

ASPECTOS RELEVANTES DE LA APLICACION DE LUBRICANTES SOLIDOS
A ALTA TEMPERATURA

P. Mendez, I. Odriozola, R. Herrera
Centro de Investigación Industrial - FUDETEC
(0315) 20001/9
Dr. Simini S/N - (2804) Campana
ARGENTINA

Key words: Lubricación sólida, Grafito, Conformado en caliente, Ring test, Coeficiente de fricción

1.- RESUMEN

El proceso de conformado mecánico de metales en caliente consiste básicamente en una operación de deformación plástica, donde el metal caliente adopta una forma prefijada dada por el molde o matriz. Como es de suponer, la interfase metal-matriz tiene una importancia relevante en la calidad superficial del producto terminado. En el caso de aceros, ésta interfase es comúnmente lubricada por medio de lubricantes sólidos ricos en grafito. Normalmente el grafito es transportado en una solución coloidal acuosa, la que es proyectada en forma de spray sobre la superficie de la matriz caliente.

En éste trabajo se propone un modelo que permite, una vez determinada la temperatura de pegado, T_p , calcular la cantidad de lubricante depositada sobre la superficie. La aplicación de éste modelo permite también, conociendo la cantidad de lubricante que se quiere aplicar así como la temperatura final del herramiental, calcular los caudales en juego de manera de diseñar el sistema aplicador.

Como se mencionó anteriormente, el modelo necesita como dato de entrada la cantidad de lubricante que se quiere depositar sobre la superficie. Esta cantidad, que no resulta fácil de predecir a priori, es determinada a partir de mediciones del coeficiente de fricción por medio del ensayo de compresión de anillos. En éste trabajo se describe ésta técnica, y se reportan valores medidos.

2.- INTRODUCCION

El objetivo de éste estudio es generar los conocimientos que permitan comprender y predecir la aplicación de lubricantes sólidos. En base al conocimiento desarrollado resultaría posible controlar a voluntad las variables durante la lubricación industrial en procesos de forja y conformado en caliente. Este conocimiento resulta necesario para lograr la aplicación sobre herramiental a altas temperaturas (aprox. 500 °C) de manera de mejorar la productividad, y al mismo tiempo disminuir el efecto "die chilling" (enfriamiento superficial brusco de la pieza al entrar en contacto con el herramiental). Este conocimiento resultará también útil para determinar el set-up de los dispositivos de aplicación de manera de economizar lubricante.

La aplicación de éstos lubricantes se realiza a través de la proyección de un spray compuesto por polvo de grafito en suspensión coloidal en agua, con una pequeña proporción de aditivos. Este lubricante se aplica sobre el herramiental de conformado mientras éste último está caliente. El mecanismo de aplicación está regido fundamentalmente por el proceso de transferencia térmica de la superficie del herramiental al spray así como por la cinética de ebullición superficial. Los componentes líquidos del spray se evaporan o evacúan durante la aplicación. El resultado final del

proceso es la obtención de una capa de grafito adherida a la superficie del herramiental.

3.1.- PROCESO DE APLICACION DE LUBRICANTE

En base a resultados experimentales, es posible determinar que la temperatura superficial del herramiental debe ser inferior a un valor característico (temperatura de pegado T_p) para que comience la adhesión del grafito. Esta temperatura depende de las propiedades del spray (tamaño y velocidad de gota), del líquido (densidad, tensión superficial, presencia de aditivos). así como de la superficie sobre la cual se aplica (rugosidad, presencia de óxidos, limpieza).^[2,3,4,5,6]

El lubricante se aplica a temperaturas superiores a T_p , de ésta manera la superficie caliente comienza un proceso de enfriamiento a lo largo del cual llega a alcanzar ésta temperatura característica instante en el en que comienza el proceso de deposición del mismo.

La velocidad de deposición del lubricante dependerá fuertemente de la evolución térmica de la pieza a lubricar. Por éste motivo, en lo que sigue se describe brevemente un modelo térmico del enfriamiento y luego se presenta un esquema simple de deposición del lubricante

3.2.- MODELO UNIDIMENSIONAL DE APLICACION DE LUBRICANTE

- MODELO TERMICO

Por simplicidad, se analizará la refrigeración de una placa infinita inicialmente isotérmica sobre la cual incide un spray en forma normal. En éste caso, la temperatura de cada punto del material depende sólo de la profundidad bajo la superficie (x) y del tiempo transcurrido (t).

Para simplificar el cálculo se supondrá que dentro del rango de temperaturas superficiales de interés, el calor es extraído por convección, y el coeficiente de convención (h) es constante. Esta suposición coincide muy bien con las experiencias realizadas en laboratorio (Figura 1). La solución analítica para éste caso es^[1]:

$$T_{sup} = T_0 - (T_0 - T_{amb}) [1 - \exp(-w^2) \cdot \text{erfc}(w)] \quad (1)$$

$$w = \frac{h \cdot (\alpha \cdot t)^{1/2}}{k} \quad (2)$$

T_{sup} = temperatura superficial en un tiempo t

T_0 = temperatura inicial del herramiental

T_{amb} = temperatura ambiente

erfc = función error complementaria

h = coeficiente de convección
 α = difusividad térmica del material del herramiental
 t = tiempo
 K = conductividad térmica del material herramiental

- MODELO DE DEPOSICION DEL LUBRICANTE

En éste modelo se supone que sólo una parte del spray que es proyectado sobre la superficie es evaporada (η_s), y que a su vez sólo una proporción, η_g , del grafito contenido en el volumen evaporado se adhiere efectivamente a la superficie. Por lo tanto, la cantidad de grafito adherida durante una aplicación de duración t , mayor a t_p resulta:

$$m_g = \eta_g \cdot x_g \cdot \dot{m} \int_{t_p}^{t_{ap}} \eta_s dt \quad (3)$$

m_g = masa de grafito por unidad de superficie efectivamente adherida

η_g = Proporción del grafito contenida en el líquido evaporado que queda efectivamente adherida

x_g = proporción en peso de grafito en el líquido

\dot{m} = caudal incidente por unidad de área

t_p = tiempo que tarda el grafito en comenzar a pegar (Figura 1)

t_{ap} = duración de la aplicación

η_s = rendimiento del spray

La variable η_s representa la relación entre el calor efectivamente extraído y el calor que se extraería evaporando totalmente el líquido incidente. Es también la relación entre la masa de líquido evaporada y el caudal incidente por unidad de área.

El valor de η_s varía durante la aplicación ya que depende fuertemente de la temperatura superficial, y puede calcularse como:

$$\eta_s = \frac{h \cdot (T_{sup} - T_{amb})}{m \cdot [r + c_p \cdot (T_s - T_{amb})]} \quad (4)$$

r = calor latente de vaporización del líquido

c_p = calor específico de líquido (medio entre T_s y T_{amb})

T_s = temperatura de saturación (ebullición) del líquido a presión atmosférica

T_p es determinada experimentalmente conservando el mismo tipo de spray y condiciones superficiales que en el caso real.

El valor de t_p se obtiene reemplazando T_{sup} por T_p en la ecuación (1) y despejando w , a partir de lo cual, con la ecuación (2) es posible calcular directamente t_p .

3.3.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se realizaron experiencias para determinar la temperatura de pegado T_p y el rendimiento de la adhesión de grafito η_g para la aplicación de lubricante sobre herramiental de acero AISI H13. Las características del spray posibilitaron tratar al problema en forma unidimensional.

El coeficiente de convección h se determinó ajustando la curva de enfriamiento dada por la ecuación (1) con datos experimentales, Figura 1.

Los valores de los parámetros del ensayo fueron los siguientes:

$$\begin{array}{ll} T_{amb} = 20 \text{ } ^\circ\text{C} & \dot{m} = 2.112 \text{ kg/m}^2\text{s} \\ h = 13262 \text{ W/m}^2\text{K} & t_{ap} = 0.25 \text{ s} \\ \alpha = 5.88 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} & r = 2.26 \cdot 10^6 \text{ J/kg K} \\ k = 28.5 \text{ W/m} & c_p = 4.18 \cdot 10^3 \text{ J/kg K} \\ x_g = 0.0507 & T_s = 100 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array}$$

En la Figura 2 se presentan los resultados de las experiencias realizadas sobre tres probetas de 40 mm de diámetro. Las estimaciones teóricas dadas por la ecuación (3) se ajustaron a los valores experimentales minimizando su error cuadrático total. Este procedimiento se realizó para cada probeta individualmente, y para

todas en conjunto, de manera de estimar la dispersión de la medición. De ésta forma se determinó:

$$T_p = 242.1 \text{ } ^\circ\text{C} (\min = 240.4 \text{ } ^\circ\text{C}, \max = 242.4 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$\eta_g = 1.095 (\min = 1.022, \max = 1.195)$$

Si bien η_g tiene un valor cercano a la unidad, no resulta evidente la razón por la cual es mayor que uno. Este hecho es actualmente motivo de estudios más detallados.

La figura 2 compara las predicciones realizadas con el modelo con resultados experimentales. Como puede observarse éste modelo simple permite predecir adecuadamente la cantidad de grafito adherida a la superficie.

4.- DISCUSION DEL MODELO DE APLICACION DE LUBRICANTES

Mediante la utilización del modelo de aplicación de lubricante presentado anteriormente, se determinó que uno de los fenómenos principales que condiciona la aplicación de lubricantes sólidos es la transferencia térmica entre el herramiental y el spray. Existe una temperatura máxima, llamada aquí temperatura de pegado (T_p), por encima de la cual no se adhiere grafito. En base al conocimiento de ésta temperatura es posible calcular la cantidad de lubricante

luego de una aplicación (ecuación (3)).

También es posible recorrer el camino inverso, sabiendo la cantidad de lubricante que se quiere aplicar,^[7] y a qué temperatura se pretende hacerlo, determinar las características del spray (set-up industrial de los aplicadores). De ésta manera es posible seleccionar la temperatura del herramiental de acuerdo a las condiciones óptimas de conformado, sin la limitación de la temperatura máxima impuesta por la aplicación del lubricante. Esto redunda en un mejor control del proceso de conformado, en la posibilidad de conformar productos de geometrías o tamaños complejos, así como en una mejora general de la productividad.

Sin embargo, aún no se ha analizado la cantidad óptima de lubricante que es necesaria depositar sobre la superficie. Para ello se requiere de la comprensión del rol que el lubricante tiene sobre la fricción. Esta relación es deducida a través del ensayo de compresión de anillos, ring compression test.^[8]

5.1.- ENSAYOS DE COMPRESIÓN DE ANILLOS

El ensayo consiste en la compresión plástica de un anillo entre dos paredes planas (Figura 3). El anillo simula la pieza a conformar, y por lo tanto debe ser del mismo material y estar a la misma

temperatura que ésta. Las paredes planas se corresponden con el herramental de conformado, y por lo tanto también deben ser del mismo material y éstar a la misma temperatura que el herramental. La interfase entre el anillo y las paredes planas (lubricante, barreras térmicas, etc.) también debe ser la misma que en el proceso real. Las proporciones del anillo pueden variar, sin embargo la mayoría de los autores utilizan las proporciones 6:3:2 (diámetro externo : diámetro interno : altura).

La determinación del coeficiente de fricción se realiza en función de la variación de altura y diámetro interno del anillo luego de la compresión. Estos dos datos se grafican sobre las curvas calibradas correspondientes a los distintos valores de fricción (Figura 4). El coeficiente de fricción utilizado, m , se define en la ecuación 5. Este coeficiente es considerado como el más representativo de la fricción en procesos de conformado plástico^[8].

$$m = \frac{\tau}{k} \quad (5)$$

τ = tensión tangencial en las superficies en movimiento relativo

k = tensión de fluencia al corte del material a conformar

Si el material no sufre endurecimiento por deformación, el valor máximo es $m = 1$, que corresponde a una fricción tan alta que las

superficies en contacto no tienen movimiento relativo. El valor mínimo de m es $m = 0$, correspondiente al caso de deslizamiento sin fricción.

5.2.- FUNDAMENTOS TEORICOS

Al comprimir el anillo se produce un flujo de material, que es fuertemente influenciado por la fricción en la interfase. Si la fricción es alta, el diámetro interno del anillo se achica mientras el externo se agranda. Para valores bajos de fricción, aumentan ambos diámetros. De ésta manera, es posible estimar la fricción en la interfase midiendo la variación de diámetro interno del anillo.

Las hipótesis de éste método son las siguientes:

- El material del anillo cumple con el criterio de fluencia de Von Mises.
- La tensión de fluencia es la misma para todos los puntos del anillo. Esto implica:
 - * homogeneidad de temperaturas
 - * el material no sufre endurecimiento por deformación
- El coeficiente de fricción m es constante en toda el área de contacto.

En base a éstas hipótesis, utilizando la teoría upper bound, o en forma más precisa, el método de los elementos finitos,^[11,12] es posible relacionar analíticamente el coeficiente de fricción con las deformaciones del diámetro interno y la altura del anillo, relación que se grafica en la figura 4.

5.3.-ENSAYOS EFECTUADOS

Se efectuaron ensayos de compresión de anillos para distintas condiciones de lubricación (según la cantidad de grafito adherido):

- sin lubricante
- 0.31 mg/cm^2
- 0.58 mg/cm^2
- 3.50 mg/cm^2
- 5.63 mg/cm^2

donde la rugosidad del herramiental utilizado fue de $R_a = 0.6 \text{ um}$, característica de la utilizada en procesos de conformado mecánico en caliente de metales.

5.4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la figura 5 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Los puntos graficados representan el promedio de por lo menos cuatro ensayos en iguales condiciones de lubricación y rugosidad.

6.- DISCUSION DE LOS RESULTADOS DE COMPRESSION DE ANILLOS

En la figura 5 se observa que las propiedades lubricantes del grafito dejan de mejorar abruptamente a partir de 0.58 mg/cm^2 . La aplicación de una mayor cantidad de lubricante no disminuye el coeficiente de fricción. Este valor es importante para la definición de standares industriales de lubricación, y es un valor de referencia para el cálculo de la configuración de los picos aplicadores.^[10]

7.- CONCLUSIONES

- Se determinó que uno de los factores principales que condicionan la aplicación de lubricantes sólidos es la transferencia térmica entre el herramiental y el spray. Existe una temperatura máxima, llamada aquí temperatura de pegado (T_p), por encima de la cual no se adhiere grafito.
- En base al conocimiento de la temperatura de pegado es posible calcular la cantidad de lubricante adherida luego de una aplicación.

- Sabiendo la cantidad de lubricante que se quiere aplicar, y a que temperatura se pretende hacerlo, es posible determinar las características del spray a aplicar. De ésta manera puede seleccionarse la temperatura del herramiental de acuerdo a las condiciones óptimas de conformado, sin la limitación de la temperatura máxima impuesta por la aplicación del lubricante.
- El método de compresión de anillos demostró ser una técnica eficaz para la determinación del coeficiente de fricción en condiciones de conformado mecánico en caliente.
- Existe un valor umbral ($\sim 0.58 \text{ mg/cm}^2$ en nuestro caso) a partir del cual las propiedades lubricantes del grafito dejan de mejorar el coeficiente de fricción. La aplicación de una mayor cantidad de lubricante no disminuye el coeficiente de fricción. Este valor es importante para la definición de standares industriales de lubricación, y es un valor de referencia para el cálculo de la configuración de los picos aplicadores.

AGRADECIMIENTO: A la empresa SIDERCA por el apoyo prestado para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", F.P.Incropera, D.p.De Witt, John Wiley & Sons (Second Edition) 1985
- [2] "Spray Cooling of Hot Surfaces", L.Bolle, J.Moureau, Multiphase Science and Technology (1982), pag 1-97
- [3] "Analysis on Film Boiling Heat Transfer of Impacting Sprays", S.Deb, S.C.Yao, Int. Journal of Heat Mass Transfer Vol 32, No 11, (1989), pag 2099-2112
- [4] "Mechanisms of film Boiling Heat Transfer of Normally Impacting Spray", K.J.Chi, S.C.Yao, Int. Journal of Heat Mass Transfer Vol 30, No 2, (1987), pag 311-318
- [5] "The Heat Transfer from a Hat Wall to Impining Water Drops in the Spheroidal State", L.H.Wachters, J.C.Rozzi, Chemical Eng. Sc. 21, pag 923-926
- [6] "Film and Transition Boiling Correlotions for Quenching of Hot Surfaces with Water Sprays", W.P.Klinzing, J.C.Rozzi, I.Mudawar, J. of Heat Treating 9 (1992), pag 91-103
- [7] "Fundamentos y Estudio de Sensibilidad del Ensayo de Compresión de Anillos", P.Mendez, R. Herrera, XVII Jornadas Metalúrgicas de la SAM, Abril 1993
- [8] "Tribology in Metalworking", Schey, ASM 1983
- [9] "Evaluation of Friction Under Hot Working Conditions in a High Temperature Test Ring", Lundberg, Waldén, Steel Research 63 (1992)

No 7

[10] "Mecanismos Físicos de la Aplicación de Lubricantes Sólidos",
P. Mendez, I.Odriozola, R.Herrera, XVII Jornadas Metalúrgicas de la
SAM, Abril 1993

[11] "Mathematical Calibration of the Ring Test with Bulge
Formation", V.De Pierre, F.Gurney, A.Male, AFML-TR-7237 (1972)

[12] "Modelado de Metal Forming. Efectos de la Fricción", E.Petocz,
E.Dvorkin, Informe FUDETEC I 1.72-334/91; 7/91

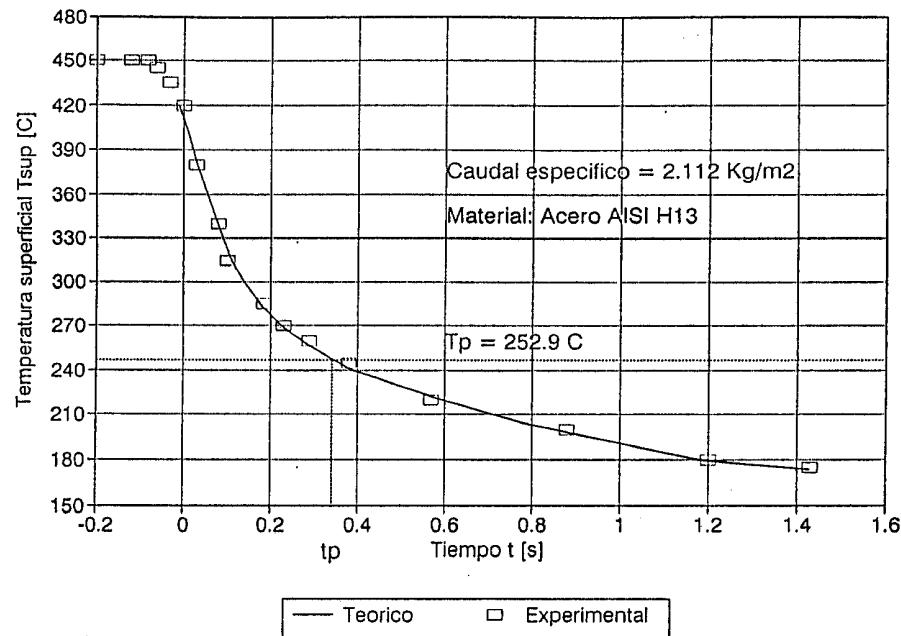


Figura 1: Enfriamiento de la superficie durante la aplicación
de lubricante

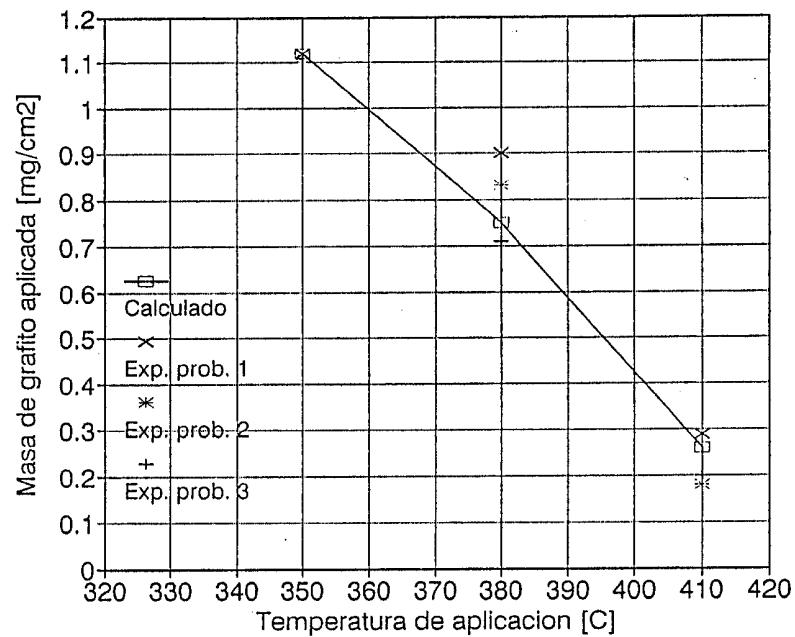


Figura 2: Masa de grafito adherida

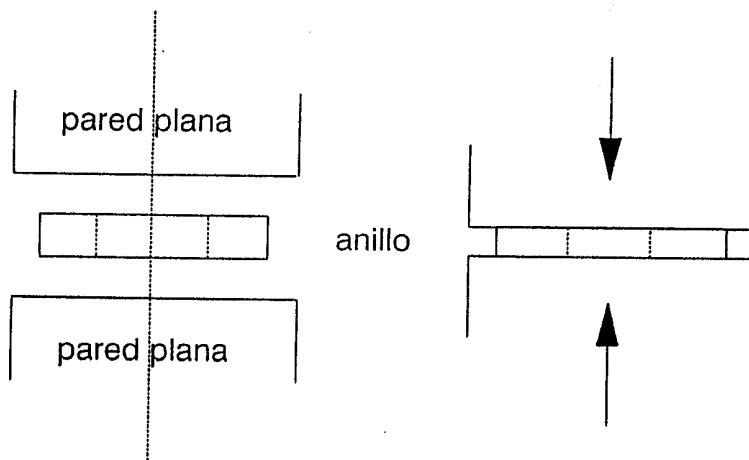


Figura 3: Esquema del ensayo de compresión de anillos

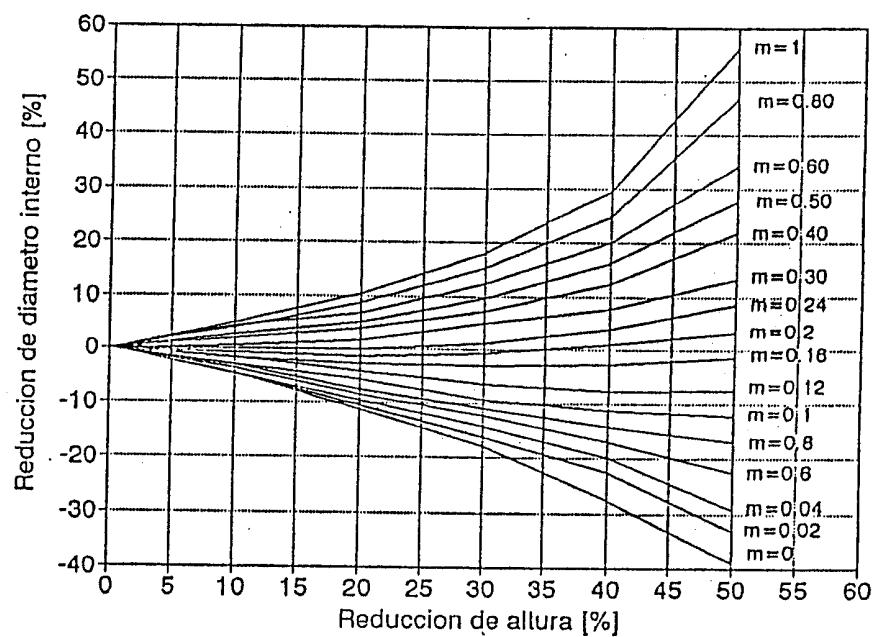


Figura 4: Curvas de calibración

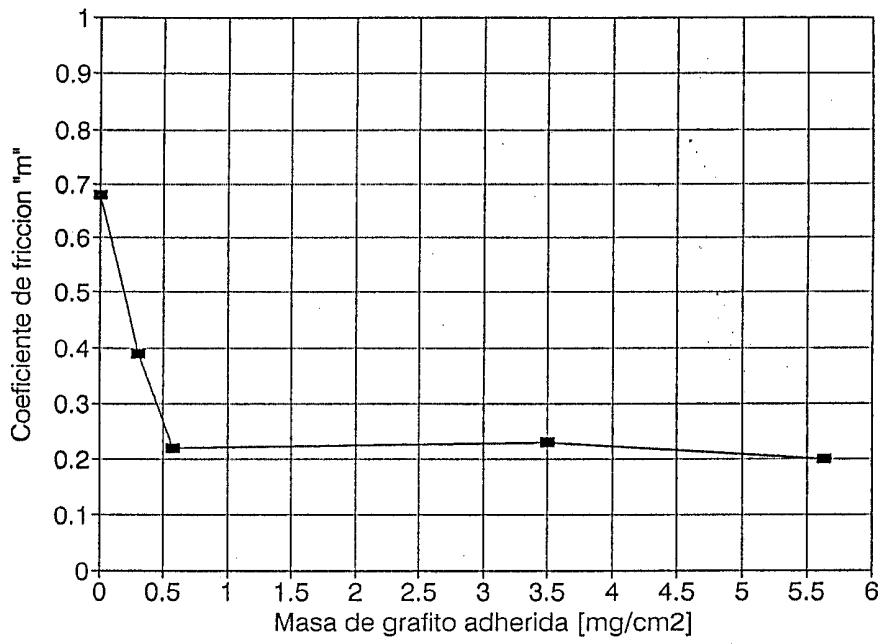


Figura 5: Coeficiente de fricción vs cantidad de lubricante adherido