



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

Comportamiento a la fricción de chapas de acero con una rugosidad labrada en la superficie

M. Puccinelli, J. Insausti , L. Iurman, A. Lucaioli

Laboratorio de Metalurgia, Departamento de Ingeniería – Universidad Nacional del Sur
Av. Alem 1253 Bahía Blanca Argentina
e-mail: insausti@criba.edu.ar

RESUMEN

Durante una operación de conformado, la topografía de la superficie de una chapa de acero afecta las fuerzas de fricción desarrolladas en el proceso, y por consiguiente la posibilidad de obtener una pieza exitosa en lo que respecta a la variación de espesor y al acabado superficial.

La complejidad de los regímenes de fricción reduce las posibilidades de elaborar un modelo que tenga en cuenta el proceso mencionado. Para lograr este objetivo surge la necesidad de comenzar con una topografía superficial que responda a una geometría simple. Con esta finalidad se realizó un trabajo imponiendo a las chapas de acero una geometría de perfil de onda rectangular por medios mecánicos y se estudió su comportamiento a la fricción utilizando un equipo de ensayo tipo Inland recomendado para chapas. Los resultados obtenidos mostraron comportamientos disímiles, pero muy repetitivos, al variar parámetros tales como la viscosidad del lubricante, la presión normal sobre las superficies deslizantes y la velocidad relativa de las mismas.

En el presente trabajo se analizan las chapas de acero con el mismo tipo de geometría impuesto en el primer trabajo, modificada en su longitud de onda.

El método utilizado para preparar las superficies consiste en minimizar la rugosidad inicial de las chapas mediante laminación en frío, utilizando rodillos pulidos a espejo. Luego se imprime la nueva geometría con el mismo método y con rodillos mecanizados de acuerdo al nuevo perfil.

Se estudia el comportamiento a la fricción, de estas chapas, y se comparan los resultados con los obtenidos en el trabajo anterior.

Todas las experiencias se realizaron con el mismo equipo para ensayos de fricción empleando dos tipos de lubricantes, dos presiones normales, y dos velocidades de deslizamiento.

El objetivo del trabajo consistió en establecer relaciones entre la geometría superficial inicial de la chapa y los resultados de los ensayos de fricción.

Los resultados muestran diferencias sistemáticas en el comportamiento a la fricción entre chapas impresas con distintas geometrías superficiales, en un sentido cuando se utiliza un lubricante de mayor viscosidad y en sentido contrario cuando se utiliza un lubricante de menor viscosidad.

Palabras Claves: Fricción de chapas de acero.

1. INTRODUCCIÓN

La topografía de la superficie de una chapa de acero afecta las fuerzas de fricción en el conformado y la posibilidad de obtener una pieza exitosa en lo que respecta a la variación de espesor y al acabado superficial [1].

La complejidad de los regímenes de fricción reduce las posibilidades de elaborar un modelo que tenga en cuenta este proceso. Por eso se realizó un trabajo imponiendo a las chapas una topografía sencilla con una geometría de perfil de onda rectangular por medios mecánicos [2] y se estudió la fricción utilizando un equipo de ensayo tipo Inland. Se encontraron resultados disímiles, pero muy repetitivos, al variar parámetros tales como la viscosidad del lubricante, la presión normal sobre las superficies deslizantes y la velocidad relativa de las mismas [3].

En el presente trabajo se analizan las chapas de acero con el mismo tipo de geometría impuesto en el primer trabajo [2, 3], modificada en su longitud de onda.

Para preparar las superficies se minimiza la rugosidad inicial de las chapas mediante laminación en frío, con rodillos pulidos a espejo. Luego se imprime la nueva geometría con el mismo método y con rodillos mecanizados de acuerdo al nuevo perfil.

Las experiencias se realizaron empleando dos tipos de lubricantes, dos presiones normales, y dos velocidades de deslizamiento. Se comparan los nuevos resultados con los obtenidos en el trabajo anterior.

El objetivo del trabajo consiste en establecer relaciones entre la geometría superficial inicial de la chapa y los resultados de los ensayos de fricción.

Estos resultados muestran diferencias sistemáticas en el comportamiento a la fricción entre chapas impresas con distintas geometrías superficiales. El sentido de estas diferencias depende de la viscosidad del lubricante.

Los valores se vuelcan en una curva de Emmens donde las coordenadas de cada punto son el coeficiente de rozamiento μ y el coeficiente de Emmens [4].

Los coeficientes de Emmens resultan del cociente PL/P indicado en la ecuación 1 [5].

$$\frac{P_L}{P} = \frac{3\eta_0 \cdot V \cdot L \cdot A}{R_a^2 \cdot N} \quad (1)$$

Donde:

PL = Presión del lubricante

V = velocidad de deslizamiento

P = N/A [Presión de contacto]

L = Long. de los bolsones de lubricante

A = Área aparente de mordazas

Ra = Rugosidad media aritmética

η_0 = viscosidad dinámica del lubricante

En la Figura 1 se muestra el diagrama obtenido por Emmens [6]. Para obtener los valores de PL/P, los ensayos se realizaron empleando, para las distintas variables, los rangos expresados en la Tabla 1.

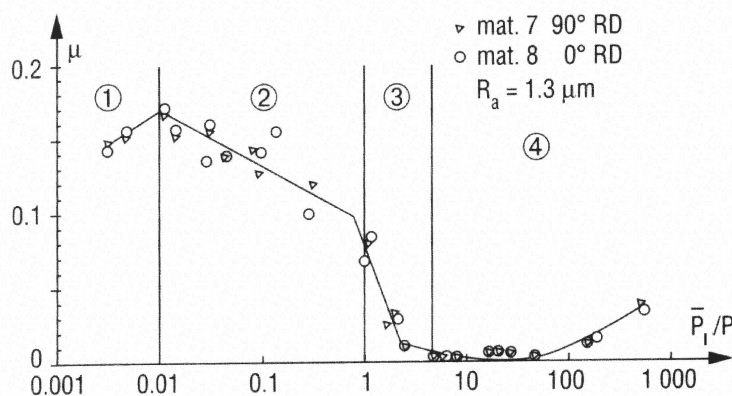


Figura 1. Diagrama de Emmens

Tabla 1. Valores utilizados por Emmens.

L	0,0002	m
Ra	0,0000013	m
P	0.6 – 6.0	Mpa
V	0,002 – 0,008	m/s
η_0	0,037 – 8,3	Pa.s

2. MATERIALES UTILIZADOS

2.1 Chapas metálicas

El estudio se realizó con chapa de acero desnuda de 0,9 mm de espesor, de calidad de embutido, a la que se le modificó la rugosidad superficial.

Para ello se recortaron 24 probetas de 50 mm por 400 mm. Con un laminador de laboratorio se modificó la geometría superficial. Para ello se emplearon dos etapas. La primera consistió en reducir los valores de los parámetros de rugosidad mediante sucesivas pasadas por el laminador provisto de un par de rodillos pulidos a espejo. Las reducciones de rugosidad se muestran en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2 – Rugosidades en la dirección de laminación

	Ra [μm]	Rz [μm]	Rt [μm]	Rm [μm]
Inicial	0.94	6.45	9.08	8.74
Final	0.41	2.88	3.83	3.45
Δ	0.53	3.57	5.25	5.29
Δ (%)	56.4	55.3	57.8	60.5

Tabla 3 – Rugosidades en la dirección normal a la laminación

	Ra [μm]	Rz [μm]	Rt [μm]	Rm [μm]
Inicial	0.93	6.53	9.11	8.83
Final	0.36	2.80	3.83	3.52
Δ	0.57	3.73	5.28	5.31
Δ (%)	61.3	57.1	57.9	60.1

La segunda etapa consistió en imprimir la geometría determinada mediante un segundo par de rodillos, uno liso y otro mecanizado con perfil de onda cuadrada. En la Figura 2 y 3 se muestran las dimensiones de los perfiles impuestos a las chapas y micrografías de las mismas.

La Figura 4 muestra el aspecto superficial de una probeta terminada y una fotografía del laminador utilizado.

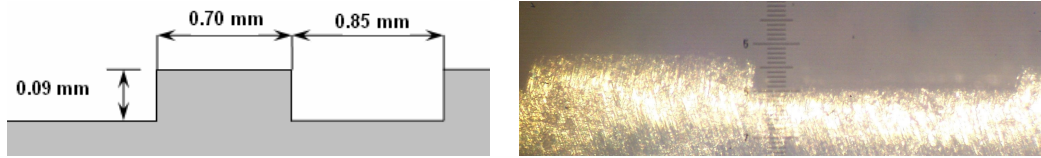


Figura 2. Esquema y micrografía del perfil 1 impreso



Figura 3. Esquema y micrografía del perfil 2 impreso

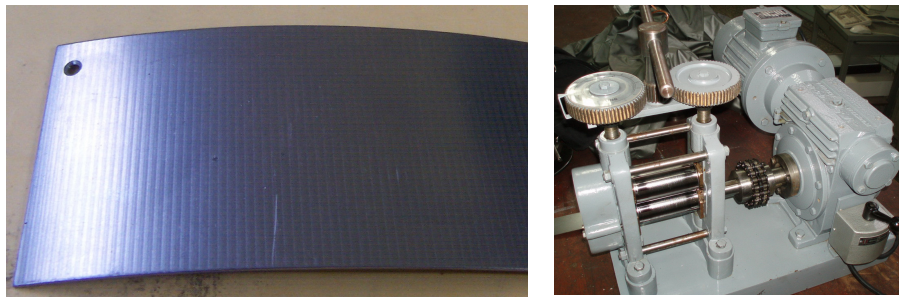


Figura 4. Aspecto del perfil impuesto y laminador utilizado

Se realizaron mediciones de dureza superficial a las chapas originales y luego del alisado, para determinar sus variaciones, debido al endurecimiento por deformación plástica producido durante las dos etapas de preparación. Para ello se utilizó la técnica de microdureza Vickers con una carga de 85 grs. Se midieron valores de aproximadamente 105 Hv tanto antes como después del alisado. Estos resultados permiten considerar que la etapa de alisado no produce variación significativa de la dureza superficial

2.2 Lubricantes

Los lubricantes empleados fueron aceite Prelube, utilizado para la protección de la chapa hasta el proceso de estampado, y aceite TSD 996 recomendado para la realización de los ensayos Swift [6].

3. ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos de fricción se realizaron con una máquina tipo Inland diseñada y construida en el Laboratorio de Metalurgia de la Universidad Nacional del Sur [7]. Este método consiste en hacer deslizar una chapa, a velocidad constante, entre herramientas planas de 20mm por 50 mm, que ejercen una fuerza normal N. El centro de la chapa es deformado elásticamente, de manera que la fuerza F sea la resultante de la fricción de corte. El coeficiente de fricción se calculó de acuerdo a la ecuación 2.

$$\mu = F/2N \quad (2)$$

La Figura 5 muestra un esquema del ensayo y una fotografía de la máquina de fricción utilizada.

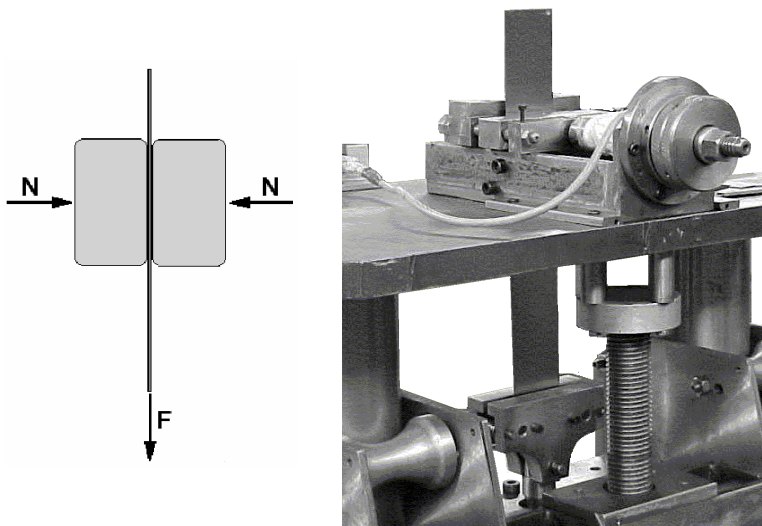


Figura 5. Esquema del ensayo y fotografía de la máquina de fricción utilizada

Esta máquina tiene la capacidad de variar su velocidad y mantener su torque constante debido a su motor de corriente continua por lo cual obtenemos velocidades de arrastre constantes. También se puede variar la fuerza ejercida por las mordazas sobre la chapa N mediante un tornillo, hasta un valor de 1000 daN. Con una celda de carga se mide N y con otra la fuerza de arrastre F .

Los valores de F y N se registraron en función del tiempo, durante cada ensayo. Los registros de estas variables fueron obtenidos con la ayuda una plaqueta adquisidora de datos conectada entre las celdas de carga de la máquina y la computadora.

Las velocidades de arrastre fueron de 20 mm/min y 200 mm/min, y las fuerzas normales de 100 daN y 500 daN.

Una vez obtenidas las probetas con la geometría impresa, se procedió a la limpieza y lubricación de las mismas. La limpieza se llevó a cabo por ultrasonido en el interior de una cuba con tetracloruro de carbono durante 20 minutos.

La lubricación se realizó por pincelado y escurrido de 20 horas en compartimiento libre de polvos.

Cada ensayo se llevó a cabo haciendo deslizar la chapa entre las mordazas a través de una longitud de 60 mm. Se realizaron diez pasadas sin lubricar entre pasadas. En cada una se determinó el coeficiente de roce a una longitud de 50 mm del comienzo, o sea cuando el deslizamiento había alcanzado un estado estacionario. Durante cada pasada se registraron los valores de fuerza de arrastre en función del tiempo, y luego de las diez pasadas se graficó la variación del coeficiente de roce con las pasadas.

Este ensayo y procedimiento de análisis se repitió tres veces para cada condición.

Luego se graficaron los promedios de los coeficientes de roce en función de las pasadas y por último se graficaron los coeficientes de roce en función de los coeficientes de Emmens con el fin de evaluar el régimen de lubricación imperante en cada condición.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Los valores de μ en función de las pasadas resultan repetitivos cuando se fijan la fuerza normal, velocidad y el lubricante empleado, como puede apreciarse con la gráfica de una condición, a modo de ejemplo, en la Figura 6. Además, se muestran los valores promedio empleados para analizar los resultados.

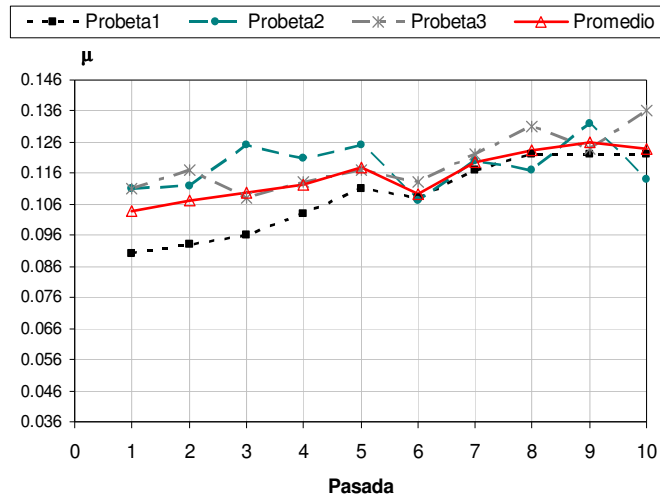


Figura 6. Valores de μ en función de pasada para tres ensayos en iguales condiciones

En las Figuras 7, 8, 9 y 10 se visualizan las gráficas del coeficiente de rozamiento promedio en función de las pasadas para cada perfil, lubricante y condiciones de ensayo. Para la condición de baja velocidad y alta fuerza normal, cuando se utilizó lubricante TSD996, no se calcularon los coeficientes de roce, debido a la aparición del fenómeno de agarre-deslizamiento durante esos ensayos.

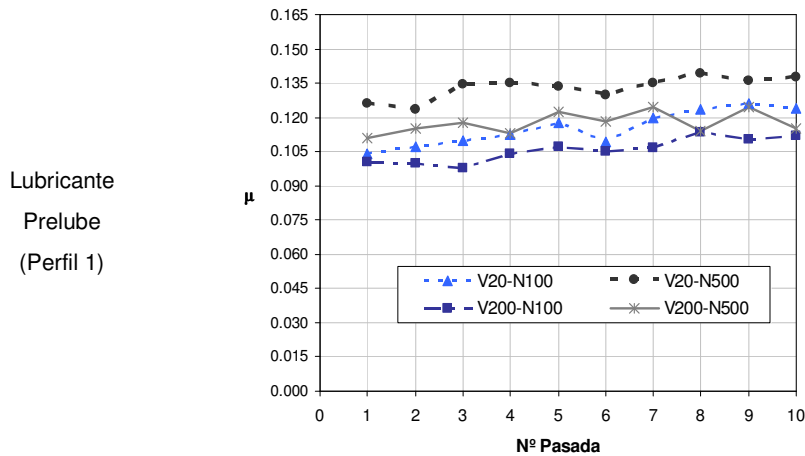


Figura 7. Coeficientes de roce promedios en función de las pasadas.

La medición de la rugosidad impresa correspondiente a los perfiles 1 y 2 (Fig. 2 y 3) se efectuó con un rugosímetro marca PRAZIS RUG-03 utilizando un cut-off de $\lambda_c=2.5$ mm. Los valores obtenidos para ambos perfiles oscilan entre 0.9 y 1.6 μm . El perfil impuesto de rugosidad hace que durante la medición, el palpador del rugosímetro no pueda copiar una discontinuidad abrupta, razón que puede quitarle confiabilidad a los valores obtenidos. Por tal motivo, además

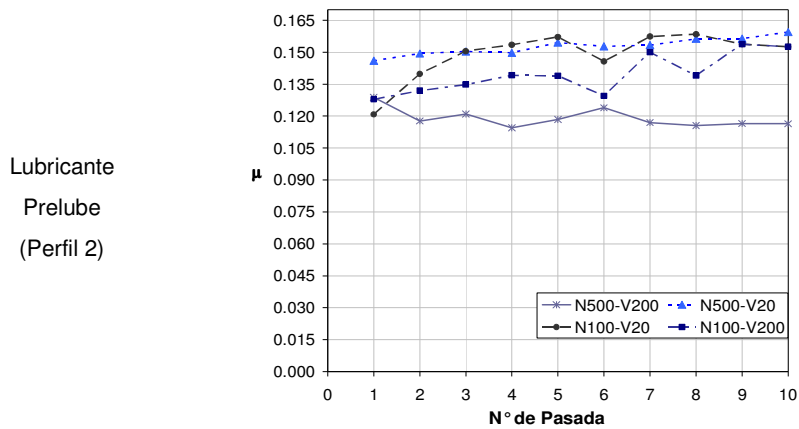


Figura 8. Coeficientes de roce promedios en función de las pasadas.

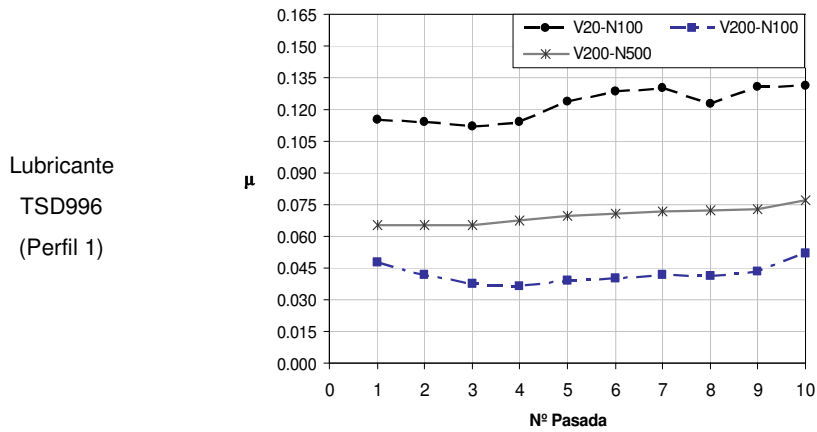


Figura 9. Coeficientes de roce promedios en función de las pasadas.

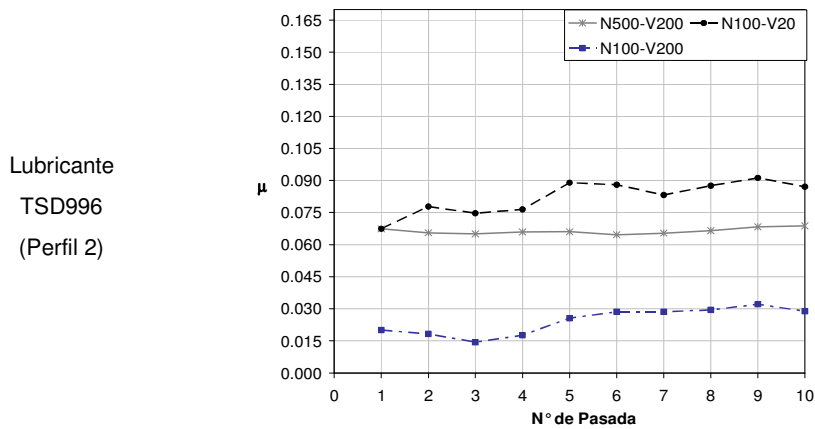


Figura 10. Coeficientes de roce promedios en función de las pasadas.

de los valores de rugosidad medidos se consideró un valor Ra calculado sobre la base del perfil teórico a imprimir.

Con las dimensiones de las ondas de las Figuras 2 y 3 se calcularon los valores de Ra resultando 49 μm para el perfil 1 y 46 μm para el perfil 2

Estos resultados difieren en gran medida de los valores de Ra medidos por lo cual estos últimos son desestimados. A pesar de que el valor calculado no tiene en cuenta la rugosidad de las zonas planas se considera que aproxima mejor a la rugosidad real.

En las Tablas 4 y 5 se muestran los valores utilizados para la obtención de los coeficientes de Emmens en las distintas condiciones de ensayo [5].

Tabla 4 - Perfil 1

L	0,00085	m
A	0,001	m ²
Ra calculado	0,000049	m
P (a N=100daN)	1	Mpa
P (a N=500daN)	5	Mpa
V1	0,0003333	m/s
V2	0,0033333	m/s
η_0 PRELUBE	0,05896	Pa.s
η_0 TSD996	0,69524	Pa.s

Tabla 5 - Perfil 2

L	0,00040	M
A	0,001	m ²
Ra calculado	0,000046	M
P (a N=100daN)	1	Mpa
P (a N=500daN)	5	Mpa
V1	0,0003333	m/s
V2	0,0033333	m/s
η_0 PRELUBE	0,05896	Pa.s
η_0 TSD996	0,69524	Pa.s

Los coeficientes de Emmens y de rozamiento para la primera pasada, obtenidos con el valor de Ra calculado para el primer y segundo perfil, se muestran en las Tablas 6 y 7. Los valores se

Tabla 6. Coeficientes de Emmens y de rozamiento para el Perfil 1 (Ra calculado)

Lubricante	η_0 [Pa.seg.]	N [daN]	Velocidad (mm/min)	PL/P	μ
Prelube	0,05896	100	20	20.66×10^{-6}	0.104
			200	20.66×10^{-5}	0.100
		500	20	4.13×10^{-6}	0.126
			200	4.13×10^{-5}	0.111
TSD996	0,69524	100	20	2.43×10^{-4}	0.115
			200	2.43×10^{-3}	0.048
		500	20	4.86×10^{-5}	Stick-Slip
			200	4.86×10^{-4}	0.065

Tabla 7. Coeficientes de Emmens y de rozamiento para el Perfil 2 (Ra calculado)

Lubricante	η_0 [Pa.seg.]	N [daN]	Velocidad (mm/min)	PL/P	μ
Prelube	0,05896	100	20	23.44×10^{-6}	0.121
			200	23.44×10^{-5}	0.125
		500	20	4.68×10^{-6}	0.146
			200	4.68×10^{-5}	0.124
TSD996	0,69524	100	20	2.76×10^{-4}	0.075
			200	2.76×10^{-3}	0.016
		500	20	5.52×10^{-5}	Stick-Slip
			200	5.52×10^{-4}	0.066

han volcado en el diagrama de Emmens mostrado en la Figura 11. Este gráfico de Emmens servirá como referencia para construir el resultante de los ensayos realizados y de los que se han de llevar a cabo para tener una mayor cantidad de datos que permitan la modelización perseguida, ya que en función de los valores de PL/P que obtuvimos podremos darle forma a la curva que buscamos construir.

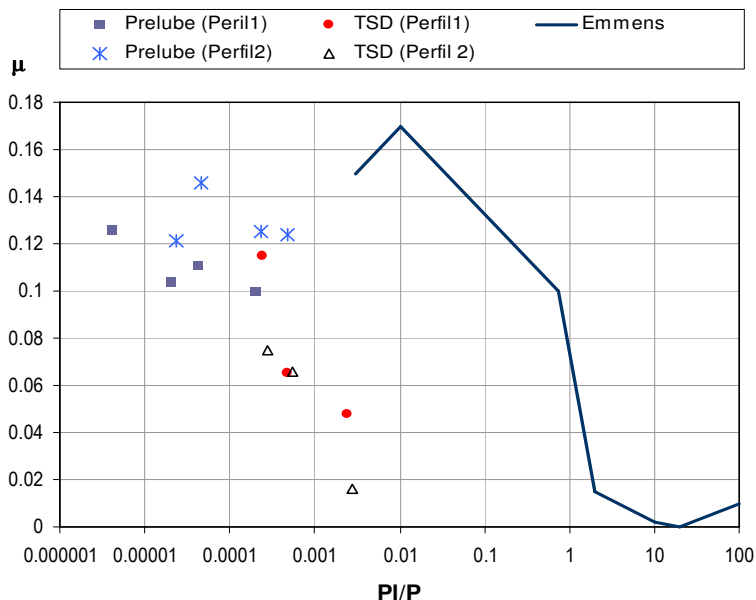


Figura 11. Valores obtenidos superpuestos con la curva obtenida por Emmens.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los valores de coeficientes de roce obtenidos en los ensayos realizados muestran que:

- No existe una influencia apreciable en el comportamiento a la fricción tanto en lo que respecta a la velocidad de deslizamiento cuanto a la carga normal, en el caso de un lubricante de baja viscosidad (Prelube).
- En el caso de un lubricante de baja viscosidad (Prelube) con el perfil 2 los valores de fricción son levemente mayores.
- Para el lubricante TSD996 en igualdad de condiciones de velocidad y carga de ensayo, los valores de μ , son menores para el perfil 2.
- Cuando se utiliza un lubricante con viscosidad elevada (TSD996), el efecto de la velocidad se presenta en forma más acentuada en ambos perfiles tal como lo muestran las Figuras 9 y 10, siendo mayor la influencia para bajas cargas.
- En los ensayos realizados con TSD996 (mayor viscosidad), a baja velocidad y alta carga normal, se produjo un efecto de agarre-deslizamiento ("stick-slip") para ambos perfiles, que imposibilitó medir los coeficientes de fricción [8].
- En la Figura 11 se observa la influencia de la geometría y la viscosidad del lubricante en el coeficiente de roce. Esta influencia es más notoria cuando el lubricante es más viscoso. Los valores obtenidos marcan una tendencia similar a la del modelo de Emmens aunque desplazados hacia valores menores de PI/P debido probablemente a las diferencias geométricas entre la topografía superficial impresa en este trabajo y las utilizadas en el modelo tomado como referencia.

6. CONCLUSIONES

- Se cuenta con un método experimental de estudio de la influencia de la geometría superficial en ensayos de fricción de chapas metálicas.
- Los valores de los coeficientes de fricción obtenidos presentan tendencias similares con modelos propuestos por otros autores.
- Se ha puesto de manifiesto la influencia de la topografía superficial, aun para valores similares de rugosidad media aritmética Ra, en cuanto al comportamiento tribológico, para igualdad de condiciones de ensayo y lubricantes utilizados.

7. REFERENCIAS

- [1] J. W. Insausti. *Relación entre las características superficiales de chapas de acero y su comportamiento en ensayos de fricción y desgaste*. Tesis de Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales. Dpto. De Ingeniería. Universidad Nacional del Sur. 2004.M.
- [2] J. Insausti, M. Puccinelli, A. Lucaioli, P. Benedetti. *Impresión de geometrías superficiales sobre chapas de acero*. AFA Asociación Física Argentina. Libro de resúmenes Pp 199. 91º Reunión Nacional de Física. Merlo, San Luis. 25-29 set 2006
- [3] Puccinelli, J. Insausti, L. Iurman, A. Lucaioli. *Frictional Behaviour of a Simple Surface Geometry imposed on Steel Sheets*. 17º conferencia de laminación y 4º conferencia sobre usos del acero IAS. 2008
- [4] W. C. Emmens, *The Influence of Surface Roughness on Friction. Controlling Sheet Metal Forming Processes*. 15 th IDDRF. Michigan. USA. 1988.
- [5] F. Delamare and E. Felder. *The Tribology of Sheet Metal Forming*. Chap. 18. The Book of Steel. 442-463. 1996.
- [6] O. H. Kemmis, *The Assessment of the Drawing and Forming Qualities of Sheet Metal by the Swift Cup Forming Test*, Sheet Metal Ind., pp 203 - 208, Marzo 1957.
- [7] A. Lucaioli, L. Iurman, J. W. Insausti, G. Bergé, D. Ziegler. *Diseño y construcción de una máquina de ensayo de fricción y desgaste para chapas metálicas*. Memorias del V Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Pp: 1401-1408, Mérida, Venezuela, 2001.
- [8] L. M. Bernick, R. H. Hilsen, C. L. Wandrei. *Development of a Quantitative Sheet Galling Test*. Wear 48. 323-346. 1978

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la SGCyT de la Universidad Nacional del Sur por subsidiar el proyecto en el que se enmarca el presente trabajo, y también al personal del Laboratorio de Metalurgia del Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur, por su colaboración.