



## COMPARACIÓN DE COEFICIENTES DE FRICCIÓN EN ENSAYOS TIPO INLAND SOBRE CHAPAS DE ACERO DESNUDAS Y RECUBIERTAS

A. O. LUCAIOLI<sup>1</sup>, J. W. INSAUSTI<sup>1</sup>, D. ZIEGLER<sup>1</sup>, L. IURMAN<sup>1</sup>, P. BENEDETTI<sup>2</sup>

Universidad Nacional del Sur

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería, Laboratorio de Metalurgia

<sup>2</sup>Departamento de Física

Avda. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, República Argentina

*(Recibido 2 de abril de 2004, para publicación 19 de julio de 2004)*

**Resumen** – Se comparan los coeficientes de fricción medidos en ensayos tipo INLAND, realizados sobre chapas de acero de bajo carbono desnudas y chapas similares recubiertas. Los valores medidos se analizan a la luz de los estados superficiales iniciales y de los regímenes de lubricación responsables de las fuerzas de conformado originadas y de la calidad superficial del producto obtenido.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de conformado de piezas metálicas tienen por objeto la elaboración de piezas con una determinada geometría, propiedades mecánicas adecuadas a su uso, y en muchos casos, un acabado superficial preestablecido. Para llevar a cabo estos procesos, se utiliza un herramental muchas veces costoso cuyas tolerancias dimensionales y rugosidad superficial están condicionadas por el desgaste que pueda sufrir al rozar el material que se deforma con dicho herramental.

Entran en juego, por otra parte, fuerzas y potencias que inciden en la productividad de los procesos.

En todos los parámetros enumerados, la fricción entre herramienta y material desempeña un rol de importancia variable, que adquiere características de decisiva en lo que concierne al acabado superficial del producto final.

En el caso específico de los procesos de conformado de chapas metálicas, la fricción y la lubricación deben ser tenidas muy en cuenta. Una lubricación efectiva puede disminuir la fricción entre chapa y la herramienta que la conforma, convirtiéndose en un factor decisivo para el éxito de la operación [1]. Una fricción elevada entre chapa y matriz puede incrementar las tensiones actuantes sobre el material que se embute, hasta eventualmente provocar la rotura del mismo. El régimen de lubricación actuante durante el proceso, por otra parte, afecta la calidad superficial del producto obtenido [2]. En este sentido, cabe consignar que en los procesos de trabajado de metales, los posibles regímenes de lubricación imperantes pueden ser lubricación límite o de borde, o lubricación mixta (límite e hidrodinámica). Influyen en el establecimiento de un régimen o de otro, diversos parámetros, entre los cuales se pueden mencionar la presión normal, la viscosidad del lubricante usado, y la velocidad relativa entre el material que se conforma y el herramental que lo procesa. Esto se pone de manifiesto en la conocida curva de Stribeck [3].

En las operaciones de estampado de chapas metálicas aparecen fenómenos de fricción deslizante que se ubican, según los parámetros de la operación, entre la región límite y la mixta de la curva de Stribeck.

Cuando el lubricante utilizado para conformar la chapa no es capaz de evitar el contacto íntimo entre ésta y la herramienta, se producen daños superficiales conocidos como transferencia de metal (“pick-up”), rayado (“scoring”), o daño superficial severo con despegue de las soldaduras de asperezas producidas por el calor de fricción, “galling” en la terminología inglesa [4].

El ensayo INLAND surgió como respuesta a la necesidad de investigar el proceso de aparición de un daño severo (“galling”) en la chapa estampada. En el mismo, una probeta rectangular de aproximadamen-

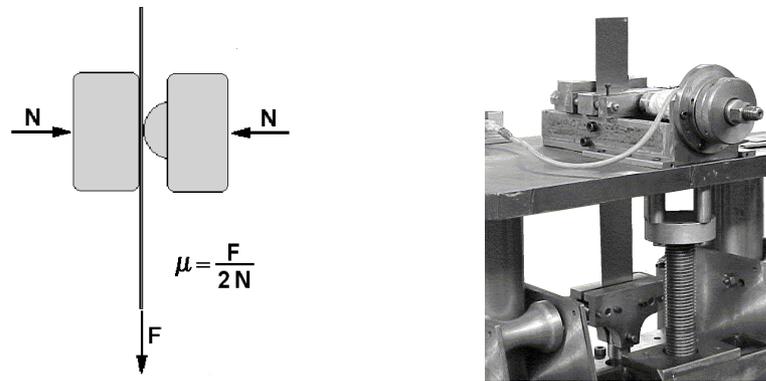


Fig. 1. Esquema y equipo de Ensayo de fricción.

te 50 mm de ancho y 300 mm de longitud es obligada a deslizarse entre dos mordazas que la presionan, una plana y la otra de perfil cilíndrico [5]. En el diseño de este ensayo, sus propulsores trataron de reproducir las condiciones habituales en operaciones de estampado, o sea:

- Velocidades relativas de deslizamiento chapa-matriz: entre 5 y 25 cm/s.
- Presiones normales sobre el material que se conforma: entre 55 y 140 MPa.

La compañía RENAULT propuso en 1991, en forma de recomendación, una variante de este ensayo, para evaluar el comportamiento de lubricantes, o el daño que puede sufrir una chapa metálica cuando es ensayada de este modo [6]. En la Fig. 1 se muestra el esquema del ensayo de fricción tipo INLAND y el equipo utilizado en los trabajos descritos en este artículo.

Cabe destacar que en la recomendación RENAULT se definen, entre otros parámetros para realizar el ensayo, el radio de la herramienta cilíndrica (10 mm en lugar de 25,4 propuestos por los autores del ensayo INLAND), la presión sobre la chapa (500 daN), y la velocidad de deslizamiento (20 mm/min, mucho menor que en el INLAND original). Las modificaciones introducidas por RENAULT hacen que este ensayo se lleve a cabo en condiciones más severas de régimen de lubricación que el originalmente propuesto. Ello se debe a que el menor radio de la mordaza cilíndrica aumenta la presión específica de contacto con la chapa, y la menor velocidad de deslizamiento aumenta la posibilidad de una lubricación límite en lugar de establecer un régimen mixto.

En los últimos años, se ha intensificado el uso de chapas de acero recubiertas por electrogalvanizado, tanto en la industria automotriz como en la de productos electrodomésticos. El objetivo de este incremento es aprovechar las propiedades protectoras contra la corrosión, del cinc sobre el acero. El uso de estos materiales requiere que los mismos sean compatibles con las operaciones de manufactura, que incluyen el conformado, la soldadura y la pintura [7].

Uno de los problemas comunes en el conformado de chapas metálicas es el posible daño superficial (“galling”), que podría trasladarse a la herramienta. El uso de chapas recubiertas trajo problemas nuevos vinculados con el recubrimiento y su interacción con el herramental y con los lubricantes [8]. La superficie del material más duro de la herramienta entra en contacto con las asperezas del recubrimiento blando del cinc y las deforma. Estas interacciones resultan en fricción, adherencia y desgaste. Se ha encontrado que las interacciones mencionadas dependen, entre otras variables, de la orientación cristalina y del tamaño de grano del recubrimiento [9, 10]. Esta circunstancia es de mucho interés para los fabricantes de chapas recubiertas, debido a que tanto la orientación cristalina como el tamaño de grano del recubrimiento se pueden regular, dentro de ciertos límites, controlando variables del proceso de recubrimiento tales como corriente y composición química del baño de galvanizado.

Existe una serie de ensayos para evaluar y tratar de predecir el comportamiento tribológico de las chapas, tanto desnudas como recubiertas, durante el conformado [11]. Uno de los ensayos posibles es el tipo INLAND, usado en el presente trabajo. Existen otros ensayos, llamados simulativos, que tratan de reproducir las condiciones del estampado industrial. Ejemplos de ensayos simulativos son los conocidos como

Tabla 1. Características de las chapas sin recubrimiento ensayadas.

Chapa	Espesor [mm]	Dureza HV5	Tamaño de grano ASTM	R <sub>a</sub> ±0,1 [μm]	R <sub>t</sub> ±1,1 [μm]
A	0,97	93,4	7 – 8	1,14	9,4
B	0,91	93,4	6	0,89	7

Tabla 2. Características de las chapas recubiertas ensayadas.

	CHAPA		
	08 Alta exigencia superficial. Muy alta embutibilidad	71 Exigencia superficial estándar. Muy alta embutibilidad.	35 Exigencia superficial estándar. Alta embutibilidad.
Tipo de recubrimiento	Orgánico sobre electrocincado.	Electrocincado	Electrocincado
Espesor de chapa [mm]	0,77	0,87	0,71
Espesor de recubrimiento [μm]	9 (ambas caras)	9 (ambas caras)	7.5 (ambas caras)
R <sub>a</sub> [μm]	1,70±0,02	1,23±0,02	1,30±0,02
R <sub>t</sub> [μm]	12,7±0,4	10,8±0,4	9,0±0,2
Densidad de crestas [crestas/pulg.]	94	67	87
Microdureza superficial [HV(107grf)]	39±2	39±2	40±4

SWIFT, ERICHSEN, FUKUI, etc. En los mismos, el comportamiento tribológico chapa-matriz es un ingrediente más en la elaboración del ensayo y en el análisis de los resultados obtenidos.

Además de las posibles variaciones en los coeficientes de fricción que se puedan tener entre las chapas de acero desnudas y las recubiertas, en estas últimas existe una mayor facilidad de desprendimiento de partículas del recubrimiento, más blandas, que al quedar depositadas sobre el herramental, provocan daños superficiales en las chapas que se estampen a continuación.

La problemática reseñada pone de manifiesto la conveniencia de estudiar y comparar los comportamientos tribológicos de chapas de acero con y sin recubrimiento. Es lo que se hace en el presente trabajo en lo que respecta al coeficiente de fricción.

## 2. EXPERIENCIAS REALIZADAS

Las determinaciones de los coeficientes de fricción se llevaron a cabo en las condiciones recomendadas por la Cía. RENAULT, ya indicadas, sobre chapas de acero de bajo carbono sin recubrir y recubiertas por electrogalvanizado.

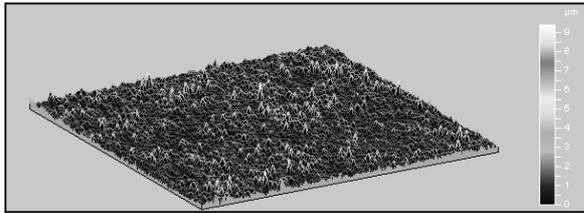
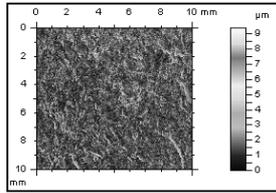


Fig. 2. Topografía de chapa A.

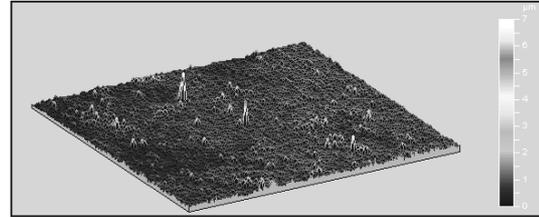
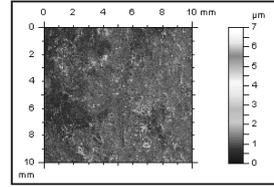


Fig. 3. Topografía de chapa B.

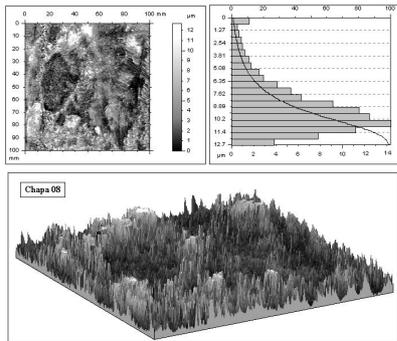


Fig. 4. Topografía chapa 08.

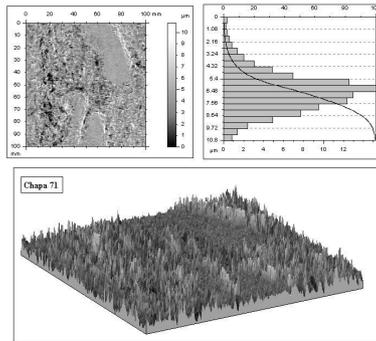


Fig. 5. Topografía chapa 71.

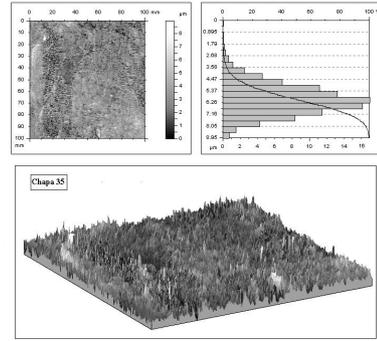


Fig. 6. Topografía chapa 35.

Se usó un equipo de ensayo de fricción tipo INLAND, diseñado y construido en el Laboratorio de Metalurgia de la Universidad Nacional del Sur [12]. Los ensayos se llevaron a cabo sobre las chapas que se indican en las Tablas 1 y 2.

Las características superficiales de las chapas, antes de ser ensayadas, fueron determinadas con un rugosímetro de palpador inductivo marca Rank Taylor Hobson modelo Talysurf 4 con longitud de “cut-off” de 0,8 mm. Los datos de rugosimetría fueron completados con observación visual de superficies y análisis metalográfico con microscopía electrónica de barrido y analizador de imágenes.

Las Fig. 2, 3, 4, 5 y 6 muestran las topografías superficiales iniciales de las chapas ensayadas, obtenidas mediante análisis de imágenes de microscopio electrónico de barrido (SEM) JEOL-JSM-3SCF operado a 15 KV y emisión de electrones secundarios, tratadas con analizador de imágenes Mountains Map Universal.

En las Fig. 7 a, b y c se muestran los difractogramas de los recubrimientos de las chapas 08, 71 y 35 respectivamente, llevados a cabo con equipo Rigaku Demki D/max-IIIc computarizado. Se observa que para la chapa 08 es dominante el plano basal (0002), mientras que los planos bipiramidales  $(10\bar{1}1)$ ,  $(10\bar{1}2)$ ,  $(10\bar{1}3)$  y  $(11\bar{2}2)$ , y los prismáticos  $(10\bar{1}0)$  y  $(11\bar{2}0)$ , se presentan subordinados. En el difractograma de la chapa 35 la intensidad del plano basal ha disminuido considerablemente, mientras que las correspondientes a los planos bipiramidales y prismáticos han aumentado. El comportamiento de la chapa 71 es similar a ésta.

Como lubricante se utilizó un aceite PRELUBE, con el que las chapas son protegidas contra la oxidación después del proceso de laminación y que al mismo tiempo garantiza una mínima lubricación en los

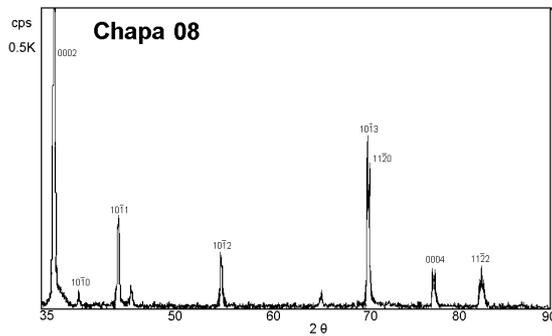


Fig. 7.a. Diffractograma recubrimiento chapa 08.

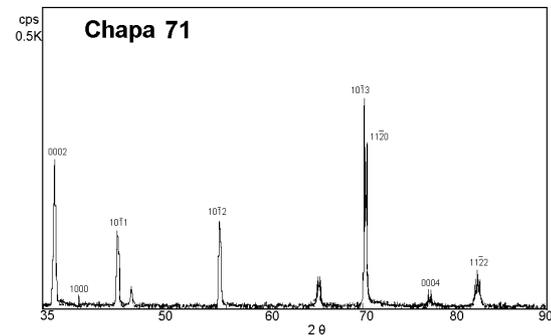


Fig. 7.b. Diffractograma recubrimiento chapa 71.

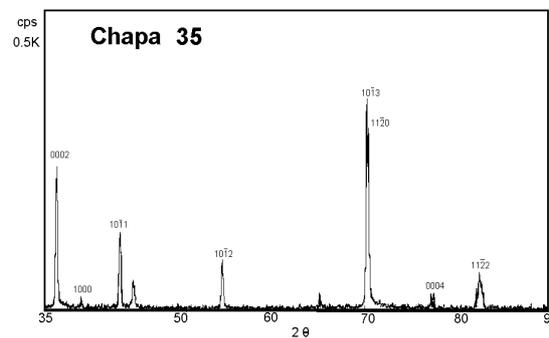


Fig. 7.c. Diffractograma recubrimiento chapa 35.

procesos posteriores de conformado de la chapa. Es un aceite mineral con aditivos anticorrosivos, cuya densidad a 15°C es de 0,88 gr/ml, y la viscosidad, 26 cSt, medida a 40 °C.

Se cortaron probetas de 50 mm de ancho y aproximadamente 400 mm de longitud. Las carreras de deslizamiento fueron del orden de 60 mm de recorrido tomándose los valores necesarios para calcular el coeficiente de fricción a los 50 mm, o sea en estado estacionario.

Antes de ser ensayadas, las chapas se desengrasaron en un baño de tetracloruro de carbono, sometido a vibraciones por ultrasonido durante 20 minutos, lubricadas y puestas a escurrir en un ambiente libre de polvos durante 24 horas.

### 3. RESULTADOS OBTENIDOS

#### 3.1. Curvas fuerza de arrastre - tiempo

En las Fig. 8, 9, 10, 11 y 12 se muestran las curvas de fuerza de arrastre en función del tiempo, en ensayos realizados a baja velocidad (20 mm/min).

#### 3.2. Coeficientes de fricción

En la Tabla 3 se consignan los coeficientes de fricción obtenidos en las diferentes chapas a baja y alta velocidad (aproximadamente un orden de magnitud mayores, 280 mm/min en las chapas A y B, y 370 mm/min en las recubiertas).

### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los valores de coeficientes de fricción consignados en la Tabla 3 muestran que, para las condiciones ensayadas:

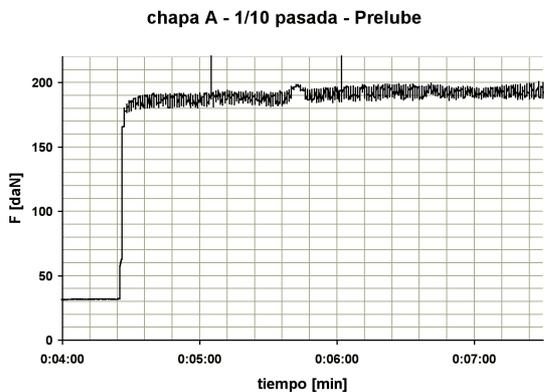


Fig. 8. Curva fuerza de arrastre – tiempo, chapa A.

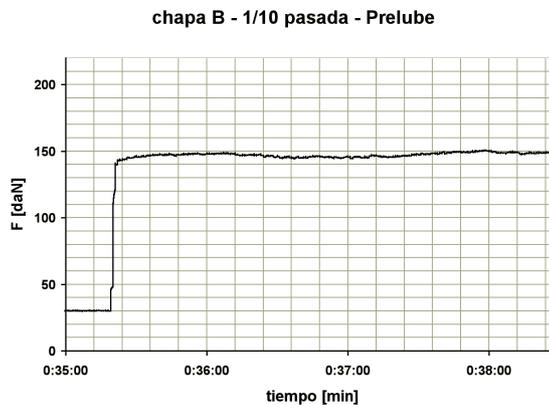


Fig. 9. Curva fuerza de arrastre – tiempo, chapa B.

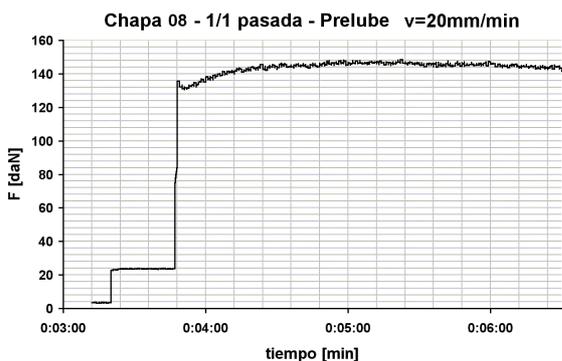


Fig. 10. Curva fuerza de arrastre – tiempo, chapa 08.

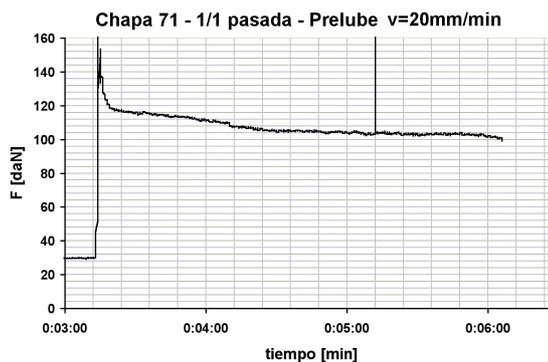


Fig. 11. Curva fuerza de arrastre – tiempo, chapa 71.

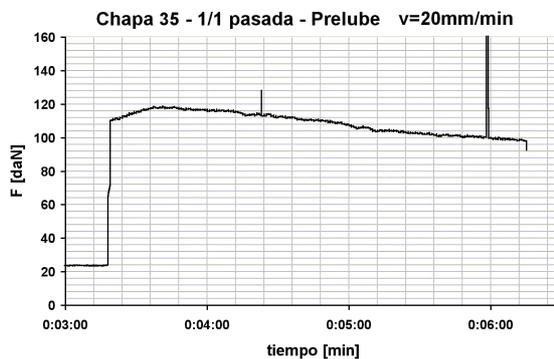


Fig. 12. Curva fuerza de arrastre – tiempo, chapa 35.

Tabla 3. Valores de coeficientes de fricción.

Chapa	A	B	08	71	35
$\mu$ baja velocidad	0,19	0,15	0,14	0,10	0,10
$\mu$ alta velocidad	0,16	0,16	0,13	0,09	0,09

- a) La fricción es más elevada en las chapas que no poseen recubrimiento de electrocincado.
- b) Dentro de las chapas no recubiertas, la muestra A exhibe un coeficiente de fricción más alto que la B, cuando el deslizamiento se produce a baja velocidad. Esto se puede atribuir a las diferentes características superficiales de las chapas. En efecto, la chapa A tiene una mayor rugosidad expresada por el valor  $R_a$ , y diferencias entre crestas y valles más pronunciadas (ver los valores de  $R_t$ ). El lubricante utilizado, de baja viscosidad, es probable que no alcance a separar eficazmente las superficies en contacto, y que se produzca una importante deformación plástica de crestas. Este efecto parece ser menor en la chapa B. Por los valores de coeficientes de fricción, encontrados, actúa un régimen de lubricación límite. La Fig. 8 muestra que, en este caso, hubo un evidente fenómeno de adherencia-deslizamiento (“stick-slip”).
- c) En las chapas recubiertas, la 08 presenta un valor más alto del coeficiente de fricción que las dos restantes. Una explicación posible es que en este tipo de recubrimientos, capas depositadas con planos basales paralelos a la superficie de las chapas darían lugar a valores mayores de fricción, al aumentar el contacto entre recubrimiento y herramienta [9]. Otra explicación posible para esta diferencia en los coeficientes de fricción es la relación entre la densidad de asperezas y la rugosidad  $R_a$ . Se ha encontrado [7] que la densidad de crestas por encima de  $1,25 \mu\text{m}$  ( $50 \mu\text{pulgadas}$ ) por pulgada de longitud se relaciona con la rugosidad  $R_a$  en condiciones de mínima fricción, mediante la relación empírica  $[\text{PD a } 50 \mu\text{pulgadas}] = 5,3 \cdot R_a - 104$ , donde el primer miembro representa la densidad de crestas por encima de  $50 \mu\text{pulgadas}$  por pulgada de longitud, halladas en los registros, y el segundo miembro, la densidad mínima de crestas.  $R_a$  también se expresa en  $\mu\text{pulgadas}$ . La Tabla 4 muestra los resultados de esta relación calculada sobre varios registros de rugosímetro de las chapas estudiadas. Como se puede ver, la peor relación se da en la chapa 08. Se justificaría de este modo el valor mayor del coeficiente de fricción obtenido en la chapa 08
- d) Salvo en la chapa A, no existen variaciones significativas en los coeficientes de fricción provocadas por el incremento en la velocidad de deslizamiento. La poca viscosidad del lubricante utilizado puede ser la explicación de la casi constancia de los valores de coeficientes de fricción a velocidades mayores de deslizamiento de la chapa. La disminución observada en la chapa A probablemente se deba a que su mayor rugosidad hace que existan bolsones de lubricante que al aumentar la velocidad de deslizamiento incrementarían la componente hidrodinámica de fricción. Éste es, de todos modos, un punto que necesita ser profundizado.

## 5. CONCLUSIONES

Los ensayos llevados a cabo pusieron de manifiesto la relación existente entre la calidad superficial de las chapas a ser conformadas y el coeficiente de fricción entre chapa y herramental. Quedan evidenciadas las diferencias de comportamiento entre chapas sin recubrir y chapas electrogalvanizadas. En estas últimas, se pudo apreciar la influencia del tipo de recubrimiento en el coeficiente de fricción exhibido en este

Tabla 4. Densidad mínima de crestas y halladas en los registros de rugosimetría.

Chapa	Densidad mínima de crestas	Densidad de crestas halladas en los registros
08	124	115, 82, 94
71	61	67, 67, 58
35	71	67, 87

tipo de ensayos, tanto en lo que respecta a la orientación cristalina del depósito como a la rugosidad superficial.

La poca viscosidad del aceite empleado, cuya función específica es más la de proteger las chapas contra la corrosión que servir como lubricante en el conformado, se estima es la causa de la poca incidencia de la velocidad de deslizamiento en los coeficientes de fricción obtenidos.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el estudio de difracción realizado por los docentes del Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur, doctores Leandro Bengochea y Graciela Mas.

## REFERENCIAS

- [1] W. R. D. Wilson, "Friction and Lubrication in Sheet Metal Forming, Mechanics of Sheet Metal Forming-Material Behavior and Deformation Analysis", Ed. Donald P. Koistinen y Neng-Ming Wang, Plenum Press, N. York, 157-177 (1978).
- [2] L. Iurman, N. Mazini, J. W. Insausti, A. O. Lucaioli, P. Benedetti, D. Ziegler, "Efecto del régimen de lubricación sobre la calidad superficial de piezas embutidas", Anales IV Congreso Internacional de Materiales, 230-241, Saltillo, México, (1997).
- [3] H. S. Cheng, "Lubrication Regimes", en ASM Handbook, Vol. 18, 89-97 (1996).
- [4] L. M. Bernick, R. R. Hilsen, C. L. Wandrei, "Development of a Quantitative Sheet Galling Test", Sheet Metal Ind., 827-833 (1978).
- [5] L. Bernick., R. R. Hilsen, C. L. Wandrei, "Development of a Quantitative Sheet Galling Test", Wear, 48, 323-346 (1978).
- [6] Régie Nationale des Usines Renault. Methode d'Essai D31 1738, Tôles Aptitude au Glissement, (1991).
- [7] J. H. Lindsay, "Coated Sheet Steel in the Automotive Industry", Galvatech '95 Conference Proceedings, 579-588 (1995).
- [8] B. Danby, P. Vankeleffe, S. Feron, "An original equipment to study the interactions between the coatings, the tools and the lubricants during deep drawing operations of coated steel sheets", Galvatech '95 Conference Proceedings, 717-722 (1995).
- [9] J. H. Lindsay, R. F. Paluch, H. D. Nine, V. R. Miller, T. J. O'Keefe, "The Interaction Between Electroplated Zinc Deposit Structure and The Forming Properties of Sheet Steel", Plating and Surface Finishing, 62-69 (1989).
- [10] J. W. Insausti, L. Iurman, A. O. Lucaioli, D. Ziegler, P. Benedetti, P. Traversa, J. P. Pedraza, "Comportamiento tribológico en el embutido de chapas de acero recubiertas". I Conference on Uses of Steel, 173-182, Instituto Argentino de Siderurgia. San Nicolás. Rep. Argentina. (2002).
- [11] J. P. Harriff, T. A. Hylton, C. J. Van Tine, D. K. Matlack, "Frictional Response of Electroplated Sheet Steels" The Physical Metallurgy of Zinc Coated Steel, Ed. A. R. Marden, The Minerals, Metals and Materials Society, 295-307 (1993).
- [12] A. O. Lucaioli, L. Iurman, G. Bergé, D. Ziegler, J. W. Insausti, "Diseño y construcción de una máquina de fricción y desgaste para chapas metálicas". V CIDIM, 1401-1408, Mérida, Venezuela, (2001).

## COMPARISON OF FRICTION COEFFICIENTS IN TYPE INLAND TESTS ON STEEL SHEETS BARED AND COATED

**Abstract** – The friction coefficients are compared, as measured in type INLAND tests, carried out on low carbon steel sheets bared and coated. The measured values are analyzed taking into consideration the initial surfaces and the possible lubrication regimes, responsible for the originated forming forces and the surface quality of the final product.