UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

OBTENCION DEL COEFICIENTE DE FRICCION MEDIANTE PRUEBAS MECANICAS

POR:

EDUARDO DOMINGUEZ GAMEZ

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

CIUDAD UNIVERSITARIA SEPTIEMBRE 2003

SEP[illegible]E, 2003

OBTENCION DEL COEFICIENTE DE FRICCION
MEDIANTE PRUEBAS MECANICAS

E. D. G.

TM
2585 3
.M2
FIME
2003
.D6

1020149258

980866

TM
Z5853
.M2
FIME
2003
.D6

FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

OBTENCION DEL COEFICIENTE DE FRICCION MEDIANTE PRUEBAS MECANICAS

POR:

EDUARDO DOMINGUEZ GAMEZ

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

CIUDAD UNIVERSITARIA SEPTIEMBRE 2003

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN MEDIANTE PRUEBAS MECÁNICAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

EDUARDO DOMÍNGUEZ GÁMEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA **SEPTIEMBRE DEL 2003**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN MEDIANTE PRUEBAS MECÁNICAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

EDUARDO DOMÍNGUEZ GÁMEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA **SEPTIEMBRE DEL 2003**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Obtención del coeficiente de fricción mediante pruebas mecánicas", realizada por el alumno Eduardo Domínguez Gámez, matrícula 0888771, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis

Asesor
Dr. Rafael Colás Ortiz

Coasesor
Dra. Martha Patricia Guerrero Mata

Coasesor
Dr. Carlos Javier Lizcano Zulaica

Vo.Bo.
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. Septiembre de 2003

A Dios

por permitirme vivir este momento

A mi madre y hermanos,

por todo el apoyo brindado

A mi novia,

por su apoyo y comprensión

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo brindado en mis estudios de postgrado así mismo agradezco a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Se agradece los apoyos económicos brindados por el CONACYT y SIREYES para realizar el presente trabajo. También se agradece el apoyo del PAICYT (UANL) para la terminación de este trabajo.

A la empresa Hylsa S. A. de C. V. por el material donado para la realización de esta investigación así como a todo el personal que labora en esta empresa, principalmente al Ing. Ricardo Viramontes, al Dr. Carlos Lizcano y al Ing. Omar Cerda.

Al Dr. Rafael Colás Ortiz, por sus valiosos comentarios y por la atención prestada a este trabajo.

A la Dra. Martha Patricia Guerrero por el entusiasmo, paciencia y apoyo recibido durante la realización de este trabajo.

Al Dr. Carlos Lizcano por la revisión de este trabajo.

A los Profesores del PDIM.

Al personal de la División de Aceros Planos de la empresa Hylsamex S. A. de C. V. (Ing. Félix Cárdenas, Ing. Gerardo Salinas).

A todos mis compañeros del PDIM.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es la obtención del coeficiente de fricción mediante pruebas mecánicas de compresión de anillo para el proceso de laminación en frío.

La justificación de esta investigación es que se tiene la necesidad de simular el proceso de laminación en frío, de tal manera que al considerar un coeficiente de fricción adecuado se obtengan resultados aproximados al proceso real, lo cual conlleva a una mejor adecuación del proceso de laminación, al predecir los parámetros necesarios para llevar a cabo el proceso.

La hipótesis de la cual parte esta investigación es que la fricción es una variable muy importante en los procesos de formado de los metales, la cual puede determinarse por medio de pruebas de compresión de anillo, a partir de curvas de calibración de fricción.

En este trabajo se estudia la fricción entre una herramienta rígida y un metal que se deforma plásticamente, el estudio se llevó a cabo utilizando dos aceros de bajo carbono y cuatro diferentes condiciones de lubricación a diferentes reducciones en el espesor del anillo. Se emplea la técnica de compresión de anillos, la cual se basa en la medición de los cambios en geometría del anillo provocados por la deformación. Los resultados obtenidos mediante este método tienen una buena correlación con los datos disponibles de observaciones de procesos de formado de metales en la industria.

También se realizó una caracterización del material utilizado durante la experimentación, con la finalidad de servir de referencia para investigaciones futuras y asegurar la repetitividad de los experimentos.

PRÓLOGO

En el presente trabajo de investigación se reportan los resultados obtenidos del estudio del comportamiento de la fricción, la cual es una variable de gran importancia en el procesado de metales. La complejidad del proceso de rolado en frío requiere de una gran comprensión del comportamiento de la fricción, ya que se requiere mantenerla constante dentro de límites muy estrechos e influye considerablemente en las propiedades del producto final obtenido.

En los últimos años, la industria de formado de metales ha intentado simular sus procesos mediante algoritmos computacionales, con el fin de mejorar sus procesos al poder predecir los parámetros necesarios antes de llevar a cabo el proceso. Lamentablemente la fricción es una variable que no se puede medir directamente, por lo cual es difícil conocerla y controlarla. En este trabajo se realizó un diseño experimental variando las condiciones de lubricación, el material y la deformación de éste, ya que son algunas de las principales variables que afectan la fricción.

Este estudio sirve para un mejor entendimiento de la fricción y como una referencia para estudios futuros, ya que al poderla comprender mejor se podrán hacer mejores análisis de los procesos de la industria de formado de metales, y al incluir los resultados dentro de la simulación, ésta describirá mejor el proceso real.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS ..... **i**

RESUMEN ..... **iii**

PRÓLOGO ..... **iv**

CAPÍTULO 1 LA FRICCIÓN **1**

1.1 INTRODUCCIÓN 1

1.2 LEYES CUANTITATIVAS DE LA FRICCIÓN 1

1.3 COEFICIENTES DE FRICCIÓN ESTÁTICA Y CINEMÁTICA 3

1.4 LA FRICCIÓN Y LA RUGOSIDAD 4

1.5 LA FRICCIÓN Y LA VELOCIDAD 5

1.6 FRICCIÓN EN EL FORMADO DE METALES. 7

1.7 COEFICIENTE DE FRICCIÓN COULÓMBICA 8

1.8 FACTOR DE FRICCIÓN 9

1.9 RELACIÓN ENTRE μ Y m 10

CAPÍTULO 2 LUBRICANTES **11**

2.1 INTRODUCCIÓN 11

2.2 REGÍMENES DE LUBRICACIÓN 11

2.3 LUBRICANTES LÍQUIDOS 14

2.4 LUBRICANTES SÓLIDOS 15

2.5 EMULSIONES.....16

2.6 LUBRICANTES EN EL FORMADO DE METALES 18

CAPÍTULO 3 LAMINACIÓN.....19

3.1 INTRODUCCIÓN 19

3.2 HISTORIA 20

3.3 VENTAJAS DE LA LAMINACIÓN EN FRÍO.....21

3.4 MOLINOS DE LAMINACIÓN.....22

3.5 ANÁLISIS DEL PROCESO.....24

3.6 LUBRICACIÓN EN LA LAMINACIÓN 26

CAPÍTULO 4 EXPERIMENTACIÓN 31

4.1 INTRODUCCIÓN 31

4.2 OBTENCIÓN DE PROBETAS 35

4.3 RECOLECCIÓN DE LUBRICANTES 37

4.4 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....39

CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN...41

5.1 INTRODUCCIÓN 41

5.2 MEDICIÓN DE PROBETAS 41

5.3 CÁLCULO DE PORCENTAJES 42

5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS 46

5.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS 54

5.6 ANÁLISIS METALOGRÁFICO 55

5.7 MEDICIÓN DE MICRODUREZA 60

5.8 CURVAS DE FLUENCIA.....65

5.9 COMPARACIÓN DE ENSAYOS DE TENSIÓN CON LOS DE COMPRESIÓN DE ANILLOS.....68

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 72

6.1 CONCLUSIONES 72

6.2 RECOMENDACIONES 73

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....74

ANEXO I.....77

I.1 ANÁLISIS METALOGRÁFICO 77

ANEXO II 79

II.1 DIMENSIONES INICIALES DE ANILLOS DE MATERIAL A. 79

II.2 DIMENSIONES INICIALES DE ANILLOS DE MATERIAL B. 80

II.3 DIMENSIONES INICIALES DE ANILLOS DE MATERIAL C. 81

II.4 DIMENSIONES INICIALES DE ANILLOS DE MATERIAL D. 81

II.5 DIMENSIONES INICIALES DE ANILLOS DE MATERIAL E..82

II.6 DIMENSIONES INICIALES DE ANILLOS DE MATERIAL F..82

ANEXO III.....83

III.1 DIMENSIONES FINALES DE ANILLOS DE MATERIAL A...83

III.2 DIMENSIONES FINALES DE ANILLOS DE MATERIAL B...84

III.3 DIMENSIONES FINALES DE ANILLOS DE MATERIAL C...85

III.4 DIMENSIONES FINALES DE ANILLOS DE MATERIAL D...85

III.5 DIMENSIONES FINALES DE ANILLOS DE MATERIAL E...86

III.6 DIMENSIONES FINALES DE ANILLOS DE MATERIAL F....86

ANEXO IV 87

IV.1 CAMBIO EN GEOMETRÍA DE ANILLOS (%) 87

ANEXO V.....89

V.1 PROGRAMA EN LENGUAJE C PARA ANÁLISIS DE ANILLOS. 89

ANEXO VI 96

VI.1 CURVAS OBTENIDAS CON EL PROGRAMA PARA DETERMINAR EL FACTOR DE FRICCIÓN CORTANTE INTERFASIAL. 96

LISTADO DE FIGURAS 105

LISTADO DE TABLAS 115

CAPÍTULO 1

LA FRICCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La fricción es la resistencia al movimiento que existe cuando un material se desplaza tangencialmente con respecto a otro, o cuando se hace el intento de producir dicho movimiento.

Existen cuatro principales problemas que incumben al estudio de la fricción, (1) bajarla cuando no se requiere, ya que se generan grandes pérdidas económicas debido a la fricción; (2) subirla a un nivel lo suficientemente alto cuando se requiere, como en las cuñas, tornillos y otros sujetadores, o en procesos de la vida diaria como el caminar o sujetar objetos con las manos; (3) mantener la fricción constante dentro de límites estrechos, como en los frenos de un auto o en la industria de laminación de metales; (4) el estudio de las oscilaciones debido a la fricción, las cuales se manifiestan como sonidos, éstos pueden ser indeseables como chillidos, rechinidos, o en el caso opuesto donde sí se desean como en los instrumentos musicales de la familia del violín [1].

1.2 LEYES CUANTITATIVAS DE LA FRICCIÓN

La fricción se expresa cuantitativamente en términos de una fuerza, y se distinguen dos efectos, cuando la fuerza aplicada no causa movimiento y cuando si lo causa. En el primer caso la fuerza aplicada es exactamente igual a la fuerza de fricción, ésto lleva a la primera propiedad cualitativa de la fricción, (1) en cualquier caso donde la

resultante de la fuerza tangencial es menor que algún parámetro específico de fuerza para esa situación en particular, la fuerza de fricción será igual y opuesta a la resultante de la fuerza aplicada y no ocurrirá el movimiento tangencial. Excepciones a esta ley se encuentran a escala microscópica.

La segunda propiedad cualitativa de la fricción es cuando la fuerza aplicada causa movimiento, aquí la fuerza de fricción actúa en dirección opuesta a aquella de la velocidad relativa de las superficies. Excepciones a esta propiedad son mínimas.

Las dos propiedades anteriores conciernen a la magnitud de la fuerza de fricción. Se requieren tres relaciones cuantitativas para expresar la magnitud de la fuerza de fricción como una función de las variables macroscópicamente observables: la carga aplicada, el tamaño de la región de contacto y la velocidad de deslizamiento [1].

La fuerza de fricción (F) es proporcional a la fuerza normal (L), esta relación permite definir un coeficiente de fricción f (o μ). Es conveniente expresar esta ley en términos de un ángulo constante de reposo, o ángulo de fricción θ, definido por $\tan\theta=\mu$. Donde θ es el ángulo de un plano inclinado en el cuál cualquier objeto, independientemente de su peso, que esté sobre el plano, permanecerá en estado estacionario, pero si el ángulo se incrementa en cualquier cantidad, el objeto se deslizará (Fig. 1.1).

La fuerza de fricción es independiente del área de contacto Aa (área aparente). Debido a que objetos grandes y pequeños, tienen el mismo coeficiente de fricción.

La fuerza de fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento υ. Esto implica que la fuerza requerida para iniciar el movimiento será la misma para mantener el deslizamiento a cualquier velocidad específica.

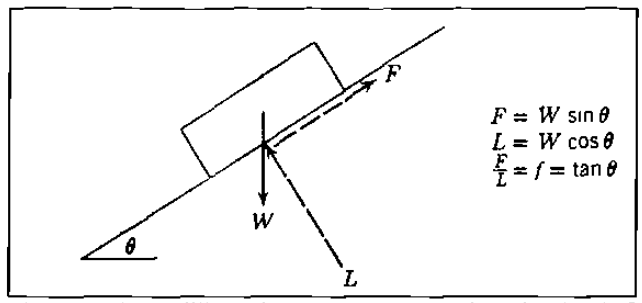


Fig. 1.1 Diagrama de equilibrio de un objeto en un plano inclinado [1].

Los tres puntos anteriores proveen el marco teórico dentro del cual la fricción es generalmente considerada por los ingenieros. Pero es importante descubrir que tan cerca estos puntos aplican en la práctica.

Los dos primeros puntos cuantitativos son generalmente bien obedecidos. Excepciones al primer punto ocurre con materiales muy duros como el diamante o en materiales muy suaves como el politetrafluoroetileno, o a cargas muy bajas del nivel de miligramos. En muchos casos, obedeciendo una expresión del tipo $F=cL^x$, donde x varía de 2/3 a 1. Otro caso donde no se cumple es en un material muy duro con un substrato muy blando, donde a altas cargas gobiernan las propiedades del substrato, debido a la fractura de la superficie dura.

Desviaciones del segundo punto son notorias en superficies muy limpias y lisas. En estas condiciones se da lugar a interacciones muy fuertes entre las superficies y la fuerza de fricción comienza a ser independiente de la carga aplicada y más dependiente del área de contacto.

1.3 COEFICIENTES DE FRICCIÓN ESTÁTICA Y CINEMÁTICA

Se debe de enfatizar que el punto 1 y 2 son generalmente bien obedecidos y las excepciones a éstos son muy raras. En cambio en el punto 3 si es algo diferente. Éste establece que la fricción es independiente de la velocidad. pero es bien sabido que la fuerza requerida para comenzar el deslizamiento es usualmente mayor que la fuerza requerida para mantenerlo y esto ha llevado a notar que hay dos coeficientes de fricción. El estático (para superficies en reposo) y el cinético (para superficies en movimiento). En trabajos recientes se ha encontrado que el coeficiente de fricción estático es una

función del tiempo de contacto y el coeficiente de fricción cinético es una función de la velocidad a través de la gama de velocidades (Fig. 1.2).

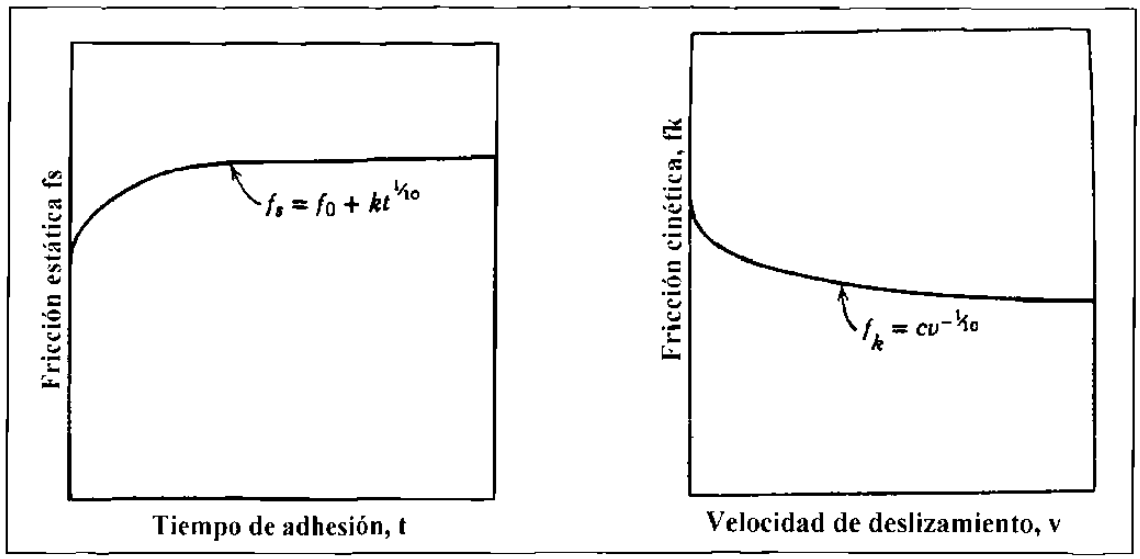


Fig. 1.2 Gráfica típica del coeficiente de fricción estática en función del tiempo (Rabinowicz 1957), y de la fricción cinética en función de la velocidad de deslizamiento (Barwell 1956), [1].

1.4 LA FRICCIÓN Y LA RUGOSIDAD

No se ha mencionado mucho la rugosidad pero se ha propuesto que la fuerza de fricción es independiente de la rugosidad de las superficies en deslizamiento. La fricción tiende a ser alta en superficies muy lisas, debido a que el área de contacto real crece excesivamente, en superficies muy rugosas la fricción es alta debido a la necesidad de levantar una superficie sobre las asperezas de la otra. En el rango intermedio de rugosidad, la fricción es mínima y es independiente de la rugosidad. Una situación excepcional es cuando una superficie rugosa tiene un coeficiente de fricción mayor que una lisa, lo cual sucede cuando un cuerpo rugoso duro se desliza sobre uno más suave, aquí las asperezas de la superficie rugosa no le permiten desplazarse dentro de la superficie suave y, cuando el deslizamiento ocurre, un área mucho mayor de la superficie suave es compartida que la representada por el área real Ar.

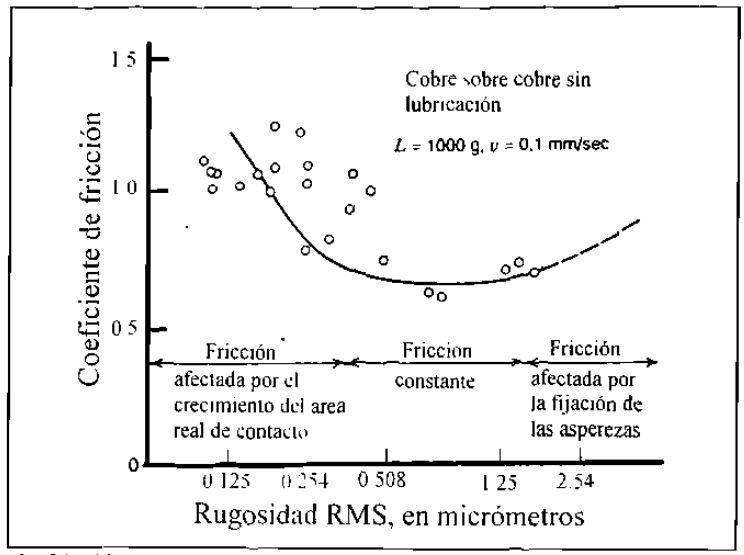


Fig. 1.3 Gráfica de la fricción contra rugosidad, cobre sobre cobre sin lubricación, se muestra una región con pendiente negativa causada por el excesivo crecimiento de uniones y una región con pendiente positiva causada por la fijación de asperezas, entre estas regiones la fricción es independiente de la rugosidad [1].

La débil dependencia de la fricción sobre una superficie rugosa es de esperarse (Fig. 1.3), ya que la fuerza de fricción sólo realiza una pequeña cantidad de trabajo en levantarse sobre la rugosidad de la superficie y la mayor parte del trabajo se aprovecha en inducir un desplazamiento cortante en la interfase de la unión [1].

1.5 LA FRICCIÓN Y LA VELOCIDAD

El coeficiente de fricción disminuye al aumentar la velocidad de deslizamiento, este fenómeno conduce a una condición conocida como amortiguamiento negativo, el cual hará que el sistema mecánico vibre con su frecuencia natural, debido a que las oscilaciones causadas por el mismo sistema hacen que éste entre en resonancia. A este comportamiento también se le conoce como vibración de resbalamiento adhesivo [2], (Fig. 1.4).

El coeficiente de fricción es independiente de la velocidad si ésta es lo suficientemente baja como para no afectar la temperatura de la superficie. Pero a bajas velocidades, el coeficiente de fricción puede comenzar a aumentar dependiendo del sistema que se analiza, un ejemplo es cuando el acero se desliza sobre metales suaves como el plomo o el indio (Fig. 1.5), pero a altas velocidades el coeficiente de fricción empieza a disminuir.

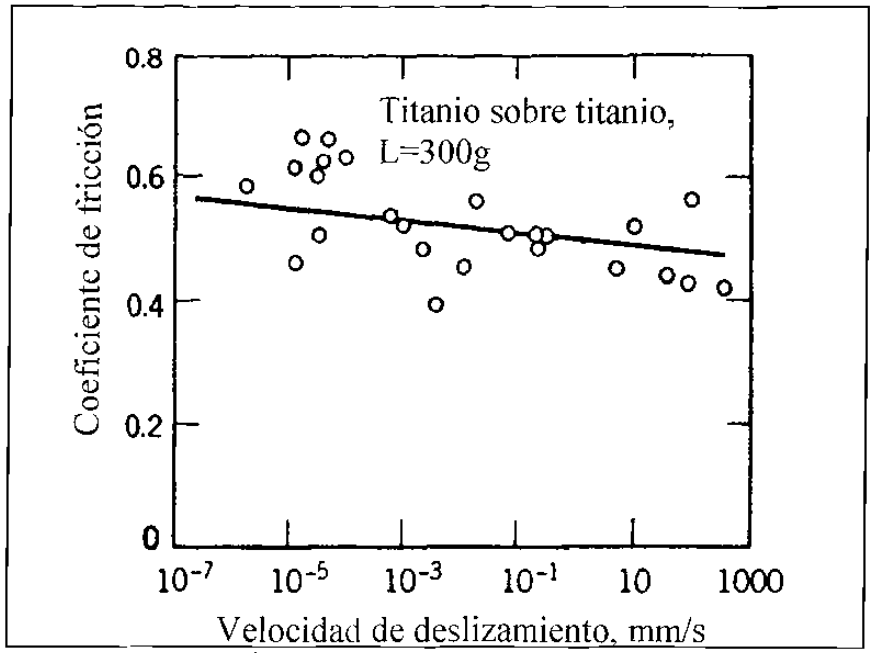


Fig. 1.4 Gráfica del coeficiente de fricción contra velocidad tiene una pendiente negativa para materiales duros, durante un amplio intervalo, sin lubricación [1].

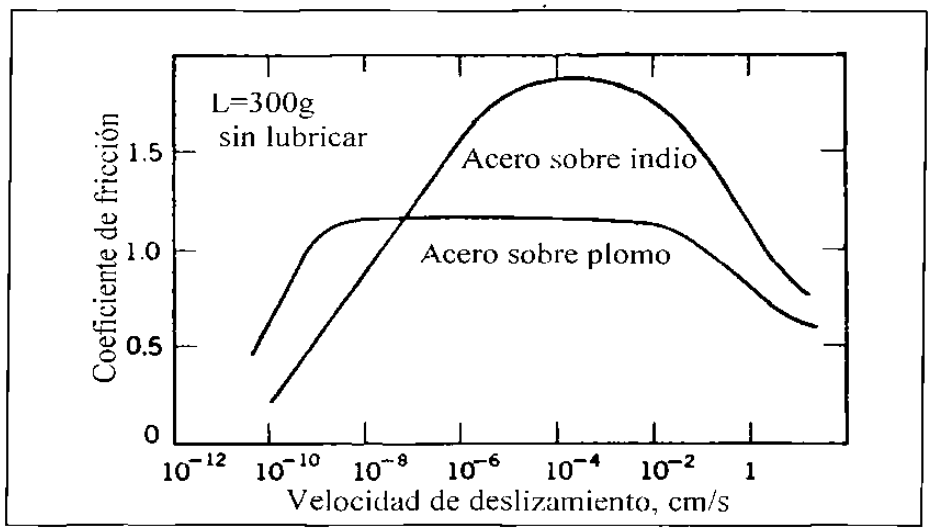


Fig. 1.5 Gráfica del coeficiente de fricción contra velocidad, en la cual a bajas velocidades se tiene una pendiente positiva y a altas velocidades se tiene una pendiente negativa, debido al gran contraste en dureza de los materiales que forman el sistema de deslizamiento [1].

Cuando se considera un lubricante entre la interfase de los materiales, existe un efecto directo de la rugosidad y de la velocidad sobre los coeficientes de fricción (Fig. 1.6), conforme aumenta la velocidad cambian las condiciones de lubricación (Capítulo 2) y, al tener una rugosidad mayor, el coeficiente de fricción también es apreciablemente mayor al compararlo con una superficie lisa. Es por eso que, las llantas de los automóviles son mejores con superficies rugosas que lisas sobre un piso mojado.

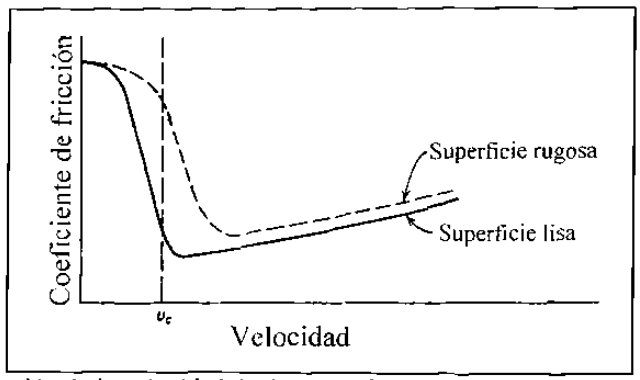


Fig. 1.6 Fricción en función de la velocidad de dos superficies de acero que se deslizan con un lubricante líquido. A velocidades cerca de v_c, la superficie lisa tiene menor fricción (lubricación completa), mientras que la rugosa tiene mayor fricción (lubricación límite o de frontera), [1].

1.6 FRICCIÓN EN EL FORMADO DE METALES.

El proceso de formado de metales se puede ver desde el punto de vista de un sistema total (Fig. 1.7). La zona de deformación es la parte más importante del proceso, donde se toma en cuenta la distribución del esfuerzo, deformaciones y velocidad de las partículas y sobre todo la carga requerida para llevar a cabo el proceso.

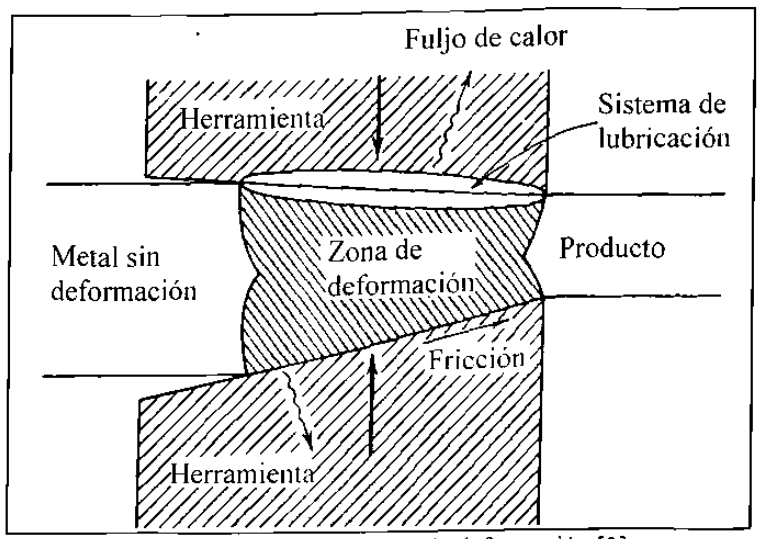


Fig. 1.7 Sistema del proceso de deformación [3].

La expresión necesaria para describir los esfuerzos de formado en cualquier proceso particular de formado de metales consiste principalmente de tres términos:

$$p = \sigma_0 g(f) h(c) \qquad [1.1]$$

donde:

σ_0 = la resistencia a fluir del material para el estado de esfuerzos apropiado, por ejemplo, uniaxial, deformación plana. etc. Ésto es una función de la deformación, temperatura y rapidez de deformación.

g(f)= una expresión para la fricción en la interfase entre la herramienta y la pieza de trabajo.

h(c)= una función de la geometría de la herramienta y la geometría de la deformación. Este término puede o no incluir una expresión del trabajo redundante.

Es por eso que las fuerzas de fricción desarrolladas entre la pieza de trabajo y las herramientas de formado son una consideración de gran importancia dentro de los procesos de formando de metales. [3]

1.7 COEFICIENTE DE FRICCIÓN COULÓMBICA

El coeficiente de fricción μ que fue propuesto por los primeros investigadores de la fricción. entre los cuales se encuentra Amontons (1699), Coulomb (1699) y Morin (1833). Se conoce como coeficiente de fricción Coulómbica. Estos científicos e ingenieros tenían como hipótesis que la fricción era debida al bloqueo entre las asperezas de las superficies de los materiales en contacto y así fue como explicaron que la fuerza de fricción es proporcional a la carga normal y es independiente del área de contacto. Esta explicación al fenómeno de la fricción se conoce como la hipótesis de rugosidad [1].

Si se supone que la fricción obedece la ley de Coulomb, se tiene la siguiente expresión:

$$\tau = \mu p \qquad [1.2]$$

El esfuerzo tangencial τ en cualquier punto de la superficie es proporcional a la presión p entre los dos cuerpos y tiene una dirección opuesta a la del desplazamiento relativo de éstos. El coeficiente de fricción μ es considerado como constante para una herramienta y material específico (para condiciones de una superficie y temperatura constante) y se dice que es independiente de la velocidad [4], Fig. 1.8.

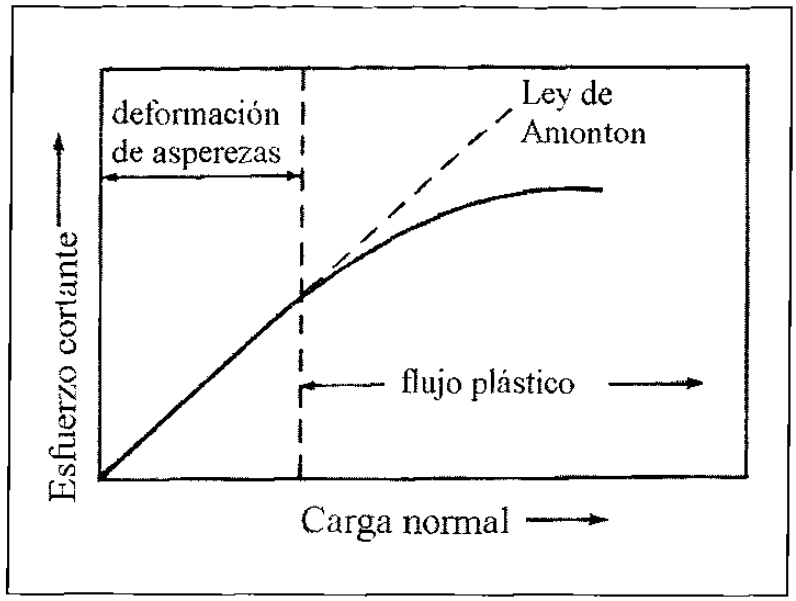


Fig. 1.8 Gráfica que muestra la proporcionalidad entre la fuerza de fricción y la carga normal [6].

1.8 FACTOR DE FRICCIÓN

El factor cortante de fricción interfasial (m) es uno de los métodos más aceptables para evaluar cuantitativamente la fricción en la interfase entre la herramienta y la pieza de trabajo [5]. Este factor es introducido a partir del análisis de esfuerzos de acuerdo al criterio de cedencia de von Mises [4] con el cual se obtiene que el máximo esfuerzo cortante que un material puede resistir, está dado por la expresión:

$$\tau = \frac{\sigma_0}{3} \qquad [1.3]$$

Lo anterior se presenta cuando el factor de fricción es 1, lo cual corresponde a fricción adhesiva. Si se considera que el factor de fricción es igual a cero cuando se presenta un caso sin fricción, entonces se llega a la expresión:

$$\tau = m\frac{\sigma_0}{3} \qquad [1.4]$$

Es por eso que los límites de m son: $0 \leq m \leq 1$.

1.9 RELACIÓN ENTRE μ Y m

Aunque el coeficiente de fricción Coulómbica μ y el factor de fricción cortante interfasial m no tienen una aceptación universal [5], para casos generales, cualquiera de los dos describe bien el comportamiento de la fricción, uno o el otro puede dar mejores resultados para un caso en particular. Es por eso que existe la necesidad de relacionarlos con el fin de conocer estas diferencias y ésto se logra al igualar sus ecuaciones, obteniendo a la expresión:

$$\mu = \frac{m}{3} \qquad [1.5]$$

CAPÍTULO 2

LUBRICANTES

2.1 INTRODUCCIÓN

Un lubricante es introducido entre dos sólidos que se deslizan y puede consistir en un sólido, líquido o gas que se introduce en la interfase de las superficies con el fin de reducir la fricción, el desgaste o disipar calor. El proceso de lubricación puede tomar diferentes formas, dependiendo de la geometría de las superficies en contacto. la rugosidad y la textura de las superficies en deslizamiento, la carga de contacto, la presión y temperatura, la velocidad de rodamiento o deslizamiento, condiciones ambientales, las propiedades físicas y químicas del lubricante, la composición del material y las propiedades de la capa superficial [6]. Se puede decir que un lubricante es una sustancia capaz de alterar la naturaleza de la interacción superficial entre dos sólidos en contacto.

2.2 REGÍMENES DE LUBRICACIÓN

El término de lubricación se aplica a dos diferentes situaciones, una es cuando el fluido lubricante separa completamente las superficies deslizantes, lo cual se conoce como lubricación fluida o completa, la otra situación es cuando hay contacto directo entre las superficies deslizantes lo cual se conoce como lubricación límite o de frontera. (Fig. 2.1).

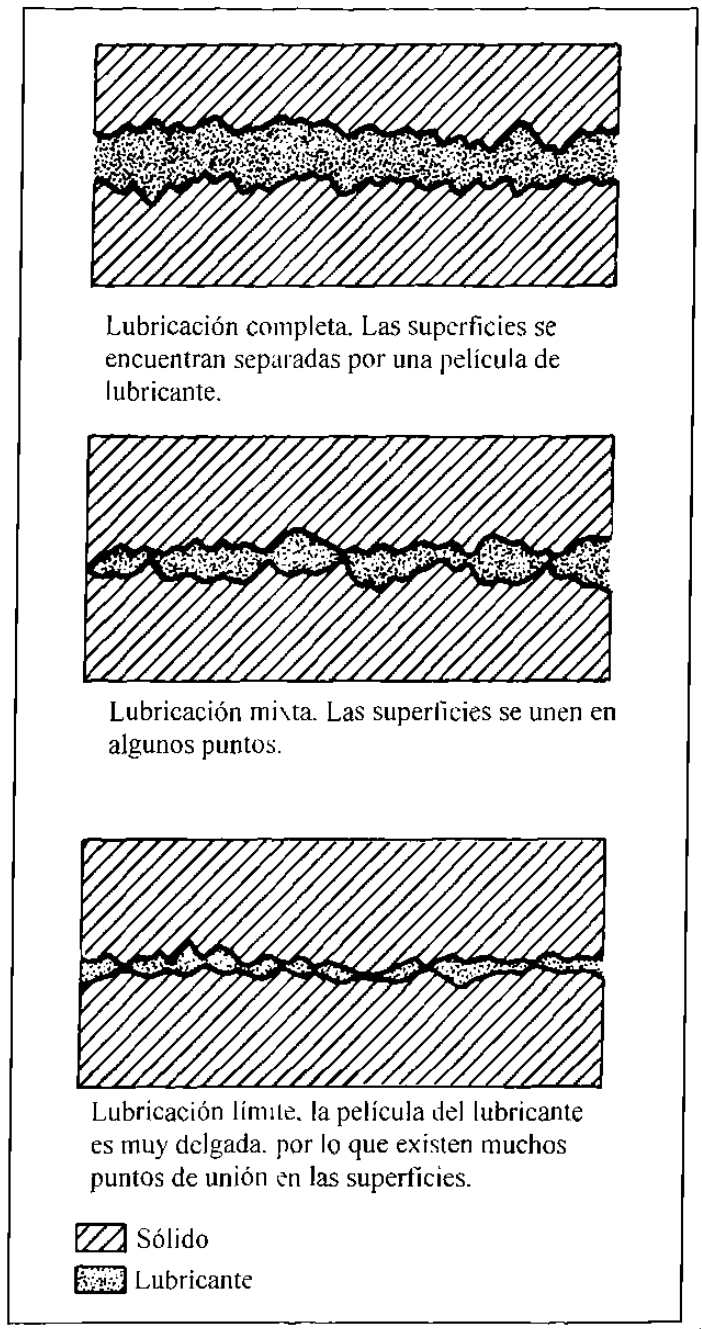


Fig. 2.1 Espesores de la capa lubricante de acuerdo al régimen de lubricación [6].

La lubricación fluida o completa se puede dividir en lubricación hidrostática, en la que se utiliza un lubricante presurizado con el fin de crear una delgada capa de lubricante, la lubricación hidrodinámica, en la cual la capa de lubricante se crea por la acción del deslizamiento (o rodado) a altas velocidades, y la lubricación elastohidrodinámica, en la cual la presión en la capa de fluido es lo suficientemente grande como para producir deformación elástica o plástica en las superficies del sólido (Fig. 2.2).

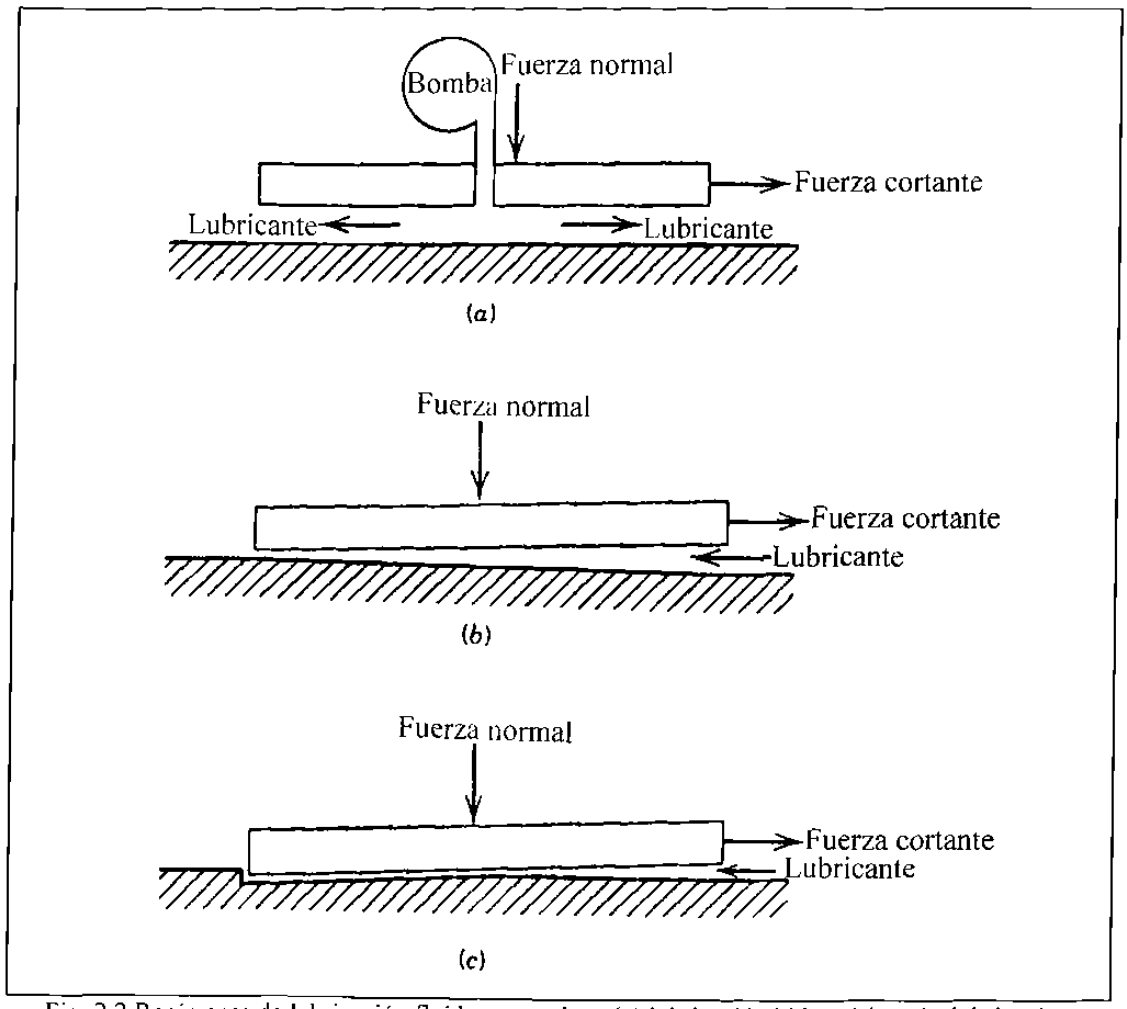


Fig. 2.2 Regimenes de lubricación fluida o completa, (a) lubricación hidrostática, (b) lubricación hidrodinámica, y (c) lubricación elastohidrodinámica [1].

La lubricación fluida o completa está gobernada por las propiedades mecánicas del fluido. Existe un régimen de lubricación intermedio entre la lubricación completa y la límite y se conoce como lubricación mixta. La transición de lubricación límite a lubricación completa está en función de la velocidad de corte existente en el fluido (Fig. 2.3). Otra situación en la que las dos superficies se encuentran separadas por una película lubricante, pero en este caso sólida, se conoce como lubricación sólida.

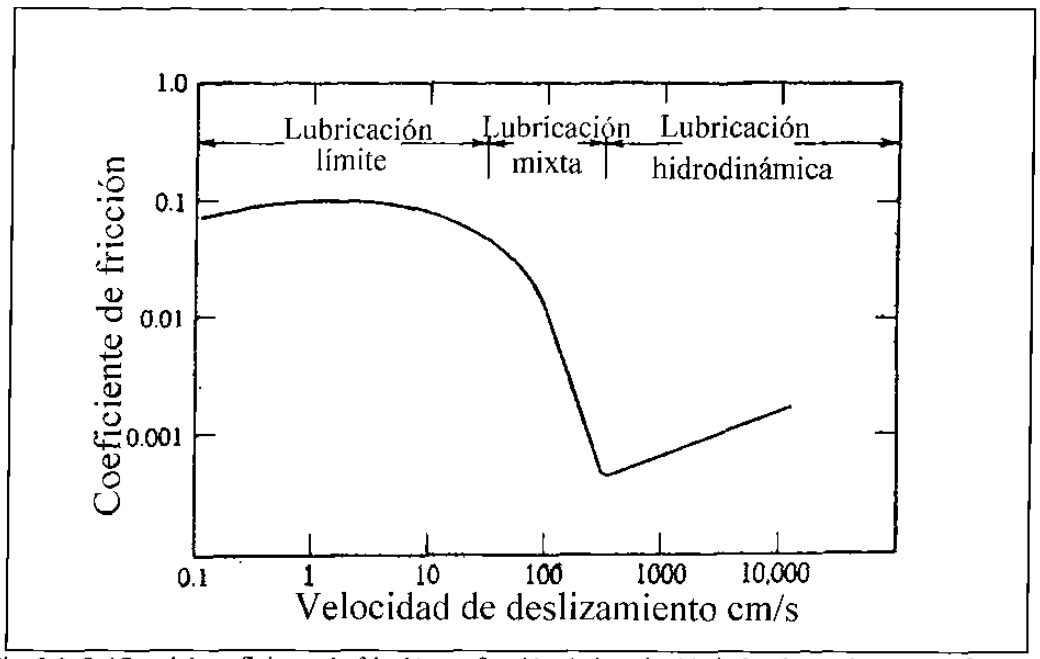


Fig. 2.3 Gráfica del coeficiente de fricción en función de la velocidad, donde se observan diferentes regímenes de lubricación en superficies capaces de desarrollar lubricación hidrodinámica [1].

2.3 LUBRICANTES LÍQUIDOS

Los lubricantes líquidos de uso más frecuente son los que se basan en fracciones de petróleo refinado o en fluidos sintéticos. Los lubricantes derivados del petróleo se preparan mediante varios procesos disponibles para refinación a partir de hidrocarburos naturales. Los tipos principales del petróleo crudo son el parafínico y el nafteínico, términos que se refieren a la estructura molecular de los componentes preponderantes. Se suele preferir como lubricantes a los petróleos parafínicos, aún y cuando los nafteínicos conservan un lugar importante en ciertas aplicaciones.

Con el fin de modificar o resaltar ciertas características de los lubricantes líquidos se le agregan productos químicos conocidos como aditivos. Sus concentraciones pueden variar desde unas cuantas partes por millón hasta porcentajes apreciables.

Con el fin de caracterizar los lubricantes se realizan pruebas físicas, químicas y de rendimiento. Las pruebas físicas usuales incluyen mediciones de la viscosidad, densidad, punto de fluidez, gravedad específica, punto de inflamación y de combustión,

olor y color. Las pruebas químicas están pensadas para dilucidar la composición, incluyendo la determinación del contenido de los aditivos. Estas pruebas incluyen la medición de varios elementos que se encuentran en los aditivos, así como pruebas de acidez y residuos de carbono. Las pruebas de rendimiento están dirigidas a la evaluación de aspectos particulares del comportamiento en servicio, como la estabilidad respecto a la oxidación, protección contra la herrumbre, facilidad de separación del agua, resistencia a la formación de espuma, propiedades para reducir el desgaste y propiedades a presiones extremas. Todas estas pruebas acerca del rendimiento constituyen un reconocimiento de hecho de que las simples pruebas físicas y químicas no pueden definir por completo el comportamiento en servicio.

2.4 LUBRICANTES SÓLIDOS

Los lubricantes sólidos son materiales con propiedades de baja resistencia al corte. Éstos son utilizados donde quiera que no se pueda mantener una película hidrodinámica de aceite. Este mecanismo de lubricación no depende de una propiedad única del lubricante, es una interdependencia de la superficie, de la composición del lubricante sólido, de la geometría de las partículas, de la superficie del metal y de la naturaleza de los procesos que ocurren en o cerca de las superficies de soporte.

Los materiales típicos de éstos son el grafito, el bisulfuro de molibdeno (MoS_2), y el politetrafluoroetileno (PTFE). Pueden utilizarse en polvos en forma natural, o dispersados en fluidos (aceites, agua) y grasas, o pueden añadirse a aglutinantes como los pigmentos a la pintura y emplearse como lubricantes ligados de película seca.

En el grafito, una forma cristalina del carbono, la distancia entre átomos dentro de la red hexagonal es de 1.42 Å, pero entre las laminillas la separación es tanta como 3.35Å. Bajo esfuerzo cortante hay fuerzas intensas dentro de las laminillas, pero las fuerzas entre las laminillas son mucho más débiles, permitiendo que se deslicen una sobre otra (Fig. 2.4). El grafito se usa comúnmente a 425 °C (800 °F) e intermitentemente a 650 °C (1200 °F).

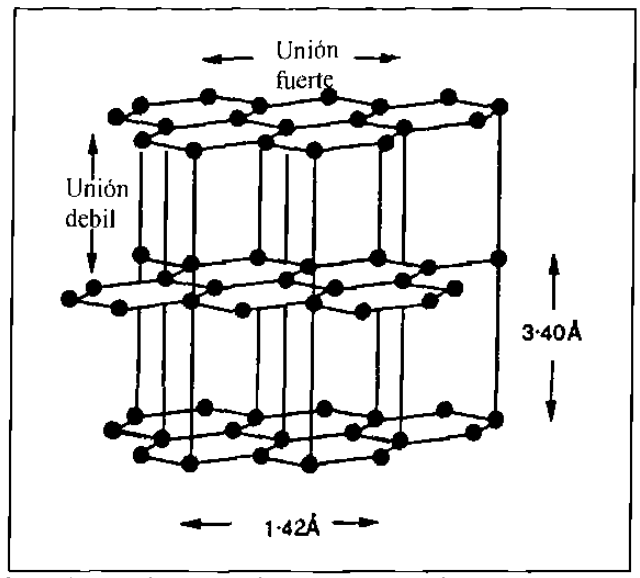


Fig. 2.4 Estructura de grafito. La laminillas individuales consisten en átomos empacados de manera compacta, separadas por una distancia relativamente larga de las laminillas adyacentes [6].

Como ningún plástico tiene una estructura molecular resistente o de naturaleza laminar, es por eso que son incapaces de tomar las características pesadas que lleva el grafito o el MoS_2. No obstante, el PTFE tiene el coeficiente de fricción más bajo de todos los lubricantes sólidos con cargas de hasta 1,760 kg/cm^2 (25,000 lb/in^2). El PTFE se comporta bien en el vacío y a temperaturas hasta de 315 °C (600 °F) a la cual comienza a descomponerse.

2.5 EMULSIONES

Las emulsiones son muy comúnmente utilizadas en el formado de metales, pequeñas gotas de aceite están finamente dispersas en agua y esta combinación de agua-aceite es usada como lubricante y refrigerante. En este tipo de emulsiones se dice que el aceite es la fase dispersa y el agua es la fase continua.

Las mezclas de aceite y agua son termodinámicamente inestables, ya que su estado de más baja energía es cuando se encuentran totalmente separados. Por esta razón se añaden emulsificadores para evitar que el aceite se separe del agua y así estabilizar la emulsión. Los emulsificadores se concentran en la interfase aceite-agua e inhiben la coalescencia de las gotas de aceite. Aún y con los emulsificadores el estado de más baja energía de la emulsión es la separación total, se dice que la emulsión se encuentra estabilizada cinéticamente.

Un ejemplo de un emulsificador es el oleato de sodio, el cual es un emulsificador aniónico, en la Fig. 2.5 se muestra su estructura (a), una forma esquemática de representarlo (b), y una emulsión estabilizada por éste (c).

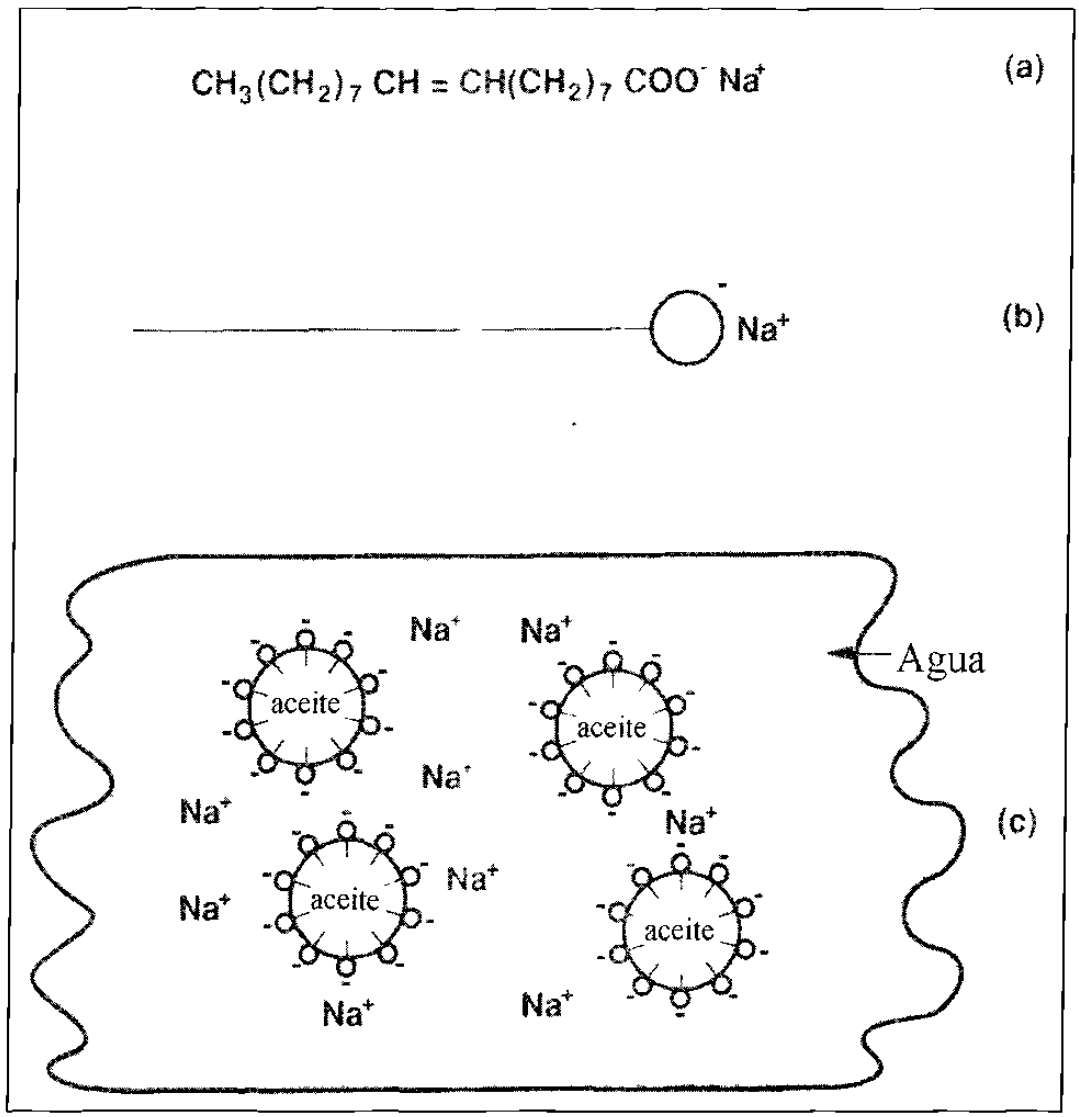


Fig. 2.5 Estructura del oleato de sodio (a), estructura representada esquemáticamente (b), emulsión de aceite y agua, estabilizada con oleato de sodio (c), [6].

Las cadenas de hidrocarbono del oleato de sodio son compatibles con las gotas de aceite y la cabeza carboxílica es compatible con el agua y permanece fuera de las gotas de aceite. La superficie de las gotas de aceite queda eléctricamente con carga negativa debido a la carga negativa de la cabeza carboxílica del oleato de sodio, y como cargas negativas tienden a repelerse. las gotas de aceite tienden a estar dispersas.

2.6 LUBRICANTES EN EL FORMADO DE METALES

Las funciones del lubricante en el procesado de metales son muy diversas, entre las cuales se encuentran: [3]

Reducir la carga de deformación.

Incrementar el límite de deformación antes de la fractura.

Controlar el acabado superficial.

Minimizar la adhesión de metal a la herramienta.

Minimizar el desgaste de la herramienta.

Aislar térmicamente la pieza de trabajo de la herramienta.

Refrigera la pieza de trabajo y la herramienta.

El lubricante debe de ser capaz de funcionar dentro de un rango amplio de carga, temperatura y velocidades de deslizamiento. Debe de tener buenas características de aspersión y mojado, así como compatibilidad con el material de la herramienta y la pieza de trabajo con el fin de evitar ataque químico. Un buen lubricante no debe de causar manchas en la pieza de trabajo durante tratamientos térmicos o procesos de soldadura subsecuentes y debe de ser fácil de remover de las superficies de la pieza de trabajo [3].

CAPÍTULO 3

LAMINACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

En la Fig. 3.1 se muestra de manera esquematizada la forma en que se lleva a cabo el proceso de conformación de la materia prima [7]. La materia prima se puede conformar por procesos con o sin cambio en volumen. En los procesos con cambio en volumen se pueden encontrar procesos de substracción y adición de materia (los maquinados son un tipo de proceso de substracción y la soldadura con aporte de metal es un tipo de proceso de adición de material). Dentro de los procesos sin cambio en volumen se mencionan por un lado los de flujo líquido (en el cual entran las fundiciones) y por el otro lado la deformación sólida en el cual entran procesos de los cuales destacan el laminado y la forja. La laminación es el proceso de deformar un metal plásticamente al pasarlo entre rodillos. Este proceso de compresión indirecta es uno de los procesos más ampliamente utilizados en el trabajado de metales ya que se obtiene una producción alta y un control muy cerrado del producto final. Si se clasifica el proceso de laminación de acuerdo a la temperatura de proceso, éste puede ser en caliente o en frío. De acuerdo a la continuidad del proceso, la laminación se clasifica como un proceso de estado estable, ya que la zona de deformación permanece constante en forma y tamaño [3].

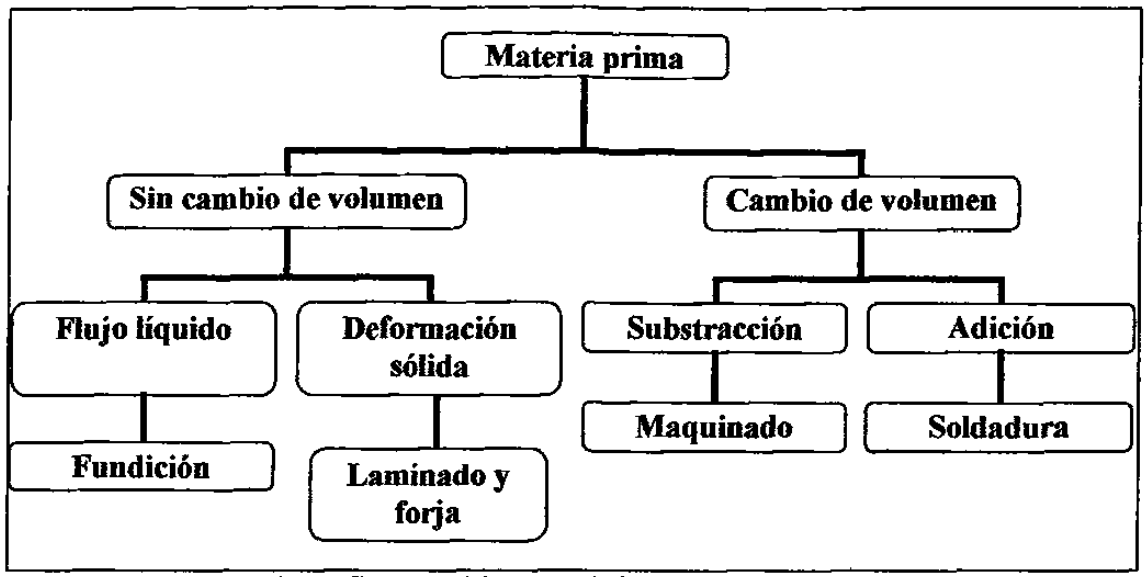


Fig. 3.1 Esquema del proceso de formado de metales [7].

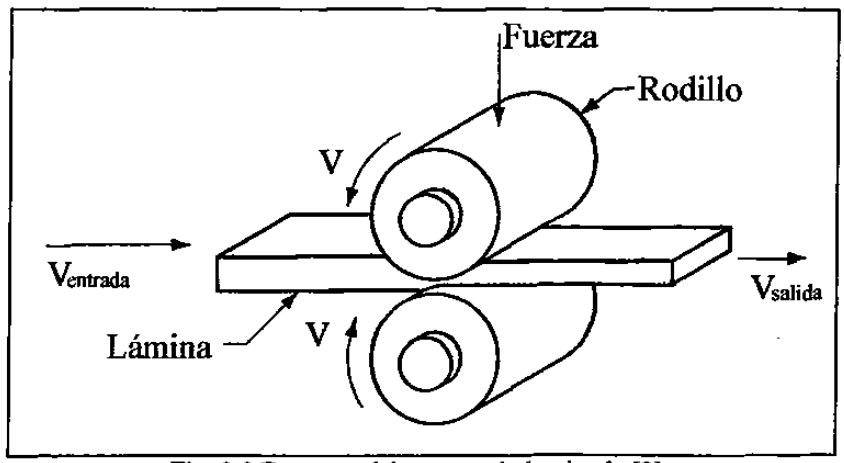


Fig. 3.2 Esquema del proceso de laminado [8].

3.2 HISTORIA

En sus inicios, el laminado se limitaba a trabajar con metales lo suficientemente dúctiles para ser trabajados en frío, como el oro y la plata, por lo que sólo tenía una aplicación en la joyería y en obras artísticas. El primer molino de laminación del cual se tiene conocimiento fue diseñado por Leonardo da Vinci en el año de 1480. Una contribución muy importante de Leonardo da Vinci fue el controlar la velocidad de avance en el tren de laminación y con esto disminuir la fuerza aplicada sobre los rodillos para realizar la laminación. Otra aportación a los principios de la laminación fue hecha por el Francés Brullier, quien produjo en el año de 1553 láminas de oro y plata de

espesor uniforme para acuñar monedas y dar formas estéticas a utensilios de distintas aplicaciones. Su elaboración se seguía efectuando manualmente [9].

Hacia finales del siglo XVI y principios del XVII se empezaron a producir láminas de hierro, teniendo conocimiento de un molino localizado en las cercanías de Bristol que, para el año de 1666, producía y seccionaba láminas de hierro, este molino utilizaba como fuente energética la corriente hidráulica que, mediante un tren de engranes, convertía la fuerza hidráulica en fuerza motriz para el proceso de laminación. En 1766 John Purnell patentó la primer laminadora que tenía la misma velocidad en ambos rodillos, esto se efectuaba relacionando los rodillos laminadores con un tren de engranes, dando a éstos las mismas velocidades angulares, cabe mencionar que anterior a esto la laminación se efectuaba sólo con la fuerza motriz de un rodillo, con la implementación de segundo rodillo con fuerza motriz al igual que el primero se obtenían mejores acabados y menores fallas en los materiales laminados [9].

El primer molino reversible apareció durante la Revolución Industrial en Inglaterra y para el año de 1854 laminó las placas destinadas al vapor "Great Eastern". El desarrollo de la revolución industrial afectó en forma directa en la utilización de nuevas fuentes de energía, manual (1480), hidráulica (1590), vapor (1798), eléctrica 1908 [9].

3.3 VENTAJAS DE LA LAMINACIÓN EN FRÍO

Existen varias ventajas que sobresalen considerablemente en el proceso de laminado en frío, una ellas es el buen acabado superficial que se puede obtener en la pieza de trabajo, ya que cuando se lamina en caliente se genera óxido sobre la superficie, esto es debido a que las temperaturas que se alcanzan en el laminado en caliente es alrededor de 0.6 la temperatura de fusión del material y aunque en el laminado se calienta el material muy por debajo de la temperatura de fusión, esta temperatura es suficiente para generar la difusión de carbono, y debido a esto es que se obtiene un mal acabado superficial, a diferencia de la laminación en frío, en la cual la temperatura máxima alcanzada es de alrededor de 100 °C debido a la fricción y a la deformación del material de trabajo.

Otra de las ventajas de la laminación en frió es que durante el proceso aumenta la resistencia mecánica debido a la deformación del material. Éste fenómeno se conoce como endurecimiento por deformación. Para eliminar los esfuerzos creados durante la deformación se puede aplicar al material un tratamiento térmico, el cual liberara los esfuerzos provocados por las dislocaciones. También se puede decir que una de las ventajas más importantes en la manufactura de materiales que son elaborados mediante el proceso de la laminación en frío es que mantiene un control muy estrecho sobre las dimensiones del producto final.

3.4 MOLINOS DE LAMINACIÓN

Un molino de laminación se compone básicamente de rodillos, chumaceras, una carcasa, para contener las partes, y un sistema de transmisión de engranes para suministrar la potencia requerida en los rodillos y para controlar la velocidad [10], (Fig. 3.3).

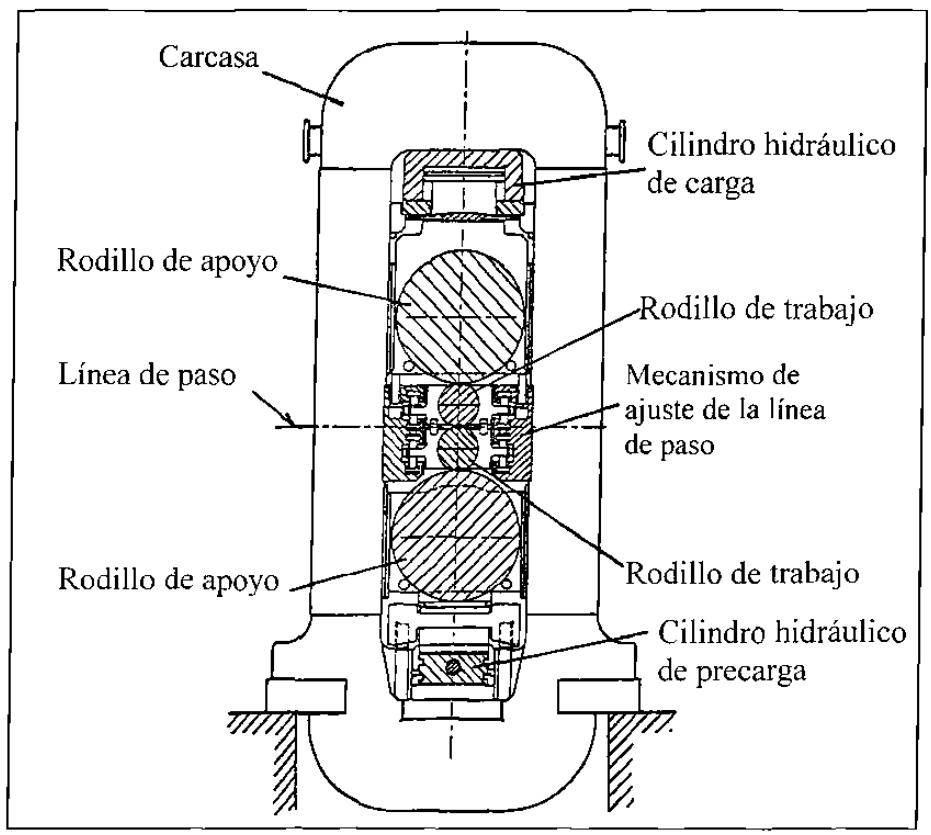


Fig. 3.3 Representación esquemática de un molino de laminación con sus partes principales [10].

Normalmente los molinos de laminación se pueden clasificar con respecto al número y disposición de los rodillos (Fig. 3.4), el más simple es el molino dúo (Fig. 3.4a), consistente en dos rodillos con las mismas dimensiones que rotan en una sola dirección, una gran mejoría en la productividad se logra con el molino dúo reversible (Fig. 3.4b) haciendo pasar la pieza de trabajo hacia delante y hacia atrás al invertir el sentido de rotación de los rodillos. El molino trío (Fig. 3.4c) consiste en dos rodillos con transmisión directa de potencia y un rodillo central el cual se mueve por la fuerza de fricción. El molino cuarto (Fig. 3.4d) consiste en dos rodillos de trabajo de diámetro pequeño y dos rodillos de apoyo de mayor diámetro, los rodillos de diámetro pequeño disminuyen considerablemente la potencia requerida, además de que se pueden procesar láminas delgadas con un control estrecho de las tolerancias en el espesor. En molino de rodillos en grupo (Fig. 3.4e) cada rodillo de trabajo es soportado por dos rodillos de apoyo y éstos a su vez son soportados por otros rodillos, se utiliza para fabricar láminas delgadas. Para altas producciones es común colocar una serie de molinos formando un tren de laminación (Fig. 3.4f) cada reducción en espesor es realizada por los castillos de laminación [3].

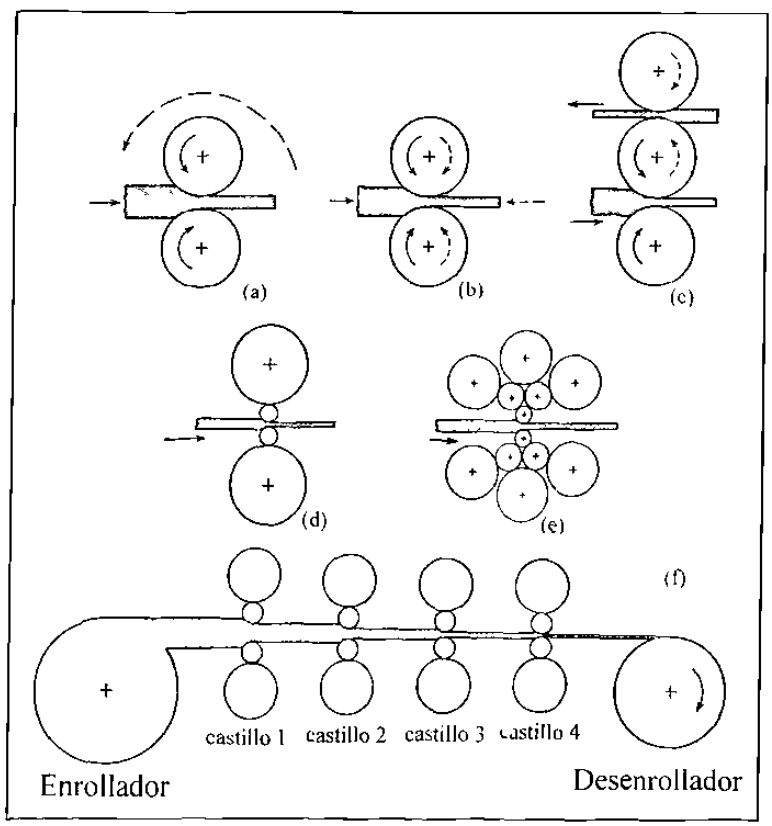


Fig. 3.4 Arreglos típicos de los rodillos en los molinos de laminación. Dúo (a), dúo reversible (b), trío (c), cuarto (d), rodillos en grupo (e), tren de laminación de cuatro castillos (f), [3].

3.5 ANÁLISIS DEL PROCESO

El análisis de esfuerzos en el procesado de metales ha sido un área muy activa durante los últimos 50 años. Como las fuerzas y deformaciones presentes son complejas, usualmente se realizan algunas consideraciones con el fin de simplificar el análisis. Entre estas consideraciones se puede mencionar que: (1) se desprecia la deformación elástica, sólo se considera la deformación plástica, (2) el material es isotrópico y homogéneo, el volumen del material permanece constante [11].

Los pasos principales a seguir para realizar el análisis matemático consisten en una serie de ecuaciones: (1) establecer las ecuaciones de equilibrio estático de fuerzas, (2) ecuaciones de Levy-Mises que relacionan la deformación con el esfuerzo de fluencia, (3) ecuaciones del criterio de cedencia específico seleccionado [11].

Los métodos de análisis más comunes se enuncian a continuación, en orden de complejidad (del más sencillo al más complejo) y en la capacidad de predecir detalles mas finos. (1) El método de rodaja. Supone deformación homogénea. (2) El método de energía de deformación homogénea. Es un método rápido que permite calcular esfuerzos promedio, a partir del trabajo plástico. (3) Teoría del campo de líneas de deslizamiento. Permite calcular esfuerzos punto a punto en condiciones de deformación plana. (4) Soluciones de límite superior e inferior. Basado en la teoría de un análisis limitado, esfuerzos razonables y campos de velocidades para calcular los límites dentro de los cuales se encontrará la carga del proceso de formado. (5) Método de elemento finito. Es una técnica basada en el método de matriz, la cual permite considerar una gran cantidad de incrementos de deformación para los materiales rígido-plásticos, con una considerable reducción en el tiempo de cálculo con la ayuda de computadoras [3].

En la Fig. 3.5 se muestra la relación existente entre la geometría de la zona de deformación en la laminación y las fuerzas presentes en ésta [3]. Una hoja de metal entra a los rodillos en el plano XX con un espesor inicial h_0 y velocidad υ_0, ésta pasa a través de los rodillos y sale en el plano YY con un espesor menor h_f y una velocidad υ_f. El

punto neutro N es donde la velocidad de la lámina es la misma que la velocidad tangencial del rodillo υ_r, también se conoce como punto de no deslizamiento. En cualquier punto a lo largo del arco de contacto, como en el punto A, actúan dos fuerzas sobre el metal, una fuerza radial P_r y una fuerza tangencial de fricción F. Entre el plano de entrada y el punto neutro la velocidad de la lámina es menor que la del rodillo y la fuerza de fricción actúa en la dirección mostrada en al Fig. 3.5. En el extremo de la salida del punto neutro la velocidad de la lámina es mayor que la del rodillo y la dirección de la fuerza de fricción es opuesta a la del desplazamiento de la lámina.

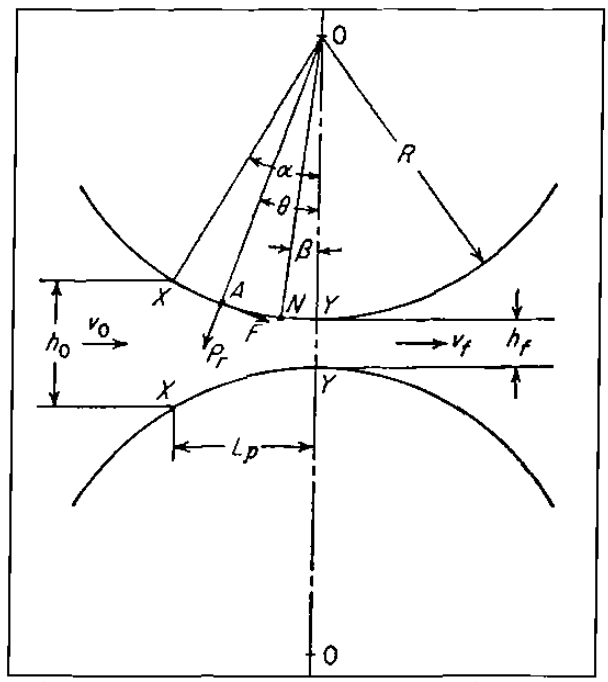


Fig. 3.5 Fuerzas que actúan durante el laminado [3].

El componente vertical de P_r es conocido como carga de laminado P, es la fuerza con la cual los rodillos presionan el metal y por reacción es la fuerza ejercida por el metal sobre los rodillos, por lo que es también conocida como la fuerza de separación. El esfuerzo específico de laminación (p) es la fuerza de laminado (P) dividida entre el área de contacto, esta área es el producto del ancho de la lámina (b), por la longitud proyectada por el arco de contacto (L_p):

$$p = \frac{P}{bL_p} \qquad [3.1]$$

Al graficar la distribución del esfuerzo del laminado a lo largo del arco de contacto (Fig. 3.6), el área bajo la línea punteada AB representa la carga total necesaria para deformar la lámina, desde la entrada hasta la salida de la lámina, la carga aumenta debido al endurecimiento por deformación de la lámina. El área achurada representa la carga debido a la fricción y aumenta lo largo del arco de contacto llegando al máximo en el punto neutro para después disminuir, por la forma que tiene gráficamente se le conoce como la colina de fricción. Se puede ver que la carga requerida para deformar el metal y la requerida por la fricción es muy similar y es por eso que la fricción tiene una influencia muy alta sobre la potencia, requerida en el proceso de laminación, así como en el grado de deformación alcanzado y estabilidad operacional [3].

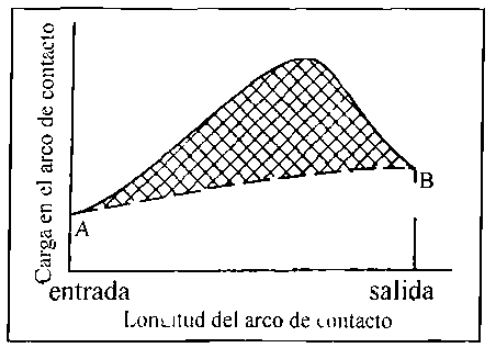


Fig. 3.6 Distribución de la carga de laminación a lo largo del arco de contacto [3].

El ángulo α entre el plano de entrada y la línea central de los rodillos (Fig. 3.5), es llamado ángulo de contacto o ángulo de la mordida y sirve para establecer la limitante de que no se podrá realizar el proceso de laminación si la tangente del ángulo de contacto es mayor que el coeficiente de fricción [6].

3.6 LUBRICACIÓN EN LA LAMINACIÓN

El lubricante se aplica en la entrada del proceso y las capas de lubricante se adhieren tanto a la superficie de la lámina como a la del rodillo y se mueve hacia adentro de la zona de deformación hasta la salida. En la entrada se forma una capa de lubricante en forma de cuña, las capas exteriores de esta cuña se mueven hacia adentro y en las capas internas se crea un retorno del flujo (Fig. 3.7), a bajas velocidades de laminación la cuña formada en la zona de entrada es muy pequeña y al incrementar la velocidad de laminación o la viscosidad del lubricante, la cuña aumenta en espesor y profundidad. Las

superficies (Fig. 3.7b) de la lámina y de los rodillos no son perfectamente lisas, ya que contienen irregularidades en forma de picos (o crestas) y valles (cavidades), por lo que algo de lubricante pasa de la entrada a la salida a través de estas irregularidades, pero al ser deformada la lámina a baja velocidad, éstas irregularidades son aplanadas y el lubricante es forzado a regresar a la entrada de la zona de deformación. A altas velocidades el lubricante es forzado hacia la salida de la zona de deformación, causando una separación entre la lámina y los rodillos (Fig. 3.8), así el proceso entra en un sistema de lubricación completamente hidrodinámico, evitando el contacto metal - metal [6].

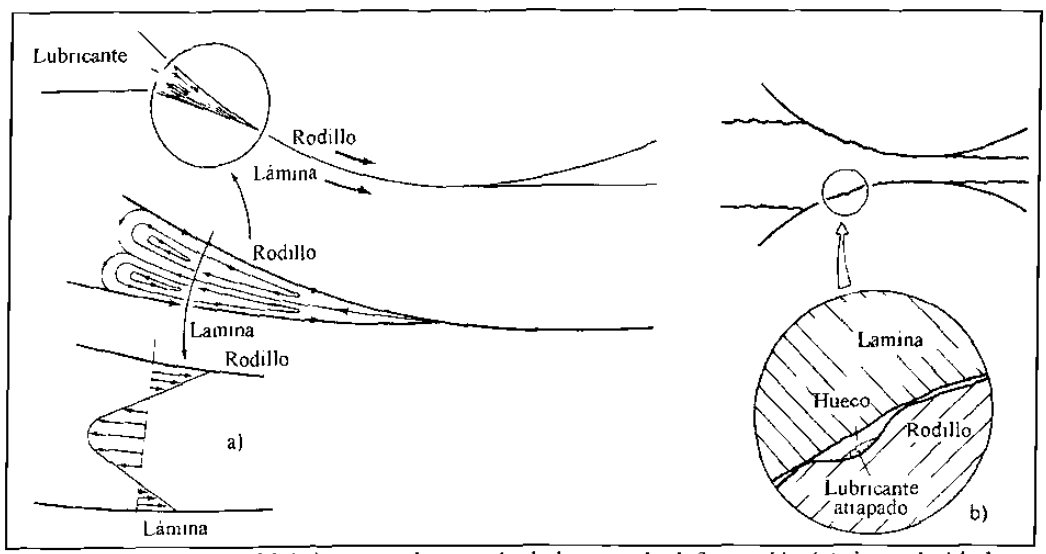


Fig. 3.7 Cuña formada por el lubricante en la entrada de la zona de deformación (a), irregularidades en las superficies de rodillos y lámina (b), [6].

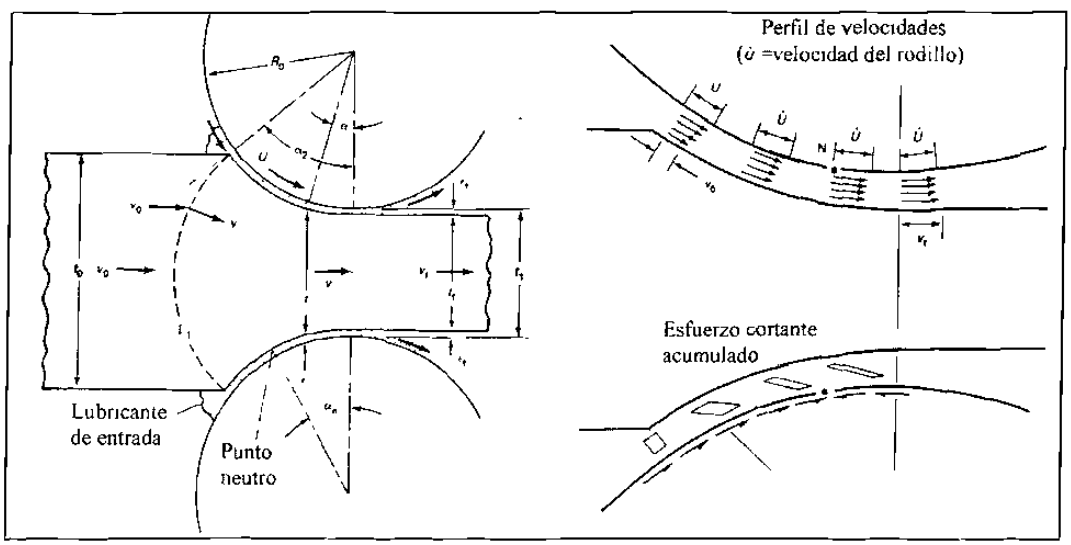


Fig. 3.8 Lubricación hidrodinámica en la laminación, representada en forma esquemática (a), esfuerzos cortantes en la capa lubricante (b), [6].

Cuando se alcanza lubricación hidrodinámica el coeficiente de fricción es mínimo y al aumentar la velocidad el efecto de la colina de fricción se reduce, así como la fuerza de separación. Al reducir la fuerza de separación se reduce la deformación elástica de la carcasa del molino, la flexión y la planeza de los rodillos al igual que el claro entre rodillos. Cuando se incrementa el espesor de la capa lubricante se reduce el espesor de la lámina en la salida y el claro entre rodillos es más grande que el espesor de la lámina por dos veces el espesor de la capa lubricante [6]. Como el arrastre de la fuerza de fricción decrece con el incremento de la velocidad el punto neutro se mueve hacia la salida de la zona de deformación reduciéndose el deslizamiento hacia delante (Fig. 3.9).

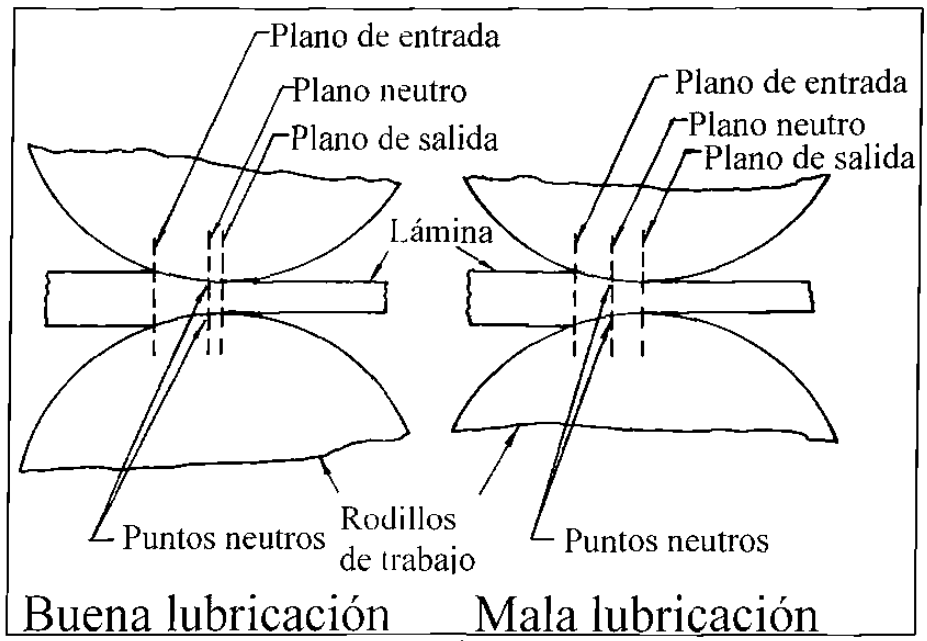


Fig. 3.9 Variación de la colina de friccion con la velocidad [9].

Esto se puede ver directamente en el modelo matemático de Bland y Ford, en el cual al variar el coeficiente de fricción μ, se pude ver el corrimiento de la colina de fricción, en la Fig. 3.10 se muestra una gráfica obtenida por un programa computacional basado en la teoría de Bland y Ford, para tres diferentes coeficientes de fricción [12].

Existen dos puntos críticos, el primero es cuando el sistema se patina debido a que el arrastre de la fuerza de fricción es insuficiente para realizar el laminado y el segundo es cuando se alcanza el régimen de lubricación hidrodinámica. Si la lámina es lo suficientemente delgada se alcanza primero la lubricación hidrodinámica y el sistema no patinará. Al seguir aumentando la velocidad después de alcanzar lubricación

hidrodinámica, cuando la fricción y el deslizamiento hacia delante alcanzan sus valores mínimos, comienzan a incrementarse (líneas 1-4, Fig. 3.11). Al ir aumentando el espesores de la lámina (líneas 2-4, Fig. 3.11), el deslizamiento hacia delante decrece y es mayor la velocidad de laminado en la que el ángulo neutro y el deslizamiento hacia delante alcanzan sus valores mínimos. La velocidad a la que se alcanza la lubricación hidrodinámica es mayor cuando se incrementa el espesor de la lámina. Existe un valor del espesor de lámina crítico, en el cuál se alcanza la lubricación hidrodinámica cuando el deslizamiento hacia delante y el ángulo neutro son cero (línea 4, Fig. 3.11). Cuando el espesor de la lámina es mayor que ese valor crítico (líneas 5-7, Fig. 3.11), la fricción alcanza valores por debajo del mínimo requerido para llevar a cabo la laminación, antes de alcanzar la lubricación hidrodinámica y el sistema empieza a patinar a la velocidad crítica [6].

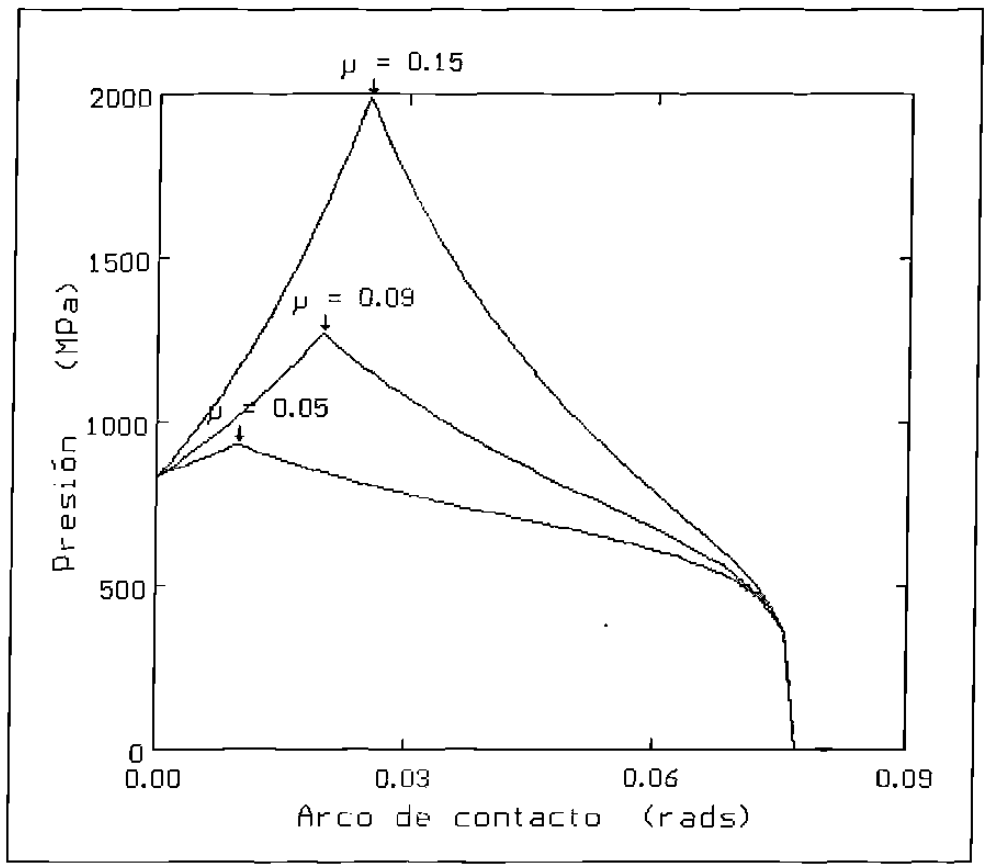


Fig. 3.10 Gráfica obtenida con un programa computacional basado en la teoría de Bland y Ford, se observa el corrimiento de la colina de fricción para distintos coeficientes de fricción [12].

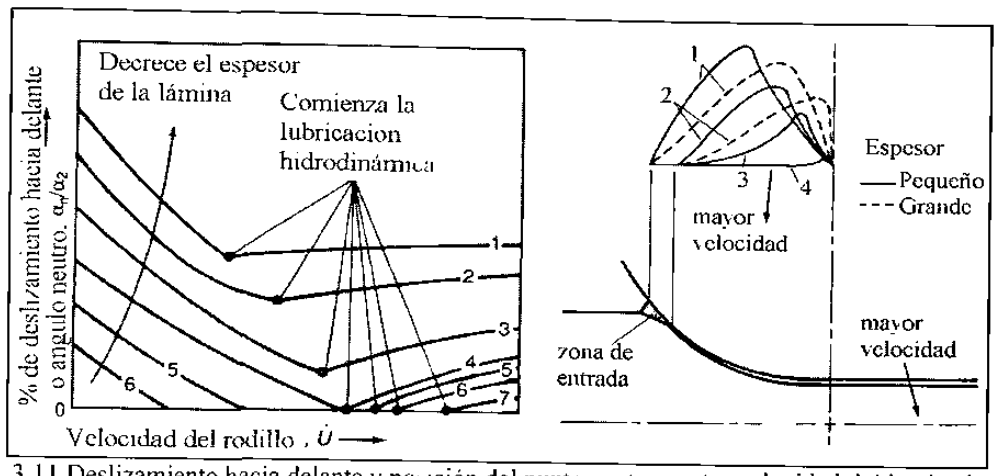


Fig. 3.11 Deslizamiento hacia delante y posición del punto neutro contra velocidad del laminado (a), variación de la colina de fricción con la velocidad (b), [6].

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

La prueba de compresión de anillos es una técnica empleada para determinar el coeficiente de fricción (μ) o el factor de fricción cortante interfasial (m). La prueba consiste en comprimir una probeta en forma de anillo con una relación de dimensiones de diámetro externo, diámetro interno y espesor fija, que, en el caso particular de este proyecto fue de 6:3:2, (Fig. 4.1). Esta técnica se basa en la medición de los cambios en geometría del anillo en deformación y no en las propiedades mecánicas del metal [13].

Se pueden aplicar una gran cantidad de condiciones de prueba, como son temperatura, cantidad de deformación, velocidad de deformación, lubricante, acabado superficial de las caras del anillo, etc. Los valores obtenidos mediante este método tienen una buena correlación con los datos que se disponen de observaciones de procesos de formado de metales en la industria. La ventaja principal de esta prueba, al hacer estudios de fricción a altas temperaturas y altas velocidades de deformación, es que no se requiere medir fuerza ni esfuerzos de cedencia [13]. Una desventaja es que se necesita un método de calibración independiente, que se obtiene mediante el análisis de la prueba. El factor de fricción se determina mediante las curvas de calibración de la fricción (Fig. 4.2) y los valores medidos del porcentaje de cambio en el diámetro interno del anillo y el porcentaje de cambio en el espesor del anillo ensayado [3].

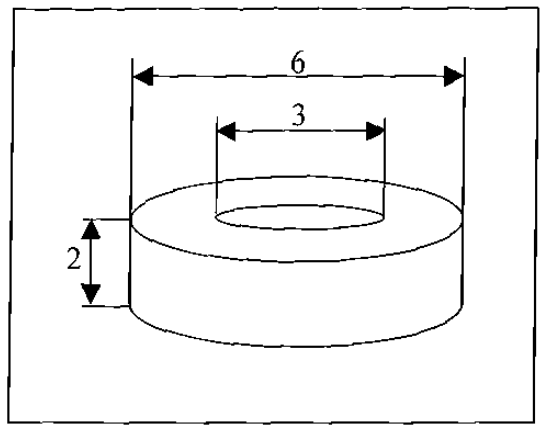


Fig. 4.1 Anillo con una relación de dimensiones de diámetro externo, diámetro interno y espesor de 6:3:2.

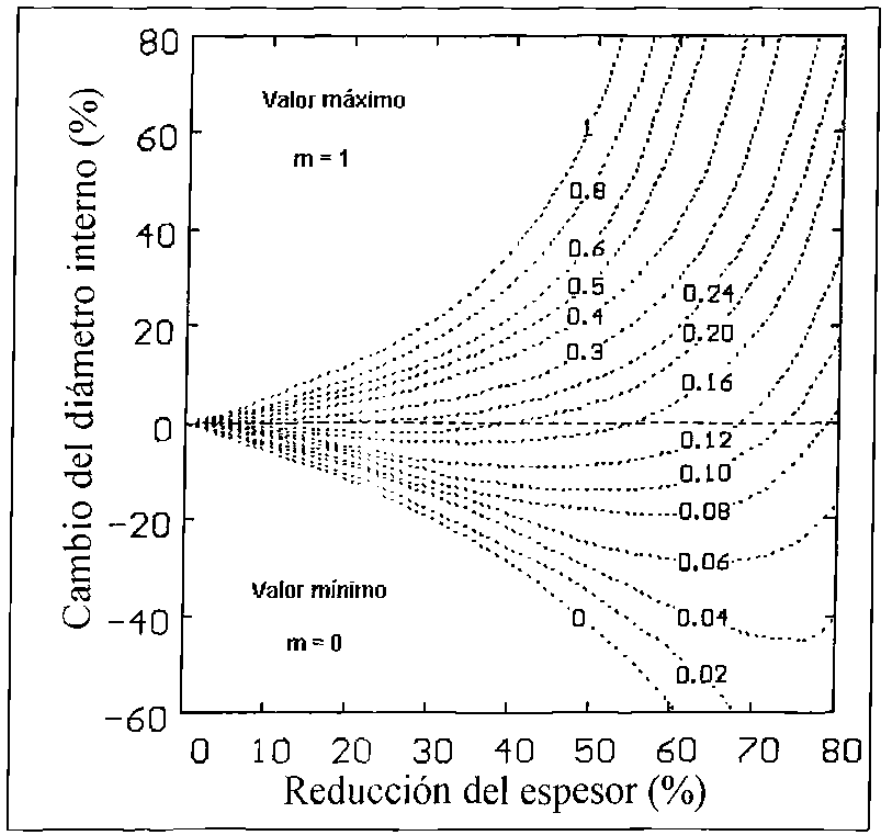


Fig. 4.2 Curva de calibración para una anillo de geometría 3:6:2 [14].

La primer curva de calibración de fricción fue obtenida experimentalmente por Male y Cockcroft [14], suponiendo un coeficiente de fricción (μ) constante. Los análisis obtenidos por Avitzur [3] y por Hawkyard y Jonson [14] suponen el factor de fricción cortante interfasial (m) constante. Por sensibilidad de medición y facilidad de experimentación es común utilizar anillos con una relación de dimensiones de diámetro externo. diámetro interno y espesor de 6:3:2, por lo que se ha adoptado como una geometría estándar no oficial [14]. Las curvas de calibración de fricción se pueden

obtener mediante análisis matemáticos auxiliados por computadora, como el método de elemento finito.

A bajos valores de m el diámetro interno (Ri) crece, en cambio, a altos valores de m el diámetro interno se reduce, lo que se debe al corrimiento del radio neutro (Rn), éste se puede definir como el radio en el cual la fricción es cero, ya que no hay movimiento relativo entre el material y la superficie, para radios mayores a Rn la fricción actúa en forma radial hacia el centro del anillo y para radios menores a Rn la fricción actúa en forma radial hacia fuera del anillo (Fig. 4.3). En algunos casos el radio neutro se encuentra dentro del diámetro interno (buena lubricación) y, en otros casos, se localiza entre los radios del anillo (mala lubricación). Cuando Rn ≤ Ri, la posición del radio neutral (Rn) pude ser determinada por la siguiente expresión:

$$\left(\frac{Rn}{Ro}\right)^2 = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{1-(Ri/Ro)^4 x^2}{\sqrt{x(x-1)[1-(Ri/Ro)^4 x]}} \qquad [4.1]$$

donde:

$$x = \left\{\frac{Ro}{Ri}\exp\left[-m\frac{Ro}{T}\left(1-\frac{Ri}{Ro}\right)\right]\right\}^2 \qquad [4.2]$$

Ri = radio interno
Ro = radio externo
T = espesor del anillo

Cuando Ri ≤ Rn ≤ Ro, la posición del radio neutral se encuentra con aproximaciones sucesivas de la expresión:

$$2m\frac{Ro}{T}\left(1+\frac{Ri}{Ro}-2\frac{Rn}{Ro}\right)+\ln\left|\left(\frac{Ri}{Ro}\right)^2\frac{(Rn/Ro)^2+\sqrt{3+(Rn/Ro)^4}}{(Rn\ \ Ro)^2+\sqrt{3(Ri/Ro)^4+(Rn/Ro)^4}}\right|=0 \qquad [4.3]$$

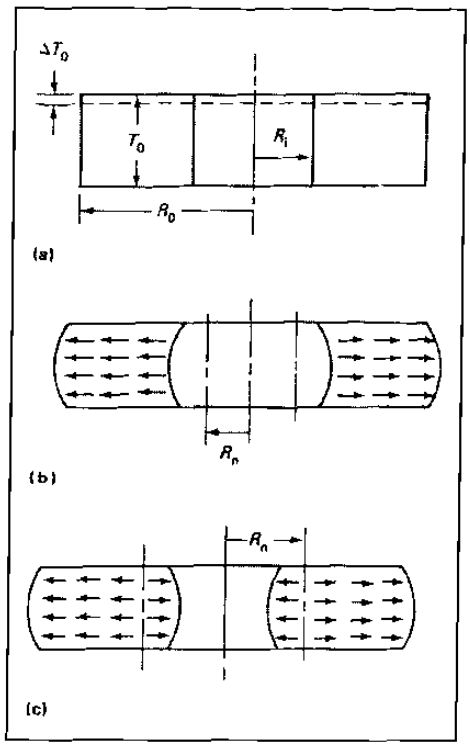


Fig. 4.3 Comportamiento del cambio en geometría de un anillo en compresión. Anillo original (a). Anillo deformado con baja fricción (el radio neutro es menor que el radio interno). Anillo deformado con fricción alta (el radio neutro es mayor que el radio interno, pero menor que el radio externo) [6].

La prueba de compresión de anillo también puede ser utilizada para caracterizar los lubricantes y se puede determinar el porcentaje de deformación en el cual falla el lubricante, como se muestra en la Fig. 4.4. los dos lubricantes A y B son iguales desde el punto de vista del coeficiente de fricción, pero el lubricante B, permite realizar reducciones más grandes [15].

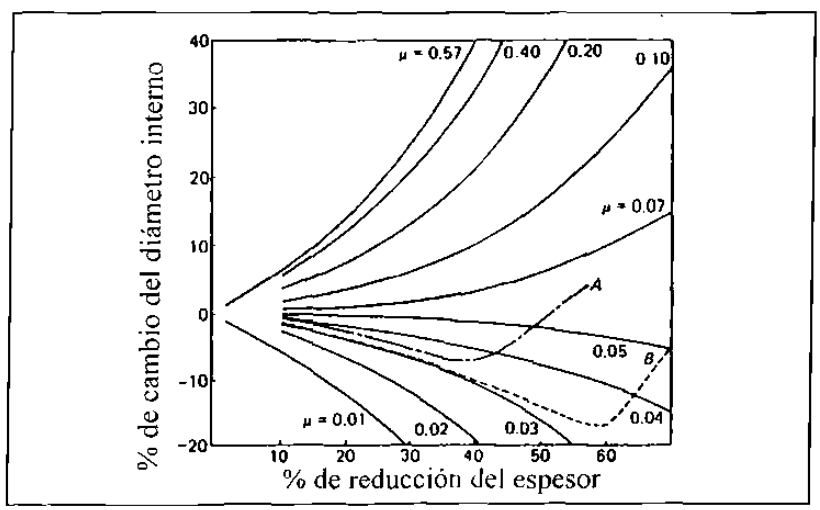


Fig. 4.4 Curva de calibración de la prueba de compresión de anillo mostrando dos lubricantes que fallan a distinto porcentaje de deformación [15].

4.2 OBTENCIÓN DE PROBETAS

Las probetas se fabricaron de acero de bajo carbono etiquetados como A, B, C, D, E y F, cuya composición química se obtuvo con el analizador LECO (DAP-LQ-G07-04) y espectrometría de emisión óptica (DAP-LQ-G06-09), utilizando la norma ASTM E-30 y su equivalente en normas NMX B-1, Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Composición química del material.

acero	%C	%Mn	%P	%S	%Cu	%Ni	%Si	%Cr	%Nb	%Mo	%Al	%Als	%Ti	%V	%B
A	0.057	0.180	0.007	0.007	0.062	0.022	0.018	0.024	0.007	0.014	0.032	0.027	0.0025	0.0	0.0003
B	0.069	0.826	0.008	0.004	0.048	0.017	0.024	0.010	0.025	0.005	0.038	0.030	0.0028	0.0	0.0
C	0.043	0.597	0.013	0.002	0.094	0.027	0.465	0.022	0.007	0.014	0.251	0.248	0.0046	0.0	0.0007
D	0.055	0.346	0.011	0.004	0.051	0.021	0.013	0.010	0.007	0.016	0.028	0.020	0.0015	0.0	0.0003
E	0.043	0.154	0.006	0.008	0.049	0.015	0.009	0.013	0.006	0.006	0.036	0.031	0.0012	0.0	0.0057
F	0.032	0.232	0.007	0.014	0.164	0.042	0.003	0.060	0.006	0.011	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0003

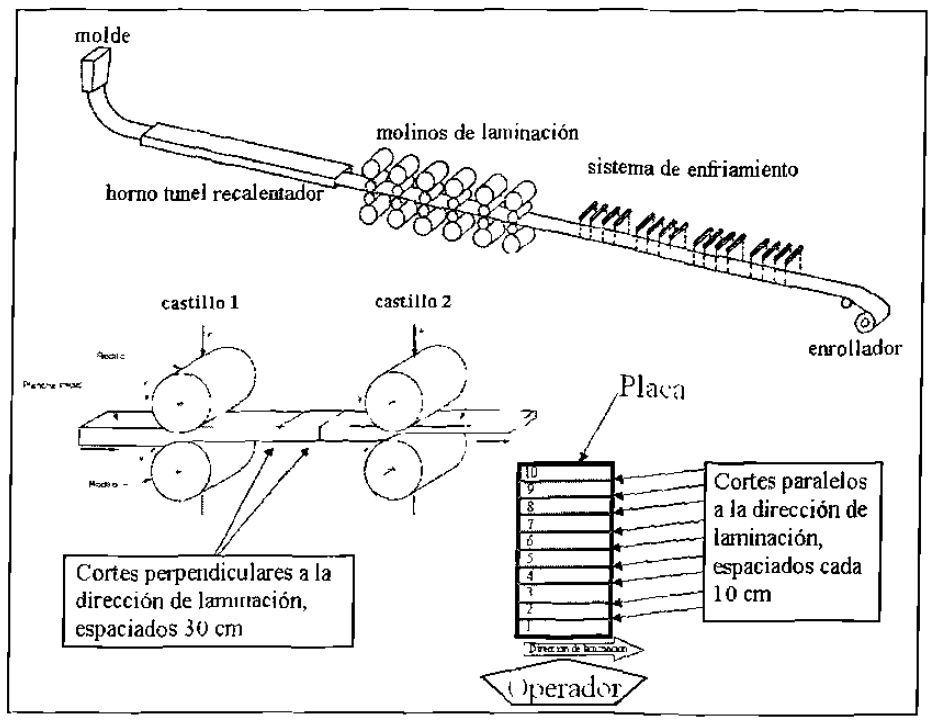


Fig. 4.5 Molino de laminación en caliente.

El acero se recolectó de un molino de laminación en caliente de seis castillos de laminación, que parten de una colada continua delgada (Fig. 4.5). El material que se procesa en un molino caliente presenta muy poca anisotropía por lo que se considera isotrópico, ya que no existe una orientación preferencial de la textura del material. Primero se obtuvo una placa de acero del material entre los castillos de laminación uno y

dos, ya que el espesor del material en esa sección del proceso es alrededor de 2.5 cm, con lo cual se facilita el maquinado de las probetas. Después la placa se cortó cada 10 cm aproximadamente, en la dirección de laminación, con equipo de corte por plasma.

De las placas obtenidas del material A y B, se realizaron metalografías (Anexo I), de cada eje de simetría (Fig. 4.6), se tomó como eje x la dirección de laminación, el eje y perpendicular a la dirección de laminación en dirección al ancho de la placa y el eje z paralelo al espesor de la placa. A partir de las placas también se maquinaron las probetas de anillos con dimensiones de diámetro externo, diámetro interno y espesor de 12, 6 y 4 mm (Fig. 4.7), respectivamente. Los cortes se realizaron con equipo de sierra de CNC y con el refrigerante necesario para evitar cambios en la microestructura debido al calentamiento local. Las probetas se obtuvieron a la distancia necesaria para evitar la región afectada por el calentamiento de los cortes con plasma. Los ejes centrales de las probetas quedaron de manera perpendicular a la dirección de laminación con la que fue inicialmente deformada la placa (Fig. 4.7).

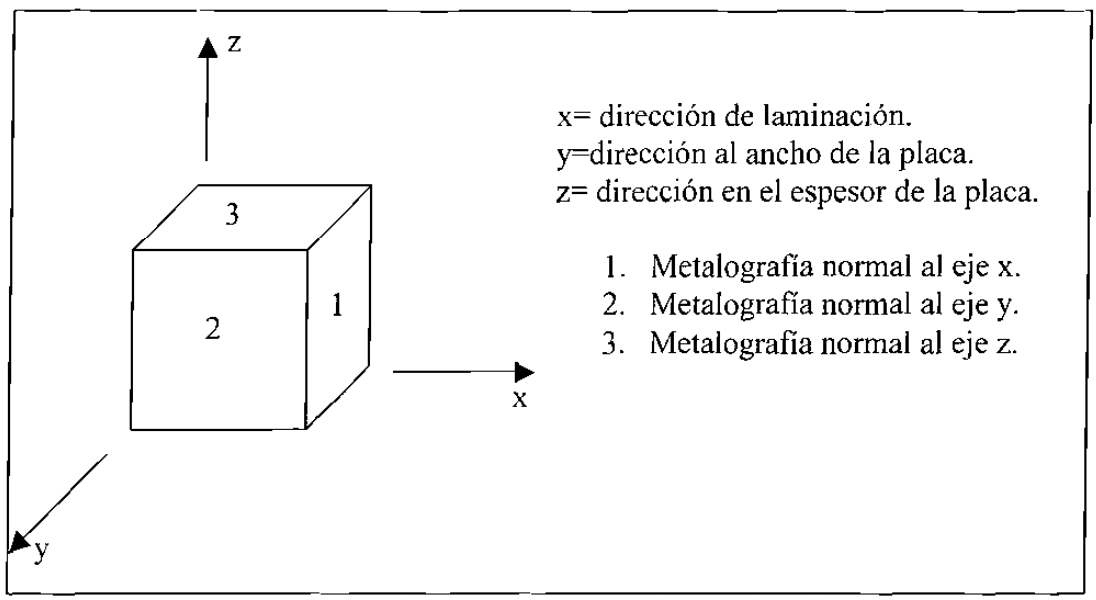


Fig. 4.6 Obtención de probetas para análisis metalográfico.

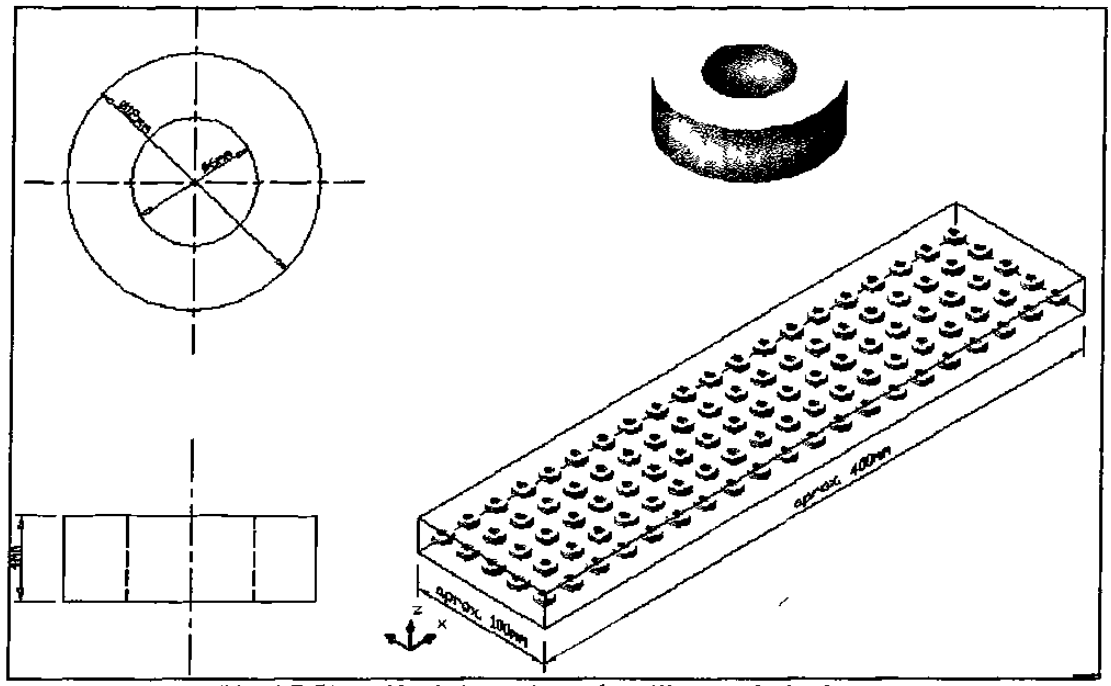


Fig. 4.7 Obtención de las probetas de anillo a partir de placas.

Las probetas obtenidas se identificaron y se midieron (Anexo II). Las mediciones se realizaron con un vernier digital. De cada anillo se realizaron ocho mediciones, cuatro del espesor y dos de cada diámetro, cada medición se realizo a 90° de la anterior y después se calculó el promedio.

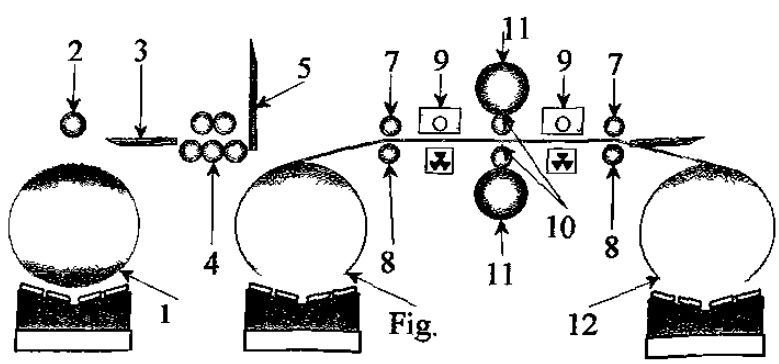
4.3 RECOLECCIÓN DE LUBRICANTES

Para el presente estudio se utilizaron cuatro diferentes condiciones de lubricación (Tabla 4.2). Se probaron los anillos sin ningún lubricante, es decir, en seco, para simular condiciones de lubricación de adhesión de la muestra con la herramienta. Para simular condiciones de fricción baja, se utilizó una cinta de politetrafluoretileno (PTFE), ya que es el lubricante sólido con el que se obtienen los más bajos coeficientes de fricción [6].

Tabla 4.2 Condiciones de lubricación

A	Seco.
B	Politetrafluoretileno (PTFE).
C	Emulsión de aceite al 6% con agua de ósmosis inversa a 60 °C.
D	Emulsión de aceite al 6% con agua de ósmosis inversa a 60 °C en uso en los molinos.

Al pretender simular las condiciones de laminación en frío, para así conocer los coeficientes de fricción presentes en este proceso de formado, la condición de lubricación C se obtuvo mediante una emulsión del aceite utilizado en el molino de laminación en frío preparada al 6% con agua de ósmosis inversa. El lubricante (D) se obtuvo directamente de los molinos de laminación en frío (Fig. 4.8). Los aceros estudiados se procesan en molinos distintos y cada molino utiliza un lubricante diferente, por lo que se tomaron muestras de los diversos lubricantes de acuerdo al tipo de acero de las probetas de anillo a ensayar. Para mantener los niveles y condiciones requeridas para el buen funcionamiento del molino, se monitorean las condiciones de la emulsión y se corrigieron en caso de presentar desviaciones de los requerimientos. La emulsión se cambia completamente después de 3 años de servicio. Para tener una evidencia del nivel de contaminación de la emulsión utilizada en el molino, se caracterizó de acuerdo a los parámetros que se monitorean constantemente en el molino (Tabla 4.3).



1. Carrete de entrada.
2. Rodillo apisonador.
3. Mesa despegadora.
4. Nivelador.
5. Mesa de paso.
6. Enrollador oriente.
7. Rodillo apisonador.
8. Rodillo deflector.
9. Rayo Gama.
10. Rodillos de trabajo.
11. Rodillos de apoyo.
12. Enrollador poniente.

Fig. 4.8 Molino cuarto reversible de laminación en frío [16].

Tabla 4.3 Caracterización de emulsiones en uso en los molinos, de acuerdo al tipo de acero probado.									
Acero	Temperatura (°C)	pH	Aceite total (%)	Aceite activo (%)	Contaminación (%)	Saponi-ficación (%)	Hierro (p.p.m.)	pH de agua de ósmosis	Cloruros (p.p.m.)
A	57	6.1	5.6	5.6	0.70	160	213	6.0	24
B	57	5.8	4.5	3.63	19.33	141	245	6.0	14.19

4.4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

La compresión se llevó a cabo en una máquina universal servohidráulica (Fig. 4.9), a una velocidad constante de desplazamiento de los cabezales de 50 mm/min. La máquina universal Instron 8502 puede aplicar una carga de hasta 10 kN, con velocidades de hasta 5,000 mm/min. Los anillos se comprimieron a cuatro diferentes porcentajes de reducción del espesor con las diferentes condiciones de lubricación. Con el fin de asegurar la repetitividad en el experimento, cada condición experimental se ensayó 3 veces (Tabla 4.4).

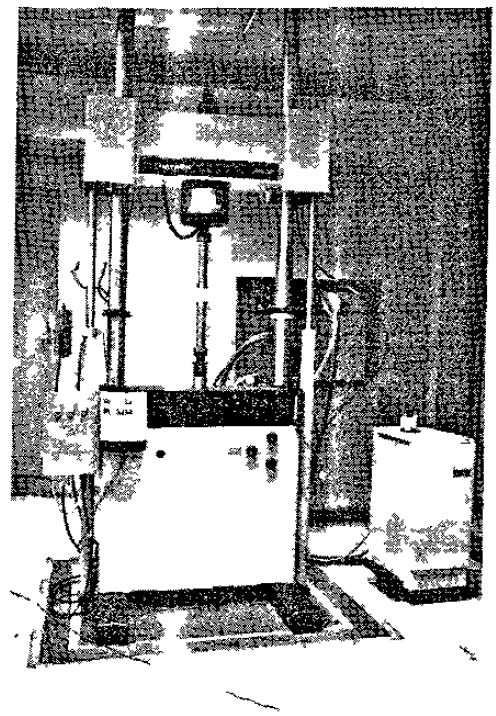


Fig. 4.9 Máquina universal Instron 8502.

Los cabezales y anillos se limpiaron con acetona entre cada experimento. Durante la prueba se tomaron datos de carga y desplazamiento de los cabezales, con el fin de obtener después la curva de fluencia del material. En la Tabla 4.4 se muestra de manera resumida el número de experimentos realizados y las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo cada experimento.

Tabla 4.4 Número de experimentos realizados.

Descripción de la variable	Cantidad que varía.	
Material	2	4
Condición de lubricación	4	3
Porcentaje de deformación	4	3
Repetitividad	3	3
Subtotal de experimentos	96	108
Total de experimentos	204	

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

De la inspección visual realizada a las probetas después de ser ensayadas (Fig. 5.1) se puede observar que el material no presentó una dirección preferencial al ser deformado, ya que se mantuvo la circunferencia del anillo. También se notó como cambió el diámetro interno en cada condición de lubricación.

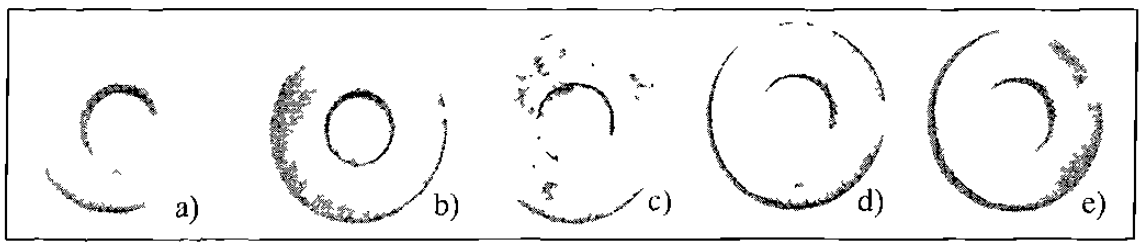


Fig. 5.1 (a) Anillo sin deformar, (b) deformado 37.88 % en seco, (c) deformado 40.06 % con PTFE, (d) deformado 38.75 % con emulsión limpia al 6 %, (e) deformado 41.46 % con emulsión usada al 6 %.

5.2 MEDICIÓN DE PROBETAS

Después de ensayar las probetas se registraron sus dimensiones finales (Anexo III). A cada anillo se le hicieron seis mediciones con un vernier digital, cuatro del espesor y dos del diámetro interno, cada medición se realizó a 90° de la anterior y después se calculó el promedio.

5.3 CÁLCULO DE PORCENTAJES

El porcentaje de cambio del diámetro interno (%ΔDI) y el porcentaje de reducción en el espesor (%ΔT) se calcularon en base a las dimensiones de los anillos con las siguientes expresiones:

$$\%\Delta DI = \frac{D_i - D_f}{D_i} x100 \qquad [5.1]$$

$$\%\Delta T = \frac{T_i - T_f}{T_i} x100 \qquad [5.2]$$

Los resultados de los porcentajes de cambio en las dimensiones de los anillos se encuentran en el Anexo IV. Estos resultados se graficaron sobre las curvas de calibración de la fricción para anillos de geometría 3:6:2 obtenidas mediante el método de elemento finito Fig. 5.2, [17].

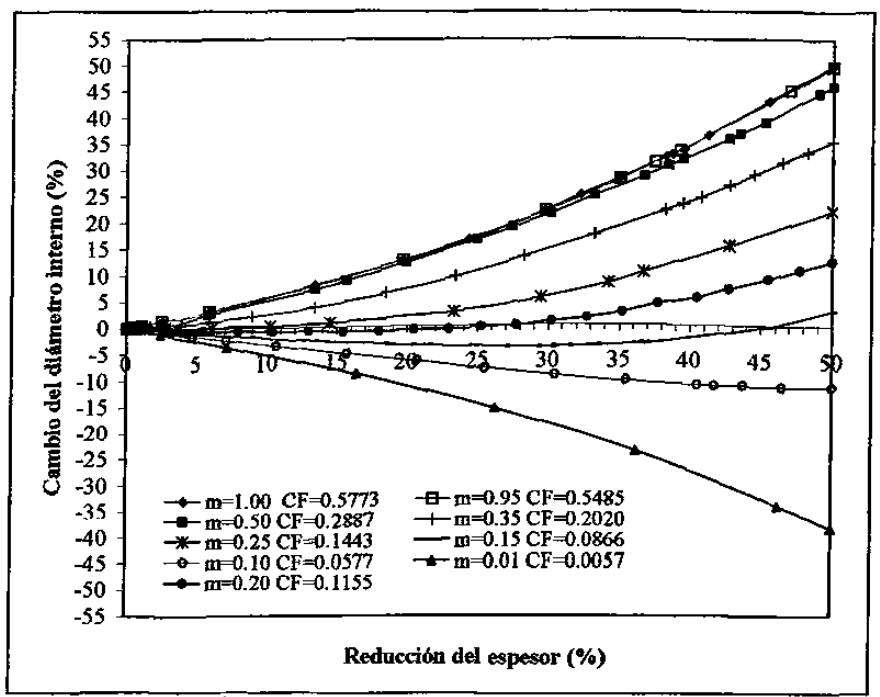


Fig. 5.2 Curvas de calibración de la fricción para anillos con geometría 3:6:2 [17].

De las Fig 5.3 a la Fig. 5.8 se muestran los resultados para cada material y para cada condición de lubricación.

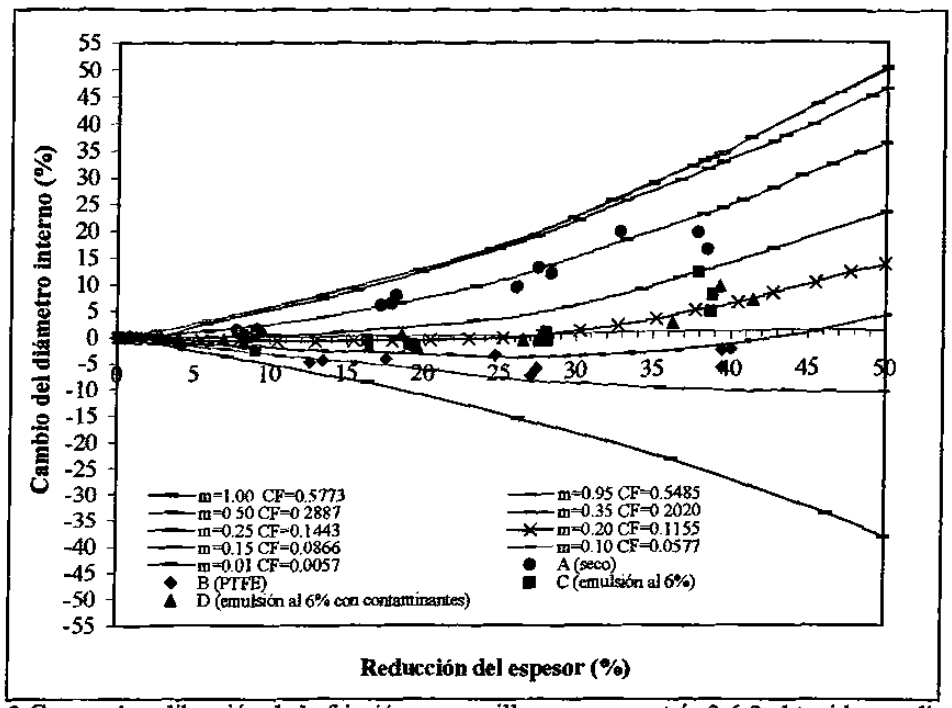


Fig. 5.3 Curvas de calibración de la fricción para anillos con geometría 3:6:2 obtenidas mediante el método de elemento finito [17] y experimentos realizados con el material A.

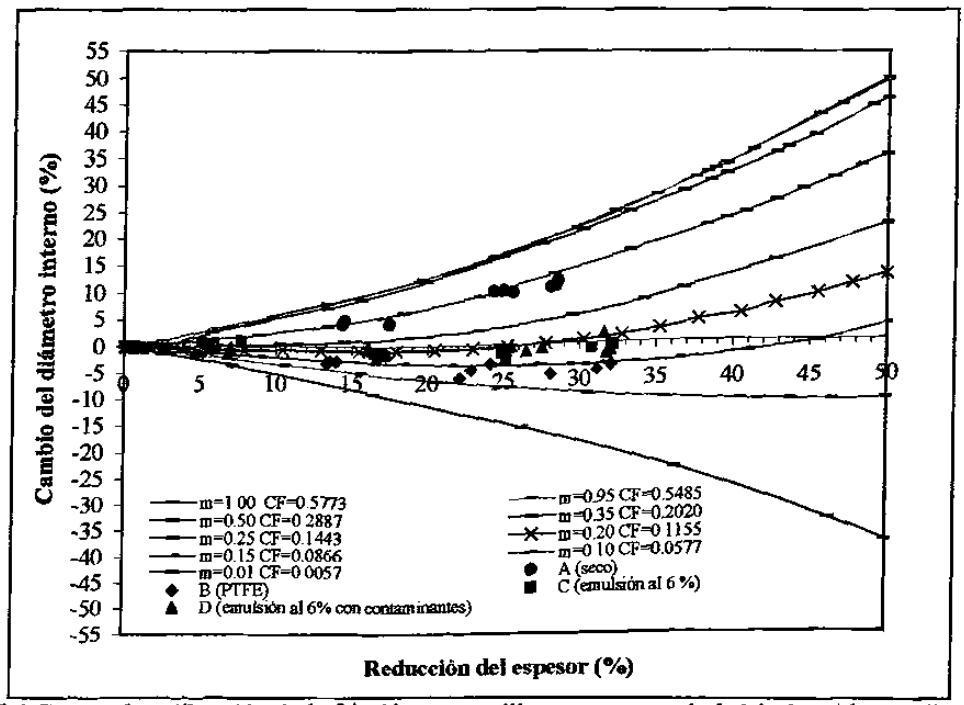


Fig. 5.4 Curvas de calibración de la fricción para anillos con geometría 3:6:2 obtenidas mediante el método de elemento finito [17] y experimentos realizados con el material B.

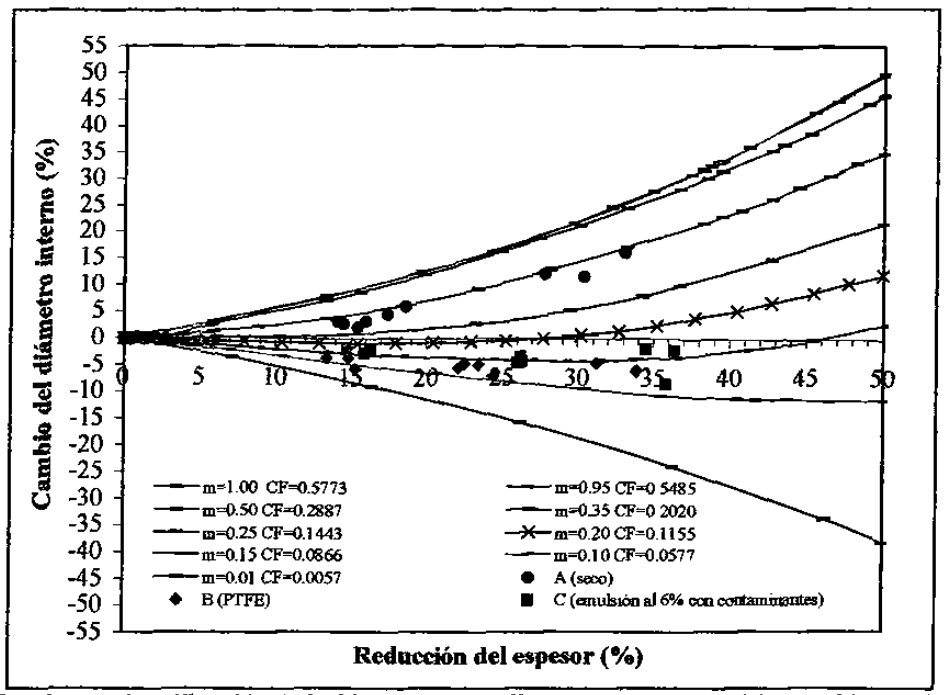


Fig. 5.5 Curvas de calibración de la fricción para anillos con geometría 3:6:2 obtenidas mediante el método de elemento finito [17] y experimentos realizados con el material C.

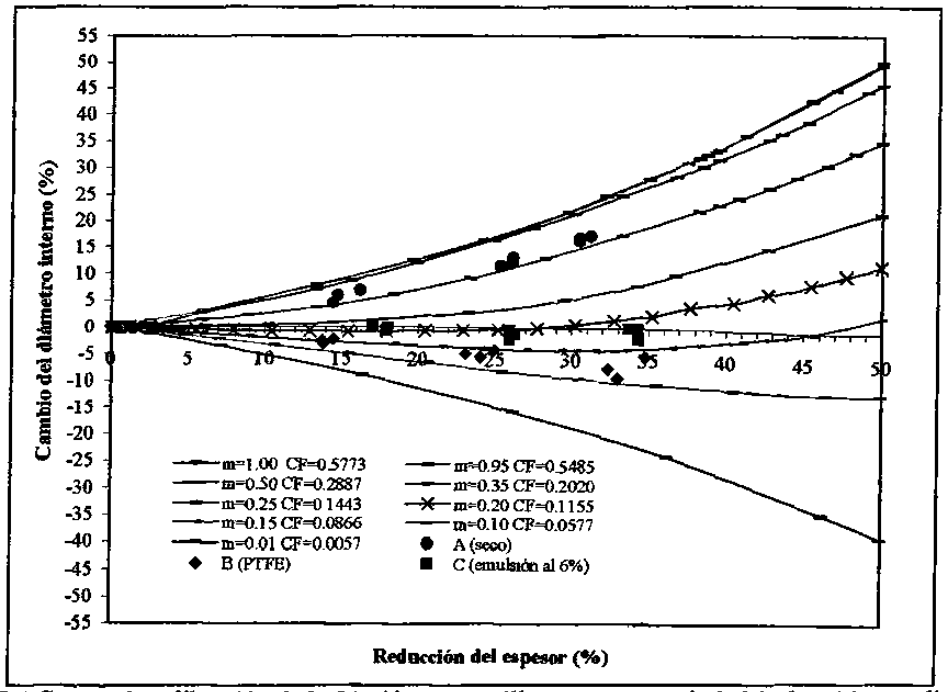


Fig. 5.6 Curvas de calibración de la fricción para anillos con geometría 3:6:2 obtenidas mediante el método de elemento finito [17] y experimentos realizados con el material D.

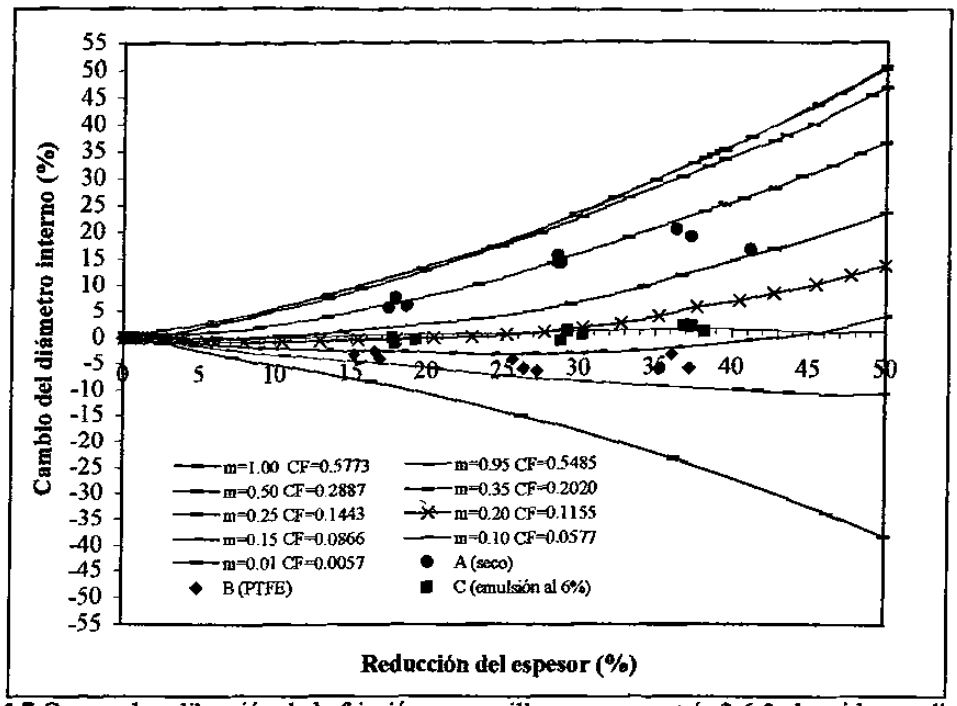


Fig. 5.7 Curvas de calibración de la fricción para anillos con geometría 3:6:2 obtenidas mediante el método de elemento finito [17] y experimentos realizados con el material E.

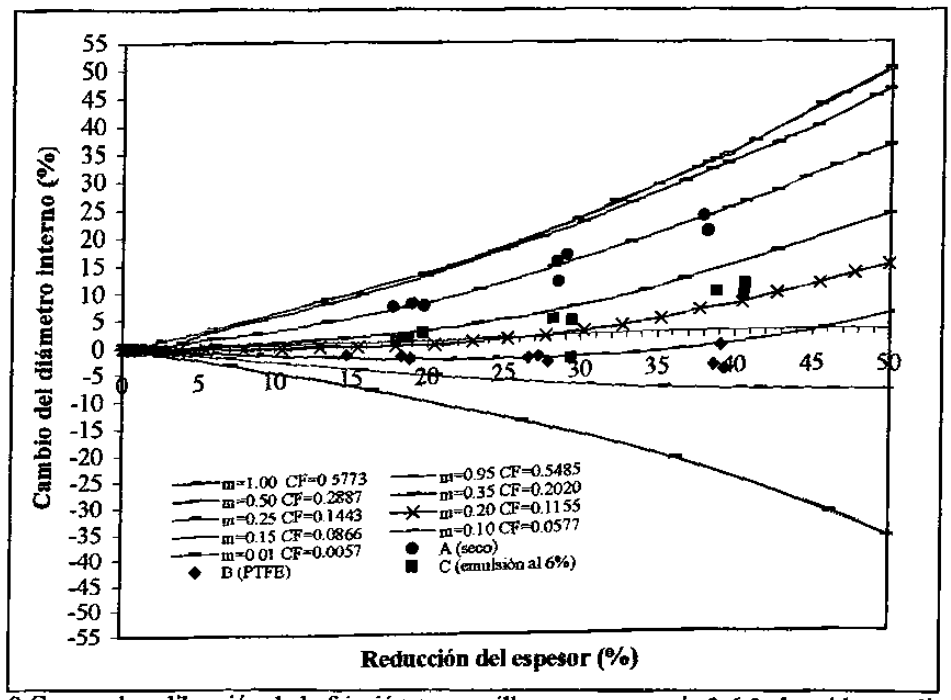


Fig. 5.8 Curvas de calibración de la fricción para anillos con geometría 3:6:2 obtenidas mediante el método de elemento finito [17] y experimentos realizados con el material F.

5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De cada una de las curvas de calibración de la fricción se trazó la curva de tendencia de acuerdo a una regresión polinomial de segundo orden, Fig. 5.9. En la Tabla 5.1 se muestran las ecuaciones de dichas curvas así como el valor R^2, el cual representa la función de Pearson [18], como la proporción de varianza de y que puede atribuirse a la varianza de x, matemáticamente:

$$R = \frac{n(\Sigma xy) - (\Sigma x)(\Sigma y)}{\sqrt{n[\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2][n\Sigma y^2 - (\Sigma y)^2]}} \qquad [5.3]$$

$$R^2 = 1 - SSE/SST \qquad [5.4]$$

$$SSE = \Sigma(y_i - \overline{y_i})^2 \qquad [5.5]$$

$$SST = (\Sigma y_j^{\,2}) - \frac{(\Sigma y_j)^2}{n} \qquad [5.6]$$

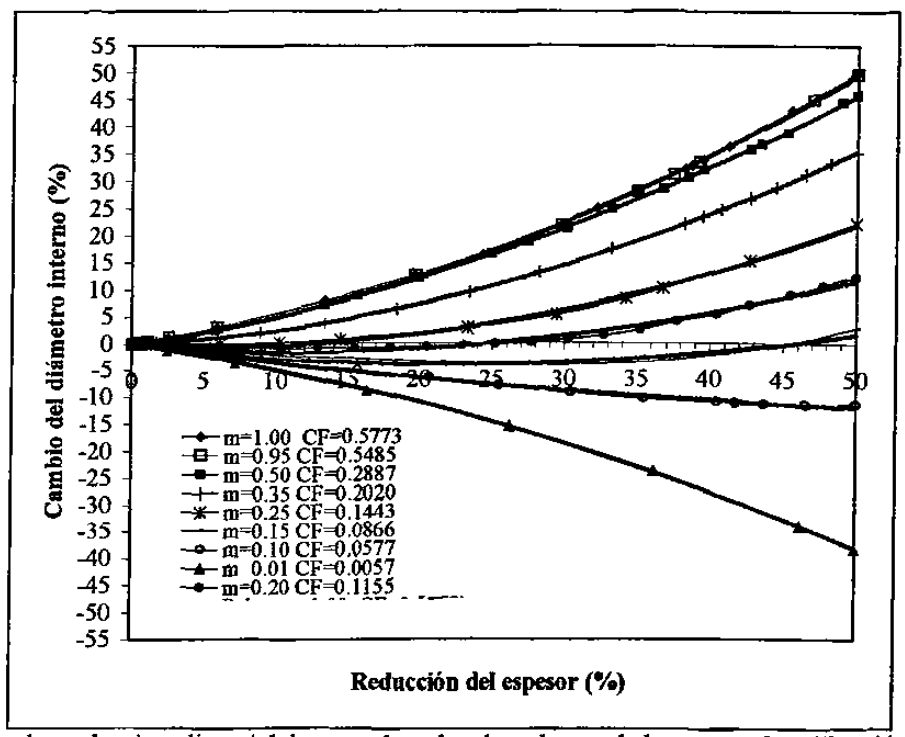


Fig. 5.9 Curvas de tendencia polinomial de segundo orden de cada una de las curvas de calibración de la fricción.

Tabla 5.1 Ecuaciones de las curvas de calibración de la fricción		
Factor de fricción interfasial (m)	Ecuación	R^2
1.00	$y = 0.0124x^2 + 0.3701x$	0.9995
0.95	$y = 0.0125x^2 + 0.3659x$	0.9998
0.50	$y = 0.0106x^2 + 0.3869x$	0.9998
0.35	$y = 0.0116x^2 + 0.1282x$	1
0.25	$y = 0.0117x^2 - 0.1517x$	0.9966
0.20	$y = 0.0096x^2 - 0.2465x$	0.9820
0.15	$y = 0.0078x^2 - 0.3593x$	0.9266
0.10	$y = 0.003x^2 - 0.3913x$	0.9967

De la Tabla 5.1 se nota que la ecuación general de las curvas de calibración de la fricción es una función polinomial de segundo orden:

$$y = ax^2 + bx \qquad [5.7]$$

Donde y es el cambio del diámetro interno (%), x es la reducción del espesor (%) y los coeficientes a y b varían de acuerdo al factor de fricción interfasial (m), como se muestra en las Fig 5.10 y Fig. 5.11, respectivamente.

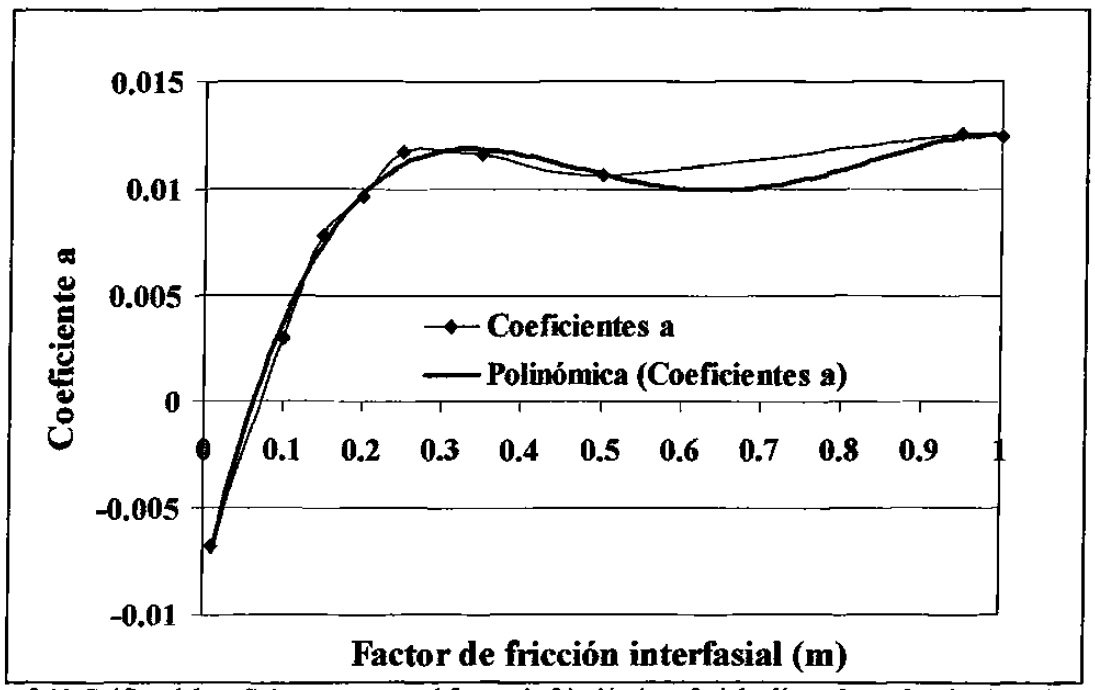


Fig. 5.10 Gráfica del coeficiente a contra el factor de fricción interfasial y línea de tendencia ajustada con una regresión polinómica de cuarto orden.

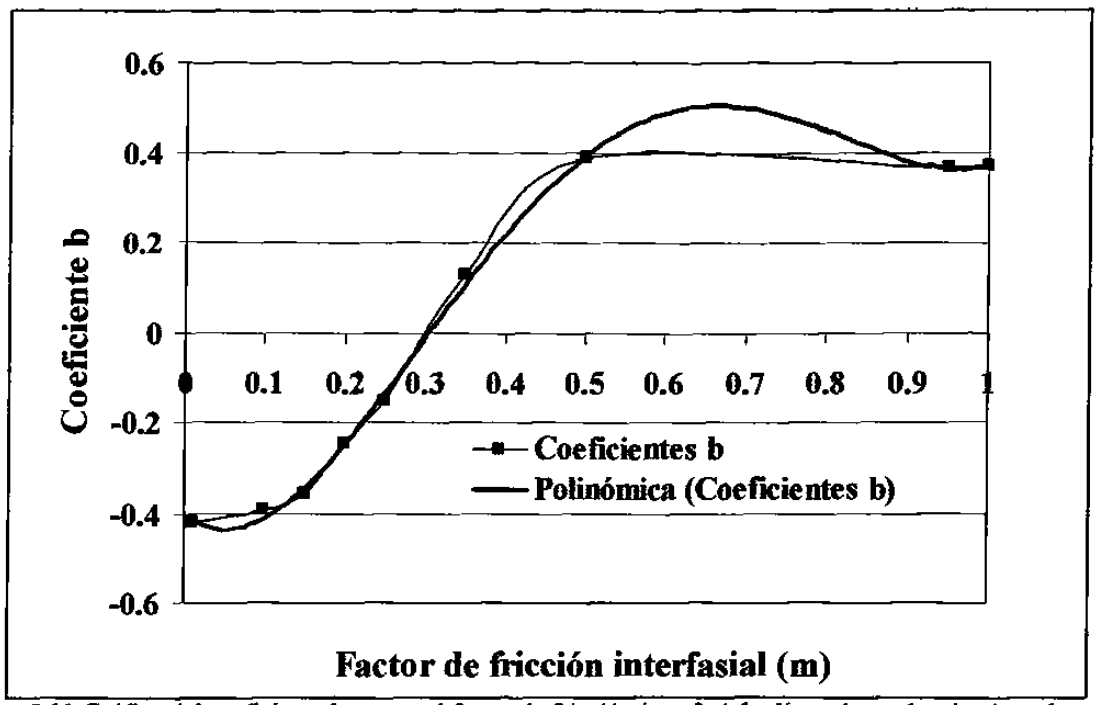


Fig. 5.11 Gráfica del coeficiente b contra el factor de fricción interfasial y línea de tendencia ajustada con una regresión polinómica de cuarto orden.

De las Fig 5.10 y Fig. 5.11 se obtuvieron las ecuaciones 5.8 y 5.9, polinómicas de cuarto orden, con un factor R^2 de 0.9962 y 0.9985 respectivamente.

$$a = -0.1943m^4 + 0.5091m^3 - 0.4586m^2 + 0.1649m - 0.0086 \quad [5.8]$$

$$b = 10.163m^4 - 22.719m^3 + 14.649m^2 - 1.3165m - 0.4052 \quad [5.9]$$

Con las ecuaciones 5.7 a la 5.9 se forma un sistema de cuarto orden en el cual, al conocer el cambio del diámetro interno (%) y la reducción del espesor (%) la única variable es el factor de fricción interfasial (m). Para resolverlo se utilizó el método de Newton-Raphson [19], que consiste en hacer iteraciones en la expresión 5.10:

$$m = m_0 - f(m_0)/f'(m_0) \quad [5.10]$$

desde m_0 hasta que m_0 sea igual a m. Para esto se realizó un programa en lenguaje C [20], cuyo código fuente se encuentra en el Anexo V, al programa se le introduce el cambio del diámetro interno (%) y la reducción del espesor (%), datos que se encuentran en el Anexo IV, y despliega en el monitor los resultados del factor de fricción interfasial

como se muestra de las Fig. 5.12 a la Fig. 5.15 para el material A y en el Anexo VI para el material B, C, D y F.

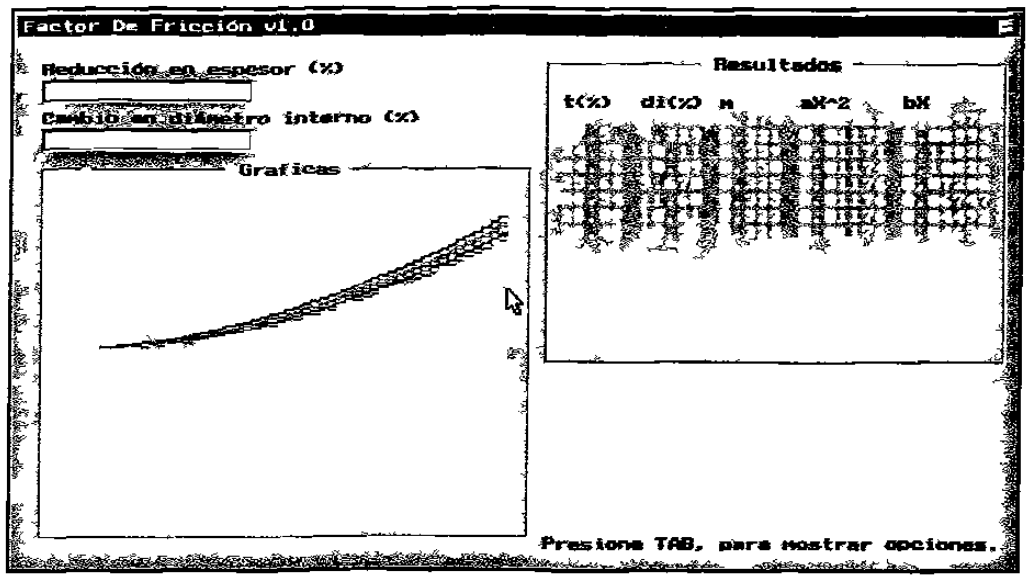


Fig. 5.12 Curvas obtenidas con el programa (Anexo V) para determinar el factor de fricción interfasial del material A, ensayado sin lubricante.

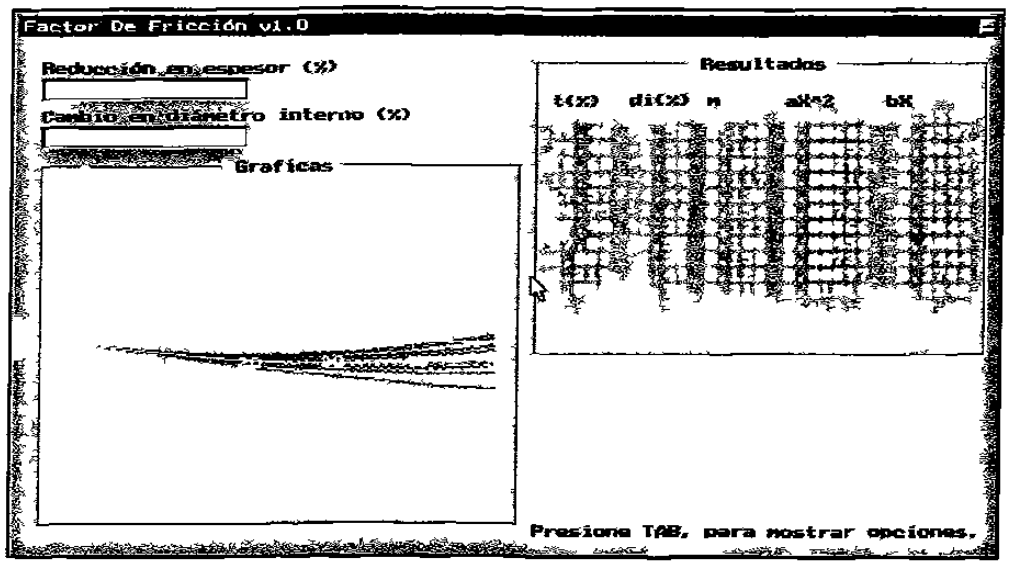


Fig. 5.13 Curvas obtenidas con el programa (Anexo V) para determinar el factor de fricción interfasial del material A, ensayado con Politetrafluoretileno (PTFE).

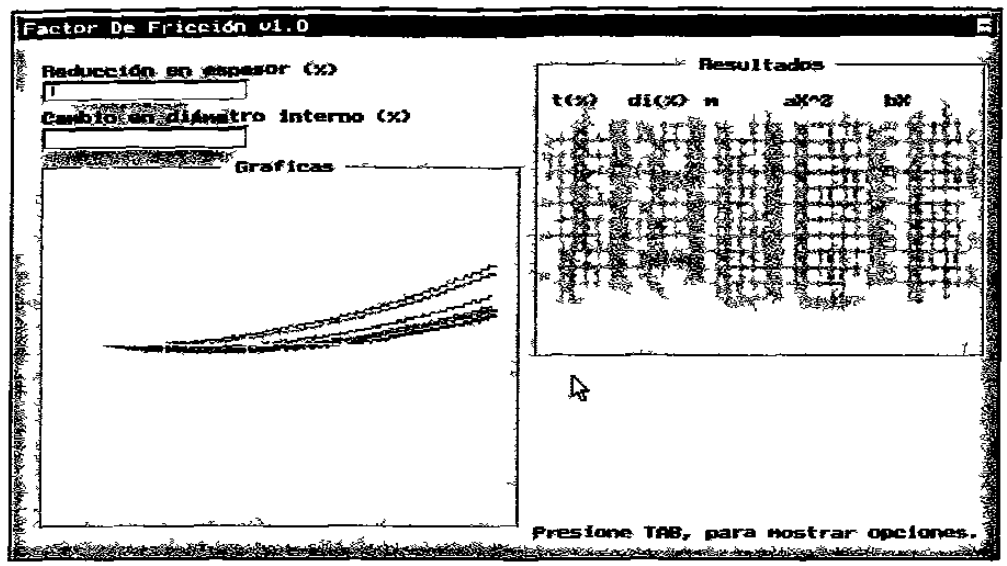


Fig. 5.14 Curvas obtenidas con el programa (Anexo V) para determinar el factor de fricción interfasial del material A, ensayado con emulsión limpia al 6%.

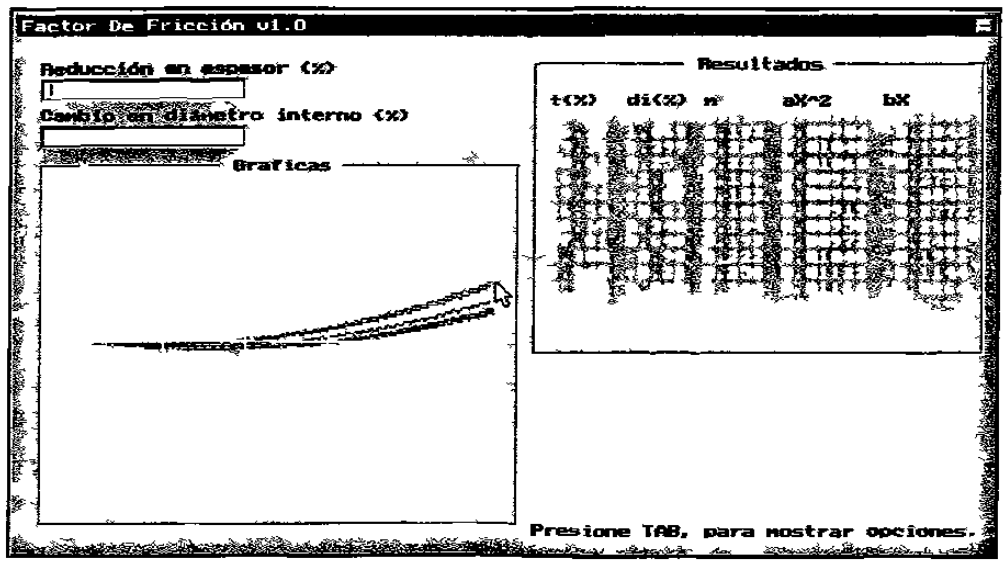


Fig. 5.15 Curvas obtenidas con el programa (Anexo V) para determinar el factor de fricción interfasial del material A, ensayado con emulsión usada al 6%.

El programa también crea un registro con los datos de entrada, el factor de fricción interfasial, el coeficiente de fricción Coulómbica y con los coeficientes de la ecuación cuadrática a la cual se ajustó. De la Tabla 5.2 a la Tabla 5.5 se encuentran los resultados arrojados por el programa, para cada condición de lubricación estudiada.

Resultados obtenidos en las pruebas sin lubricación.											
Material A						Material B					
%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx	%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx
32.85	18.73	0.385	0.222	0.0116	0.186	5.35	0.57	0.323	0.187	0.0118	0.043
38.48	15.33	0.285	0.164	0.0116	-0.050	5.17	0.90	0.353	0.204	0.0117	0.113
37.88	18.44	0.321	0.185	0.0118	0.038	5.79	0.25	0.295	0.170	0.0116	-0.025
18.23	7.70	0.396	0.229	0.0115	0.211	14.52	4.94	0.378	0.218	0.0116	0.170
17.25	5.74	0.359	0.208	0.0117	0.129	17.50	4.33	0.322	0.186	0.0118	0.040
17.91	6.03	0.358	0.207	0.0117	0.125	14.37	4.18	0.356	0.206	0.0117	0.121
27.52	12.63	0.362	0.209	0.0117	0.134	24.33	10.12	0.359	0.207	0.0117	0.128
26.14	9.22	0.323	0.186	0.0118	0.043	24.97	10.09	0.351	0.202	0.0117	0.108
28.35	11.43	0.333	0.192	0.0118	0.067	25.64	9.67	0.336	0.194	0.0118	0.073
9.37	0.84	0.297	0.171	0.0117	-0.020	28.55	11.60	0.333	0.192	0.0118	0.067
7.81	1.33	0.338	0.195	0.0118	0.078	28.09	10.62	0.324	0.187	0.0118	0.045
9.13	1.58	0.332	0.192	0.0118	0.065	28.45	10.92	0.324	0.187	0.0118	0.046
Material C						Material D					
%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx	%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx
17.46	4.53	0.327	0.189	0.0118	0.052	31.25	17.16	0.384	0.222	0.0116	0.183
15.47	2.15	0.288	0.166	0.0116	-0.042	30.50	16.75	0.388	0.224	0.0116	0.193
14.56	2.74	0.312	0.180	0.0117	0.016	30.49	16.30	0.381	0.220	0.0116	0.177
33.11	16.25	0.346	0.200	0.0118	0.098	25.37	11.64	0.373	0.216	0.0116	0.160
30.44	11.57	0.313	0.181	0.0117	0.020	26.20	13.22	0.391	0.226	0.0115	0.199
27.82	12.06	0.349	0.201	0.0117	0.104	26.12	12.14	0.372	0.215	0.0117	0.157
16.00	3.27	0.311	0.180	0.0117	0.015	14.78	6.10	0.412	0.238	0.0114	0.243
14.18	3.32	0.333	0.192	0.0118	0.066	14.49	4.53	0.365	0.211	0.0117	0.142
18.64	6.16	0.351	0.203	0.0117	0.110	16.22	6.94	0.411	0.237	0.0114	0.241
Material E						Material F					
%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx	%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx
37.35	17.18	0.313	0.181	0.0117	0.018	37.97	21.80	0.358	0.207	0.0117	0.125
36.40	18.52	0.337	0.195	0.0118	0.077	38.22	18.98	0.323	0.187	0.0118	0.043
41.23	14.83	0.261	0.151	0.0113	-0.108	38.26	19.12	0.324	0.187	0.0118	0.046
28.61	14.18	0.373	0.215	0.0117	0.159	28.45	13.76	0.368	0.212	0.0117	0.148
28.64	12.87	0.351	0.203	0.0117	0.110	28.55	10.08	0.312	0.180	0.0117	0.015
28.81	12.82	0.349	0.201	0.0117	0.104	29.08	15.02	0.380	0.220	0.0116	0.176
17.47	5.11	0.341	0.197	0.0118	0.085	18.97	6.85	0.363	0.210	0.0117	0.137
17.96	7.14	0.386	0.223	0.0116	0.188	17.75	6.42	0.370	0.214	0.0117	0.153
18.70	5.55	0.336	0.194	0.0118	0.075	19.74	6.41	0.343	0.198	0.0118	0.091

149258

Resultados obtenidos en las pruebas realizadas con PTFE.											
Material A						Material B					
%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx	%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx
40.06	-3.33	0.141	0.081	0.0068	-0.359	4.76	-1.47	0.150	0.087	0.0074	-0.344
39.44	-3.51	0.141	0.081	0.0068	-0.360	2.52	-0.16	0.267	0.154	0.0114	-0.092
39.45	-6.58	0.122	0.070	0.0055	-0.387	5.18	-1.06	0.197	0.114	0.0096	-0.255
12.60	-4.81	0.091	0.053	0.0030	-0.420	13.56	-2.71	0.167	0.097	0.0083	-0.314
13.46	-4.35	0.117	0.068	0.0052	-0.393	13.99	-2.79	0.166	0.096	0.0083	-0.316
17.58	-4.44	0.136	0.078	0.0065	-0.367	13.36	-3.12	0.155	0.089	0.0077	-0.337
24.75	-3.64	0.154	0.089	0.0076	-0.337	22.11	-6.17	0.117	0.067	0.0051	-0.393
27.41	-6.25	0.124	0.071	0.0057	-0.384	24.12	-3.54	0.156	0.090	0.0077	-0.334
27.04	-7.58	0.109	0.063	0.0045	-0.403	22.85	-4.62	0.141	0.081	0.0068	-0.359
4.04	-1.27	0.150	0.087	0.0074	-0.344	32.04	-4.43	0.141	0.081	0.0068	-0.359
4.22	-1.49	0.128	0.074	0.0060	-0.378	31.12	-5.20	0.135	0.078	0.0064	-0.369
4.04	-0.74	0.211	0.122	0.0101	-0.224	28.10	-5.93	0.128	0.074	0.0059	-0.379
Material C						Material D					
%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx	%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx
31.25	-4.61	0.140	0.081	0.0068	-0.361	32.98	-9.23	0.102	0.059	0.0039	-0.410
33.88	-6.02	0.127	0.073	0.0059	-0.380	32.37	-7.34	0.117	0.067	0.0051	-0.394
24.41	-7.10	0.109	0.063	0.0045	-0.402	34.77	-5.11	0.134	0.077	0.0064	-0.370
22.55	-4.61	0.141	0.081	0.0068	-0.359	23.11	-4.92	0.137	0.079	0.0066	-0.366
23.47	-4.96	0.137	0.079	0.0066	-0.366	24.12	-5.44	0.131	0.075	0.0062	-0.375
22.14	-5.56	0.126	0.073	0.0058	-0.381	24.98	-4.15	0.148	0.085	0.0073	-0.348
15.28	-5.63	0.094	0.054	0.0032	-0.418	13.84	-3.22	0.154	0.089	0.0076	-0.338
13.43	-3.61	0.140	0.081	0.0068	-0.361	14.48	-2.39	0.178	0.103	0.0088	-0.294
14.85	-3.59	0.147	0.085	0.0072	-0.350	13.79	-2.64	0.170	0.098	0.0085	-0.309
Material E						Material F					
%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx	%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx
35.20	-7.31	0.118	0.068	0.0052	-0.392	38.65	-6.56	0.122	0.071	0.0056	-0.386
37.25	-7.30	0.118	0.068	0.0052	-0.392	39.13	-2.91	0.145	0.084	0.0071	-0.353
36.09	-4.68	0.136	0.079	0.0065	-0.367	39.38	-7.45	0.117	0.067	0.0051	-0.393
26.37	-6.84	0.116	0.067	0.0051	-0.394	26.59	-4.04	0.148	0.086	0.0073	-0.347
27.27	-7.28	0.112	0.065	0.0048	-0.399	27.26	-3.88	0.150	0.087	0.0074	-0.345
25.66	-4.93	0.138	0.080	0.0067	-0.364	27.88	-4.87	0.139	0.080	0.0067	-0.363
16.87	-4.60	0.130	0.075	0.0061	-0.376	18.30	-2.70	0.172	0.099	0.0086	-0.305
15.19	-3.65	0.147	0.085	0.0072	-0.350	18.88	-3.29	0.161	0.093	0.0080	-0.326
16.55	-3.14	0.162	0.093	0.0081	-0.324	14.69	-2.46	0.176	0.102	0.0088	-0.297

Resultados obtenidos para el material en las pruebas realizadas con emulsión limpia.											
Material A						Material B					
%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx	%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx
38.75	3.81	0.191	0.110	0.0094	-0.268	7.74	1.06	0.324	0.187	0.0118	0.045
38.86	6.92	0.213	0.123	0.0102	-0.220	5.38	0.25	0.298	0.172	0.0117	-0.017
37.91	10.93	0.250	0.144	0.0111	-0.135	5.96	0.49	0.310	0.179	0.0117	0.012
19.09	-1.57	0.193	0.111	0.0095	-0.264	17.01	-10.00	0.208	0.120	0.0100	-0.230
19.45	-20.00	0.184	0.106	0.0091	-0.281	16.58	-1.07	0.208	0.120	0.0100	-0.231
16.37	-0.86	0.213	0.123	0.0102	-0.220	17.25	-1.57	0.196	0.113	0.0096	-0.257
28.05	0.51	0.197	0.114	0.0096	-0.254	25.05	-0.99	0.188	0.109	0.0093	-0.273
28.18	-1.24	0.178	0.103	0.0088	-0.294	24.91	-1.58	0.181	0.104	0.0090	-0.288
27.58	-1.01	0.182	0.105	0.0090	-0.286	25.21	-2.64	0.167	0.096	0.0083	-0.315
8.95	3.00	0.263	0.152	0.0113	-0.102	30.81	-10.00	0.174	0.101	0.0087	-0.301
8.26	0.51	0.291	0.168	0.0116	-0.035	32.08	-0.41	0.177	0.102	0.0088	-0.296
9.07	-2.63	0.144	0.083	0.0070	-0.354	32.21	-0.50	0.175	0.101	0.0087	-0.298
Material C						Material D					
%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx	%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx
35.88	-8.33	0.111	0.064	0.0047	-0.401	34.37	-2.13	0.157	0.091	0.0078	-0.332
36.40	-1.97	0.155	0.090	0.0077	-0.336	33.72	-0.09	0.175	0.101	0.0087	-0.299
34.53	-1.80	0.160	0.092	0.0079	-0.328	34.33	-0.25	0.173	0.100	0.0086	-0.304
26.02	-4.46	0.144	0.083	0.0070	-0.355	26.00	-0.42	0.193	0.111	0.0095	-0.264
26.26	-3.42	0.156	0.090	0.0077	-0.334	26.33	-1.10	0.183	0.106	0.0091	-0.282
26.34	-4.36	0.145	0.084	0.0071	-0.353	25.98	-2.04	0.173	0.100	0.0086	-0.303
16.32	-2.05	0.186	0.108	0.0092	-0.277	17.08	3.00	0.229	0.132	0.0106	-0.183
14.77	-1.96	0.189	0.109	0.0093	-0.271	17.94	-0.76	0.211	0.122	0.0101	-0.225
15.93	-2.57	0.174	0.101	0.0087	-0.300	18.04	-0.34	0.219	0.126	0.0103	-0.207
Material E						Material F					
%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx	%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx
36.87	0.68	0.174	0.100	0.0086	-0.302	40.71	8.80	0.218	0.126	0.0103	-0.207
37.42	0.51	0.171	0.099	0.0085	-0.307	40.60	6.67	0.204	0.118	0.0099	-0.239
38.25	-0.43	0.163	0.094	0.0081	-0.323	38.84	7.40	0.217	0.125	0.0103	-0.211
28.86	-1.71	0.171	0.099	0.0085	-0.307	29.48	2.42	0.213	0.123	0.0102	-0.220
29.28	0.09	0.189	0.109	0.0093	-0.271	28.25	3.03	0.225	0.130	0.0105	-0.192
30.28	-0.77	0.178	0.103	0.0088	-0.294	29.37	-4.49	0.142	0.082	0.0069	-0.357
17.74	-0.51	0.216	0.125	0.0103	-0.212	18.78	0.59	0.234	0.135	0.0107	-0.172
17.90	-1.37	0.199	0.115	0.0097	-0.251	17.95	0.34	0.233	0.134	0.0107	-0.175
19.28	0.93	0.238	0.137	0.0108	-0.162	19.70	1.44	0.245	0.142	0.0110	-0.145

Tabla 5.2 Resultados obtenidos para el material A y B en pruebas realizadas con emulsión sucia.											
Material A						Material B					
%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx	%ΔDI	%ΔT	m	μ	ax^2	bx
41.46	5.84	0.195	0.113	0.0096	-0.258	7.05	-0.25	0.258	0.149	0.0112	-0.115
36.28	1.67	0.183	0.105	0.0090	-0.284	5.73	-0.08	0.272	0.157	0.0114	-0.080
39.31	8.40	0.222	0.128	0.0104	-0.199	6.81	-1.49	0.184	0.106	0.0091	-0.281
18.64	0.25	0.228	0.132	0.0106	-0.185	16.15	-0.41	0.224	0.129	0.0105	-0.196
16.46	-2.02	0.187	0.108	0.0092	-0.276	16.12	3.00	0.233	0.135	0.0107	-0.174
19.63	-2.08	0.182	0.105	0.0090	-0.285	16.64	-2.14	0.184	0.106	0.0091	-0.281
26.55	-0.84	0.186	0.107	0.0092	-0.277	27.55	-0.83	0.184	0.106	0.0091	-0.282
28.19	0.34	0.195	0.113	0.0096	-0.259	26.52	-1.39	0.180	0.104	0.0089	-0.290
27.82	0.65	0.200	0.115	0.0097	-0.249	25.50	-0.33	0.195	0.113	0.0096	-0.258
8.30	-0.93	0.222	0.128	0.0104	-0.199	32.06	-1.48	0.167	0.096	0.0083	-0.314
6.94	-0.25	0.258	0.149	0.0112	-0.114	31.76	-20.00	0.163	0.094	0.0081	-0.322
8.31	0.59	0.294	0.170	0.0116	-0.026	31.62	1.73	0.198	0.114	0.0097	-0.253

5.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De las gráficas y tablas de resultados anteriores, se puede observar que el factor de fricción interfasial varía de acuerdo al tipo de lubricación y no con respecto al material. El valor del factor de fricción interfasial y su coeficiente de fricción Coulómbica equivalente se muestran en la Tabla 5.6 para los materiales ensayados y para cada condición de lubricación. En la Tabla 5.7 se muestra el resultado final del factor de fricción interfasial y el coeficiente de fricción Coulómbica, independientemente del tipo del material.

Tabla 5.3 Resumen de resultados para cada material ensayado.												
	Material											
	A		B		C		D		E		F	
Lubricación	m	μ	m	μ	m	μ	m	μ	m	μ	m	μ
A (seco)	0.34	0.20	0.34	0.20	0.33	0.19	0.39	0.22	0.34	0.20	0.35	0.20
B (PTFE)	0.14	0.08	0.16	0.09	0.13	0.07	0.14	0.08	0.13	0.08	0.15	0.09
C (emulsión limpia)	0.21	0.12	0.22	0.13	0.16	0.09	0.19	0.11	0.19	0.11	0.21	.12
D (emulsión usada en molinos)	0.21	0.12	0.20	0.12								

Tabla 5.4 Resumen de resultados para cada tipo de lubricación, factor de fricción cortante interfasial y coeficiente de fricción Coulómbica promedio para todos los materiales ensayados.			
Tipo de lubricación	Promedio		Desviación estándar
	m	μ	
A (seco)	0.35	0.20	0.03
B (PTFE)	0.14	0.08	0.03
C (emulsión al 6% limpia)	0.20	0.11	0.04
D (emulsión al 6% usada en molinos)	0.21	0.12	0.03

5.6 ANÁLISIS METALOGRÁFICO

Se tomaron nueve muestras del material A, a tres diferentes porcentajes de deformación (cercanos al 17, 28 y 40 %) y ensayadas con tres diferentes sistemas de lubricación (en seco, con politetrafluoretileno y con una emulsión limpia al 6%), el detalle completo de las muestras que se analizaron se encuentra en la Tabla 5.8. Cada una de las muestras ensayadas se dividió en cuatro partes con una cortadora con disco de diamante, como se muestra en la Fig. 5.16.

Tabla 5.5 Características de muestras seleccionadas para análisis metalográfico.			
Lubricación.	Porcentaje de reducción en el espesor del anillo.		
A (seco)	17.25	27.52	38.48
B (PTFE)	17.58	27.41	39.44
C (emulsion al 6%)	17.37	27.58	38.86

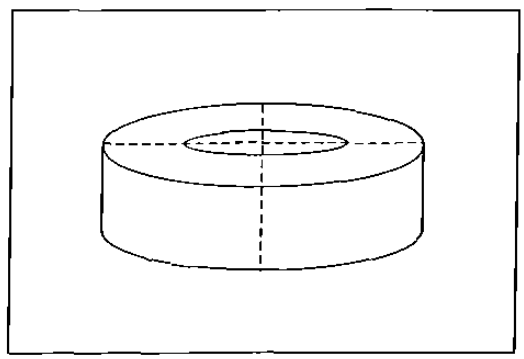


Fig. 5.16 Anillo seccionado en cuatro partes, cada corte a 90 del otro mediante una cortadora con disco de diamante.

De los cuartos de anillo que quedaron, nueve se metieron en una mufla a 700 °C durante un período de dos horas, con el fin de hacer crecer el tamaño de grano [21]. Las muestras se montaron para preparación metalográfica y se pulieron hasta acabado espejo con sílica de 0.03 μm. Las muestras fueron atacadas durante 4 segundos con un reactivo cuya composición se encuentra en la Tabla 5.9, este reactivo es conocido como el reactivo de Fry y es utilizado para revelar regiones localizadas de deformación plástica [22].

Tabla 5.6 Composición del reactivo de Fry.

Compuesto	Cantidad
Cloruro cúprico	36 g
Ácido Clorhídrico	145 ml
Agua destilada	80 ml

En las imágenes de las metalografías se alcanza a apreciar una X debido a la localización de la deformación como se muestra en la Fig. 5.17. De la Fig 5.18 a la Fig. 5.26 se muestran los imágenes obtenidas del análisis realizado a las muestras mediante estereoscopía.

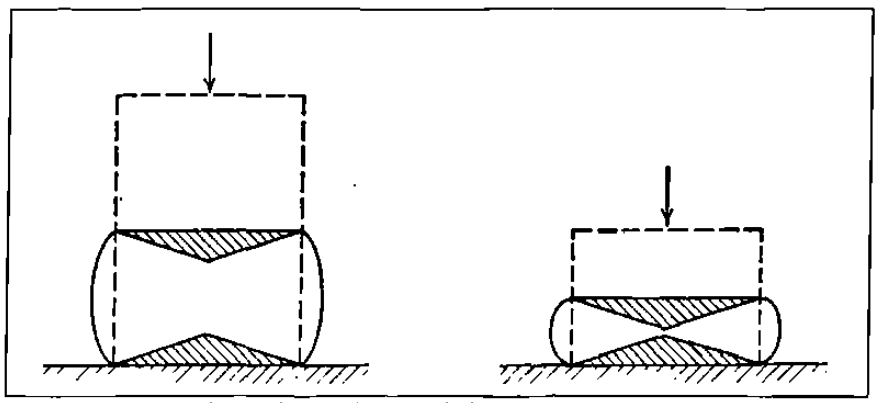
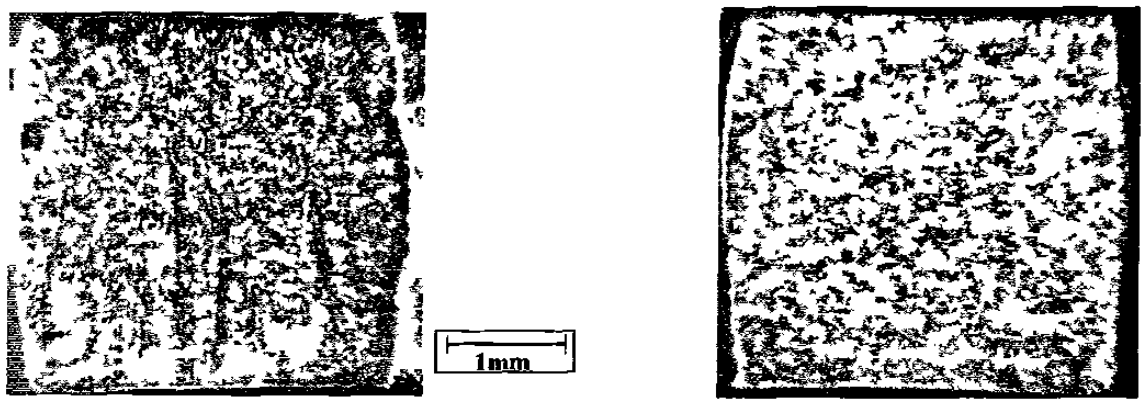
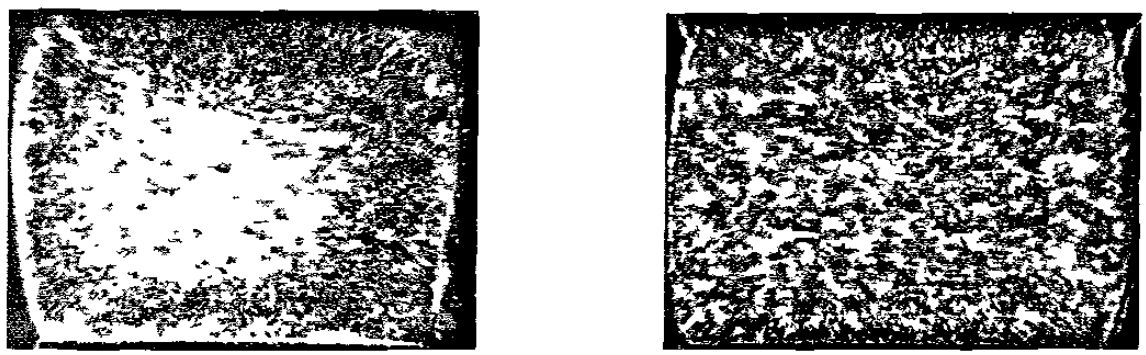


Fig. 5.17 Dibujo esquemático de la localización de la deformación creada por la compresión [3].



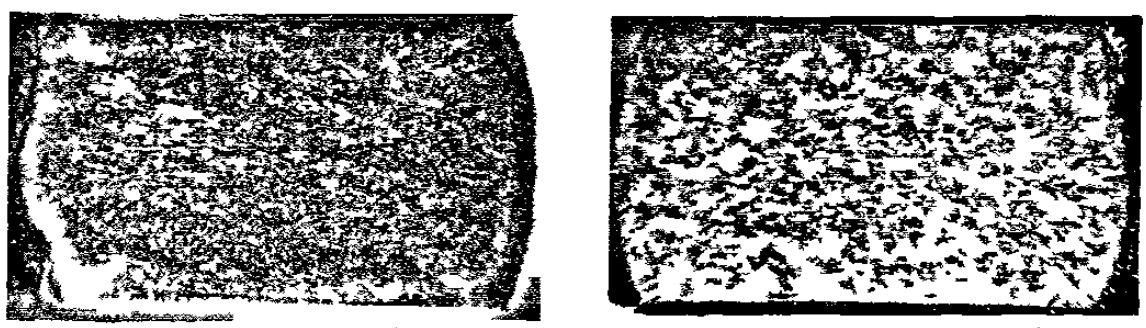
a) b)

Fig. 5.18 Muestra comprimida en seco con un 17.25% de reducción en el espesor (a) y con el tratamiento térmico (b).



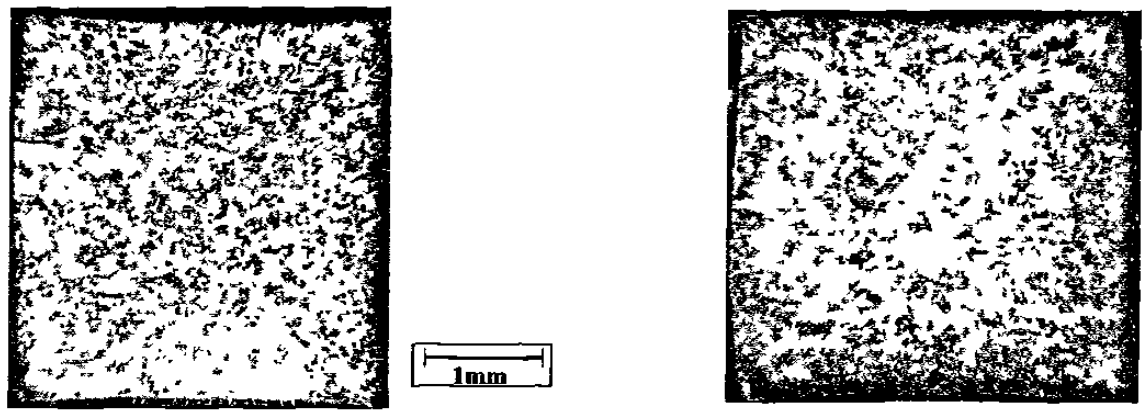
a) b)

Fig. 5.19 Muestra comprimida en seco con un 27.52% de reducción en el espesor (a) y con el tratamiento térmico (b).



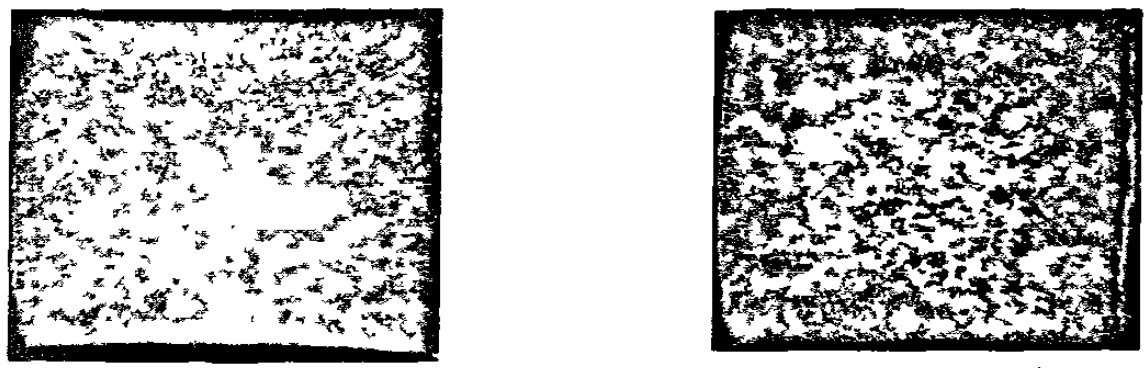
a) b)

Fig. 5.20 Muestra comprimida en seco con un 38.48% de reducción en el espesor (a) y con el tratamiento térmico (b).



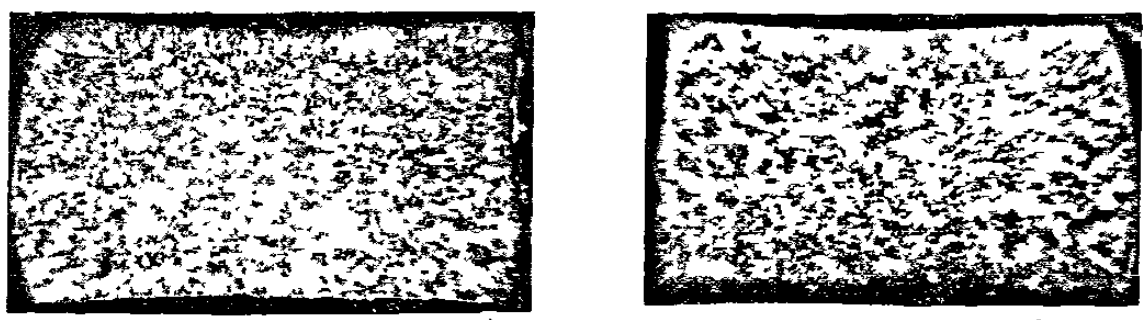
a) b)

Fig. 5.21 Muestra comprimida con politetrafluoretileno como lubricante con un 17.58% de reducción en el espesor (a) y con el tratamiento térmico (b).



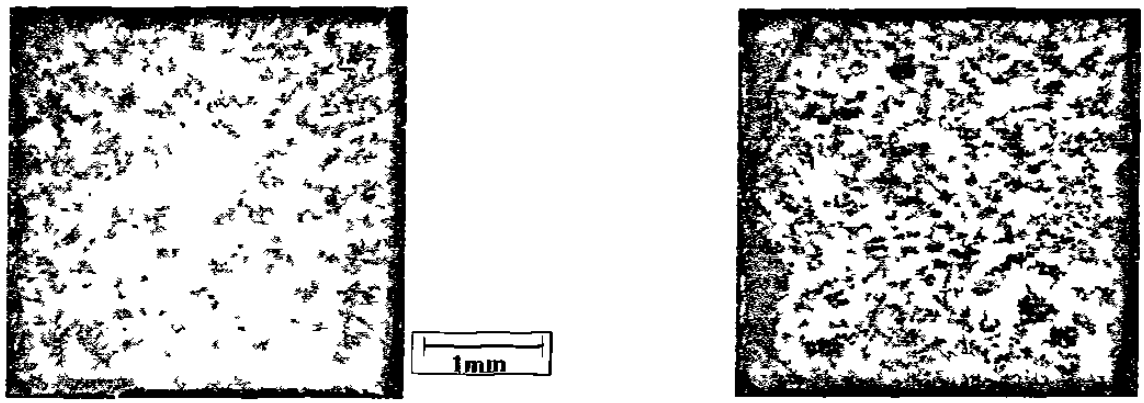
a) b)

Fig. 5.22 Muestra comprimida con politetrafluoretileno como lubricante con un 27.41% de reducción en el espesor (a) y con el tratamiento térmico (b).



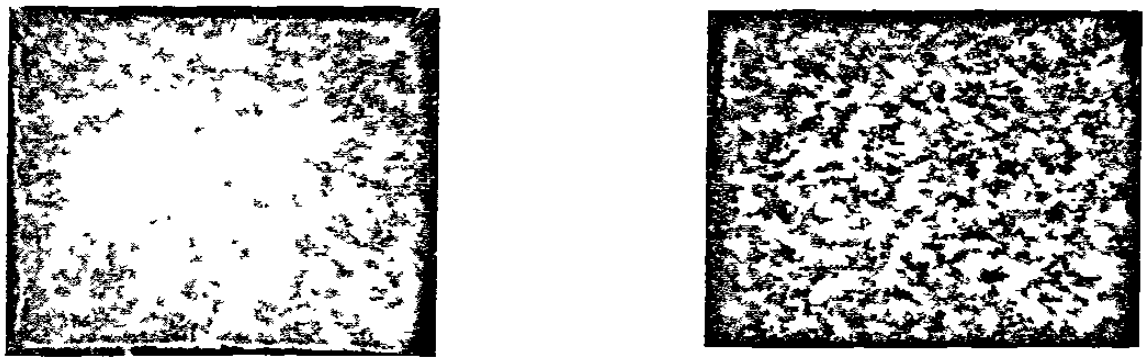
a) b)

Fig. 5.23 Muestra comprimida con politetrafluoretileno como lubricante con un 39.44% de reducción en el espesor (a) y con el tratamiento térmico (b).



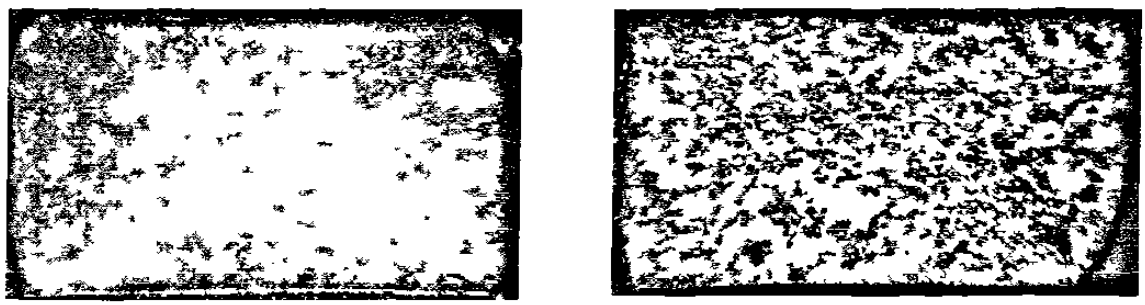
a) b)

Fig. 5.24 Muestra comprimida con emulsión limpia al 6% como lubricante con un 17.37% de reducción en el espesor (a) y con el tratamiento térmico (b).



a) b)

Fig. 5.25 Muestra comprimida con emulsión limpia al 6% como lubricante con un 27.58% de reducción en el espesor (a) sin y con el tratamiento térmico (b).



a) b)

Fig. 5.26 Muestra comprimida con emulsión limpia al 6% como lubricante con un 38.86% de reducción en el espesor(a) sin y con el tratamiento térmico (b).

5.7 MEDICIÓN DE MICRODUREZA

Se realizó un análisis de microdureza Vickers, aplicando una carga de 100g durante 5 segundos. A cada una de las 18 metalografías anteriores, se le hicieron nueve identaciones, distribuidas en forma de una malla de 3 por 3 centrada en la muestra como se ve en la Fig.5.27.

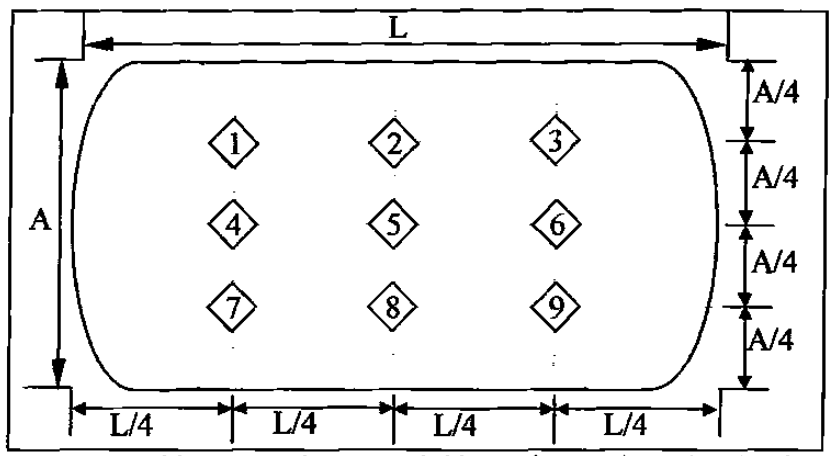


Fig. 5.27 Diagrama esquemático que con los puntos de identación para determinar la microdureza Vickers.

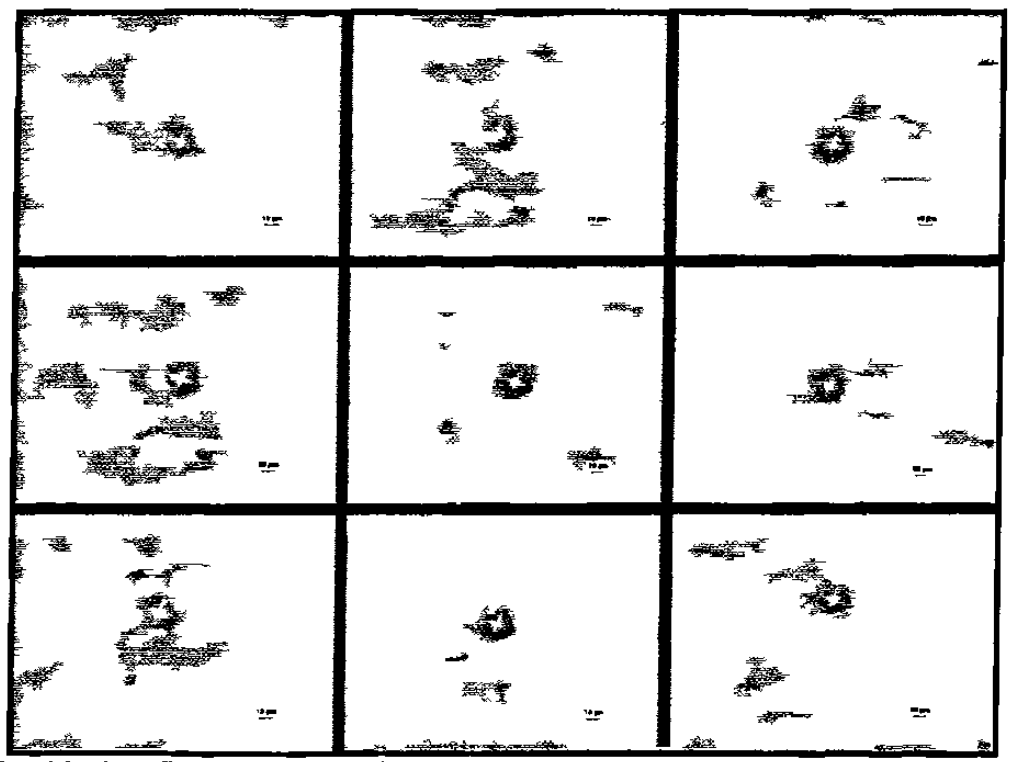


Fig. 5.28 Metalografía que muestra las identaciones realizadas a una muestra comprimida sin lubricante con una reducción en espesor de 27.52%.

Se realizaron un total de 162 identaciones y las dimensiones de las diagonales se encuentran en la Tabla 5.10, así como los resultados de microdureza Vickers (HV) que se calcularon a partir de la diagonal promedio en micrómetros (d) y la carga aplicada en gramos (P) de acuerdo a la fórmula:

$$HV = \frac{1854.4P}{d^2} \qquad [5.11]$$

Tabla 5.7 Resultados de las mediciones de dureza.

	No. de medicion	Muestras sin tratamiento térmico				Muestras con tratamiento térmico			
		Diagonal 1	Diagonal 2	Promedio	HV	Diagonal 1	Diagonal 2	Promedio	HV
Sin lubricante con 17.25% de deformación	1	25.13	25.49	25.31	289.52	38.95	40.06	39.51	118.82
	2	25.91	25.69	25.80	278.51	37.35	38.00	37.67	130.66
	3	25.64	26.02	25.83	277.92	35.62	36.37	35.99	143.14
	4	24.32	23.81	24.07	320.17	34.31	35.26	34.79	153.25
	5	24.04	24.28	24.16	317.65	42.40	42.77	42.58	102.26
	6	25.45	24.94	25.19	292.13	41.66	42.29	41.98	105.24
	7	27.49	27.61	27.55	244.36	36.86	35.90	36.38	140.09
	8	25.51	27.14	26.33	267.51	36.60	36.37	36.48	139.32
	9	24.90	24.54	24.72	303.40	40.81	41.29	41.05	110.04
Sin lubricante con 27.52% de deformación	1	24.78	25.64	25.21	291.80	34.31	34.67	34.49	155.89
	2	28.11	28.74	28.42	229.55	36.27	35.13	35.70	145.50
	3	25.64	25.41	25.53	284.61	36.50	35.40	35.95	143.50
	4	28.11	28.60	28.36	230.64	41.92	41.42	41.67	106.77
	5	25.77	25.91	25.84	277.65	41.29	40.67	40.98	110.40
	6	26.64	27.14	26.89	256.41	43.66	42.99	43.32	98.81
	7	28.60	26.87	27.74	241.00	41.91	41.56	41.73	106.48
	8	27.24	26.87	27.06	253.29	42.03	40.69	41.36	108.39
	9	26.51	25.51	26.01	274.10	43.39	43.02	43.20	99.35
Sin lubricante con 38.48% de deformacion	1	23.24	23.45	23.34	340.32	42.03	42.28	42.15	104.36
	2	26.42	25.49	25.95	275.33	41.92	41.42	41.67	106.77
	3	25.85	25.33	25.59	283.18	38.37	39.33	38.85	122.89
	4	26.00	27.07	26.54	263.33	40.43	41.41	40.92	110.74
	5	24.32	24.68	24.50	308.93	41.42	40.24	40.83	111.22
	6	26.20	25.19	25.70	280.86	40.06	40.80	40.43	113.45
	7	24.83	24.83	24.83	300.88	42.29	43.66	42.97	100.41
	8	25.19	24.91	25.05	295.57	43.16	40.93	42.04	104.92
	9	26.92	26.64	26.78	258.52	40.97	41.56	41.26	108.91
Con PTFE como lubricante con 17.58% de deformación	1	29.34	31.44	30.39	200.83	40.69	36.13	38.41	125.70
	2	28.01	28.97	28.49	228.44	38.44	38.44	38.44	125.52
	3	28.47	28.24	28.36	230.63	40.48	40.90	40.69	112.00
	4	29.71	29.72	29.71	210.06	40.13	39.88	40.00	115.88
	5	29.84	28.23	29.03	220.01	44.22	43.97	44.10	95.36
	6	29.84	31.55	30.70	196.82	36.19	37.06	36.62	138.25
	7	29.34	28.86	29.10	219.01	46.47	47.19	46.83	84.55
	8	30.94	30.32	30.63	197.65	38.95	37.27	38.11	127.67
	9	31.18	29.71	30.44	200.07	37.57	37.57	37.57	131.40

Continuación de Tabla 5 10									
	No. de medición	Muestras sin tratamiento termico				Muestras con tratamiento térmico.			
		Diagonal 1	Diagonal 2	Promedio	HV	Diagonal 1	Diagonal 2	Promedio	HV
Con PTFE como lubricante con 27 41% de deformacion	1	27.51	27.74	27.62	243.02	41.11	41.62	41.36	108.38
	2	32.01	32.30	32.15	179.38	36.55	36.13	36.34	140.42
	3	28.47	30.57	29.52	212.76	39.16	39.88	39.52	118.74
	4	27.24	27.49	27.36	247.66	42.34	43.57	42.96	100.50
	5	29.21	28.97	29.09	219.12	39.01	39.09	39.05	121.59
	6	29.97	29.84	29.90	207.37	40.54	39.88	40.21	114.71
	7	28.24	27.87	28.06	235.60	41.62	41.06	41.34	108.52
	8	29.84	29.95	29.89	207.51	42.13	43.72	42.92	100.66
	9	28.60	29.84	29.22	217.18	41.11	39.37	40.24	114.51
Con PTFE como lubricante con 39 44% de deformacion	1	27.14	27.14	27.14	251.69	42.13	41.98	42.05	104.87
	2	27.79	29.39	28.59	226.88	45.17	44.30	44.73	92.68
	3	25.49	27.24	26.36	266.79	41.70	38.59	40.14	115.06
	4	27.59	29.10	28.34	230.81	42.34	42.16	42.25	103.88
	5	26.06	27.79	26.92	255.80	44.66	42.20	43.43	98.32
	6	29.17	28.74	28.96	221.17	44.80	44.95	44.87	92.09
	7	27.29	28.24	27.76	240.60	40.97	39.37	40.17	114.92
	8	26.56	27.87	27.22	250.31	42.20	43.43	42.81	101.16
	9	26.20	28.15	27.18	251.03	45.39	45.67	45.53	89.45
Emulsión limpia al 6% con 17 37% de deformación	1	27.89	29.02	28.46	228.96	32.67	37.47	35.07	150.78
	2	32.93	32.55	32.74	172.99	35.04	34.45	34.74	153.62
	3	30.09	30.84	30.46	199.81	35.02	36.00	35.51	147.08
	4	31.38	30.63	31.01	192.87	33.53	34.43	33.98	160.61
	5	30.16	28.08	29.12	218.75	39.83	40.43	40.13	115.16
	6	29.50	31.01	30.25	202.59	39.33	39.93	39.63	118.07
	7	26.39	29.78	28.09	235.08	33.65	32.42	33.03	169.95
	8	31.21	29.88	30.54	198.76	36.24	35.39	35.81	144.57
	9	30.32	30.53	30.43	200.30	33.17	32.67	32.92	171.14
Emulsión limpia al 6% con 27 58% de deformación	1	31.58	32.24	31.91	182.13	41.78	39.24	40.51	112.98
	2	28.65	28.65	28.65	225.97	39.96	40.80	40.38	113.73
	3	31.59	30.53	31.06	192.20	41.66	41.29	41.48	107.78
	4	30.20	31.32	30.76	195.95	41.26	42.90	42.08	104.75
	5	29.13	28.93	29.03	220.10	40.83	40.93	40.88	110.98
	6	32.82	35.76	34.29	157.70	35.66	34.51	35.08	150.66
	7	29.39	31.38	30.39	200.86	38.00	37.42	37.71	130.40
	8	30.26	32.55	31.41	188.01	41.92	38.83	40.38	113.75
	9	31.01	30.58	30.79	195.59	39.16	40.21	39.68	117.76
Emulsion limpia al 6% con 38 86% de deformacion	1	32.05	32.17	32.11	179.87	37.50	35.88	36.69	137.77
	2	30.94	32.05	31.49	186.98	41.19	40.18	40.68	112.03
	3	27.61	28.47	28.04	235.82	34.54	35.00	34.77	153.36
	4	32.05	29.47	30.76	196.01	38.95	38.83	38.89	122.61
	5	30.46	31.59	31.03	192.65	39.20	38.23	38.71	123.73
	6	28.35	29.09	28.72	224.84	39.32	39.32	39.32	119.95
	7	31.34	28.11	29.72	209.89	35.87	35.25	35.56	146.65
	8	31.55	33.04	32.30	177.78	40.06	39.69	39.88	116.62
	9	31.12	31.18	31.15	191.08	42.16	41.55	41.86	105.85

Debido a la simetría geométrica que se presenta en la Fig. 5.27 los datos de la Tabla 5.10 se redujeron en cuatro puntos, de acuerdo a como se muestra en la Tabla 5.11, se promediaron las mediciones 1, 3, 7, 9, que corresponden a las esquinas de las muestras (Gráfica 1 de la Fig. 5.29), las mediciones 2 y 8 (Gráfica 2 de la Fig. 5.29), las mediciones 4 y 6 (Gráfica 3 de la Fig. 5.29) y las mediciones 5 que corresponde a la identación central (Gráfica 4 de la Fig. 5.29). En las gráficas de la Fig. 5.29 se aprecia que las piezas que fueron tratadas térmicamente presentan una menor dureza.

Tabla 5.8	Mediciones de durezas graficadas en la Fig. 5.29.
	Datos promediados, de acuerdo a la Fig. 5.27.
Gráfica 1	1, 3, 7, 9
Gráfica 2	2 y 8
Gráfica 3	4 y 6
Gráfica 4	5

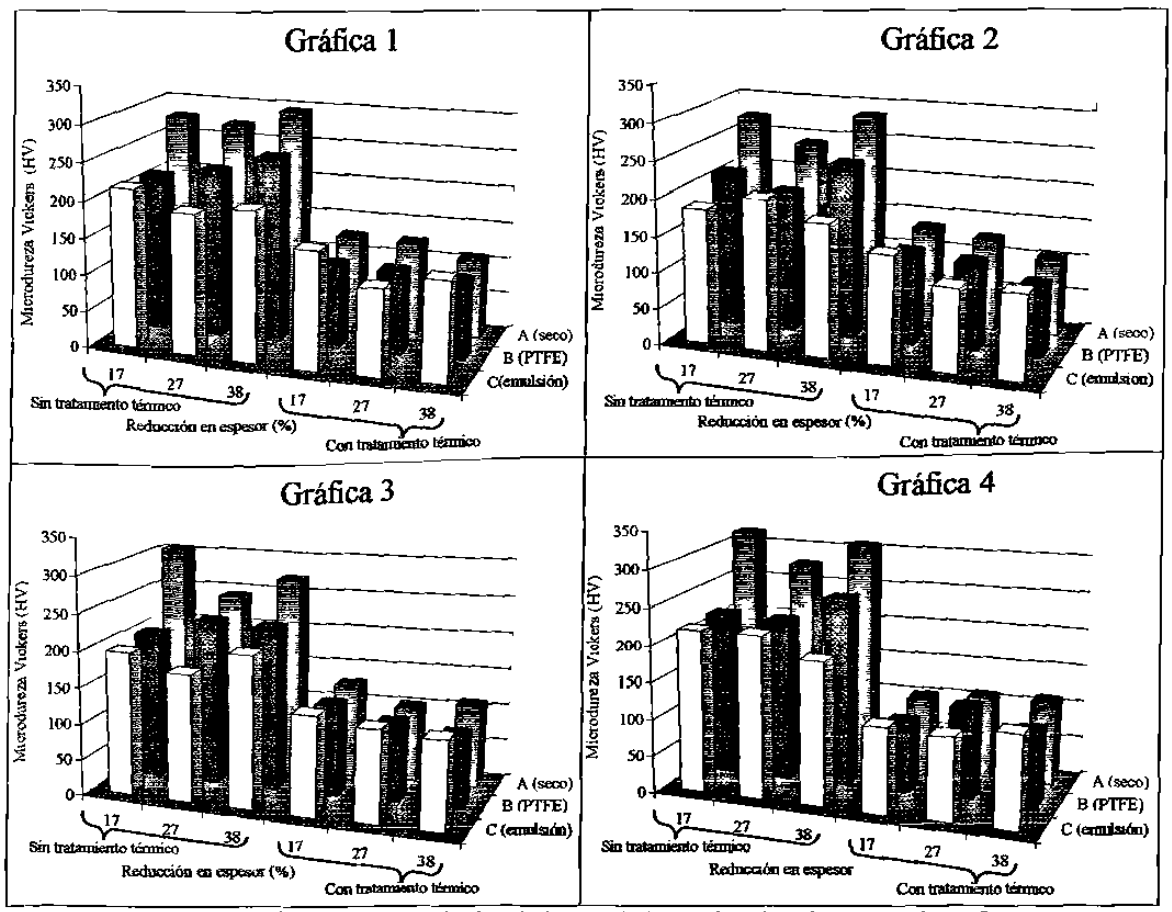


Fig. 5.29 Gráficas de los resultados de las mediciones de microdureza Vickers (HV).

De los resultados obtenidos con las mediciones de microdureza no se pudo obtener una relación directa con la deformación dentro de la pieza, en la Tabla 5.12 se muestra un resumen de la Tabla 5.10 obtenido mediante promedios y en la Fig. 5.30 se muestra una gráfica de los resultados de microdureza contra tipo de lubricante y diferentes porcentajes de deformación en las muestras sin tratamiento térmico.

Tabla 5.9 Resumen de los resultados de las mediciones de microdureza Vickers.

Condición del ensayo.	Muestras sin tratamiento térmico.	Muestras con tratamiento térmico.
Sin lubricante con 17.25% de deformación	287.91	126.98
Sin lubricante con 27.52% de deformación	259.90	156.80
Sin lubricante con 38.48% de deformación	289.66	109.30
PTFE como lubricante con 17.58% de deformación	211.50	117.37
PTFE como lubricante con 27.41% de deformación	218.84	114.23
PTFE como lubricante con 39.44% de deformación	243.90	101.38
Emulsión limpia al 6% con 17.37% de deformación	205.57	147.89
Emulsión limpia al 6% con 27.58% de deformación	195.39	118.09
Emulsión limpia al 6% con 38.86% de deformación	199.44	126.51

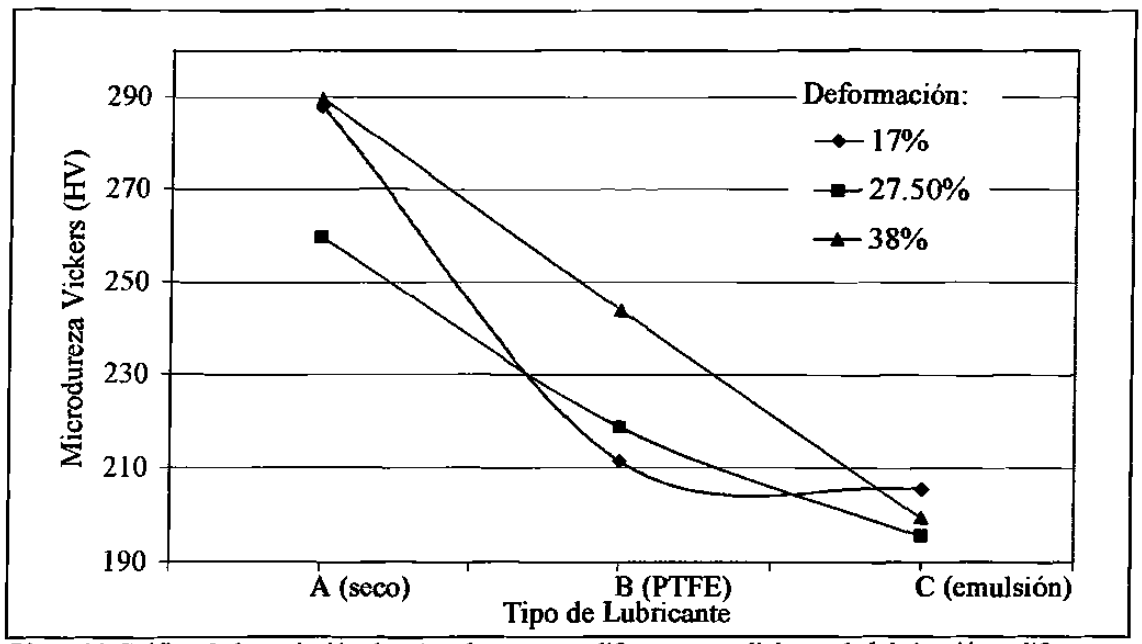


Fig. 5.30 Gráfica de la variación de microdureza para diferentes condiciones de lubricación y diferentes porcentajes de deformación.

5.8 CURVAS DE FLUENCIA

En los ensayos realizados también se creó un registro de carga y desplazamiento de cada uno de los ensayos, para después poder crear la curva esfuerzo contra deformación verdaderas, corregidas por el factor de fricción del PTFE, para poderla considerar como una curva de fluencia del material, para esto se utilizó un programa computacional [23]. De las Fig. 5.31 a la Fig. 5.37 se muestran las curvas de fluencia obtenidas para los materiales A, B, C, D, E y F.

A pesar de la diferencia en la resistencia mecánica entre los diferentes materiales, esto no se traduce en una diferencia en el factor de fricción cortante interfasial (m). La carga aplicada para lograr un cierto porcentaje de deformación depende del material ensayado y para las mismas condiciones de lubricación, el factor de fricción cortante interfasial permanece constante.

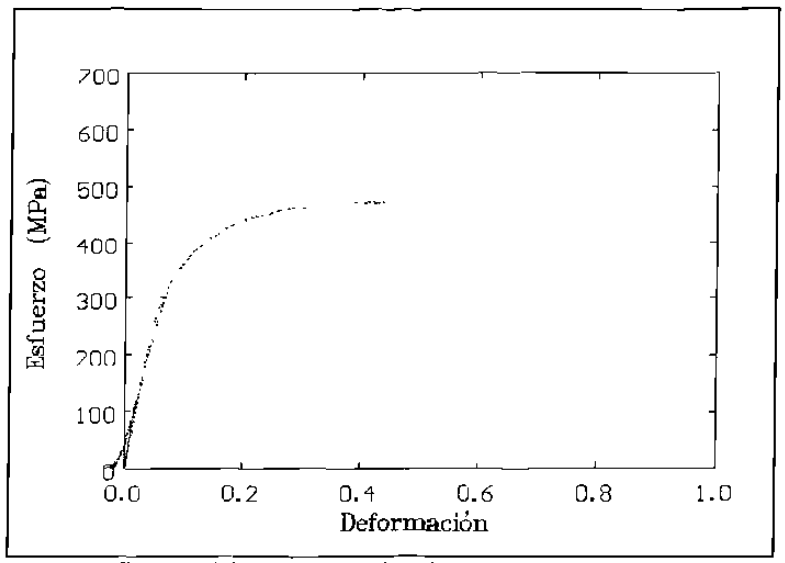


Fig. 5.31 Curva de fluencia del material A, obtenida con un programa computacional [23].

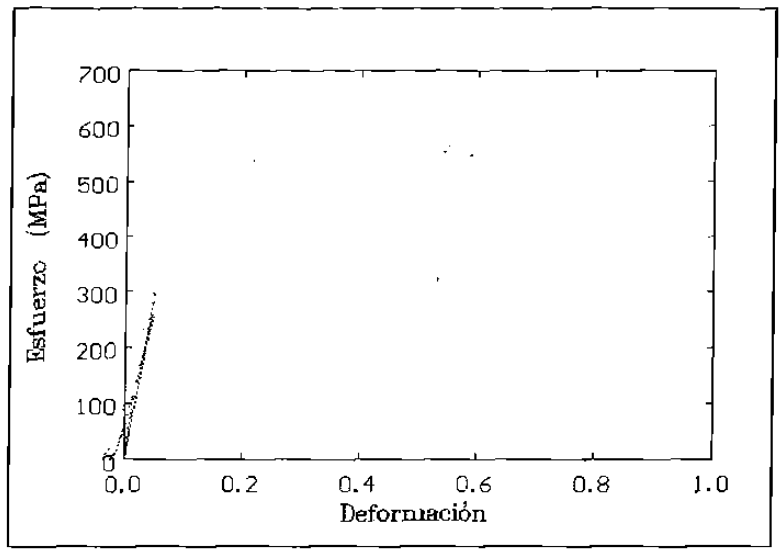


Fig. 5.32 Curva de fluencia del material B, obtenida con un programa computacional [23].

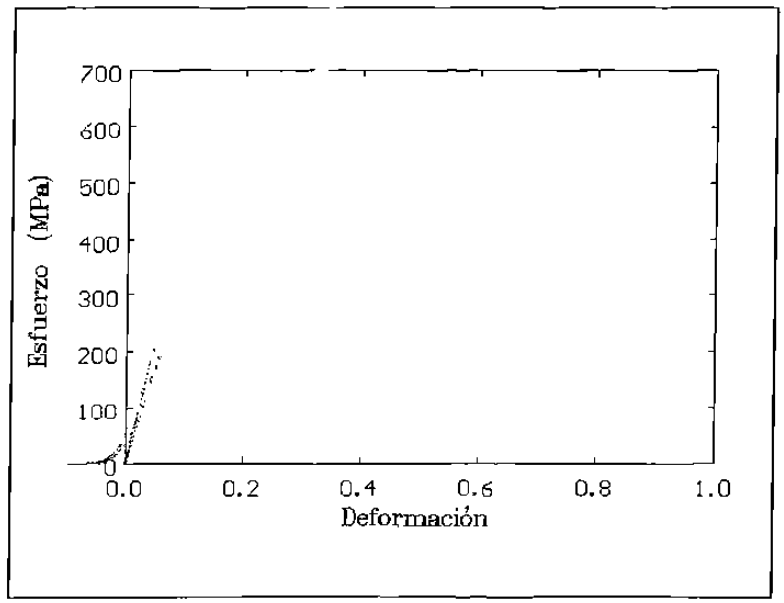


Fig. 5.33 Curva de fluencia del material C, obtenida con un programa computacional [23].

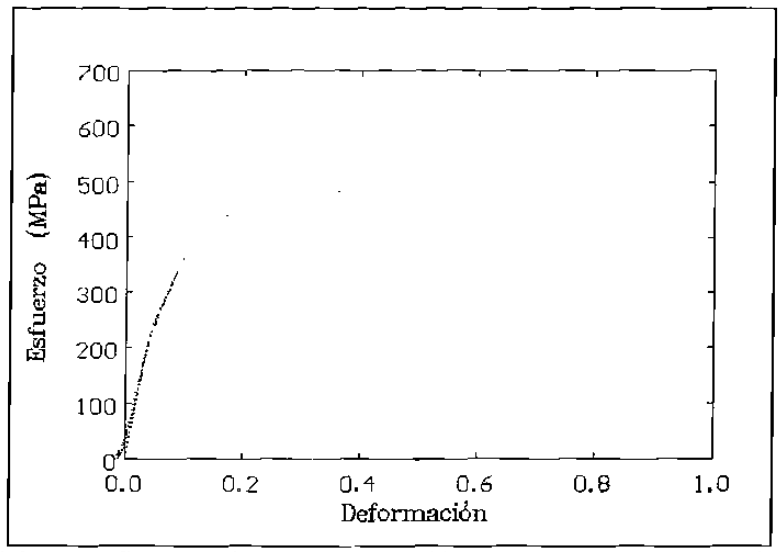


Fig. 5.34 Curva de fluencia del material D, obtenida con un programa computacional [23].

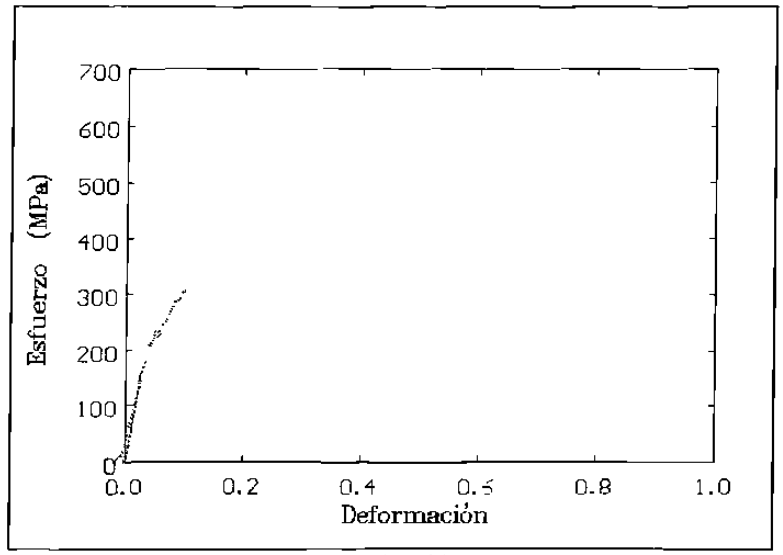


Fig. 5.35 Curva de fluencia del material E, obtenida con un programa computacional [23].

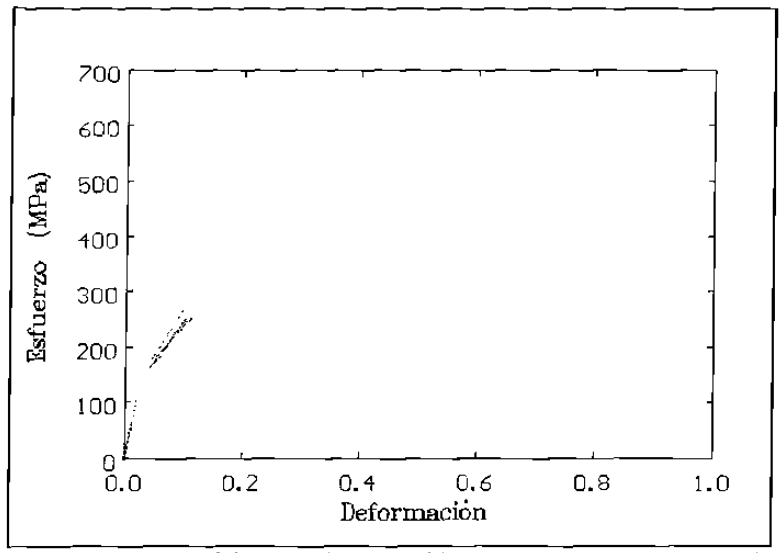


Fig. 5.36 Curva de fluencia del material F, obtenida con un programa computacional [23].

5.9 COMPARACIÓN DE ENSAYOS DE TENSIÓN CON LOS DE COMPRESIÓN DE ANILLOS

Las curvas de fluencia obtenidas con los ensayos de compresión de anillos se compararon con las curvas de fluencia obtenidas mediante ensayos tensión [24]. De las Fig. 5.37 a la Fig. 5.42 se muestran las curvas de fluencia obtenidas con ensayos de tensión [24] y las curvas obtenidas con los ensayos de compresión de anillo para los materiales A, B, C, D, E y F.

El material utilizado para realizar los ensayos de tensión se obtuvo a partir de el rollo que sale del proceso de laminación en caliente que parte de una colada continua Fig. 4.5 y de los pasos siguientes en el proceso de dicho rollo, los cuales consisten en las diferentes reducciones por las que pasa en el proceso de laminación en frío Fig. 4.8.

Las curvas de fluencia de los ensayos de compresión de anillo están por debajo de las de tensión ya que no se está considerando la parte intermedia del proceso entre el castillo 2 y el rollo final del molino caliente Fig. 4.5.

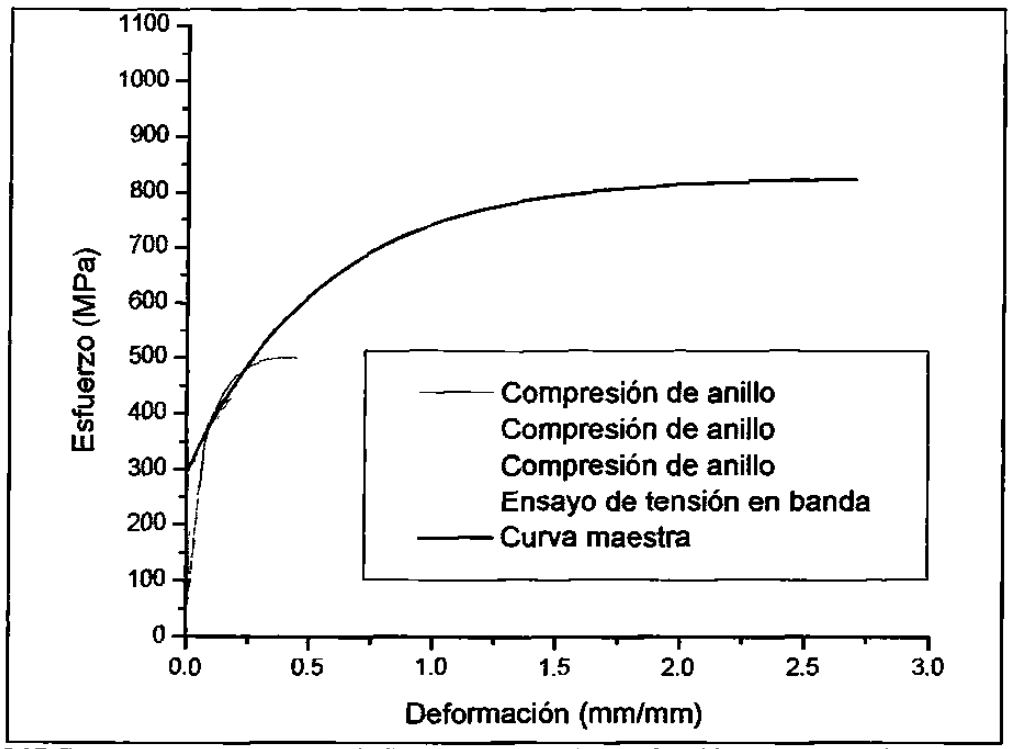


Fig. 5.37 Comparación de las curvas de fluencia del material A, obtenida con ensayos de tensión [24] y con ensayos de compresión de anillo.

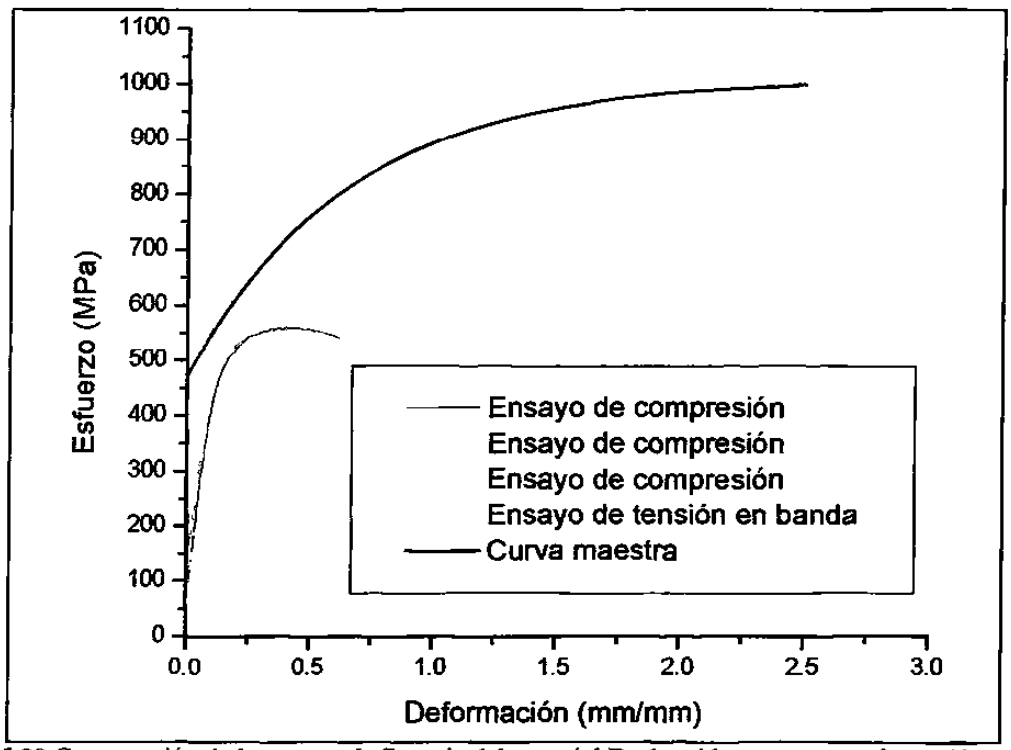


Fig. 5.38 Comparación de las curvas de fluencia del material B, obtenida con ensayos de tensión [24] y con ensayos de compresión de anillo.

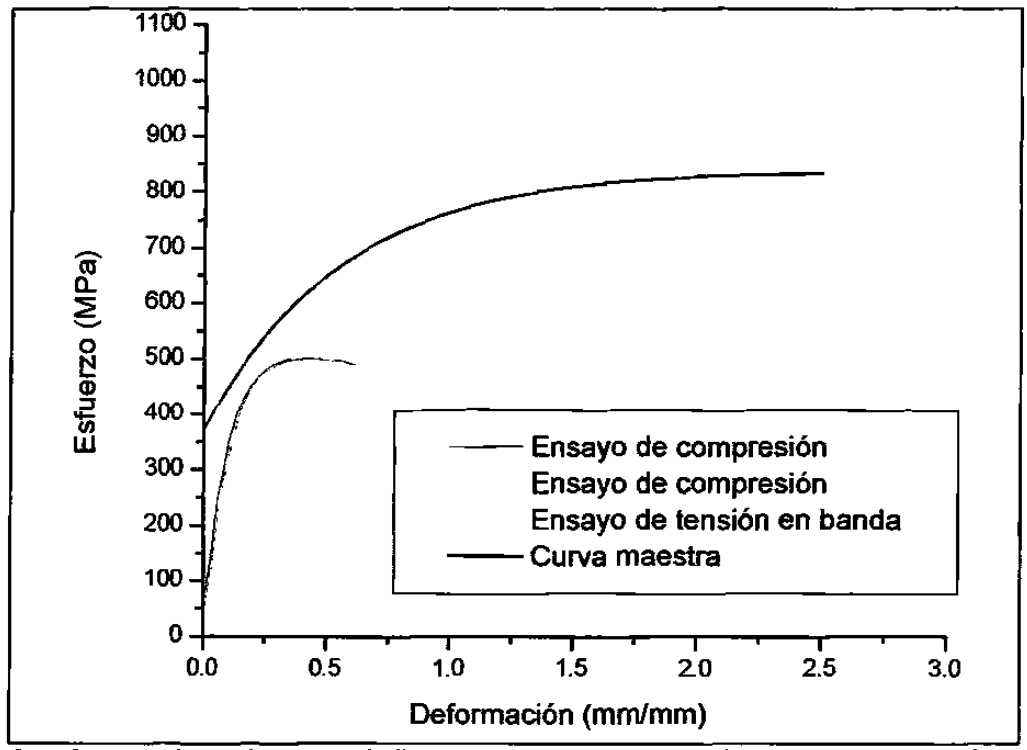


Fig. 5.39 Comparación de las curvas de fluencia del material C, obtenida con ensayos de tensión [24] y con ensayos de compresión de anillo.

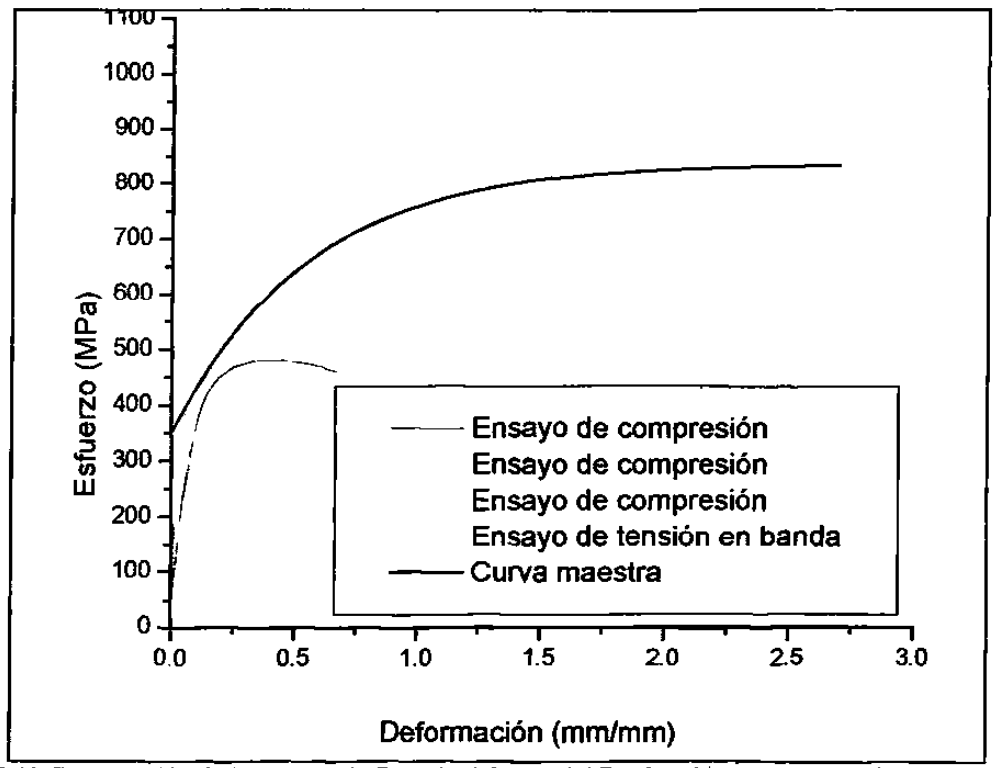


Fig. 5.40 Comparación de las curvas de fluencia del material D, obtenida con ensayos de tensión [24] y con ensayos de compresión de anillo.

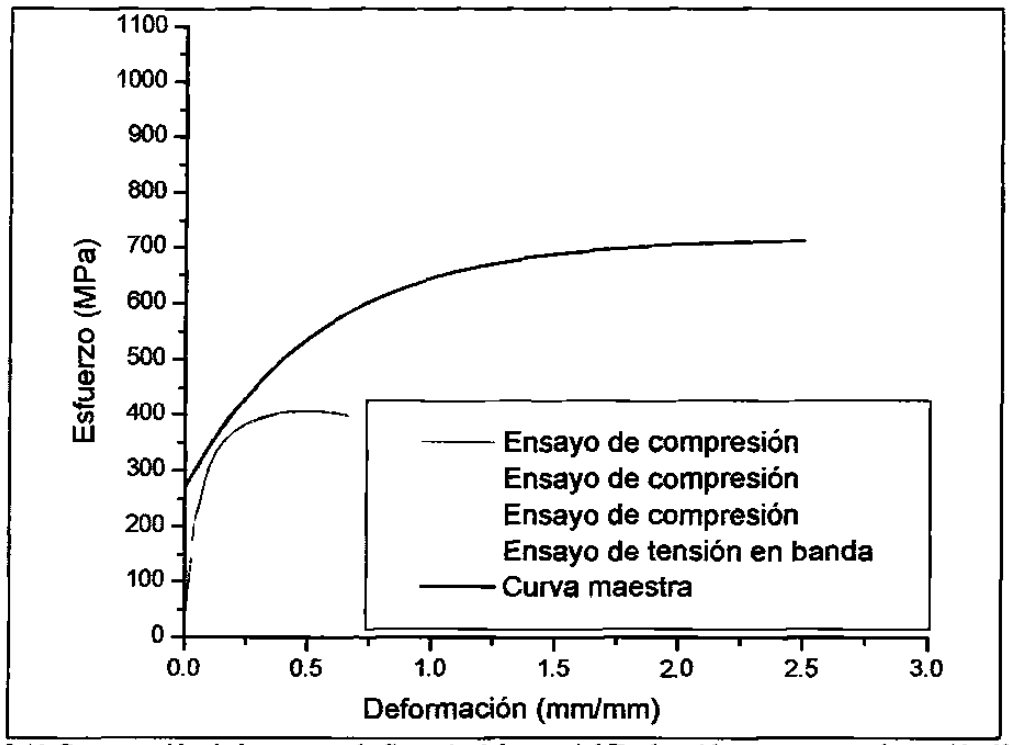


Fig. 5.41 Comparación de las curvas de fluencia del material E, obtenida con ensayos de tensión [24] y con ensayos de compresión de anillo.

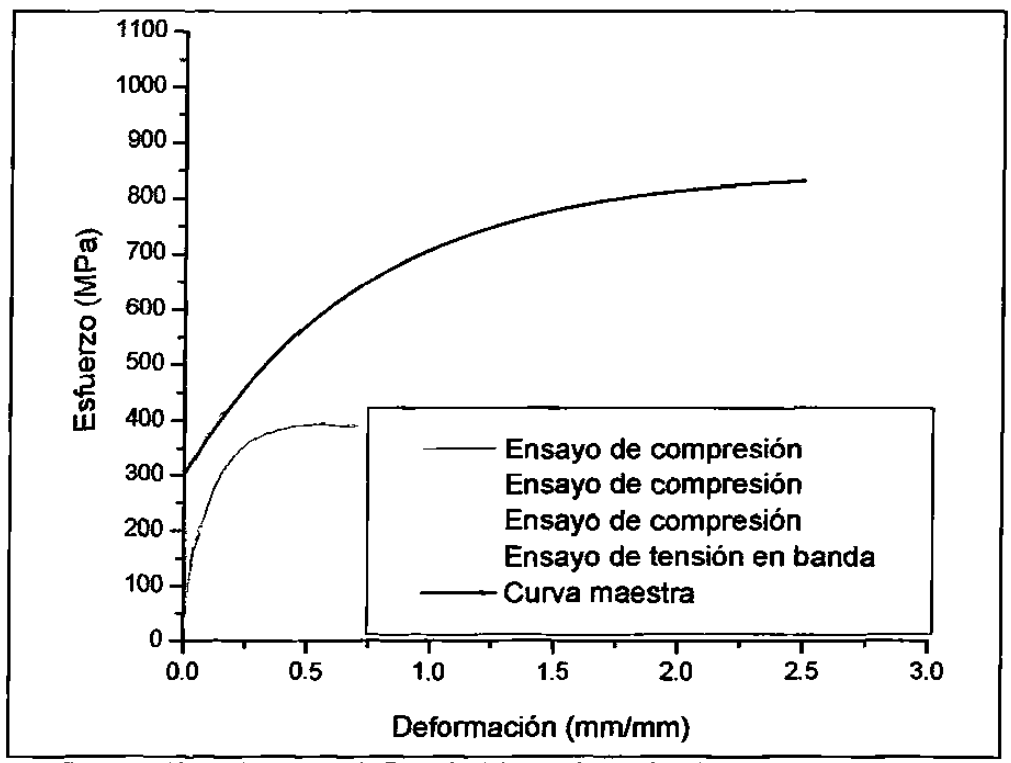


Fig. 5.42 Comparación de las curvas de fluencia del material F, obtenida con ensayos de tensión [24] y con ensayos de compresión de anillo.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en la presente investigación se puede concluir lo siguiente:

La fricción en un proceso de formado depende del sistema de lubricación presente, principalmente del lubricante y de la geometría del sistema y no del material que se está procesando.

La prueba de compresión de anillo es una buena herramienta para determinar la fricción en un proceso de formado, así como la curva de fluencia del material. Esta prueba se basa en las mediciones de los cambios de geometría del anillo en compresión y representan en gran medida lo que realmente sucede en el proceso real, involucrando el tipo de material, lubricantes, cargas aplicadas, deformación.

Las pruebas realizadas con emulsiones de aceite al 6% presentaron el mismo factor de fricción interfasial (m), tanto para la emulsión limpia como para la que presentaba contaminantes. Esto se debe a que la cantidad de contaminantes estaban dentro del nivel de contaminantes permitido para el buen funcionamiento del molino de laminación, por lo cual no se afectó el factor de fricción interfasial (m).

Los ensayos realizados sin lubricante y con politetrafluoretileno representan los extremos dentro de los límites de fricción en el formado de metales, obteniendo la mínima fricción con el politetrafluoretileno y la máxima fricción sin lubricante.

El material obtenido de un molino de laminación en caliente, es una buena opción para la fabricación de los anillos, ya que por presentar poca anisotropía, provoca que el anillo al ser deformado siga manteniendo su circunferencia, lo cual facilita las mediciones de sus dimensiones finales.

Del análisis metalográfico y de microdureza no se encontró una dependencia del tamaño de grano, de la dureza y ni de la deformación con respecto al factor de fricción cortante interfasial (m).

El algoritmo utilizado (Anexo V) para el análisis de las pruebas de compresión de anillos es una buena opción para analizar los cambios en geometría de los anillo, con éste se asegura que el criterio para determinar el factor de fricción interfasial (m) a partir de los cambios geométricos del anillo sea constante y no sea arbitrario como cuando se realiza una comparación visual de las curvas.

6.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda para estudios posteriores realizar pruebas de compresión de anillo variando la velocidad de deformación y así poder trazar la curva del comportamiento de la fricción contra la velocidad. También se recomienda realizar pruebas de compresión de anillo variando el acabado superficial del anillo para conocer los límites de rugosidad dentro del los cuales no se ve afectada significativamente la fricción.

Otra recomendación es realizar pruebas de compresión de anillo con los distintos lubricantes que ofrece el mercado para la industria de laminación, esto con el fin de evaluarlos, pudiendo encontrar un lubricante menos costoso y al mismo tiempo se obtengan los mismos o mejores resultados.

El programa utilizado ayuda a simplificar el análisis y se puede tomar como un punto de partida para así poder hacer más común la prueba de compresión de anillos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ernest Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials*, Wiley Interscience, 2° ed., Nueva York, 1995, pp. 1-123, 239-265.

[2] Eugene A. Avallone y Theodore Baumeister III, *Marks manual del ingeniero mecánico*, Mc. Graw Hill 9° ed.,México D.F., 1995, Cap. 3, 5, 6 y 13.

[3] George E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, Mc Graw Hill, Nueva York, 2° ed, 1976, pp. 503-615.

[4] Betzalel Avitzur, *Metal Forming: Processes and Analyses*, Mc Graw Hill, Nueva York, 1968, pp. 77-150, 436-491.

[5] Hasan Sofuoglu, Hasan Gedikli, y Jahan Rasy, *Determination of Friction Coefficient by Employing the Ring Compression Test*, Journal of Engineering Materials and Technology, EUA, Vol. 123 julio 2001, p. 338.

[6] ASM International Hanbook Committee, *AMS Handbook Friction Lubrication and Wear Technology volume 18,* The material information Society, EUA, 1987, pp. 1-162.

[7] Moore Kibbey, *Materiales y Procesos de Fabricación (industria metal mecánica y de plásticos)*, Limusa / Noriega editores, México D.F., 1996, pp. 197-208, 309-360.

[8] Mickell P. Groover, *Fundamentos de Manufactura Moderna (materiales, procesos y sistemas)*, Prentice Hall, México D.F., 1997, pp. 99-108, 183-219, 447-475.

[9] William L. Roberts, *Cold Rolling of Steel*, Marcel Dekker, Nueva York, 1978, pp. 1-109, 243-332, 478-568.

[10] Vladimir B. Ginzburg y Robert Ballas, *Flat Rolling Fundamentals*, Marcel Dekker, Nueva York 2000, pp. 239-279, 381-502.

[11] Marc André Meyers y Krishan Kumar Chawla, *Mechanical Metallurgy principles and applications*, Prentice Hall, Nueva Jersy, 1984, pp.71-131.

[12] Rafael Colás, *Programa Computacional para determinar la colina de fricción basado en Bland y Ford,* UANL, San Nicolás de los Garza, N. L., México, 2003.

[13] Alan T. Male, M. G. Cockcroft, *A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation*, Journal of the Institute of Metals, EUA, Vol. 93, 1964-65, pp. 38-93.

[14] Vicent De Pierre, Fred Gurney y Alan T. Male, *Mathematical calibration of the ring test with bulge formation*, Tech. Rep. No. AFML-TR-72-37, USAF Materials Laboratory, EUA, 1972.

[15] Geoffrey W. Rowe, *Principles of Industrial Metalworking Processes*, Crane Russak, Gran Bretaña, 1977, pp. 287-307.

[16] Empresa Hylsamex S.A. de C.V, *división aceros planos*, San Nicolás de los Garza, N.L., México, 2003.

[17] Rodríguez Arizpe Paloma. *Trabajo de investigación en Tesis de Maestría,* UANL, México, 2003.

[18] George E. P. Box, William G. Hunter, J y Stuart Hunter, *Estadística para investigadores, introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos*, Reverté, Barcelona, 1989, pp. 601-622.

[19] John A. N. Lee, *Numerical Analysis for Computers,* Reinhold Publishing Corporation, Nueva York, 1996, p. 255.

[20] Chris H. Pappas y William H. Murray III, *Borland C++ Handbook,* Mc Graw Hill, Nueva York, 1994, pp. 405-525.

[21] A. Gulyaev, *Physical Metallurgy, Volume 1,* Mir Publishers, Moscow, 1978, pp. 217-328.

[22] Leonard E. Samuels, *Optical Microscopy of Carbon Steels,* American Society of Metals, Ohio, 1980, pp. 575-579.

[23] Rafael Colás, *Programa para determinar la curva de fluencia,* UANL, San Nicolás de los Garza, N. L., México, 2003.

[24] Luis G. Díaz Samaniego, *Simulación del proceso de laminación en frío de aceros al carbono por el método de elemento finito usando ABAQUS*^{MR}, UANL, San Nicolás de los Garza, N. L., México. pp. 189-195.

ANEXO I

I.1 ANÁLISIS METALOGRÁFICO

Las probetas para análisis metalográfico se obtuvieron como se muestra en la Fig. I.1.

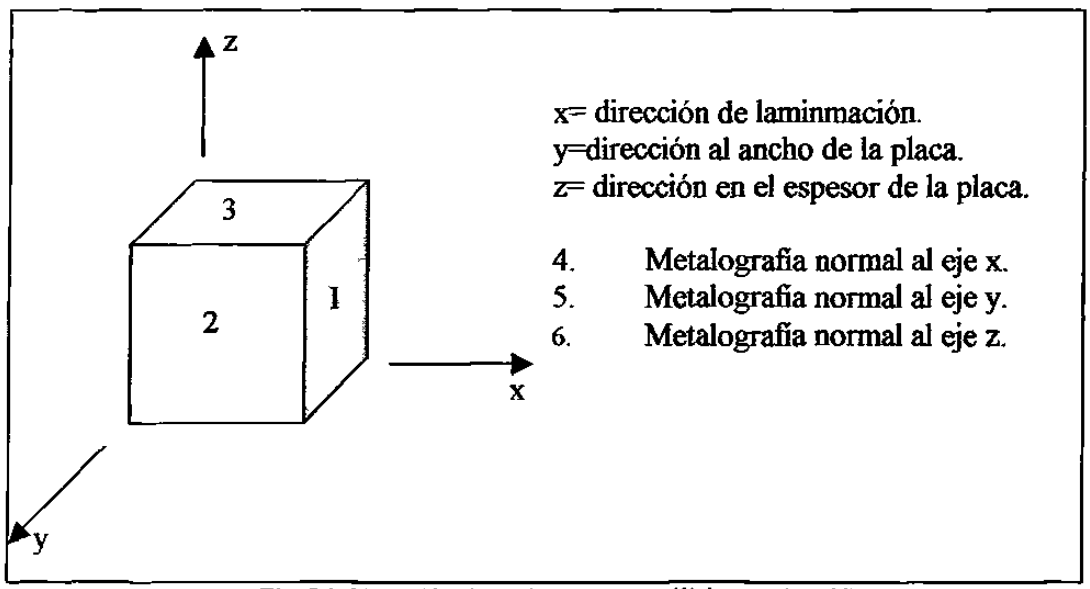


Fig. I.1 Obtención de probetas para análisis metalográfico.

Fig. I.2 Metalografía 1 del Material A.

Fig. I.3 Metalografía 2 del Material A.

Fig. I.4 Metalografía 3 del Material A.

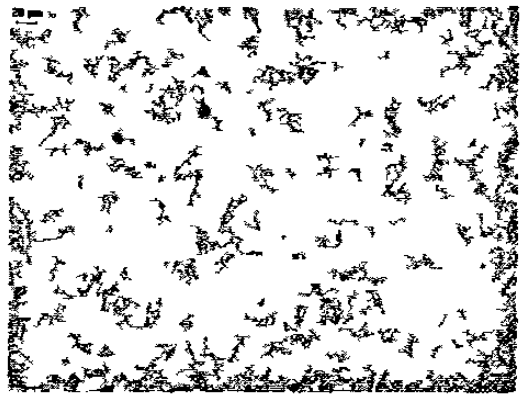


Fig. I.5 Metalografía 1 del Material B.

Fig. I.6 Metalografía 2 del Material B.

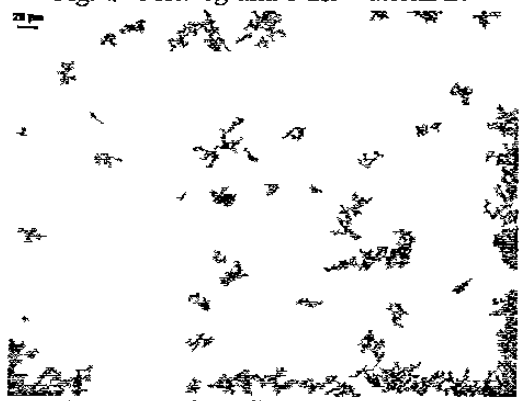


Fig. I.7 Metalografía 3 del Material B.

Para medir el tamaño promedio de grano se utilizó un microscopio óptico modelo Olympus BX60 y el software analizador de imágenes Image-Pro PLUS versión 4.5.0.19, y los resultados se encuentran en la Tabla I.1.

Tabla I.1 Tamaños promedio de grano.

Número de figura.	Cantidad de granos muestreados	Diámetro promedio (μm)	No. ASTM
Fig. I.1	200	26.29	8
Fig. I.2	173	25.71	8
Fig. I.3	148	28.69	8
Fig. I.4	1152	11.16	10
Fig. I.5	840	12.09	10
Fig. I.6	803	12.71	10

ANEXO II

II.1 DIMENSIONES INICIALES DE ANILLOS DE MATERIAL A.

Tabla II.1 Dimensiones iniciales de anillos de material A

No Experimento	Diametro externo (mm)			Diametro interno (mm)			Espesor (mm)					Lubricación
	Medicion		Prom	Medicion		Prom	Medición				Prom	
1	11.89	11.91	11.90	5.89	5.91	5.90	3.98	3.98	3.98	3.97	3.98	A (seco)
2	11.87	11.86	11.87	5.98	6.02	6.00	4.07	4.08	4.07	4.08	4.08	
3	11.93	11.94	11.94	6.02	6.01	6.02	4.03	3.97	4.01	4.00	4.00	
4	11.89	11.91	11.90	5.99	6.00	6.00	4.03	4.04	4.06	4.05	4.05	B (PTFE)
5	12.01	12.00	12.01	5.98	6.01	5.99	3.98	4.01	4.02	3.99	4.00	
6	12.00	12.02	12.01	5.76	5.77	5.77	4.03	4.04	4.02	4.03	4.03	
7	11.92	11.91	11.92	6.02	6.04	6.03	4.00	3.98	4.01	4.01	4.00	C (emulsion al 6%)
8	11.96	11.95	11.96	5.84	5.85	5.85	3.94	3.95	3.95	3.94	3.95	
9	11.96	11.94	11.95	6.02	6.06	6.04	3.98	4.00	4.00	3.99	3.99	
10	11.65	11.70	11.68	6.08	6.07	6.08	4.02	4.04	4.03	4.05	4.04	D (emulsion al 6% contaminada)
11	12.01	11.99	12.00	6.00	6.00	6.00	4.03	4.02	4.00	4.00	4.01	
12	11.94	11.94	11.94	6.01	6.00	6.01	4.02	4.01	4.00	3.98	4.00	
13	12.02	12.01	12.02	5.91	5.91	5.91	3.97	3.95	3.95	3.93	3.95	A (seco)
14	12.00	11.98	11.99	6.10	6.10	6.10	3.95	3.98	3.98	3.97	3.97	
15	11.92	11.95	11.94	5.90	5.87	5.89	3.95	3.97	3.99	3.95	3.97	
16	11.93	11.99	11.96	5.75	5.89	5.82	4.06	4.04	4.05	4.04	4.05	B (PTFE)
17	11.96	11.95	11.96	5.97	5.98	5.98	3.93	3.95	3.97	3.98	3.96	
18	12.04	12.05	12.05	6.09	6.08	6.09	4.03	4.07	4.06	4.05	4.05	
19	11.97	11.97	11.97	6.08	6.06	6.07	4.05	4.04	4.07	4.08	4.06	C (emulsion al 6%)
20	11.97	11.97	11.97	6.02	6.01	6.02	3.98	3.96	3.98	3.97	3.97	
21	11.90	11.91	11.91	5.80	5.88	5.84	3.92	3.90	3.90	3.92	3.91	
22	12.09	12.07	12.08	6.06	6.07	6.07	3.96	3.96	3.98	3.98	3.97	D (emulsion al 6% contaminada)
23	12.04	12.05	12.05	6.00	5.90	5.95	3.92	3.90	3.94	3.91	3.92	
24	12.00	11.95	11.98	6.00	6.00	6.00	3.97	3.95	3.97	3.95	3.96	
25	11.99	12.00	12.00	6.01	5.95	5.98	3.96	3.97	3.98	3.97	3.97	A (seco)
26	12.04	12.05	12.05	6.04	6.00	6.02	4.00	4.02	3.98	3.99	4.00	
27	11.99	11.99	11.99	6.07	6.00	6.04	4.05	4.04	4.02	4.01	4.03	
28	11.99	11.99	11.99	5.93	5.88	5.91	3.93	3.93	3.93	3.93	3.93	B (PTFE)
29	11.97	11.97	11.97	6.04	5.96	6.00	3.98	4.01	3.99	4.00	4.00	
30	11.97	11.97	11.97	5.94	5.93	5.94	3.97	3.96	4.00	3.97	3.98	
31	12.03	12.03	12.03	5.93	5.91	5.92	3.96	3.95	3.96	3.96	3.96	C (emulsion al 6%)
32	11.99	11.97	11.98	6.06	6.03	6.05	3.96	3.94	3.93	3.96	3.95	
33	11.98	11.98	11.98	5.99	5.95	5.97	3.98	3.96	3.98	4.00	3.98	
34	11.97	11.97	11.97	5.93	5.91	5.92	3.95	3.94	3.94	3.95	3.95	D (emulsion al 6% contaminada)
35	11.97	11.97	11.97	5.92	5.92	5.92	3.85	3.83	3.84	3.84	3.84	
36	11.94	11.94	11.94	6.16	6.11	6.14	3.95	3.94	3.95	3.94	3.95	
37	11.95	11.95	11.95	5.98	5.97	5.98	3.96	3.94	3.96	3.93	3.95	A (seco)
38	11.97	11.96	11.97	6.02	6.02	6.02	3.93	3.94	3.93	3.94	3.94	
39	12.00	12.02	12.01	6.01	6.04	6.03	3.96	3.98	3.98	3.96	3.97	
40	11.93	11.93	11.93	5.92	5.90	5.91	3.96	3.96	3.96	3.95	3.96	B (PTFE)
41	11.98	11.98	11.98	6.04	6.03	6.04	3.94	3.80	3.95	3.96	3.91	
42	11.96	11.96	11.96	6.08	6.09	6.09	3.96	3.95	3.96	3.97	3.96	
43	11.98	11.99	11.99	6.07	6.04	6.06	4.00	4.02	3.94	4.01	3.99	C (emulsion al 6%)
44	12.05	12.04	12.05	5.92	5.90	5.91	3.94	3.94	3.93	3.93	3.94	
45	11.99	11.99	11.99	5.91	5.87	5.89	4.02	4.04	4.02	4.01	4.02	
46	11.99	11.99	11.99	5.92	5.96	5.94	3.97	3.97	3.99	3.97	3.98	D (emulsion al 6% contaminada)
47	12.05	12.05	12.05	5.90	5.93	5.92	3.96	3.97	3.96	3.96	3.96	
48	12.01	12.01	12.01	5.91	5.98	5.95	3.97	3.97	3.96	3.98	3.97	

II.2 DIMENSIONES INICIALES DE ANILLOS DE MATERIAL B.

Tabla II 2 Dimensiones iniciales de anillos de material B

No Experimento	Diámetro externo (mm)			Diametro interno (mm)			Espesor (mm)					Lubricacion
	Medicion		Prom.	Medicion		Prom.	Medición				Prom.	
1	12 02	12 02	12 02	6 10	6 11	6.11	3 96	3 99	3 96	3.97	3 97	A (seco)
2	11 95	11.94	11 95	6.12	6 12	6.12	4 00	4 01	4.02	4.01	4 01	
3	11 89	11 88	11 89	6.09	6 08	6 09	3 96	3 99	3.98	3.95	3.97	
4	11 97	11 96	11 97	6 12	6 13	6 13	3 93	3.93	3 94	3.95	3 94	B (PTFE)
5	11 96	11.96	11 96	6 13	6 13	6 13	3 99	3 96	3 96	3 96	3 97	
6	11 95	11 96	11.96	6 12	6 09	6 11	3 97	3 96	3.96	3 94	3 96	
7	11 99	11 99	11 99	6 16	6 15	6 16	3 94	3 92	3.96	3 95	3 94	C (emulsión al 6%)
8	11 96	11 96	11 96	6 02	6 09	6.06	3 99	4.02	4.00	3.97	4 00	
9	11 99	11 98	11 99	6 10	6 12	6.11	3 98	3.91	3 92	3.97	3 95	
10	11 92	11.93	11.93	6 10	6 11	6 11	3 91	3.89	3.90	3 91	3.90	D (emulsión al 6% contaminada)
11	11 92	11.91	11 92	6.08	6 10	6.09	3 93	3.92	3.94	3.93	3 93	
12	11 77	11 77	11 77	6 06	6 03	6.05	3 91	3.93	3.93	3.94	3.93	
13	11 90	11 90	11 90	5 98	5 96	5.97	3 95	3.92	3.91	3 92	3.93	A (seco)
14	11.94	11 92	11 93	6.02	6 00	6.01	3 95	3 92	3 92	3.92	3 93	
15	11.95	11 97	11 96	6 10	6 09	6.10	3 97	3 94	3 94	3.95	3 95	
16	11 90	11 90	11 90	6 10	6 07	6.09	3 97	4 01	3 96	3 99	3.98	B (PTFE)
17	11 95	11 94	11 95	6 11	6 09	6.10	3 90	3 92	3 91	3 92	3 91	
18	11 86	11 87	11.87	6 10	6 08	6.09	3 94	3 98	3 96	3 99	3.97	
19	11 91	11.94	11 93	6 01	6 03	6 02	3 92	3 89	3 90	3.87	3.90	C (emulsión al 6%)
20	11.88	11 88	11 88	6.11	6 09	6.10	3 96	3.96	3 96	3 98	3.97	
21	11 89	11 92	11 91	6.08	6 05	6.07	3 91	3 88	3 89	3.91	3 90	
22	11 94	11.95	11 95	6.09	6 08	6.09	3 96	3 93	3 92	3.92	3.93	D (emulsión al 6% contaminada)
23	11.95	11 95	11 95	6.11	6 11	6.11	3 97	3 96	3 98	3 97	3 97	
24	11.96	11 93	11 95	6 07	6 06	6 07	3 94	3 97	3 97	3.93	3 95	
25	11 92	11 93	11 93	6 12	6 13	6.13	3 93	3 94	3 93	3.94	3.94	A (seco)
26	11 93	11 93	11 93	6.10	6 09	6.10	3 90	3 94	3 93	3.93	3.93	
27	11 90	11 89	11 90	6 09	6 11	6 10	3 93	3 89	3 89	3.89	3 90	
28	11 94	11 95	11 95	5 94	6 05	6 00	3 99	3 99	3 97	3.97	3 98	B (PTFE)
29	11 92	11.92	11 92	6 09	6 07	6 08	3 99	3.96	3.96	3 97	3.97	
30	11 94	11 92	11.93	6 07	6 04	6.06	3 86	3 87	3.88	3 88	3 87	
31	11 94	11 93	11.94	6 07	6 08	6 08	3 96	3.97	3 94	3.94	3 95	C (emulsión al 6%)
32	11 92	11.95	11 94	6.00	6 00	6.00	3 96	3 96	3 97	3.97	3 97	
33	11 93	11 93	11 93	6 04	6 09	6.07	3 92	3 90	3.91	3 90	3 91	
34	11 65	11 67	11.66	6 04	6 03	6 04	3 93	3.94	3 96	3 96	3 95	D (emulsión al 6% contaminada)
35	11 94	11 94	11.94	6.11	6 12	6 12	3 91	3.91	3.90	3 89	3.90	
36	11.94	11 94	11 94	6.04	6 04	6.04	3 99	3 98	3.97	3 98	3.98	
37	11 86	11 88	11 87	6 08	6 07	6 08	3 95	3.99	3.97	3 92	3 96	A (seco)
38	11.92	11 92	11 92	6.06	6 09	6 08	3 97	3.99	3 96	3 96	3 97	
39	11 95	11 95	11 95	6 14	6 13	6.14	3 99	3.93	3 95	3 98	3.96	
40	11 91	11 89	11 90	6 10	6 08	6 09	4 01	4 02	4 01	4 00	4.01	B (PTFE)
41	11 95	11 94	11 95	5 97	5 95	5.96	4 03	4 02	4 02	4 03	4.03	
42	11 97	11 97	11 97	6 06	5 92	5 99	3 91	3 95	3 93	3 94	3.93	
43	11 94	11 99	11 97	5 98	5 97	5 98	4 01	4 00	3 98	3 98	3 99	C (emulsion al 6%)
44	11 93	11 93	11 93	6.03	6 02	6 03	3 91	3 95	3 94	3 94	3 94	
45	11 95	11 96	11 96	5.96	5 98	5.97	3 97	4 03	4 08	3 97	4 01	
46	11.91	11.91	11 91	6.07	6 06	6.07	3 97	3 99	3 99	3 96	3.98	D (emulsión al 6% contaminada)
47	11 94	11 96	11 95	6 03	6 00	6 02	3 95	3 98	3 96	3 95	3 96	
48	11 96	11 96	11 96	6.07	6 08	6.08	4 02	3 97	3 97	3.95	3.98	

II.3 DIMENSIONES INICIALES DE ANILLOS DE MATERIAL C.

Tabla II.3 Dimensiones iniciales de anillos de material C.

No. Experimento	Diámetro externo (mm)			Diámetro interno (mm)			Espesor (mm)					Lubricacion
	Medición		Prom	Medicion		Prom	Medición				Prom	
1	11.87	11.88	11.88	5.83	5.86	5.85	4.07	4.03	4.08	4.09	4.07	
2	12.07	12.11	12.09	5.81	5.82	5.82	4.08	4.05	4.04	4.05	4.06	A (seco)
3	12.10	12.11	12.11	5.84	5.86	5.85	4.04	4.07	4.05	4.05	4.05	
4	12.03	12.02	12.03	5.86	5.86	5.86	4.04	4.04	4.05	4.03	4.04	
5	11.78	11.79	11.79	5.82	5.80	5.81	4.03	4.15	4.09	4.08	4.09	B (PTFE)
6	11.85	11.86	11.86	5.77	5.78	5.78	4.04	4.06	4.07	4.05	4.06	
7	11.84	11.84	11.84	5.63	5.77	5.70	4.19	4.08	4.12	4.08	4.12	
8	11.83	11.82	11.83	5.82	5.84	5.83	4.01	4.05	4.01	4.00	4.02	C (emulsión al 6%)
9	12.02	12.00	12.01	5.82	5.85	5.84	4.01	4.06	4.01	4.05	4.03	
10	11.86	11.88	11.87	5.85	5.84	5.85	4.04	4.05	4.04	4.03	4.04	
11	11.93	11.94	11.94	5.83	5.84	5.84	4.11	4.10	4.09	4.06	4.09	A (seco)
12	12.10	12.09	12.10	5.84	5.85	5.85	4.03	4.05	4.04	4.02	4.04	
13	11.90	11.92	11.91	5.85	5.86	5.86	4.01	4.03	4.04	4.02	4.03	
14	12.03	12.03	12.03	5.85	5.85	5.85	4.03	4.04	4.06	4.02	4.04	B (PTFE)
15	12.05	12.07	12.06	5.86	5.84	5.85	4.10	4.08	4.07	4.10	4.09	
16	12.05	12.02	12.04	5.83	5.83	5.83	4.02	4.01	4.02	4.05	4.03	
17	11.86	11.87	11.87	5.86	5.84	5.85	4.08	4.05	4.06	4.03	4.06	C (emulsión al 6%)
18	11.95	11.96	11.96	5.85	5.85	5.85	4.05	4.06	4.07	4.07	4.06	
19	11.94	11.96	11.95	5.82	5.82	5.82	4.02	4.07	4.03	4.00	4.03	
20	12.15	12.15	12.15	5.87	5.87	5.87	4.03	4.04	4.02	4.06	4.04	A (seco)
21	11.90	11.91	11.91	5.85	5.84	5.85	4.02	4.00	4.02	4.00	4.01	
22	11.91	11.87	11.89	5.85	5.87	5.86	4.01	4.01	4.00	4.01	4.01	
23	12.04	12.05	12.05	5.81	5.81	5.81	4.02	4.02	3.98	3.99	4.00	B (PTFE)
24	11.93	11.92	11.93	5.85	5.84	5.85	4.03	4.04	4.07	4.09	4.06	
25	12.08	12.08	12.08	5.85	5.85	5.85	4.01	4.03	4.01	4.00	4.01	
26	11.99	11.98	11.99	5.85	5.86	5.86	4.01	4.02	4.00	4.02	4.01	C (emulsión al 6%)
27	12.07	12.11	12.09	5.83	5.84	5.84	4.01	4.03	4.00	4.03	4.02	

II.4 DIMENSIONES INICIALES DE ANILLOS DE MATERIAL D.

Tabla II.4 Dimensiones iniciales de anillos de material D.

No Experimento	Diámetro externo (mm)			Diametro interno (mm)			Espesor (mm)					Lubricación
	Medición		Prom	Medicion		Prom.	Medición				Prom	
1	11.97	11.96	11.97	5.84	5.87	5.86	4.04	4.03	4.03	4.03	4.03	
2	11.96	11.98	11.97	5.83	5.81	5.82	4.08	4.05	4.06	4.07	4.07	A (seco)
3	11.96	11.95	11.96	5.89	5.89	5.89	4.08	4.06	4.07	4.09	4.08	
4	11.94	11.95	11.95	5.86	5.84	5.85	4.06	4.05	4.07	4.04	4.06	
5	11.95	11.94	11.95	5.85	5.86	5.86	4.09	4.06	4.07	4.09	4.08	B (PTFE)
6	11.96	11.93	11.95	5.89	5.85	5.87	4.06	4.05	4.08	4.06	4.06	
7	11.94	11.94	11.94	5.87	5.86	5.87	4.04	4.04	4.03	4.04	4.04	
8	11.96	11.96	11.96	5.87	5.86	5.87	4.09	4.07	4.10	4.08	4.09	C (emulsión al 6%)
9	11.96	11.97	11.97	5.89	5.89	5.89	4.09	4.09	4.08	4.08	4.09	
10	11.98	11.97	11.98	5.88	5.89	5.89	4.05	4.06	4.04	4.05	4.05	
11	11.94	11.95	11.95	5.90	5.90	5.90	4.07	4.04	4.07	4.04	4.06	A (seco)
12	11.98	11.92	11.95	5.88	5.90	5.89	4.07	4.05	4.05	4.06	4.06	
13	11.96	11.96	11.96	5.89	5.89	5.89	4.07	4.04	4.06	4.06	4.06	
14	11.93	11.93	11.93	5.89	5.87	5.88	4.11	4.12	4.11	4.12	4.12	B (PTFE)
15	11.95	11.97	11.96	5.91	5.91	5.91	4.10	4.10	4.11	4.10	4.10	
16	11.97	11.96	11.97	5.89	5.89	5.89	4.04	4.05	4.05	4.05	4.05	
17	11.95	11.96	11.96	5.89	5.89	5.89	4.09	4.10	4.08	4.10	4.09	C (emulsión al 6%)
18	11.96	11.95	11.96	5.89	5.89	5.89	4.08	4.08	4.09	4.07	4.08	
19	11.95	11.94	11.95	5.91	5.90	5.91	4.05	4.04	4.04	4.04	4.04	
20	11.92	11.92	11.92	5.86	5.85	5.86	4.05	4.05	4.06	4.06	4.06	A (seco)
21	11.95	11.96	11.96	5.92	5.90	5.91	4.06	4.04	4.05	4.06	4.05	
22	11.95	11.94	11.95	5.90	5.90	5.90	4.08	4.09	4.09	4.07	4.08	
23	11.94	11.95	11.95	5.87	5.87	5.87	4.04	4.06	4.04	4.02	4.04	B (PTFE)
24	11.95	11.94	11.95	5.86	5.87	5.87	4.03	4.02	4.03	4.02	4.03	
25	11.95	11.93	11.94	5.91	5.90	5.91	4.06	4.07	4.08	4.07	4.07	
26	11.95	11.95	11.95	5.90	5.91	5.91	4.08	4.08	4.07	4.05	4.07	C (emulsion al 6%)
27	11.97	11.94	11.96	5.91	5.93	5.92	4.03	4.04	4.03	4.03	4.03	

II.5 DIMENSIONES INICIALES DE ANILLOS DE MATERIAL E.

Tabla II 5 Dimensiones iniciales de anillos de material E

No. Experimento	Diámetro externo (mm)			Diámetro interno (mm)			Espesor (mm)					Lubricación
	Medición		Prom	Medicion		Prom	Medicion				Prom.	
1	11 95	11 94	11.95	5.81	5 89	5.85	4 08	4 06	4.07	4.07	4 07	A (seco)
2	11 96	11 96	11 96	5 88	5 89	5 89	4 09	4 07	4.07	4.06	4 07	
3	11 95	11 95	11 95	5 87	5 86	5 87	4 09	4 67	4 60	4.08	4 36	
4	11 91	11 92	11.92	5.89	5 88	5.89	4 11	4 11	4 10	4 10	4 11	B (PTFE)
5	11 89	11 91	11 90	5.81	5 84	5 83	4 08	4.09	4 10	4 05	4.08	
6	11 94	11 95	11 95	5 86	5 88	5 87	4 02	4 07	4 04	4 05	4.05	
7	11 95	11 95	11 95	5 88	5 89	5.89	4.04	4 05	4 05	4 05	4 05	C (emulsión al 6%)
8	11 90	11 89	11 90	5.87	5 82	5.85	4 08	4 09	4 07	4 09	4 08	
9	11 99	11 99	11 99	5.85	5 87	5 86	4 09	4 09	4 08	4 08	4 09	
10	11.99	11 91	11 95	5 85	5.86	5.86	4 05	4 06	4.06	4 05	4.06	A (seco)
11	11.94	11 88	11 91	5.87	5 86	5.87	4 08	4.09	4 10	4 09	4.09	
12	11 95	11.97	11 96	5.89	5 89	5 89	4 06	4.04	4 05	4.06	4 05	
13	11.84	11.86	11 85	5 84	5.85	5 85	4 06	4 04	4.05	4.04	4.05	B (PTFE)
14	11.91	11 93	11 92	5.83	5 84	5.84	4 05	4 05	4.05	4 06	4.05	
15	11 92	11 92	11 92	5 89	5 88	5 89	4 06	4 06	4.07	4.06	4 06	
16	11.87	11.87	11 87	5 86	5 87	5.87	4 09	4 10	4.09	4 04	4.08	C (emulsión al 6%)
17	11 85	11 85	11 85	5 89	5 86	5 88	4 06	4 04	4 06	4 06	4.06	
18	11 92	11 85	11 89	5 88	5 87	5 88	4 05	4 02	4 03	4 05	4 04	
19	11 95	11 90	11 93	5 87	5 88	5 88	4 03	4 04	4.04	4 03	4.04	A (seco)
20	11 82	11 81	11.82	5 88	5 88	5 88	4 06	4 07	4 07	4 06	4.07	
21	11 92	11.90	11.91	5 87	5 84	5.86	4 02	4.03	4 03	4 02	4 03	
22	11 98	11.98	11 98	5.87	5 88	5.88	4 03	4 02	4.03	4 04	4 03	B (PTFE)
23	11 95	11 92	11.94	5 88	5 89	5 89	4 06	4 05	4 04	4 04	4 05	
24	11 97	11 96	11.97	5 89	5 88	5.89	4 04	4.06	4 04	4.05	4 05	
25	11 90	11 85	11 88	5 87	5 86	5.87	4 05	4 04	4 04	4.05	4 05	C (emulsion al 6%)
26	11 92	11 94	11 93	5 84	5 87	5.86	4 08	4 07	4 08	4 08	4.08	
27	11 87	11 89	11 88	5 90	5 88	5 89	4 08	4 08	4 06	4 07	4.07	

II.6 DIMENSIONES INICIALES DE ANILLOS DE MATERIAL F.

Tabla II 6 Dimensiones iniciales de anillos de material F

No Experimento	Diámetro externo (mm)			Diametro interno (mm)			Espesor (mm)					Lubricacion
	Medición		Prom.	Medicion		Prom.	Medición				Prom	
1	11 99	11 98	11 99	5.90	5 89	5.90	4.01	4.02	4.04	4 02	4.02	A (seco)
2	11 98	11.98	11 98	5 89	5 91	5 90	4 03	4.04	4.06	4 04	4.04	
3	11 91	11.91	11 91	5.89	5 88	5 89	4 00	4 02	4 00	4.00	4 01	
4	11 96	11 96	11 96	5 87	5 87	5.87	4 02	4 00	4.02	4 00	4 01	B (PTFE)
5	11 93	11 92	11 93	5 82	5 85	5 84	4 06	4.05	4 06	4 06	4 06	
6	11 97	11 95	11 96	5 90	5 91	5 91	4 17	4 19	4 19	4 16	4 18	
7	11.96	11 97	11 97	5 91	5 91	5 91	4 03	4 01	4.03	4 02	4 02	C (emulsion al 6%)
8	11 93	11 95	11 94	5 92	5 92	5 92	4 08	4.05	4.05	4 05	4.06	
9	11.98	11 97	11 98	5 88	5 87	5.88	4 02	4 06	4 04	4.05	4.04	
10	11 94	11 97	11 96	5 89	5 88	5 89	3 97	3.96	3.97	3 95	3 96	A (seco)
11	11 99	11 98	11 99	5 90	5 91	5 91	4 06	4 10	4.07	4 06	4.07	
12	11 95	11 98	11.97	5 93	5 92	5 93	4 04	4.01	4 01	4.00	4.02	
13	11 98	11 92	11.95	5 95	5 94	5 95	4 06	4 03	4 03	4.05	4 04	B (PTFE)
14	11 93	11 93	11 93	5.94	5 92	5 93	4 03	4 03	4 03	4 05	4 04	
15	11 97	11 95	11 96	5 96	5 95	5.96	4 04	4 02	4 04	4 04	4 04	
16	11 96	11 97	11 97	6 00	5 99	6 00	4 02	4 03	4 04	4 02	4 03	C (emulsion al 6%)
17	11 99	11 98	11 99	5 94	5 94	5 94	4 15	4 12	4 14	4 12	4 13	
18	11 99	11 98	11 99	5 90	5 90	5 90	4 01	4 02	4 02	4 02	4 02	
19	11 98	11 95	11 97	5 92	5 91	5 92	4.05	4 06	4 05	4.02	4 05	A (seco)
20	11 95	11 93	11 94	5 91	5 92	5.92	4 04	4 04	4 05	4 04	4.04	
21	11 98	11 97	11 98	5.95	5 91	5.93	4 02	4 01	4 01	4 02	4 02	
22	11 96	11 94	11 95	5 91	5 92	5 92	3 98	3 97	3 98	3 97	3 98	B (PTFE)
23	11 98	11 97	11 98	5.93	5 91	5 92	4 09	4 06	4 05	4 06	4 07	
24	11.98	11 99	11 99	5.89	5 88	5 89	4 02	4 03	4 03	3 99	4 02	
25	11 93	11 92	11 93	5 96	5 96	5 96	4 05	4 03	4 07	4 09	4 06	C (emulsion al 6%)
26	11 96	11 96	11 96	5 92	5 92	5 92	4 07	4 06	4 03	4 05	4 05	
27	11 93	11 92	11 93	5 88	5 89	5 89	4 02	4 03	4 04	4 00	4 02	

ANEXO III

III.1 DIMENSIONES FINALES DE ANILLOS DE MATERIAL A.

Tabla III.1 Dimensiones finales de anillos de material A.

No. Experimento	Diámetro interno (mm)			Espesor (mm)					Lubricación
	Medicion		Prom	Medicion				Prom	
1	4.81	4.78	4.80	2.67	2.66	2.67	2.69	2.67	A (seco)
2	5.11	5.05	5.08	2.53	2.52	2.50	2.49	2.51	
3	4.91	4.91	4.91	2.48	2.47	2.50	2.49	2.49	
4	6.31	6.09	6.20	2.42	2.43	2.43	2.43	2.43	B (PTFE)
5	6.23	6.17	6.20	2.42	2.40	2.42	2.45	2.42	
6	6.11	6.22	6.17	2.46	2.45	2.43	2.42	2.44	
7	5.70	5.90	5.80	2.48	2.43	2.43	2.46	2.45	C (emulsión al 6%)
8	5.50	5.39	5.45	2.42	2.41	2.41	2.42	2.42	
9	5.34	5.42	5.38	2.49	2.46	2.48	2.48	2.48	
10	5.69	5.76	5.73	2.35	2.36	2.39	2.36	2.37	D (emulsión al 6% contaminada)
11	5.96	5.84	5.90	2.53	2.56	2.57	2.56	2.56	
12	5.46	5.55	5.51	2.44	2.43	2.41	2.43	2.43	
13	5.47	5.44	5.46	3.24	3.22	3.24	3.22	3.23	A (seco)
14	5.75	5.75	5.75	3.29	3.29	3.28	3.28	3.29	
15	5.53	5.53	5.53	3.26	3.26	3.25	3.25	3.26	
16	6.08	6.12	6.10	3.53	3.51	3.55	3.56	3.54	B (PTFE)
17	6.27	6.20	6.24	3.42	3.41	3.44	3.43	3.43	
18	6.41	6.30	6.36	3.34	3.33	3.35	3.34	3.34	
19	6.13	6.20	6.17	3.29	3.27	3.29	3.29	3.29	C (emulsión al 6%)
20	6.12	6.15	6.14	3.20	3.18	3.20	3.22	3.20	
21	5.94	5.84	5.89	3.27	3.27	3.25	3.29	3.27	
22	6.07	6.03	6.05	3.23	3.22	3.23	3.24	3.23	D (emulsión al 6% contaminada)
23	6.00	6.14	6.07	3.27	3.27	3.27	3.28	3.27	
24	6.10	6.15	6.13	3.18	3.19	3.18	3.18	3.18	
25	5.24	5.21	5.23	2.88	2.86	2.88	2.89	2.88	A (seco)
26	5.44	5.49	5.47	2.95	2.95	2.94	2.97	2.95	
27	5.37	5.32	5.35	2.91	2.89	2.87	2.88	2.89	
28	6.16	6.08	6.12	2.98	2.95	2.95	2.95	2.96	B (PTFE)
29	6.41	6.34	6.38	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90	
30	6.43	6.34	6.39	2.91	2.90	2.89	2.90	2.90	
31	5.89	5.89	5.89	2.88	2.82	2.84	2.85	2.85	C (emulsión al 6%)
32	6.05	6.19	6.12	2.85	2.85	2.82	2.82	2.84	
33	6.02	6.04	6.03	2.87	2.90	2.89	2.87	2.88	
34	5.96	5.98	5.97	2.89	2.89	2.92	2.89	2.90	D (emulsión al 6% contaminada)
35	5.91	5.89	5.90	2.74	2.73	2.77	2.79	2.76	
36	6.10	6.09	6.10	2.86	2.84	2.84	2.85	2.85	
37	5.92	5.93	5.93	3.56	3.58	3.59	3.58	3.58	A (seco)
38	5.95	5.93	5.94	3.64	3.63	3.62	3.62	3.63	
39	5.92	5.94	5.93	3.59	3.61	3.62	3.61	3.61	
40	5.97	6.00	5.99	3.81	3.79	3.79	3.80	3.80	B (PTFE)
41	6.15	6.10	6.13	3.75	3.75	3.75	3.74	3.75	
42	6.16	6.10	6.13	3.78	3.81	3.80	3.81	3.80	
43	6.04	6.07	6.06	3.63	3.65	3.63	3.63	3.64	C (emulsion al 6%)
44	5.88	5.88	5.88	3.60	3.63	3.61	3.60	3.61	
45	6.01	6.08	6.05	3.66	3.64	3.65	3.68	3.66	
46	6.01	5.98	6.00	3.65	3.64	3.64	3.65	3.65	D (emulsión al 6% contaminada)
47	5.93	5.93	5.93	3.69	3.68	3.69	3.69	3.69	
48	5.90	5.92	5.91	3.62	3.63	3.66	3.65	3.64	

III.2 DIMENSIONES FINALES DE ANILLOS DE MATERIAL B.

Tabla III 2 Dimensiones finales de anillos de material B

No Experimento	Diámetro interno (mm)			Espesor (mm)					Lubricación
	Medicion		Prom	Medicion				Prom	
1	6 07	6 07	6 07	3 84	3 73	3 72	3 74	3 76	A (seco)
2	6 08	6 05	6.07	3 80	3 81	3 81	3 79	3.80	
3	6 07	6 07	6 07	3.74	3 74	3 74	3 74	3 74	
4	6 22	6 21	6 22	3.78	3 76	3 72	3 74	3 75	B (PTFE)
5	6 13	6 15	6.14	3.86	3 85	3 88	3 88	3.87	
6	6 16	6 18	6 17	3 74	3 77	3 74	3.76	3 75	
7	6.09	6.09	6.09	3.65	3 62	3 64	3 64	3.64	C (emulsión al 6%)
8	6.05	6.03	6 04	3 78	3 79	3 78	3 77	3.78	
9	6.09	6.07	6.08	3 72	3 72	3 72	3.68	3.71	
10	6 12	6 12	6 12	3 67	3.60	3 62	3.62	3.63	D (emulsión al 6% contaminada)
11	6 10	6 09	6 10	3 71	3 70	3 69	3 72	3 71	
12	6.14	6.13	6 14	3 69	3.66	3 64	3.65	3 66	
13	5.59	5 76	5 68	3 34	3 36	3 37	3 35	3 36	A (seco)
14	5 75	5 75	5 75	3 23	3.24	3 24	3 25	3 24	
15	5 85	5.83	5 84	3 39	3.40	3 37	3.37	3 38	
16	6 24	6 26	6 25	3 43	3.46	3 46	3.42	3 44	B (PTFE)
17	6 28	6 26	6 27	3 36	3 37	3 37	3.36	3 37	
18	6.22	6.34	6 28	3 43	3 44	3 44	3.44	3.44	
19	6 08	6.08	6 08	3 25	3 24	3 21	3.23	3.23	C (emulsión al 6%)
20	6 16	6.17	6 17	3 32	3.28	3 32	3.31	3 31	
21	6 18	6 14	6 16	3.22	3 26	3 21	3 21	3 23	
22	6 13	6 09	6 11	3 30	3 29	3 30	3.30	3 30	D (emulsion al 6% contaminada)
23	6 10	6 12	6 11	3 35	3 33	3 32	3 32	3.33	
24	6 22	6 17	6 20	3.28	3 29	3 31	3 30	3.30	
25	5 51	5.5	5.51	2 99	3 00	2 96	2.96	2 98	A (seco)
26	5 49	5.47	5 48	2 95	2 97	2 95	2.91	2 95	
27	5 49	5 53	5.51	2.92	2 89	2.89	2 90	2.90	
28	6.42	6.31	6.37	3.10	3 11	3 10	3 09	3.10	B (PTFE)
29	6.31	6 28	6 30	3.02	3 01	3 01	3 01	3 01	
30	6 35	6 32	6.34	2.97	3 00	3.01	2 97	2.99	
31	6 09	6 18	6 14	2 96	2.97	2 97	2 95	2.96	C (emulsión al 6%)
32	6 10	6 09	6 10	2 99	2 96	2 97	2 99	2 98	
33	6 21	6 24	6 23	2 92	2 91	2 93	2 93	2 92	
34	6 09	6 08	6 09	2 86	2 87	2 88	2 83	2 86	D (emulsion al 6% contaminada)
35	6 22	6 18	6 20	2 85	2.88	2 90	2 84	2 87	
36	6.08	6 04	6.06	2 96	2 96	2 97	2 97	2 97	
37	5 36	5.38	5 37	2 81	2.83	2 85	2.82	2 83	A (seco)
38	5 43	5 43	5 43	2 87	2 86	2 84	2 85	2 86	
39	5 49	5 44	5 47	2 84	2.83	2 83	2 84	2 84	
40	6 37	6 35	6.36	2 72	2 73	2 74	2 71	2 73	B (PTFE)
41	6 21	6.33	6 27	2 79	2 76	2 76	2 78	2 77	
42	6 15	6 54	6 35	2.82	2 85	2 85	2 79	2 83	
43	6 02	6 05	6 04	2 77	2.74	2 77	2 77	2 76	C (emulsion al 6%)
44	6 15	5 95	6 05	2 68	2.69	2 67	2 65	2 67	
45	5 95	6.05	6 00	2 72	2.74	2 72	2 70	2 72	
46	6 13	6 18	6 16	2 72	2 72	2 68	2 69	2 70	D (emulsión al 6% contaminada)
47	6 10	6 17	6 14	2 70	2.69	2 71	2 71	2 70	
48	5 96	5 98	5 97	2 75	2.74	2 69	2 70	2 72	

III.3 DIMENSIONES FINALES DE ANILLOS DE MATERIAL C.

Tabla III 3 Dimensiones finales de anillos de material C.

No Experimento	Diámetro interno (mm)			Espesor (mm)					Lubricación
	Medicion		Prom	Medicion				Prom	
1	5 60	5 56	5 58	3 36	3 36	3 36	3 35	3 36	A (seco)
2	5.71	5.67	5 69	3 42	3 40	3 44	3 45	3.43	
3	5 70	5 68	5 69	3.45	3.49	3 46	3.45	3.46	
4	6.12	6.14	6 13	2 77	2.79	2 78	2.77	2.78	B (PTFE)
5	6.22	6.10	6 16	2 68	2 73	2 71	2.69	2.70	
6	6.20	6.17	6 19	3.05	3 03	3 09	3.09	3.07	
7	6 22	6 13	6 18	2.64	2 62	2 65	2.65	2 64	C (emulsión al 6%)
8	5.97	5.92	5 95	2 55	2 56	2 55	2 56	2 56	
9	5 97	5 91	5 94	2.63	2 65	2 63	2 65	2.64	
10	4 92	4 87	4 90	2.69	2 70	2 70	2 72	2.70	A (seco)
11	5 19	5 13	5 16	2.80	2 81	2 87	2 90	2 85	
12	5 16	5 12	5.14	2 90	2 90	2 92	2 93	2 91	
13	6.16	6 09	6 13	3 11	3 14	3 12	3 10	3 12	B (PTFE)
14	6.15	6 13	6 14	3 08	3 11	3 09	3 08	3 09	
15	6.19	6 16	6.18	3 17	3 18	3 18	3 20	3 18	
16	6.05	6 13	6.09	2.95	3.01	2 98	2 97	2.98	C (emulsión al 6%)
17	6.06	6 04	6.05	3 00	3.00	2 98	2.98	2.99	
18	6 10	6 11	6 11	2.98	2 99	2 99	3 01	2 99	
19	5.64	5 62	5 63	3 36	3 41	3 38	3 39	3.39	A (seco)
20	5 69	5 66	5 68	3 43	3 47	3 49	3 47	3 47	
21	5 50	5 47	5 49	3 24	3.28	3 26	3 27	3 26	
22	6 18	6.20	6 19	3 38	3.39	3 42	3 39	3 40	B (PTFE)
23	6 05	5.99	6 02	3 46	3.45	3 46	3 49	3 47	
24	6 01	6.10	6.06	3 43	3.45	3 47	3 47	3 46	
25	5 94	6 00	5 97	3.35	3 38	3 35	3.35	3 36	C (emulsión al 6%)
26	5 96	5.98	5 97	3 41	3.43	3 43	3 41	3.42	
27	5 98	5 99	5.99	3.38	3 37	3 38	3.38	3.38	

III.4 DIMENSIONES FINALES DE ANILLOS DE MATERIAL D.

Tabla III 4 Dimensiones finales de anillos de material D

No. Experimento	Diámetro interno (mm)			Espesor (mm)					Lubricación
	Medicion		Prom	Medicion				Prom	
1	4.84	4.86	4 85	2.75	2 78	2 78	2 78	2 77	A (seco)
2	4 83	4 86	4.85	2 82	2.84	2 82	2.82	2.83	
3	4 93	4 93	4.93	2.79	2 83	2 85	2.86	2.83	
4	6 36	6.42	6 39	2.71	2 72	2 71	2.73	2.72	B (PTFE)
5	6 30	6 27	6.29	2 73	2 75	2 77	2.78	2.76	
6	6 11	6 23	6.17	2 64	2.64	2 66	2 66	2.65	
7	5 96	6 02	5 99	2 68	2.63	2 62	2 67	2 65	C (emulsión al 6%)
8	5 80	5.94	5 87	2 71	2 70	2 70	2 72	2.71	
9	5 91	5 90	5 91	2 69	2 67	2 69	2 68	2.68	
10	5 22	5 18	5 20	3 04	3.02	3 02	3 01	3 02	A (seco)
11	5.14	5 10	5 12	2 99	2.99	2 98	3 01	2 99	
12	5 16	5 19	5 18	2 98	2 99	3 01	3 01	3 00	
13	6.18	6 18	6 18	3 11	3 13	3 13	3 11	3.12	B (PTFE)
14	6 23	6.17	6.20	3.09	3 11	3 15	3 14	3 12	
15	6.15	6 16	6.16	3.06	3 07	3 07	3 11	3 08	
16	5 92	5 91	5 92	2.96	3.01	3 01	3 00	3 00	C (emulsión al 6%)
17	6.04	5 87	5 96	3 00	3 05	3 00	3 01	3 02	
18	6 02	6 00	6 01	3 04	3 01	3 01	3 02	3 02	
19	5 54	5 55	5 55	3.50	3 44	3 42	3 42	3 45	A (seco)
20	5 58	5.60	5 59	3 46	3 49	3 47	3 45	3 47	
21	5 51	5 49	5 50	3 37	3 41	3 40	3 40	3 40	
22	6 11	6 07	6 09	3 49	3 51	3 53	3 54	3 52	B (PTFE)
23	6 03	5 99	6 01	3 44	3 44	3 48	3 46	3 46	
24	6 03	6 01	6 02	3 43	3 48	3 47	3 50	3 47	
25	5 88	5 93	5.91	3 36	3 37	3 38	3.39	3 38	C (emulsion al 6%)
26	5 96	5 94	5 95	3 33	3 35	3 34	3 34	3 34	
27	5 92	5 96	5 94	3 30	3 30	3 31	3 31	3 31	

III.5 DIMENSIONES FINALES DE ANILLOS DE MATERIAL E.

Tabla III.5 Dimensiones finales de anillos de material E									
No. Experimento	Diámetro interno (mm)			Espesor (mm)					Lubricación
	Medicion		Prom	Medicion				Prom.	
1	4.85	4.84	4.85	2.55	2.55	2.53	2.57	2.55	A (seco)
2	4.76	4.83	4.80	2.56	2.60	2.60	2.60	2.59	
3	4.94	5.05	5.00	2.56	2.57	2.56	2.56	2.56	
4	6.29	6.34	6.32	2.64	2.66	2.67	2.67	2.66	B (PTFE)
5	6.29	6.21	6.25	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56	
6	6.21	6.08	6.15	2.58	2.56	2.60	2.60	2.59	
7	5.82	5.87	5.85	2.57	2.55	2.54	2.56	2.56	C (emulsión al 6%)
8	5.87	5.76	5.82	2.56	2.58	2.54	2.54	2.56	
9	5.93	5.84	5.89	2.53	2.53	2.50	2.53	2.52	
10	5.01	5.04	5.03	2.87	2.89	2.91	2.91	2.90	A (seco)
11	5.11	5.11	5.11	2.91	2.92	2.92	2.92	2.92	
12	5.11	5.16	5.14	2.88	2.89	2.87	2.90	2.89	
13	6.26	6.23	6.25	2.97	2.99	2.98	2.98	2.98	B (PTFE)
14	6.24	6.28	6.26	2.96	2.95	2.92	2.96	2.95	
15	6.20	6.15	6.18	3.02	3.03	3.01	3.02	3.02	
16	5.97	5.96	5.97	2.91	2.90	2.89	2.91	2.90	C (emulsión al 6%)
17	5.87	5.87	5.87	2.80	2.89	2.89	2.89	2.87	
18	5.92	5.92	5.92	2.78	2.81	2.84	2.83	2.82	
19	5.57	5.58	5.58	3.30	3.32	3.35	3.35	3.33	A (seco)
20	5.47	5.45	5.46	3.29	3.32	3.37	3.36	3.34	
21	5.57	5.49	5.53	3.28	3.28	3.28	3.25	3.27	
22	6.15	6.14	6.15	3.36	3.36	3.35	3.33	3.35	B (PTFE)
23	6.10	6.10	6.10	3.42	3.43	3.45	3.43	3.43	
24	6.07	6.07	6.07	3.36	3.38	3.40	3.37	3.38	
25	5.90	5.89	5.90	3.31	3.36	3.32	3.32	3.33	C (emulsion al 6%)
26	5.94	5.93	5.94	3.35	3.35	3.35	3.34	3.35	
27	5.93	5.96	5.95	3.29	3.28	3.29	3.29	3.29	

III.6 DIMENSIONES FINALES DE ANILLOS DE MATERIAL F.

Tabla III.6 Dimensiones finales de anillos de material F.									
No. Experimento	Diámetro interno (mm)			Espesor (mm)					Lubricación
	Medición		Prom	Medicion				Prom.	
1	4.61	4.61	4.61	2.46	2.52	2.50	2.50	2.50	A (seco)
2	4.79	4.77	4.78	2.48	2.52	2.50	2.49	2.50	
3	4.83	4.69	4.76	2.46	2.48	2.48	2.47	2.47	
4	6.21	6.30	6.26	2.44	2.46	2.49	2.45	2.46	B (PTFE)
5	6.03	5.98	6.01	2.47	2.49	2.45	2.47	2.47	
6	6.24	6.45	6.35	2.55	2.46	2.53	2.59	2.53	
7	5.42	5.36	5.39	2.40	2.37	2.37	2.40	2.39	C (emulsión al 6%)
8	5.55	5.50	5.53	2.43	2.43	2.38	2.40	2.41	
9	5.58	5.30	5.44	2.52	2.45	2.45	2.47	2.47	
10	5.09	5.06	5.08	2.84	2.85	2.83	2.82	2.84	A (seco)
11	5.32	5.30	5.31	2.89	2.91	2.92	2.92	2.91	
12	5.06	5.01	5.04	2.82	2.86	2.86	2.85	2.85	
13	6.17	6.20	6.19	2.97	2.95	2.95	3.00	2.97	B (PTFE)
14	6.12	6.20	6.16	2.93	2.93	2.94	2.94	2.94	
15	6.28	6.21	6.25	2.92	2.90	2.90	2.92	2.91	
16	5.86	5.84	5.85	2.85	2.83	2.84	2.84	2.84	C (emulsion al 6%)
17	5.81	5.71	5.76	2.95	2.97	2.97	2.97	2.97	
18	5.68	6.65	6.17	2.82	2.82	2.85	2.86	2.84	
19	5.50	5.52	5.51	3.27	3.27	3.28	3.29	3.28	A (seco)
20	5.53	5.54	5.54	3.31	3.32	3.34	3.33	3.33	
21	5.54	5.56	5.55	3.23	3.22	3.22	3.22	3.22	
22	6.09	6.06	6.08	3.23	3.24	3.26	3.26	3.25	B (PTFE)
23	6.14	6.09	6.12	3.29	3.31	3.30	3.29	3.30	
24	6.03	6.03	6.03	3.40	3.42	3.46	3.43	3.43	
25	5.91	5.94	5.93	3.28	3.30	3.30	3.31	3.30	C (emulsión al 6%)
26	5.89	5.91	5.90	3.32	3.32	3.33	3.33	3.33	
27	5.78	5.82	5.80	3.21	3.22	3.25	3.24	3.23	

ANEXO IV

IV.1 CAMBIO EN GEOMETRÍA DE ANILLOS (%)

Tabla IV 1 Cambio en geometría de anillos (%), material A y B

Numero de experimento	Material A		Material B		Lubricación
	Diametro interno (%)	Espesor (%)	Diámetro interno (%)	Espesor (%)	
1	18 73	32 85	0.57	5 35	A (seco)
2	15.33	38.48	0.90	5.17	
3	18 44	37 88	0.25	5.79	
4	-3.33	40 06	-1.47	4.76	B (PTFE)
5	-3.51	39.44	-0.16	2.52	
6	-6.85	39 45	-1 06	5 18	
7	3 81	38 75	1.06	7 74	C (emulsión al 6%)
8	6 92	38 86	0 25	5 38	
9	10 93	37 91	0 49	5 96	
10	5 84	41 46	-0.25	7.05	D (emulsion al 6% contaminada)
11	1 67	36.28	-0 08	5 73	
12	8.40	39 31	-1 49	6 81	
13	7 70	18.23	4.94	14 52	A (seco)
14	5 74	17.25	4 33	17 50	
15	6 03	17.91	4.18	14 37	
16	-4 81	12.60	-2.71	13.56	B (PTFE)
17	-4 35	13 46	-2 79	13 99	
18	-4 44	17 58	-3 12	13 36	
19	-1 57	19 09	-1.00	17.01	C (emulsión al 6%)
20	-2 00	19 45	-1.07	16.58	
21	-0 86	16 37	-1 57	17 25	
22	0.25	18.64	-0.41	16 15	D (emulsión al 6% contaminada)
23	-2 02	16.46	0 00	16 12	
24	-2.08	19 63	-2 14	16 64	
25	12 63	27 52	10.12	24 33	A (seco)
26	9.22	26.14	10.09	24 97	
27	11 43	28 35	9.67	25 64	
28	-3 64	24.75	-6.17	22.11	B (PTFE)
29	-6 25	27 41	-3.54	24 12	
30	-7.58	27 04	-4 62	22 85	
31	0 51	28 05	-0 99	25.05	C (emulsión al 6%)
32	-1 24	28 18	-1 58	24.91	
33	-1 01	27 58	-2 64	25.21	
34	-0 84	26 55	-0 83	27 55	D (emulsion al 6% contaminada)
35	0 34	28 19	-1 39	26.52	
36	0 65	27.82	-0 33	25 50	
37	0 84	9 37	11 60	28 55	A (seco)
38	1.33	7 81	10 62	28 09	
39	1 58	9 13	10 92	28 45	
40	-1 27	4 04	-4 43	32 04	B (PTFE)
41	-1.49	4 22	-5 20	31 12	
42	-0 74	4 04	-5 93	28 10	
43	0 00	8 95	-1 00	30 81	C (emulsion al 6%)
44	0 51	8 26	-0 41	32 08	
45	-2 63	9 07	-0 50	32 21	
46	-0 93	8 30	-1 48	32 06	D (emulsion al 6% contaminada)
47	-0 25	6 94	-2.00	31 76	
48	0 59	8.31	1 73	31 62	

Tabla IV.2 Cambio en geometría de anillos (%), material C y D					
Numero de experimento	Material C		Material D		Lubricación
	Diametro interno (%)	Espesor (%)	Diámetro interno (%)	Espesor (%)	
1	4.53	17.46	17.16	31.25	A (seco)
2	2.15	15.47	16.75	30.50	
3	2.74	14.56	16.30	30.49	
4	-4.61	31.25	-9.23	32.98	B (PTFE)
5	-6.02	33.88	-7.34	32.37	
6	-7.10	24.41	-5.11	34.77	
7	-8.33	35.88	-2.13	34.37	C (emulsión al 6%)
8	-1.97	36.40	-0.09	33.72	
9	-1.80	34.53	-0.25	34.33	
10	16.25	33.11	11.64	25.37	A (seco)
11	11.57	30.44	13.22	26.20	
12	12.06	27.82	12.14	26.12	
13	-4.61	22.55	-4.92	23.11	B (PTFE)
14	-4.96	23.47	-5.44	24.12	
15	-5.56	22.14	-4.15	24.98	
16	-4.46	26.02	-0.42	26.00	C (emulsion al 6%)
17	-3.42	26.26	-1.10	26.33	
18	-4.36	26.34	-2.04	25.98	
19	3.26	16.00	6.10	14.78	A (seco)
20	3.32	14.18	4.53	14.49	
21	6.16	18.64	6.94	16.22	
22	-5.63	15.28	-3.22	13.84	B (PTFE)
23	-3.61	13.45	-2.39	14.48	
24	-3.59	14.85	-2.64	13.79	
25	-2.05	16.32	0.00	17.08	C (emulsión al 6%)
26	-1.96	14.77	-0.76	17.94	
27	-2.57	15.95	-0.34	18.04	

Tabla IV.3 Cambio en geometría de anillos (%), material E y F					
Número de experimento	Material E		Material F		Lubricación
	Diámetro interno (%)	Espesor (%)	Diámetro interno (%)	Espesor (%)	
1	17.18	37.35	21.80	37.97	A (seco)
2	18.52	36.40	18.98	38.22	
3	14.83	41.25	19.12	38.26	
4	-7.31	35.20	-6.56	38.65	B (PTFE)
5	-7.30	37.25	-2.91	39.13	
6	-4.68	36.09	-7.45	39.38	
7	0.68	36.87	8.80	40.71	C (emulsión al 6%)
8	0.51	37.42	6.67	40.60	
9	-0.43	38.25	7.40	38.84	
10	14.18	28.61	13.76	28.45	A (seco)
11	12.87	28.64	10.08	28.55	
12	12.82	28.81	15.02	29.08	
13	-6.84	26.37	-4.04	26.59	B (PTFE)
14	-7.28	27.27	-3.88	27.26	
15	-4.93	25.66	-4.87	27.88	
16	-1.71	28.86	2.42	29.48	C (emulsion al 6%)
17	0.09	29.28	3.03	28.25	
18	-0.77	30.28	-4.49	29.37	
19	5.11	17.47	6.85	18.97	A (seco)
20	7.14	17.96	6.42	17.75	
21	5.55	18.70	6.41	19.74	
22	-4.60	16.87	-2.70	18.30	B (PTFE)
23	-3.65	15.19	-3.29	18.88	
24	-3.14	16.55	-2.46	14.69	
25	-0.51	17.74	0.59	18.78	C (emulsion al 6%)
26	-1.37	17.9	0.34	17.95	
27	-0.93	19.28	1.44	19.70	

ANEXO V

V.1 PROGRAMA EN LENGUAJE C PARA ANÁLISIS DE ANILLOS.

```
// Archivos de cabezera
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <esgraf21.h>
#include <stdio.h>
// Prototipos de funciones
void DPI(void);
int AcercaDe(void);
void Opciones(int Opcion, int Contador);
void InicializarGraficos(void);
void ImprimirResultados(int Indice);
void Calculo(float t, float d, int Indice);
void Curvas (int Contador);
void CrearArchivo(int Contador);
void Reiniciar (int Contador);
// Definición de objetos
struct RESULTADOS {
  float t;          // Reduccion de espesor (%)
  float d;          // Cambio en diametro interno (%)
  float m;          // Factor de friccion
  float cf;         // Coeficiente de fricción Coulómbica
  float c;          // Coeficiente X^2
  float e;          // Coeficiente X
};
FILE *arch;
/ Declaración de objetos
class esraton raton;          // Objeto de entrada del ratón
class esgraf pantalla;        // Objeto que controla E/S en modo gráfico
struct RESULTADOS Resultados[16];

void main(void) {
  // Declaración de variables
  float t1 = 0, d1 = 0;
  int Ciclo = 1, Contador = 0, Respuesta   0;
  char Temporal1[16] = {""}, Temporal2[16]   {""};
  char MenuPrincipal[8][70] = {"Reiniciar Información","-","Imprimir Reporte.
    Dibujar pantalla inicial
  DPI();
  // Ciclo principal
  do {
      Obtener reducción en espesor
    do {
```

```
        Respuesta = pantalla.capcc(20, 45, 15, GRISOBSCURO, NEGRO, BLANCO, NO, NO, "",
 Temporal1);
        t1 = atof(Temporal1);
        strcpy(Temporal1, " ");
        // Si se pulsó tab mostrar menú de opciones
        if (Respuesta == 9) {
          Respuesta = pantalla.menu(MenuPrincipal, 340, 230, GRISOBSCURO, GRIS, NEGRO,
 BLANCO, AZUL, NO, 0, 8);
          Opciones(Respuesta, Contador);
          if (Respuesta == 0) Contador=0;
          raton.puntero(INACTIVO);
          pantalla.borrarzona(340, 230, 550, 320, GRIS);
          raton.puntero(ACTIVO);
        }
      } while(t1 < 0 | t1 > 50);
      // Obtener cambio en diámetro interno
      do {
        Respuesta = pantalla.capcc(20, 75, 15, GRISOBSCURO, NEGRO, BLANCO, NO, NO, "",
 Tempora2);
        d1 = atof(Temporal2);
        strcpy(Temporal2, " ");
        // Si se pulsó tab mostrar menú de opciones
        if (Respuesta == 9) {
          Respuesta = pantalla.menu(MenuPrincipal, 340, 230, GRISOBSCURO, GRIS, NEGRO,
 BLANCO, AZUL, NO, 0, 8);
          Opciones(Respuesta,Contador);
          if (Respuesta == 0) Contador=0;
          raton.puntero(INACTIVO);
          pantalla.borrarzona(340, 230, 550, 320, GRIS);
          raton.puntero(ACTIVO);
        }
      } while(d1 < -50 | d1 > 50);
      // Limpiar campos de entrada
      pantalla.capcc(20, 45, 15, GRISOBSCURO, NEGRO, BLANCO, SI, NO, "", Temporal1);
      pantalla.capcc(20, 75, 15, GRISOBSCURO, NEGRO, BLANCO, SI, NO, "", Temporal2);
      // Realizar cálculo
      Calculo(t1, d1, Contador);
      / Imprimir resultados
      ImprimirResultados(Contador);
      / Graficar resultados
        Curvas (Contador);
      // Incrementar contador
      Contador++;
          if (Contador == 15) Ciclo = 0;
    } while(Ciclo);
}
void Calculo(float t, float d, int Indice) {
    / Declaración de variables
    float c = 0, e = 0, cf = 0, p = 0, m = 0, j = 0, i = 0;
    float a = 0, au = 0, ad = 0, at = 0, ac = 0;
    // Calculo de coeficientes de la ecuación cuarta
    a = (-pow(t, 2) * .0086) - (t * .4052) - d;
    au = (pow(t, 2) * .1649) - (t * 1.3165);
    ad = (-pow(t, 2) * .4586) + (t * 14.649);
    at = (pow(t, 2) * .5091) - (t * 22.719);
    ac = (-pow(t, 2) * .1943) + (t * 10.163);
```

```
    // Solución de ecuación cuarta
    do{p=j;
    for(i = 1; i < 100; i++) {
      m = p-
 (ac*pow(p,4)+at*pow(p,3)+ad*pow(p,2)+au*p+a)/(ac*4*pow(p,3)+at*3*pow(p,2)+ad*2*p+au);
      if(p == m) i = 100;
      p = m;
      }
    j=j++;
    } while (m<0); //Condición para obtener m positiva
    // Calculo de coeficientes
    c = -0.1943*pow(m,4)+.5091*pow(m,3)-.4586*pow(m,2)+.1646*m-.0086;
    e = 10.163*pow(m,4)-22.719*pow(m,3)+14.649*pow(m,2)-1.3165*m-.4052;
    cf = m/sqrt(3);
    // Guardar resultados en estructura
    Resultados[Indice].t = t;
    Resultados[Indice].d = d;
    Resultados[Indice].m = m;
    Resultados[Indice].cf= cf;
    Resultados[Indice].c = c;
    Resultados[Indice].e = e;
  }

  void Opciones(int Opcion, int Contador) {
    switch(Opcion) {
      case 0:    // Reiniciar
        Reiniciar(Contador);
        break;
      case 2:    // Imprimir reporte
        break;
      case 3:    // Exportar a excel
        CrearArchivo(Contador);
        break;
      case 5:    // Acerca de
        AcercaDe();
        break;
      case 7:    // Salir
        // Ocultar puntero del ratón
        {  raton.puntero(INACTIVO);
         / Cerrar modo grafico
        closegraph();
        // Salir del programa
        exit(EXIT_SUCCESS);
        break;}
    }
  }

  void Reiniciar(int Contador){
  int i;
  for (i=0;i<Contador;i++){
    Resultados[Contador].t=0;
    Resultados[Contador].d=0;
    Resultados[Contador].m=0;
    Resultados[Contador].cf=0;
    Resultados[Contador].c=0;
    Resultados[Contador].e=0;}
```

```
  DPI();}

  void ImprimirResultados(int Indice) {
    // Declaración de variables
    int PosicionInicial = 0, Digitos = 0;
    char Temporal1[16] = {""}, Temporal2[16]   {""};
    / Establecer posicion inicial de resultados
    PosicionInicial = 65;
    // Establecer el numero de digitos regresados
    Digitos = 10;
    // Ocultar puntero del ratón
    raton.puntero(INACTIVO);
    // Establecer el color de los resultados
    setcolor(AMARILLO);
    // Mostrar t
    gcvt(Resultados[Indice].t, Digitos, Temporal1);
    strncpy(Temporal2, Temporal1, 5);
    outtextxy(350, PosicionInicial + (Indice * 10), Temporal2);
    strcpy(Temporal1, "");
    strcpy(Temporal2, "");
    // Mostrar d
    gcvt(Resultados[Indice].d, Digitos, Temporal1);
    strncpy(Temporal2, Temporal1, 5);
    outtextxy(400, PosicionInicial + (Indice * 10), Temporal2);
    strcpy(Temporal1, "");
    strcpy(Temporal2, "");
    // Mostrar m
    gcvt(Resultados[Indice].m, Digitos, Temporal1);
    strncpy(Temporal2, Temporal1, 5);
    outtextxy(450, PosicionInicial + (Indice * 10), Temporal2);
    strcpy(Temporal1, "");
    strcpy(Temporal2, "");
    / Mostrar c
    gcvt(Resultados[Indice].c, Digitos, Temporal1);
    strncpy(Temporal2, Temporal1, 7);
    outtextxy(500, PosicionInicial + (Indice * 10), Temporal2);
    strcpy(Temporal1, "");
    strcpy(Temporal2, "");
    // Mostrar e
    gcvt(Resultados[Indice].e, Digitos, Temporal1);
    strncpy(Temporal2, Temporal1, 7);
    outtextxy(565, PosicionInicial + (Indice * 10), Temporal2);
    strcpy(Temporal1, "");
    strcpy(Temporal2, "");
    / Mostrar puntero del ratón
    raton.puntero(ACTIVO);
}

void DPI(void) {
    Declaraciónes de variables
  int MaxX = 0, MaxY = 0;
  char Temporal[16]   {""};
  // Inicializar graficos
  InicializarGraficos();
  / Ocultar puntero del ratón
  raton.puntero(INACTIVO);
```

```
    // Obtener cordenadas máximas de la pantalla
    MaxX = getmaxx();
    MaxY = getmaxy();
    // Dibujar ventana principal
    pantalla.ventana(1, 1, MaxX, MaxY, GRISOBSCURO, GRIS, AZUL, BLANCO, CERRAR,
  IZQUIERDA, "Factor De Fricción v1.0");
    // Mostrar primer pregunta
    setcolor(NEGRO);
    outtextxy(20, 35, "Reducción en espesor (%)");
    pantalla.capcc(20, 45, 15, GRISOBSCURO, NEGRO, BLANCO, SI, NO, "", Temporal);
    // Mostrar segunda pregunta
    setcolor(NEGRO);
    outtextxy(20, 65, "Cambio en diámetro interno (%)");
    pantalla.capcc(20, 75, 15, GRISOBSCURO, NEGRO, BLANCO, SI, NO, "", Temporal);
    // Mostrar frame de tabla de resultados
    pantalla.frame(340, 35, MaxX-10, 220, GRISOBSCURO, NO, NEGRO, CENTRO, " Resultados ");
    // Mostrar etiquetas de resultados
    setcolor(NEGRO);
    outtextxy(350, 55, "t(%)");
    outtextxy(400, 55, "di(%)");
    outtextxy(450, 55, "m");
    outtextxy(500, 55, "aX^2");
    outtextxy(565, 55, "bX");
      Mostrar frame de la grafica
    pantalla.frame(20, 100, 330, MaxY-20, GRISOBSCURO, NO, NEGRO, CENTRO, " Graficas ");
    setcolor(NEGRO);
    outtextxy(340, MaxY-20, "Presione TAB, para mostrar opciones.");
    // Fijar caracterizticas del ratón
    raton.esmmh(1,629);
    raton.esmmv(21,335);
    raton.puntero(ACTIVO);
    raton.punteroxy(315,175);
  }

  void InicializarGraficos(void) {
    / Declaración de variables
    int Controlador = VGA, Modo = VGAMED, CodigoError = 0;
    initgraph(&Controlador, &Modo, "");
    CodigoError = graphresult();
    if(CodigoError != grOk) {
      gotoxy(1,1); cprintf("Error: %s", grapherrormsg(CodigoError));
      gotoxy(1,2); cprintf("Pulse una tecla.");
      getch(); exit(EXIT_FAILURE);
    }
  }

  void Curvas(int Contador){
  float c,e;                          //declaración de variables
  int my,mx,es,ex,ey,ox,oy,j,i,y,nd,divx,divyp,divy,tx;
  char tex[2];
  c = Resultados[Contador].c;
  e=Resultados[Contador].e;
  setcolor(Contador);
  mx = 315;
  my = getmaxy()-25;
  es=2;                               escala y origen de gráfica
```

```
  ex=mx*2/es-45;
  ey=(my-100)/es;
  ox=mx-ex;
  oy=my-ey;
  moveto(ox,oy);                    //Gráfica de curva
  for (i=0;i<ex;i++){
    y=oy-(c*pow(i*50/ex,2)+e*i*50/ex)*ey/50;
    lineto(ox+i,y);
    }
  setcolor(YELLOW);
  moveto(mx,oy);                    //ejes
  lineto(ox,oy);
  moveto(ox,oy+ey);
  lineto(ox,oy-ey);
  nd=5;                   divisiones en ejes
  for (i=1;i<=nd;i++)
    {divx=i*ex/nd+ox;
    divyp=oy-i*ey/nd;
    divy=i*ey/nd+oy;
    tx=i*10;
    itoa(tx,tex,10);
    moveto(divx,oy-5);
    lineto(divx,oy+5);
    outtextxy(divx-5,oy+10,tex);
    moveto(ox,divyp);
    lineto(ox+5,divyp);
    outtextxy(ox-20,divyp+3,tex);
    moveto(ox,divy);
    lineto(ox+5,divy);
    outtextxy(ox-20,divy-5,tex);
    }
 }

 void CrearArchivo(int Contador){
 int i=0;
 char Temporal1[16]={""},Temporal2[10]={","},Temporal3[10]={"\n"};
 arch=fopen("C:\temp\\RCT.csv","ab");
   if(arch==NULL)
   {clrscr();
   printf("\a\a ERROR");
   printf("\n ARCHIVO NO SE ABRIO, CHECAR POSIBLES FALLAS");
   exit(1);}
 / do{
 for(i=0;i<Contador;i++)
 { fflush(stdin);
   gcvt(Resultados[i].t,10,Temporal1);
     fwrite(&Temporal1,sizeof(Temporal1),1,arch);
     strcpy(Temporal1,"");
     fwrite(&Temporal2,sizeof(Temporal2),1,arch);
   gcvt(Resultados[i].d,10,Temporal1);
     fwrite(&Temporal1,sizeof(Temporal1),1,arch);
     strcpy(Temporal1,"");
     fwrite(&Temporal2,sizeof(Temporal2),1,arch);
   gcvt(Resultados[i].m,10,Temporal1);
     fwrite(&Temporal1,sizeof(Temporal1),1,arch);
     strcpy(Temporal1,"");
```

```
    fwrite(&Temporal2,sizeof(Temporal2),1,arch);
  gcvt(Resultados[i].cf,10,Temporal1);
    fwrite(&Temporal1,sizeof(Temporal1),1,arch);
    strcpy(Temporal1,"");
    fwrite(&Temporal2,sizeof(Temporal2),1,arch);
  gcvt(Resultados[i].c,10,Temporal1);
    fwrite(&Temporal1,sizeof(Temporal1),1,arch);
    strcpy(Temporal1,"");
    fwrite(&Temporal2,sizeof(Temporal2),1,arch);
  gcvt(Resultados[i].e,10,Temporal1);
    fwrite(&Temporal1,sizeof(Temporal1),1,arch);
    fwrite(&Temporal3,sizeof(Temporal3),1,arch);
  }
fclose(arch);
}

int AcercaDe(void) {
  // Declaración de variables
  void *buffer;
  unsigned int bytes;
  // Ocultar puntero del ratón
  raton.puntero(INACTIVO);
  // Inicialización de variables
  bytes = 0;
  // Obtener tamaño de la imagen en bytes
  bytes = imagesize(220, 80, 420, 220);
   / Verificar si hay suficiente espacio en la pila para guardar
  if((buffer = new char[bytes]) == NULL) return 0;
   / Guardar imagen en buffer
  getimage(220, 80, 420, 220, buffer);
   / Ventana de Acerca de
  pantalla.ventana(220, 80, 420, 220, GRISOBSCURO, GRIS, AZUL, BLANCO, CERRAR,
IZQUIERDA, "Acerca De...");
  setcolor(BLACK);
  outtextxy(290,105,"Anillos");
  outtextxy(280,115,"Version 1.0");
  outtextxy(240,135,"Factor de Fricción");
  outtextxy(244,145,"Para geometria 6:3:2");
  outtextxy(275,155,"2003 - 2004");
  outtextxy(233,175,"Diseño y codificación:");
  outtextxy(250,185,"Eduardo Domínguez"); setcolor(RED);
  outtextxy(230,195,"e_dominguez_g@hotmail.com");
  outtextxy(238,205,"VST to Oderfla (NOZZ)");
  // Esperar a que se pulse una tecla
  while(getch() == NULL);
  // Ocultar puntero del ratón
  raton.puntero(INACTIVO);
  // Reestablecer imagen
  putimage(220, 80, buffer, COPY_PUT);
  delete [] buffer;
  // Mostrar puntero del ratón
  raton.puntero(ACTIVO);
}
```

ANEXO VI

VI.1 CURVAS OBTENIDAS CON EL PROGRAMA PARA DETERMINAR EL FACTOR DE FRICCIÓN CORTANTE INTERFASIAL.

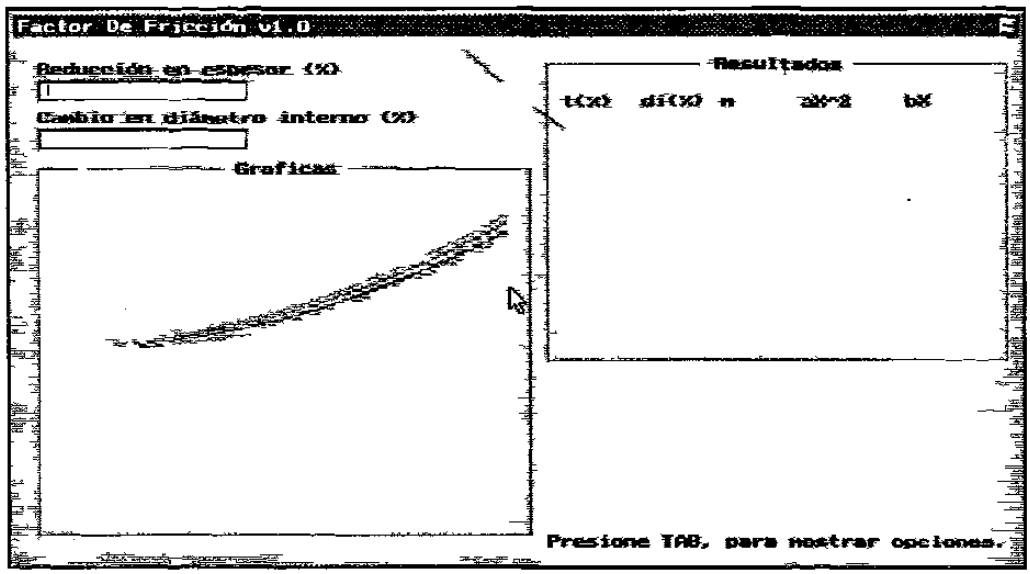


Fig. VI.1 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material B. ensayado sin lubricante.

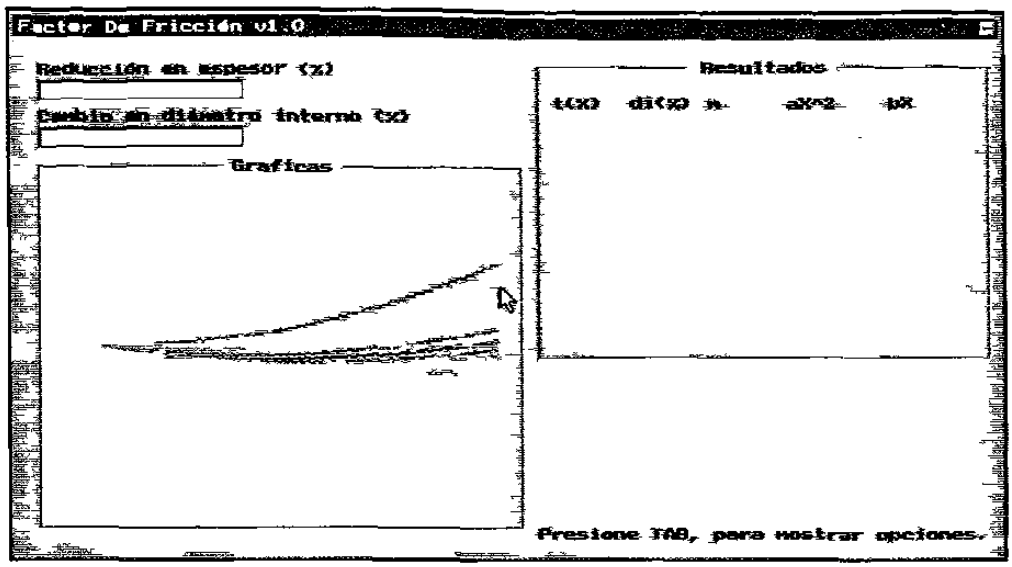


Fig. VI.2 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material B, ensayado Politetrafluoretileno (PTFE).

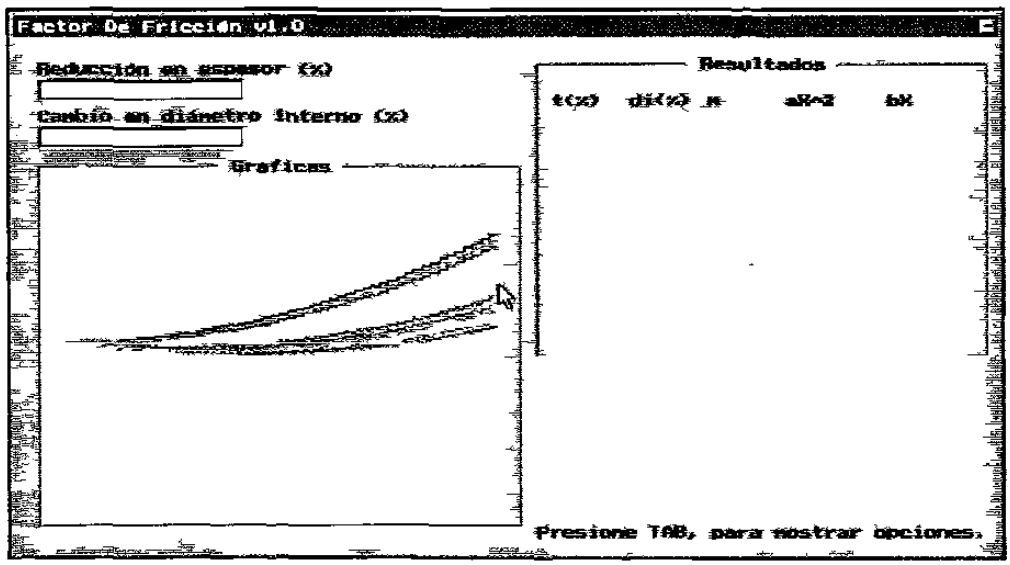


Fig. VI.3 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material B, ensayado con emulsión limpia al 6%.

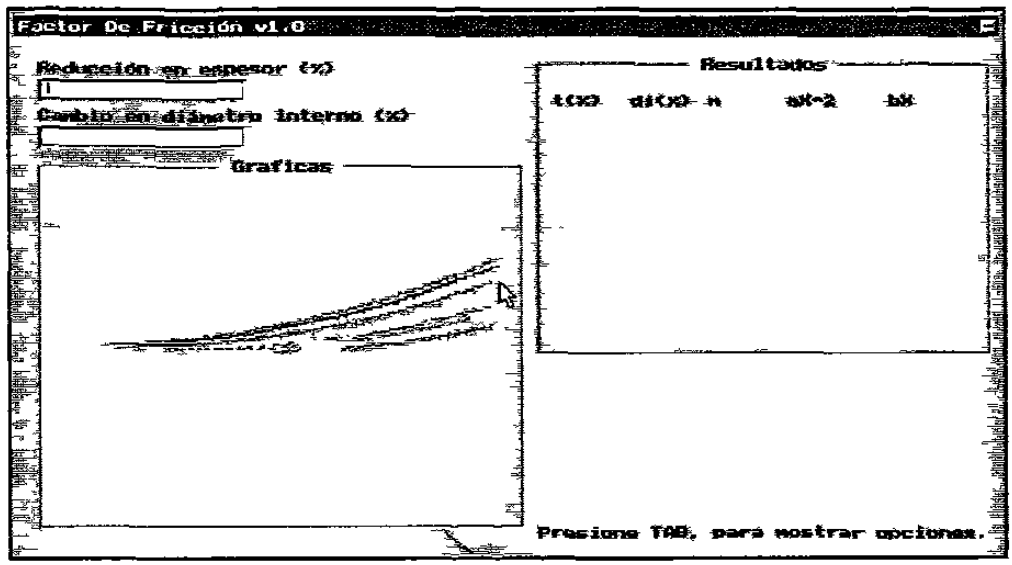


Fig. VI.4 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material B, ensayado con emulsión usada al 6%.

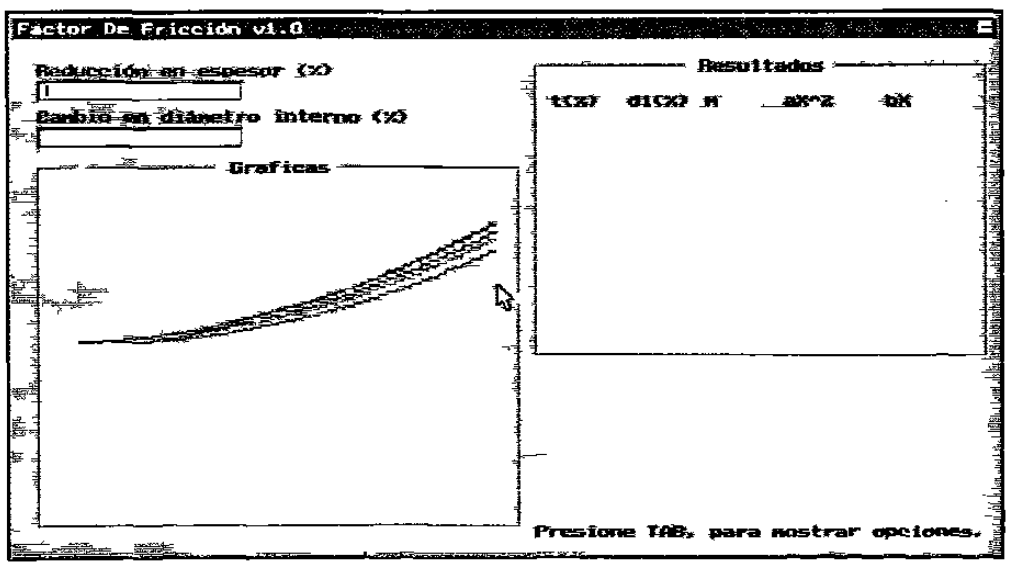


Fig. VI.5 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material C, ensayado sin lubricante.

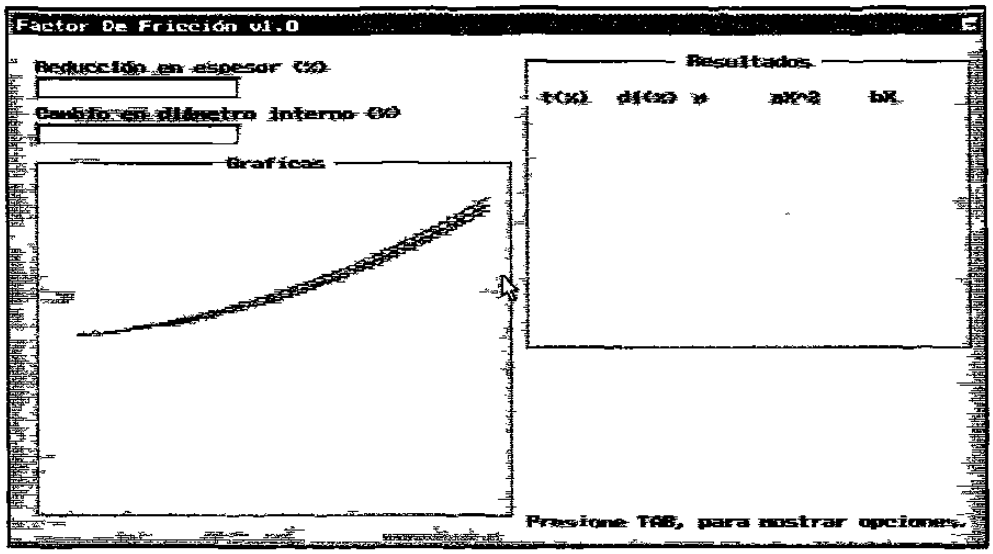


Fig. VI.8 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material D, ensayado sin lubricante.

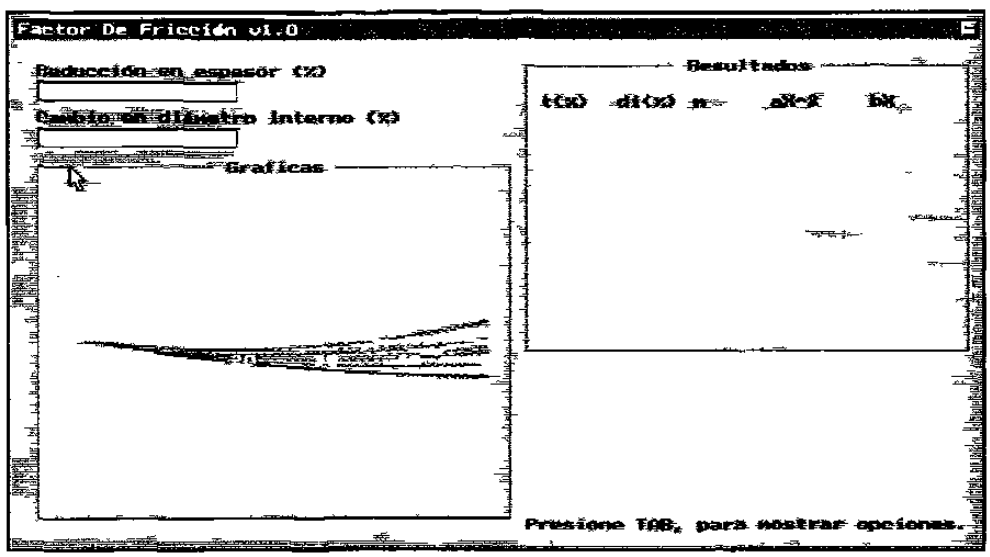


Fig. VI.9 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material D, ensayado Politetrafluoretileno (PTFE).

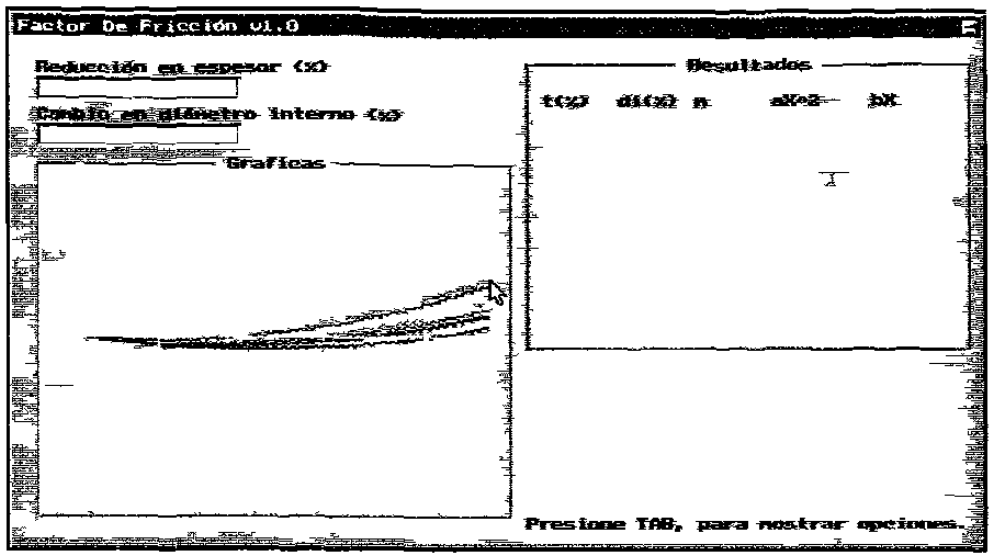


Fig. VI.10 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material D, ensayado con emulsión limpia al 6%.

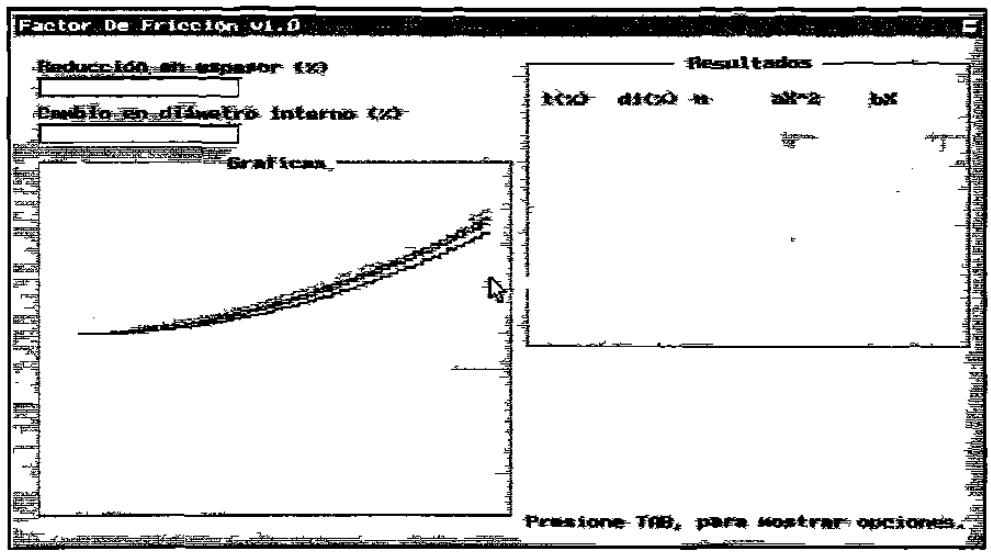


Fig. VI.11 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material E, ensayado sin lubricante.

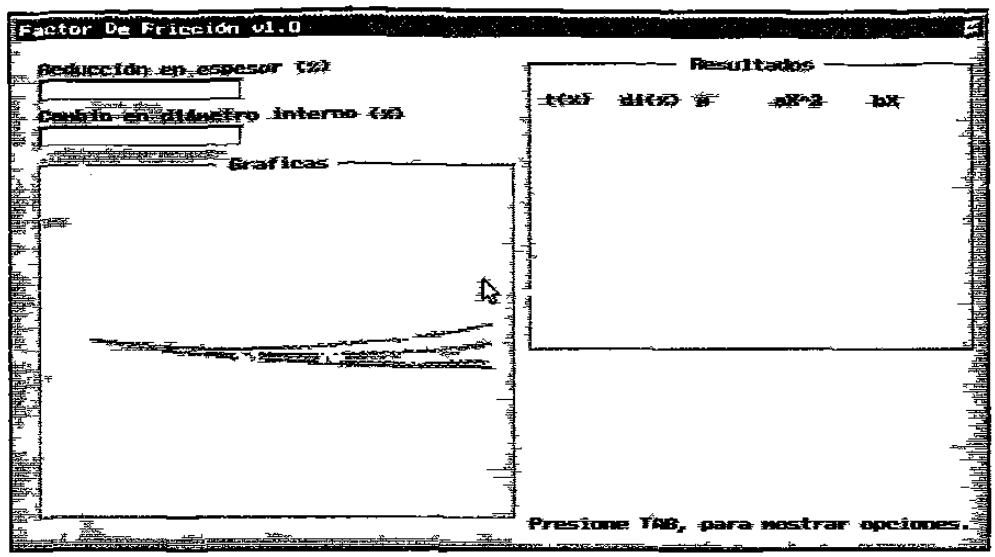


Fig. VI.12 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material E, ensayado Politetrafluoretileno (PTFE).

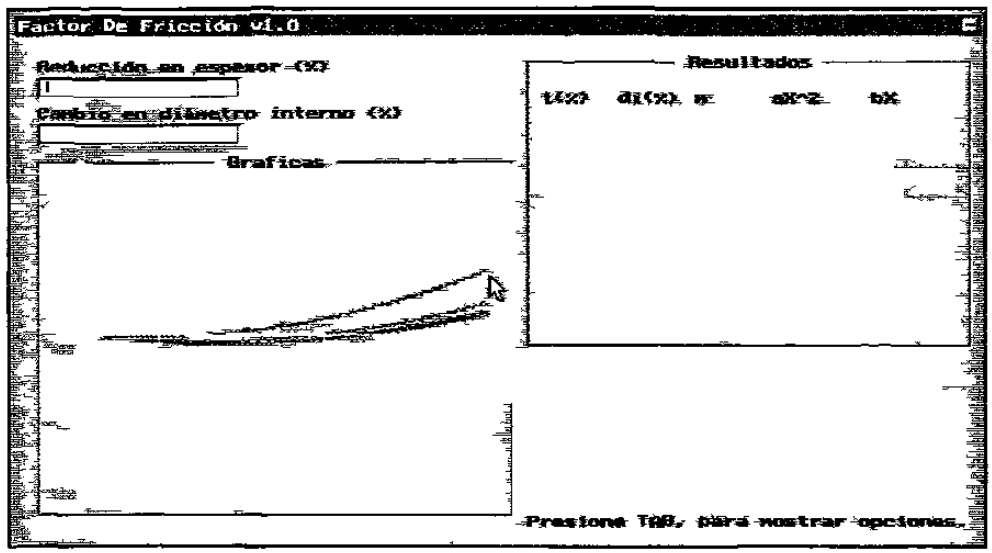


Fig. VI.13 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material E, ensayado con emulsión limpia al 6%.

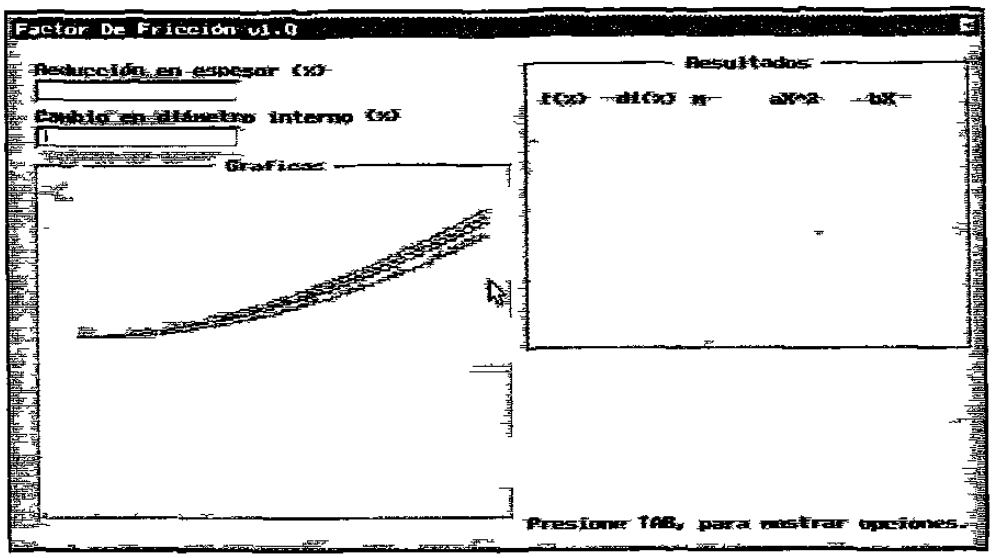


Fig. VI.14 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material F, ensayado sin lubricante.

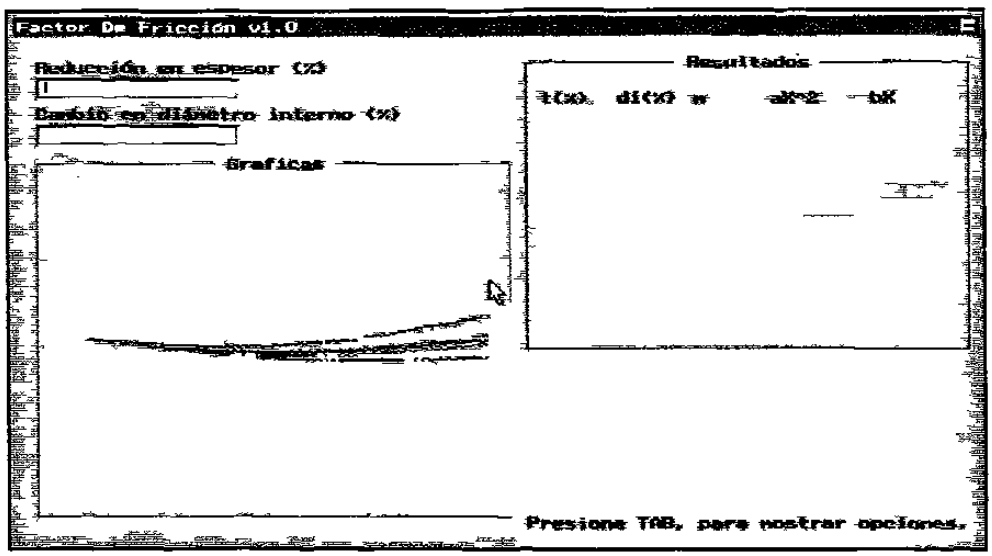


Fig. VI.15 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material F, ensayado Politetrafluoretileno (PTFE).

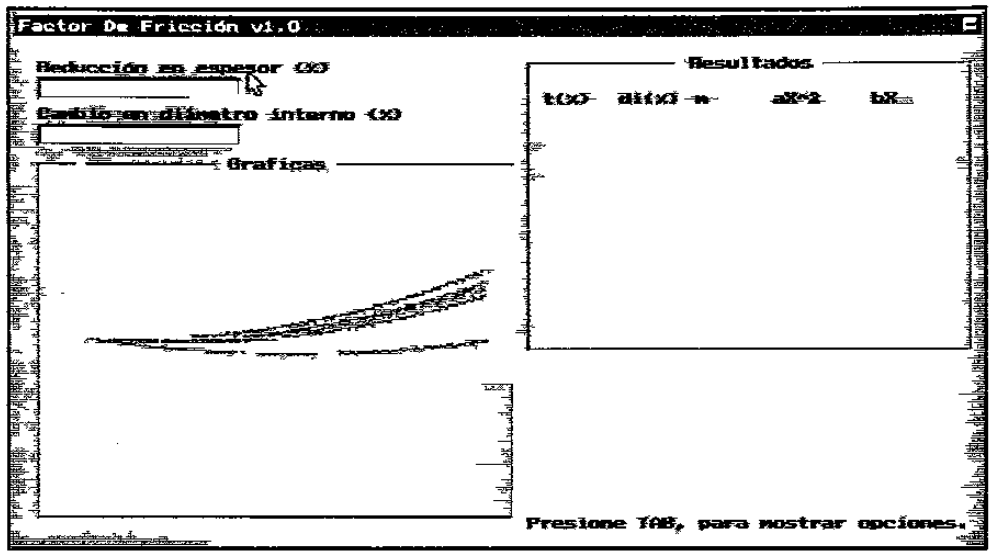


Fig. VI.16 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material F, ensayado con emulsión limpia al 6%.

LISTADO DE FIGURAS

Fig. 1.1 Diagrama de equilibrio de un objeto en un plano inclinado [1]. 3

Fig. 1.2 Gráfica típica del coeficiente de fricción estática en función del tiempo (Rabinowicz 1957), y de la fricción cinética en función de la velocidad de deslizamiento (Barwell 1956), [1].....4

Fig. 1.3 Gráfica de la fricción contra rugosidad, cobre sobre cobre sin lubricación, se muestra una región con pendiente negativa causada por el excesivo crecimiento de uniones y una región con pendiente positiva causada por la fijación de asperezas, entre estas regiones la fricción es independiente de la rugosidad [1]. 5

Fig. 1.4 Gráfica del coeficiente de fricción contra velocidad tiene una pendiente negativa para materiales duros, durante un amplio intervalo, sin lubricación [1]. 6

Fig. 1.5 Gráfica del coeficiente de fricción contra velocidad, en la cual a bajas velocidades se tiene una pendiente positiva y a altas velocidades se tiene una pendiente negativa, debido al gran contraste en dureza de los materiales que forman el sistema de deslizamiento [1]. 6

Fig. 1.6 Fricción en función de la velocidad de dos superficies de acero que se deslizan con un lubricante líquido. A velocidades cerca de υ_c, la superficie lisa tiene menor fricción (lubricación completa), mientras que la rugosa tiene mayor fricción (lubricación límite o de frontera), [1]. 7

Fig. 1.7 Sistema del proceso de deformación [3].....7

Fig. 1.8 Gráfica que muestra la proporcionalidad entre la fuerza de fricción y la carga normal [6]. 9

Fig. 2.1 Espesores de la capa lubricante de acuerdo al régimen de lubricación [6]. 12

Fig. 2.2 Regímenes de lubricación fluida o completa, (a) lubricación hidrostática, (b) lubricación hidrodinámica, y (c) lubricación elastohidrodinámica [1].....13

Fig. 2.3 Gráfica del coeficiente de fricción en función de la velocidad, donde se observan diferentes regímenes de lubricación en superficies capaces de desarrollar lubricación hidrodinámica [1].....14

Fig. 2.4 Estructura de grafito. La laminillas individuales consisten en átomos empacados de manera compacta, separadas por una distancia relativamente larga de las laminillas adyacentes [6].....16

Fig. 2.5 Estructura del oleato de sodio (a), estructura representada esquemáticamente (b), emulsión de aceite y agua, estabilizada con oleato de sodio (c), [6].....17

Fig. 3.1 Esquema del proceso de formado de metales [7]. 20

Fig. 3.2 Esquema del proceso de laminado [8]. 20

Fig. 3.3 Representación esquemática de un molino de laminación con sus partes principales [10]. 22

Fig. 3.4 Arreglos típicos de los rodillos en los molinos de laminación. Dúo (a). dúo reversible (b), trío (c), cuarto (d), rodillos en grupo (e), tren de laminación de cuatro castillos (f), [3].....23

Fig. 3.5 Fuerzas que actúan durante el laminado [3]. 25

Fig. 3.6 Distribución de la carga de laminación a lo largo del arco de contacto [3].....26

Fig. 3.7 Cuña formada por el lubricante en la entrada de la zona de deformación (a), irregularidades en las superficies de rodillos y lámina (b), [6].....27

Fig. 3.8 Lubricación hidrodinámica en la laminación, representada en forma esquemática (a), esfuerzos cortantes en la capa lubricante (b), [6].....27

Fig. 3.9 Variación de la colina de fricción con la velocidad [9].....28

Fig. 3.10 Gráfica obtenida con un programa computacional basado en la teoría de Bland y Ford, se observa el corrimiento de la colina de fricción para distintos coeficientes de fricción [12].....29

Fig. 3.11 Deslizamiento hacia delante y posición del punto neutro contra velocidad del laminado (a), variación de la colina de fricción con la velocidad (b), [6].....30

Fig. 4.1 Anillo con una relación de dimensiones de diámetro externo, diámetro interno y espesor de 6:3:2.....32

Fig. 4.2 Curva de calibración para una anillo de geometría 3:6:2 [14].....32

Fig. 4.3 Comportamiento del cambio en geometría de un anillo en compresión. Anillo original (a). Anillo deformado con baja fricción (el radio neutro es menor que el radio interno). Anillo deformado con fricción alta (el radio neutro es mayor que el radio interno, pero menor que el radio externo) [6].....34

Fig. 4.4 Curva de calibración de la prueba de compresión de anillo mostrando dos lubricantes que fallan a distinto porcentaje de deformación [15].....34

Fig. 4.5 Molino de laminación en caliente. 35

Fig. 4.6 Obtención de probetas para análisis metalográfico. 36

Fig. 4.7 Obtención de las probetas de anillo a partir de placas. 37

Fig. 4.8 Molino cuarto reversible de laminación en frío [16]. 38

Fig. 4.9 Máquina universal Instron 8502. 39

Fig. 5.1 (a) Anillo sin deformar, (b) deformado 37.88 % en seco, (c) deformado 40.06 % con PTFE, (d) deformado 38.75 % con emulsión limpia al 6 %, (e) deformado 41.46 % con emulsión usada al 6 %. 41

Fig. 5.2 Curvas de calibración de la fricción para anillos con geometría 3:6:2 [17]. 42

Fig. 5.3 Curvas de calibración de la fricción para anillos con geometría 3:6:2 obtenidas mediante el método de elemento finito [17] y experimentos realizados con el material A. 43

Fig. 5.4 Curvas de calibración de la fricción para anillos con geometría 3:6:2 obtenidas mediante el método de elemento finito [17] y experimentos realizados con el material B. 43

Fig. 5.5 Curvas de calibración de la fricción para anillos con geometría 3:6:2 obtenidas mediante el método de elemento finito [17] y experimentos realizados con el material C. 44

Fig. 5.6 Curvas de calibración de la fricción para anillos con geometría 3:6:2 obtenidas mediante el método de elemento finito [17] y experimentos realizados con el material D. 44

Fig. 5.7 Curvas de calibración de la fricción para anillos con geometría 3:6:2 obtenidas mediante el método de elemento finito [17] y experimentos realizados con el material E. 45

Fig. 5.8 Curvas de calibración de la fricción para anillos con geometría 3:6:2 obtenidas mediante el método de elemento finito [17] y experimentos realizados con el material F. 45

Fig. 5.9 Curvas de tendencia polinomial de segundo orden de cada una de las curvas de calibración de la fricción. 46

Fig. 5.10 Gráfica del coeficiente **a** contra el factor de fricción interfasial y línea de tendencia ajustada con una regresión polinómica de cuarto orden. 47

Fig. 5.11 Gráfica del coeficiente **b** contra el factor de fricción interfasial y línea de tendencia ajustada con una regresión polinómica de cuarto orden. 48

Fig. 5.12 Curvas obtenidas con el programa (Anexo V) para determinar el factor de fricción interfasial del material A, ensayado sin lubricante. 49

Fig. 5.13 Curvas obtenidas con el programa (Anexo V) para determinar el factor de fricción interfasial del material A, ensayado con Politetrafluoretileno (PTFE). 49

Fig. 5.14 Curvas obtenidas con el programa (Anexo V) para determinar el factor de fricción interfasial del material A, ensayado con emulsión limpia al 6%. 50

Fig. 5.15 Curvas obtenidas con el programa (Anexo V) para determinar el factor de fricción interfasial del material A, ensayado con emulsión usada al 6%. 50

Fig. 5.16 Anillo seccionado en cuatro partes, cada corte a 90° del otro mediante una cortadora con disco de diamante.....55

Fig. 5.17 Dibujo esquemático de la localización de la deformación creada por la compresión [3]. 56

Fig. 5.18 Muestra comprimida en seco con un 17.25% de reducción en el espesor (a) y con el tratamiento térmico (b).....57

Fig. 5.19 Muestra comprimida en seco con un 27.52% de reducción en el espesor (a) y con el tratamiento térmico (b).....57

Fig. 5.20 Muestra comprimida en seco con un 38.48% de reducción en el espesor (a) y con el tratamiento térmico (b).....57

Fig. 5.21 Muestra comprimida con politetrafluoretileno como lubricante con un 17.58% de reducción en el espesor (a) y con el tratamiento térmico (b).....58

Fig. 5.22 Muestra comprimida con politetrafluoretileno como lubricante con un 27.41% de reducción en el espesor (a) y con el tratamiento térmico (b).....58

Fig. 5.23 Muestra comprimida con politetrafluoretileno como lubricante con un 39.44% de reducción en el espesor (a) y con el tratamiento térmico (b).....58

Fig. 5.24 Muestra comprimida con emulsión limpia al 6% como lubricante con un 17.37% de reducción en el espesor (a) y con el tratamiento térmico (b).....59

Fig. 5.25 Muestra comprimida con emulsión limpia al 6% como lubricante con un 27.58% de reducción en el espesor (a) sin y con el tratamiento térmico (b).....59

Fig. 5.26 Muestra comprimida con emulsión limpia al 6% como lubricante con un 38.86% de reducción en el espesor(a) sin y con el tratamiento térmico (b). 59

Fig. 5.27 Diagrama esquemático que con los puntos de identación para determinar la microdureza Vickers. 60

Fig. 5.28 Metalografía que muestra las identaciones realizadas a una muestra comprimida sin lubricante con una reducción en espesor de 27.52%....60

Fig. 5.29 Gráficas de los resultados de las mediciones de microdureza Vickers (HV). 63

Fig. 5.30 Gráfica de la variación de microdureza para diferentes condiciones de lubricación y diferentes porcentajes de deformación. 64

Fig. 5.31 Curva de fluencia del material A, obtenida con un programa computacional [23]....65

Fig. 5.32 Curva de fluencia del material B, obtenida con un programa computacional [23]....66

Fig. 5.33 Curva de fluencia del material C, obtenida con un programa computacional [23]....66

Fig. 5.34 Curva de fluencia del material D, obtenida con un programa computacional [23]....67

Fig. 5.35 Curva de fluencia del material E, obtenida con un programa computacional [23]....67

Fig. 5.36 Curva de fluencia del material F, obtenida con un programa computacional [23]....68

Fig. 5.37 Comparación de las curvas de fluencia del material A, obtenida con ensayos de tensión [24] y con ensayos de compresión de anillo. 69

Fig. 5.38 Comparación de las curvas de fluencia del material B, obtenida con ensayos de tensión [24] y con ensayos de compresión de anillo. 69

Fig. 5.39 Comparación de las curvas de fluencia del material C, obtenida con ensayos de tensión [24] y con ensayos de compresión de anillo. 70

Fig. 5.40 Comparación de las curvas de fluencia del material D, obtenida con ensayos de tensión [24] y con ensayos de compresión de anillo. 70

Fig. 5.41 Comparación de las curvas de fluencia del material E, obtenida con ensayos de tensión [24] y con ensayos de compresión de anillo. 71

Fig. 5.42 Comparación de las curvas de fluencia del material F, obtenida con ensayos de tensión [24] y con ensayos de compresión de anillo. 71

Fig. I.1 Obtención de probetas para análisis metalográfico. 77

Fig. I.2 Metalografía 1 del Material A. 77

Fig. I.3 Metalografía 2 del Material A. 77

Fig. I.4 Metalografía 3 del Material A. 78

Fig. I.5 Metalografía 1 del Material B. 78

Fig. I.6 Metalografía 2 del Material B. 78

Fig. I.7 Metalografía 3 del Material B. 78

Fig. VI.1 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material B, ensayado sin lubricante. 96

Fig. VI.2 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material B, ensayado Politetrafluoretileno (PTFE).....97

Fig. VI.3 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material B, ensayado con emulsión limpia al 6%.....97

Fig. VI.4 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material B, ensayado con emulsión usada al 6%.....98

Fig. VI.5 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material C, ensayado sin lubricante.....98

Fig. VI.6 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material C, ensayado Politetrafluoretileno (PTFE).....99

Fig. VI.7 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material C, ensayado con emulsión usada al 6%.....99

Fig. VI.8 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material D, ensayado sin lubricante.....100

Fig. VI.9 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material D, ensayado Politetrafluoretileno (PTFE).....100

Fig. VI.10 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material D, ensayado con emulsión limpia al 6%.....101

Fig. VI.11 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material E, ensayado sin lubricante. 101

Fig. VI.12 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material E, ensayado Politetrafluoretileno (PTFE). 102

Fig. VI.13 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material E, ensayado con emulsión limpia al 6%.....102

Fig. VI.14 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material F, ensayado sin lubricante.....103

Fig. VI.15 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material F, ensayado Politetrafluoretileno (PTFE). 103

Fig. VI.16 Curvas obtenidas con el programa para determinar el factor de fricción interfasial del material F, ensayado con emulsión limpia al 6%.....104

LISTADO DE TABLAS

Tabla 4.1 Composición química del material.....35

Tabla 4.2 Condiciones de lubricación 37

Tabla 4.3 Caracterización de emulsiones en uso en los molinos, de acuerdo al tipo de acero probado. 39

Tabla 4.4 Número de experimentos realizados. 40

Tabla 5.1 Ecuaciones de las curvas de calibración de la fricción 47

Tabla 5.2 Resultados obtenidos para el material A y B en pruebas realizadas con emulsión sucia. 54

Tabla 5.3 Resumen de resultados para cada material ensayado.....54

Tabla 5.4 Resumen de resultados para cada tipo de lubricación, factor de fricción cortante interfasial y coeficiente de fricción Coulómbica promedio para todos los materiales ensayados. 55

Tabla 5.5 Características de muestras seleccionadas para análisis metalográfico.....55

Tabla 5.6 Composición del reactivo de Fry. 56

Tabla 5.7 Resultados de las mediciones de dureza. 61

Tabla 5.8 Mediciones de durezas graficadas en la Fig. 5.29.....63

Tabla 5.9 Resumen de los resultados de las mediciones de microdureza Vickers. 64

Tabla I.1 Tamaños promedio de grano. 78

Tabla II.1 Dimensiones iniciales de anillos de material A. 79

Tabla II.2 Dimensiones iniciales de anillos de material B. 80

Tabla II.3 Dimensiones iniciales de anillos de material C. 81

Tabla II.4 Dimensiones iniciales de anillos de material D. 81

Tabla II.5 Dimensiones iniciales de anillos de material E. 82

Tabla II.6 Dimensiones iniciales de anillos de material F. 82

Tabla III.1 Dimensiones finales de anillos de material A. 83

Tabla III.2 Dimensiones finales de anillos de material B. 84

Tabla III.3 Dimensiones finales de anillos de material C. 85

Tabla III.4 Dimensiones finales de anillos de material D. 85

Tabla III.5 Dimensiones finales de anillos de material E. 86

Tabla III.6 Dimensiones finales de anillos de material F. 86

Tabla IV.1 Cambio en geometría de anillos (%), material A y B 87

Tabla IV.2 Cambio en geometría de anillos (%). material C y D 88

Tabla IV.3 Cambio en geometría de anillos (%), material E y F 88