

SIMULACIÓN NUMÉRICA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE TERMOFORMADO DE LÁMINAS

Carlos Garrido¹, Diego Celentano² y Fernando Flores³

¹Universidad de La Serena, Depto de Ing. Mecánica, La Serena-Chile
cgarrido@userena.cl

²Universidad de Santiago de Chile, Depto. de Ing. Mecánica, Santiago-Chile
dcelenta@lauca.usach.cl

³Universidad Nacional de Córdoba, Depto. de Estructuras, Córdoba-Argentina.
fflores@efn.uncor.edu

Palabras clave: termoformado, termomecánica, métodos numéricos.

Resumen. *En este trabajo se estudia un proceso de conformado de un material termoplástico. El análisis considera los efectos termomecánicos que se producen entre la lámina a termoformar con las diferentes herramientas del proceso. El modelo termomecánico acoplado utilizado se basa en una formulación Lagrangeana Total Hiperelástica donde el comportamiento del material de la lámina a termoformar se describe a través de un modelo constitutivo elastoplástico que incorpora un criterio de fluencia isótropo y una ley de endurecimiento potencial. Este modelo se resuelve con un esquema alternado en el contexto del método de los elementos finitos. La discretización espacial emplea un elemento finito de lámina extendido que, además de brindar un tratamiento adecuado a las grandes deformaciones elastoplásticas que experimenta el material, incorpora una variación lineal de la temperatura a través del espesor para describir los efectos térmicos sobre el mismo. Por último, los resultados del modelo se comparan con mediciones experimentales realizadas en un proceso industrial de fabricación de un gabinete de un refrigerador doméstico.*

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad es difícil imaginar que algún sector, productivo o económico, pueda prescindir de los plásticos. Basta una simple visualización a nuestro alrededor para verificar la importancia que tienen estos materiales en nuestro diario vivir. La producción de plásticos continuará creciendo, abarcando distintos sectores, debido principalmente a sus propiedades y a su relación costo-beneficio. Ellos presentan gran variedad de propiedades, algunas de las cuales no son posibles de obtener en otros materiales. Los plásticos se clasifican en termoplásticos y termoestables. Dentro de los termoplásticos, se encuentra el “Acronitrilo Butadieno Estireno”, conocido a nivel comercial como ABS, de alto interés industrial por sus características de formabilidad y calidad de terminación.

Los distintos productos manufacturados con plásticos se obtienen por variados procesos de moldeo. Entre otros, el proceso por el cual se usa una lámina de material termoplástico para darle una forma deseada, utilizando medios mecánicos o neumáticos para formar el artículo final sin pasar por la fusión del plástico, se denomina Proceso de Termoformado. Este proceso de transformación se puede realizar al vacío, a presión y en forma mecánica. Muchas son las líneas que requieren de este tipo de procesos: la industria productora de embalajes alimentarios, la fabricación de envases y empaques desechables, la industria automotriz (parachoque y tapicería), la fabricación de componentes de línea blanca (refrigeradores, estufas, etc.), etc.

Por otra parte y con el fin de obtener piezas con una alta calidad de terminación y de resistencia, la tendencia actual para el análisis de procesos de este tipo se vuelca al empleo de simulaciones numéricas que requieren de modelos constitutivos y técnicas numéricas robustas y apropiadas las cuales, validadas adecuadamente, representen lo más acertadamente posible el evento en estudio.

En este contexto es que se enmarca este trabajo donde se pretende contar con una herramienta apropiada para la descripción completa del proceso de termoformado permitiendo, además, analizar la sensibilidad de la respuesta termomecánica para determinados parámetros de operación. En particular, este trabajo tiene como objetivo principal realizar el análisis numérico y su comparación experimental del proceso de conformado de materiales termoplásticos con aplicación en la fabricación de gabinete de refrigeradores.

2. EL PROCESO DE TERMOFORMADO

El termoformado de láminas de materiales plásticos es un proceso de transformación. Cuando se calienta un material termoplástico a temperaturas y tiempos adecuados puede adoptar diferentes formas predeterminadas. Al enfriarse puede recobrar su rigidez y conservar la forma que se le ha preestablecido mediante una matriz. Se emplean diferentes alternativas y combinaciones de ellas. En el proceso de termoformado están involucradas distintas herramientas que interactúan para obtener el producto deseado. Estas herramientas se consideran indeformables o bien de comportamiento con pequeñas

deformaciones frente a las grandes deformaciones que se presentan en la lámina durante el proceso. Las herramientas utilizadas son: un sistema de calentamiento que permite obtener la temperatura de termoformado, la matriz sobre la cual la lámina se apoya y que dará la forma al producto deseado y el sistema de enfriamiento para que el material recupere las características de su rigidez original. Alternativamente existe el dado o contrapunzón que es el elemento que empuja a la lámina sobre la matriz (este elemento no siempre está presente) y el pisador llamado también anillo prensa-lámina que tiene por finalidad el evitar la formación de arrugas y pliegues en el proceso.

En la fabricación de gabinete de refrigeradores, específicamente, se obtiene una forma final preestablecida a partir de una lámina de material termoplástico. En este proceso participan variados componentes y/o herramientas (matriz, punzón, pisadores, calefactor, etc.) durante la realización de las distintas etapas (calentamiento, inflado, posicionamiento de la matriz, enfriamiento, desmontado) que se describen a continuación. La figura 1 muestra en forma esquemática un proceso típico de termoformado.

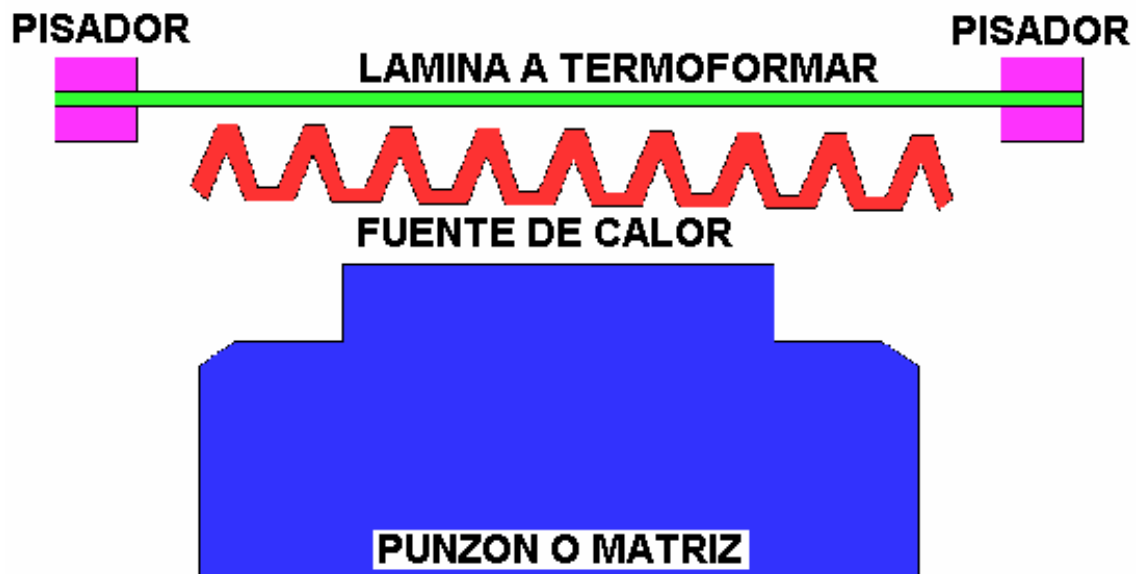


Figura 1. Lámina y herramientas de un proceso de termo conformado.

- En general las etapas del proceso de conformado, como se observa en la figura 2, son:
- Etapa 1.** Preparación de la lámina. Pre calentamiento a la temperatura de termoformado.
 - Etapa 2.** Soplado de la lámina.
 - Etapa 3.** Penetración de la matriz o punzón.
 - Etapa 4.** Definición de la forma mediante vacío.
 - Etapa 5.** Enfriado.

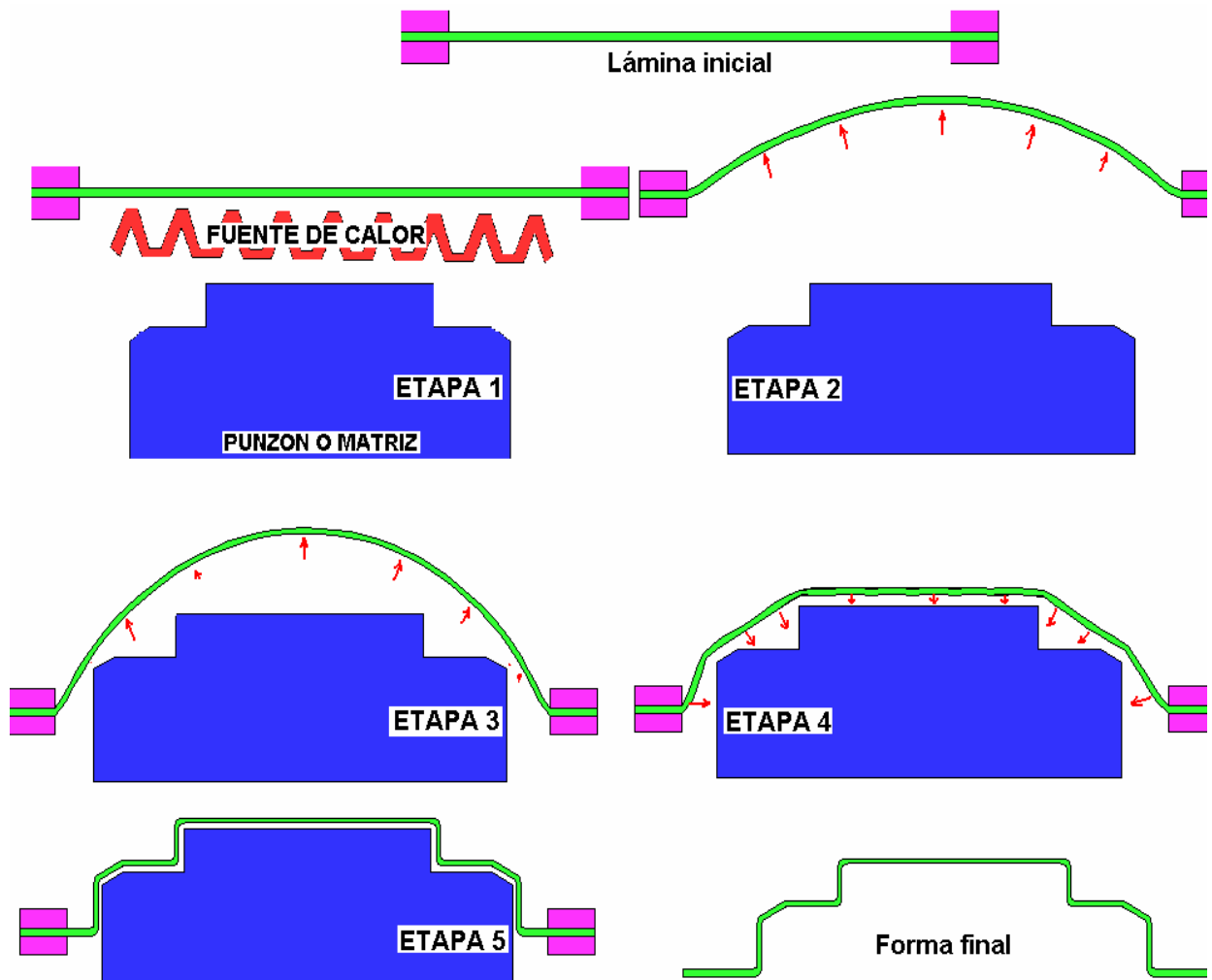


Figura 2. Esquemmatización de las diferentes etapas del proceso de termoformado de láminas de materiales plásticos.

El análisis termomecánico de cada etapa así como sus interacciones inevitablemente requieren de simulaciones numéricas las que, basadas en modelos constitutivos y técnicas numéricas robustas y apropiadas las cuales, representen lo más acertadamente posible el evento en estudio. Para tal fin es necesario realizar una validación experimental adecuada de las mismas.

3. FORMULACIÓN TERMOMECAÁNICA

El fenómeno físico a estudiar se define por las relaciones que describen el comportamiento termomecánico el cual puede ser expresado por las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento, energía y la desigualdad disipativa, definidas en

$\Omega \times \gamma$, con Ω , la configuración deformada o espacial y γ , indica el intervalo de tiempo. Tales ecuaciones son¹⁻⁴:

$$\begin{aligned} \rho J &= \rho_0 \\ \nabla \cdot \sigma + \rho b_F &= \rho \ddot{u} \\ -\rho c \dot{T} - \nabla \cdot q + \rho r - T \beta : d + \rho r_{\text{int}} &= 0 \\ -q \cdot \nabla T + D_{INT} &\geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Siendo ρ la densidad en la configuración espacial, ρ_0 la densidad en la configuración inicial o material, σ el tensor de tensiones de Cauchy, ∇ el operador gradiente espacial, b_F la fuerza de volumen específica, r la fuente de calor específica, u el vector desplazamiento, J el determinante del gradiente de deformaciones $F = dx/dX = 1 - \nabla u$ (1, tensor unidad de segundo orden), d el tensor velocidad de deformación ($d = 1/2(\nabla v + v\nabla)$, siendo v la velocidad) las que, junto con condiciones iniciales y de contorno y relaciones constitutivas adecuadas, forman el conjunto de ecuaciones a resolver.

Se postula que el comportamiento termomecánico del medio continuo puede ser descrito a través de una función de energía específica ψ que depende de diversas variables de estado. La función de energía es dependiente de la deformación, la temperatura T y de un conjunto de variables internas α_k las que, en general, se definen por ecuaciones de evolución.

3.1 Medidas de esfuerzo y deformación y ley constitutiva

Se emplea una Formulación Lagrangeana Total que refiere las medidas de tensión y deformación a la geometría original. Se adoptan en este contexto las tensiones y deformaciones de Hencky (T, ε) las que, mediante relaciones adecuadas, pueden transformarse respectivamente al segundo tensor de tensiones de Piola-Kirchhoff y al tensor de deformaciones de Green-Lagrange, siendo estos últimos los utilizados para la evaluación del equilibrio a través del principio de los trabajos virtuales⁶. La ley constitutiva se expresa a través de una relación entre las tensiones y las deformaciones elásticas suponiendo válida la hipótesis de la descomposición aditiva del tensor de deformaciones de Hencky en tres componentes: elástica, plástica y térmica. Es decir,

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon} &= \bar{\varepsilon}^e + \bar{\varepsilon}^p + \bar{\varepsilon}^{th} \\ \bar{T} &= C : \bar{\varepsilon}^e \end{aligned} \quad (2)$$

Para la hipótesis de comportamiento elastoplástico isótropo del material, se puede adoptar la siguiente definición de la función de energía Ψ^P , para un modelo con endurecimiento isótropo potencial:

$$\psi^P = -\frac{1}{(n^p + 1)\rho_0} A^p (\bar{\varepsilon}_0^p + \bar{\varepsilon}^p)^{n^p + 1} \quad (3)$$

Donde el coeficiente de rigidez del material y el exponente de endurecimiento por

deformación, A^P y n^P respectivamente, son constantes características del endurecimiento del material por deformación plástica que se obtienen a partir de los ensayos experimentales de tracción. Por último, $\bar{\epsilon}_0^P$ es el valor inicial que toma la variable deformación plástica efectiva.

3.2 Formulación y solución discretizada

Las ecuaciones presentadas anteriormente de cantidad de movimiento y energía (en conjunto con la conservación de la masa) se formulan en el contexto del método de elementos finitos. La correspondiente forma débil puede ser escritas en forma matricial, para los residuos mecánico y térmico R_U, R_T respectivamente⁷, como:

$$\begin{aligned} R_U &\equiv F_U + F_f - M\ddot{U} - F_\sigma = 0 \\ R_T &\equiv CT + KT + q_c + q_f + q_v + rp + rf \end{aligned} \quad (4)$$

Donde F_U , F_f y F_σ son los vectores de fuerzas externas, contacto mecánico y fuerzas internas, respectivamente; M, la matriz de masa y U, el desplazamiento nodal. Así mismo C y K, son las matrices de capacidad y conductividad respectivamente; T, las temperaturas nodales; q_c y q_f representan las contribuciones externas de convección y flujo de calor; q_v, rp y rf representa las contribuciones asociadas al cambio de volumen debido a la temperatura, a la disipación estructural y al trabajo de fricción por contacto de la lámina con las herramientas. La solución propuesta del sistema de ecuaciones dado es mediante un esquema alternado. Ambos residuos son evaluados con un esquema de integración temporal explícito.

La discretización espacial del continuo se realiza con elementos triangulares de lámina delgada^{6,8-10}, adecuados para el tratamiento de grandes deformaciones elastoplásticas y que consideran sólo los grados de libertad de desplazamientos y se basan en la teoría de láminas clásica para el análisis mecánico (sin deformaciones transversales de corte). La curvatura se considera en función de integrales sobre el contorno del elemento de forma tal que las mismas sean función de la geometría del propio elemento (e) y la de sus vecinos (a, b y c). Esto permite configurar un elemento tipo celular que en conjunto con el elemento de deformación constante CST (para integrar el comportamiento membranal), forman finalmente el denominado elemento BST (triángulo básico de láminas). Este elemento se extiende, al incluir los efectos térmicos, considerando una variación lineal de la temperatura a través del espesor.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL PROCESO DE TERMOFORMADO

La figura 3 muestra esquemáticamente la geometría en estudio. La lámina se encuentra a una temperatura inicial de 190 °C y el punzón a 80 °C. Se supone que el material de la lámina es elásticamente isótropo y que su comportamiento plástico está regido por el criterio de anisotropía plástica desarrollado por Hill (1948), particularizado para estados

de tensión plana y anisotropía normal. El contacto mecánico se describe por medio de la clásica ley de rozamiento de Coulomb con un esquema de penalización para controlar la interpenetración normal de los cuerpos en contacto.

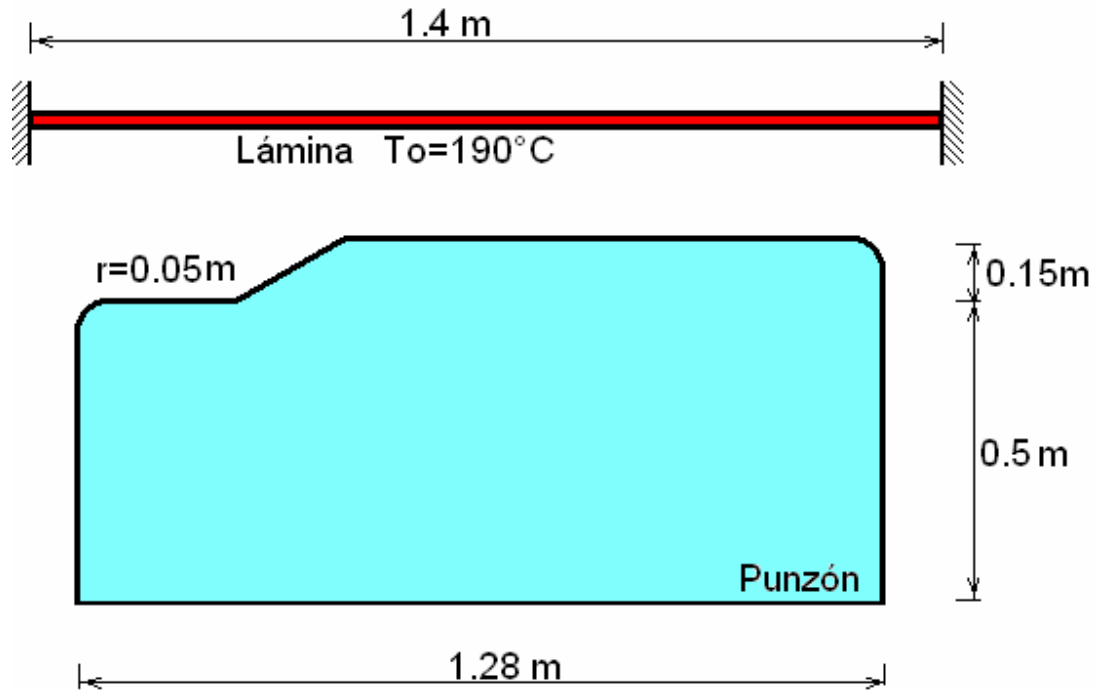


Figura 31. Esquema de las herramientas empleadas para el ensayo de embutición de láminas.
Dimensiones en milímetros.

A la lámina en su estado no deformado se le trazaron líneas en forma de grilla, separadas cada 82 mm, con el objeto de estudiar su comportamiento al final del proceso. La figura 4 muestra una imagen de la forma final que adquiere el gabinete observándose además la gran deformación que alcanzan las líneas trazadas. El desarrollo experimental se realizó en la empresa CTI S.A., en Chile, en una máquina con capacidad para producir 80 unidades por hora.

La lámina a termoformar tiene las propiedades mecánicas dadas en la tabla 1, mientras que en la tabla 2 se dan las características globales de la lámina y del proceso.

Las ecuaciones vistas anteriormente, en particular la componente térmica, han sido incorporadas, en conjunto con las características y modelo constitutivo propios del material en análisis, en un código¹¹ adaptado para estudiar problemas de embutición de láminas con grandes deformaciones.

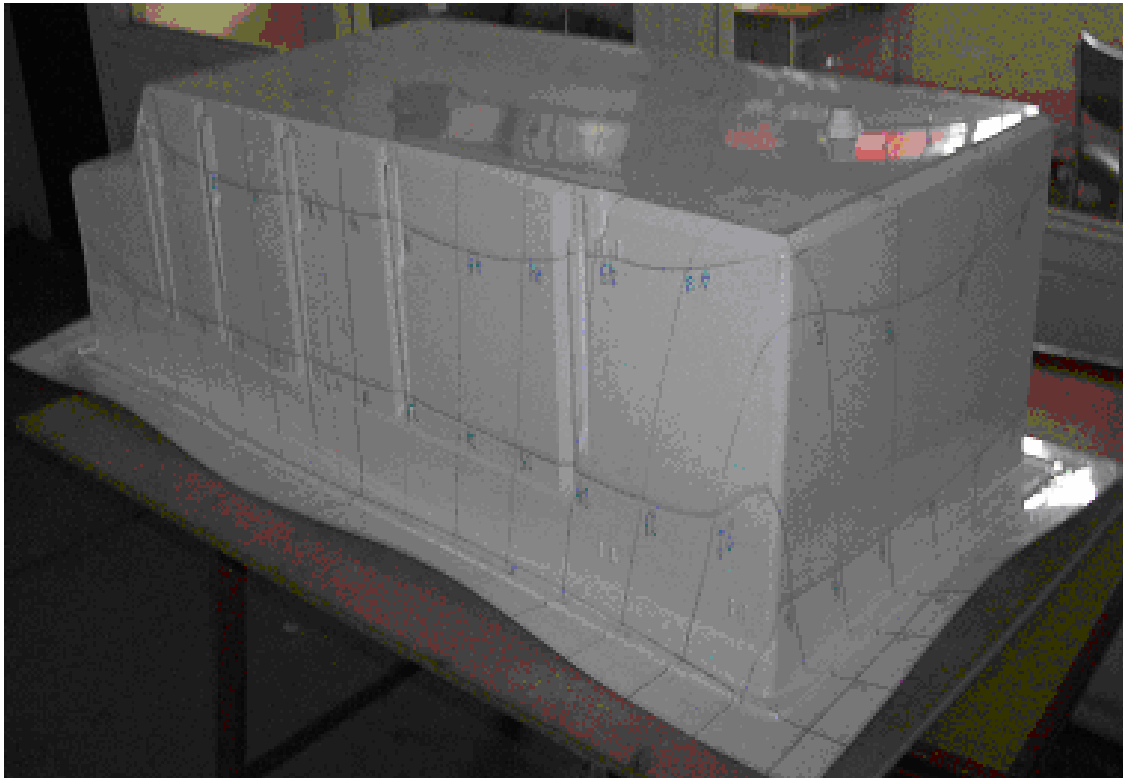


Figura 4. Gabinete típico de un refrigerador comercial 3300.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del material de la lámina.

PROPIEDAD	TEMPERATURA	
	20°C	105°C
Módulo de elasticidad	0.027 GPa	
Razón de Poisson	0.49	0.49
Límite elástico [MPa]	$\bar{\sigma} = 38.8(0.026 + \bar{\epsilon}_p)^{0.0284}$	$\bar{\sigma} = 2.687(0.017 + \bar{\epsilon}_p)^{0.2442}$
Fluencia	35 MPa	1 MPa
Dilatación Térmica	$1.6 \cdot 10^{-5}$	
Calor específico	2000	2000
Conductividad térmica	0.2	0.21 W/mK

Tabla 2. Características geométricas y parámetros operativos.

Dimensiones de la lámina original	145*75 mm
Espesor de la lámina	2.80 mm
Punzón	1280*500 mm
Velocidad del punzón	10 m/s
Coefficiente de rozamiento	0.44
Presión de soplado	0.8 MPa
Presión de vacío	0.09 MPa

A pesar de no existir simetría total y por razones de simplificación del modelo, en esta fase del estudio la discretización se realiza sobre un cuarto de todos los componentes que participan en el proceso (herramientas y lámina). Así, la figura 5 muestra la discretización hecha al punzón. Los resultados obtenidos al final del proceso de embutido (correspondiente a una penetración $H=460$ mm), a lo largo de las líneas BA y CA se muestran en las figuras 6 y 7, respectivamente. En dichas figuras se comparan la razón de espesores calculados numéricamente con los valores experimentales medidos.

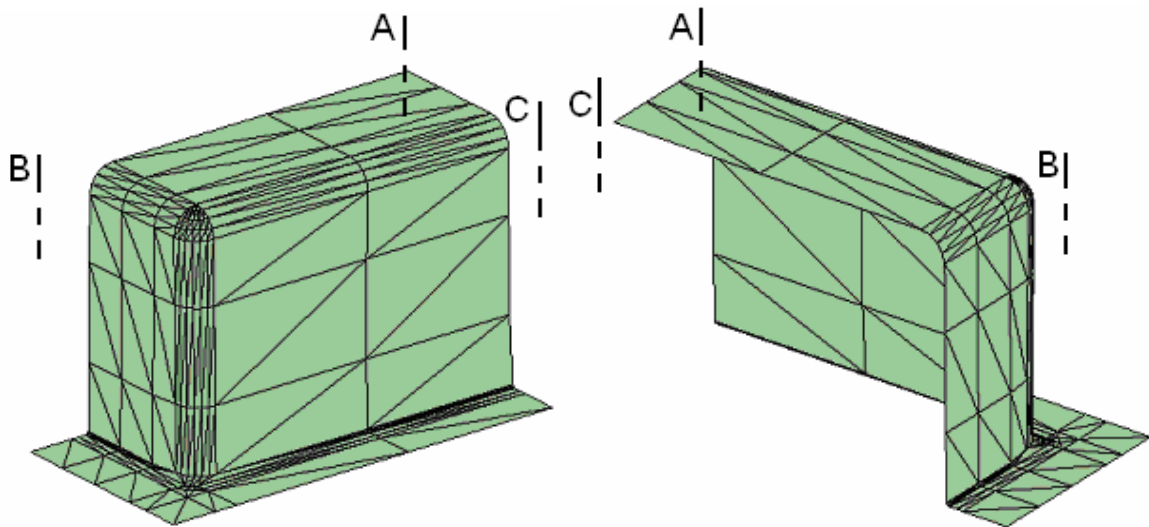


Figura 5. Discretización del punzón considerada en el proceso de embutición.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una metodología para realizar la simulación numérica del proceso de termoformado de estructuras laminares de materiales termoplásticos. A la luz de los resultados obtenidos se observa una cierta tendencia de ajuste entre los valores numéricos respecto de los obtenidos experimentalmente. Sin embargo las divergencias son todavía importantes. Estas diferencias pueden obedecer principalmente a dos aspectos. A la lámina originalmente se la precalienta en forma discreta, es decir, tiene diferentes valores iniciales de temperatura dependiendo de las distintas deformaciones finales requeridas en esas zonas. El segundo aspecto corresponde al comportamiento del material a termoformar el cual, producto de la variación de temperatura, varía sustancialmente sus propiedades. Esta variación se manifiesta, principalmente, por el contacto del punzón con la lámina. Estos dos aspectos se incluirán en trabajos futuros.

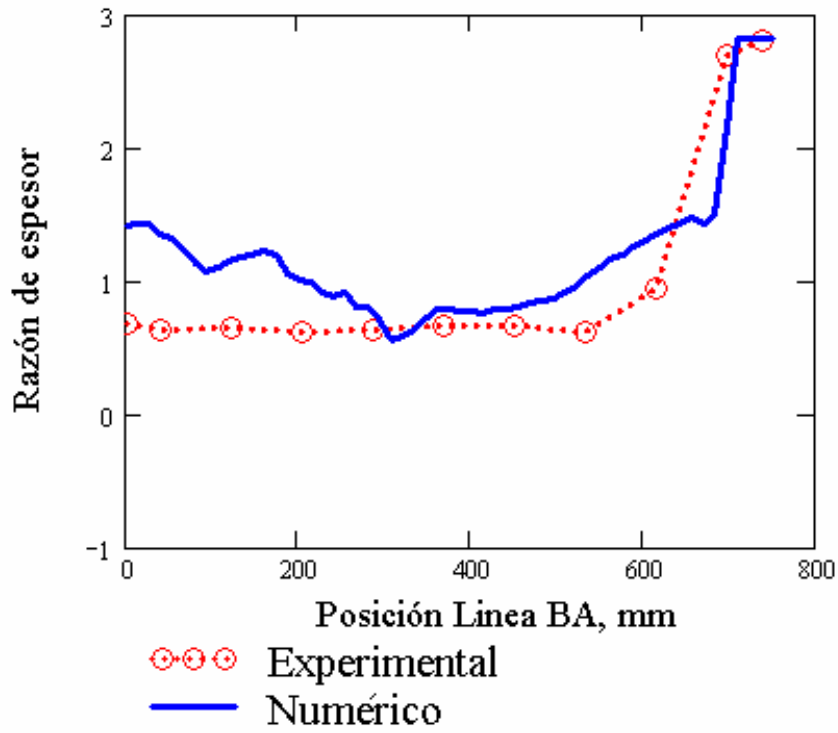


Figura 6. Razón de espesores a lo largo de la línea BA.

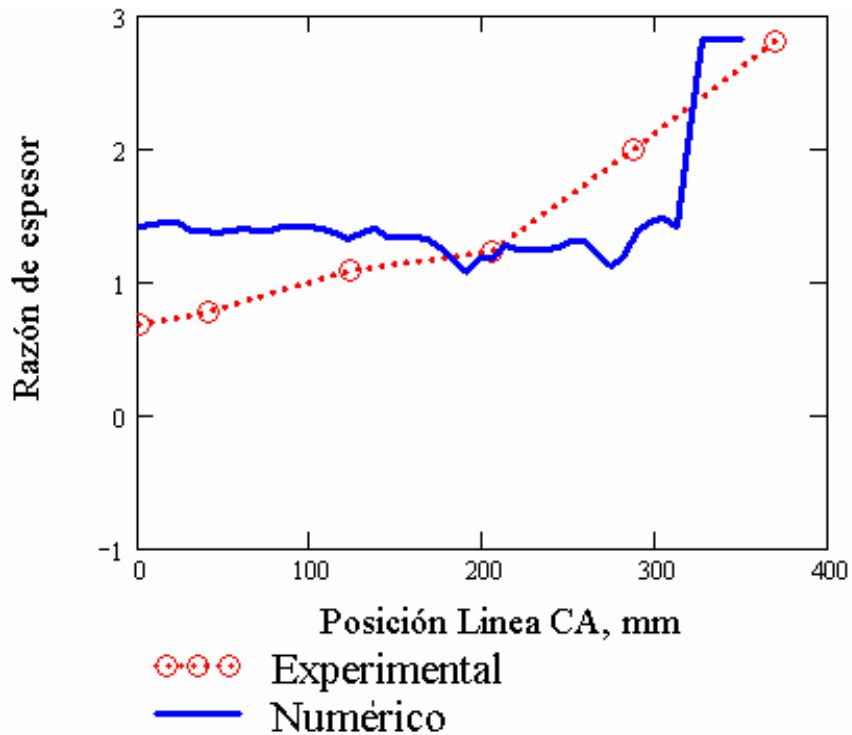


Figura 7. Razón de espesores a lo largo de la línea CA.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los apoyos brindados por DICYT-USACH y CONICYT (Proyecto Fondecyt 1020026) y de la DIULS-ULS para el desarrollo de este trabajo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Garrido C., Celentano D. y Flores F., “Caracterización Numérica del Proceso de Embutido de Láminas”, X Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica – COCIM 2002. Universidad de Santiago de Chile, Chile (2002).
- [2] Garrido C., Celentano D. y Flores F., “Simulación numérica del termoformado de Láminas”, Revista Mecánica Computacional Vol. XXII. M. B. Rosales, V. H. Cortínez y D. V. Bambill (Editores). Bahía Blanca, Argentina (2003).
- [3] Garrido C., Torres J. y Celentano D., “Caracterización Mecánica De Materiales Termoplásticos de Uso en Componentes de Refrigeradores”, Congreso CONAMET-SAM/SIMPOSIO MATERIA. Centro Atómico de Bariloche - Instituto Balseiro. Bariloche Argentina (2003).
- [4] Malvern L., *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*, Prentice-Hall Inc (1969).
- [5] García C., “Análisis Numérico de Sólidos Sometidos a Grandes Deformaciones”, Tesis de Ingeniería de Ejecución Mecánica, Universidad de Santiago de Chile (1999).
- [6] Flores, F.G. y Oñate, E., “A basic shell triangle with only translational DOFs for large strain plasticity”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 50 (2000).
- [7] Celentano D., Vulcan: Coupled Thermomechanical Finite Element Analysis for Solidification Problems. User’s Manual, Version 2.2 (1996).
- [8] Flores F., “Elementos Finitos para el Análisis de Sólidos Anisotrópicos con Grandes Deformaciones Plásticas”, Congreso de Métodos Numéricos y sus Aplicaciones ENIEF XII, Mecánica Computacional. Córdoba, Argentina (2001).
- [9] Flores F., “Un Algoritmo de Contacto para el Análisis de Procesos de Embutición”, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* (1999).
- [10] Stampack, A General Finite Element System For Sheet Stamping Forming Problems, Data Input Version 2.1.0, Quantech ATZ S.A., Barcelona, Spain.
- [11] L. Adam y J.F. Ponthot, “Numerical Simulation of Viscoplastic and Frictional Heating During Finite Deformation of Metal. Part I: Theory”, *J. Eng Mech.* 128(11), 1215-1221 (2002).