

ESTUDIO Y MODELACIÓN EL PROCESO DE APERTURA-RASGADURA DE TAPAS Y HOJALATA

A. Monsalve*, A. Artigas*, J.L. Basoalto** y C. Alvarez**

(*) Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Casilla 10233, Santiago, Chile
amonsalv@lauca.usach.cl

(**) Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Casilla 10233, Santiago, Chile

Resumen. Mediante dispositivos especialmente diseñados y contruidos, se realizó el estudio y modelización del proceso de apertura (perforación y rasgadura) de tapas del envase denominado R-200, el que se utiliza en la industria de envases de productos alimenticios, fundamentalmente. Dicho estudio incluyó la medición de las cargas necesarias para la apertura y posterior rasgadura de la tapa. Dado que el material con el que se fabrican las tapas es hojalata T5, se simuló en este material la rasgadura a través de la fabricación de dos entallas paralelas, para posteriormente realizar el rasgado del mismo, midiendo la carga necesaria para realizar el proceso. Se fabricaron entallas de diverso espesor residual, con el objeto de correlacionar este parámetro con la carga de rasgadura. Paralelamente se modelizó el proceso de rasgadura de hojalata a través de la técnica de elementos finitos, utilizando para ello un mallado que considera elementos tridimensionales. El software usado fue AlgorTM. El modelo permite calcular la fuerza necesaria para la apertura tanto de la tapa como del material base, encontrándose una similitud razonable entre los valores predichos por el modelo y aquellos obtenidos experimentalmente. Se realizó además una caracterización mecánica y microestructural, con el fin de identificar las características principales de ambos materiales.

Abstract. Through specially designed and constructed devices, the study and modeling of the opening process (perforation and tearing) of R-200 cans was carried out. This type of can is used in the storing of foods, principally. This study included the measuring of the loads necessary to opening and tearing of the end. Owing the material used to fabricate the ends is T5 tinplate, the tearing process was simulated over this material fabricating two parallels notches of different residual thicknesses, with the objective to obtain a correlation between this parameter and the tearing load. The modeling by finite element method of this process was made by means a three dimensional mesh. The software used was AlgorTM. The model permits to compute the necessary force to open the can and the tearing force of both, the cans and the base material, finding a good agreement between experimental and predicted values. A mechanical and microstructural characterization was also be made in order to identify the principal characteristic of these materials.

1. INTRODUCCIÓN

La industria del acero se halla en constante cambio debido a los desafíos que cotidianamente debe enfrentar, tanto en lo que atañe a la fabricación de nuevos tipos capaces de satisfacer necesidades específicas, como en lo concerniente a la optimización de los aceros ya consolidados en el mercado. Esto precisamente es lo que ocurre con aquellos aceros destinados al sector del envase. La tendencia en este ámbito consiste en el desarrollo de nuevos tipos de aceros capaces de presentar buenas propiedades de conformado, gran resistencia (para asegurar la estanqueidad del envase) y baja resistencia a la fractura, esto último particularmente aplicable a los envases denominados de fácil apertura (EOE, Easy Open End) [1].

En efecto, la tendencia actual en muchos envases destinados a la industria de alimentos es la de adoptar la

tecnología de fácil apertura con el fin de facilitar su manipulación por el consumidor final.

En relación a esto, en este trabajo se estudian las variables más relevantes en el proceso de rasgadura y apertura de tapas denominadas EOE, cuantificándose la fuerza necesaria para perforar las tapas y la necesaria para producir la rasgadura. Además, se han fabricado entallas en hojalata original, tratando de simular la manufactura de las mismas en las tapas comerciales. En este último caso sólo se ha cuantificado la fuerza de rasgadura. Finalmente, para completar el estudio, se ha modelizado el comportamiento de las tapas y hojalatas utilizando la técnica de elementos finitos, determinándose la fuerza necesaria para la perforación (tapas) y aquella necesaria para la rasgadura (tapas y hojalata). Se evaluó la dependencia entre las cargas necesarias y las direcciones de laminación, tanto para tapas como para hojalatas, evaluándose en este último caso, la dependencia de la fuerza de rasgadura con el

espesor residual. El trabajo incorpora además una caracterización mecánica y microestructural del material empleado.

2. EXPERIMENTAL.

Tal como se aprecia en la figura 1, la tapa en estudio está constituida por una anilla, una entalladura circular y un remache que une la anilla con la tapa.

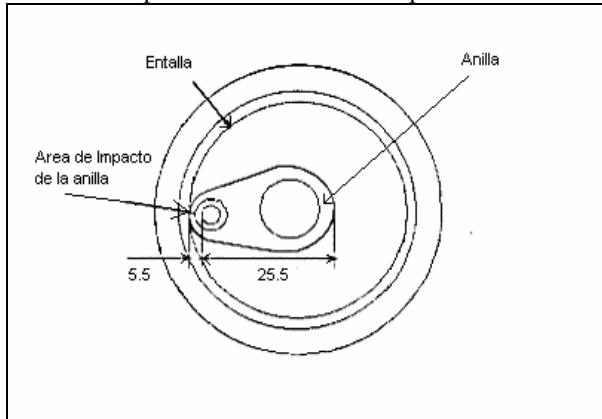


Figura 1. Esquema de la tapa EOE estudiada. Medidas en mm.

La composición química de la hojalata T5 utilizada para simular la apertura de tapas se muestra en la Tabla 1. A su vez, las propiedades mecánicas de los materiales estudiados se muestran en las Tablas 2 y 3.

Tabla 1. Composición química de la hojalata utilizada.

%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Al	ppm N
0.06-0.08	0.45-0.55	<0.02	<0.017	<0.03	<0.04	55-75

Tabla 2. Propiedades Mecánicas del acero de tapas EOE.

Límite elástico (MPa)	Resistencia máxima (MPa)	Elongación a rotura (%)	Índice de endurecimiento	Módulo de Endurecimiento (MPa)
430	580	20	0,22	400

Tabla 3. Propiedades Mecánicas de la hojalata estudiada.

Límite elástico (MPa)	Resistencia máxima (MPa)	Elongación a rotura (%)	Índice de endurecimiento	Módulo de Endurecimiento (MPa)
380	550	15	0,16	500

La microestructura correspondiente a este tipo de acero, tanto de la tapa misma como de la hojalata estudiada, se puede apreciar en la figura 2. Dado el bajo contenido de carbono, la microestructura corresponde a una matriz ferrítica con colonias muy finas de perlita, las que en algunos casos aparecen orientadas en el sentido de laminación y en otras, precipitadas en las fronteras de grano.

Los ensayos de apertura y rasgadura fueron realizados en una máquina de tracción/compresión Tinius-Olsen,

servo hidráulica con capacidad para 30 toneladas. La toma de datos se realiza a través de una celda de carga y de un control de posición.



(a)



(b)

Figura 2. Microestructura de la aleación estudiada (a) Tapas; (b) Hojalata T5

Se diseñaron dispositivos para realizar la apertura controlada de las tapas, tal como se ilustra en la figura 3. Este dispositivo es capaz de realizar la perforación de la tapa por la anilla y además, la rasgadura de la misma, tras aplicar una fuerza apropiada.

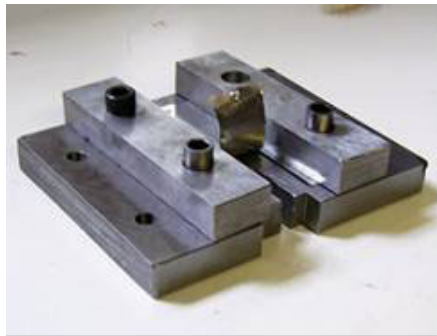


Figura 3. Dispositivo utilizado para perforar y rasgar las tapas a 0° y 45°, respecto del plano de la tapa.

Además se diseñó y fabricó un dispositivo capaz de generar las entallas para proceder posteriormente a su rasgadura, tal como se aprecia en la figura 4. Estas entallas son lineales, paralelas entre sí y separados una distancia de 25 mm.



(a)



(b)

Figura 4. Dispositivo para (a) fabricar las entallas; (b) realizar la rasgadura.

3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Para realizar el desarrollo del modelo numérico, tanto en la apertura de tapas como en la rasgadura de las mismas, se utiliza el software comercial Algor 12, incluyéndose en el análisis un módulo elasto-plástico, el que considera una ley de endurecimiento lineal e isotrópica. Para la discretización de la ecuación de equilibrio, se emplea el principio de los trabajos virtuales, utilizándose un elemento tipo Brick, de seis y ocho nodos. Para describir el proceso de perforación, se utilizaron 3000 elementos conectados por 4003 nodos; para rasgadura, se utilizaron 3848 elementos con 5309 nodos. En la figura 5 puede observarse el mallado utilizado en el estudio de la apertura de tapas. [2]

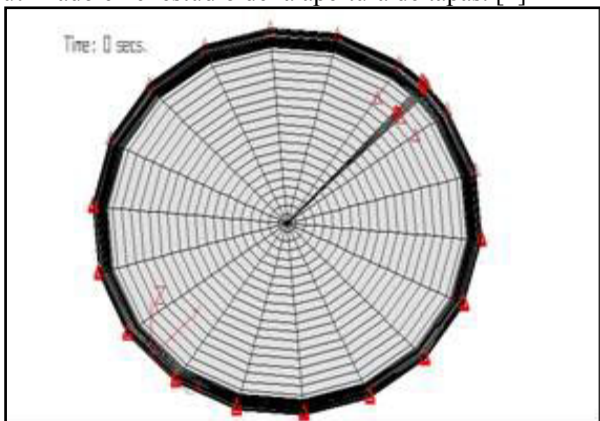


Figura 5. Mallado utilizado para el estudio de las tapas.

El modelo empleado para describir el comportamiento elastoplástico del material es un modelo bilineal, consistente en dos líneas rectas de pendientes correspondientes al módulo de Young (parte elástica) y al módulo de endurecimiento (parte plástica). A su vez, los valores de ambos coeficientes se encuentran en las Tablas 2 y 3.

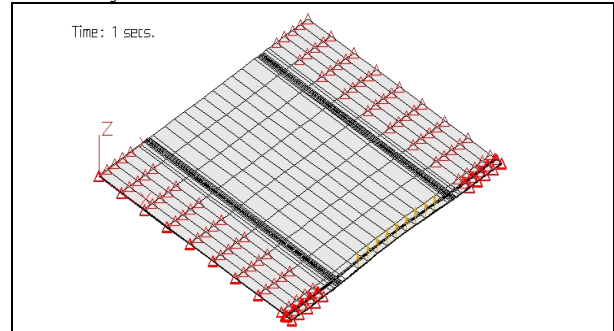


Figura 6. Mallado utilizado en la rasgadura de hojalata.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Curvas de apertura a tapas. En la figura 7 se muestra a modo de ejemplo una curva de apertura de tapas correspondiente al envase de denominación comercial R-200. Las curvas presentan dos máximos, uno de ellos correspondiente a la perforación de la tapa por la anilla y el segundo, correspondiente a la rasgadura de la tapa. Al proceder a la apertura de la tapa, inclinándola en 45° , los valores de ambos parámetros resultan ser algo menores. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.

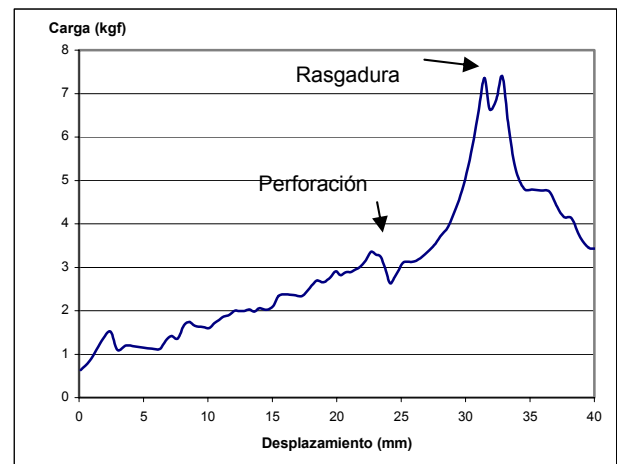


Figura 6. Curva de apertura de tapa EOE, mostrando los dos máximos característicos.

Tabla 4. Cargas (kgf) de perforación y rasgadura.

	0°	45°
Carga de Perforación	3-3,5	1-2
Carga de Rasgadura	7-7,5	4-7

La diferencia en las cargas de perforación y rasgadura, se deben a que el cambio de orientación genera una descomposición diferente de las fuerzas verticales, que son las que se miden con la máquina de tracción. Se realizaron procesos de apertura a tapas con diferente

dirección de laminación relativa a la zona de impacto de la anilla. Como se aprecia en la tabla 5, los valores de la carga de perforación no se ven afectados por la orientación de la dirección de laminación, en cambio, la carga de rasgadura es mayor para la disposición de 0°, lo cual es razonable debido a que en este caso, la grieta avanza en una dirección que nunca es paralela a la dirección de laminación.

Tabla 5. Cargas de perforación y rasgadura para diferentes orientaciones de la tapa, en kgf.

	Perforación	Rasgadura
0°	2-3	6-7
90°	2-3	3-4

4.2. Curvas de rasgadura de hojalata. Las curvas de rasgadura de hojalata se muestran en la figura 7, pudiendo apreciarse un aumento de la carga hasta el momento en que se produce la rasgadura, momento a partir del cual la carga se mantiene constante.

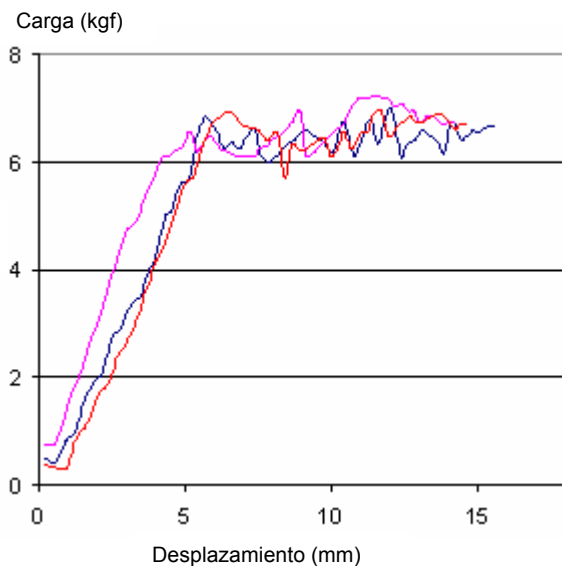


Figura 7.- Curvas de carga de rasgadura para probetas doblamente entalladas, en función del desplazamiento.

Se fabricaron probetas con distintos espesores residuales, midiéndose la carga de rasgadura para cada caso, correlacionándose este valor con el espesor residual. Los resultados se resumen en la figura 8, habiéndose realizado el estudio de la dependencia entre la dirección de las entallas relativa a la dirección de laminación. Si bien no existen diferencias significativas en los valores de las fuerzas necesarias para la rasgadura, en general se obtienen los mayores valores para la orientación de 45°, siendo la menor la correspondiente a la dirección de 90°.

4.3. Resultados de los modelos numéricos. En la figura 9 se muestran los resultados obtenidos para la simulación numérica de la perforación de tapas. Los puntos correspondientes a la zona de arriba, son los que muestran una tensión de Von Mises más elevada, siendo perforados por la anilla de acuerdo a lo observado

experimentalmente. La figura 9(c) muestra la presencia de tensiones por encima del límite elástico (430 MPa) en la zona de proceso, en tanto que la figura 9(d), muestra niveles de tensión por encima del límite de ruptura (580 MPa), lo que indica que el material en este nivel ya se ha fracturado.

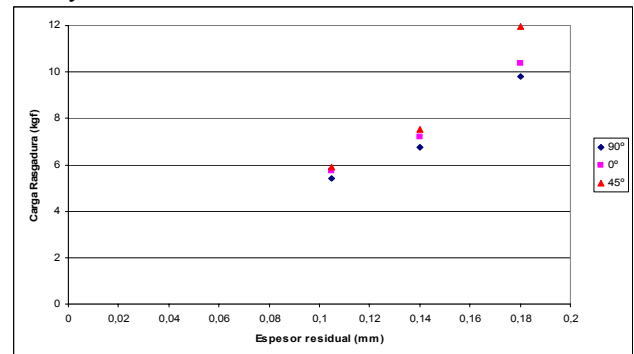


Figura 8. Carga de rasgadura en probetas doblamente entalladas en función el espesor residual.

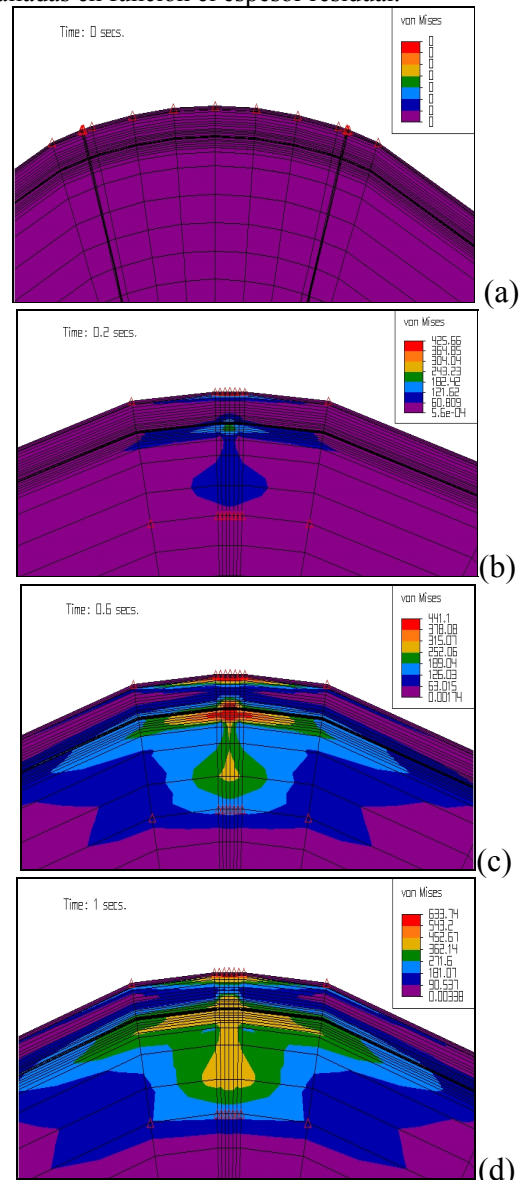
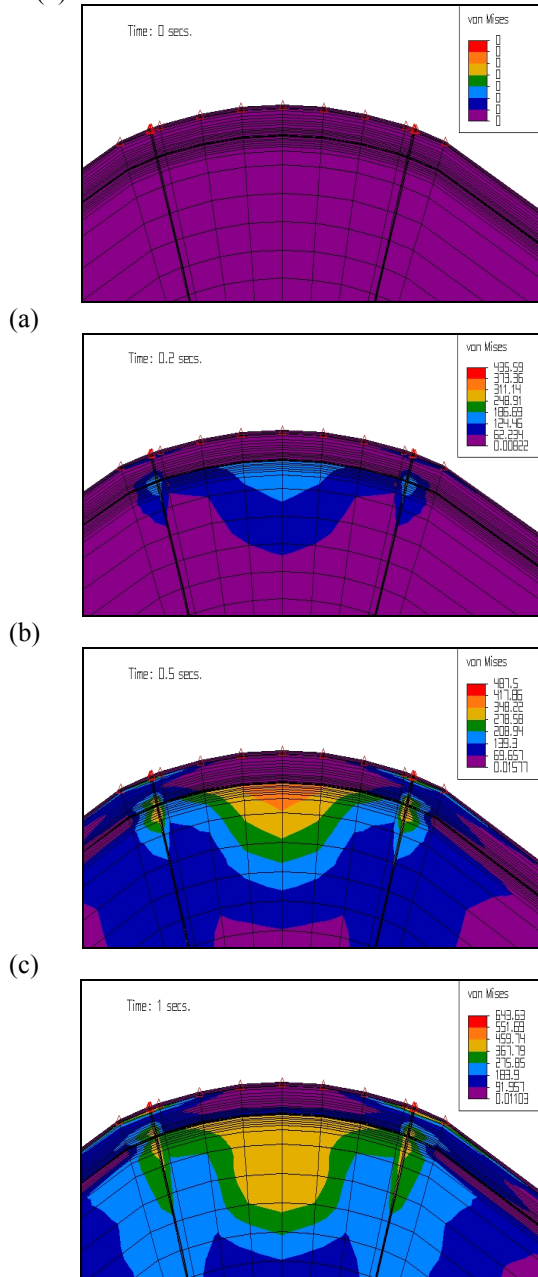


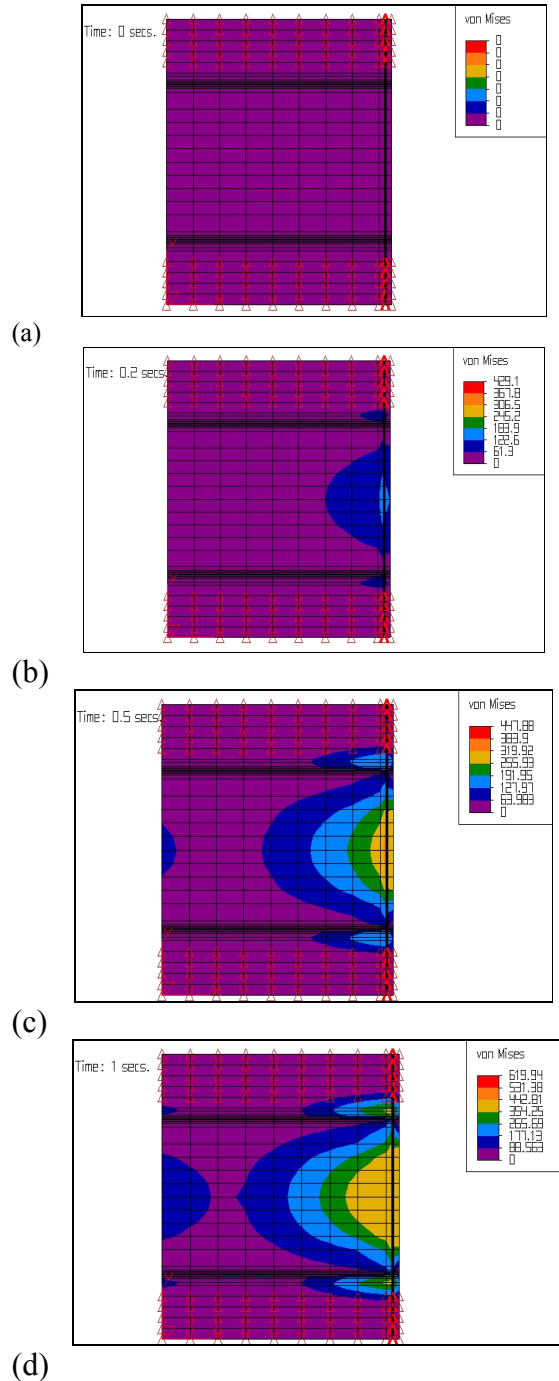
Figura 9. Distribución de la tensión de Von Mises (MPa) durante la perforación de la tapa.

En la figura 10 se muestran los resultados del proceso de rasgadura de tapas. Tal como se observa, las tensiones crecen alrededor de la zona cercana a la entalla hasta valores que superan el límite elástico del material (430 MPa), llegando a superar la tensión de ruptura (580 MPa) en la zona cercana a la entalla, figura 10(d).



(d) Figura 10.- Resultados de la simulación del proceso de rasgadura de tapas.

Finalmente, en la figura 11 se muestran los resultados de la simulación del proceso de rasgadura de hojalata doblemente entallada. Las tensiones aparecen concentradas simétricamente debido a la forma de aplicar la carga. Estas tensiones van creciendo gradualmente a medida que se realiza el ensayo, llegando primero a valores superiores al límite elástico luego de lo cual, superan el límite de ruptura, produciéndose de esta forma la rasgadura del material.



(d) Figura 11.- Resultados de la simulación del proceso de rasgadura de hojalata doblemente entallada.

4.4 Validación de la simulación numérica.

La validación del modelo numérico realizado a las tapas, se realizó comparando los resultados obtenidos para las cargas de perforación y de rasgadura medidos sobre tapas. Para esto se consideró un criterio de falla basado en la resistencia máxima a la fractura (UTS) del material, utilizando la tensión equivalente de Von Mises. Esta comparación se muestra en la Tabla 6. Los valores de ambas cargas han sido corregidos de acuerdo al balance de momentos comentado en la figura 12, en que F_r es la fuerza realizada sobre la zona de rotura, F_a

es la fuerza hecha verticalmente y L_1 , L_2 representan las distancias mostradas en la figura.

Tabla 6.- Comparación entre los resultados de cargas de perforación y rasgadura provenientes del modelo numérico y aquellos obtenidos experimentalmente.

	Perforación (kgf)	Rasgadura (kgf)
Experimental	13,9	6
Númerico	13,4	5,7

Como se aprecia, existe una concordancia razonable entre los valores obtenidos numérica y experimentalmente.

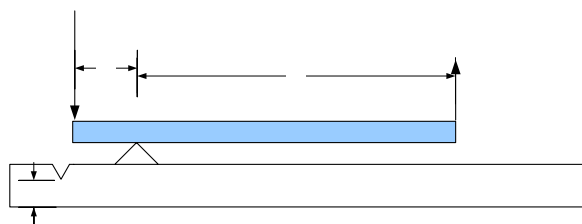


Figura 12. Balance de momentos durante el movimiento de la anilla. ($F_r L_1 = F_a L_2$).

La simulación numérica del proceso de rasgadura de hojalata se realizó asignando diversos espesores residuales a las probetas estudiadas numéricamente. Estos espesores residuales se tomaron iguales a aquellos medidos experimentalmente, tras la fabricación de la entallas. Esto permitió realizar la comparación entre el modelo numérico y los resultados experimentales. La buena correlación existente entre ambos métodos, valida el método numérico empleado, ya que, tal como se observa en la figura 13, se produce una buena concordancia en los valores de carga de rasgadura frente a espesor residual en ambos casos.

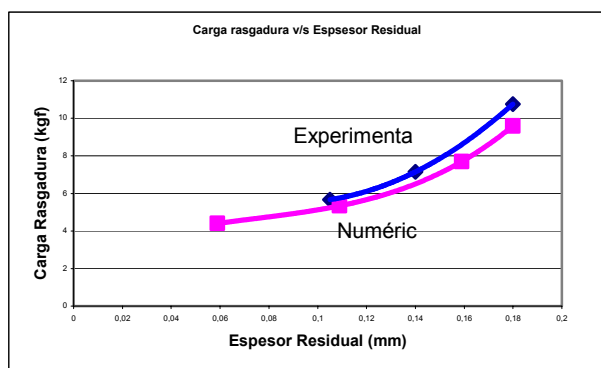


Figura 13. Gráfica comparativa de las cargas necesarias para la rasgadura obtenida experimental y numéricamente.

Aunque por razones de espacio no se ha mencionado en el presente trabajo, se ha calculado además el trabajo esencial específico de fractura en Modo III de acuerdo con lo propuesto en la literatura [3-4].

5. CONCLUSIONES

Se han diseñado y construido dispositivos para la apertura de tapas denominadas EOE.

Se ha determinado la curva de apertura de tapas EOE, localizándose en ellas el punto correspondiente a la perforación y el correspondiente a la rasgadura.

Se ha correlacionado la carga de rasgadura con la orientación de la dirección de laminación, encontrándose que la carga de perforación es independiente de la orientación relativa entre la posición de la anilla y la dirección de laminación. A su vez, la carga de rasgadura de tapas es mayor en aquellos casos en que el borde de ataque de la anilla es paralelo (dirección 0°) a la dirección de laminación.

Se han diseñado un dispositivo para producir una doble entalla en la hojalata utilizada en la manufactura de tapas. Además, se ha diseñado un utillaje que permite realizar la rasgadura de la hojalata.

Se ha determinado una relación creciente entre la carga de rasgadura y el espesor residual de las entallas.

Se ha modelado numéricamente tanto la apertura de tapas (perforación y rasgadura) como la rasgadura de hojalata. Este modelo permitió calcular la carga de perforación y la de rasgadura en tapas, así como también la carga de rasgadura en hojalata.

Los resultados del modelo numérico coinciden bien con aquellos resultados obtenidos experimentalmente, en cuanto a fuerza de perforación (tapas) y de rasgadura (tapas y probetas), lo que a su vez permite dar por validado el modelo numérico.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el soporte económico dado por CONICYT a través del proyecto Fondecyt 1030002.

7. REFERENCIAS

- [1] Monsalve A., Gutiérrez I., Application of a modified rigid plastic model to the out-plane fracture of "easy open cans", Int. Journal of Fracture, Vol. 102, pp. 323-339, 2000.
- [2] Basoalto J.L. y Alvarez C., Análisis experimental y numérico del proceso de fractura en Modo III, en láminas de acero de bajo contenido en carbono para aplicación comercial en tapas de fácil apertura EOE, Tesis Ingeniería Civil Mecánica, Universidad de Santiago de Chile, marzo 2004.
- [3] Mai Y.W, Cotterell B., The essential work of fracture for tearing for ductile metals, Int. Journal of Fracture, Vol. 24, pp. 229-236, 1984.
- [4] Muscat-Fenech C., Liu J.H., Atkins A.G., The trousers tearing test with ductile metals sheets, Journal of Material Processing Technology, Vol. 32, 301-315, 1992.