciones que se le hacen a los herramentales cuando están en la etapa de evaluación en el proceso de inyección antes de liberarlos para producción. Si el fenómeno de la deformación de los contenedores se puede explicar mediante la contracción de la pieza, entonces, es posible desarrollar un modelo de una estructura predeformada (Figura 92), tal que al momento de contraerse por el enfriamiento, desde la temperatura de expulsión a la temperatura ambiente, quede en la estructura final deseada

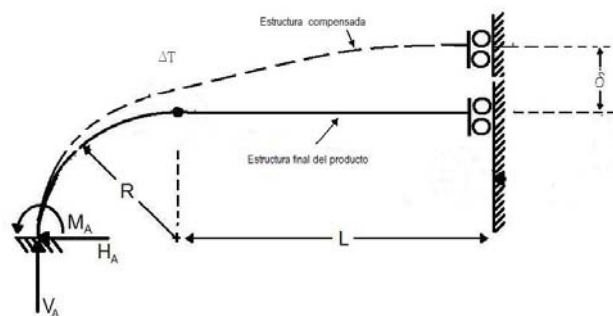


FIGURA 92 Propuesta de nuevo desarrollo para compensación de cavidades de moldes de inyección de plástico para piezas con forma de contenedor

REFERENCIAS

- [1] Alexander B. Rebello, Shao-Chiung Lu, R. Allen Miller, *"Integration of Design Manufacturability Analysis for Die Casting Design System"*, Ohio state University, Columbus, OH, NADCA, 1995, Issue 42, pages 123-130.
- [2] Feng Reng, *"STL ToolKit: A manufacturability evaluation environment"*, Ph. D. Dissertation, The Ohio State University, 1998, 157 pages, AAT 991125 6.
- [3] Fischer, Jerry M., 2003, *"Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage"*, Norwich, NY, Plastics Design Library. ISBN: 1-884207-72-3.
- [4] Malloy, Robert A., 1994, *"Plastic Part Design for Injection Molding: an Introduction"*, New York, NY, Hanser Publishers. ISBN: 1-56990-129-5.
- [5] C. L. Li, *"A feature-based approach to injection mould cooling system design"*, Computer-Aided Design, Volume 33, Issue 14, December 2001, Pages 1073-1090, ISSN 0010-4485, DOI: 10.1016/S0010-4485(00)00144-5.
- [6] Helen L. Lockett, Marin D. Guenov, *"Graph-based feature recognition for injection moulding based on a mid-surface approach"*, Computer-Aided Design, Volume 37, Issue 2, February 2005, Pages 251-262, ISSN 0010-4485, DOI: 10.1016/j.cad.2004.06.010.
- [7] Nelida Garcia, Esther Gonzalez, Juan Baselga, Julio Bravo, *"Critical thickness estimation in ISO-MC cards injection using CAE tools"*, Journal of Materials Processing Technology, Volumes 143-144, Proceedings of the International Conference on the Advanced Materials Processing Technology, 2001., 20 December 2003, Pages 491-494, ISSN 0924-0136, DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00303-0.
- [8] Yuh-Min Chen, Chiun-Cheng Wen, Chengter Ted Ho, *"Extraction of geometric characteristics for manufacturability assessment"*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 19, Issue 4, August 2003, Pages 371-385, ISSN 0736-5845, DOI: 10.1016/S0736-5845(03)00002-4.
- [9] N. Zahlan, J.M. O'Neill, *"Design and fabrication of composite components; the spring-forward phenomenon"*, Composites, Volume 20, Issue 1, Flow Processes in Composite Materials, January 1989, Pages 77-81, ISSN 0010-4361, DOI: 10.1016/0010-4361(89)90685-X.

REFERENCIAS

- [10] K.M.B Jansen, D.J. van Dijk and K.P. Keizer, *“Warpage of Injection Moulded Plates and Corner Products”*, International Polymer Processing, Issue 4, 1998, Pages 417-424. Hanser Publishers, Munich.
- [11] H. W. Wiersma, L. J. B. Peeters, R. Akkerman, *“Prediction of spring forward in continuous-fiber/polymer L-shaped parts”*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 29, Issue 11, November 1998, Pages 1333-1342, ISSN 1359-835X, DOI: 10.1016/S1359-835X(98)00062-1.
- [12] B. Mlekusch, *“The warpage of corners in the injection moulding of short-fiber-reinforced thermoplastics”*, Composites Science and Technology, Volume 59, Issue 12, September 1999, Pages 1923-1931, ISSN 0266-3538, DOI: 10.1016/S0266-3538(99)00051-2.
- [13] A. Ammar, V. Leo, G. Régnier, *“Corner Deformation of Injected Thermoplastic Parts”*, International Journal of Forming Processes, Volume 6, issue 1, Pages 53-70.
- [14] Kuang-Ting Hsiao, Sudhir Gangireddy, *“Investigation on the spring-in phenomenon of carbon nanofiber-glass fiber/polyester composites manufactured with vacuum assisted resin transfer molding”*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 39, Issue 5, May 2008, Pages 834-842, ISSN 1359-835X, DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.01.015.



ANEXO 1



Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis¹

This standard is issued under the fixed designation E 831; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers determination of linear thermal expansion of solid materials using thermomechanical analysis techniques. Related information can be found in Refs. (1-12)².

1.2 This test method is applicable to solid materials that exhibit sufficient rigidity over the test temperature range such that the sensing probe does not produce indentation of the specimen.

1.3 The recommended lower limit of coefficient of linear thermal expansion measured with this test method is 5 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$. The test method may be used at lower (or negative) expansion levels with decreased accuracy and precision (see Section 11).

1.4 This test method is applicable to the temperature range from -120 to 600°C . The temperature range may be extended depending upon the instrumentation and calibration materials used.

1.5 Computer or electronic based instruments, techniques, or data treatment equivalent to this test method may also be used.

NOTE 1—Users of this test method are expressly advised that all such instruments or techniques may not be equivalent. It is the responsibility of the user to determine the necessary equivalency prior to use.

1.6 SI values are the standard.

1.7 This test method is related to ISO 11359-2 but is significantly different in technical detail.

1.8 *This standard does not purport to address all of the safety problems, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 696 Test Method for Coefficient of Linear Thermal Ex-

pansion of Plastics Between -30°C and 30°C ³

D 3386 Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Electrical Insulating Materials⁴

E 228 Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials with a Vitreous Silica Dilatometer⁵

E 473 Terminology Relating to Thermal Analysis⁵

E 1142 Terminology Relating to Thermophysical Properties⁵

E 1363 Test Method for Temperature Calibration of Thermomechanical Analyzers⁵

E 2113 Test Method for Length Change Calibration of Thermomechanical Analyzers⁵

2.2 ISO Standards:⁶

ISO 11359-2 Plastics—Thermomechanical Analysis (TMA)—Part 2: Determination of Coefficient of Linear Thermal Expansion and Glass Transition Temperature

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Thermal analysis terms in Terminologies E 473 and E 1142 shall apply to this test method.

4. Summary of Test Method

4.1 This test method uses a thermomechanical analyzer or similar device to determine the linear thermal expansion of solid materials when subjected to a constant heating rate.

4.2 The change of the specimen length is electronically recorded as a function of temperature. The coefficient of linear thermal expansion can be calculated from these recorded data.

5. Significance and Use

5.1 Coefficients of linear thermal expansion are used, for example, for design purposes and to determine if failure by thermal stress may occur when a solid body composed of two different materials is subjected to temperature variations.

5.2 This test method is comparable to Test Method D 3386 for testing electrical insulation materials, but it covers a more general group of solid materials and it defines test conditions

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee E37 on Thermal Measurements and is the direct responsibility of Subcommittee E37.01 on Test Methods and Recommended Practices.

Current edition approved Sept. 10, 2003. Published September 2003. Originally approved in 1981. Last previous edition approved in 2000 as E 831 – 00.

² The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.01.

⁴ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 10.02.

⁵ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

⁶ Available from the American National Standards Institute, 11 W. 42nd St., 13th Floor, New York, NY 10036.

more specifically. This test method uses a smaller specimen than Test Methods E 228 and D 696.

6. Apparatus

6.1 *Thermomechanical Analyzers (TMA)*—The essential instrumentation required providing minimum thermomechanical analytical or thermodilatometric capability for this test method includes:

6.1.1 *Rigid Specimen Holder*, of inert, low expansivity material ($\leq 0.5 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{K} \cdot ^\circ\text{C})$) to center the specimen in the furnace and to fix the specimen to mechanical ground.

6.1.2 *Rigid Expansion Probe*, of inert, low expansivity material ($\leq 0.5 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{K} \cdot ^\circ\text{C})$) that contacts the specimen with an applied compressive force.

6.1.3 *Sensing Element*, linear over a minimum range of 2 mm to measure the displacement of the rigid expansion probe to within ± 50 nm resulting from changes in length of the specimen.

6.1.4 *Weight or Force Transducer*, to generate a constant force of 1 to 100 mN (0.1 to 10 g) that is applied through the rigid expansion probe to the specimen.

6.1.5 *Furnace*, capable of providing uniform controlled heating (cooling) of a specimen to a constant temperature or at a constant rate between 2 and $10^\circ\text{C}/\text{min}$ within the applicable temperatures range of between -120 and 600°C .

6.1.6 *Temperature Controller*, capable of executing a specific temperature program by operating the furnace between selected temperature limits at a rate of temperature change of 2 to $10^\circ\text{C}/\text{min}$ constant to within $\pm 0.1^\circ\text{C}/\text{min}$ or at an isothermal temperature constant to $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

6.1.7 *Temperature Sensor*, that can be attached to, in contact with, or reproducibly positioned in close proximity to the specimen to indicate the specimen/furnace temperature to $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

6.1.8 A means of sustaining an environment around the specimen of inert gas at a purge gas rate of 10 to 50 mL/min.

NOTE 2—Typically, greater than 99 % pure nitrogen, argon, or helium is used when oxidation in air is a concern. Unless effects of moisture are to be studied, use of dry purge gas is recommended and is essential for operation at subambient temperatures.

6.1.9 *Recording Device*, capable of recording and displaying any fraction of the specimen dimension signal (TMA curve), including signal noise, on the Y-axis versus any fraction of the temperature signal, including noise, on the X-axis.

6.2 *Cooling Capability*, to sustain a subambient specimen temperature (if subambient measurements are to be made) or to hasten cool down of the specimen from elevated temperatures.

6.3 *Micrometer*, or other length-measuring device with a range of up to 10 mm to determine specimen dimensions to within $\pm 25 \mu\text{m}$.

7. Test Specimens

7.1 Specimens shall be between 2 and 10 mm in length and have flat and parallel ends to within $\pm 25 \mu\text{m}$. Lateral dimensions shall not exceed 10 mm. Other lengths may be used, but shall be noted in the report.

NOTE 3—This level of flatness and parallelness may be difficult to attain with some materials. Specimens that do not meet these requirements

may be used, but will result in increased imprecision.

7.2 The specimens are ordinarily measured as received. Where some heat or mechanical treatment is applied to the specimen prior to test, this should be noted in the report.

NOTE 4—Some materials, particularly composites, may require heat treatment to condition the specimen prior to test to relieve stresses or distortions. Such heat treatment must be included in the report.

8. Calibration

8.1 Calibrate the temperature and length changes signals according to the procedures in the manufacturer's operation manual.

8.2 Calibrate the temperature signal using Test Method E 1363.

8.3 Calibrate the length change signal using Test Method E 2113 at the same heating rate as that to be used for the test specimens. The observed expansion must be corrected for the difference in expansion between the specimen holder and probe obtained from a blank run in which no sample or a specimen of the material of construction of the probe is run. (see 10.1).

9. Procedure

9.1 Measure the initial specimen length in the direction of the expansion test to $\pm 25 \mu\text{m}$ at 20 to 25°C .

NOTE 5—Direct readout of zero position and specimen length using the analyzer sensing element, where available, with a sufficient range has been found to be an accurate means of length determination.

9.2 Place the specimen in the specimen holder under the probe. Place the specimen temperature sensor in contact with the specimen or as near to the specimen as possible.

9.3 Move the furnace to enclose the specimen holder. If measurements at subambient temperature are to be made, cool the specimen to at least 20°C below the lowest temperature of interest. The refrigerant used for cooling shall not come into direct contact with the specimen.

9.4 Apply an appropriate load force to the sensing probe to ensure that it is in contact with the specimen. Depending on the compressibility of the specimen and the temperature range to be investigated, a force of between 1 and 100 mN (0.1 to 10 g) is adequate. The actual incremental force, mass, or stress above that required to make contact with zero force shall be noted in the report.

9.5 Select appropriate ordinate and abscissa range sensitivity settings on the recorder.

NOTE 6—Normally, the expansion increases with the increase in temperature as shown in the schematic diagram of Fig. 1. An abrupt change in slope of the expansion curve indicates a transition of the material from one state to another.

9.6 Heat the specimen at a constant heating rate of $5^\circ\text{C}/\text{min}$ over the desired temperature range and record the changes in specimen length and temperature to all available decimal places. Other heating rates may be used but shall be noted in the report.

NOTE 7—For best results, specimen temperature gradients should be small. High heating rates, large specimen sizes, and low specimen thermal diffusivity may lead to large specimen temperature gradients. The effects of specimen temperature gradients may be compensated for by correction found through the use of suitable reference materials whose size and

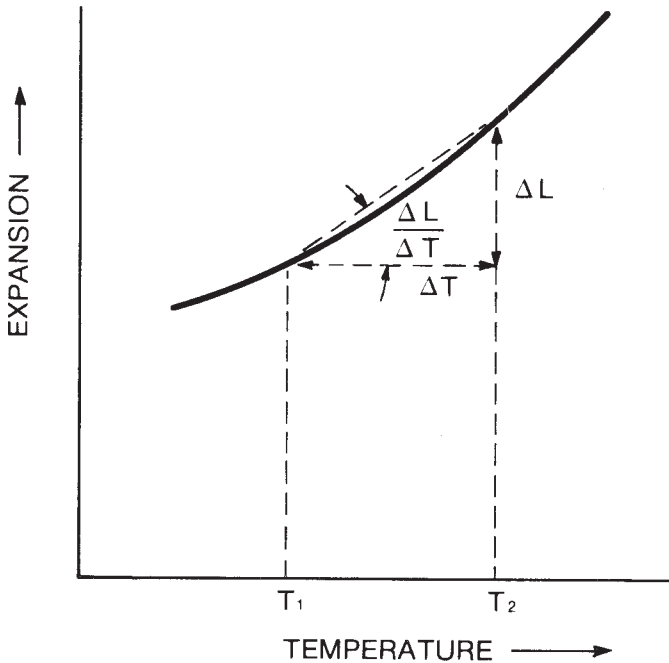


FIG. 1 Specimen Expansion Versus Temperature

thermal conductivity are close to that of the test specimen.

NOTE 8—Intralaboratory testing indicates that no detectable increase in imprecision is observed for specimen sizes from 2 to 10 mm in length, for heating rates from 2 to 10°C/min, and for thermal conductivities from 0.2 to 400 W/(m·°C) if only one parameter is changed.

9.7 Measure the measurement instrument baseline by repeating 9.3 through 9.6 using the same test parameters but without a test specimen. The measured ΔL for the specimen should normally be corrected for this instrument baseline, especially for low expansion specimens.

9.8 Test at least three specimens of the same material. Retest of a specimen may be used only as reference and shall not be treated as an independent test of a new specimen.

10. Calculation

10.1 Calculate the mean coefficient of linear thermal expansion rounded to the nearest 0.1 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ for a desired temperature range as follows: (See Table 1 of Test Method E 228.)

$$\alpha_m = \frac{\Delta L_{sp} \times k}{L \times \Delta T} \tag{1}$$

$$k = \frac{\alpha_{ref} \times L_{ref} \times \Delta T_{ref}}{\Delta L_{ref}} \tag{2}$$

where:

α_m = mean coefficient of linear thermal expansion, $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,

α_{ref} = mean coefficient of linear thermal expansion, for reference material, $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ (see 8.3),

k = calibration coefficient,

L = specimen length at room temperature, m,

ΔL_{ref} = change of reference material length due to heating, μm ,

L_{ref} = reference material length at room temperature, m,

ΔL_{sp} = change of specimen length, μm ,

ΔT_{ref} = temperature difference over which the change in reference material length is measured, $^\circ\text{C}$,

ΔT = temperature difference over which the change in specimen length is measured, $^\circ\text{C}$, and

NOTE 9—For low-expansion specimens, ΔL should be corrected for the expansion of the sample holder displaced by the specimen.

$$\Delta L_{sp} \text{ (or } \Delta L_{ref}) = \Delta L_{obs} + L \Delta T \alpha_{holder} - \Delta L_{blank} \tag{3}$$

where:

ΔL_{obs} = measured change in length, μm ,

α_{holder} = mean coefficient of linear thermal expansion for holder, $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$, and

ΔL_{blank} = change of baseline due to heating, μm .

If the holder is composed of vitreous silica (that is, fused quartz), $\alpha_{holder} = 0.52 \pm 0.02 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ from 20 to 700°C.

10.2 Select a ΔT from a smooth portion of the thermal curves in the desired temperature range; then obtain ΔL as depicted in Fig. 1. The α_m shall not be calculated from a temperature range in which a transition point is noted.

NOTE 10—Values for ΔT generally range between 50 and 100°C. Values less than 50°C may lead to poor precision; values greater than 100°C may mask small change in the expansion coefficient.

11. Report

11.1 The report shall include the following:

11.1.1 Designation of the material, including the name of the manufacturer and information on lot number and chemical composition when known,

11.1.2 Specimen orientation with respect to the original part or the direction of the oriented fiber fillers if a composite material is used,

11.1.3 Method of test specimen preparation,

11.1.4 Dimensions of the specimen,

11.1.5 Description of the thermomechanical analysis apparatus,

11.1.6 Purge gas and cooling medium, if used,

11.1.7 Temperature range in which the coefficient of linear thermal expansion has been determined,

11.1.8 Average value of the coefficient of linear thermal expansion in $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ as determined from three specimens,

11.1.9 Expansion curves obtained, and

11.1.10 The specific dated version of this test method used.

12. Precision and Bias ⁷

12.1 Precision of thermal expansion measurements depends on the length of the specimen, the temperature range of interest, and the change in the specimen length. Maximum imprecision in the calculated coefficient of linear thermal expansion may be estimated from the imprecisions in the individual measurements by the following equation.

$$\delta_{\alpha/\alpha_m} = [(\delta\Delta L/\pm\Delta L)^2 + (\delta L/L)^2 + (\delta\Delta T/\Delta T)^2]^{1/2} \tag{4}$$

where:

⁷ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: E37-1000.

α_m = mean coefficient of linear thermal expansion, $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,

δ_{α} = imprecision in the measurement of α , $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,

ΔL = change of specimen length due to heating, μm ,

$\delta\Delta L$ = imprecision in the measurement of ΔL , μm ,

L = specimen length at room temperature, m,

δL = imprecision in the measurement of L , m,

ΔT = temperature difference over which the change in specimen length is measured, $^\circ\text{C}$, and

$\delta\Delta T$ = imprecision in the measurement of ΔT , $^\circ\text{C}$.

12.1.1 Example:

$$L = 8 \text{ mm} \quad (5)$$

$$\delta L = \pm 25 \mu\text{m} \quad (6)$$

$$\Delta L = 60 \mu\text{m} \quad (7)$$

$$\delta\Delta L = \pm 1 \mu\text{m} \quad (8)$$

$$\Delta T = 100^\circ\text{C} \quad (9)$$

$$\delta\Delta T = \pm 0.5^\circ\text{C} \quad (10)$$

$$\delta_{\alpha}/\alpha_m = [(1 \mu\text{m}/60 \mu\text{m})^2 + (25 \times 10^{-6}\text{m}/8 \times 10^{-3}\text{m}^2 + (0.5^\circ\text{C}/100^\circ\text{C})^2)]^{1/2} \quad (11)$$

or expressed as percent:

$$\delta_{\alpha}/\alpha_m = \pm 1.8\% \quad (12)$$

12.1.2 Intralaboratory precision measurements confirm the relationship above.

12.2 Interlaboratory precision of this method for coefficient of thermal expansion was determined from the results of a round robin in which eight laboratories using six instrument models participated.

12.2.1 For materials with $\alpha > 20 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$, interlaboratory precision on specimens 8 mm in length, measured over a 100°C temperature range, was $\pm 2.6\%$ with a maximum deviation of 3.7 %.

12.2.2 For materials with $20 > \alpha > 5 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$, interlaboratory precision on specimens 8 mm in length, measured over a 100°C temperature range, was $\pm 5.1\%$ with a maximum deviation of 7.8 %.

12.2.3 For materials with $5 > \alpha > 1 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$, interlaboratory precision on specimens 8 mm in length, measured over a 100°C temperature range, was $\pm 12\%$ with a maximum deviation of 61 %.

12.2.4 For materials with $\alpha > 5 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$, intralaboratory precision on specimens 8 mm in length, measured over a 100°C temperature range, was $\pm 1.8\%$ with a maximum deviation of 5.8 %.

12.3 The following criteria should be used for judging the acceptability of results:

12.3.1 (Single Instrument)—The standard deviation of results obtained by the same instrument and laboratory has been estimated to be $0.97 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ at 32 degrees of freedom. Two results should be considered suspect (95 % confidence level) if they differ by more than $2.7 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$.

12.3.2 (Multi-Instrument)—The standard deviation of results (each the average of duplicates) obtained by different instruments or laboratories, has been estimated to be $1.1 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ at 4 degrees of freedom. Two such averages should be considered suspect (95 % confidence level) if they differ by more than $3.1 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$.

12.4 Accuracy is anticipated, from calculations, to be a function of specimen size and magnitude of the coefficient of thermal expansion varying from $< \pm 2\%$ for $\alpha > 20 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ to $> \pm 15\%$ for $\alpha < 5 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$.

12.4.1 An estimation of the accuracy of the coefficient of thermal expansion measurement was obtained by comparing the mean of triplicate determinations performed in a single laboratory with values reported in the literature. Based on this comparison, the accuracy of the measurement is estimated to be $+ 5.4\%$.

Material	Testing	Coefficient of Expansion, $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$, at 50°C Literature
Copper (11)	17.8 ± 0.9	16.91
Lead (12)	30.9 ± 1.3	29.33

13. Keywords

13.1 linear expansion; solid materials; thermal expansion coefficient; thermomechanical analysis

REFERENCES

- (1) Gaskill, R., and Barrall, E. M., *Thermochimica Acta*, Vol 12, 1975, p. 102.
- (2) Barton, J. M., *Thermochimica Acta*, Vol 29, 1979, p. 188.
- (3) Nix, F. C., and Mac Nair D., *Physical Review*, Vol 60, 1941, p. 597.
- (4) Simmons, R. O., and Balluffi, R. W., *Physical Review*, Vol 117, 1960, p. 52.
- (5) Fraser, D. B., and Hollis Hallet, A. C., *7th International Conference on Low-Temperature Physics*, 1961, p. 689.
- (6) Altman, H. W., Rubin, T., and Johnson, H. L., Ohio State University, Cryogenic Laboratory Report OSU-TR-264-27 (1954) AD 26970.
- (7) Hidnert, P., and Krider, H. S., *Journal of Research National Institute of Standards and Technology*, Vol 48, 1952, p. 209.
- (8) Nix, F. C., and Mac Nair, D., *Physical Review*, Vol 61, 1942, p. 74.
- (9) White, G. K., *Journal of Physics*, Vol 2F, 1972, p. L30.
- (10) Hahn, T. A., and Kirby, R. K., *AIP Conference Proceedings*, No. 3, Vol 87, 1972.
- (11) National Institute of Standards and Technology Certificate, Standard Reference Material 736, 1969.
- (12) Stokes, A. R., and Wilson, A. J. C., *Proceedings of the Physical Society (London)*, Vol 53, 1941, pp. 658–662.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



ANEXO 2



INFORME DE RESULTADOS

NOMBRE O RAZÓN SOCIAL:

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY

No. DE INFORME/SERVICIO:

536-08

DESCRIPCIÓN DEL SERVICIO:

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE
EXPANSIÓN TÉRMICA DE POLIPROPILENO

FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME:

2008-11-07



WC-CQ-011-01/7

INFORME DE RESULTADOS

No. DE INFORME /SERVICIO:

536-08

I- DATOS GENERALES

DOMICILIO: Av. Eugenio Garza Sada # 2501 Sur
COLONIA: Tecnológico
CIUDAD: Monterrey, Nuevo León C.P. 64849
TELEFONO(S): 01 (81) 8328-3031 / 4264 EXL 482 FAX: 01 (81) 8328-4031 / 4322
ATENCION (SOLICITANTE): Genardo Tamez
e-mail: franaguiva@gmail.com

No. DE COTIZACION DEL SERVICIO: 11330
FECHA DE ACEPTACION DEL SERVICIO: 2008-11-03
FECHA DE REGISTRO DE LA(S) MUESTRA(S): 2008-11-03
FECHA DE REALIZACION DEL SERVICIO: 2008-11-03 al 06
DESCRIPCION DE LA(S) MUESTRA(S): Lamina
ORIGEN DE LA(S) MUESTRA(S): Entregada por el cliente en CIQA

NOTA(S):

GARANTIA:
Con la finalidad de asegurar el mejor servicio, el cliente tiene la oportunidad de solicitar cualquier aclaración o emitir en su caso alguna queja por escrito respecto del presente informe dentro del plazo de un mes posterior a la fecha de emisión del mismo.
Favor de comunicarse a la Coordinación de Servicios de Laboratorio. Al Sr. Dr. Jesús Efraín Pérez Peregrino, e-mail: jper@ciqa.mx

PAG. 2 DE 7



INFORME DE RESULTADOS

NO. DE INFORME/SERVICIO
536-08

II.- RESULTADOS

METODO(S) DE PRUEBA(S) DE REFERENCIA

ASTM-E-831-2006

PRUEBA/MEDICION:		Expansión Térmica Lineal de Materiales Sólidos por Análisis Termomecánico	
PROPIEDAD MEDIDA:		Expansión	
UNIDAD:		$\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$	($\text{m/m}^\circ\text{C}$)
MUESTRA CLIENTE	MUESTRA: ACUMEX P-47 MOLDE #13	211	(2.11×10^{-5})
MUESTRA CIQA	536-1-08	236	(2.36×10^{-5})
		Alcance de espesor : 1,6885 mm y 1,9593 mm (Anexos 1 y 2)	
MUESTRA CLIENTE	MUESTRA: P91-15 MOLDE MIC041898	223	(2.23×10^{-5})
MUESTRA CIQA	536-2-08	237	(2.37×10^{-5})
		Alcance de espesor : 1,9084 mm y 2,0578 mm (Anexos 3 y 4)	
MUESTRA CLIENTE	-----	-----	-----
MUESTRA CIQA	-----	-----	-----

EQUIPO(S) UTILIZADO(S): No. INVENTARIO:	Analizador Termomecánico	CCQ-003
CONDICIONES PARTICULARES DE LA PRUEBA-MEDICION:	Velocidad de calentamiento 10 $^\circ\text{C}/\text{min}$ Flujo de Nitrógeno: 50 cm^3/min Temperatura de Prueba = de temperatura ambiente hasta 120 $^\circ\text{C}$	

NOTA(S)

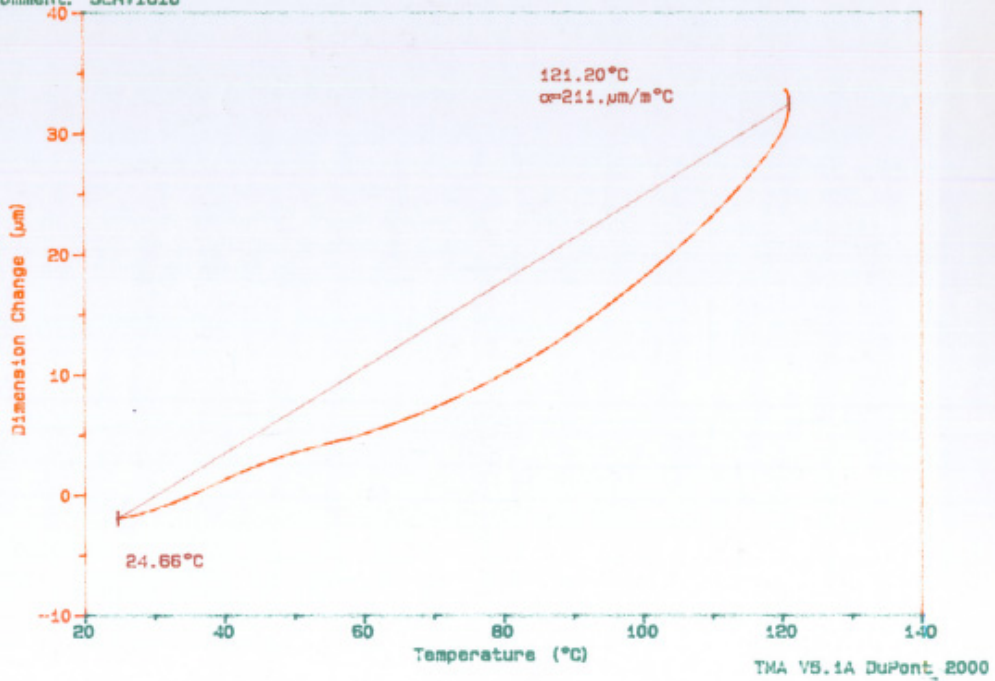
REALIZO: L.C.Q. Sinda Leticia Ramos Ramirez Responsable de Servicio	AUTORIZO: M.C. Anabel García Córdoba Signatario Autorizado	 Control de Calidad
---	--	------------------------

EL PRESENTE INFORME SE REFIERE ÚNICAMENTE A LA MUESTRA PRUEBA Y NO PODRÁ SER REPRODUCIDO EN FORMA PARCIAL O TOTAL SIN LA AUTORIZACION PREVIA DE ESTE LABORATORIO DE SERVICIOS.

Sample: 536-1-08
Size: 1.6885 mm
Method: Expansion
Comment: SERVICIO

TMA

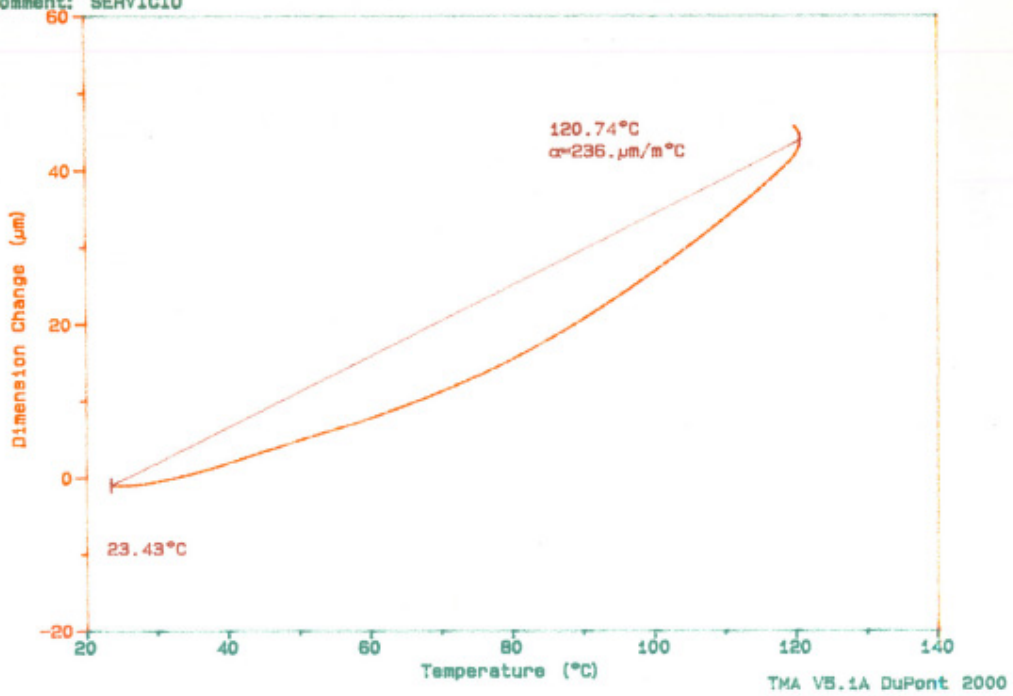
File: C: 536-1-08.001
Operator: SLRR
Run Date: 4-Nov-08 16:39



Sample: 536-1-08
Size: 1.9593 mm
Method: Expansion
Comment: SERVICIO

TMA

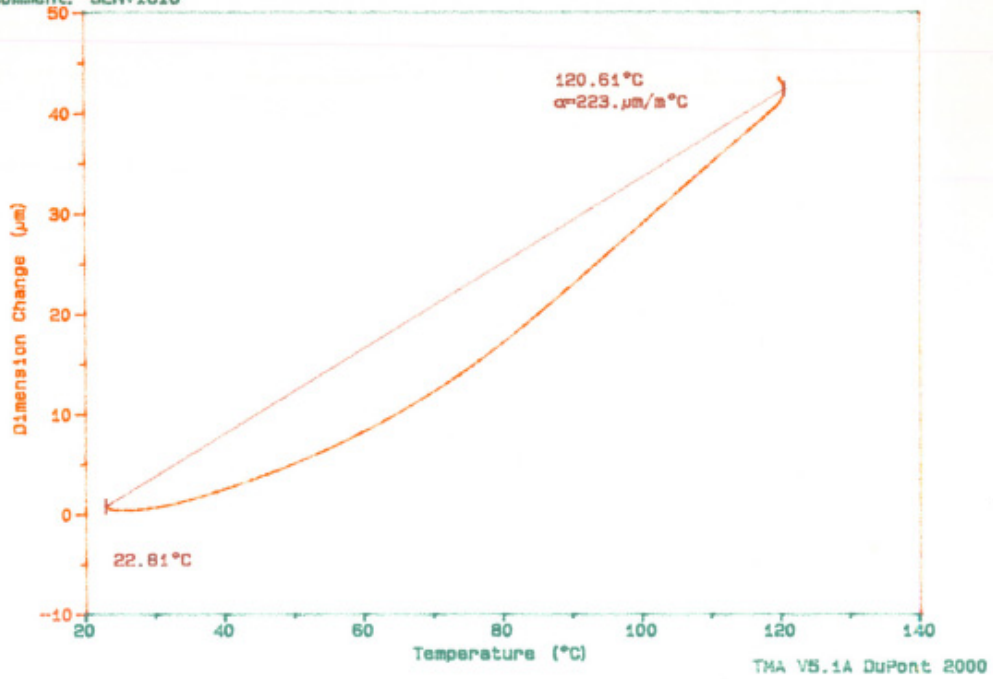
File: C: 536-1-08.012
Operator: SLRR
Run Date: 5-Nov-08 12:03



Sample: 536-2-08
Size: 1.9084 mm
Method: Expansion
Comment: SERVICIO

TMA

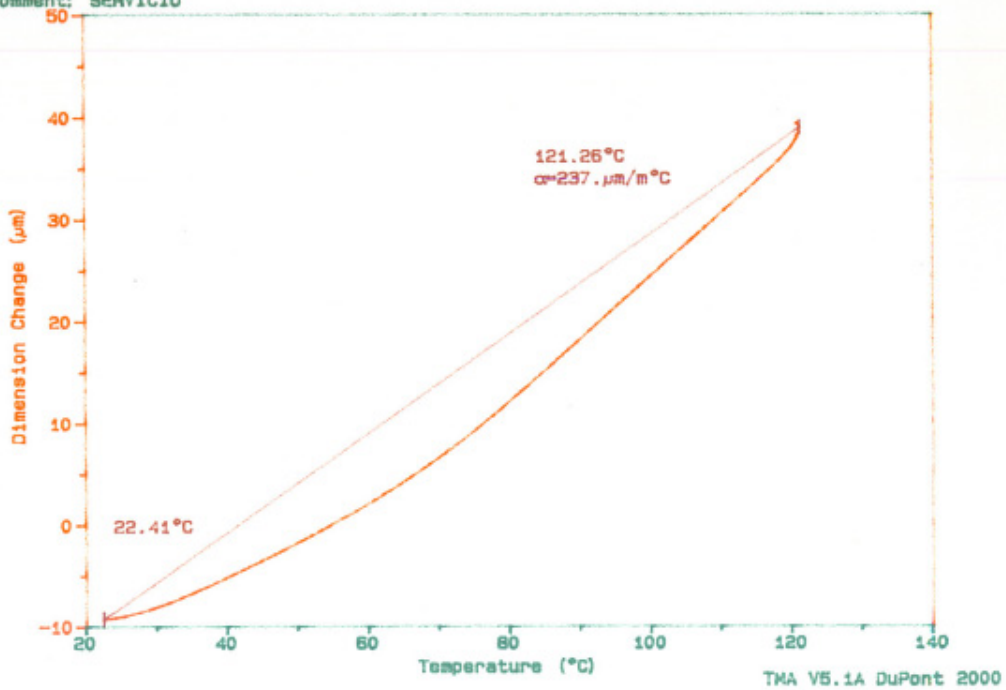
File: C: 536-2-08.011
Operator: SLRR
Run Date: 5-Nov-08 11:16



Sample: 536-2-08
Size: 2.0578 mm
Method: Expansion
Comment: SERVICIO

TMA

File: C: 536-2-08.013
Operator: SLRR
Run Date: 5-Nov-08 12:46



ANEXO 3

Tabla 1 Resultados de los modelos analíticos y de ANSYS, porcentajes de error, Longitud 83mm y espesor 2.284mm

Archivo en ANSYS	R int (mm)	R medio (mm)	R ext (mm)	R/t	Deformación en B Ecuación 7 (mm)	Deformación en B Ecuación 11 (mm)	Deformación en B ANSYS (mm)		Diferencia entre Analítico y ANSYS	Diferencia entre Analítico Ajustado y ANSYS	% Error Ecuación 7	% Error Ecuación 11
							Tamaño de malla 0.0005	Tamaño de malla 0.0025				
							prueba de efecto de radio_12	1.86				
	2.36	3.5	4.64	1.54	2.146	2.06						
prueba de efecto de radio_02	2.86	4	5.14	1.75	2.447	2.334	2.316	2.314	0.131	0.018	5.353494074	0.777202073
	3.36	4.5	5.64	1.97	2.662	2.523						
prueba de efecto de radio_03	3.86	5	6.14	2.19	2.797	2.633	2.607	2.607	0.19	0.026	6.792992492	0.997314921
	4.36	5.5	6.64	2.41	2.863	2.677						
prueba de efecto de radio_04	4.86	6	7.14	2.63	2.876	2.672	2.685	2.684	0.191	-0.013	6.641168289	0.484171322
	5.36	6.5	7.64	2.85	2.851	2.631						
prueba de efecto de radio_05	5.86	7	8.14	3.07	2.799	2.566	2.632	2.632	0.167	-0.066	5.966416577	2.507598784
	6.36	7.5	8.64	3.29	2.73	2.486						
prueba de efecto de radio_06	6.86	8	9.14	3.51	2.651	2.398	2.516	2.516	0.135	-0.118	5.092417955	4.689984102
	7.36	8.5	9.64	3.73	2.567	2.306						
prueba de efecto de radio_07	7.86	9	10.14	3.95	2.481	2.214	2.376	2.376	0.105	-0.162	4.23216445	6.818181818
	8.36	9.5	10.64	4.17	2.395	2.123						
prueba de efecto de radio_08	8.86	10	11.14	4.39	2.312	2.035	2.233	2.233	0.079	-0.198	3.416955017	8.866995074
	9.36	10.5	11.64	4.61	2.231	1.95						
prueba de efecto de radio_09	9.86	11	12.14	4.82	2.153	1.869	2.097	2.097	0.056	-0.228	2.60102183	10.87267525
	10.36	11.5	12.64	5.04	2.079	1.792						
prueba de efecto de radio_10	10.86	12	13.14	5.26	2.009	1.719	1.972	1.971	0.037	-0.253	1.841712295	12.8296146
	11.36	12.5	13.64	5.48	1.942	1.65						
prueba de efecto de radio_11	11.86	13	14.14	5.70	1.878	1.585	1.858	1.858	0.02	-0.273	1.064962726	14.69321851
	12.36	13.5	14.64	5.92	1.818	1.524						
	12.86	14	15.14	6.14	1.762	1.465						
	13.36	14.5	15.64	6.36	1.708	1.411						
prueba de efecto de radio_14	13.86	15	16.14	6.58	1.657	1.359	1.663	1.663	-0.006	-0.304	0.362100181	18.28021648
	14.36	15.5	16.64	6.80	1.609	1.31						
	14.86	16	17.14	7.02	1.564	1.263						
	15.36	16.5	17.64	7.24	1.52	1.219						
prueba de efecto de radio_16	15.86	17	18.14	7.46	1.479	1.177	1.506	1.506	-0.027	-0.329	1.825557809	21.84594954
	16.36	17.5	18.64	7.68	1.44	1.138						
	16.86	18	19.14	7.89	1.403	1.1						
	17.36	18.5	19.64	8.11	1.368	1.064						
	17.86	19	20.14	8.33	1.335	1.03						
	18.36	19.5	20.64	8.55	1.303	0.997						
prueba de efecto de radio_13	18.86	20	21.14	8.77	1.272	0.996	1.325	1.325	-0.053	-0.329	4.166666667	24.83018868
	19.36	20.5	21.64	8.99	1.243	0.937						
	19.86	21	22.14	9.21	1.215	0.908						
	20.36	21.5	22.64	9.43	1.188	0.881						
	20.86	22	23.14	9.65	1.163	0.856						
	21.36	22.5	23.64	9.87	1.139	0.831						
prueba de efecto de radio_15	21.86	23	24.14	10.09	1.115	0.807	1.189	1.189	-0.074	-0.382	6.6367713	32.12783852

Tabla 2 Resultados de los modelos analíticos y de ANSYS, porcentajes de error, Longitud 63mm y espesor 2.284mm

Archivo en ANSYS	R int (mm)	R medio (mm)	R ext (mm)	R/t	Deformación en B Ecuación 7 (mm)	Deformación en B Ecuación 11 (mm)	Deformación en B ANSYS (mm)		Diferencia entre Analítico y ANSYS	Diferencia entre Analítico Ajustado y ANSYS	% Error Ecuación 7	% Error Ecuación 11
							Tamaño de malla 0.0005	Tamaño de malla 0.00025				
63_01	1.86	3	4.14	1.315789	1.263	1.206	1.225	1.226	0.038	-0.019	3.01	1.55
	2.36	3.5	4.64	1.535088	1.493	1.414						
63_02	2.86	4	5.14	1.754386	1.66	1.558	1.537	1.537	0.123	0.021	7.41	1.37
	3.36	4.5	5.64	1.973684	1.764	1.641						
63_03	3.86	5	6.14	2.192982	1.814	1.673	1.667	1.666	0.147	0.006	8.10	0.36
	4.36	5.5	6.64	2.412281	1.823	1.666						
63_04	4.86	6	7.14	2.631579	1.803	1.634	1.669	1.668	0.134	-0.035	7.43	2.10
	5.36	6.5	7.64	2.850877	1.765	1.585						
63_05	5.86	7	8.14	3.070175	1.715	1.526	1.606	1.605	0.109	-0.08	6.36	4.98
	6.36	7.5	8.64	3.289474	1.658	1.462						
63_06	6.86	8	9.14	3.508772	1.599	1.397	1.517	1.516	0.082	-0.12	5.13	7.91
	7.36	8.5	9.64	3.72807	1.54	1.333						
63_07	7.86	9	10.14	3.947368	1.481	1.271	1.422	1.422	0.059	-0.151	3.98	10.62
	8.36	9.5	10.64	4.166667	1.424	1.211						
63_08	8.86	10	11.14	4.385965	1.37	1.154	1.332	1.331	0.038	-0.178	2.77	13.36
	9.36	10.5	11.64	4.605263	1.319	1.1						
63_09	9.86	11	12.14	4.824561	1.27	1.049	1.248	1.248	0.022	-0.199	1.73	15.95
	10.36	11.5	12.64	5.04386	1.224	1.002						
63_10	10.86	12	13.14	5.263158	1.181	0.957	1.174	1.173	0.007	-0.217	0.59	18.48
	11.36	12.5	13.64	5.482456	1.14	0.915						
63_11	11.86	13	14.14	5.701754	1.102	0.875	1.107	1.107	-0.005	-0.232	0.45	20.96
	12.36	13.5	14.64	5.921053	1.066	0.838						
63_12	12.86	14	15.14	6.140351	1.032	0.803	1.047	1.048	-0.015	-0.244	1.45	23.30
	13.36	14.5	15.64	6.359649	1	0.77						
63_13	13.86	15	16.14	6.578947	0.969	0.739	0.995	0.995	-0.026	-0.256	2.68	25.73
	14.36	15.5	16.64	6.798246	0.941	0.71						
63_14	14.86	16	17.14	7.017544	0.914	0.683	0.949	0.948	-0.035	-0.266	3.83	28.03
	15.36	16.5	17.64	7.236842	0.888	0.656						
63_15	15.86	17	18.14	7.45614	0.864	0.632	0.907	0.907	-0.043	-0.275	4.98	30.32
	16.36	17.5	18.64	7.675439	0.841	0.608						
63_16	16.86	18	19.14	7.894737	0.82	0.586	0.87	0.87	-0.05	-0.284	6.10	32.64
	17.36	18.5	19.64	8.114035	0.799	0.565						
63_17	17.86	19	20.14	8.333333	0.779	0.545	0.837	0.837	-0.058	-0.292	7.45	34.89
	18.36	19.5	20.64	8.552632	0.761	0.526						
63_18	18.86	20	21.14	8.77193	0.743	0.508	0.808	0.807	-0.065	-0.3	8.75	37.13
	19.36	20.5	21.64	8.991228	0.726	0.49						
63_19	19.86	21	22.14	9.210526	0.71	0.474	0.781	0.781	-0.071	-0.307	10.00	39.31
	20.36	21.5	22.64	9.429825	0.694	0.458						
63_20	20.86	22	23.14	9.649123	0.679	0.443	0.757	0.757	-0.078	-0.314	11.49	41.48
	21.36	22.5	23.64	9.868421	0.665	0.428						
63_21	21.86	23	24.14	10.08772	0.652	0.414	0.735	0.735	-0.083	-0.321	12.73	43.67

Tabla 3 Resultados de los modelos analíticos y de ANSYS, porcentajes de error, Longitud 103mm y espesor 2.284mm

Archivo en ANSYS	R int (mm)	R medio (mm)	R ext (mm)	R/t	Deformación en B Ecuación 7 (mm)	Deformación en B Ecuación 11 (mm)	Deformación en B ANSYS (mm)		Diferencia entre Analítico y ANSYS	Diferencia entre Analítico Ajustado y ANSYS	% Error Ecuación 7	% Error Ecuación 11
							Tamaño de malla 0.0005	Tamaño de malla 0.00025				
103_1	1.86	3	4.14	1.3157895	2.285	2.225	2.313	2.317	-0.028	-0.088	1.225382932	3.804582793
	2.36	3.5	4.64	1.5350877	2.82	2.731						
103_2	2.86	4	5.14	1.754386	3.275	3.156	3.145	3.146	0.13	0.011	3.969465649	0.349761526
	3.36	4.5	5.64	1.9736842	3.629	3.478						
103_3	3.86	5	6.14	2.1929825	3.878	3.696	3.656	3.656	0.222	0.04	5.724600309	1.094091904
	4.36	5.5	6.64	2.4122807	4.03	3.821						
103_4	4.86	6	7.14	2.6315789	4.101	3.868	3.858	3.858	0.243	0.01	5.925384053	0.259201659
	5.36	6.5	7.64	2.8508772	4.11	3.856						
103_5	5.86	7	8.14	3.0701754	4.074	3.801	3.85	3.849	0.224	-0.049	5.498281787	1.272727273
	6.36	7.5	8.64	3.2894737	4.004	3.716						
103_6	6.86	8	9.14	3.5087719	3.914	3.613	3.723	3.723	0.191	-0.11	4.879918242	2.9546065
	7.36	8.5	9.64	3.7280702	3.81	3.498						
103_7	7.86	9	10.14	3.9473684	3.699	3.378	3.56	3.559	0.139	-0.182	3.757772371	5.112359551
	8.36	9.5	10.64	4.1666667	3.585	3.256						
103_8	8.86	10	11.14	4.3859649	3.47	3.135	3.349	3.348	0.121	-0.214	3.4870317	6.389967154
	9.36	10.5	11.64	4.6052632	3.357	3.017						
103_9	9.86	11	12.14	4.8245614	3.248	2.902	3.155	3.154	0.093	-0.253	2.863300493	8.019017433
	10.36	11.5	12.64	5.0438596	3.142	2.792						
103_10	10.86	12	13.14	5.2631579	3.04	2.687	2.971	2.97	0.069	-0.284	2.269736842	9.55907102
	11.36	12.5	13.64	5.4824561	2.943	2.587						
103_11	11.86	13	14.14	5.7017544	2.85	2.491	2.802	2.8	0.048	-0.311	1.684210526	11.09921485
	12.36	13.5	14.64	5.9210526	2.761	2.401						
103_12	12.86	14	15.14	6.1403509	2.678	2.315	2.646	2.646	0.032	-0.331	1.194921583	12.50944822
	13.36	14.5	15.64	6.3596491	2.598	2.233						
103_13	13.86	15	16.14	6.5789474	2.522	2.156	2.51	2.51	0.012	-0.354	0.475812847	14.10358566
	14.36	15.5	16.64	6.7982456	2.45	2.082						
103_14	14.86	16	17.14	7.0175439	2.382	2.013	2.379	2.379	0.003	-0.366	0.125944584	15.38461538
	15.36	16.5	17.64	7.2368421	2.317	1.947						
103_15	15.86	17	18.14	7.4561404	2.255	1.884	2.265	2.264	-0.01	-0.381	0.44345898	16.82119205
	16.36	17.5	18.64	7.6754386	2.196	1.824						
103_16	16.86	18	19.14	7.8947368	2.14	1.767	2.161	2.16	-0.021	-0.394	0.981308411	18.23229986
	17.36	18.5	19.64	8.1140351	2.087	1.713						
103_17	17.86	19	20.14	8.3333333	2.036	1.661	2.066	2.066	-0.03	-0.405	1.473477407	19.60309777
	18.36	19.5	20.64	8.5526316	1.987	1.612						
103_18	18.86	20	21.14	8.7719298	1.941	1.565	1.981	1.98	-0.04	-0.416	2.060793405	20.9994952
	19.36	20.5	21.64	8.9912281	1.897	1.52						
103_19	19.86	21	22.14	9.2105263	1.854	1.477	1.902	1.902	-0.048	-0.425	2.588996764	22.34490011
	20.36	21.5	22.64	9.4298246	1.814	1.436						
103_20	20.86	22	23.14	9.6491228	1.775	1.397	1.831	1.831	-0.056	-0.434	3.154929577	23.70289459
	21.36	22.5	23.64	9.8684211	1.738	1.359						
103_21	21.86	23	24.14	10.087719	1.702	1.323	1.766	1.766	-0.064	-0.443	3.760282021	25.08493771

FE DE ERRATAS

Cuando se refiere a material Polipropileno 80% Virgen 20% reciclado, la corrección es Polipropileno 80% reciclado 20% Virgen. Este error aparece en las páginas xiii, 80, 82, 88 y 101.

Corrección a las páginas 78 y 79:

Las gráficas de las figuras 62, 63 y 64 deben de mostrar tres rangos en negros, el error es que solo se ven dos rangos graficados, a continuación se anexan las gráficas corregidas.

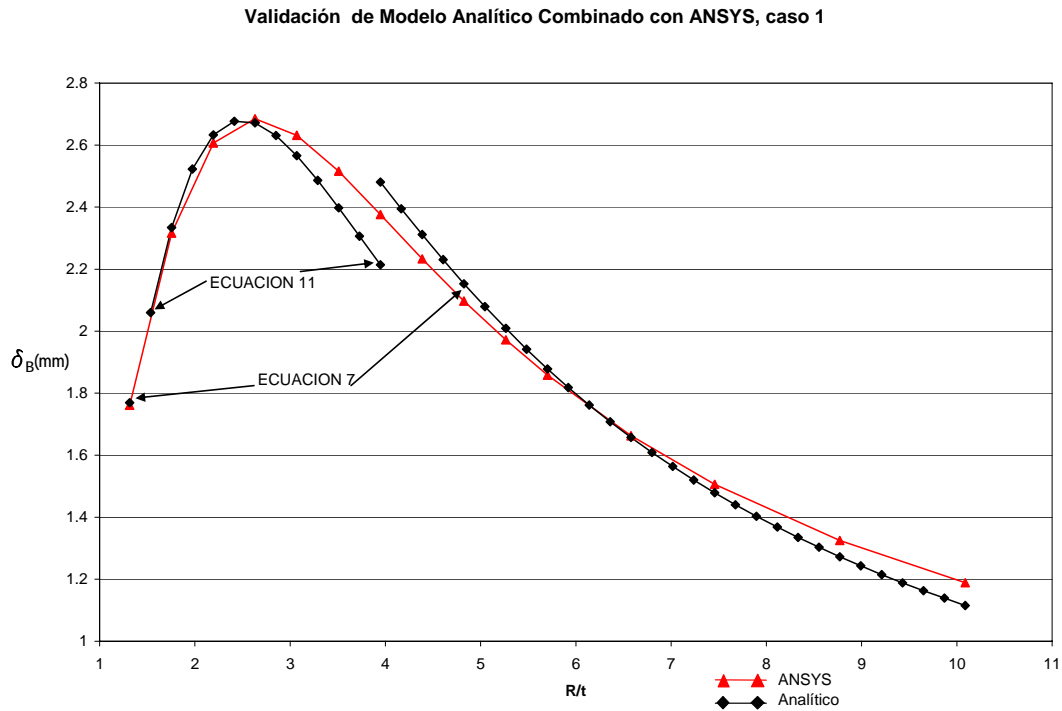


FIGURA 62 Comparación ANSYS vs Analítico por rangos, Ecuaciones 7 y 11, caso 1

Validación de Modelo Analítico Combinado con ANSYS, caso 2

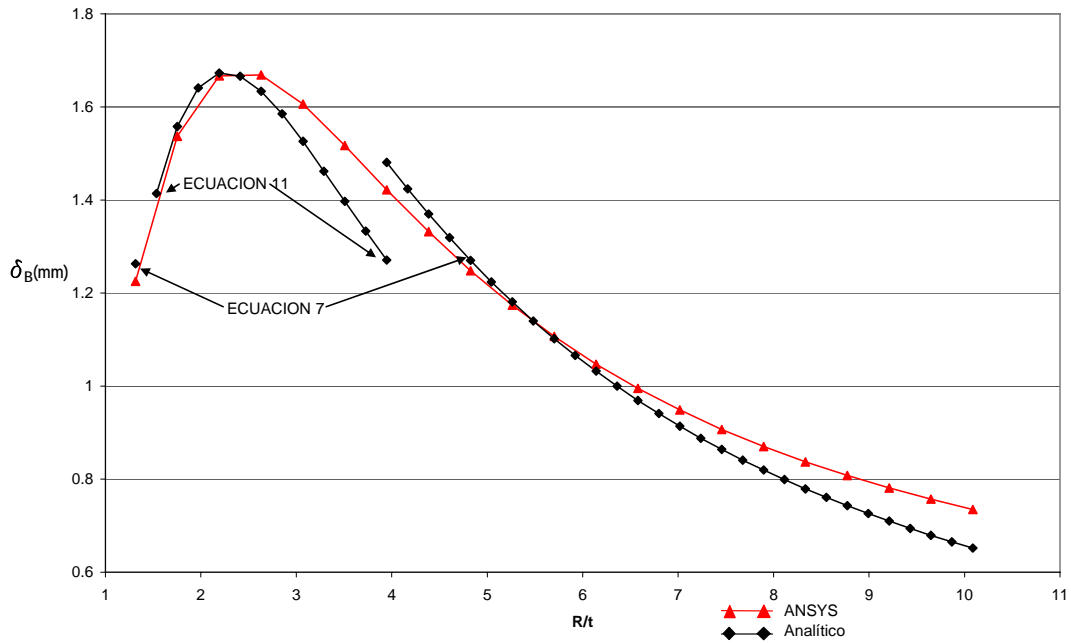


FIGURA 63 Comparación ANSYS vs Analítico por rangos, Ecuaciones 7 y 11, caso 2

Validación de Modelo Analítico Combinado con ANSYS, caso 3

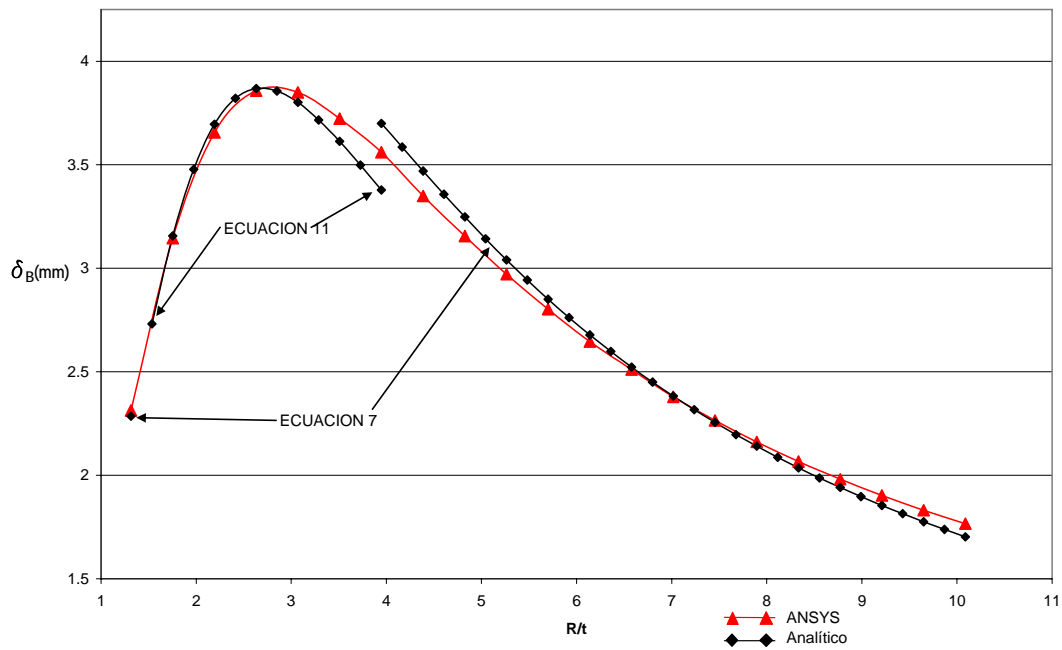


FIGURA 64 Comparación ANSYS vs Analítico por rangos, Ecuaciones 7 y 11, caso 3