

Mecanismos de fricción en la estampación de chapas electrocincadas para automóviles

A. C. CARCEL, C. FERRER, M. A. PEREZ

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Universidad Politécnica de Valencia

El presente trabajo es una contribución al estudio del comportamiento tribológico entre chapas y matriz durante el proceso de estampación. Se ha llevado a cabo sobre chapas electrocincadas seleccionadas de bobinas que fallaron por roturas durante la estampación de piezas de carrocerías. Un número similar de bobinas que permitieron una estampación correcta ha sido también sometido a estudio como referencia. El comportamiento tribológico en condiciones de lubricación límite y las diferencias entre distintos tipos de chapas puede interpretarse y justificarse por la diferente topografía original y su contribución a la generación de la superficie real de contacto Sc . Las chapas con una topografía inicial con bajos valores de material portante en la curva de Abbot-Firestone, con altos valores de Rpk y bajos de $Mr1$, presentan bajo condiciones de lubricación límite menores valores de Sc y coeficientes de fricción estables, permitiendo una embutición correcta.

Palabras clave: embutición, chapas recubiertas, lubricación límite, topografía superficial,

Friction mechanisms during stamping of zinc electrocoated sheets for car body panels

This work was carried out on electrolytic zinc coated steel sheets, and was aimed at understanding and justifying the onset of fractures found in some samples during real stamping of automotive parts. For comparison purposes, a set of samples obtained from zinc coated steel sheets that showed lower friction values was also analysed. Samples that failed by fracture show values of coefficient of friction under BL conditions higher and unstable. This behaviour can be justified by differences in the original surface topography and by a different evolution of the real surface ratio Sc , in contact with the tools. Coils with surface topography having lower values of material ratio in the Abbot-Firestone curve, that is, with higher values of Rpk and lower values of $Mr1$, contribute to maintain low values of Sc under boundary lubrication conditions and to guarantee stable and low friction coefficient values, allowing correct stamping.

Key words: stamping, zinc coated sheets, boundary lubrication, surface topography, surface texture

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos habitualmente contemplados en el análisis del comportamiento tribológico durante la embutición se basan en una adaptación de la curva de Stribeck y de los parámetros operacionales de tipo Hersey [1,2], y se deben a contribuciones de varios autores como Emmens, Schipper o Ter Haar [3,4,5]. Si bien es cierto que la mayoría de los sistemas lubricados muestran un comportamiento similar al mostrado en las curvas de tipo Stribeck, las operaciones de embutición son muy complejas e incluyen siempre zonas o etapas en las que el proceso de lubricación funciona en condiciones de lubricación límite. Así ocurre, por ejemplo, en zonas como los frenos, el contacto con la entrada a la matriz o el contacto con los bordes de los punzones.

Las condiciones de lubricación límite son hoy día mucho más habituales que hace unos años. Es práctica habitual hoy la estampación directa de piezas, sin aplicación de aceites especiales de embutición de alta viscosidad. El mismo aceite aplicado en la planta de producción de chapa como protección anticorrosiva temporal (*pre-lubes*), debe proporcionar la lubricación necesaria en el proceso. Estos aceites tienen una viscosidad muy baja (inferior a 100 cSt a 20°C) y por otra parte, la cantidad de aceite disponible es reducida (1-2 g/m²), lo que hace que las condiciones de lubricación límite, es decir, con existencia de contactos metal-metal, sea habitual incluso bajo zonas del prensachapas.

El comportamiento tribológico en condiciones de lubricación límite durante la embutición ha recibido mucha menos atención que otros aspectos del proceso de embutición, y los mecanismos críticos

que controlan la fricción no están todavía suficientemente aclarados. Entre los trabajos publicados en relación con el problema existe abundante información experimental, pero con resultados en muchos casos contradictorios. Se ha publicado, por ejemplo, que en condiciones de lubricación límite la rugosidad superficial de las chapas tiene un efecto despreciable en los valores de la fricción, existiendo en cambio una gran influencia del material del recubrimiento y del material de la matriz, de la rugosidad de la matriz y del tipo de aditivos en el lubricante [6,7].

Estudios previos llevados a cabo por nosotros confirman, sin embargo, que existen importantes diferencias en el comportamiento durante la estampación asociados a ligeras variaciones en la topografía superficial [8]. Es cierto que estos cambios no se detectan por los valores convencionales de Ra o Pc , pero pueden predecirse a partir de medidas de algunos parámetros de topografía o textura alternativos a los convencionales, como Rpk o $Mr1$.

Un aspecto de interés que también ha sido citado en algunos estudios es la existencia de importantes cambios en la fricción (o en el comportamiento tribológico) como consecuencia del tiempo y de la distancia de deslizamiento [9,10] y que estos cambios, bajo condiciones BL son incluso más relevantes que los simples valores del coeficiente de fricción [11]. En efecto, el paso bajo el prensachapas puede haber modificado de forma significativa la topografía de la chapa y por lo tanto, su comportamiento tribológico puede ser muy diferente al original.

Se ha publicado también diversos trabajos relacionados con la fricción en condiciones de BL la contribución de mecanismos de tipo hidrostático o microhidrodinámico, originados por la existencia de pozos cerrados en la topografía que son capaces de transportar aceite y de soportar gran parte de la presión, como por ejemplo en [12,13,14]. Dado que la existencia de huecos o valles cerrados lateralmente sólo es detectable por técnicas de medida de textura tridimensionales 3D, son abundantes los trabajos recientes desde un análisis puramente mecánico, orientados a justificar el uso de tecnología 3D apoyándose en la importante contribución de los pozos cerrados al control de la fricción.

Este trabajo se orienta, específicamente, al análisis del proceso de modificación de la textura superficial bajo condiciones de lubricación límite, y a valorar sus efectos sobre el comportamiento tribológico y sobre los mecanismos de control de la fricción.

2. DETALLES EXPERIMENTALES

El comportamiento tribológico en condiciones de lubricación límite se ha analizado empleando un equipo de ensayos de fricción plana, con geometría de contacto lineal (contacto semicilindro-plano). El sistema empleado se basa de hecho en el ensayo Inland clásico desarrollado por Hilsen y Bernick en sus estudios pioneros sobre los problemas de "galling" con chapas desnudas de acero [15]. Las matrices están fabricadas en un acero de UNE F-5214 templado y revenido a 60 HRC, con un acabado obtenido mediante lija metalográfica de grano 600 en sentido transversal. Las medidas de rugosidad superficial así obtenida se encuentran en el rango $R_a = 0,2-0,3 \mu\text{m}$. El lubricante empleado fue Ferrocote 6130 de Quaker Chemical B.V. Las condiciones de ensayo se seleccionaron de acuerdo con el ensayo Renault D-311738 para reproducir las condiciones de lubricación límite. La carga normal es de 500 dN, la velocidad de deslizamiento fue de 50 mm/min y la longitud de deslizamiento en cada una de las sucesivas pasadas fue de 55-60 mm. Los valores del coeficiente de fricción se miden de forma continua en cada carrera, estando su valor definido por:

$$\mu = T / 2N \quad (1)$$

A partir de dichos valores del ancho de la zona de contacto, la presión media aparente en la zona tiene un valor de 140 MPa. Bajo estas condiciones de presión, velocidad, viscosidad y valores medios de la topografía superficial $R_a = 1,35$ micras, el factor de Emmens [3] para el proceso tiene un valor del orden de 10^{-4} , un orden de magnitud inferior al valor de 10^{-3} considerado como valor crítico para el inicio de condiciones de lubricación límite. El valor de la fracción de superficie en contacto S_c se determinó mediante observaciones con microscopía óptica, con un microscopio Nikon Microphot a 100 X, y también se llevaron a cabo observaciones y análisis MEB, en un microscopio Jeol 6300 con software de análisis EDX. Los valores originales y la evolución de la topografía superficial se determinaron mediante técnicas de medida 2D, con un equipo de palpador autoguiado Mahr Perthometer M2, que cumple ASME B 45.1-1995 e ISO 3274.

3. COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO Y CAMBIOS EN LA TOPOGRAFÍA. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Valores del coeficiente de fricción

El uso de ensayos de fricción plana bajo condiciones de lubricación límite ha permitido distinguir claramente los comportamientos reales observados durante la embutición. En el análisis del comportamiento

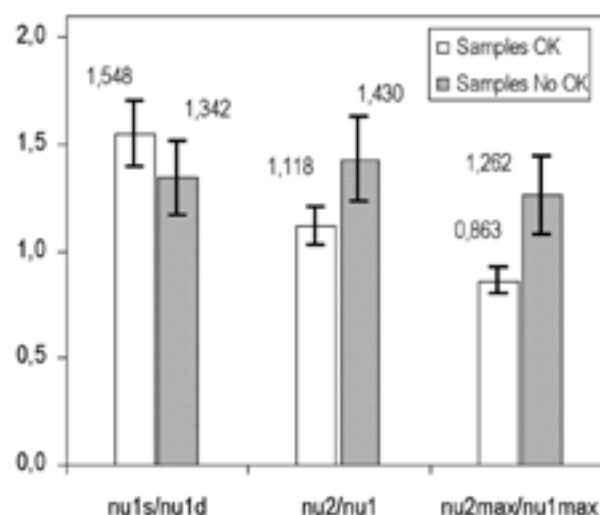


Figura 1. Valores de algunos criterios de fricción. De izquierda a derecha:

- Ratio FR, tal como se define en el ensayo Inland [15].
- Ratio entre los valores del coeficiente de fricción dinámico
- Ratio entre los valores máximos del coeficiente de fricción

tribológico bajo condiciones de lubricación límite, las diferencias entre bobinas que estampan correctamente y las que presentan fallos por fractura radica, más que en los valores reales del coeficiente de fricción inicialmente observado, en los incrementos de los valores máximos del citado coeficiente. La figura 1 muestra que, en un análisis estadístico, el mejor indicador para distinguir entre ambos grupos de bobinas es la ratio entre los valores máximos del coeficiente de fricción medidos en la segunda pasada respecto a los observados en la primera.

Los valores máximos crecen en hasta un 50% para las bobinas que fallaron (grupo No OK) cuando el ensayo se prolonga a 2 pasadas (de 60 a 120 mm de distancia bajo carga). Tal como sugiere Dalton en un excelente y reciente análisis del problema [11], con cuyas observaciones coincidimos, este comportamiento debe atribuirse bien a la ausencia de aditivos de lubricación límite adecuados en el aceite o a la ausencia de aporte de aceite a la zona de contacto (*lubricant breakdown*).

Por el contrario, en el grupo de muestras OK el comportamiento es diferente, los valores del coeficiente de fricción permanecen más estables y los valores máximos se ven incluso reducidos en la segunda pasada.

3.2. Evolución del área real de contacto S_c

Las medidas llevadas a cabo sobre las muestras ensayadas indican que la superficie en contacto crece conforme se incrementa el número de pasadas en el ensayo. No obstante, los valores iniciales y su evolución son diferentes para ambos grupos de bobinas. Tras la primera pasada, las muestras que dan altos valores de fricción y que fallan en la embutición presentan unos valores de S_c claramente superiores a las muestras de comportamiento óptimo. La figura 2 muestra el aspecto tras la primera pasada de dos de las muestras, tal como se observa en microscopía óptica. Las características originales de la superficie, obtenida por electroerosión EDT, son todavía observables, aunque la topografía de la chapa del grupo No OK ha cambiado de forma más significativa.

Los valores de la fracción de área en contacto S_c (zonas blancas) medidas por análisis de imagen son 0,75 y 0,45 respectivamente, y aumentan hasta 0,85 y 0,70 en la segunda pasada del ensayo de fricción, en paralelo con un incremento en los valores del coeficiente de fric-

ción. Tras la tercera pasada, las diferencias en S_c se reducen, aunque son todavía observables. Tras la tercera pasada, los elevados valores de S_c , por encima de 0,90, en conexión con la baja cantidad de aceite disponible en los pequeños pozos que actúan como reserva de aceite, desencadenan la aparición de fenómenos de "galling" en muchas de las muestras [16].

3.3. Evolución de la topografía superficial

Los recubrimientos de cinc sufren una fuerte modificación de la topografía durante la estampación. El deslizamiento bajo altas presiones normales aplasta los picos originales. Al mismo tiempo, y como resultado de fenómenos de adhesión con las herramientas de acero o fundición, el cinc fluye plásticamente bajo tensiones de cizalladura paralelas a la superficie, rellenando los valles originales.

Las medidas de la topografía superficial ponen de manifiesto este aplastamiento. Los valores obtenidos de S_m crecen conforme aumenta la distancia bajo carga, reduciéndose simultáneamente R_a y otros parámetros asociados con la altura del perfil. Un efecto de interés, que permite distinguir ambos grupos de bobinas, se encuentra en el análisis de la curva de Abbot. Para valores similares de los elementos del perfil (S_m), los valores de material portante tienen un valor aproximadamente doble para las muestras No OK. Ello significa que el espacio disponible para los valles es mucho más bajo en estas muestras. Dado que el volumen disponible en los valles es proporcional, al menos, al cuadrado de la dimensión recta medida, se desprende que las diferencias en disponibilidad de lubricante son muy inferiores en el caso de las muestras No OK.

Las diferencias encontradas en la topografía original siguen manifestándose incluso tras varias pasadas en el ensayo de fricción, lo que pone de manifiesto la importante contribución de la topografía original. Son estas diferencias, detectables mediante parámetros de topografía como R_{pk} o $Mr1$, cuyo uso debería incorporarse junto a los tradicionales R_a o P_c , las que determinan una diferente evolución de la superficie de contacto S_c y por lo tanto, una diferente evolución en los valores del coeficiente de fricción. La figura 3 muestra valores de la ratio nu_{2max}/nu_{1max} , junto con valores del parámetro $Mr1$.

Resulta evidente que tanto los ensayos de fricción en condiciones de lubricación límite, como las medidas directas de la topografía, permiten claramente distinguir los comportamientos diferentes encontrados en la embutición real. Ambas técnicas podrían utilizarse por tanto como herramientas de control de calidad en recepción de las bobinas, ya que permiten establecer, sin confusión, una distinción clara entre comportamientos correctos y con fractura en el proceso de estampación real.

4. MECANISMOS DE FRICCIÓN

Estos cambios en la topografía superficial permiten justificar las diferencias encontradas en el comportamiento tribológico. Bajo condiciones de lubricación mixta o límite, los valores del coeficiente de fricción aumentan con la fracción de área en contacto S_c y con la resistencia a la deformación por cizalladura del recubrimiento [18]. Los efectos del endurecimiento por deformación pueden considerarse poco relevantes en el caso del zinc puro, ya que a temperatura ambiente el parámetro de endurecimiento $n \approx 0$. De este modo, un incremento en S_c debe llevar asociado, en paralelo, un incremento en los valores del coeficiente de fricción. Un modelo simple, empleado para modelizar el comportamiento en condiciones de lubricación mixta [19], es también aplicable al caso.

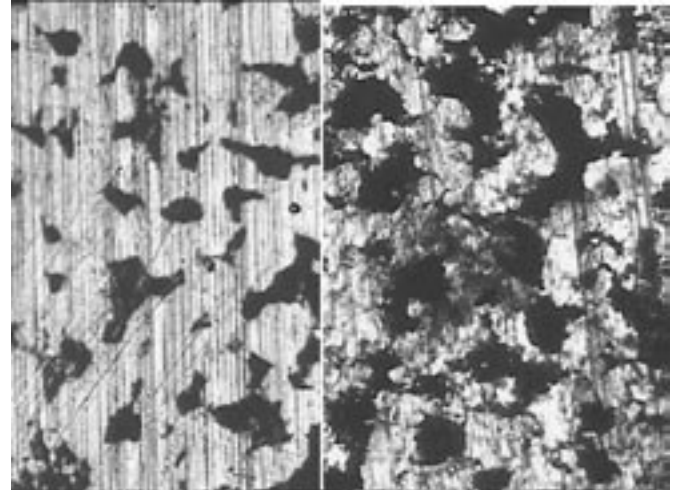


Figura 2. Aspecto superficial a 100X de los recubrimientos de cinc tras una pasada en el ensayo de fricción. Las zonas negras son valles remanentes. Izquierda: Muestra de una bobina No OK. $\mu = 0,13-0,22$. $S_c = 0,75$. Derecha: Muestra de una bobina OK. $\mu = 0,083-0,10$. $S_c = 0,45$.

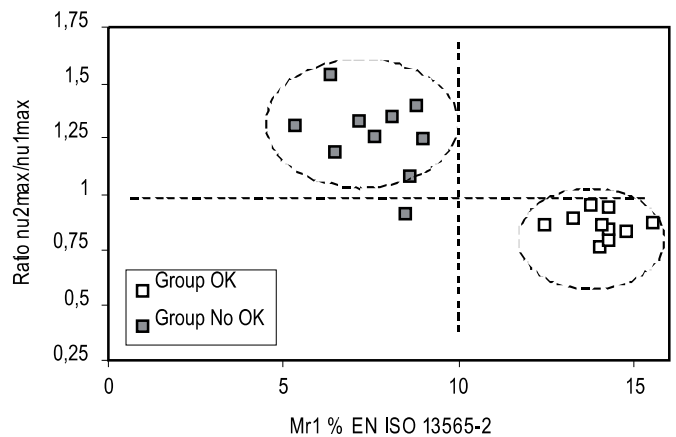


Figura 3. Resultados obtenidos de ensayos de fricción en condiciones BL y los valores del parámetro $Mr1$ medido en la chapa original.

$$\mu = \frac{\tau_c A_c + \tau_l A_l}{N_c + N_l} = \frac{(\tau_c S_c + \tau_l S_l) \cdot A}{N} = \frac{(\tau_c S_c + \tau_l S_l)}{P} \quad (2)$$

Donde

μ es el coeficiente de fricción observado

τ_c es la resistencia al corte media de la zona en contacto

τ_l es la resistencia al corte del lubricante en los valles

A es el área total aparente de contacto

N es la carga normal aplicada

$P = N/A$ es la presión aparente de contacto

A_c es el área real en contacto y A_l el área ocupada por los valles con aceite;

$A_c + A_l = A$

S_c es la fracción del área total en contacto; $S_c = A_c/A$

S_l es la fracción del área total ocupada por bolsas de lubricante (valles). Obviamente, debe cumplirse siempre que $S_c + S_l = 1$

La expresión anterior (2) permite justificar la contribución de S_c al incremento de los valores del coeficiente de fricción. Dado que τ_c es siempre claramente superior a τ_l , los incrementos en S_c van acompañados de un incremento paralelo en los valores de μ . Los coeficientes de fricción calculados para las capas de lubricación límite (BL) obtenidas a partir de aditivos grasos se encuentran en el rango de 0,04 a 0,10,

para presiones entre 10 y 100 Mpa. Para presiones del orden de 100 Mpa, la resistencia al corte de las capas τ_{bl} varía entre unos 4 y 10 Mpa. [20-23].

Los valores del coeficiente de fricción encontrados son, para el caso de las primeras pasadas, sólo ligeramente superiores a los característicos de la fricción en capas límite. El mantenimiento de valores estables de dicho valor, aún cuando cambian las condiciones de contacto (área real en contacto), para el caso de las bobinas OK, demuestra que el efecto más determinante se debe a la contribución de las capas límite. En las bobinas No OK, y empleando el mismo tipo de aceite, el comportamiento es diferente. En este caso el rápido crecimiento de Sc elimina los valles y deja la superficie rápidamente sin capacidad para seguir aportando aditivos a la zona de contacto, observándose un rápido incremento en los valores del coeficiente de fricción, que alcanza valores superiores a 0,20-0,25 en la tercera pasada.

En suma, puede afirmarse que la capacidad de la superficie para soportar presión normal y tensiones de cizalladura manteniendo al mismo tiempo una cierta cantidad de valles (no importa si son abiertos o cerrados) capaces de retener lubricante parece ser el factor crítico que determina el mantenimiento de valores bajos y estables del coeficiente de fricción en condiciones BL y que distingue a una topografía óptima desde el punto de vista de la embutición. En cualquier caso, en condiciones BL resulta fundamental disponer de aceites correctamente aditivados. En caso contrario, sólo los mecanismos de tipo HD pueden ser activos, y como hemos comprobado, su eficacia cuantitativa, frente a los efectos de las capas BL es despreciable.

5. CONCLUSIONES

El uso de ensayos de fricción plana bajo condiciones de lubricación límite ha permitido distinguir claramente los comportamientos reales observados durante la embutición, las diferencias entre bobinas que estampan correctamente y las que presentan fallos por fractura, asociados al rápido aumento de los valores de fricción con la matriz.

Las chapas de bobinas que fallan en la embutición real presentan mayores valores de la fracción de área en contacto Sc . El efecto negativo de altos valores de Sc parece estar asociado, fundamentalmente, al efecto de agotamiento de reservas de lubricante aditivado. No obstante, mayores valores de Sc determinan que todos los efectos de fricción asociados al contacto metal-metal se incrementan: mayor zona bajo efectos de dañado mecánico ("ploughing") y mayor zona donde pueden tener lugar efectos de adhesión con la matriz.

Los valores iniciales de determinados parámetros de la topografía superficial permiten distinguir la mayor o menor tendencia a dar altos valores de Sc . La curva de material portante muestra que las diferencias iniciales entre ambos grupos de bobinas se evidencia incluso tras la tercera pasada en el ensayo de fricción. Una topografía definida inicialmente por un elevado número de picos altos permite soportar la carga sin aplastamiento excesivo. Las bobinas buenas, para un tamaño idéntico de elementos, presentan menores valores de material portante, lo que implica necesariamente mayores tamaños de los valles.

6. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido realizado con apoyo financiero del Plan Nacional I+D+I 2000-2003. Proyecto: Investigación del comportamiento tribológico en la embutición de chapas recubiertas con cinc para automóviles y su optimización mediante lubricantes sólidos.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. R. Stribeck "Die wesentlichen eigenschaften der gleit- und rollenlager" *VDI-Zeitschrift* 46, 1341-1348, 1432-1438 and 1463-1470. (1902)
2. M.D. Hersey "On the laws of lubrication of journal bearings" *ASME trans.* 37, 167-202, (1915)
3. W.C. Emmens "The influence of surface roughness on friction" Proc. 15th IDDRG Biennial Conference. Dearnborn, p.63-70, (1988)
4. D.J. Schipper "Transitions in the lubrication of concentrated contacts" Ph.D. Thesis, University of Twente, Netherlands (1988)
5. R. Haar. "Friction in sheet metal forming. The influence of local contact conditions and deformation", Ph.D. Thesis, University of Twente. Netherlands. (1996).
6. J. Schey. "Tribology in metalworking". ASM p.79 (1983)
7. J. Scheers and C. de Mare. "Study of the frictional behaviour of steel sheet surfaces during deep drawing by use of design of experiments". 20th Bienn. Cong. IDDRG Brussels, Belgium (1998).
8. A.C. Carcel, C. Ferrer and M.A.Perez. "Alternative 2D surface topography parameters for optimising friction behaviour of zinc coated sheets". 22th Int. Cong. IDDRG Nagoya (Japan) May 2002.
9. K.C. Ludema. *Friction, Wear, Lubrication*. CRC Press, 10 (1996)
10. J. Schey and S.W. Watts. "Transient tribological phenomena in the drawbead simulation" SAE paper 9200634 (1992)
11. G. Dalton. "New friction model for sheet metalforming." SAE paper 2001010081, (2001)
12. A. Wihlborg and L. Gunnarson, "A frictional study of uncoated EBT steel sheets in a bending under tension friction test" *Wear* 237 (1) 129-136, (2000)
13. T. Nellemann, N. Bay and T. Wanheim. "Real area of contact and friction stress- The role of trapped lubricant", *Wear*, 43, 45-53. (1977)
14. A. Azushima, M. Tsubouchi, and H. Kudo. "Direct observation of lubricant behaviour under the micro PH-L at the interface between workpiece and die". *Adv. Tech. of Plasticity Vol 1* (1990)
15. L.M. Bernick, R.R. Hilsen and C.L. Wandrei, "Development of a quantitative sheet galling test", *Wear* (48)323,346 (1978).
16. D. Rault, and M. Etringer, "Sheet metal forming and energy conservation". ASM 97-114 (1976).
17. R.R. Hilsen, I.F.Hughes and D.T. Quinto. "Surface galling characteristics of a series of high strength cold rolled steels". Proc. 10th Bienn. Cong. IDDRG, Warwick, April (1978).
18. V. Samper and E. Felder "Frictional mechanism in uncoated and zinc coated steel sheet forming". Proc. 16th. Leeds-Lyon Symposium on Tribology. (1989)
19. J.D. Westeneng. "Modelling of contact and friction in deep drawing processes". Doct. Thesis. University of Twente (2001)
20. B.J. Briscoe and D. Tabor. "Rheology of thin organic films", *ASLE Transactions* 17(3): 158-165. (1973)
21. B.J. Briscoe and D.C. Evans. "The shear properties of Langmuir-Blodgett layers", Proc. R. Soc. London, Series A 380: 389-407 (1982)
22. R.S. Timsit and C.V. Pelow. "Shear strength and tribological properties of stearic acid films on glass and aluminium-coated glass". *Journal of Tribology* 114: 150-158 (1992)
23. J.M. Georges and D. Mazuyer, "Pressure effects on the shearing of a colloidal thin film". *Journal Physical Condensed Matter* 2: 9545-9550. (1991).

Recibido: 1.2.03

Aceptado: 30.11.03