

# Tendencias tribológicas actuales en el conformado de la chapa metálica.

**L. A. Valdivia Pérez\*, F. Robles Proenza\*\*, R. Santana Milan\*\*.**

\*Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Pinar del Río, C/ Martí Final 270, Pinar del Río, Cuba.

Email: valdivia@meca.upr.edu.cu.

\*\*Facultad de Ingeniería. Universidad de Holguín. Ave. XX Aniversario. Holguín. Cuba.

(Recibido el 14 de Junio de 2004, aceptado el 20 de Octubre de 2004)

## Resumen.

Muchos de los esfuerzos orientados a mejorar u optimizar los procesos de conformado de chapa metálica en la actualidad, están dirigidos a reducir o eliminar totalmente la lubricación. Esta tendencia se fundamenta en el conocimiento de los fenómenos tribológicos que ocurren en las zonas de contacto herramienta-pieza. También las exigencias ecológicas actuales han obligado a la industria moderna a estudiar las vías para minimizar los impactos negativos de los lubricantes hacia el medio y la conformación de la chapa en frío no ha escapado a este análisis. Los residuos de lubricantes provenientes de los distintos procesos tecnológicos para la fabricación de piezas por esta vía, son potencialmente peligrosos al entorno por su compleja composición química.

El presente estudio analiza el estado del arte relativo a la caracterización de los fenómenos tribológicos en las operaciones de conformado con una visión optimista hacia el futuro donde la lubricación y su impacto ambiental debe y puede ser reducido.

**Palabras claves:** Chapa metálica, conformado seco, embutición, lubricación, medio ambiente, rozamiento, fricción, desgaste.

---

## 1. Introducción.

La industria de fabricación de piezas de chapa metálica mediante procesos de conformado, se distingue por dos aspectos ecológicos importantes: el bajo consumo de energía por unidad de peso de la pieza y gran aprovechamiento de material; y el aumento considerable de la conformación de chapas de aceros y aleaciones especiales. Esos aspectos, unidos a otros como pueden ser las propiedades de resistencia, la estabilidad y el reciclaje, bajos costos de fabricación y peso limitado conforman las características que el mercado industrial actual busca en el desarrollo de las piezas metálicas.

Como consecuencia de este creciente interés, en las últimas décadas estas tecnologías han tenido un importante desarrollo, que ha propiciado un considerable esfuerzo científico investigativo encaminado a su caracterización y optimización.

Se ha establecido que en la mayoría de las operaciones el éxito depende del conocimiento y control del desgaste de la herramienta, y de la fricción entre el material que se deforma y las superficies activas de la

herramienta. Generalmente, tanto el desgaste como la fricción se combaten utilizando determinadas cantidades de lubricantes las cuales originan residuos indeseables y emisiones nocivas para la salud de las personas. En el caso de la conformación en frío se dispone de varios métodos para manipular y evacuar los residuos y las emisiones pero aún así, en lo que se refiere a los fluidos, ha existido el inescrupuloso manejo de los mismos contaminando el agua, el aire y el suelo.

Debido a que los costos de fabricación por la utilización de los fluidos, cada vez más químicamente sofisticados, seguirán aumentando en el futuro y que las leyes de preservación del medio ambiente serán cada vez más restrictivas y estrictas en su aplicación, cualquier medio o método de trabajo que reduzca de manera sustancial la cantidad de lubricante empleada en la conformación representa un incentivo ecológico y económico de primera magnitud

Si en la conformación de piezas se pretende evitar el uso de lubricantes o reducir su empleo, las funciones de estos deben ser asumidas por las variaciones en el diseño de los útiles y por la selección y preparación de los materiales para herramientas y semiproductos.

## 2. Proceso de embutición.

Dentro de las operaciones del conformado de la chapa, la embutición ocupa un lugar de gran importancia tecnológica, es un proceso complejo debido a la gran cantidad de variables que intervienen en ella y a su mutua interrelación.

El proceso de embutición de una copa cilíndrica se muestra en la Figura 1 el primer paso consiste en la aplicación de lubricante al semiproducto en forma de chapa, el segundo paso comienza con la acción del pisador. En este paso se aplica una fuerza conocida como fuerza de pisado  $F_p$  y que su función es garantizar el cierre del pisador. El tercer paso es el embutido de la pieza, aquí se ejerce una fuerza sobre la chapa, mediante el punzón, que la obliga a deslizarse sobre la superficie

de la matriz e introducirse en ella, obteniendo la forma final de la pieza, esta fuerza es conocida con fuerza de embutido  $F_E$ .

### 2.1. Deformaciones en el proceso de embutición.

Este proceso involucra la transferencia de altas tensiones a través de la zona de contacto herramienta/pieza para deformar plásticamente la pieza hasta alcanzar la forma deseada. Durante la evolución de la forma de la pieza, ocurre un significativo deslizamiento entre la superficie de la herramienta y la pieza. En la Figura 2 se muestran las zonas donde se producen las deformaciones más severas en el proceso de embutición de la chapa metálica.

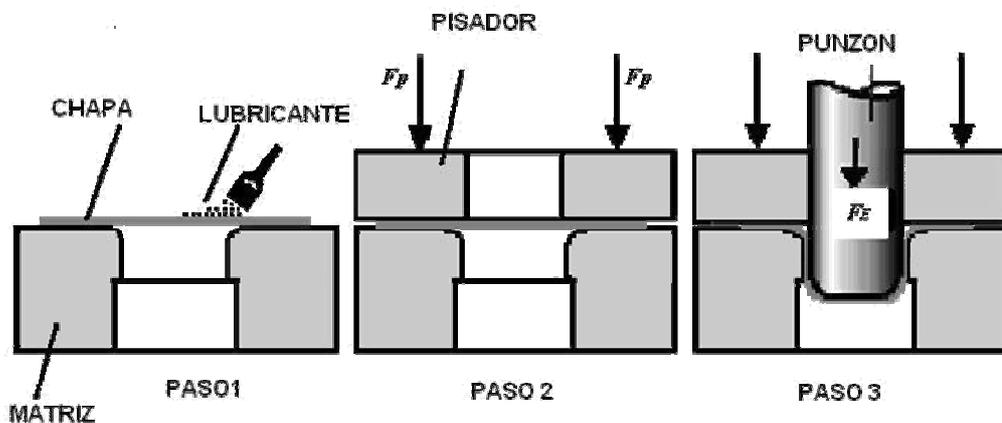


Figura 1. Proceso de embutido de una copa cilíndrica.

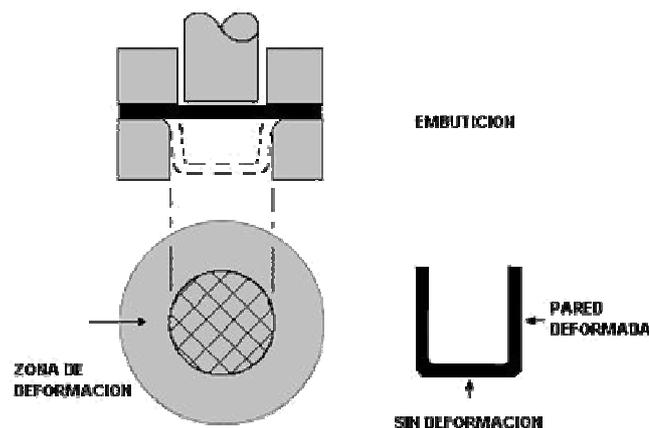


Figura 2. Proceso de embutición. Principales zonas de deformación.

Puede observarse cómo la chapa se dobla en la zona del radio del punzón. Igualmente, el metal adyacente se dobla sobre el radio de la matriz. La chapa que está en contacto con el fondo del punzón es empujada hacia abajo, y como el fondo es plano no sufre deformación alguna. Durante la operación, el metal doblado sobre el radio de la matriz debe ser enderezado para crear la pared cilíndrica del recipiente. Como este metal ya había sido endurecido por el doblado previo, se necesita una fuerza mayor para ello.

Al final de la operación se habrá deslizado una cantidad de flujo de metal sobre el radio de la matriz y en la zona de pisado. Para que esto fuese posible, se debió superar la fuerza de rozamiento estático entre el recorte y la superficie de la matriz, así como entre el pisador y la superficie del recorte. El origen de la fuerza de rozamiento es la fuerza normal creada por el pisador.

Otros mecanismos que se producen son la compresión del metal en la zona cercana al radio de la matriz y el estirado de mismo en caso de que el fondo de la copa no fuese plano. La pared lateral cercana al radio del punzón soporta un esfuerzo creciente de tracción y se produce una disminución de espesor con respecto al recorte original. A menudo se producen desgarramientos en esta zona.

La intensidad del desgaste durante el conformado de la chapa es proporcional a la distancia que se desliza la chapa sobre la matriz para una presión dada. Sin embargo el promedio del desgaste para diferentes combinaciones de matriz/chapa varía considerablemente en dependencia de las características de la superficie, la

velocidad de conformado, y del tipo de lubricación. El deterioro superficial de los materiales ocurre por diferentes mecanismos en diferentes puntos de la superficie. Los procesos de conformado están caracterizados por una mezcla de estados en los cuales intervienen la fricción sólida más la fricción hidrodinámica [36]. Es preciso señalar que entre las superficies de contacto, aparte de la presencia de lubricantes, pueden igualmente existir partículas de desechos generados en la zona de interacción de las superficies de la pieza y de la herramienta.

### 3. Fricción y lubricación en el embutido.

En casi todos los procesos de conformación de metales, la baja fricción es beneficiosa atendiendo a que reduce la presión en la zona de contacto, la fuerza, los requerimientos de energía y la generación de calor; sin embargo es necesario que existan fuerzas de rozamiento que controlen el movimiento del material, [41]. La fuerza de rozamiento en la zona de contacto podrá ser fácilmente cambiada por la lubricación y por los cambios en la rugosidad superficial tanto de la pieza como de la herramienta.

En la Figura 3, se representan los principales parámetros que tienen influencia en el sistema tribológico que se pone de manifiesto durante la operación de embutición.



Figura 3. Sistema tribológico. Embutición..

El flujo de material hacia el interior de la matriz es controlado por la fricción, lo mismo que las fuerzas sobre la superficie del pisador y de los nervios de freno, y a la vez afecta la distribución de fuerzas sobre la matriz. [26]. Durante el desarrollo de la embutición, la interacción de diferentes mecanismos hacen complejo el establecimiento de algunos parámetros. Sin embargo, se recomienda considerar a la fricción como la variable de salida de un sistema controlado por el mecanismo de lubricación que opera. Esta variable no podrá ser independiente, sino una función de muchas variables tales como, rugosidad, tipo de lubricante, superficie química, velocidad de deslizamiento relativo, y presiones de conformado.

Las características de la zona de contacto, Figura 4, dependerán de las propiedades que aporten cada uno de sus componentes:

- una herramienta dura, rígida y suficientemente lisa
- una chapa metálica suave y rugosa, la cual no solo se deforma en la dirección normal sino también en la dirección tangencial
- un aceite que contiene los aditivos necesarios para servir de lubricante en la interfase de contacto entre herramienta y pieza

En la zona de contacto entre la matriz y la pieza a conformar, surgirán entonces las fuerzas tangenciales, en algunos casos de corte, y que se oponen al movimiento relativo de las dos superficies, es por ello que la magnitud de la fricción puede ser descrita por el promedio de la resistencia al cizallamiento en la referida zona de contacto.

### 3.1 Zonas de lubricación en la embutición.

Las zonas de lubricación en el proceso embutición se localizan en las áreas de contacto matriz-chapa-pisador, radio de la matriz/chapa, borde del punzón/chapa, punta del punzón/chapa, [40]. Otros autores consideran necesario la adición de nuevas zonas como son radio del punzón-chapa y borde superior del punzón-chapa. [28, 35, 38]. En la Figura 5 se muestra, según [27], cómo se desarrollan las condiciones de lubricación.

Las primeras áreas que estarán lubricadas son la región de la punta del punzón (1), la zona de contacto entre la pared del punzón-chapa (3 y 4), la zona (5) radio de la matriz-chapa, y la zona de la chapa-matriz y pisador-chapa (6).

En la zona 1 se formará una película comprimida de lubricante tras el impacto del punzón, y a la vez la chapa metálica envuelve los radios del punzón, zona 2. Las zonas de contacto 3 y 4 alojan el resto del lubricante que ha sido desplazado de las zonas 1 y 2. A medida que transcurre el embutido el espacio comprendido entre las zonas 3 y 4 varía su posición con respecto a la chapa y al punzón.

La zona más crítica está en la matriz, y es particularmente crucial en las operaciones de embutición, es el radio zona 5; es precisamente en este lugar donde se fuerza a la chapa, previamente deformada, a deslizarse sobre el radio, con una velocidad de deslizamiento igual a la velocidad de embutido, trayendo consigo la falla de la película de lubricante y la subsiguiente transferencia de metal y micro soldadura.

En la zona del pisador 6, las presiones nominales son más bajas, pero la deformación es compleja: un deslizamiento radial acompañado de una compresión circunferencial las cuales pueden conducir al engrosamiento de las paredes del recipiente que se embute y al daño de la superficie de la matriz.

### 3.2 Mecanismos de Lubricación en los procesos de Conformación.

En la literatura consultada se establece una clasificación para caracterizar los regímenes de lubricación que se presentan en el proceso de conformado, basándose en la representación de la conocida curva de Stribeck, Figura 6, [28], la misma propuesta es retomada en sus respectivos trabajos por [35, 38]. En ella se plantea que en el proceso pueden distinguirse tres regímenes de lubricación: Lubricación Límite (BL), Lubricación Mixta (ML), Lubricación Elasto Hidrodinámica (EHL).

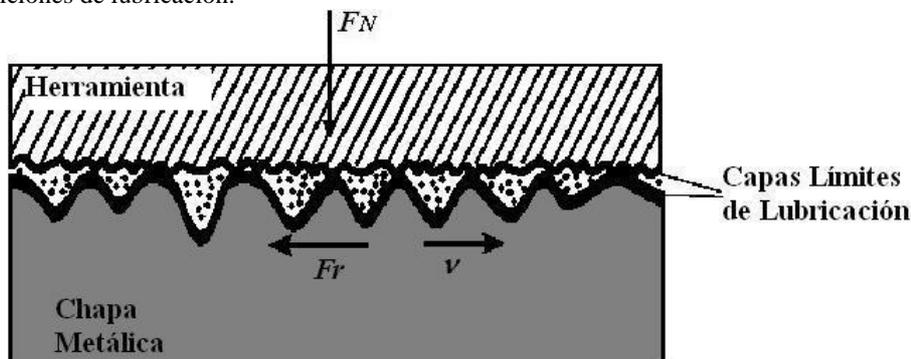


Figura 4. Zona de contacto embutido.

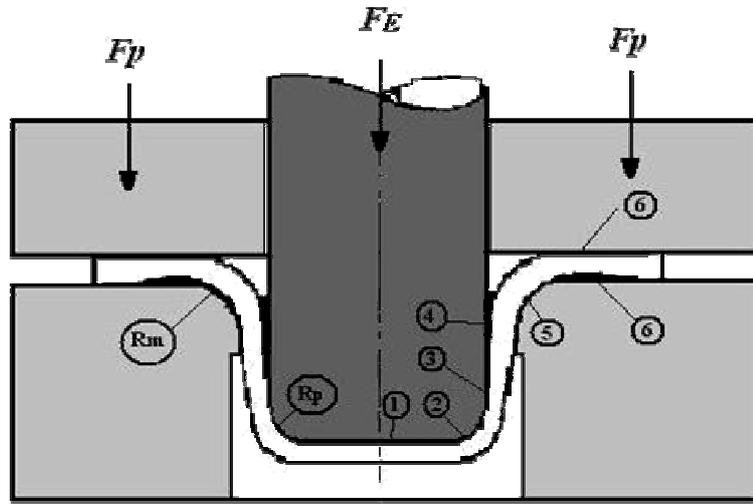


Figura 5. Zonas de lubricación en el embutido. (Schey 1983).

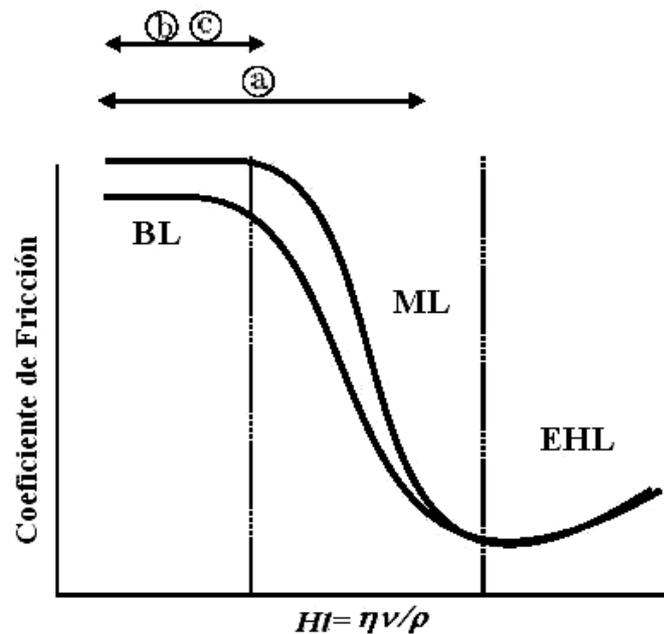


Figura 6. Curva generalizada de Stribeck. , [38]. a) área de trabajo de la región del pisador, zona 6 en Figura 4; b) área de trabajo de la región de radio de la matriz, zona 4 en Figura 4; c) área de trabajo del radio de contacto del punzón, zona 2 Figura 4.

La mencionada curva de Stribeck relaciona el coeficiente de fricción en función del parámetro  $HI$ , y que este será igual a la relación.

$$HI = \frac{\eta_o v_{nom}}{P_{nom}}$$

Donde:  $\eta_o$  es la viscosidad del lubricante a temperatura ambiente,  $v_{nom}$  la velocidad relativa de deslizamiento entre la chapa y la herramienta y  $P_{nom}$  la presión nominal en la interfase. La curva es válida para una combinación dada de las rugosidades de la chapa y la herramienta. Valores bajos de  $HI$  implican la ocurrencia de la Lubricación Límite, (BL), por el contrario, valores muy altos de  $HI$  provocan la

Lubricación Hidrodinámica, (EHL); mientras que para valores intermedios de *HI* el contacto está en el régimen de Lubricación Mixta, (ML).

### 3.3 Mecanismos de Lubricación en el Embutido.

Los criterios sobre la ocurrencia de un determinado mecanismo de lubricación en cada una de las regiones mencionadas en la sección 3.1 no son concluyentes. Diversas opiniones consideran que en estas regiones los regímenes de lubricación límite y por película gruesa pueden ocurrir solo bajo inusuales circunstancias mientras se defiende la tesis de que la totalidad del proceso opera en regímenes de lubricación mixta o por película delgada. Otros estudios consideran que el mecanismo predominante es el de lubricación mixta, partiendo del criterio de que la mayoría de los lubricantes líquidos operan en dicho régimen.

Sin embargo, y como resultado de la minuciosa revisión efectuada en este trabajo, existen indicios que evidencian el predominio del régimen de lubricación límite en estas zonas y en el proceso en general.

En la región pisador-chapa-herramienta los valores de presión son bajos, incluso por debajo de 10 MPa, debido al tamaño del área de contacto [38]. Estos valores de presión posibilitan la acción de los efectos Macro-Hidrodinámicos en la lubricación del contacto y a su vez provocan una disminución del coeficiente de fricción, lo que hace que el mecanismo de lubricación presente se ubique en la zona más baja de la Lubricación Mixta, ML, ver Figura 5, [34]. Sin embargo, durante la embutición profunda la presión en la región del pisador aumenta debido a que el área de contacto decrece en la medida que la chapa se embute, esto posibilita un tránsito hacia el mecanismo de lubricación límite.

Otro análisis que considera el predominio del mecanismo de lubricación límite, BL, en esta zona, parte del criterio que cuando comienza la incidencia del pisador sobre la chapa tiene lugar la compresión de la película de lubricante por la aproximación perpendicular de las superficies no es típico que haya grandes cantidades de lubricante en esta zona debido a la fuerte tendencia de reducir el consumo por las razones medioambientales. El rango recomendado para el uso de cantidades normales de lubricantes oscila entre 0,5 a 2 gr/m<sup>2</sup>, esta cantidad produce un espesor de capa de aceite de aproximadamente 0,5 a 2 μm, que comparada con la altura de las asperezas de la rugosidad de la superficie, 10 a 25μm, resulta insuficiente para llenar completamente los valles y garantizar la total separación de las superficies. [35].

En la región donde se produce el contacto entre el radio de la matriz y la chapa, ver Figura 5 región 5, la situación es más compleja, [27, 21], la chapa cubre el radio de la matriz creando, en su interior, una película de lubricante comprimida pero como los valores de presión son altos, alrededor de 100 MPa, [38], dicha

película es muy difícil de mantener provocando entonces la ruptura de la capa y el inevitable contacto entre las asperezas de las dos superficies. Todo lo anterior conlleva al desarrollo del mecanismo de Lubricación límite, BL.

La zona 2, Figura 5, región de contacto entre el punzón y la chapa las condiciones son muy similares a las que existen en la zona del radio de la matriz. Cuando ocurre el contacto la película de lubricante es comprimida y obligada a salir fuera de la interfase lo cual trae consigo que el flujo de metal sea fuertemente controlado por la fricción.

En la Figura 6, donde se muestra la curva generalizada de Stribeck se representan también las áreas de trabajo de las regiones de contacto anteriormente analizadas. Su localización en la parte superior de la línea obedece a que esta zona se caracteriza por una tendencia muy fuerte a la deformación plástica de las asperezas.

[41, 26] plantean que, independientemente del mecanismo de lubricación existente, en primer lugar la carga total es distribuida entre la espesa película de lubricante comprendida entre los valles y la película límite existente en el contacto entre los picos. En segundo lugar, la película límite tiende a ser continuamente destruida por el rozamiento y regenerada por el lubricante proveniente de los valles. Si el flujo del lubricante de los valles a los picos es poco efectivo, se llega a un estado de contacto sólido-sólido entre las crestas de las rugosidades aumentando por consiguiente las fuerzas de fricción. En este estadio, el mecanismo de deformación de asperezas, concepto introducido por [8], empieza a controlar las fuerzas de rozamiento. En [26, 37, 18, 33] se considera que el mecanismo predominante responsable del rozamiento en los procesos de conformado es la deformación plástica de las asperezas. No obstante, la descripción teórica de todo el fenómeno de rozamiento debido a las numerosas variables que intervienen y a sus interacciones, es todavía limitada [18].

## 4. Topografía superficial de la chapa y la herramienta y su influencia en la fricción.

Independientemente de otros factores, la topografía de la chapa metálica tiene un definido efecto en la calidad de las piezas conformadas. La topografía superficial influye en el mantenimiento del lubricante sobre la superficie de la chapa, igualmente en el desplazamiento de éste hacia la zona de contacto y en el transporte de las partículas de desgaste fuera de dicha zona. Una adecuada topografía contribuye a reducir el riesgo de desgaste adhesivo en el útil y por consiguiente, disminuye la aparición de marcas o rayas en las piezas embutidas.

Los diferentes procesos desarrollados en la fabricación de chapa metálica permiten obtener diversas texturas superficiales. Sin embargo existe un cierto desconocimiento de la relación entre los parámetros que definen la rugosidad y textura con las propiedades tribológicas del sistema chapa-lubricante-útil [29]. Esta relación se ve dificultada por los cambios a los que está sometida la topografía superficial de la chapa durante el proceso de conformación [1, 3].

En la literatura se pueden encontrar diversos trabajos que intentan modelar el régimen de lubricación y su relación con la topografía de la chapa, en ellos se considera la cantidad de lubricante atrapada en las cavidades de la chapa como un parámetro importante en los procesos de rozamiento entre la chapa y el útil, teniendo como principio fundamental que el lubricante ácido puede escapar de la cavidad y formar una película que reemplaza la película límite de los picos de las asperezas. [1, 3, 4, 5, 6, 29, 31, 37, 39].

Los principales resultados de estos estudios demuestran que en función de la topografía de la chapa, diferentes mecanismos determinarán la conducta tribológica. Que los cambios en la topografía superficial de la chapa dependerán en gran medida de las tensiones generadas en su superficie, y de la velocidad de deslizamiento de ésta. Lo anterior evidencia la influencia de la topografía para caracterizar el mecanismo de fricción durante la conformación de chapa metálica.

Bajo condiciones de lubricación elevada, las asperezas de la superficie de la herramienta pueden cortar, deformar y/o aplanar (desde el punto de vista microscópico) la superficie de la pieza conformada arrancando pequeñas partículas de desgaste. Si la lubricación es escasa, el material de la pieza a conformar puede adherirse a la superficie de la herramienta formando un "recubrimiento" que puede provocar ralladuras e incluso cambiar la topografía de la superficie de la herramienta. Esto trae consigo el aumento del rozamiento. La transferencia del material de la chapa a la superficie de la herramienta es un aspecto generalmente a evitar.

Para evitar el desgaste adhesivo en la herramienta, en la literatura consultada se proponen dos soluciones. En primer lugar, la texturización de la superficie de la herramienta para retener el lubricante y de esta forma controlar las condiciones de lubricación [24, 30]. Como segunda opción se propone el uso de recubrimientos sobre la superficie de la herramienta que cumplan la misión de disminuir las fuerzas de rozamiento y el desgaste de tipo adhesivo [7, 15, 23, 36]. Entre estos recubrimientos se pueden citar el caso de capas duras depositadas por PVD (deposición física en fase vapor), por CVD (deposición química en fase vapor), o

recubrimientos basados en capas de carbono adiamantado (DLC).

En [31] se propone una estructura tipo para la topografía de la superficie de la herramienta en la que quedan definidas dos escalas de cavidades): la mayor llamada "meso" y la menor "micro". La topografía meso-escala contiene un suficiente volumen de cavidades que favorece la retención del lubricante (porosidad cerrada). La topografía micro-escala tiene una red de cavidades más pequeñas unidas entre si que permiten el movimiento del lubricante durante el proceso de conformado (porosidad abierta). La superposición de estas dos topografías define la rugosidad de la superficie de la herramienta.

Tanto [30] para el caso del laminado, como [24], para el caso del estirado de la chapa, aplicaron el concepto de texturización de la superficie de la herramienta. En ambos casos los resultados obtenidos demostraron que la superficie de la herramienta puede ser localmente adaptada a la variación de las condiciones de carga y optimizada en función de la zona de la herramienta para disminuir el desgaste de ésta. No obstante, en sus trabajos no se analiza la texturización en trabajos de embutición donde actuarían la matriz y pisador o solamente la matriz en los radios de conformado. Tampoco se estudia la viabilidad de este método en un proceso industrial (relación coste de la texturización versus disminución del desgaste en el útil y disminución de los defectos en la chapa). Igualmente existen lagunas en lo referente a la persistencia de la zona texturizada en función del número de piezas producidas y del método de reparación de dicha superficie texturizada.

#### **4.1 Recubrimientos duros en la superficie de la Herramienta.**

Los trabajos analizados hasta ahora parten del principio que el uso del lubricante es imprescindible aunque sea en cantidades mínimas y optimizadas, y que la supresión completa del lubricante supondría utilizar otro material que realizase su misión: recubrimientos que cumplen la misión de lubricante sólido. El efecto lubricante de los recubrimientos duros depositados en forma de capas finas está sobradamente demostrado en la literatura: [9, 10, 11, 12, 14, 16, 17, 19, 20, 25, 32, 36, 40].

En [36] se analizó el comportamiento de útiles recubiertos de nitruro de cromo durante el conformado de chapa de acero galvanizado utilizando una cantidad reducida de lubricante. La duración de las herramientas recubiertas con o sin uso de lubricación reducida aumentaba respecto a la herramienta sin recubrir.

[23] desarrolló pruebas de embutición de chapas de aluminio de 1 mm. de espesor con el objetivo de determinar el comportamiento de los recubrimientos de uso común en los procesos de conformado en frío. Los resultados fueron satisfactorios. Demostraron el

comportamiento satisfactorio del carbono adiamantado para la embutición no lubricada de chapas de aluminio debido a la escasa afinidad química entre ellos lo que evita la adherencia.

## 5. Conclusiones.

El punto coincidente de los estudios consultados radica en que para lograr un correcto desarrollo del proceso de embutición hay que prestarle suma atención al control del coeficiente de fricción en los distintos puntos donde las superficies desarrollan su contacto. La magnitud de la fricción puede ser descrita por el promedio de la resistencia al cizallamiento en la referida zona. Los procesos de deformación, diseño de herramientas, calidad superficial, selección de lubricantes, y también la predicción de fallas por simulación, son altamente dependientes del análisis de los mecanismos de fricción. La fricción no es un parámetro independiente, sino una función de muchas variables. Es una práctica habitual en la industria actual la selección de dichos parámetros con criterios pragmáticos y utilitarios.

La mayoría de los autores consultados consideran la función lubricación imprescindible para la consecución de los resultados en el proceso. Su función puede ser minimizada a través de la introducción de mejoras en las superficies de la herramienta y la chapa, o introduciendo lubricantes sólidos como pueden ser los recubrimientos en capa dura. Sin embargo, no hay parámetros establecidos que garanticen el éxito de las operaciones bajo circunstancias de embutición seca o semiseca sin la presencia de la capa límite de lubricación.

El proceso de embutido profundo seco, aunque ha sido una aspiración en la tecnología de nuestros tiempos por ser económica y ecológicamente factible, no ha sido objeto de una investigación sistemática prefiriéndose el uso de lubricantes y recubrimientos. La fuerte conciencia ecológica mundial, que también ha influido a los investigadores en el campo de la mecánica, y específicamente en los procesos de conformación, ha contribuido a la apertura de nuevas líneas de investigación.

## 6. Referencias bibliográficas consultadas.

1. Azushima, A., 1995, "Direct Observation of Contact Behaviour to Interpret the Coefficient of Friction in Sheet Metal Forming". *Ann. CIRP*, 44/1:209-212.
2. Azushima, A., et al., 1996, "Direct Observation of Microcontact Behaviour at the Interface Between Tool and Workpiece in Lubricated Upsetting". *Annals of the CIRP*, 45/1:205-210.
3. Azushima, A., Miyamoto, J., Kudo, H., 1997, "Effect of Surface Topography of Workpiece on Pressure Dependence of Coefficient of Friction in Sheet Metal Forming". *Annals of the CIRP*, 47/1:478-482.
4. Bay, N., Bech, J., Eriksen, M., 1998, "A Study of mechanisms of Liquid Lubrication in Metal Forming". *Annals of the CIRP*, 47/1:221-226.
5. Bay, N., Bech, J., Sorensen, C.G., 1999, "A Basic Study of the Influence of Surface Topography on Mechanisms of Liquid Lubrication in Metal Forming". *Annals of the CIRP*, 44/1:203-208.
6. Bench, J., Bay, N., Eriksen, M., 1998, "Entrapment and Escape of Liquid Lubricant in Metal Forming". *Proceed. 8<sup>th</sup> Int. Conf. Tribology, NORDTRIB '98*, Ebeltoft Denmark, June 1998, pp. 713-720.
7. Bolt, P.J., Schaake, R.P., 1999, "Lubricant reduction in Aluminium Deep Drawing by Means of Tool Coating or Lubricating Primers". *Proceed. 6<sup>th</sup> Int. Conf. Advanced Tech. of Plasticity*, Sept 19-24, pp. 627-633.
8. Bowden, F.P., and Tabor, D., 1964, "The Friction and Lubrication of Solids, Part II". Oxford University Press, Oxford.
9. Broszeit, E. Friedrich, C., Berg, G., 1999, "Deposition, Properties And Applications Of PVD Cr<sub>x</sub>N Coating". *Surface And Coating Technology*, Vol 112, pp. 9-16.
10. Friedrich, C., Berg, G., Senf, J., Broszeit, E., 1999, "Reliable PVD Coatings On Components: Aspects Of Deposition And Characterization For Quality Management". *Surface And Coating Technology*, Vol 112, Pp. 152-161.
11. Fu, Y., et al., 1998, "Development and Characterization of CrN films by Ion Beam Enhanced Deposition for Improved Wear Resistance". *Wear*, Vol 217, pp. 159-166.
12. Hedenqvist, Per., Jacobson, S., Hogmark, S., 1997, "Tribological Laboratory Evaluation of Thin Hard Coatings". *Surface and Coating Technology*, Vol 97, pp. 656-660.
13. Hua, D.Y., Qiu, L., Cheng, H. S., 1997, Modeling of Lubrication in Micro Contact, *Tribology Letters*, Vol 3, pp. 81-86.
14. Jiang, Jiaren., Arnel, R.D., Tong, Jin., 1997, "Some Special Tribological Features of DLC Coating Deposited On Soft Substrates". *Wear*, Vol 211, pp. 254-264.
15. Kivivuori, S., Harju, E., Korhonen, A.S. 1999, "Formation Of A Wear Resistant Non-Metallic

- Protective Layer On PVD-Coated Cutting Forming Tools". *Surface And Coating Technology*, Vol 112, Pp. 98-102.
16. Knotek, O., Lugscheider, E., Barimani, C., 1997, "PVD Coating for Lubricant-Free Tribological Applications". *Wear*, Vol 209, pp. 101-105.
  17. Lee, Y., Jeong, K., 1998, "Wear-life Diagram of TiN-Coated Steels". *Wear*, Vol 217, pp. 175-181.
  18. Lo, Sy-Wei, 1999, "Surface Roughening and Contact Behaviour in Forming of Aluminium Sheet. *Transaction of the ASME*", Vol. 121, 224-233.
  19. Lugscheider, E., Knotek, O., Barimani, C., 1999, "PVD Hard Coated Reamers in Lubricant-Free Cutting". *Surface and Coating Technology*, Vol 112, pp. 146-151.
  20. Miyoshi, K., 1998, "Lubrication by Diamond and Diamonlike Carbon Coating". *Journal of Tribology*, Vol. 120, pp. 379-384.
  21. Mizuno, T. And Kataoka, H., 1978, *Bull. JSME*, 23, 1016-1023.
  22. Mizuno, T., Okamoto, M., 1982, "Effects of Lubricant Viscosity at Pressure and Sliding Velocity on Lubricating Conditions in the Compression-Friction on Sheet Metal". *Journal of Lubr. Techn.*, 104:53-59.
  23. Murakawa, M., Koga, N., Kumagai, T., 1995, "Deep-Drawing of Aluminium Sheet Without Lubricant by use of Diamond-Like Carbon Dies. Surface". *Coatings technology*, Vol. 76-77, pp. 553-558.
  24. Neudecker, Th., Popp, U., Schraml Engel, U., 1999, "Towards Optimized Lubrication by Microtexturing of Tool Surfaces.
  25. Novak, R., Kvasnicka, Y., Nováková, D., Malá, Z., 1999, "Study of Hard PVD Coating on Strongly Curved Surfaces". *Surface and Coating Technology*, Vol 112, pp. 65-69.
  26. Saha, P.K., 1993, "Boundary Friction Measurements in Sheet Metal Forming". Ph.D. dissertation, Mechanical Engineering, Northwestern University.
  27. Schey, John A., 1983, "Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear". *American Society for Metals*.
  28. Schey, John A., 1997, "Friction in Sheet Metalworking". *Society of Automotive Engineer . Paper. 970712*, 87-106.
  29. Scmoeckel, D., Prier, M., Staeves, J., 1997, "Topography Deformation of Sheet Metal during the Forming Process and its Influence on Friction". *Annals of the CIRP* 46/1:175-178.
  30. Sheu, S. And Wilson, W.R.D., 1993, "Mixed Film Lubrication of Strip Rolling". *STLE Transactions*, Vol. 37, pp. 483-493.
  31. Sheu, S., Hector, L.G., Richmond, O., 1998, "Tool Surface Topographies for Controlling Friction and Wear in Metal Forming Processes". *Journal of Tribology*, Vol. 120, pp. 517-527.
  32. Suu, Y.L., Yao, S.H., Leu, Z.L., Wei, C.S., 1997, "Comparison of Tribological Behavior of three Films -TiN, TiNCN And CrN - Grown by Physical Vapor Deposition". *Wear*, Vol 213, pp. 165-174.
  33. Sutcliffe, M.P.F., 1999, "Flattening of Random Rough Surface in Metal-Forming Processes. *Journal of Tribology*". Vol 121, pp. 433-440.
  34. Ter Haar, R., 1996, "Friction in Sheet Metal Forming, the influence of (local) contact conditions an deformation". PhD-Thesis, University Twente, Netherlands.
  35. Vermeulen, M., Scheers, J., De Boeck, A., 1993, "Tribology in the deep drawing process". 6<sup>th</sup> International Conference on Tribology, Eurotrib'93.
  36. Vetter, J., Knaup, R., Dwuletzki, H., 1996, "Hard Coating for Lubrication reduction in Metal Forming". *Surf. Coat. Technol.* , Vol 86-87, pp.739-747.
  37. Wang, Z., Dohda, K., Haruyama, Y., Yokoy, N., 1999, "Effect of Sliding Conditions on Lubricating Improvement of Micro Pits in Metal Forming". *Proceed. 6<sup>th</sup> Int. Conf. Advanced Tech. of Plasticity*, Sept 19-24, pp. 2175-2180.
  38. Westeneng, A., 2001, "Modelling of Contact and Friction in Deep Drawing Processes". PhD-Thesis, University Twente, Netherlands
  39. Wihlborg, A., Crafoord, R., 1999, "Frictional Study of Uncoated Steel Sheets". *Proceed. 6<sup>th</sup> Int. Conf. Advanced Tech. of Plasticity*, Sept 19-24, pp. 355-364.
  40. Wilson, S., Alpas, A.T., 1998, "TiN Coating Wear Mechanisms in Dry Sliding Contact against High Speed Steel". *Surface and Coating Technology*, Vol 108-109, pp. 369-376.
  41. Wilson, W.R.D., 1978, "Friction and Lubrication in Sheet Metal Forming", *Mechanic of Sheet Metal Forming*, Plenum Press, pp. 157-177.
-

## **Current tribological tendencies in conformed metallic foil.**

### **Abstract.**

Many of the oriented efforts to improve or to optimize the sheet metal forming processes at the present time are directed to reduce or to eliminate totally the lubrication. This tendency is based in the knowledge of the tribological phenomenas that happen in the tool-piece contact zones. The current ecological demands have also forced the modern industry to study the processes to minimize the negative impacts of lubricants toward the environment and the cold sheet metal forming processes has not escaped to this analysis. The residuals of lubricant coming of the different technological processes for the production of pieces by this way are potentially dangerous to the environment for their complex chemical composition.

The present study analyzes the state of the relative art of the characterization of the tribological phenomenas in the sheet metal forming with an optimistic vision toward the future where the lubrication and its environmental impact should and can be reduced.

**Keywords: Sheet metal forming, friction, wear, lubrication, environment.**