

Estudio del desgaste de chapas de acero con herramienta plana y semicilíndrica bajo diferentes regímenes de lubricación

Study of wear on steel sheets tested with plain and semicylindric tools under different lubrication regimes

L. Iurman, A. Lucaioli, J. W. Insausti, D. Ziegler
Departamento de Ingeniería. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. Argentina
sam@criba.edu.ar
insausti@criba.edu.ar

P. Benedetti, P. Traversa
Departamento de Física. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. Argentina

Resumen

El desgaste adhesivo por deslizamiento puede constituir un serio problema en chapas estampadas en frío. Cabe destacar que los fenómenos de desgaste están en pleno proceso de estudio y cuantificación, dado que las variables que intervienen son numerosas. Existen ensayos normalizados para estudiar este fenómeno, con diferentes geometrías de herramienta. En el presente trabajo se describen los ensayos llevados a cabo en una máquina diseñada y construida en el laboratorio, siguiendo las recomendaciones contenidas en la especificación D31 1738/-A de la Cía. Renault. Los ensayos se realizaron utilizando diferentes regímenes de lubricación. Se compararon los resultados obtenidos en cada caso. Las superficies fueron analizadas con rugosímetros eléctricos y microscopía electrónica complementada con analizadores de imágenes.

Palabras claves: Fricción, lubricación, desgaste, chapas de acero, ensayos.

Abstract

The adhesive wear due to slip may constitute a serious problem in cold deep drawn sheets. It is worthwhile to point out that the wear phenomena are still in process of research and quantification, because the incident variables are numerous. There are normalized tests to study this process, with different tool geometries. In the present paper the tests carried out in a device projected and built up in our laboratory are described, following the recommendations contained in D31 1738/-A Renault specification. The tests have been carried out with different lubrication regimes. The results obtained in each case have been compared. The surfaces have been analyzed with electric roughmeters and scanning electron microscopy completed with image analyzers.

Key words: Friction, lubrication, wear, steel sheets, tests.

1 Introducción

En las operaciones de conformado de chapas pueden establecerse diferentes regímenes de lubricación, según la naturaleza de la capa fluida usada como lubricante y las características superficiales de las chapas (Cheng, 1992).

El régimen de lubricación actuante durante el proceso tiene importancia tecnológica por cuanto incide en los siguientes aspectos fundamentales:

- Influye en las fuerzas puestas en juego durante el proceso, y por lo tanto en el costo de la energía insumida, o bien incluso en el éxito o el fracaso de la operación. Esto último se debe a que con fricciones elevadas, las fuerzas desarrolladas pueden llevar a la rotura de la chapa.
- Incide en el acabado superficial del producto elaborado. En este sentido, una completa separación entre material y herramienta dará lugar a una superficie final de aspecto mate. Un régimen de lubricación que implique un contacto íntimo entre herramienta y material, por otra

parte, hará que la herramienta pule la superficie del material, con riesgos de daños por rayado y/o adherencias localizadas ("galling") (Schey, 1970).

- Permite la creación de bases de datos tribológicos para diseñar procesos utilizando simulaciones numéricas.

Para evaluar el régimen de lubricación imperante en un proceso de conformado de chapas, existen varias alternativas. Una de ellas es medir el coeficiente de fricción. Otra consiste en analizar la superficie resultante. Bajos coeficientes de fricción son índice de lubricación mixta o hidrodinámica (Betzalel Avitzur, 1992). La relación entre superficie opaca y superficie pulida luego del conformado, indica por otra parte la presencia de zonas con lubricación límite y zonas con lubricación fluidodinámica (Iurman et al, 1997).

Uno de los ensayos propuestos para el estudio de las condiciones de fricción y de posibles daños superficiales sobre las chapas durante su conformado, es el denominado "ensayo Inland" (Bernick et al. 1978).

1.1 Ensayo Inland

Una probeta de chapa rectangular es apretada entre una herramienta plana y una cilíndrica de 25 mm de radio, con una fuerza normal N . Se aplica entonces una fuerza de tracción F para deslizar la chapa entre las dos herramientas, a una velocidad constante.

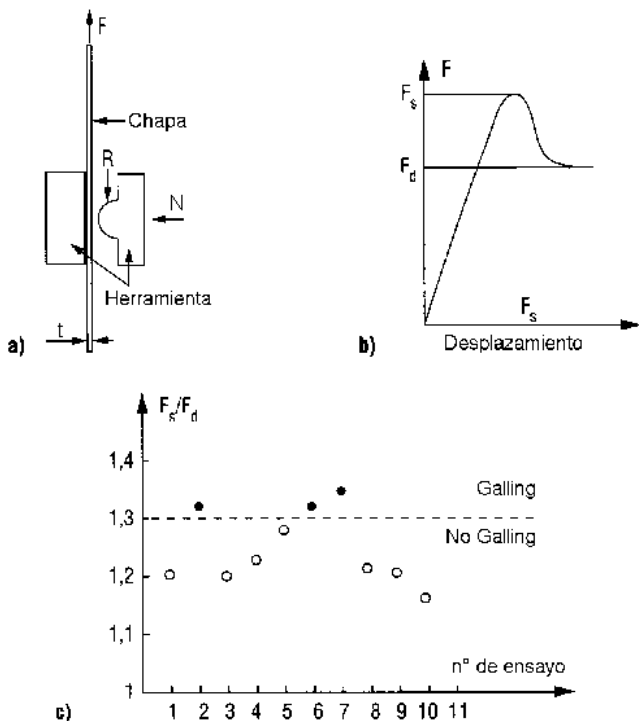


Fig. 1. El ensayo Inland. a) Geometría, b) variación de la fuerza de roce al comienzo del ensayo, c) Relación entre el cociente de las fuerzas de roce y el "Galling" para diferentes presiones de contacto.

Mediante este ensayo se puede determinar:

- El coeficiente de roce (Delamare y Felder, 1996).

$$\mu = \frac{F}{2N} \quad (1)$$

- El desgaste que sufre la chapa por pasadas sucesivas. (Cárcel et al, 1997).
- La posibilidad de daño superficial ("galling") en la chapa, motivado por el roce contra la herramienta.

En este sentido, los promotores del ensayo indican que en general, la fuerza de tracción experimenta una caída cuando la chapa empieza a deslizar, como se muestra en la Fig. 1.

En las condiciones en que realizaron sus experiencias los promotores del ensayo, cuando la fuerza dinámica supera en más del 30 % a la estática, es probable que se produzca daño superficial en la chapa. (Bernick et al. 1978).

Como se puede ver, el ensayo Inland brinda información que puede ser muy valiosa para la selección de lubricantes o de acabados superficiales de chapas usadas en piezas que deban estamparse.

1.2 Ensayo Renault

Es similar al ensayo Inland, en el que se ha modificado el radio de la herramienta cilíndrica, que pasa a ser de 10 mm, y se fijan la carga normal en 500 daN y la velocidad de desplazamiento de la chapa, que debe ser de 20 mm/min. (Renault, 1991).

En el Laboratorio de Metalurgia de la Universidad Nacional del Sur se diseñó y construyó una máquina de ensayos tipo Inland, para cubrir las especificaciones de ensayo prescritas por la empresa Renault (Renault, 1991, Lucaioli et al, 2001).

Se trata de una máquina electromecánica, accionada por un motor de corriente continua de velocidad variable, con un reductor que permite ajustar las velocidades de desplazamiento del carro que ejerce la fuerza F sobre la probeta.

El mecanismo seleccionado asegura una velocidad constante de arrastre de la probeta.

La máquina tiene una disposición vertical que permite una mejor alineación de la probeta con la fuerza de arrastre. Con este mismo objetivo se diseñó un bastidor muy robusto y un mecanismo de guiado del carro de desplazamiento de la probeta, formado por cuatro rodillos que se desplazan sobre columnas circulares.

Tanto la fuerza normal sobre la probeta, como la de arrastre de la misma, se miden por medio de celdas de carga construidas con extensómetros eléctricos de resistencia, que trabajan por tracción.

En la Fig. 2 se ve un detalle de la máquina con la probeta que se está ensayando.

2 Experiencias realizadas

2.1 Materiales ensayados

Se hicieron ensayos de fricción y desgaste sobre dos chapas de acero de bajo contenido de carbono, cuyas características se detallan en la Tabla I.

Ambas chapas tienen terminación superficial semimate, que se caracteriza por una rugosidad R_a comprendida entre 0,52 y 1,5 μm . La chapa "A" tiene aspecto superficial SP (Superficie estándar que puede aceptar determinadas imperfecciones), mientras que la "B" es de aspecto definido como AB (Superficie exenta de imperfecciones que afecten el aspecto uniforme del recubrimiento posterior).

2.2 Lubricación empleada

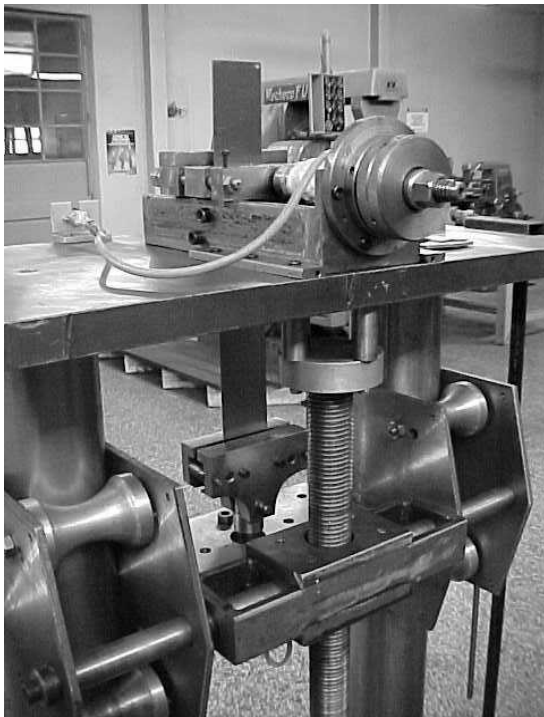
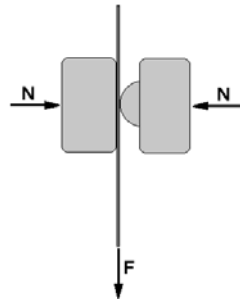


Fig. 2. Detalle de montaje y fotografía de ensayo.

Se usaron tres condiciones de lubricación:

- Con polietileno.
- Con aceite TSD 996.
- Sin lubricante

El polietileno usado fue de 40 micrones de espesor, colocado sobre ambas caras de la chapa.

El aceite TSD es el recomendado para los ensayos Swift de acopado (Kemmis, 1957). Se trata de un aceite muy viscoso con aditivos.

2.3 Técnica de ensayo

Siguiendo las recomendaciones de la especificación Renault (Renault, 1991), se cortaron probetas de 50 mm de ancho y aproximadamente 400 mm de largo, para poder realizar varias carreras de arrastre entre mordazas del orden de 60 mm cada una. Las probetas fueron desengrasadas en un baño de tetracloruro de carbono mediante aplicación de ultrasonido durante 10 minutos. Luego del desengrase, las probetas a ser aceitadas fueron sumergidas en el lubricante y dejadas escurrir durante 20 horas en un ambiente libre de polvos.

Tabla I. Características de las chapas ensayadas

	Chapa A	Chapa B
Espesor [mm]	0,97	0,91
Dureza HV5	93,4	93,4
Tamaño de grano ASTM	Entre 7 y 8	6
Rugosidad inicial R_a [μm] (Delante)	1.14	0.89
Rugosidad inicial R_a [μm] (Reverso)	1.2	0.82

Una vez apretada la chapa entre las mordazas plana y cilíndrica con una fuerza normal de 500 daN, se accionaba el carro de arrastre a una velocidad de 20 mm/min, con una carrera de aproximadamente 60 mm, midiendo la fuerza necesaria para hacer avanzar el carro. Para las dos chapas y las diferentes condiciones de lubricación, se hizo en primer lugar una pasada sobre una parte de la probeta, y luego varias pasadas sobre otra parte de la misma, sin volver a lubricar entre pasadas en este último caso.

Luego del ensayo se tomaron mediciones de rugosidad en las superficies afectadas, con un rugosímetro Prazis-03 con palpador piezoeléctrico. En las mediciones de rugosidad se utilizó una longitud de muestreo L de 4.80 mm, con un "cut off" de 0.80 mm.

Los parámetros de rugosidad medidos fueron (Mummery, 1990):

- Altura media aritmética, R_a .
- Promedio de las máximas distancias entre crestas y valles en cinco tramos de medición en que se divide la longitud

de muestreo, Rz.

- Distancia de la cresta más alta al valle más profundo en la longitud de muestreo, Rt.
- Distancia del valle más profundo a la cresta más alta que toma el mayor valor dentro de los cinco periodos del "cut-off" en que se divide la longitud de medición, Rm.

También se analizaron las superficies afectadas mediante microscopía electrónica de barrido

3 Resultados obtenidos

3.1 Coeficientes de fricción:

En la Fig. se muestran tres curvas de fuerzas de arrastre en función del tiempo, obtenidas en la chapa B con los diferentes sistemas de lubricación empleados.

Con los valores obtenidos en los ensayos, se calculan los coeficientes de roce mediante la Ec.(1), donde N es la fuerza normal igual a 500 daN aproximadamente.

Se aclara que N presentaba oscilaciones alrededor del valor inicial, a medida que se producía el desplazamiento de la probeta.

Las curvas mostradas en la Fig. 3 ponen en evidencia la dificultad de calcular la relación entre rozamiento estático y dinámico, en el inicio del desplazamiento de la probeta.

De todos modos, se calculó esta relación para la chapa A lubricada con polietileno y la B, con aceite y polietileno. Los valores obtenidos se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Relación entre coeficientes de fricción estáticos y dinámicos

	Chapa A		Chapa B
Lubricante	Polietileno	Polietileno	Aceite
F estática [daN]	31	30	137.5
F dinámica [daN]	27	24	106
Fest/Fdin	1.15	1.25	1.297
μ_{est}	0.075	0.072	0.275
μ_{din}	0.054	0.048	0.212

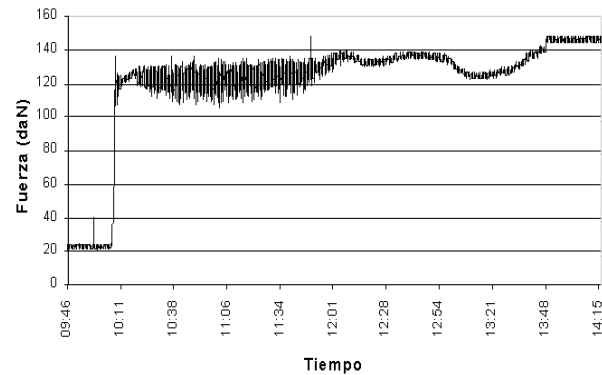
Los coeficientes de rozamiento dinámico se tomaron a los 50 mm de recorrido de la chapa, según lo indicado en la especificación Renault.

En la Fig. 4 se ven los valores de μ_{din} obtenidos en las sucesivas pasadas para las chapas A y B, con las diferentes condiciones de lubricación.

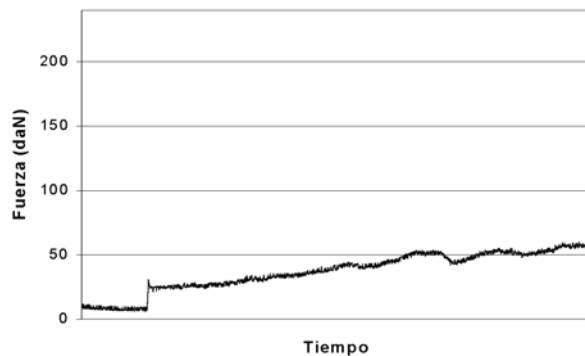
Hay que aclarar que en la condición de fricción en seco, o sea sin lubricante, en la chapa A se pudieron hacer solamente tres pasadas, y una en la chapa B, debido al daño superficial introducido tanto en la superficie de las chapas como en las herramientas.

3.2 Análisis de la rugosidad de las superficies de las chapas

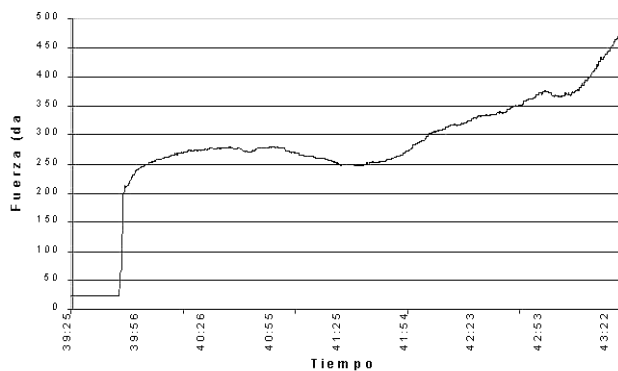
Después de los ensayos de fricción y desgaste, se analizaron las superficies de las chapas con un rugosímetro eléctrico Prazis. Se estudiaron las superficies resultantes de una o varias pasadas (diez para polietileno y aceite, y las que se pudieron llevar a cabo en seco), tanto en la cara enfrentada con la herramienta de perfil circular como la plana. Los resultados obtenidos constan en las Figs. 5 y 6.



a) Lubricada con aceite



b) Lubricada con polietileno



c) Sin lubricante

Fig. 3. Fuerzas de arrastre en función del tiempo

3.3 Estudio del estado superficial con microscopía electrónica de barrido

Se extrajeron muestras de las chapas ensayadas y se estudió su evolución superficial. Se utilizaron aumentos de 100x, 480x y 1000x. En las Figs. 7, 8, 9 y 10 se muestran algunas imágenes de superficie, representativas de los resultados obtenidos. Se tomó el aumento de 480x como más ilustrativo, dentro de la necesaria economía en la extensión de esta presentación.

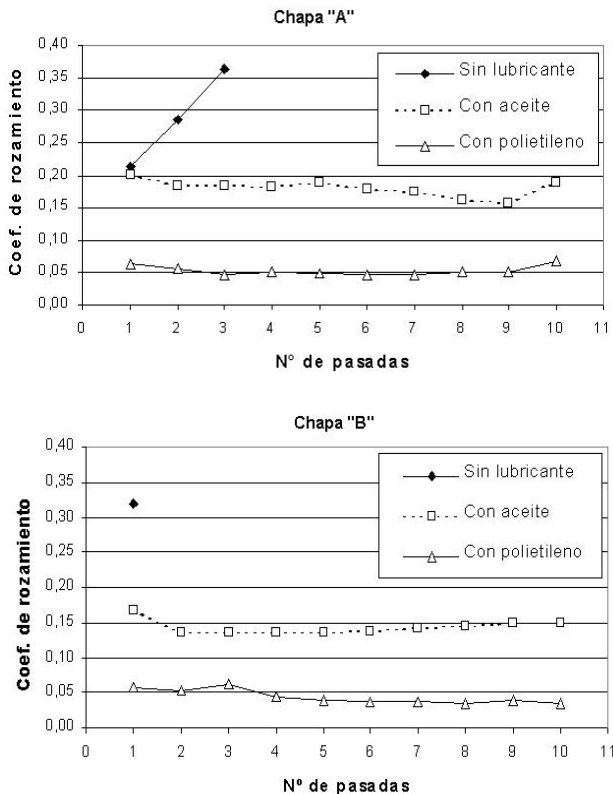


Fig. 4. Coeficientes de roce en función del número de pasadas.

4 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos son en general consistentes con datos existentes en la literatura específica y con predicciones teóricas sobre fricción y desgaste. Es conveniente, sin embargo, puntualizar algunos aspectos sobre los cuales será necesario profundizar los estudios iniciados con el equipo utilizado en este trabajo. Son los que se reseñan a continuación.

4.1 Coeficientes de rozamiento

Por problemas de oscilaciones en las curvas fuerzas de arrastre – tiempo en la lubricación con aceite y con polietileno, o por la forma de la curva en el caso de

ausencia de lubricante (ver figura 3), no resulta demasiado consistente la relación entre rozamiento estático y dinámico. Según los promotores del ensayo “Inland”, esa relación fue visible y repetitiva en sus experiencias solamente cuando pudieron aplicar la fuerza de arrastre con una velocidad de 500 daN/seg. En nuestro caso, la máxima velocidad alcanzada hasta ahora está en el orden de 150 daN/seg.

En cuanto a las oscilaciones en las curvas mostradas en la figura 3, en buena parte son debidas a fenómenos de adherencia-deslizamiento (“Stick-slip”) propios de esos regímenes de lubricación.

Los valores de coeficientes de rozamiento dinámicos para los diferentes regímenes de lubricación y las sucesivas pasadas, mostrados en la figura 4, son consistentes con valores similares reportados en la bibliografía consultada (Cárcel González et al, 1997, Culcasi y González, 1996).

4.2 Parámetros de rugosidad

El análisis de los datos exhibidos en las figuras 5 y 6 indica que en general se obtuvieron las menores rugosidades luego de diez pasadas con el aceite empleado.

En la chapa A, más gruesa y con una rugosidad inicial levemente mayor en el reverso, esa diferencia se mantuvo en mayor o menor grado en los regímenes de lubricación en que se empleó aceite y polietileno. Con la chapa sin lubricante, la rugosidad aumentó mucho más en la cara que enfrenta la matriz plana. El gran aumento experimentado en este caso no se puede adjudicar a la pequeña diferencia inicial.

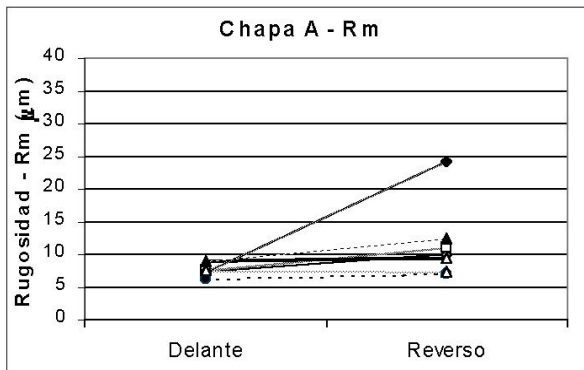
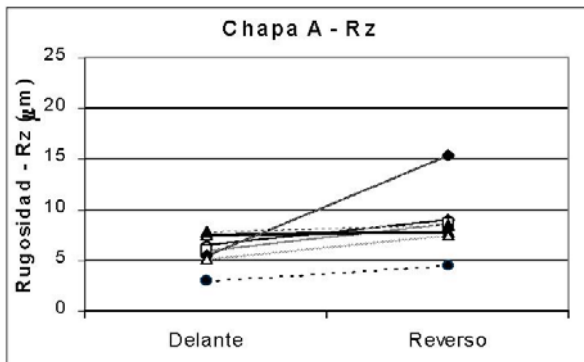
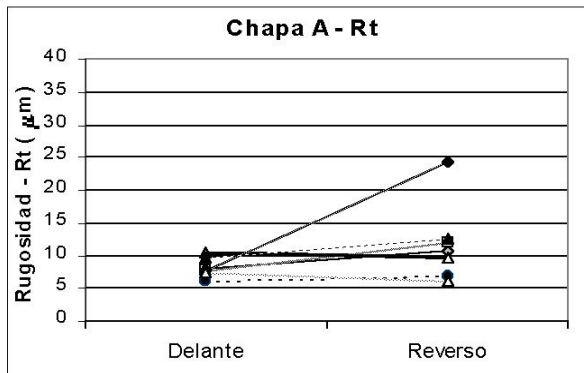
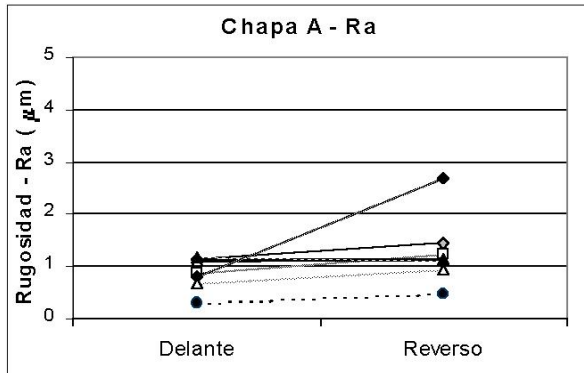
En la chapa B, más fina, y con rugosidad inicial sensiblemente igual en ambas caras, el comportamiento no fue tan simple. Hay un evidente gran aumento de la rugosidad en seco en la cara que enfrenta a la matriz plana, y en los otros regímenes, un comportamiento dispar entre la acción de la herramienta curva respecto a la plana.

De lo antedicho surge que, la posiblemente diferente acción de las herramientas plana y curva sobre la rugosidad final de la superficie de la chapa, debe ser estudiada con mayor profundidad.

No aparece, por otra parte, en las curvas de la figura 5 y 6 un parámetro de rugosidad que se vea más afectado que los otros por las pasadas realizadas, y que por lo tanto pueda ser tomado como referente del daño producido.

4.3 Aspecto superficial de las chapas

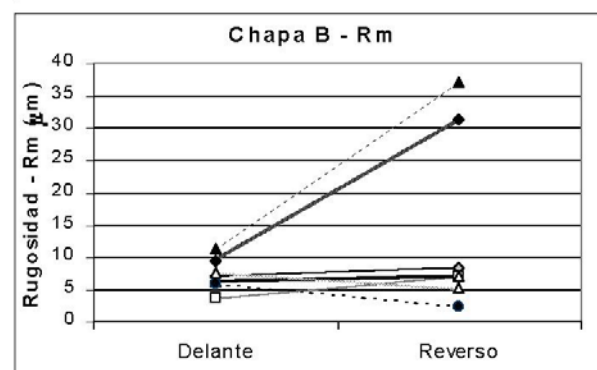
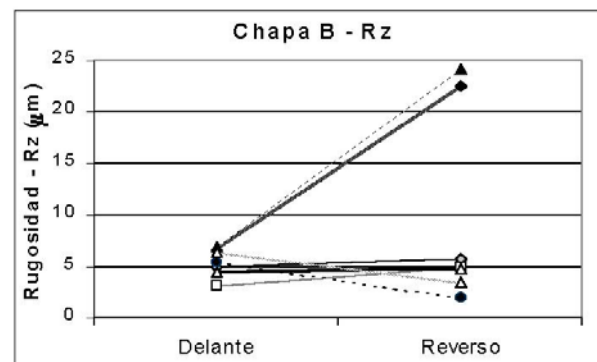
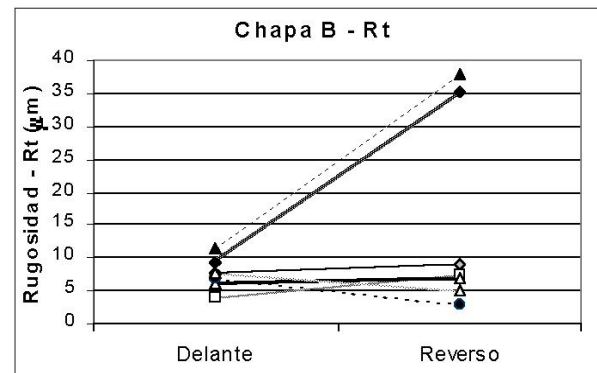
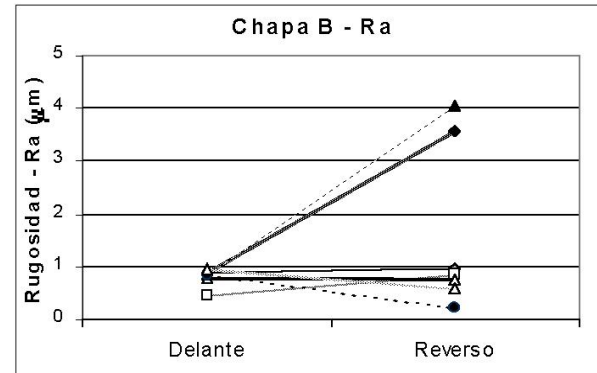
El análisis de las superficies mostró que, si bien el aceite y el polietileno dieron coeficientes de rozamiento relativamente bajos, no evitaron el rayado de las superficies. Este rayado es perceptible ya en la primera pasada con aceite, y en la superficie final luego de diez pasadas en la lubricación con polietileno. En este último caso, la rotura de la película de plástico en sucesivas pasadas se reputa como causa probable del daño superficial.



Delante: cara frente a herramienta circular
Reverso: Cara frente a herramienta plana

—●— Chapa sin ensayar -□- PE - 10 pda —▲— SECO - 3 pda ...◆... Aceite - 10 pda
—□- PE - 1 pda -▲- SECO 1 pda -△- Aceite 1 pda

Fig. 5. Parámetros de rugosidad de la chapa A, para diferentes condiciones de ensayo



Delante: cara frente a herramienta circular
Reverso: Cara frente a herramienta plana

—●— Chapa sin ensayar -□- PE - 10 pda —▲— SECO - 3 pda ...◆... Aceite - 10 pda
—□- PE - 1 pda -▲- SECO 1 pda -△- Aceite 1 pda

Fig. 6. Parámetros de rugosidad de la chapa B, para diferentes condiciones de ensayo

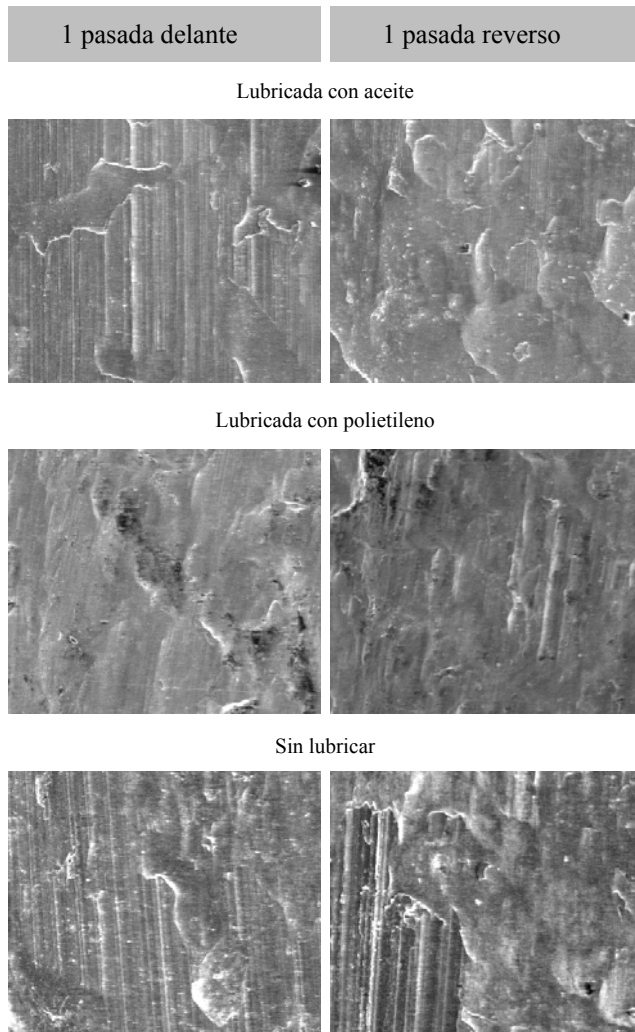


Fig. 7. Aspectos superficiales de las probetas ensayadas de la chapa A luego de una pasada.

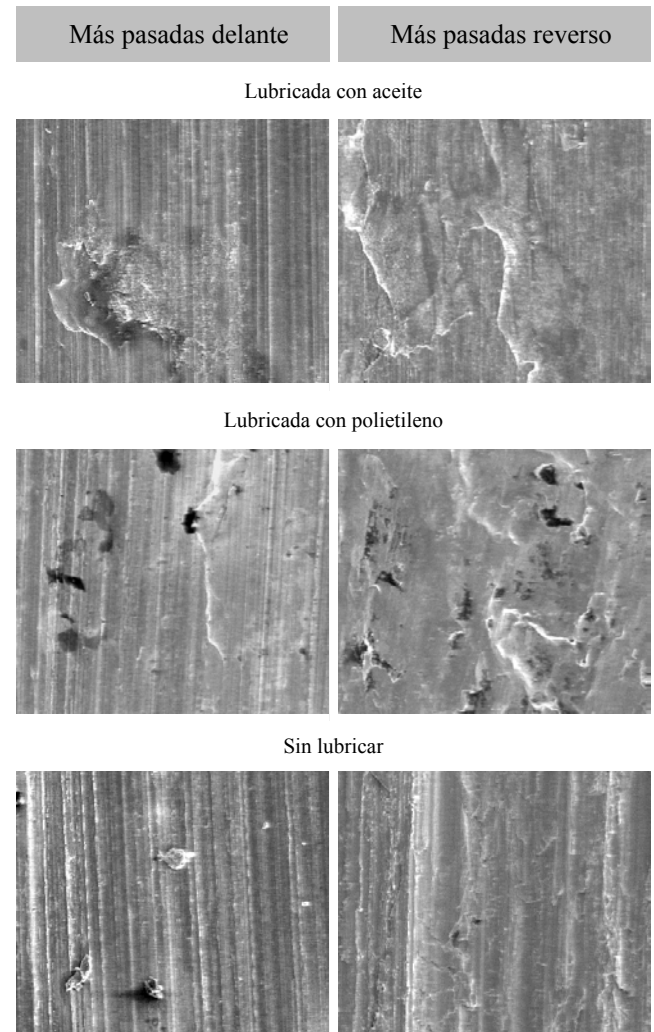


Fig. 8. Aspectos superficiales de las probetas ensayadas de la chapa A, luego de la última pasada.

Es notable que, pese a esta rotura, el coeficiente de roce permaneció en valores bajos.

En cuanto a la fricción en seco, el daño superficial era previsible, y evidencia todas las características de una deformación por esfuerzos de corte que dan lugar a ondulaciones irregulares superficiales, similares en aspecto a una cascarilla producida por oxidación (Hogmark et al, 1992).

5 Consideraciones generales

Hay que destacar que el ensayo recomendado por Renault impone condiciones más severas sobre la chapa que las previstas por los promotores del ensayo "Inland".

En efecto, en este último se trata de reproducir condiciones de presión normal sobre la probeta similares a las que ejercen los prensachapas en las operaciones industriales de estampado, que son del orden de $6-15 \text{ daN/mm}^2$. (Bernick et al, 1978)

En las pruebas descritas, las condiciones de apoyo de la herramienta con la chapa son de un cilindro de radio $R=10 \text{ mm}$ sobre un plano.

Supuesta una distribución hertziana de presiones, el semiancho de contacto viene dado por la ecuación:

$$b = \sqrt{\left\{ \frac{4 \cdot N \cdot R}{\pi \cdot l} \left[\left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \right) + \left(\frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right] \right\}} \quad (2)$$

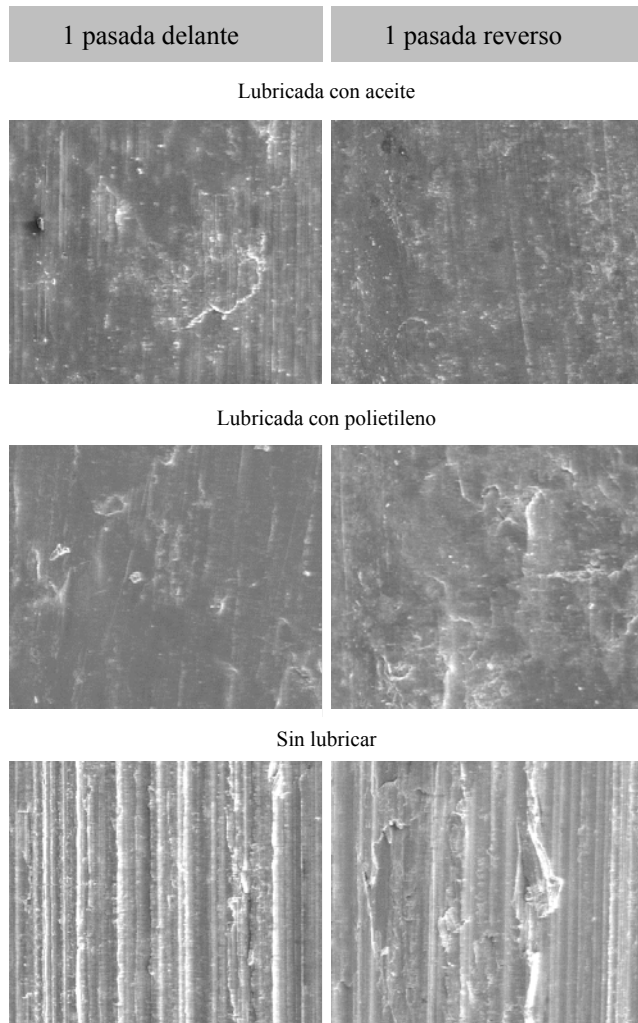


Fig. 9. Aspectos superficiales de las probetas ensayadas de la chapa B luego de una pasada.

donde: N = fuerza normal = 500 daN.
 R = radio del cilindro = 10 mm.
 l = longitud de contacto = 50 mm.
 ν_1, ν_2 = coeficientes de Poisson de los materiales en contacto = 0,30.
 E_1, E_2 = módulos de Young de los materiales en contacto 21000 daN/mm².

y la presión media resulta:

$$p_m = \frac{N}{2 \cdot b \cdot l} \quad (3)$$

Reemplazando los valores de las constantes elásticas del material (en este caso tanto el herramental como la probeta son de acero), de la fuerza normal aplicada y de las dimensiones geométricas del ensayo, se obtiene:

$$b = 0,104 \text{ mm}$$

$$p_m = 48 \text{ daN/mm}^2$$

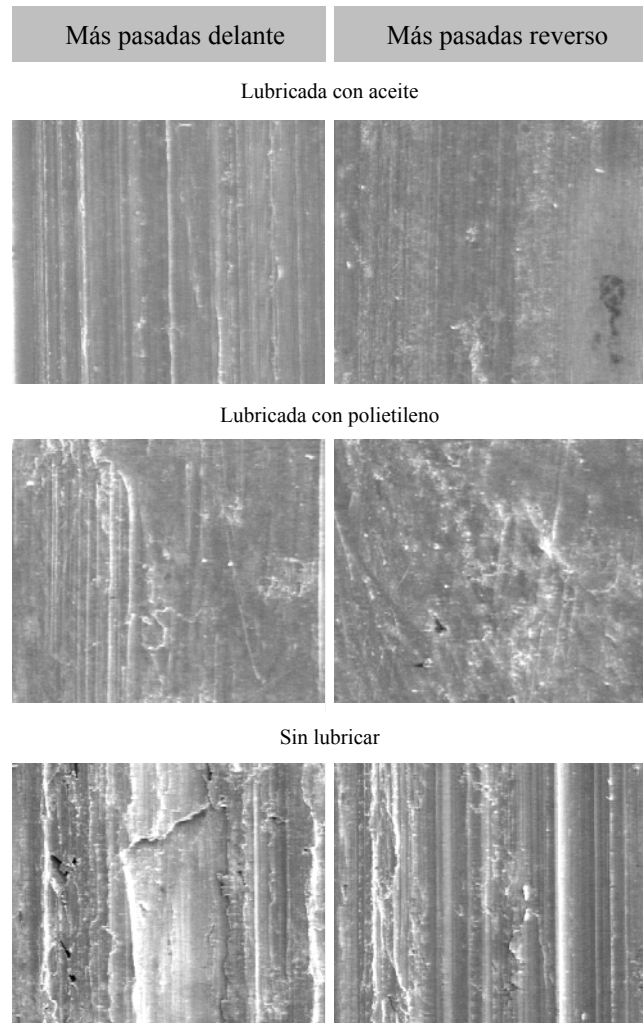


Fig. 10. Aspectos superficiales de las probetas ensayadas de la chapa B, luego de la última pasada.

Se trata de valores de presión normales muy superiores a los 6-15 daN/mm² usuales en estampado. La velocidad de desplazamiento prescrita en el ensayo

Renault es por otra parte muy inferior a las usuales en conformado industrial de chapas, que pueden llegar a ser del orden de 80 mm/seg.

Esta combinación de condiciones hace que en el ensayo utilizado, el régimen actuante sea de lubricación límite, mientras que en las operaciones industriales puede haber casos de lubricación mixta, en los que la componente hidrodinámica desempeña un rol importante.

6 Conclusiones

Se cuenta con un equipo y técnicas disponibles para evaluar comportamientos de lubricantes y superficies de chapas metálicas en fenómenos de fricción y desgaste.

Los resultados obtenidos al estudiar la aplicación de regímenes diversos de lubricación sobre chapas de acero de bajo carbono son consistentes con los reseñados en la bibliografía específica.

Se seguirá analizando el comportamiento de lubricantes y materiales para aclarar algunos aspectos tales como régimen de lubricación y daño superficial, influencia de la presión normal en el coeficiente de rozamiento, e influencia del espesor, rugosidad inicial y estructura cristalina en el daño superficial de chapas metálicas, entre otros parámetros.

7 Agradecimientos

Los autores agradecen al señor César Larrea por su contribución técnica en la construcción del equipo de ensayo de fricción; la colaboración brindada por M. Julia Yañez en los análisis de estados superficiales mediante microscopía electrónica, y el aporte de los alumnos de Ingeniería Industrial de la U.N.S. que cursan el Seminario de Metalurgia y Tecnología Mecánica en el 1° cuatrimestre del 2001, por las experiencias llevadas a cabo con la supervisión del Ingeniero Guillermo Bergé.

Referencias

- Bernick LM, Hilsen RR y Wandrei CL, 1978, Development of a quantitative sheet galling test, *Wear* 48, pp 323-346.
- Betzalel A, 1992, Friction during metal forming, *ASM Handbook*, 10° Edición, Vol. 18, pp 57-69.
- Cárcel A, Ferrer C y Saura J, 1997, Evaluación del comportamiento tribológico en la embutición de chapas recubiertas para carrocería de automóviles. Estrategias de lubricación, *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, Vol. 1, N° 1, pp. 69-80.
- Cheng HS, 1992, Lubrication regimes, *ASM Handbook*, 10° Edición., Vol. 18, Friction lubrication and wear technology, ASM International, pp 89-97.
- Culcasi JD y González AC, 1996, Evaluación de la fricción en chapas para conformado mediante ensayos de deslizamiento, *Anales SAM*, Jujuy.
- Delamare F y Felder E, 1996, The tribology of sheet metal forming, *Book of Steel*. pp 441-465.
- Hogman S, Jacobson S y Vingsbo O, 1992, Surface damage, *ASM Handbook*, 10° Edición., Vol. 18, pp 176-183.
- Iurman L, Mazini N, Insausti JW, Lucaioli A, Benedetti P y Ziegler D, 1997, Efecto del régimen de lubricación sobre la calidad superficial de piezas embutidas, *Anales IV Congreso Internacional de Materiales*, Saltillo, México, pp 230-241.
- Kemmis OH, 1957, The assessment of the drawing and forming qualities of sheet metal by the swift cup forming test, *Sheet Metal Ind.*, pp. 203-208.
- Lucaioli A, Iurman L, Insausti JW, Bergé G y Ziegler D, 2001, Diseño y construcción de una máquina de ensayo de fricción y desgaste para chapas metálicas, *CIDIM*, Mérida. Venezuela.
- Mummery L, 1990, Hommelwerke GmbH.
- Régie Nationale des Usines Renault, 1991, Méthode d'Essai D31 1738, Tôles aptitude au glissement.
- Schey JA, 1970, Metal deformation processes— friction and lubrication, Edit. Marcel Dekker.