

308917



UNIVERSIDAD PANAMERICANA

ESCUELA DE INGENIERIA

Con estudios incorporados a la  
Universidad Nacional Autónoma de México

14  
2ej-

MONITOREO DE DESGASTE EN DADOS PARA FORJA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

T E S I S

Que para obtener el Título de  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
Area: Mecánica Eléctrica

p r e s e n t a

ROBERTO GONZALEZ OJEDA

Revisor: ING. RODOLFO BRAVO DE LA PARRA

México, D. F.

1 9 9 2



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**INDICE****INTRODUCCION.....vi****CAPITULO I****FENOMENOS DE LA FRICCION  
Y DEL DESGASTE****TRIBOLOGICO.....1****1.1. Fricción.....1****1.1.1. Factor cortante en  
la interfase.....4****1.1.2. Fricción variable.....4****1.1.3. Efectos de la  
Fricción.....5****1.2. Fundamentos de la  
tribología en el  
trabajo en metales.....7****1.2.1. Interfases reales.....7****1.2.2. Superficie de contacto.....9****1.2.3. Carga elástica  
y contacto normal.....11****1.2.4. Deslizamiento y  
origen de la fricción.....12**

1.3. Desgaste.....	17
1.3.1. Desgaste adhesivo.....	19
1.3.2. Desgaste abrasivo.....	20
1.3.3. Desgaste por fatiga.....	22
1.3.4. Desgaste químico.....	24
1.3.5. Mecanismos de desgaste combinados.....	24
1.3.6. Cuantificación del desgaste.....	25
1.3.7. Coeficientes de desgaste.....	26

## CAPITULO II

EFFECTOS DE LA FRICCIÓN Y EL DESGASTE EN DADOS PARA FORJA.....	33
2.1. Forja en dados para impresión.....	33
2.1.1. Llenado del dado.....	34
2.1.2. Forja y fuerzas de expulsión.....	36
2.2. Forja cerrada y extrusión.....	37
2.2.1. Procesos.....	37
2.2.2. Prácticas.....	38
2.3. Lubricación y desgaste de la forja en caliente.....	40
2.3.1. Mecanismos de lubricación.....	40
2.3.2. Desgaste en el dado.....	45
2.4. Cálculos de fuerzas para forja.....	50

## CAPITULO III

DEFINICION DEL PROBLEMA	
E HIPOTESIS DEL TRABAJO.....	55
3.1. Localización del desgaste.....	56
3.2. Naturaleza del desgaste.....	71
3.3. Comportamiento del desgaste.....	81
3.4. Análisis cuantitativo del desgaste.....	82
3.5. Definición del problema.....	84
3.5.1. Región desgastada.....	84
3.5.2. Efectos del desgaste en la producción.....	85
3.5.3. Definición de monitoreo.....	87
3.5.4. Requerimientos del monitoreo.....	87
3.6. Beneficios y alcances del monitoreo.....	87
3.7. Aceros herramientales.....	90
3.7.1. Características de los aceros herramientales....	90
3.7.2. Características del acero H13.....	92

## CAPITULO IV

## DISEÑO DE UN APARATO

DE MONITOREO.....	98
4.1. Modos de medición.....	98
4.1.1. Modo indirecto.....	99
4.1.2. Modo directo.....	99
4.1.3. Modo continuo.....	99
4.1.4. Modo periódico.....	99
4.2. Consideraciones de diseño.....	100
4.3. Sistema de monitoreo.....	100
4.3.1. Planteamiento del sistema.....	101
4.3.2. Características del plomo.....	101
4.3.3. Aparato para medir el desgaste.....	103
4.3.4. Ecuaciones y ejemplo de medición.....	105
4.4. Análisis del error.....	109
4.5. Alternativas de solución.....	112
4.5.1. Medición directa.....	112
4.5.2. Sistema "Vision".....	115

## CAPITULO V

## APLICACION DEL SISTEMA

DE MONITOREO.....	117
5.1. Consideraciones sobre la forma de monitorear.....	118
5.2. Determinacion de los anillos de medición.....	119
5.3. Programa para monitoreo.....	120
5.4. Ejemplo de aplicación.....	125
5.5. Resultados.....	129

## CAPITULO VI

CONCLUSIONES.....	130
-------------------	-----

BIBLIOGRAFIA.....	133
-------------------	-----

## INTRODUCCION

El trabajo en metales y en particular la forja es una de las primeras ocupaciones tecnológicas que se le conoce a la humanidad; los metales han sido forjados y formados por más de 7000 años. Considerando la importancia de los lubricantes en todos los procesos de deformación es de asombrarse el que la información sobre esto sea muy reciente.

Lo anterior se debe, tal vez, a que la composición, la forma de trabajar y la lubricación en los metales fueron, y de alguna manera todavía son, los secretos más resguardados de los procesos. Por otra parte, el trabajo en metales fue durante mucho tiempo artesanal y, consecuentemente, no se desarrolló teoría a su respecto (sobre todo en cuanto a lubricación se refiere).

La forja es, sin duda, el proceso que tiene la historia más larga de uso de lubricantes; las partes de los rifles eran forjadas en dados para impresión usando aceites pesados o aceite mezclado con grafito como lubricante. Sin embargo, la profundidad de los estudios de la lubricación en la forja se han quedado rezagados con respecto a otros procesos como el trefilado, la laminación o el embutido.



En los últimos años ha surgido el término "tribología" que viene del griego tribos que significa fricción. En realidad el término comprende el estudio de la fricción, la lubricación y el desgaste, que, aunque a primera vista parecen fenómenos distintos, en realidad son manifestaciones de lo mismo y no se puede estudiar por separado.

De cualquier forma, el desgaste en los dados para forja es sumamente preocupante ya que basta que alguna parte del dado se desgaste para que quede inservible. Por otra parte, el elevado precio de los aceros que se usan para fabricar los dados hace que el herramental represente alrededor del quince por ciento de los costos del proceso de forja. Es evidente que al encontrar formas de disminuir el desgaste y, por consiguiente, aumentar la vida del dado, los ahorros en la producción son muy significativos.

Uno de los problemas para entender los efectos de la lubricación, la fricción y otros factores que influyen en el desgaste del dado es el hecho de que no existe forma de visualizar este desgaste. La forja, y en particular la forja en caliente es lo que se puede llamar un trabajo "pesado". Esto hace sumamente difícil medir el desgaste que sufre el dado mientras se encuentra forjando y de esta forma determinar la eficacia de un cierto lubricante, de los tratamientos que ha sufrido el dado y, a final de cuentas, del diseño del mismo dado.

El presente trabajo pretende hacer una introducción a la naturaleza de los fenómenos del desgaste y de la fricción y proponer un sistema para medir de una forma confiable el desgaste que sufre un dado para forja en caliente. Lo anterior con la esperanza de aumentar el interés por conocer y entender de una forma teórica los fenómenos tribológicos en el trabajo en metales, seguir de una manera precisa el comportamiento del desgaste en el dado y, a final de cuentas, entender más a fondo el proceso de la forja.

**CAPITULO I**  
**FENOMENOS DE LA FRICCION Y DEL DESGASTE**  
**TRIBOLOGICO**

En los últimos años ha surgido el término tribología, que es un concepto que comprende la ciencia y la tecnología de la fricción, la lubricación y el desgaste. El conocimiento concerniente a la tribología del trabajo en metales ha aumentado considerablemente debido a la importancia que tiene el conocer a fondo los procesos de manufactura.

Con muy pocas excepciones, el trabajo en metales implica el contacto entre dos cuerpos: el herramental (dado) y la pieza de trabajo; esto nos lleva a concluir que los fenómenos de la fricción y el desgaste se presentan en todos los procesos de manufactura, independientemente del trabajo que se esté realizando y de las condiciones particulares de éste.

**1.1. FRICCION**

La fricción se puede definir como la fuerza de resistencia tangencial a la frontera común entre dos

cuerpos, cuando, bajo la acción de una fuerza externa, un cuerpo se mueve o se tiende a mover con respecto a la superficie del otro. Ya que las fuerzas pueden ser medidas de una forma relativamente fácil, los estudios sobre los efectos de la fricción se han convertido en el punto central en la investigación del trabajo en metales.

No se pueden entender los efectos de la fricción en el trabajo en metales sin familiarizarse de alguna manera con la teorías de plasticidad. Los criterios de plasticidad más usados para los metales son el de Tresca, que se puede escribir como:

$$\frac{\sigma_{\max}}{2} - \frac{\sigma_{\min}}{2} = \frac{\sigma_f}{2} \quad (1.1)$$

y el de Von Mises:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_f^2 \quad (1.2)$$

en donde  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  son los tres esfuerzos principales y " $\sigma_f$ " es el esfuerzo de fluencia uniaxial del material.

Las teorías de plasticidad toman, la mayoría de las veces, una visión sumamente simplificada de la interfase, considerando que el dado y la pieza de trabajo tienen geometrías bien definidas y que la interfase sufre un esfuerzo cortante conocido  $\tau_f$ . Sin embargo, por conveniencia de cálculos, es preferible que la interfase sea descrita como un factor no dimensional.

Para definir el coeficiente de fricción es posible tomar el concepto de la ingeniería mecánica:

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{\tau_f}{p} \quad (1.3)$$

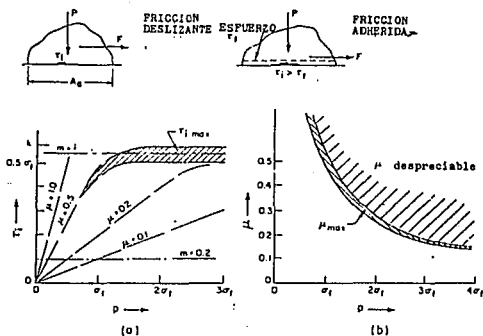
donde F es la fuerza requerida para mover el cuerpo y P es la fuerza normal,  $\mu$  es el esfuerzo cortante promedio

debido a la fricción y  $p$  es la presión normal. Esta definición comprende las dos leyes básicas de Amontón acerca de la fricción: la fuerza de fricción es proporcional a la fuerza normal y es independiente del tamaño del área aparente de contacto. Para una constante, el esfuerzo cortante en la interfase  $\tau_i$  se debe incrementar al mismo ritmo que  $p$ ; cuando esta condición se satisface se habla de una fricción de Coulomb (figura 1.1 a).

Esto último no es necesariamente verdadero para el trabajo en metales, ya que cuando  $\tau_i$  alcanza un valor  $k$ , el material tiene otra opción: en lugar de deslizarse en contra de la superficie del dado, le toma menos energía el deformarse dentro del cuerpo de la pieza de trabajo, mientras la superficie permanece inmóvil (figura 1.1 b). Esto se puede describir como fricción adherida, aún cuando no existe una adhesión real al material del dado. La condición para que se cumpla este fenómeno es:

$$\tau_i = \mu p > k \quad (1.4)$$

FIG. 1.1. Esfuerzo cortante (a) y máximo coeficiente de fricción (b) a varias presiones en la interfase



Ya que  $k=0.577 \sigma_r$  (según Von Mises), a veces se toma  $\mu_{m,th}=0.577$ , pero esto es cierto sólo cuando se alcanza la completa conformidad de la superficie en  $p = \sigma_r$ . Lo anterior significa que el coeficiente de fricción no tiene sentido cuando  $\mu p > k$  ya que no existe deslizamiento en la interfase.

#### 1.1.1. FACTOR CORTANTE EN LA INTERFASE.

Las dificultades con  $\mu$  hacen necesario el describir la interfase de la siguiente forma:

$$(1.5)$$

donde  $m$  es el factor cortante en la interfase y tiene un valor de  $m=0$  para interfase sin fricción y  $m=1$  para fricción adherida. Esto tiene una conveniencia muy grande ya que se define con ayuda de  $k$ , cuyo valor es conocido.

Sin embargo, el uso de  $m$  tiene sus inconvenientes: normalmente la interfase esta hecha de un material bastante distinto del material de la pieza de trabajo. Por otra parte, el considerar a  $k$  como un valor bien conocido y con propiedades bien definidas es una simplificación, ya que el trabajo severo, combinado con el deslizamiento de la interfase cambian substancialmente las propiedades de la superficie de contacto, haciendo el cálculo de  $m$  poco confiable.

#### 1.1.2. FRICCIÓN VARIABLE.

Debido a que la presión de la interfase, velocidades de deslizamiento, temperaturas y otras condiciones que afectan el comportamiento de los lubricantes tienden a variar en la zona de contacto entre el dado y la pieza de trabajo, es lógico que  $\mu$  ó  $m$  varien también. De ahí que una descripción exacta de la interfase solo se pueda hacer con el valor local de  $\tau$ , aunque, por conveniencia, se asume un valor promedio de  $\mu$  ó  $m$ . Esto se permite para el cálculo de fuerzas, pero puede llevar a errores en el cálculo de distribución de esfuerzos.

### 1.1.3. EFECTOS DE LA FRICCIÓN.

#### - PRESIONES Y FUERZAS.

En la forma más general el esfuerzo requerido para la deformación consta de tres partes:

$$p = f_1(\sigma) \cdot f_2(\tau) \cdot f_3(\text{geometría del proceso}) \quad (1.6)$$

La primera componente se debe al trabajo de deformación; es el esfuerzo requerido para la deformación sin fricción de un material con esfuerzo de fluencia  $\sigma$ , para una deformación  $\epsilon$ , a una velocidad de deformación  $\dot{\epsilon}$ , y homogénea.

La segunda componente representa los efectos de la fricción y es la parte más importante de nuestro estudio, aún cuando puede significar menos del 5% de la fuerza de deformación.

La tercera componente refleja la dificultad de lograr una deformación homogénea. Esta falta de homogeneidad está regida por la geometría del proceso en combinación, a veces, con los efectos de la fricción. Esto último es lo que hace sumamente difícil el encontrar una solución teórica válida para los procesos de trabajo en metales. Algunas veces este último término se toma como trabajo redundante.

La fricción no es siempre indeseable y ocasionalmente es benéfica, como cuando transfiere esfuerzos de la pieza de trabajo al punzón al realizarse un embutido.

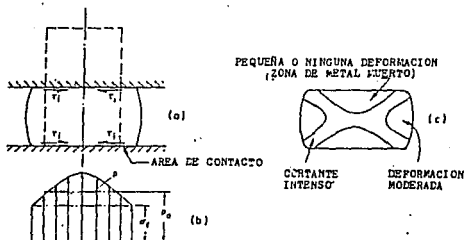
#### - LOS EFECTOS DE LA FRICCIÓN.

La presencia de una fuerza de fricción se aprecia desde el momento en que la pieza de trabajo se mueve con respecto al dado. Este deslizamiento se le impone a un tocho cuando se le mueve dentro de un contenedor para ser extruido, cuando un alambre se pasa por un dado o cuando se maquina una pieza en un torno.

El volumen de material permanece constante durante una deformación plástica, de ahí que el diámetro de un cilindro

aumente ,mientras su altura se reduce. La superficie que se expande se mueve radialmente hacia afuera, deslizándose sobre la superficie del dado. Entonces surge un esfuerzo friccionante que se opone a la expansión libre del cilindro y la presión de la interfase (presión del dado) debe aumentar para vencer esta resistencia. Conforme aumenta la distancia a la orilla, la fuerza de fricción y con ella la presión del dado también aumentan, desarrollando la llamada "cresta de fricción" (figura 1.2). De aquí que la presión del dado pueda ser mucho mayor de la esperada por el del material.

FIG. 1.2. Consecuencias de la fricción ilustrado en la forja libre de un cilindro



Una de las metas de la teoría del trabajo en metales es el determinar la distribución de la presión en la zona de contacto entre el dado y la pieza. Sin embargo, para muchos propósitos es suficiente el conocer la presión promedio  $p_a$ .

#### - INCREMENTO DE TEMPERATURA.

Casi todo el trabajo de deformación se transforma en calor, de aquí que la deformación plástica o el corte de metales a velocidades altas puedan producir incrementos de temperatura muy significativos, especialmente cuando la conducción de calor es pobre.

La fricción afecta al incremento de temperatura en dos formas:

a) Bajo fricción deslizante, el trabajo requerido para vencer la fuerza de fricción se transforma en calor justo en la interfase.

b) Bajo fricción adherida, los cambios de temperatura en la interfase no son considerables, pero la localización de los esfuerzos cortantes puede llevar a la localización del calentamiento, lo que lleva a una deformación no homogénea de la pieza.

#### - DISTRIBUCION DE ESFUERZOS.

Como primera aproximación se puede asumir que la deformación plástica es homogénea, pero en muchos casos, dos factores invalidan esta suposición.

Primeramente, la fricción impone una restricción externa a la deformación y, por otra parte, la geometría del proceso mismo puede inducir a una falta de homogeneidad; ésto es, que no todas las partes de la pieza sufran el mismo esfuerzo.

### 1.2. FUNDAMENTOS DE LA TRIBOLOGIA EN EL TRABAJO EN METALES

#### 1.2.1. INTERFASES REALES.

En la primera parte de este capítulo se vió a la interfase como una capa continua con un esfuerzo cortante  $\tau$  interpuesta entre un dado rígido y una pieza de trabajo deformable. No nos preocupamos por la naturaleza de la interfase y asumimos que cualquier cambio que pudiera suscitarse a través de las variables del proceso, puede ser comprendido simplemente escogiendo valores apropiados de  $\tau$ , (ó  $\mu$  ó  $m$ ). Esta simplificación es aceptable para cálculos de presiones, fuerzas y potencias; pero es inadecuado para entender las fuentes de la fricción y el desgaste.



### 1.2.1.1. Vista macroscópica.

En la escala macroscópica (figura 1.3 a), debemos reconocer que el material del dado no es rígido y tiene un módulo elástico finito y un esfuerzo de cedencia; así, la configuración nominal del dado siempre es deformada a través de deflexiones elásticas y, si la carga es excesiva, también por flujo plástico o por fractura.

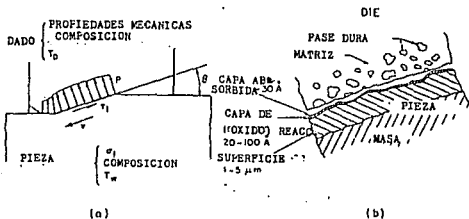
El dado y la pieza de trabajo no son simples componentes mecánicos ya que tienen composiciones más o menos bien definidas que rigen las consecuencias del contacto íntimo. Si las condiciones lo permiten puede ocurrir atracción mutua o adhesión con amplias consecuencias en términos de fricción y desgaste.

### 1.2.1.2. Vista microscópica.

Para entender mejor los fenómenos tribológicos es necesario distinguir varias características microscópicas (figura 1.3 b):

- Las superficies del dado y la pieza muestran pequeños picos y valles cuyas características influyen en la fricción y el desgaste.
- Un dado metálico muestra una composición donde aparecen partículas duras y resistentes al desgaste insertadas en una matriz más blanda y dúctil.
- El material de la pieza de trabajo puede ser de una sola fase o de varias.

FIG. 1.3. La interfase dado/pieza en vistas (a) macro y (b) micro escalas



d) Las superficies de metal puras (superficies vírgenes) rara vez existen. Las superficies normalmente están cubiertas con productos surgidos por la reacción con el aire, la humedad y los lubricantes.

### 1.2.2. SUPERFICIE DE CONTACTO.

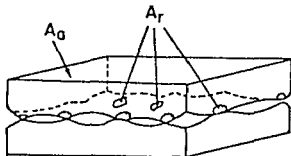
El contacto entre dos superficies reales es muy complejo para ser analizado completamente pero, una aproximación útil se puede lograr al observar una superficie sin lubricante (fricción seca).

#### 1.2.2.1. Area de contacto.

Antes de discutir la mecánica del contacto, es necesario entender la gran variedad de condiciones que pueden existir en el trabajo en metales. Para simplificar el análisis se considera que el dado es perfectamente liso y que la pieza de trabajo tiene una cierta rugosidad uniforme.

En una vista tridimensional, las superficies solo hacen contacto en los puntos más altos (crestas). El área real de contacto  $A_r$  es solo una fracción del área aparente  $A_a$  (figura 1.4).

FIG. 1.4. Puntos de contacto entre dos superficies rugosas



Superpuestas a las asperezas que se logran ver en la superficie, están otras irregularidades de menor escala llamadas microasperezas o asperezas de alto orden. Para una superficie dada, la magnitud de  $A_r$  depende de la magnitud de

la carga  $P$  a la que está sometida y al deslizamiento relativo entre las superficies.

#### 1.2.2.2. Presiones en la interfase.

Se debe hacer una distinción cuidadosa entre la presión local en las rugosidades y la presión promedio o esfuerzo normal, ya que pueden ser muy distintos (sobre todo si  $A_r$  es muy pequeño).

1. Cuando la carga normal es pequeña la pieza no sufre otro tipo de esfuerzo y no hay deslizamiento; el esfuerzo promedio permanece por debajo del esfuerzo de fluencia del material.

2. Cuando el esfuerzo promedio se mantiene por debajo de " $\sigma_f$ " pero se imprime un movimiento relativo (deslizamiento) entre el dado y la pieza, se llega a una condición similar a la que se ve entre componentes mecánicos.

3. Cuando la presión es suficiente para causar el flujo plástico del cuerpo, las rugosidades hacen contacto con un sustrato que se deforma. Ya que el criterio de cedencia puede ser satisfecho de muchas formas, la presión en la interfase puede variar ampliamente:

a. La cedencia ocurre con una presión normal menor a " $\sigma_f$ " pero con esfuerzos de tensión y compresión actuando de forma paralela a la interfase (figura 1.5 a).

b. El esfuerzo normales apenas inferior a " $\sigma_f$ " cuando el esfuerzo tensil actúa paralelamente a la superficie y los de compresión de manera perpendicular (figura 1.5 b).

c. Los esfuerzos normales son mayores a " $\sigma_f$ " cuando todos los esfuerzos de compresión como en el caso de rolado, forja y extrusión (figura 1.6).

FIG. 1.5. Ejemplos de baja presión en la interfase, resultado de la cedencia en estado de esfuerzos combinados

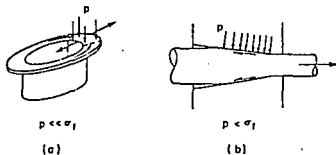
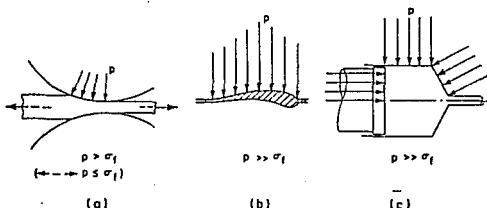


FIG.1.6. Ejemplos de alta presión en la interfase, resultado de la cedencia en compresión



### 1.2.3. CARGA ELÁSTICA Y CONTACTO NORMAL.

Desde un punto de vista macroscópico, una rugosidad presionada en una superficie, únicamente sufre deformaciones elásticas, pero desde un punto de vista más cercano, aún cuando la presión en la interfase no es suficiente para causar deformación plástica en la masa, algunas rugosidades se deforman plásticamente. Una guía útil es el índice de plasticidad:

$$\Psi = \left[ \frac{E^*}{H} \right] \left[ \frac{\sigma^m}{\beta} \right]^n \quad (1.7)$$

donde  $H$  es la dureza,  $\sigma^m$  es la desviación estandar de la altura de las rugosidades,  $\beta$  es la media del radio de las

rugosidades,  $n=0.5$  ó  $1$ , y  $E^*$  es el módulo elástico compuesto de las superficies 1 y 2, que se obtiene como:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^n}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^n}{E_2} \quad (1.8)$$

donde  $\nu$  es el módulo de Poisson. Para la mayoría de los casos  $\psi > 1$  y la deformación plástica de las rugosidades es inevitable.

#### 1.2.4. DESLIZAMIENTO Y ORIGEN DE LA FRICCIÓN.

- Teoría de la adhesión.

El esfuerzo cortante en la unión formada entre dos superficies muy lisas se acerca al cortante  $k$  de la pieza de trabajo; así, si la pieza se mueve con respecto al dado, la unión tiene que ser cortada con una fuerza:

$$F = A_r k \quad (1.9)$$

y el coeficiente de fricción puede ser definido como:

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{A_r k}{A_r H} = \frac{k}{H} \quad (1.10)$$

Esta simple teoría de la adhesión de la fricción, se debe a Bowden y Tabor [1] y toma en cuenta las dos leyes empíricas de la fricción.

La tabla 1.1 muestra las principales hipótesis sobre fricción seca. Como se puede ver, Bowden y Tabor calculan la fuerza de fricción de la siguiente forma:

$$F = A_r \tau_c + A_c p_e \quad (1.11)$$

donde  $A_r$  es el área real de contacto,  $\tau_c$  el esfuerzo cortante para las juntas adhesivas,  $A_c$  el área de corte transversal y  $p_e$  la resistencia del material a ser extruido.

TABLA 1.1. TEORIAS SOBRE FRICCION SECA

GRUPO DE TEORIAS	CREADOR DE LA TEORIA	FORMULAS PRINCIPALES	COMENTARIOS
TEORIAS MECANICAS	AMONTONS COULOMB	$T = \mu N$  $T = A + \mu N$	TEORIAS QUE SE RELACIONAN SOLO A LAS RUGOSIDADES DE LA SUPERFICIE EL COEFICIENTE NO DEPENDE DE N Y A NO DEPENDE DEL AREA DE CONTACTO REAL.
	BOWDEN	$T = A_r \tau_c + A_c P_e$	TEORIA DE LA CREACION Y EL ROMPIAMIENTO DE LAS CONEXIONES. LA FUERZA DE FRICCION ES LA SUMA DE RESISTENCIA DEL CORTE DE JUNTURAS ADHESIVAS Y LA RESISTENCIA DEL EMPUJE AL MATERIAL DEFORMADO PLASTICAMENTE
TEORIAS MOLECULARES	TOWLISON	$\mu = E / n p x_c$	LA RESISTENCIA A LA FRICCION VIENE DE LA RESISTENCIA DE ATRACCION MOLECULAR
	DIETRIAGIN	$T = \mu (N + N_0)$ $N_0 = P_0 A_r$	EXPLICA SOLO LA INFLUENCIA DE RUGOSIDADES MOLECULARES
TEORIA MECANICO-MOLECULAR	KRAGIELSKI	$\mu = T / N$  $\mu = \alpha A_r / N + \beta$	LA FRICCION ES LA MISMA DE LAS RESISTENCIAS DE RUGOSIDADES, DE CONEXIONES ADHESIVAS Y DE ATRACCION MOLECULAR.

Para explicar el surgimiento de fuerzas de fricción mucho más elevadas de las que se observan normalmente con superficies limpias, se debe considerar que, en el punto donde se inicia el deslizamiento, la unión está sujeta a un estado de esfuerzos combinado que consiste de una presión normal y de un esfuerzo cortante. La presión que se requiere para el flujo plástico cae si se impone un estado de esfuerzos combinado. De una forma similar se puede mostrar que la unión cederá a una presión normal mucho más baja (menos de  $3 \sigma_r$ ), y por tanto el área real de contacto crecerá hasta que la carga pueda ser soportada. Este crecimiento en la juntura incrementa el área de unión a ser cortada y por tanto la fuerza de fricción, llevando esto a valores elevados de  $\mu$ .

- Capas contaminantes.

En presencia de una capa contaminante, la soldadura de rugosidades es prevenida por un elemento contaminante de esfuerzo cortante  $\tau_c$ . De aquí que:

$$\tau_c = m_c k \quad (1.12)$$

donde  $m_c$  se relaciona al área real de contacto  $A_r$ . por los argumentos de crecimiento de las uniones [2] se puede demostrar que:

$$\mu = \left[ \frac{m_c^2}{\alpha (1 - m_c^2)} \right]^{1/2} \quad (1.13)$$

donde  $\alpha = (H/k)^2$  para una unión tridimensional, y alrededor de nueve según la experimentación. Se toma  $m_c=1$  para superficies muy limpias, pero si  $m_c < 0.2$ :

$$\mu = \left[ \frac{m_c^2}{\alpha} \right]^{1/2} = \left[ \frac{m_c^2 k^2}{H^2} \right]^{1/2} = \frac{\tau_c}{H} \quad (1.14)$$

Esto nos muestra que la soldadura en frío no es esencial para explicar la fricción, ni lo es el crecimiento

de las uniones cuando  $m_c$  es pequeña, ya que la fricción es rígida por el esfuerzo cortante de la capa contaminante.

- Interacción de las rugosidades.

En el párrafo anterior se asume que la unión entre el dado y la pieza es cortada en un plano paralelo a la dirección del deslizamiento. En realidad las rugosidades se encuentran unas a otras cuando se deslizan y ocurre la deformación plástica de la rugosidad suave (pieza). Cuando la pendiente de la rugosidad llega a cero se obtienen resultados iguales a los de la teoría de crecimiento de uniones. Una rugosidad grande en la superficie del dado se abre paso entre el material de la pieza y contribuye a la fuerza de fricción.

- Teoría molecular y energía superficial:

Todavía existen más fuentes de fricción. El contacto íntimo une al dado y a la pieza lo suficiente para generar fuerzas interatómicas, aún cuando no se dé la soldadura en frío. Kragelski [3] considera que la fricción tiene fuentes mecánicas y moleculares.

- Pieza deformada plásticamente.

A medida que la deformación aumenta, más y más rugosidades hacen contacto, hasta que su deformación no puede ser vista aisladamente; al contrario, las interacciones entre las zonas de deformación se deben tomar en cuenta.

Se ha visto que una rugosidad aislada cede a aproximadamente  $3 \sigma$ , ya que el sustrato no deformable previene su deformación libre. A medida que el contacto entre rugosidades aumenta, los campos de esfuerzos actuando en ellas empiezan a interactuar y comienza el flujo plástico en el sustrato. La presión requerida para deformar las



rugosidades cae, éstas últimas se aplanan y los valles entre ellas se levantan.

El área de contacto  $A_R$  aumenta rápidamente y con ella la fuerza de fricción. Finalmente  $A_R$  se aproxima a  $A_a$  de manera asintótica. Cuando se logra un contacto de 100%:

$$\mu = \kappa / p \quad (1.15)$$

Se debe hacer notar que la presión requerida para deformar las rugosidades cae y que  $A_R$  aumenta rápidamente cuando la pieza de trabajo está hecha para ceder ante esfuerzos de tensión.

Asumiendo que la superficie de la pieza de trabajo consiste en rugosidades puntiagudas e idénticas que se deforman con una herramienta de superficie plana, Wanheim y Bay [4] mostraron que según la teoría de las líneas de deslizamiento, el área real de contacto (expresada como una fracción  $c=A_R/A_a$ ) depende tanto de la presión de la interfase como del esfuerzo cortante en la zona real de contacto  $m_c$ . Si  $\tau_c = m_c k$ , entonces el esfuerzo por fricción en el área aparente de contacto es:

$$\tau_f = m_c c k \quad (1.16)$$

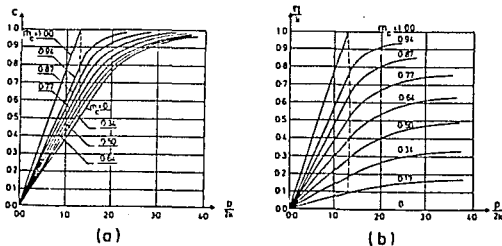
Inicialmente el área calculada de contacto aumenta linealmente con la presión de la interfase  $p$ . Ya que también aumenta linealmente con  $p$ :

$$\mu = \frac{\tau_c}{p} = \frac{m_c c k}{p} \quad (1.17)$$

y encontramos que  $\mu$  es constante como en la fricción de Coulomb. A presiones más altas ( $p/2k > 1.3$ ) el incremento de  $c$  no es lineal y el valor límite de  $c=1$  se alcanza solo gradualmente. Correspondientemente, el esfuerzo cortante en la interfase  $\tau_c$  también alcanza un valor límite igual a  $m_c k$ . Debido a esto, el coeficiente de fricción se vuelve

dependiente de la fricción. De cualquier forma, con muy buena lubricación y  $m_c < 0.2$ , el valor de  $\tau$ , aumenta aproximadamente de forma lineal con  $p$  y la fricción de Coulomb se mantiene.

FIG. 1.7. Efectos de la presión en la interfase en (a) area real de contacto y (b) esfuerzo cortante en la interfase



Muchas superficies de dados, intensionalmente o por desgaste, se dañan al grado que no pueden ser consideradas planas. Entonces las rugosidades del material duro del dado encuentran y deforman plásticamente las rugosidades de la pieza, aumentando la fricción, penetrando las capas de la superficie y posiblemente causando adhesión y desgaste. Es común que se encuentre de manera experimental que la fricción aumenta con la rugosidad de la superficie, al menos bajo condiciones de adhesión leve.

### 1.3 DESGASTE

La deformación se efectuaría sin desgaste si el dado y la pieza de trabajo estuvieran separados por una capa gruesa de lubricante y ninguna partícula externa estuviera presente. Sin embargo, al ocurrir el deslizamiento algunos

de los productos de las reacciones entre los metales son removidos y, se vuelve inevitable la pérdida progresiva de material (desgaste). Uno de los principales fines de los lubricantes es el evitar el desgaste excesivo.

Es difícil comprender el desgaste en maquinaria donde ocurre un contacto repetitivo sobre las mismas superficies, pero en el trabajo en metales, solo una de las partes (el dado o herramienta) sufre un contacto repetitivo, y la otra parte (pieza de trabajo) se mueve fuera de la zona de contacto. Aún cuando la superficie de la pieza es contactada repetidamente en el curso de un proceso, la superficie que se mueve a la zona de contacto es muy variable. Una deformación plástica elevada y la extensión de la superficie agravan los problemas potenciales de adhesión y también afectan la influencia de cualquier partícula desgastante que pueda estar presente; las partículas más gruesas de la capa lubricante pueden ser presionadas dentro de la superficie y ser neutralizadas, o si son duras y filosas, sobresalir en un ángulo inadecuado y actuar como herramientas cortantes insertadas en un substrato plástico.

Es muy difícil y casi imposible acelerar el proceso de desgaste y prever una situación de producción bien controlada; de aquí que la simulación en laboratorio sea tan difícil. Las observaciones de una producción a escala completa están influenciadas por variables incidentales y pueden ser engañosas. Por lo tanto, la racionalización del desgaste en el trabajo en metales se apoya en gran parte en los conocimientos obtenidos de las situaciones que sufren las maquinarias.

La compleja naturaleza del desgaste ha llevado a intentos para introducir orden al caos mediante esquemas de clasificación, aún cuando ningún esquema puede ser perfecto. Una aproximación útil es la de Burwell [5] que asume que, al menos en algunas situaciones, solo un tipo de mecanismo de desgaste domina. Otro sistema está basado en la morfología de las partículas desgastantes.

### 1.3.1. DESGASTE ADHESIVO.

En el trabajo en metales las superficies del dado y la pieza de trabajo siempre están contaminadas y frecuentemente lubricadas; aún más, las superficies vírgenes están parcialmente expuestas debido a la generación de nuevas superficies y el surgimiento de rugosidades a través de las capas superficiales. Dependiendo de la afinidad entre los materiales, la adhesión puede llevar al soldado en frío y, con esto, al movimiento relativo (deslizamiento o separación de la superficie) y a la destrucción de las uniones por uno de varios mecanismos.

1. Si la unión es tan fuerte o más que el material del dado (como por la formación de compuestos intermetálicos), la unión se separa ya sea en el dado o en la pieza. El desgaste del dado se vuelve muy alto, particularmente cuando altas temperaturas de la interfase promueven la difusión de elementos aleantes del material del dado a la pieza reduciendo la resistencia del dado.

2. Si la unión es más fuerte que la pieza de trabajo, la separación ocurre en la pieza con poco efecto en el dado. En contactos subsecuentes con la superficie de la pieza, existen varias posibilidades:

a. Crecimiento del desgaste por acumulación del material hasta formar partículas desgastantes.

b. La partícula separada se transfiere a la pieza, luego al dado y luego de nuevo a la pieza hasta que el fragmento deja una zona deformada en la pieza.

c. La zona desgastada se cubre de lubricante, logrando un equilibrio dinámico entre la transferencia de material y su remoción.

d. Si una partícula formada no se remueve, se vuelve una rugosidad dura, llevando esto a una fricción excesiva o acabado inaceptable en la pieza.

3. Si la unión es más débil que el material de la pieza, la separación ocurre en la interfase y no se suscita el desgaste adhesivo.

### 1.3.2. DESGASTE ABRASIVO.

El desgaste abrasivo es la remoción de material por una rugosidad dura (desgaste entre dos cuerpos) o una partícula interpuesta entre dos superficies (desgaste entre tres cuerpos).

Para que se forme una partícula desgastante se deben cumplir una serie de condiciones:

1. La experimentación ha mostrado que la dureza Vickers de la partícula debe ser al menos 1.5 veces más grande que la de la superficie que sufrirá la abrasión. En el trabajo en metales, el dado casi siempre satisface este criterio. Esto no significa que solamente la pieza se desgaste; al contrario, la mayor preocupación en el desgaste abrasivo es la del dado.

Existen varias fuentes de partículas duras. Se pueden encontrar óxidos en la superficie de la pieza de trabajo y muchos de los materiales de las piezas, especialmente las aleaciones endurecidas por precipitación, contienen partículas intermetálicas duras en su estructura; por otra parte, las partículas intermetálicas también se pueden formar por difusión.

2. El daño que pueda causar una partícula dura depende del tamaño de la partícula, su distribución y su orientación relativa respecto a la interfase.

- a. Cuando la partícula dura es redonda o plana pero orientada con un ángulo de ataque pequeño (ángulo de inclinación respecto a la superficie) y la profundidad de penetración es pequeña, solo se logra deformación elástica en el material suave.

- b. Con mayor profundidad de penetración, las mismas partículas escarban en el material. Si este material es de baja ductilidad, el material removido se convierte en una partícula de desgaste. Si el material es dúctil, el material desplazado es empujado a las orillas y removido por contactos subsecuentes.

c. Cuando el ángulo de ataque es bastante grande, la acción cortante resulta en remoción instantánea de material.

d. A velocidades de deslizamiento muy altas, la energía generada en zonas de contacto muy pequeñas puede llevar a la fusión localizada y entonces, el material es expulsado en forma de glóbulos fundidos.

e. Los efectos a largo plazo dependen de la geometría del proceso. Si las rebabas se acumulan, puede ocurrir el desgaste entre tres cuerpos.

3. Los óxidos y compuestos intermetálicos pueden ser tan duros como los constituyentes del herramental, de ahí que, el desgaste abrasivo se convierta en una competencia entre el dado y la pieza de trabajo. Las partículas incrustadas en la superficie de la pieza se vuelven particularmente dañinas cuando reciben un soporte fuerte de la matriz, que es casi tan dura como la partícula misma.

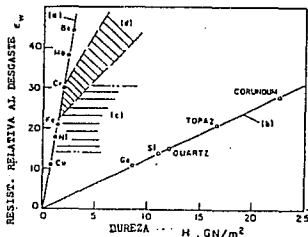
4. Debido a que una superficie solo es dañada si es más suave que el abrasivo, no es de sorprenderse que la resistencia al desgaste sea función de la dureza (figura 1.8). Se debe tomar la dureza para las condiciones que prevalecen en la interfase; de aquí que los cambios de fase que ocurren durante el deslizamiento sean de gran ayuda. La transformación de austenita retenida a martensita es particularmente efectiva en aceros. Un leve calentamiento en el deslizamiento fortalece la martensita por la difusión de carbono a las dislocaciones.

La difusión de elementos aleantes del dado a la pieza debilita al dado y provoca un rápido desgaste (a veces llamado desgaste difusivo), que es una de las principales causas de falla en herramientas de acero rápido.

5. Para la misma dureza, las cerámicas tienen una menor resistencia que los metales o aleaciones, debido a su baja resistencia al corte y su mayor fragilidad. Sin embargo, son mucho más duras que los metales.

6. La erosión es una forma de desgaste entre dos cuerpos en donde la partícula abrasiva recibe su energía de la velocidad del fluido que la lleva.

FIG. 1.8. Resistencia al desgaste de  
(a) metales puros, (b) cerámicas, (c) metales endurecidos y (d) metales tratados térmicamente



### 1.3.3. DESGASTE POR FATIGA.

Este tipo de desgaste es predominante en maquinaria que sufre cargas cíclicas tales como cilindros para rolado y engranes. Mucha de la investigación de la fatiga por contacto tiene relación directa con el desgaste de dados y herramientas cargadas cíclicamente, tales como dados de forja.

Existe controversia respecto a particularidades en los mecanismos de fatiga, pero en general consiste en los siguientes pasos:

1. Cuando un elemento mecánico bien lubricado es sujeto a cargas de compresión elástica en parte de su superficie, se puede mostrar que se generan esfuerzos cortantes debajo de la superficie.

2. La carga repetida causa la generación de microgrietas, usualmente debajo de la superficie y alrededor de puntos débiles.

3. Con la subsecuente carga y descarga, la microgrieta se propaga, crece, y una vez que llega a un tamaño crítico, cambia su dirección para emerger en la superficie. Esto se llama desgaste por micropitting y ha sido objeto de muchos estudios.

4. El proceso de formación de partículas de desgaste planas por medio de deformación cortante cíclica debido a tracción en la superficie, se llama desgaste por "delaminación".

5. Cuando la carga normal se combina con el deslizamiento, la localización del máximo esfuerzo cortante se mueve hacia la superficie y las grietas por fatiga se originan debido a defectos superficiales. La fatiga superficial se debe normalmente a fatiga en las rugosidades.

6. El desgaste por fatiga entre cuerpos que se contactan de forma normal es llamado "desgaste por impacto".

7. Debido a la similitud de los procesos, el desgaste por fatiga puede ser visto como un problema de mecanismos de fractura.

Para prevenir el desgaste por fatiga se deben evitar los esfuerzos internos y externos y el contacto entre la matriz y partículas de segunda fase. Se han hecho grandes avances en la reducción y eliminación de inclusiones y en el control del tamaño y forma de las partículas de segunda fase. El control del acabado superficial y de los esfuerzos residuales es también importante.

Cuando se trabaja en caliente puede surgir una complicación; al contacto con la pieza caliente, la superficie del dado se calienta repentinamente, resultando ésto en una expansión de la superficie y generando esfuerzos entre el sustrato y la superficie. Si este fenómeno es excesivo puede resultar en un desgaste conocido como "crazing" o "firecracking".



#### 1.3.4. DESGASTE QUIMICO.

El desgaste químico se refiere, no a la pérdida de material debido al ataque químico directo, sino a la pérdida debido a las reacciones triboquímicas. El proceso consiste en tres etapas bien identificadas:

1. Se forma una capa en la superficie del dado debido a reacciones químicas (e.g. oxidación) o triboquímicas.

2. El producto de la reacción es removido mecánicamente en la zona de deformación.

3. La superficie altamente reactiva es recubierta con un producto de reacción si el lubricante o el medio es adecuado. Como todas las reacciones químicas ésta también es acelerada por la temperatura y la presión.

Un contribuidor al desgaste triboquímico es el potencial eléctrico generado en el curso del deslizamiento. Hay muchas explicaciones posibles a este desgaste electroquímico; una fem térmica se puede generar entre materiales distintos, sucediendo entonces una transferencia de electrones entre material y fluido. El camino de la corriente se cierra del dado a la pieza a través del equipo y el lubricante. El efecto acelerado se puede neutralizar por medio de aislamiento o voltaje inverso.

#### 1.3.5. MECANISMOS DE DESGASTE COMBINADOS.

En muchas circunstancias, varios de los mecanismos mencionados anteriormente actúan simultáneamente. De hecho, la separación de los tipos de desgaste puede ser muy difícil, y se han adoptado términos específicos para describir algunos de los mecanismos combinados más comunes. El término scuffing o scoring se refiere al desgaste adhesivo combinado con la abrasión. La remoción de capas protectoras combinado con deformación plástica de las rugosidades y subsecuente formación de uniones adhesivas, son las características de este fenómeno.

El desgaste tribomecánico también tiende a aparecer mezclado con otros tipos, ya que, la oxidación y las

características mecánicas de la capa de óxido determinan la extensión del desgaste adhesivo y abrasivo. La presencia de oxígeno y particularmente de agua afecta al desgaste, aún con deslizamiento lubricado.

Fenómenos más complejos surgen de las reacciones de los metales, algunos de los cuales ceden pequeñas cantidades de hidrógeno, aún bajo desgaste abrasivo extenso. Las interacciones entre materiales en contacto y los lubricantes afectan al desgaste a tal grado, que hacen que la dureza tenga importancia secundaria.

#### 1.3.6. CUANTIFICACION DEL DESGASTE.

En un régimen de lubricación dado, el desgaste frecuentemente alcanza una condición de estado estable y se ve que, el volumen de desgaste  $V$  es proporcional a la distancia  $l$  ó al tiempo  $t$  de deslizamiento. En algunos, pero no en todos los casos, el desgaste también es proporcional a la carga normal  $P$ , inversamente proporcional a la dureza  $H$  del material más suave, e independiente del área aparente de contacto. Por consiguiente:

$$\frac{V}{l} = k \frac{P}{H} \quad (1.18)$$

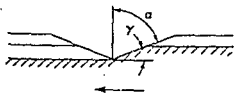
donde  $K$  es alguna constante típica de la situación de desgaste. Su valor puede ir desde  $10^{-9}$  para deslizamiento bien lubricado, hasta la unidad en fricción seca. La mayor dificultad en las teorías sobre desgaste es la interpretación y predicción de  $K$  para los distintos fenómenos.

En el desgaste abrasivo, la formación de rebaba se debe al desprendimiento de material de un cierto volumen. Ya que la carga surge de la mitad predominante de una rugosidad cónica, el semiángulo  $\alpha$  del cono entra en la expresión (figura 1.9):

$$\frac{V}{l} = K \frac{2 P \cot \alpha}{H} \quad (1.19)$$

El valor de K depende de la ductilidad del material, su resistencia a la fractura y el mismo ángulo. Los beneficios de una alta dureza son obvios.

FIG. 1.9. Angulo de ataque en desgaste abrasivo



### 1.3.7. COEFICIENTES DE DESGASTE.

-Desgaste por adhesión.

Para el desgaste tribológico por adhesión Archard [6] supone que las partículas del desgaste son hemiesferas con diámetro "d" igual al diámetro de soldadura y que tienen los mismos tamaños. Cuando n soldaduras existen en el mismo momento, el área de contacto real  $A_r$  es igual a:

$$A_r = n \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \quad (1.20)$$

Si consideramos que la carga normal necesaria para que el material fluya es  $w = A_r \cdot 3\sigma$ , entonces:

$$n = \frac{4A_r}{\pi d^2} = \frac{4w}{3d^2\pi\sigma} \quad (1.21)$$

Si suponemos que todas las soldaduras quedan conectadas por el deslizamiento "d", podemos obtener una fórmula para el

número de soldaduras  $N$  formadas durante el deslizamiento unitario:

$$N = 171 (1/d) = \frac{4}{3} \frac{W}{d^2} \frac{1}{\pi \sigma_u} \quad (1.22)$$

El volumen total de partículas  $\Delta V$  formadas por la distancia  $L$  se puede expresar así:

$$\frac{\Delta V}{\Delta L} = K N \left( \frac{d^3}{12} \right) \quad (1.23)$$

introduciendo el valor de  $N$ :

$$\frac{\Delta V}{\Delta L} = \frac{K W}{9 \sigma_u} \text{ para } V = f(L) \quad dV / dL = kW / 9 \sigma_u \quad (1.24)$$

La integración a lo largo de la distancia  $L_s$  dá el valor volumétrico del desgaste adhesivo:

$$V_{adh} = \frac{K W L_s}{9 \sigma_u} \quad (1.25)$$

Si  $d_{adh}$  es el desgaste medido y  $A_n$  es el área nominal de contacto:

$$d_{adh} = \frac{V_{adh}}{A_n} = \left( \frac{K}{9 \sigma_u} \right) \left( \frac{W}{A_n} \right) L_s \quad (1.26)$$

$$\text{ó } d_{adh} = K_{adh} P_n L_s$$

donde:

$$P_n = \frac{W}{A_n} \quad - \text{ es la presión media nominal y}$$

$$K_{adh} = \frac{K}{9 \sigma_u} \quad - \text{ el coeficiente de desgaste adhesivo.}$$

A continuación se muestra la Tabla 2 con valores de  $K$  para varios materiales que trabajan sin lubricación.

TABLA 1.2. VALORES DE "K"

PAREJA DE MATERIALES	"K"
ZINC SOBRE ZINC	160 E -3
ACERO (POCO CARBON) SOBRE ACERO (POCO CARBON)	45 E -3
COBRE SOBRE COBRE	32 E -3
ACERO DE ALTA RESIST. SOBRE ACERO DE ALTA RESISTENCIA	21 E -3
COBRE SOBRE ACERO	1.5 E -3
ACERO SOBRE COBRE	0.5 E -3
BAQUELITA SOBRE BAQUELITA	0.02 E -3

Si se toma:

$$k_{adh} = \frac{d_{adh}}{p_m L_o} \quad (1.27)$$

es posible tomar esta razón como constante y calcular el volúmen desgastado por adhesión.

La experimentación muestra que el coeficiente K no se cambia hasta el límite de plasticidad, y arriba de este límite aumenta rápidamente; de ahí que:

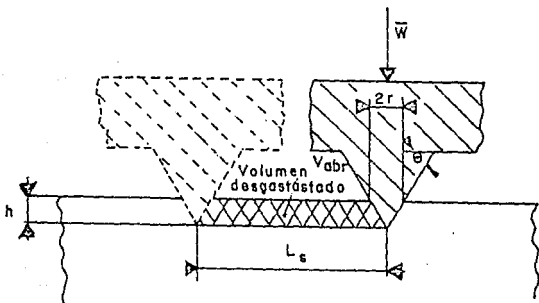
$$d_{adh} = k_{adh} p_m L_o \quad \text{para } p_m < \sigma_u \quad (1.28)$$

Las aplicaciones de las ecuaciones para medir el volumen desgastado son limitadas debido a que, durante el desgaste no actúa un solo tipo de mecanismo.

- Desgaste abrasivo.

La figura 1.10 muestra el modelo para calcular el desgaste abrasivo.

FIG. 1.10. Modelo para desgaste abrasivo



Existe la relación:

$$\frac{W'}{A_{ch}} = 3\sigma_u \quad (1.29)$$

donde:

$A_{ch}$  - área de contacto proyectada sobre la superficie horizontal

$W'$  - carga normal para rugosidad única

$3\sigma_u$  - límite de plasticidad

Cuando el área de contacto tiene forma redonda con radio  $r$

$$w' = (3 \sigma_u) (\pi r^2) \quad (1.30)$$

el área de corte transversal de la ranura, se expresa así:

$$A_{ct} = r h = r^2 \tan \theta \quad (1.31)$$

y el volumen total de desgaste  $V_{abr}$  obtenido a lo largo de la distancia  $L_s$  es igual a:

$$V_{abr} = A_{ct} L_s = L_s r^2 \tan \theta \quad (1.32)$$

Sustituyendo el valor de  $r^2$  con la fórmula 1.30:

$$V_{abr} = \frac{w L_s (\tan \theta)_m}{3 \pi \sigma_u} \quad (1.33)$$

y análogicamente para todas las rugosidades:

$$V_{abr} = \frac{w' L_s (\tan \theta)_m}{3 \pi \sigma_u} \quad (1.34)$$

donde:

- $w$  - carga normal
- $(\tan \theta)_m$  - valor medio para todas las rugosidades
- $\sigma_u$  - esfuerzo uniaxial del material mas blando
- $L_s$  - distancia total de deslizamiento.

Esta última fórmula se parece a la obtenida para el desgaste adhesivo, en donde  $K/3$  se sustituye por  $(\tan \theta)_m$ .

A continuación se muestra una tabla con valores para esta constante.

TABLA 1.3. VALORES DE  $(\tan \theta)_m / \pi$

MATERIALES	TIPO DE DESGASTE	TAMAÑO DE LA PARTICULA (MICRAS)	$3(\tan \theta)_m / \pi$
ACERO	SIN LAS PARTICULAR EN LA REGION DEL CONTACTO	260	0.008
ACERO	CON "	150	0.006
ACERO	CON "	80	0.0045
BRONCE	CON "	70	0.0016

$$d_{abr} = \frac{V_{abr}}{A_n} = \frac{(\tan \theta)_m}{3\pi \sigma_c} \left( \frac{w}{A_n} \right) L \quad (1.35)$$

$$\text{ó } d_{abr} = K_{abr} p_m L_s$$

donde:

$p_m = w / A_n$  - presión media en contacto

$L_s$  - distancia de deslizamiento

$$K_{abr} = \frac{(\tan \theta)_m}{3\pi \sigma_c} \quad \text{- coeficiente de desgaste abrasivo,}$$

el cual depende de las características de rugosidad superficial del material más blando y de su dureza.



A continuación la tabla 4 muestra algunos valores para esta K:

TABLA 1.4. VALORES DE BHN/(E X 10<sup>-6</sup>)  
PARA ALGUNOS MATERIALES

MATERIALES	CONDICIONES	BHN/(E x 10 <sup>-6</sup> )
AI 2 0 3		143
HIERRO FUNDIDO	DURO	33
CARBURO DE TUNGT.	9% CO	22
ACERO	DURO	21
TITANIO	DURO	17
ALEAC. DE ALUMINIO	DURO	11
COBRE	SUAVE	25
PLATA	PURO	2.3
ALUMINIO	PURO	2.0
PLOMO	PURO	2.0
ESTANO	PURO	0.7

De las fórmulas anteriores es fácil entender los beneficios de una alta dureza al tratar de prevenir el desgaste abrasivo.

**CAPITULO II**  
**EFFECTOS DE LA FRICCIÓN Y EL DESGASTE**  
**EN DADOS PARA FORJA**

La forja en todas sus formas es un proceso por lotes, tanto desde el punto de vista mecánico como tribológico. Nunca se logran condiciones de estado estable; al momento en que la prensa o martillo golpea, el lubricante es expuesto continuamente a cambios de presión y velocidad.

Los residuos de lubricante y los productos del desgaste también cambian continuamente, aún cuando se puede lograr un equilibrio dinámico con control adecuado. La ausencia de condiciones de estado estable lleva a grandes dificultades para realizar un análisis sistemático, aún cuando el proceso es bastante simple.

**2.1 FORJA EN DADOS PARA**  
**IMPRESION**

La técnica que solía ser llamada forja cerrada o drop forging ahora es designada de una forma más precisa como forja de impresión, debido a que los dos dados que actúan definen solo parte de la geometría de la forja y el material

fluye libremente hacia afuera a lo largo de la línea de partición hacia el cordón de rebaba.

#### 2.1.1. LLENADO DEL DADO

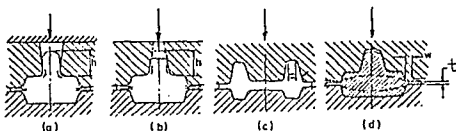
La presión necesaria para llenar la cavidad del dado debe ser generada por la resistencia al flujo hacia el cordón de rebaba. Se puede considerar que el cordón actúa de tal forma que, la presión en el punto de entrada del dado está regida por la relación entre el alto y el ancho del cordón y por la fricción. De ahí que, una alta fricción en el cordón es deseable, aún cuando se requiera baja fricción en el dado. Estos requerimientos contradictorios no son fácilmente conciliados, aunque la situación es sobrellevada de alguna manera por el desgaste que sufre el lubricante en el cordón debido al intenso frotamiento.

La resistencia que se desarrolla en el cordón de rebaba se ve claramente en la figura 2.1 a. La altura de la parte extruida aumenta conforme aumenta la fricción en el cordón, aunque también esta influida por la geometría de la operación: un tocho con una relación alto-diámetro más grande dá un llenado más profundo. Este proceso se ha sugerido para determinar la fricción.

Los dados de impresión convencionales son de distintas formas. Para facilitar la remoción de la pieza de la cavidad, es usual el forjar con una abertura (figura 2.1 b), cuyo ángulo depende del material de la pieza, su configuración y el equipo.

Mientras más grande sea la diferencia de temperatura entre la pieza y el dado, y el tiempo que se tarde la remoción de la pieza, más son las posibilidades de que la pieza se encoja en sus diámetros, lo que provoca el uso de ángulos más grandes en las aberturas cónicas (figura 2.1 c). Con expulsores manejados mecánicamente o bajo condiciones isotérmicas se pueden minimizar las aberturas y los ángulos.

FIG.2.1. Proceso de forja simplificado usado en el estudio de lubricantes



La creencia de que la abertura ayuda al llenado del dado fue desmentida por Wallace y Schey [7]. El forjar con una abertura cónica es equivalente a extruir con un conducto angosto y cónico en donde crecen las fuerzas de fricción, y especialmente bajo condiciones no isotérmicas, rápidamente se llega a la fricción adhesiva.

Esto se cumple aún en forjas de figuras simples, el abarrilamiento causa que la pieza toque al dado y quede inmóvil lejos de las esquinas, lo que provoca que el llenado de la cavidad se dé por flujo de la masa interna del material. La formación del cordón de rebaba ayuda poco, por lo menos inicialmente, y las presiones necesarias para llenar los últimos detalles del dado solo se logran cuando el cordón es muy delgado. En la forja en caliente los efectos de la fricción pueden ser aumentados enfriando el cordón, lo que resulta, sin embargo, en fuerzas de forja muy grandes, altas presiones en el cordón y corta vida del dado. De aquí que el material excedente se acomode en la cavidad del cordón (figura 2.1 d), permitiendo esto, una relación  $w/t$  de menos de 5.

Es casi imposible obtener un lubricante que provoque una fricción alta en el área del cordón y baja fricción en la cavidad; por consiguiente, la lubricación tiene una importancia secundaria con respecto a la temperatura del dado en lo que se refiere al llenado. La lubricación solo es verdaderamente útil cuando el tocho es más pequeño que el diámetro de la cavidad, de tal forma, que la expansión de

las caras más grandes, obtenida con lubricante, facilite el llenado.

### 2.1.2. FORJA Y FUERZAS DE EXPULSION.

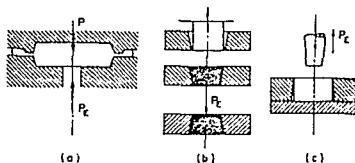
Las fuerzas que se pueden esperar en una forja se pueden calcular de una forma relativamente simple, siempre y cuando se acepten una serie de simplificaciones. El flujo puede ser visualizado como si estuviera concentrado en las zonas cercanas a la línea de partición y algunos factores constantes como  $\sigma_m$  se pueden asumir para el cordón, y, de la presión desarrollada a la entrada del cordón, se puede obtener una presión de operación para la cavidad. Los efectos de la fricción se pueden evaluar en base a las mediciones de la fuerza total requerida para una forja dada. Esta técnica fue usada por Tolkien [8], quien forjó un disco plano y logró el llenado del dado principalmente por el esparcimiento de las caras del disco. Por lo tanto, la fuerza total de la forja ( $p$ ) se tomó como un indicador de la fricción deslizante.

La fácil remoción de la pieza de trabajo de la cavidad del dado es un prerequisite para la producción en lotes. Las fuerzas requeridas para expulsar una pieza forjada de la cavidad, reflejan la fricción y adhesión entre el dado y la pieza luego de que se ha logrado la conformidad entre las dos superficies a través de la deformación plástica.

Tolkien tomó la fuerza  $P_E$  requerida para expulsar la pieza como una medida de la unión pieza-dado (figura 2.2); y así como él, otros investigadores diseñaron métodos para medir esta fuerza.

Las paredes de las cavidades tienden a formar rugosidades debido al desgaste; de aquí que la fuerza de expulsión pueda ser tomada, también, como medida del desgaste del dado.

FIG.2.2. Técnica para probar la acción de los lubricantes de forja



## 2.2 FORJA CERRADA Y EXTRUSION

En la forja cerrada, los elementos del dado encierran completamente a la pieza de trabajo al final del golpe. Otras operaciones también caen dentro del término, sobre todo aquellas en donde una parte de la pieza no está encerrada, de tal forma que se forme un claro en caso de sobrellenado.

### 2.2.1. PROCESOS

La forja cerrada es, en realidad, un ejemplo de extrusión directa o indirecta. Se debe recordar que la extrusión directa siempre implica el deslizamiento del tocho contra las paredes del contenedor, aún cuando solo se extruya una parte y la fricción evite el flujo del material. En contraste con esto, en la extrusión directa/indirecta, al actuar la fricción en la dirección del flujo del material, ayuda a la extrusión. Por consiguiente, la fuerza requerida para efectuar las operaciones de forma combinada, es menor que para cualquiera de ellas por separado, y el balance entre el flujo de material hacia adelante y hacia atrás es muy sensible a la fricción.

En la forja cerrada las condiciones de estado estable rara vez se alcanzan y el desarrollo y deterioro de la capa

de lubricante durante las etapas de transición se vuelve de importancia crítica.

#### 2.2.2. PRACTICAS.

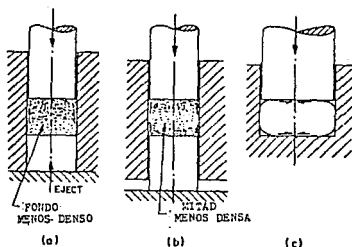
Los procesos que se realizan en frío son designados como forja en frío, formado en frío, extrusión fría o, en algunos casos extrusión por impacto. Las parte son formadas normalmente sin usar aberturas, y los expulsores se usan rutinariamente. Un requerimiento importante es que el lubricante debe proteger las superficies ya formadas durante el deslizamiento o la expulsión de la parte terminada. Muy frecuentemente el deterioro de lubricante y el dado ocurre, no durante la forja, sino durante la expulsión.

Las presiones del punzón y del dado se pueden reducir y/o realizar figuras de mayor complejidad si se entibia el material, aún cuando los problemas de lubricación crecen en gran medida.

El trabajo en caliente es practicado ampliamente en forjas horizontales, en donde el dado se reparte a lo largo de un plano axial, de tal manera que las figuras (desde el punto de vista de la dirección del punzón), se pueden formar. La combinación de la extrusión y la forja también es posible en prensas mecánicas, aunque existen ciertas limitaciones.

Una forma especializada de forja cerrada es la compactación de polvos metalúrgicos y la forja fría o caliente de elementos sinterizados. Generalmente la menor fricción entre las partículas ayuda a la consolidación, y la menor fricción en el dado es deseable por las mismas razones que en la forja de cuerpos sólidos.

FIG. 2.3. Compactación de polvos con (a) un contenedor estacionario y (b) un contenedor flotante, y (c) forjado de una preforma cilíndrica.



Al momento de la compactación en una prensa de simple efecto (figura 2.3 a), la presión ejercida en la parte inferior del golpe se reduce debido a la fricción en las paredes del contenedor, y el cambio de presión entre la parte superior e inferior del golpe, puede ser utilizado como evaluación del lubricante. Si la fricción no se reduce lo suficiente, es preferible que el contenedor flote, y que de esta manera, encuentre su punto de mínima energía (figura 2.3 b). Ocasionalmente la fricción puede ser útil cuando el abarrilamiento resulta en un soporte de las superficies laterales y supresión de las cuarteaduras (figura 2.3 c).

Por otra parte, se debe señalar que los problemas asociados con alta fricción y consecuentemente con presiones altas en el dado, solo pueden ser evitados totalmente cambiando el modo de la deformación. Esto normalmente implica reemplazar la aproximación usual a los dados con un movimiento rotatorio. La fricción deslizante cambia con el



contacto rodante, y la geometría del proceso puede volverse muy favorable; aún cuando el peligro de deformaciones no homogéneas se incrementa y los dados pueden necesitar formas mucho más complejas.

### 2.3. LUBRICACION Y DESGASTE DE LA FORJA EN CALIENTE.

La forja en caliente es el proceso metalúrgico más antiguo que se conoce; aún así, es también el proceso para el cual se han hecho menos estudios sobre lubricación. La razón es que, al momento de forjar el acero, las nuevas superficies generadas durante la deformación están expuestas al aire, y por lo tanto se reoxidan antes de hacer contacto con el dado. también hemos visto que el llenado del dado no es necesariamente ayudado por la lubricación; de ahí que, fue solo con el surgimiento de la hidráulica, y particularmente con el trabajo en prensas mecánicas, y con la introducción de materiales ligeros y materiales difíciles de forjar, que la lubricación se convirtió en una preocupación importante.

#### 2.3.1. MECANISMOS DE LUBRICACION.

Las piezas de trabajo son calentadas a las temperaturas típicas de operación (Tabla 2.1), pero los dados normalmente se encuentran substancialmente más fríos. Por lo tanto, un lubricante no solo debe asegurar la separación dado-pieza y la baja fricción, sino preferiblemente, también debe actuar como un aislante térmico. Un excesivo calentamiento del dado puede llevar a daños y desgaste, provocando que las altas temperaturas en la interfase limiten severamente la elección del lubricante.

Table 2.1. Typical hot working temperatures for various metals and alloys

Compiled primarily from *Metals Handbook*, 9th Ed., Vol 1 (1978), Vol 2 (1979) and Vol 3 (1980), ASM, Metals Park, OH.

Metal or alloy	Temperature, C	Metal or alloy	Temperature, C
Steels:		2024	360-450
1008	900-1250	5052	300-510
1045	<1150	7075	260-450
Tool steels:		Mg-base:	
D2 (1.5C-12Cr-1Mo)	900-1080	Mg-1Mn	290-540
H13 (0.4C-5Cr-1.5Mo-1V)	900-1150	Be	650-1100
Stainless steels:		Zr	600-1000
302 (18Cr-9Ni)	930-1200	Ti and Ti-base:	
410 (13Cr)	870-1150	Ti (99%)	760-980
Ni and Ni-base:		Ti-6Al-4V	920-1100
Ni	650-1230	Sn	20-100
Hastelloy X	1000-1150	Pb	20-200
Cu and Cu-base:		Zn	120-275
Cu	750-950	W	1600-1900
Cartridge brass (30Zn)	725-850	Mo-base:	
Muntz metal (40Zn)	625-800	TZM (0.5Ti)	1300-1800
Leaded brass (39Zn-1Pb)	625-800	Nb	850-1200
Phosphor bronze (5Sn)	540-560	Ta	500-1100
Al bronze (5Al)	815-870	U	750-875
Al and Al-base:			
1100 Al	250-550		

### 2.3.1.1. Lubricantes de capa sólida.

Los lubricantes de capa sólida que se usan en la forja en caliente normalmente contienen grafito (o para temperaturas menores  $\text{MoS}_2$ ). Los lubricantes solo se aplican a la superficie del dado ya que serían destruidos al calentar la pieza de trabajo, aún cuando el mismo dado es precalentado o llega a una temperatura de estado estable durante la forja. Anteriormente se preferían los aceites o grasas, pero las consideraciones ecológicas se han inclinado por los lubricantes acuosos.

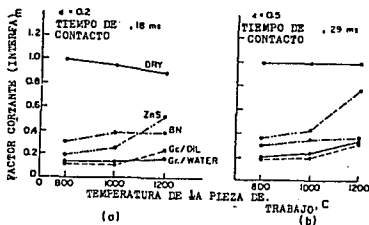
Se deben considerar una serie de efectos al evaluar un lubricante de capa sólida:

#### 1. Efecto de la temperatura.

El deterioro de un lubricante y la oxidación son funciones del tiempo de contacto, temperatura del dado y la pieza, deformación de la superficie y deslizamiento. Para un

tiempo de contacto dado los lubricantes fallan a diferentes temperaturas (figura 2.4).

FIG. 2.4. Fricción en forja en caliente de anillos de acero con lubricante seco



## 2. Efectos de la transferencia de calor.

Uno de los factores que crea confusión es el enfriamiento de la pieza de trabajo al tocar la superficie del dado; esto restringe la deformación tanto como lo hace la fricción, y también afecta a los esfuerzos en la interfase. Las relaciones no son directas, ya que los óxidos, que son aisladores de calor, interactúan con el lubricante para determinar la velocidad de la transferencia de calor.

La transferencia de calor también es función del tiempo de contacto y por ende, de la velocidad de la forja. El gradiente de temperatura aumenta con la velocidad y se estima que la superficie del dado alcanza 900 C para un martillo y 800 C para una prensa mecánica durante el forjado de un acero a 1040 C.

Menores velocidades de transferencia de calor no significan, necesariamente, menor fricción, y se han obtenido datos conflictivos en cuanto a los efectos del grosor de la capa de óxidos en la fricción. Keung [10]

encontró que la fricción alcanza un mínimo con una capa de 50 micrometros, llega a un máximo intermedio a 150 micrometros y declina después de los 250 micrometros.

### 3. Efectos de la velocidad de forja.

Al incrementar la velocidad de la forja, varios efectos se suscitan simultaneamente:

- a. El esfuerzo de fluencia aumenta debido al alto orden de esfuerzos, pero decrece sí mucho del calor generado es retenido.
- b. Se reduce el tiempo de contacto y el enfriamiento.
- c. Se reduce el tiempo en que el lubricante está expuesto a altas temperaturas.

La combinación de estos efectos generalmente reduce la fricción a velocidades altas. Esto se observa aún con piezas de acero no lubricadas y oxidadas. La razón para esto todavía no es clara, aunque Wallace y Schay [10] fueron capaces de mostrar que no se debe, simplemente, a que existe menos enfriamiento. Algunos autores como Keung [9] se lo atribuyen a la formación de un cojín de vapor.

### 4. Efecto de la geometría y temperatura del dado.

La fricción baja a altas velocidades de forja no necesariamente significa menores fuerzas de forja, y al juzgar la efectividad de un lubricante, se debe tener en cuenta la geometría de la forja.

- a. En la forja libre la variable predominante es la expansión de las caras.
- b. En la forja cerrada la mayor deformación se dá en la extrusión hacia un conducto que se angosta.
- c. En la forja de impresión la extrusión se combina con la forja libre y la expresión lateral (cordón de rebaba).

En cuanto a la temperatura del dado:

- a. Altas temperaturas del dado resultan en menos enfriamiento y facilitan el flujo de material.
- b. Si la temperatura en la interfase provoca la degradación del lubricante, el deslizamiento en la interfase decrece.

#### 5. Efecto del método de aplicación.

Aún el mejor lubricante puede fallar si es depositado en una forma discontinua; al mismo tiempo, si la capa protectora es demasiado gruesa puede provocar acumulación de lubricante, forjas no llenadas y mala calidad superficial. De aquí que un depósito controlado sea esencial.

#### 6. Efectos de la fuerza de expulsión.

Las presiones generadas por componentes gaseosas del lubricante ayudan a remover la forja de la cavidad, así como una serie de fenómenos pueden suscitarse al momento de expulsar la pieza. Si la pieza está muy apretada puede deformarse al momento de ser expulsada.

#### 2.3.1.2. Lubricantes de capa gruesa.

A la temperatura de forja en caliente, solo pueden ser usados los lubricantes de vidrio líquido o sustancias inorgánicas similares, y esto siempre impone algunos requerimientos similares:

- a. En la forja isotérmica y no isotérmica, la acumulación de residuos de lubricante en la cavidad puede resultar en forjas sin llenar. Por lo tanto, el lubricante se le debe aplicar solo a la pieza y en forma de una capa delgada.
- b. El lubricante de vidrio líquido debe mojar la pieza para seguir la deformación de la superficie, pero lo debe hacer sin corroer la superficie del dado o la pieza.
- c. Si el vidrio se adhiere al dado, debe permitir la expulsión de la pieza sin fuerza excesiva.

#### 1. Efectos de la geometría del proceso.

Debido a la gran variedad de geometrías que se forjan, la selección y evaluación de un lubricante debe tomar en cuenta:

- a. Para configuraciones planas el grueso de la capa que va a ser aplastada es función de la velocidad de la forja y de la viscosidad del vidrio a la temperatura de la interfase.

b. El efecto hidrodinámico en la compresión del esfuerzo plano revela la capacidad del lubricante para seguir la deformación de la superficie.

c. Para deformaciones más severas es recomendable la extrusión.

## 2. Variables del lubricante.

No existe un acuerdo en cuanto a la viscosidad óptima, pero la mayoría de las investigaciones recomiendan de 10 a 100 Pa·s a la temperatura de la pieza. En la forja no isotérmica la temperatura de la superficie de la pieza tiende a bajar con un buen aislante de capa líquida, pero puede aumentar si la capa se rompe y la alta fricción genera calor.

Para forja isotérmica es más importante relacionar la viscosidad del vidrio con el esfuerzo de fluencia del material.

No existe un mínimo definido para el grueso de la capa, pero los valores típicos están alrededor de 0.05 a 0.1 mm para forja y de 0.1 a 1 mm para extruido de formas. Un grueso excesivo en la capa puede provocar rugosidades en la superficie y formación de cristales en el dado.

### 2.3.2. DESGASTE EN EL DADO.

La vida de un dado para forja en caliente varía de algunos cientos a algunas decenas de miles de partes. Es lo suficientemente corta para haber provocado investigaciones en cuanto a las causas del desgaste, especialmente debido a que los costos de los dados significan alrededor del 15% del costo total de la producción.

#### 1. Métodos para pruebas de desgaste.

Como todos los estudios de desgaste, los estudios de desgaste del dado son muy difíciles de reproducir. Básicamente existen dos aproximaciones posibles:

Primeramente, se pueden someter a estudio estadístico un alto número de observaciones en la producción. No existe duda de la importancia de estos resultados, pero las

variables no controladas pueden hacer que los datos se dispersen. Thomas [11] estimó que después de que se han seguido los efectos sistemáticos, aún queda un 75% de variabilidad que está fuera del control del operario de la forja.

Por otra parte, los experimentos de laboratorio se pueden efectuar bajo condiciones bien controladas, pero deben estar limitados a algunas cuantas miles de piezas.

## 2. Formas de desgaste.

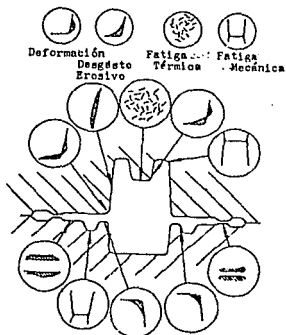
Está prácticamente aceptado que la mayor parte del desgaste en el dado se puede dividir en cuatro mecanismos que, en orden decreciente de incidencia son: abrasión, fractura frágil (brittle fracture), deformación plástica y fatiga térmica.

a. Abrasión: la abrasión se observa en el 70% de todos los dados desgastados y es una forma gradual de desgaste provocada principalmente por óxidos. Sharma y Arrowsmith [12] mostraron que la transferencia de óxidos al dado se puede observar después de los primeros contactos. El desgaste es proporcional a la distancia, lo que lleva a una relación parecida a la fórmula 1.18. La apariencia típica de la superficie es la de estar deslavada. Al forjar una configuración plana con expansión de sus caras, el desgaste se concentra en las zonas de deslizamiento y no en las de atascamiento. Similarmente en los dados de impresión el desgaste se concentra en las partes de la cavidad donde ocurre un fuerte flujo de material (figura 2.5)> la rugosidad inicial de la superficie parece tener muy poco efecto, y la rugosidad alcanza un máximo para una parte dada de la cavidad.

b. Fractura frágil: este tipo de desgaste se encuentra en el 25% de los dados que fallan y es atribuible a la fatiga mecánica. Las fracturas o cuarteaduras en las esquinas son frecuentes, pero también se observan grietas superficiales y escamaciones. La principal causa para la

fractura frágil es el desarrollo de altos esfuerzos locales alrededor de zonas críticas como radios muy cerrados, combinado con la inadecuada ductilidad del material del dado. Esto puede llevar a la destrucción prematura del dado por cuarteaduras.

FIG.2.5. Localización y modos de desgaste en un dado para forja en caliente no isotérmica





c. Deformación plástica: ésta resulta de la sobrecarga de un dado dúctil en puntos de alta presión. Lleva a la deformación de superficies planas del dado, aplastamiento de las protuberancias y apertura de las cavidades, y las cargas repetitivas pueden acabar con la ductilidad del dado.

d. Fatiga térmica: la fatiga térmica se muestra con una apariencia típica granulada en la superficie del dado y se encuentra casi siempre en partes planas del dado.

### 3. Variables que influyen en el desgaste.

la mayoría de los dados fallan debido a distintos mecanismos de desgaste; los efectos de las condiciones del proceso interactúan entre sí, a veces reforzando y otras oponiéndose unas a otras. De cualquier forma se pueden sacar algunas condiciones:

a. La alta temperatura en el dado es destructiva porque la superficie del dado pierde rigidez, lo que lo hace menos resistente a la abrasión y a la deformación plástica. Por lo tanto se encontró que bajo condiciones de fricción seca (sin lubricación) el desgaste es inversamente proporcional a la temperatura del dado.

b. Los óxidos son benéficos como aisladores de calor pero dañinos como fuente principal de la abrasión. Sus efectos dependen de la geometría de la pieza, la cual controla el deslizamiento y atascamiento. La oxidación no controlada es una de las principales causas de falta de confiabilidad en los resultados.

c. La lubricación tiene, tal vez, el efecto más complejo. Al forjar partes planas promueve la expansión de las caras; de ahí que el desgaste avance en gran parte de la superficie, pero con una profundidad menor, llevando esto a una reducción general del desgaste. Se ha encontrado que el desgaste aumenta en el fondo de un dado caliente, pero decrece en la tapa de un dado frío. La aplicación de un lubricante acuoso para enfriar es benéfica al reducir la temperatura del material, pero dañina si la contracción es

excesiva (puede provocar fatiga térmica). De cualquier forma, el factor más importante es el deslizamiento relativo, si la expansión de las caras es la forma de deformación predominante, el desgaste, normalmente es inversamente proporcional a la fricción.

#### 4. Variables de la forja.

Los efectos discutidos en el párrafo anterior son suficientes para explicar la mayoría de las observaciones prácticas.

a. La variable principal es la temperatura del dado. La vida del dado decrece al crecer el peso de la forja, ya que el mayor contenido de calor resulta en un incremento de temperatura.

b. Las interrupciones en el flujo de la producción son dañinas ya que incrementan los choques térmicos.

c. Los tiempos de contacto y de ciclo afectan los gradientes de temperatura del material y de la superficie.

d. La temperatura excesiva es dañina, pero también lo son los cambios de temperatura excesivos. El choque térmico y la fatiga térmica se minimizan al precalentar apropiadamente el dado, preferentemente con una fuente de calor bien distribuida (eléctrico o gas), y no con una fuente localizada de alta temperatura.

e. La configuración del dado junto con la lubricación determinan el flujo de material. Las partes complejas requieren presiones mayores y más golpes para el llenado en un martillo, se quedan pegadas con más facilidad y expulsan más rebaba, lo que resulta en un desgaste pronunciado.

#### 5. Selección de los materiales del dado.

Los aspectos metalúrgicos de los materiales para dados son mucho más complejos, pero de una forma general, se requieren aceros aleados; el cromo y el molibdeno son muy benéficos, especialmente en altas concentraciones. Se ha

encontrado que un acero al 5% de Cr es más resistente al desgaste que uno con 0.55 C, 1.5 Ni, 0.6 Cr y 0.25 Mo.

Se han usado muchas formas de recubrimiento para las superficies:

a. El crear superficies con depósitos soldados se hace rutinariamente para reparar u construir dados. Se han reportado duraciones de 2 a 10 veces mayores.

b. El nitrurado ha probado ser muy útil en insertos para dados; es muy efectivo al reducir la escamación y, en varios tratamientos, es una de las técnicas mejor establecidas. Mejora la resistencia a la abrasión, pero no hace lo mismo con el desgaste por impacto.

c. Las técnicas de recubrimiento por difusión (como el cromado), resultan en vidas de 2 a 3 veces más largas.

d. Se han obtenido resultados favorables con recubrimientos superficiales tales como TiC-TiN y recubrimientos de WC ligados con cobalto y cromo. Se han obtenido buenos resultados en cuanto a la resistencia a la abrasión con un compuesto 70 Ni, 20 Cr, 5 Si, 5 B aplicado como una capa y luego sinterizado.

e. Debido a que los primeros contactos son decisivos en la vida de un dado, el pretratamiento de las superficies es muy usual. La capa de óxido azul que se forma al calentar en presencia de vapor de agua, absorbe y se une al lubricante.

## 2.4 CALCULOS DE FUERZAS PARA FORJA

Definitivamente, todos los cálculos relacionados con las fuerzas necesarias para realizar una forja se basan en el esfuerzo de cedencia del material que se está forjando a la temperatura en que se encuentre. Una de las aproximaciones más simples es determinar la fuerza necesaria para deformar en forja libre un cilindro. Se puede demostrar que para este caso, la presión máxima requerida está dada por:

$$p = \frac{\sigma_o}{Q} (e^Q - 1) \quad (2.1)$$

donde:

$$Q = 2 \mu (r/h) \quad (2.2)$$

y en donde:

$\mu$  - es el coeficiente de fricción entre las caras del cilindro y las herramientas

$r$  - es el radio final del cilindro

$h$  - altura del cilindro

$\sigma_o$  - esfuerzo de cedencia del material a la temperatura de forja.

Sin embargo, las geometrías que se forjan, normalmente son más complejas y la fuerza necesaria para deformar la pieza crece a medida que la figura tenga más cavidades.

Para calcular las fuerzas de forja es necesario seguir algunos pasos básicos:

1. Calcular la deformación que sufre el material. Por ejemplo, si la pieza se reduce de una altura  $h_o$  a una altura  $h_f$ , la deformación está dada por:

$$\epsilon = \ln \left( \frac{h_o}{h_f} \right) \quad (2.3)$$

2. Encontrar el esfuerzo de fluencia adecuado; esto depende de si el proceso se realiza en condiciones de estado estable o no estable.

3. Determinar si el proceso pudiera resultar en deformaciones no homogéneas. Encontrar la  $L$  apropiada y la

$h$ ; si  $h/L > 1$  utilizar la figura 2.6 para determinar  $Q_i$ . Si la deformación es razonablemente homogénea ( $h/L < 1$ ), los efectos de la fricción predominarán y, después de estimar la magnitud de ésta, se pueden encontrar valores de  $Q$  para varios procesos.

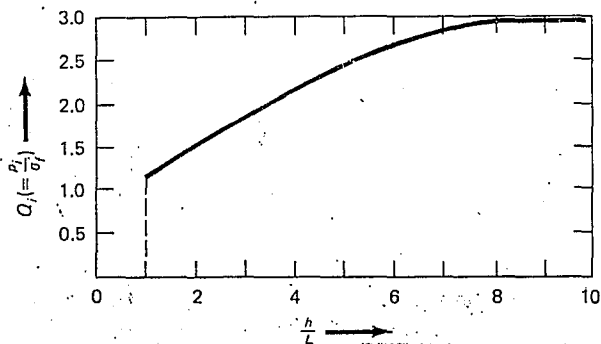
4. La presión promedio es simplemente:

$$P = \sigma_r Q \quad (2.4)$$

Luego basta basta multiplicar la presión  $p$  por una área  $A$  (área de la forja) para obtener el valor de la fuerza ( $P$ ).

$$P = A P \quad (2.5)$$

FIG. 2.6. Curva para el cálculo de  $Q_i$



Es evidente que en la actualidad existen métodos muy avanzados que permiten calcular las fuerzas de forja de manera precisa; tal es el caso de los análisis por elemento finito. Por otro lado las fórmulas aquí mostradas son muy básicas y su única ventaja es el hecho de estar apoyadas en una larga experiencia y el determinar fuerzas con un margen de confiabilidad con respecto a las fuerzas reales.

Sin embargo, en la industria, a veces es difícil profundizar tanto como para analizar la deformación de una manera exacta y las aproximaciones no son siempre confiables, por tanto, se han desarrollado fórmulas empíricas que arrojan mejores aproximaciones y son más específicas en cuanto al tipo de forja que se piensa realizar.

Wasiunyk[13] propone esta fórmula para calcular una forja de tipo horizontal, con plano de partición y rebaba:

$$P = w R_{m1} \left[ \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{a}{h} \right) F_r + \left( 1 + \frac{a}{h} + 0.1 \frac{a}{h} \right) F \right] \quad (2.6)$$

donde:

$$w = 2.8 (1 - 0.001 d) \quad d = 1.13 F \sqrt{F}$$

y en donde:

$F$  - área de la forja  
 (incluyendo rebaba)  
 $R_{mt}$  - resistencia del material  
 a la temperatura de forja  
 $s$  - ancho de la rebaba  
 $h$  - espesor de la rebaba  
 $F_r = 2 s h$  - área de la rebaba  
 $a$  - ancho de la pieza

Otra de las fórmulas propuestas es ésta:

$$P = \left\{ 3 \left( 1.15 + 0.07 \frac{b_{er}}{h_{er}} + 0.15 \frac{1 + \lambda}{2 \lambda} \frac{h_{er}}{b_{er}} + \frac{50}{b_{er}} \right) + \right. \\
 + 2 \left( 1.15 + 0.1 \frac{1 + \lambda}{2 \lambda} \frac{h_{er}}{b_{er}} + \frac{50}{b_{er}} \right) \left[ \left( 1.1 + \frac{10}{b_{er}} \right) \left( 1 + \frac{0.1 + \frac{10}{b_{er}}}{\lambda} \right) - 1 \right] \left. \right\} F \beta \sigma_p \quad (2.7)$$

donde:

$b_{er} = F/l$  - ancho promedio de la forja  
 $l$  - dimensión más grande en el  
 plano de partición  
 $h_{er} = \sqrt{F}$  - altura promedio de la forja  
 $\sigma$  - límite de plasticidad a la  
 temperatura de deformación  
 $F$  - área de la forja

$$\beta = (0.95 + 0.05 \lambda) < 1.15$$

$$\lambda = 1 / b_{er}$$

5

**CAPITULO III**  
**DEFINICION DEL PROBLEMA E HIPOTESIS**  
**DEL TRABAJO**

La forja en caliente es un proceso que permite la producción de grandes lotes, y de esta manera transformar la materia prima (acero al carbón, por ejemplo) en piezas casi terminadas que tienen características muy especiales, tales como resistencia, dureza, acabado superficial, etc., todo ésto último logrado a través de las condiciones particulares de la forja.

Es evidente que, siendo la forja un proceso donde se producen grandes lotes y considerando que el costo del herramental (dados) es bastante alta debido al uso de aceros herramientales, es necesario comprender el proceso muy a fondo para lograr que la vida del dado sea lo más larga posible y de esta forma reducir los costos sin afectar la calidad de la producción.

Como se vió en los capítulos anteriores, los mecanismos de desgaste que pueden sufrir los dados son muy variados y dependen de la zona y configuración del dado; sin embargo, la práctica nos dice que normalmente solo algunas zonas del dado presentan desgaste predominante con respecto al resto



del dado, y estas zonas solo sufren uno de los mecanismos desgastantes, o por lo menos, solo uno es el que predomina.

Es evidente que para poder entender los mecanismos que desgastan al dado y el proceso de la forja en su totalidad, se necesita visualizar de alguna manera el desgaste. Pero antes de hacer eso, se deben considerar algunos aspectos como su localización, su naturaleza y su comportamiento.

### 3.1 LOCALIZACION DEL DESGASTE

Aún cuando el desgaste se manifiesta en todos los puntos donde existe contacto entre el dado y la pieza de trabajo, es lógico que el avance del desgaste sea mucho más notorio en zonas donde existen condiciones de presión y deslizamiento que superan al resto del dado.

A continuación se muestran una serie de figuras que constituyen un análisis por elemento finito de la distribución de esfuerzos que sufre un cierto dado en diferentes momentos de la forja. Los valores de esfuerzo están expresados en  $\text{kg/mm}^2$  y se utilizaron tres ejes: el eje X que es un eje radial, el eje Z que forma un eje angular y el eje Y que es axial y va hacia arriba. Este dado se utiliza para una forja vertical (el punzón entra por arriba) y las figuras solo muestran la mitad del dado, lo cual es suficiente para entender la distribución de esfuerzos. Las figuras muestran distribuciones para cuatro distintos análisis: SI es un análisis de esfuerzos promedio realizado por el método de Von Mises, SX es un análisis de esfuerzos radiales, SZ es lo correspondiente a esfuerzos angulares y SY representa los esfuerzos en la dirección axial.

Aunque las figuras solo muestran algunos instantes de la forja, es posible observar, como lo muestra la figura 3.3, que la superficie del dado llega a sufrir esfuerzos de  $300 \text{ kg/mm}^2$  lo cual implica propensión a la adhesión.

FIG. 3.1. Sistema SI

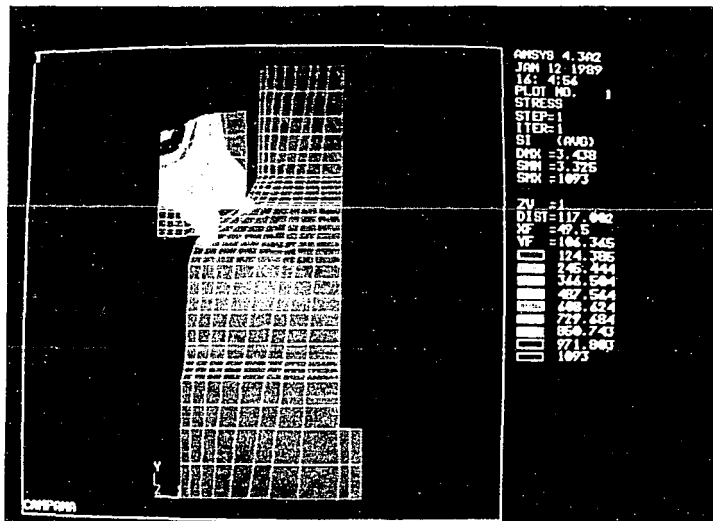


FIG. 3.2. Sistema SZ

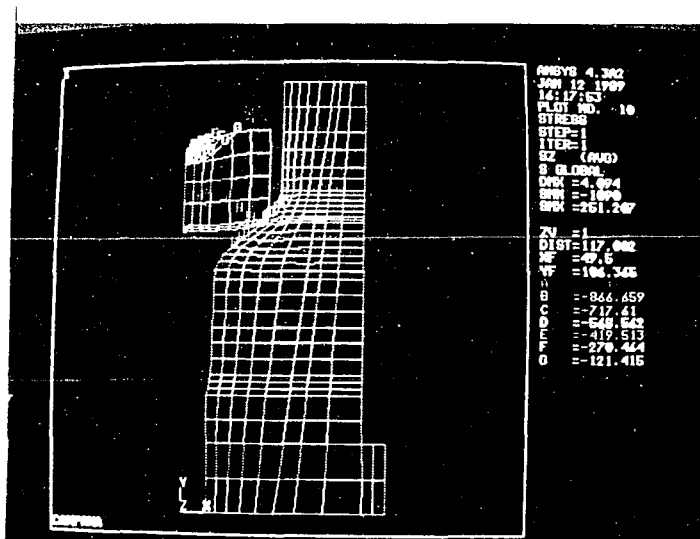


FIG. 3.3. Sistema SI

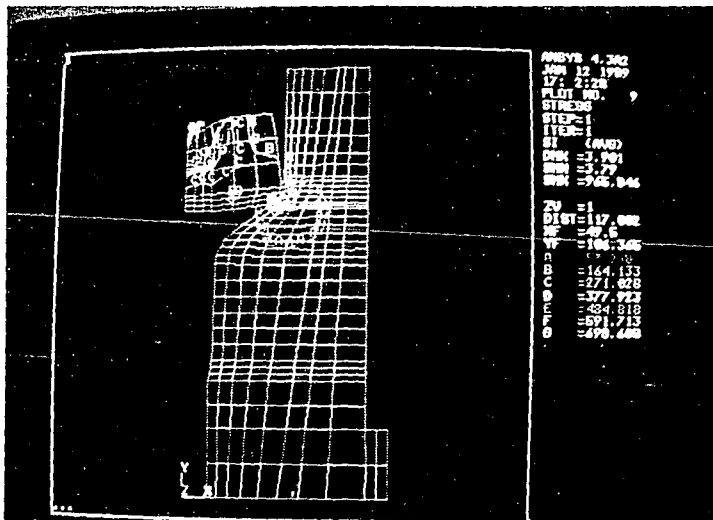


FIG. 3.4. Sistema SX

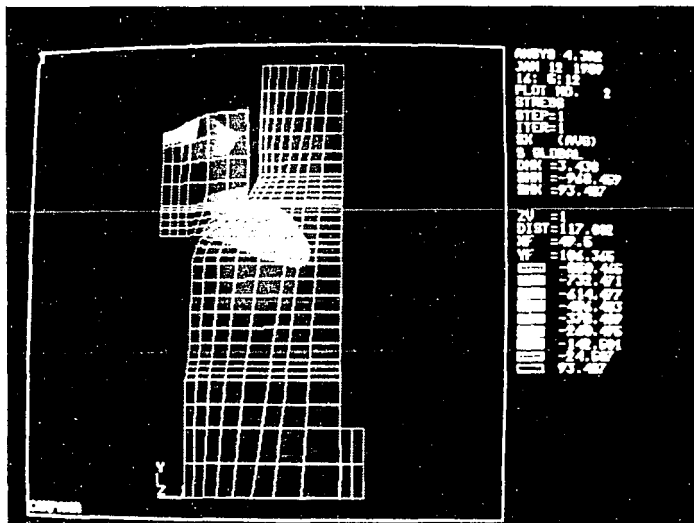


FIG. 3.5. Sistema SY

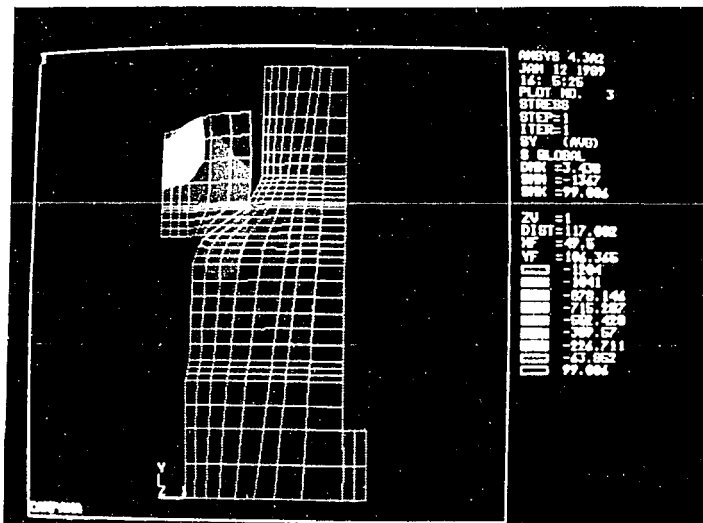


FIG. 3.6. Sistema SZ

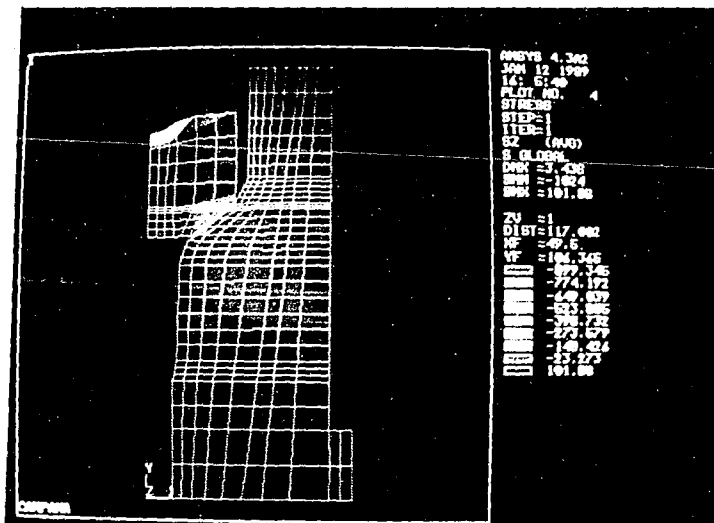


FIG. 3.7. Sistema SI

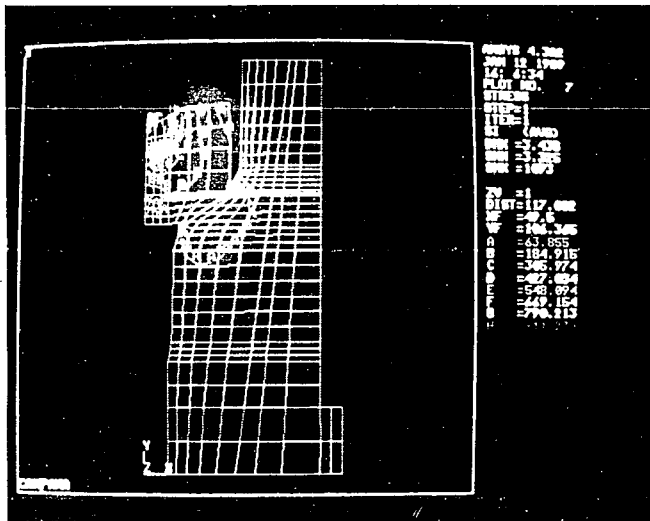




FIG. 3.8. Sistema SZ

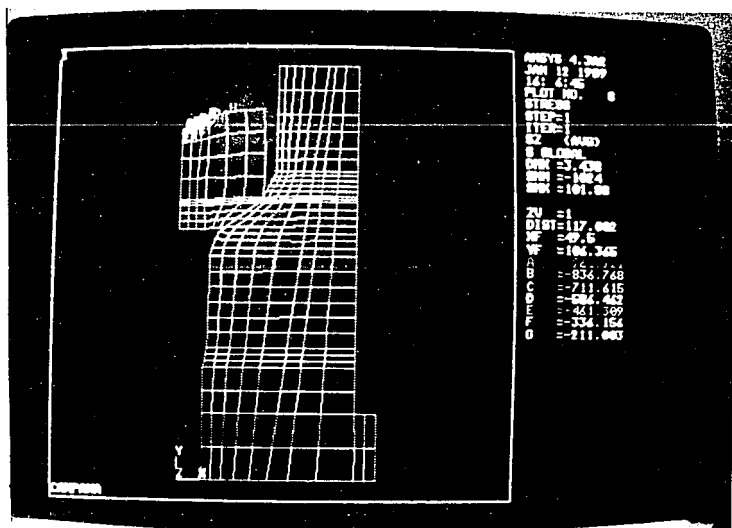


FIG. 3.9. Sistema SI

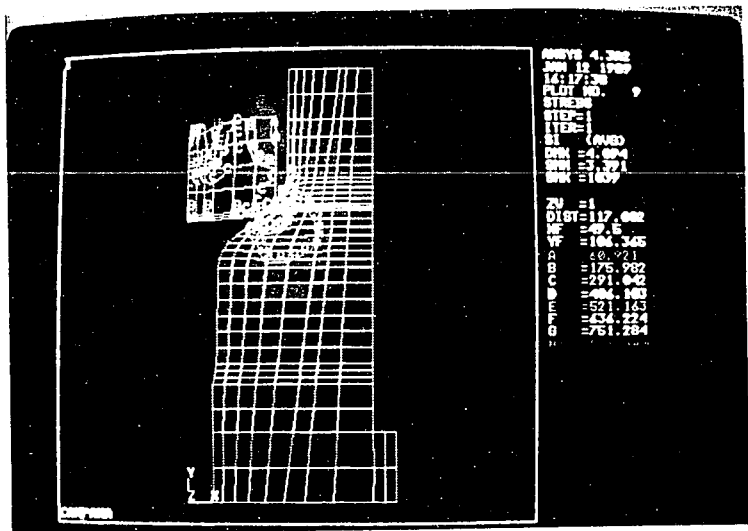


FIG. 3.10. Sistema SZ

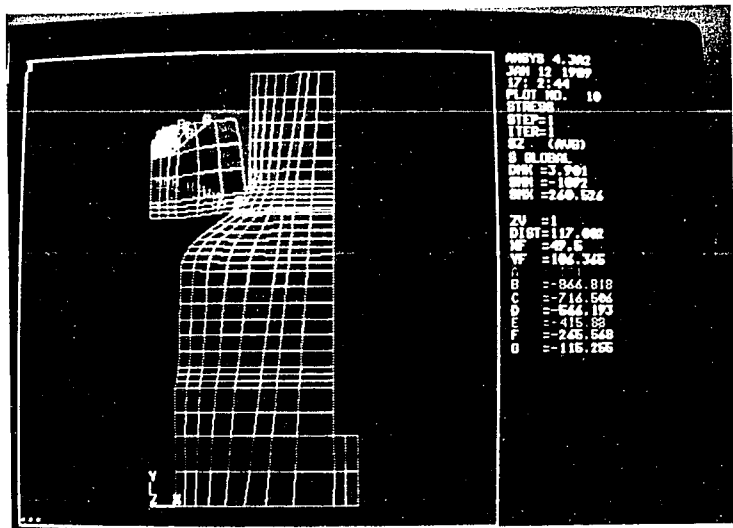


FIG. 3.11. Sistema SI

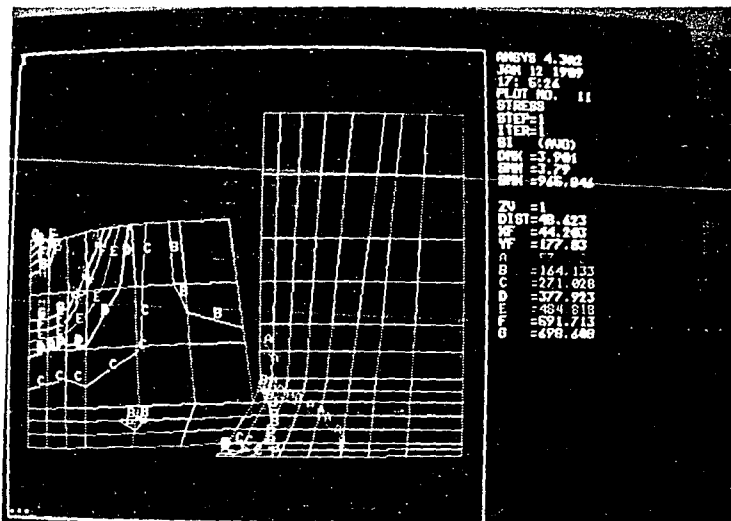
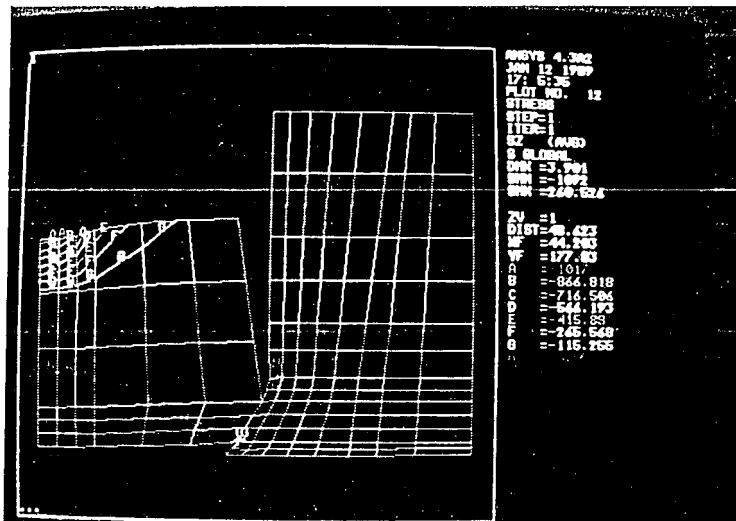


FIG. 3.12. Sistema SZ



Después de observar estas figuras y considerando que en realidad esta pieza se logra en gran parte a través de una extrusión, es evidente que la zona que sufre un desgaste más pronunciado es la que se muestra en la figura 3.1.

Como se puede ver en la figura 3.1, al momento en que el tocho hace contacto con el dado, debido a que la forma de contacto es prácticamente lineal, la superficie del dado alcanza esfuerzos de  $291 \text{ kg/mm}^2$  y las zonas que rodean a ese punto llegan a  $175 \text{ kg/mm}^2$ .

La figura 3.11 muestra el momento en que el tocho empieza a deformarse y se puede observar que en la parte inferior del tocho, la superficie del dado sufre esfuerzos de  $377 \text{ kg/mm}^2$  y la zona alrededor de ese punto llega a los  $271 \text{ kg/mm}^2$ .

Las figuras 3.7 y 3.8 muestran al tocho cuando éste se ha deformado lo suficiente para que el contacto pieza-dado se vea como una línea en el corte. Aunque en la parte inferior del contacto los esfuerzos solo alcanzan  $63 \text{ kg/mm}^2$ , en la parte superior de éste se llega a los  $305 \text{ kg/mm}^2$ .

Aunque este análisis no muestra los esfuerzos que se generan en la zona donde realmente comienza la extrusión (zona indicada en la figura 3.1), se puede estimar que los esfuerzos ahí generados son lo suficientemente grandes como para causar abrasión, sobre todo debido a la velocidad tan grande de deslizamiento que se suscita.

Es lógico pensar que existe más de una forma de atenuar el desgaste es esta zona, ya sea incrementando el valor del radio, forjando horizontalmente o aumentando el diámetro a extruir. Sin embargo, aún cuando al diseñar dados se tratan de considerar recomendaciones como los de la figura 3.13 (radios mínimos); se debe tener en cuenta que el cliente exige propiedades de resistencia que están determinadas por la forma en que se deforma el material.

Lo anterior nos lleva a entender que la formación de zonas expuestas a mayor desgaste no se pueda evitar.

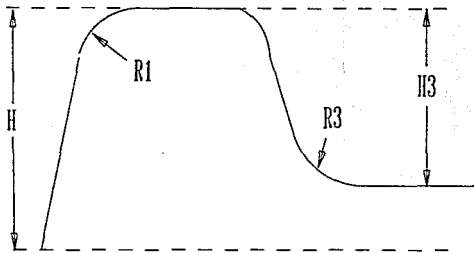


FIG. 3.13. ALTURAS Y RADIOS MINIMOS  
PARA DADOS

H[mm]	R1	H3[mm]	R3
0 - 40	2.5	0 - 25	4
40 - 63	4	25 - 40	6
63 - 100	6	40 - 63	10
100-250	10	63 -100	16
250-400	16	100-250	25
		250-400	63

20

### 3.2. NATURALEZA DEL DESGASTE

Aún cuando las tres causas básicas de falla prematura en los dados son: sobrecarga, abrasión y sobrecalentamiento; la abrasión es el factor más difícil de controlar, aunque no se pueden separar los efectos y causas de estos tres fenómenos.

Cuando los dados se calientan demasiado, su resistencia al desgaste disminuye, lo que favorece a la abrasión. Este sobrecalentamiento se presenta en las áreas que forman cavidades y además, puede ser el resultado de la producción continua.

En cuanto a la sobrecarga, existen puntos o líneas en la superficie del dado en donde se suscitan esfuerzos muy elevados, lo que favorece varios mecanismos de desgaste como la abrasión, la adhesión y el pitting.

La experiencia muestra que para un dado como el de la figura 3.14 fabricado en acero al alto cromo (e.g. H12 ó H13), y forjando piezas de acero al carbón bajo condiciones de operación estándar como: temperatura del tocho de 1200 C, precalentado del dado a 200 C y lubricación a base de grafito y aceite; la zona de desgaste crítico sufre abrasión de una manera muy pronunciada (figura 3.1), lo que provoca que las piezas forjadas ya no sirvan (solo se alcanzan alrededor de 1500 piezas).

Es evidente que para combatir la abrasión se debe incrementar la dureza de la superficie del dado. Pero aún cuando ésta sufre tratamientos como el sulfuniturado<sup>1</sup>, la penetración y los efectos que se logran no son suficientes.

Como ya se vió en los capítulos 1 y 2, la lubricación juega un papel muy importante en todo esto, así como la temperatura del dado, la cual, aunque normalmente es de 200 a 450 C, bajo ciertas condiciones extremas puede llegar a

1 - SULFUNITURADO: Proceso para endurecimiento superficial de aceros aleados en una atmósfera constituida por una mezcla en proporciones adecuadas de gas amoníaco y amoníaco disueltado.



680 C con las consecuencias lógicas de este sobrecalentamiento.

Todo lo anterior nos lleva a entender que la superficie que se indica en la figura 3.1 sufre una abrasión excesiva que se presenta como rayas que siguen al flujo del material forjado (o la dirección de la extrusión), y que vistas desde un plano superior aparecen como lo muestra la figura 3.15.

También se ha observado que si se logra incrementar la dureza en la zona en cuestión, aún cuando el dado soporta un incremento del 50% en las piezas forjadas; después de cierto número de piezas aparece otro tipo de desgaste que se manifiesta como desprendimiento de material o desgaste por adhesión en otra zona (figura 3.8).

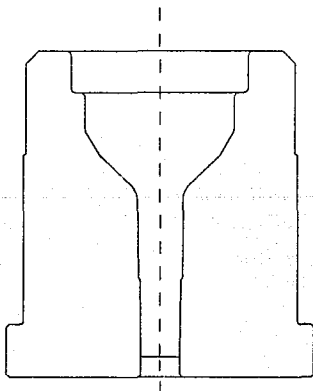


FIGURA 3.14

DADO DE PREFORMADO PARA CAMPANA

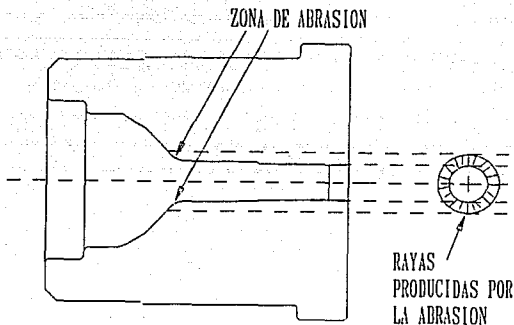


FIG. 3.15. ZONA DESGASTADA POR ABRASION

Esto nos lleva a pensar que esta zona del dado, aún cuando no sufre abrasión debido al poco deslizamiento de material que ahí se suscita, sí experimenta condiciones de presión y temperatura que fomentan la difusión de elementos aleantes del material del dado a la pieza, reduciendo la resistencia del dado y provocando separación de la capa superficial.

A continuación se muestran una serie de fotos sacadas al dado y al punzón, una vez que se han desgastado.

La foto 3.1 es una vista superior del dado. En el centro de la foto se puede observar la zona que sufre más desgaste. Este desgaste se presenta como rayas en la zona donde se realiza la extrusión y se puede definir como

desgaste abrasivo (por lo menos ese es el desgaste que predomina).

La foto 3.2 muestra parte de la superficie del punzón, en donde se puede ver claramente el desgaste por fatiga, que se debe principalmente al impacto que sufre la pieza al momento de forjar.

La foto 3.3 es otra imagen del punzón en donde se ve más de cerca el desgaste que sufre la pieza. Como se puede observar, la superficie plana presenta desgaste por fatiga, lo que se ve como grietas; sin embargo, en la orilla donde se forma un radio, se puede ver claramente el desgaste abrasivo (rayas).

La foto 3.4 es prácticamente la misma toma que la 3.1, pero iluminada desde la parte inferior del dado. Se observan claramente las rayas producidas por la abrasión en la zona extruida.

La foto 3.5 es una imagen de la parte central del punzón. De nuevo presenta dos tipos de desgaste; la fatiga en forma de cuarteaduras en la superficie y desgaste catastrófico en forma de abrasión en toda la orilla.

La foto 3.6 es una vista de la entrada al dado. Se puede ver que en donde existen radios, se forman rayas abrasivas. Por otra parte, la parte inferior de la foto muestra señales de desgaste adhesivo justo antes de las rayas abrasivas en la zona crítica.

FOTO 3.1. Vista superior del  
dado de preformado

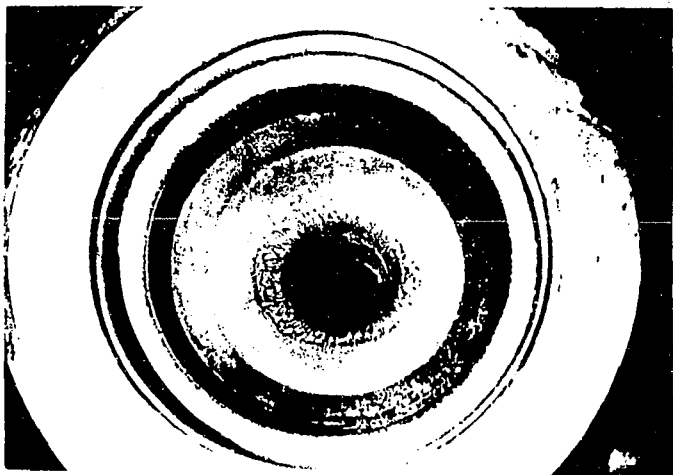


FOTO 3.2. Punzón desgastado por  
fractura



FOTO 3.3. Abrasión y desgaste  
por fractura en el punzón

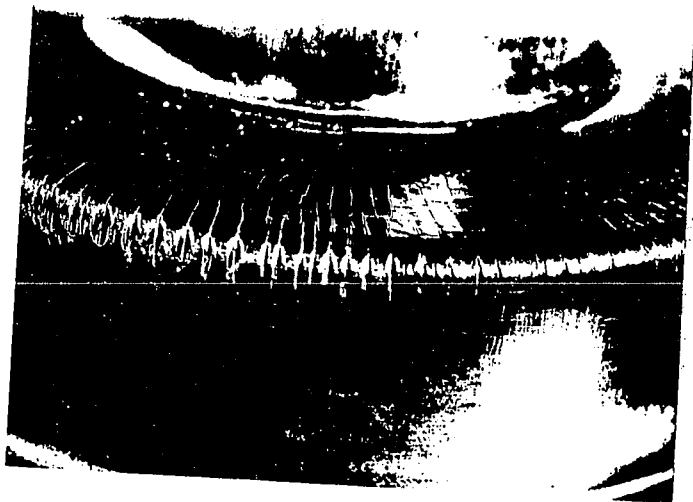


FOTO 3.4. Conducto de extruido en  
el dado de preformado



ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

79

FOTO 3.5. Parte central del punzón  
desgastada por abrasión y fatiga

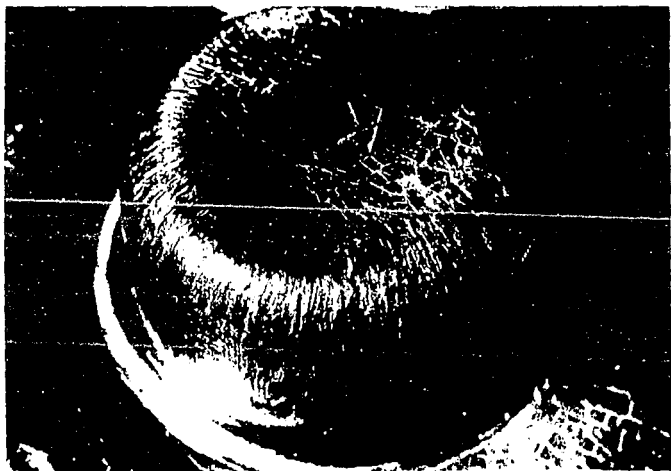




FOTO 3.6. Orillas en la entrada al  
dado de preformado



### 3.3 COMPORTAMIENTO DEL DESGASTE

Al hacer contacto la pieza y el dado, cualquier tipo de desgaste sigue un comportamiento como lo muestra la figura 3.16.

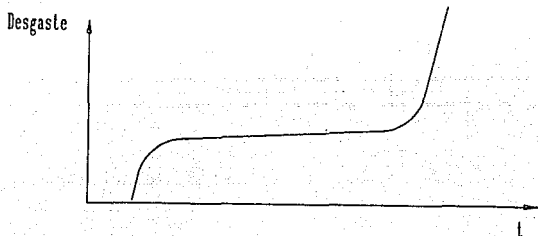


FIG. 3.16. CURVA TIPICA DE DESGASTE

Lo anterior es particularmente cierto para la abrasión, en la cual el desgaste se puede entender como la profundidad de la capa desgastada. De ahí que podamos estudiar la siguiente figura (figura 3.17.):

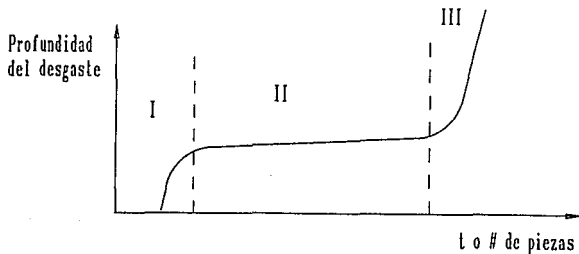


FIG. 3.17. CURVA DE ABRASION

Aquí se pueden apreciar tres zonas que se caracterizan por su avance con respecto al tiempo de operación o, en nuestro caso, al número de piezas forjadas.

La primera región se caracteriza por un desgaste pronunciado debido al acoplamiento entre las piezas y el dado. Aunque su duración se presupone corta, se debe cuidar que las condiciones particulares del proceso no provoquen que el desgaste alcanzado en esta etapa sea mayor del deseado.

La segunda etapa se caracteriza por abrasión muy lenta, ya que los elementos han llegado a una conformidad que permite forjar muchas piezas y prácticamente no experimentar desgaste. La mayoría de los métodos para incrementar la vida del dado (lubricantes, rediseño, etc.) pretenden incrementar la duración de esta etapa.

La tercera etapa se suscita cuando el material y en particular la superficie del dado han perdido sus propiedades tanto de resistencia como de dureza debido al contacto prolongado. Como se ve en la figura 3.17. el desgaste se acelera hasta el punto donde se suscita la fractura o, en el caso de la forja, cuando la profundidad del desgaste es tan grande que las piezas forjadas salen de tolerancia.

#### **3.4. ANALISIS CUANTITATIVO DEL DESGASTE**

La cuantificación del desgaste es deseable para predecir la vida útil de un herramental o dado y para preprogramar los cambios de herramientas en un proceso.

1. La pérdida de peso se puede determinar de antemano si la fracción del total del peso es lo suficientemente grande. Las plantas normalmente llevan registros de las cantidades producidas (tonelaje, número de piezas) con un cierto número de herramientas antes de que sea necesaria la recuperación del herramental, y antes de que el dado tenga

que ser retirado debido a que las dimensiones del producto salen de tolerancia. Los niveles de desgaste pueden ser expresados como volumen, peso, cambio dimensional por unidad de distancia, peso del producto o tiempo.

2. Las mediciones más detalladas para seguir el comportamiento del desgaste en el dado pueden interrumpir la producción, de ahí que, la mayoría de los datos relacionados con desgaste localizado son el resultado de investigaciones especiales. Se pueden usar instrumentos mecánicos u ópticos, y algunos implementos se han desarrollado para dados y cavidades. De cualquier forma los compuestos a base de elastómeros<sup>2</sup> siguen siendo muy útiles en perfiles desgastados.

3. Las técnicas de rastreo radioactivo son de las herramientas más útiles.

a. Se incorpora un isótopo radioactivo al dado durante su preparación o, más frecuentemente, el materiales expuesto a radiación de electrones en un reactor nuclear para activar algunos de sus elementos. La transferencia de material radioactivo a la superficie de contacto puede ser monitoreada por radiografía o por métodos de conteo.

b. Cuando el isótopo que se escoge tiene una duración de vida media, y la pieza de trabajo o el dado es tan grande que la actividad total necesaria requeriría medidas preventivas excesivas, se puede irradiar solo un inserto para el dado.

c. La activación de una capa delgada representa un avance significativo. La superficie del dado o herramental se hace radioactivo mediante la exposición a un rayo de partículas cargadas, aún cuando la activación solo alcanza los 200 micrometros.

d. También el lubricante se puede hacer radioactivo.

4. Las técnicas de emisión acústica han encontrado muchas aplicaciones en los estudios generales de fractura, y tienen mucho potencial en la tribología. Aunque sus

<sup>2</sup> - ELASTÓMEROS: Cualquier materia natural o artificial caracterizada por tener propiedades elásticas comparables a las del caucho

aplicaciones son lógicas en la detección de fracturas en herramientas, su uso en el monitoreo de la variación de la fricción promete mucho en procesos como el extruido.

5. Otra posibilidad muy intrigante es el seguimiento de la fractura de las capas de lubricante por un monitoreo con emisión de electrones. Como se vió con anterioridad, una superficie recién contactada emite electrones, y por lo tanto, un incremento en la emisión de electrones fotoestimulados indica fallas en la capa de lubricante.

### **3.5. DEFINICION DEL PROBLEMA**

Como se vió en el punto anterior, en el caso de dados para forja el desgaste localizado solo puede ser medido por métodos especiales y diseñados específicamente para el problema. De aquí que este trabajo de investigación tome como ejemplo el dado mostrado en la figura 3.14.

#### **3.5.1. REGION DESGASTADA.**

En el dado en cuestión la abrasión se presenta como rayas que siguen al flujo de material y que se localizan en la región (radio) que se muestra en la figura 3.18.

Aunque existen otras áreas del dado que sufren abrasión y otros mecanismos de desgaste, el avance en esta zona es lo suficientemente grande como para considerarla zona crítica.

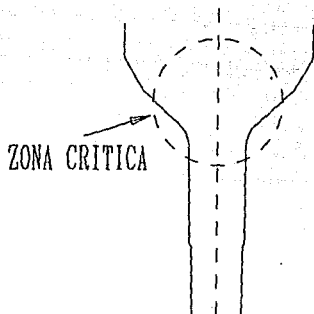


FIG. 3.18. ZONA CRITICA DE  
DESGASTE EN EL DADO

### 3.5.2. EFECTOS DEL DESGASTE EN LA PRODUCCION.

Este dado forma parte de un juego de dados que se utilizan en una prensa mecánica con una fuerza nominal de 15.7 MN y que sirven para forjar una pieza denominada campana. El dado que nos ocupa se denomina dado de preformado ya que el proceso para forjar la pieza es a grandes rasgos el siguiente:

Se toma un tocho de tres pulgadas de diámetro y 2.3 pulgadas de altura hecho de acero al carbón (1552) y se lleva a una temperatura de 1200 C; luego pasa a un dado de preparación donde el tocho se deforma para facilitar el siguiente paso. Enseguida de esto, el tocho deformado pasa al dado de preformado en donde se forja hasta alcanzar el perfil que muestra el dado (lo que implica una fuerte extrusión); de ahí la pieza pasa a un dado de finalizado en donde adquiere su forma final (fig 3.19).

El excesivo desgaste en la zona crítica del dado de preformado provoca que las piezas, al momento de forjarse en

el dado de finalizado, salgan con pliegues. Esto se debe a que el desgaste en la zona crítica implica un incremento en los diámetros de la pieza. Este incremento en el tamaño de la pieza de preformado hace que no sea útil para el dado de finalizado.

Aunque existen métodos para recuperar el dado una vez que se ha desgastado, esto normalmente se hace maquinando el radio en cuestión para eliminar las rayas formadas por la abrasión y de esta forma volver a utilizar el dado. Sin embargo, esta recuperación solo da resultado las primeras dos veces. Si se considera que el dado de preformado dura alrededor de 1500 piezas sin cambiarlo, y que se logra recuperar dos veces más; la producción que puede llegar a arrojar un dado es de alrededor de 4500 piezas. Este número es bastante bajo ya que los costos del herramental son muy altos (para un dado de preformado, alrededor de 5 millones de pesos).

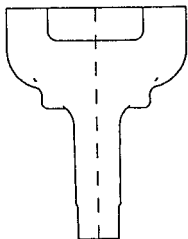


FIG. 3.19. PIEZA FORJADA EN EL DADO DE FINALIZADO

### 3.5.3. DEFINICION DE MONITOREO.

La palabra monitor se define como el dispositivo visual o acústico que permite comprobar el funcionamiento de un aparato. De aquí que el monitoreo se entienda como el proceso que permite seguir de una manera confiable el comportamiento o avance de un proceso.

La meta principal de esta investigación es lograr implementar un sistema que permita monitorear el avance del desgaste en el dado de preformado y en otros dados similares.

### 3.5.4. REQUERIMIENTOS DEL MONITOREO.

El problema de desgaste que nos ocupa implica una serie de requerimientos para el sistema de monitoreo:

1. El sistema debe ser capaz de medir el desgaste en la zona crítica de una manera precisa y confiable.

2. Aunque lo ideal sería una medición continua, el sistema debe proporcionar datos de forma periódica (cada cierto número de piezas).

3. El monitoreo debe interferir lo menos posible con el proceso de forja.

4. El sistema de monitoreo debe ser aplicable, no solo al dado de preformado, sino a otros dados similares.

## 3.6. BENEFICIOS Y ALCANCES DEL MONITOREO

Aún cuando el fin último de esta investigación es el incrementar la vida del dado y de esta forma reducir los costos de producción, se entiende que, al igual que cualquier medición, el monitoreo del desgaste no puede mejorar las condiciones de la producción por sí solo. Son las decisiones que se tomen a partir de los datos obtenidos con el sistema las que permitirán incrementar la vida del dado.



Como se vió en la sección 3.3., el desgaste presenta tres etapas bien identificadas que deben ser visualizadas por medio del sistema de monitoreo. Al conocer estas etapas se pueden tomar decisiones en cuanto a la resistencia que se debe tener en la superficie del dado, el momento en que se debe interrumpir la forja para mandar el dado a recuperación, los beneficios o restricciones que implica la lubricación y los efectos del control de la temperatura del dado.

Para entender de una manera gráfica los alcances del monitoreo, se puede estudiar la figura 3.20, en donde se muestra la vida de un dado con y sin monitoreo.  $D_p$  es el desgaste permisible después del cual las piezas forjadas salen de tolerancia,  $t_1$  es el tiempo o número de piezas forjadas que alcanza un dado sin monitoreo.

En el lado derecho de la figura se muestra como, si se conoce la forma en que avanza la curva de desgaste, se puede detener el proceso y mandar el dado a recuperación, lo que provoca que la silueta de la curva se repita.  $t_2$  es el tiempo o número de piezas forjadas con un dado monitoreado y  $R$  es el momento en que el dado se manda a recuperación. Es evidente que la vida del dado se incrementa.

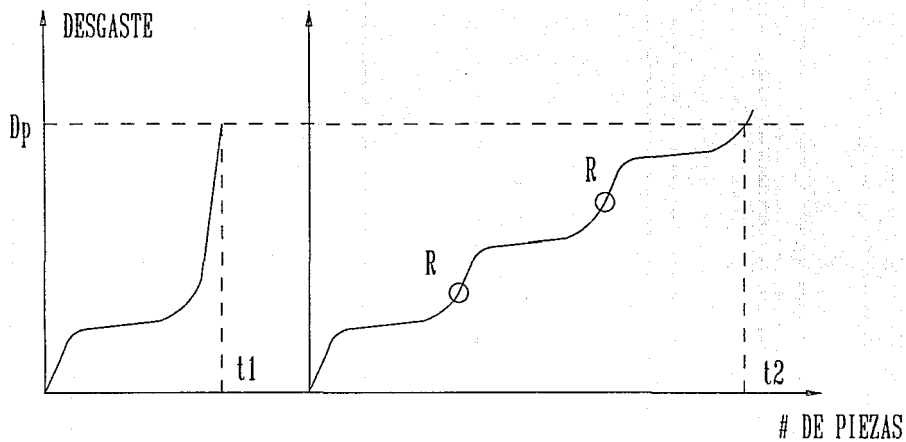


FIG. 3.20. COMPARACION DE LA DURACION DE UN DADO  
 CON Y SIN MONITOREO

### 3.7. ACEROS HERRAMENTALES

#### 3.7.1. CARACTERISTICAS DE LOS ACEROS HERRAMENTALES.

Cualquier acero usado como herramienta puede clasificarse técnicamente como acero herramental; sin embargo, el término suele limitarse a aceros especiales de alta calidad utilizados para corte o formado.

Existen varios métodos para clasificar los aceros herramentales. uno es según los medios de templeado que se usen, como aceros templeados en agua, aceros templeados en aceite y aceros templeados en aire. El contenido de la aleación es otro medio de clasificación, como aceros al carbono para herramientas, aceros de baja aleación para herramientas y aceros de mediana aleación para herramientas. Un último método de agrupación es el que se basa en el empleo del acero herramental, como aceros para trabajo en caliente, aceros resistentes al impacto, aceros rápidos y aceros para trabajo en frío.

El método de identificación adoptado por AISI tiene en cuenta el método de templeado, aplicaciones, características particulares y aceros para industrias específicas. Los aceros herramentales más usados se han conjuntado en siete grupos, identificándolos con una letra del alfabeto.

Resulta difícil seleccionar un acero herramental adecuado, destinado a una aplicación dada. Lo mejor es correlacionar las características metalúrgicas de los aceros herramentales con los requisitos del acero en funcionamiento.

TABLA 3.1. Clasificación de aceros  
herramientales

GRUPO	SÍMBOLO Y TIPO
Templados en agua	W
Resistentes al impacto	S
Trabajo en frío	O Templable en aceite A Mediana aleación y templable en aire D Alto carbono, alto cromo
Trabajo en caliente	H (H1-H19, incluso, base cromo; H20-H39, incluso, base tungsteno; H40-H59, incluso, base molibdeno)
Alta velocidad	T Base tungsteno M Base molibdeno
Moldes	P Aceros para moldes (P1-P19, incluso, bajo carbono; P20-P39, incluso, otros tipos)
Propósitos específicos	L Baja aleación F Carbono-tungsteno

En la mayoría de los casos, la selección de un acero herramental no se limita a un solo tipo o a una serie particular para resolver en forma funcional un problema concreto. Aunque muchos aceros herramentales se utilizarán para cualquier trabajo, se considerarán según la productividad esperada, la facilidad de fabricación y el costo. A final de cuentas, lo que determina la selección adecuada es el costo por pieza unitaria hecha por la herramienta.

La mayoría de las aplicaciones de aceros herramentales, con excepción del acero que se utiliza para hacer piezas de maquinaria, puede dividirse en tipos de operación: corte, cizallado, formado, estirado, extrusión, laminado o golpeado.

Las herramientas de formación se caracterizan por dar su forma a la pieza que se constituirá, lo cual se puede hacer forzando el metal sólido dentro de la impresión de la herramienta caliente o fría y empleando un troquel de forjado en caliente o de forjado en frío. Las herramientas de formado deben tener alta tenacidad y gran resistencia en

general, pero pueden requerir alta resistencia al rojo (resistencia al suavizamiento por calor).

Del análisis anterior es evidente que, para la mayoría de las aplicaciones, la dureza, la tenacidad, la resistencia al desgaste y la dureza al rojo son los factores más importantes al escoger los aceros. En aplicaciones individuales deben considerarse seriamente muchos otros factores, entre los cuales se incluye la deformación permisible en la forma considerada; la cantidad de decarburización superficial que puede tolerarse; la templabilidad que puede obtenerse; la resistencia a las fracturas por calor; los requisitos de tratamiento térmico, incluyendo temperaturas, atmósferas y equipo; y la maquinabilidad.

Lo anterior explica el porqué se escogió un acero H13 para el dado de preformado y también para los otros dos dados que forjan la campana.

### 3.7.2. CARACTERISTICAS DEL ACERO H13.

Antes de medir el desgaste en el dado es muy importante conocer las características del acero del que está fabricado. En particular, para el dado de preformado se utiliza un acero al alto cromo denominado H13.

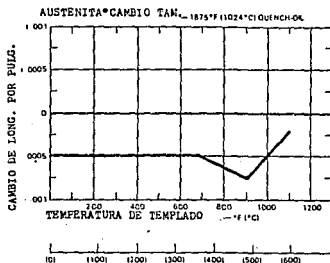
La composición del acero H13 es la siguiente:

Carbón.....	0.41%
Manganeso.....	0.35%
Silicio.....	1.00%
Cromo.....	5.35%
Vanadio.....	0.90%
Molibdeno.....	1.40%

Este acero es un acero herramental para trabajo en caliente con 5% de cromo diseñado particularmente para aplicaciones que requieren mucha dureza en caliente y buena resistencia. Da un margen de seguridad amplio en

herramientas expuestas a golpes fuertes de martillos o herramientas con filos o esquinas puntiagudas.

La figura que se muestra a continuación (figura 3.21) tiene los cambios longitudinales típicos de este acero cuando ha sido endurecido y templado apropiadamente. Muestra que el acero se encogerá alrededor de 0.0005 pulgadas/pulgada cuando es templado a 1000 °F.



El acero H13 se usa en herramientas para trabajo en caliente donde se requiere la máxima resistencia posible. Sus aplicaciones típicas son: dados de forja, herramientas de compresión elevada, dados de bulldozer, dados de extrusión de aluminio, dados para tornillos, punzones. Si se necesita, los dados fabricados en este material pueden ser enfriados con agua sin peligro de sufrir cuarteaduras.

#### - Tratamiento térmico.

Este acero, como cualquier acero herramental con alto contenido de carbón, está sujeto a descarburización durante el tratamiento térmico y se deben tomar precauciones para controlar esta condición.

Para forjarlo se debe calentar lenta y uniformemente a una temperatura de alrededor de 1100 C y forjarlo. No se debe trabajar el metal abajo de 899 C, sino que se debe recalentar tan seguido como sea necesario.

Para el revenido, el material debe estar empacado en un contenedor adecuado o colocado en un medio con atmósfera controlada. Se calienta uniformemente hasta 843/871 C y se enfría muy despacio a una velocidad no mayor a 30°F por hora. Esto producirá una dureza máxima de 241 Brinell.

A continuación se muestra una tabla con los valores de dureza con respecto a diferentes temperaturas de templeado. Se debe hacer notar que la dureza se mantiene hasta una temperatura de templeado de 583 C. Por lo tanto no hay razón para templear este material a una temperatura más baja. Los materiales herramientas nunca deben ser templeados a temperaturas más bajas que las de operación.

TEMPERATURA DE TEMPLADO		Rockwell C: Tratado en aire o aceite
F	C	
As Hardened		51/53
600	316	51/53
800	427	51/53
900	482	51/53
950	510	52/54
1000	538	52/54
1050	566	51/53
1100	593	49/51
1150	621	45/47
1200	649	39/41
1250	877	31/33
1300	704	28/30

- Coeficiente de expansión térmica.

La siguiente tabla muestra los coeficientes promedio entre la temperatura de medio ambiente y la temperatura elevada que se especifica. Están hechas para un material revenido y sus dimensiones están en in/in/° temperatura.

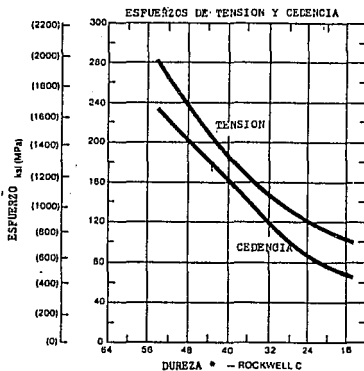
## COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA

RANGO DE TEMPERATURA		10 <sup>6</sup> /°F	10 <sup>6</sup> /°C
°F	°C		
80- 200	27- 93	6.1	11.0
80- 400	27-204	6.4	11.6
80- 600	27-427	6.8	12.2
80-1000	27-538	6.9	12.4
80-1200	27-649	7.3	13.1
80-1450	27-788	7.5	13.5
500-1200	260-649	7.8	14.0
500-1450	260-688	8.0	14.4
800-1200	427-649	8.1	14.6
800-1450	427-788	8.2	14.8

Estas son una serie de tablas y gráficas que muestran diferentes propiedades del acero herramental H13.

## CONDUCTIVIDAD TERMICA

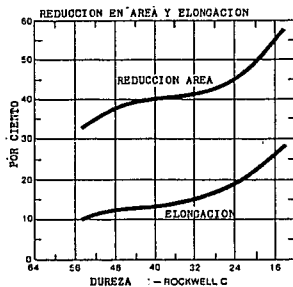
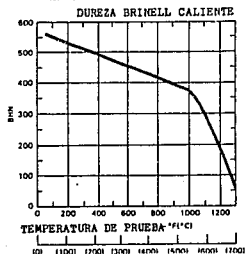
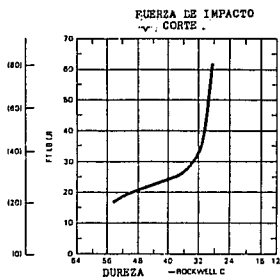
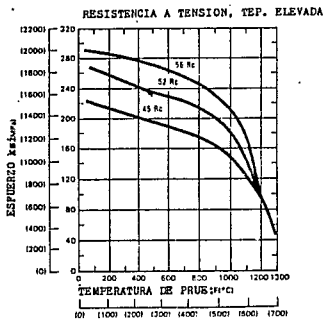
TEMPERATURA		Btu-in/ft <sup>2</sup> /hr/°F	W/m · K
°F	°C		
420	216	198	28.6
660	349	197	28.4
890	477	196	28.3
1120	604	199	28.7





·MODULO DE ELASTICIDAD

TEMPERATURA		psi x 10 <sup>6</sup>	MPa x 10 <sup>3</sup>
F	C		
70	21	30.5	210.3
300	149	27.6	191.7
500	260	26.1	180.0
650	343	27.7	191.0
800	427	27.3	188.2
900	482	27.0	186.2
1000	538	22.7	156.5
1200	649	18.5	113.8



Como se vió al principio del capítulo, existen puntos en la superficie del dado para preformado que sufren esfuerzos que alcanzan  $300 \text{ kg/mm}^2$ . Si se toma la figura 3.22 como referencia, se puede esperar que el material tenga un esfuerzo de fluencia de alrededor de  $1500 \text{ MPa}$ , lo que se traduce en  $153 \text{ kg/mm}^2$ . Esto significa que los esfuerzos que sufre el dado son suficientes para deformarlo plásticamente.

**CAPITULO IV**  
**DISEÑO DE UN APARATO**  
**DE MONITOREO**

Como se vió en el capítulo anterior, los sistemas o mecanismos para medir desgaste localizado en un dado, normalmente son de tipo mecánico u óptico y se diseñan específicamente para un problema determinado. El sistema o aparato que se necesita para medir y monitorear el desgaste en la campana de preformado debe cumplir una serie de requerimientos ya mencionados en la sección 3.5.4.; sin embargo, existen otros requerimientos lógicos que se derivan del hecho de "diseñar" un aparato. Al momento de hacer esto último es imperativo tener en mente el que el aparato tenga el costo más bajo posible, sea de fácil manejo, sea durable, etc.

En cuanto a las formas en que se debe realizar el monitoreo, se deben considerar los distintos modos en que se puede medir.

**4.1. MODOS DE**  
**MEDICION**

No Hwy Hos n.

98

---

~

Existen varios modos o maneras de realizar el monitoreo, pero se pueden distinguir claramente las siguientes cuatro: indirecta, directa, continua y periódica.

#### 4.1.1. MODO INDIRECTO.

El modo indirecto consiste en realizar la medición no directamente sobre el dado mientras éste se encuentra forjando, sino medir sobre algún dispositivo que refleje de manera confiable el perfil del dado.

#### 4.1.2. MODO DIRECTO.

Es lo contrario del indirecto y consiste en un aparato o dispositivo que permita medir el desgaste directamente sobre el dado. Lo anterior, por supuesto, sin interrumpir el proceso de forja.

#### 4.1.3. MODO CONTINUO.

El modo continuo consiste en monitorear el desgaste del dado de forma ininterrumpida o por lo menos después de cada una de las forjas. El principal inconveniente de este método es que las posibilidades de que la medición interfiera con el proceso en sí, son muchas.

#### 4.1.4. MODO PERIODICO.

Este modo consiste en medir el desgaste solamente cada cierto número de forjas, de tal manera que se tengan datos confiables para dibujar la curva de desgaste con suficiente precisión. Al proponer este modo se entiende que debe haber una estimación del desgaste para evaluar los periodos de medición; al momento en que el dado está sufriendo su última etapa de desgaste o desgaste acelerado, es necesario monitorear con periodos muy cortos para lograr exactitud.

#### 4.2. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Al momento de diseñar el sistema o aparato para monitorear el desgaste es necesario tomar en cuenta limitaciones que impone el proceso de forja. La pieza en cuestión se forja en una prensa con fuerza nominal de 1600 toneladas y en donde el dado de preformado sólo es uno de los tres dados que se utilizan para lograr la pieza final. También se debe considerar que el tocho que se forja llega a la prensa a una temperatura de 1200 C y que los dados en sí se encuentran a 300 ó 400 C y bajo condiciones extremas llegan a 600 C. Aunque la vida del herramental está cerca de las 1500 piezas, se debe considerar que se forjan cerca de 250 piezas por hora, lo que implica que un dado de preformado solo dura 6 horas, lo que es menos de un turno de trabajo; esta velocidad de forja se traduce en alrededor de cuatro piezas forjadas cada minuto, lo que significa que el operador trabaja bastante rápido. Otro aspecto a considerar es el hecho de que el operador tiene un acceso restringido a los dados una vez que se está forjando; el único contacto más o menos directo que realiza es la lubricación, que se hace manualmente con un escobetón remojado en el lubricante.

#### 4.3. SISTEMA DE MONITOREO

Una vez que se han considerado las restricciones del punto anterior, el sistema que presenta las mejores expectativas es un método indirecto y periódico que consiste en lo siguiente:

#### 4.3.1. PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA:

El sistema que se va a utilizar consiste en forjar cada cierto número de piezas un tocho de plomo a temperatura ambiente y medir las dimensiones del radio que sufre el desgaste abrasivo sobre esta pieza de plomo. Lo anterior viene dado por el hecho de que el plomo forjado en frío logra una "fotografía" muy exacta del perfil del dado, lo que no se logra con las piezas forjadas en acero. Estas últimas llegan al dado a una temperatura bastante alta (de 1000 a 1200 C) y para medir cualquier tipo de dimensión o manipularlas sería necesario esperar a que se enfriaran; como se sabe el acero al carbón tiene un coeficiente de expansión considerablemente grande ( $10$  a  $11.7 \times 10^{-6}$  por cada grado celcius)<sup>1</sup>, lo que implica que una vez que la pieza se ha enfriado de 1000 C a 20 ó 30 C, sus dimensiones se han reducido de manera drástica, por lo menos en cuanto a desgaste se refiere.

#### 4.3.2. CARACTERISTICAS DEL PLOMO.

El plomo es un metal que tiene una aplicación muy amplia como material tecnológico. Es de apariencia gris azulado y tiene una estructura cfc (cubica centrada en las caras) con una densidad de  $11.36 \text{ g/cm}^3$ , que es la más alta de los metales ordinarios. Hay varias aplicaciones del plomo que se basan en su densidad; por ejemplo, se usa para fabricar contra pesos, plomadas para pesca deportiva u profesional, y balas.

Cuando se expone a la atmósfera, el plomo adquiere con rapidez una película protectora de óxido o de sulfato. En consecuencia, el plomo tiene una resistencia buena a la corrosión atmosférica, al agua dulce y ante muchos ácidos y gases, incluyendo el cloro. En estado puro se usa para recubrir láminas de acero.

Desde el tiempo de los romanos hasta los albores del siglo veinte se usó el plomo para hacer cañerías. Aunque las cañerías de plomo han sido substituidas por las de cobre y

<sup>1</sup> - COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA: Coeficiente que representa el cambio fraccional de la longitud por cada grado de un grado en la temperatura. Por ejemplo,  $0.1 \text{ in/in/}^\circ\text{C}$  significa que el material crece  $0.1$  pulgadas por cada pulgada de longitud al aumentar la temperatura en un grado celcius.

plástico, aún existen incontables instalaciones de plomo en las estructuras y residencias antiguas.

Otras aplicaciones del plomo incluyen su uso como material para envolver cables, como escudo contra la radiación y como amortiguador del sonido. El plomo también se usa como aditivo en los latones de maquinado libre, en bronces y aceros inoxidable, en donde forma una fase dispersa que proporciona lubricación y características de rompimiento de chips.

El plomo, en combinación con el estaño y el antimonio forma una clase de metales que se conocen como metales de tipo. El bajo punto de fusión que se deriva del plomo facilita el colado. El antimonio proporciona dureza y resistencia al desgaste, en tanto que el estaño añade fluidez y mejora la estructura, haciéndola más fina y más capaz de reproducir detalles, propiedad que es indispensable en un metal de tipo.

Los metales antifriccionantes son aleaciones ternarias de plomo, antimonio y estaño en las que se aprovecha el bajo coeficiente de fricción del plomo. La composición de un metal antifriccionante con base en el plomo sería 75% Pb-10% Sb-10% Sn. Estas aleaciones se usan como material de cojinetes para cargas ligeras o moderadas.

El término aleación de fusión baja se aplica en general a los metales que se fusionan a menos de 233 C. Este es el límite superior de temperatura de fusión de esas aleaciones y se han desarrollado aleaciones que se funden a temperaturas tan bajas como 46.7 C. Muchas de estas aleaciones contienen plomo, estaño y bismuto. Algunas de esas aleaciones forman eutécticas<sup>2</sup>, pero otras son aleaciones no eutécticas. Las aleaciones eutécticas se funden y fluyen a una temperatura específica en tanto que, como se podría esperar, las aleaciones no eutécticas se funden entre límites amplios de temperatura.

Como se vió en el parrafo anterior, el plomo es ideal para lograr aleaciones de muy bajo punto de fusión. Esto

<sup>2</sup> - EUTÉCTICAS: Sistema en que sus componentes son totalmente por solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido.



implica que el material tiene una temperatura de recristalización<sup>3</sup> igual o menor a la temperatura ambiente (de 0.3 a 0.5 la temperatura del punto de fusión), en la cual los granos bajo esfuerzo y deformación plástica se empiezan a recristalizar para formar granos nuevos libres de esfuerzos. Si a lo anterior se añade la facilidad de estas aleaciones de plomo para fluir y el bajo coeficiente de fricción que tienen, se hace evidente que es extremadamente fácil forjar el plomo en frío, lo que permite manipular la pieza forjada sin demasiadas preocupaciones.

Como ya se explicó, la forja de plomo en frío permite visualizar de manera precisa y confiable el perfil del dado en sus diferentes etapas de desgaste.

#### 4.3.3. APARATO PARA MEDIR EL DESGASTE.

Una vez que se tiene la pieza forjada en plomo es necesario medir de manera precisa el desgaste (abrasión) que ha sufrido la zona crítica.

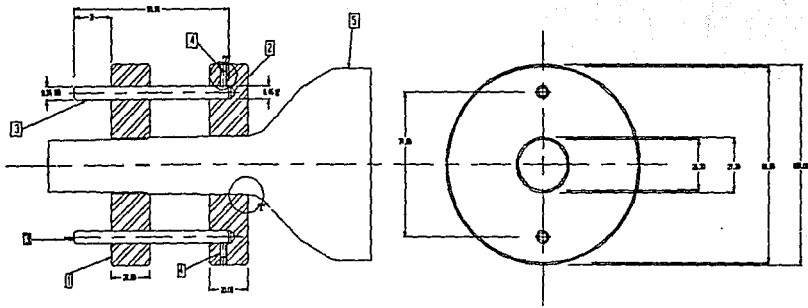
El aparato que se muestra en el ensamble No. 01-00-00 se basa en el siguiente principio: si se conoce el diámetro que debe existir a una cierta altura medida desde la base de la pieza y también se conoce el diámetro que realmente existe, entonces el desgaste es la diferencia entre estos dos diámetros.

El aparato que se muestra consta de las siguientes partes:

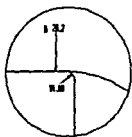
1. Anillo de referencia.
2. Anillo de medición.
3. Pernos.
4. Prisioneros.

El anillo de medición tiene dos barrenos en donde se introducen pernos de 1/4 de pulgada y se fijan por medio de prisioneros. El anillo de referencia tiene dos barrenos que atraviesan el anillo de arriba hacia abajo y concuerdan con los del anillo de medición.

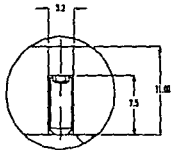
<sup>3</sup> - RECRISTALIZACIÓN: Temperatura a la cual los granos bajo esfuerzo y deformación plástica se empiezan a recristalizar para formar granos nuevos libres de esfuerzos.



VERDE T



VERDE T



1	PISTA FUSION	1	1.000
1	PERFORADOR	2	100.000
2	PERNO	2	100.000
2	MEJILLA DE RESISTOR	1	100.000
2	MEJILLA DE RESISTOR	1	100.000
No.	MOVER	CANTIDAD	UNIDAD

PESO:	2.3 KG.	APARATO PARA MONTAJE DE DESGASTE	DESIGNO: ROBERTO BONDAZ REVISADO: ROBERTO BONDAZ REVISOR: DR. P. RUBEN
ESCALA:	2:1	UNIVERSIDAD PANAMERICANA	NUMERO DE CONTROL: 01-00-00

Los pernos entran en los barrenos del anillo de referencia con un ajuste H5 g4 que se define como un ajuste de deslizamiento que se emplea para la localización exacta, en donde las piezas pueden moverse con facilidad, pero no están destinadas a girar libremente.

Una vez que el aparato está armado se coloca la pieza forjada en forma vertical con la parte extruida hacia arriba. Luego de esto se introducen los dos anillos entrando primero el de medición y luego el de referencia.

El anillo de referencia recarga en un borde que tiene la pieza en su parte extruida; precisamente se llama anillo de referencia ya que este borde se toma como referencia para hacer la medición.

El anillo de medición recarga directamente sobre la zona de desgaste de manera firme pero sin rayar la superficie de la pieza de plomo.

Una vez que los dos anillos han asentado sobre la pieza basta medir de manera precisa (preferentemente con un vernier de carátula) la altura "H", que es la distancia que existe entre la parte superior del perno y la cara superior del anillo de referencia.

Debido a que se conocen todas las dimensiones del aparato, como son altura del perno (cualquiera de los dos) a partir de la cara superior del anillo de medición, altura del anillo de referencia y del anillo de medición, al conocer la altura H es posible calcular la altura que existe entre el borde de referencia (en donde recarga el anillo de referencia) y el punto donde el anillo de medición toca a la superficie desgastada.

Esta última altura y el hecho de que se conoce la geometría original de la pieza, permiten hacer las siguientes consideraciones:

1. En el punto en donde el anillo de medición toca a la pieza debe existir originalmente un cierto diámetro  $D_0$ .
2. En ese punto existe realmente un diámetro mayor  $D_r$  que es el mismo diámetro que tiene el anillo de medición.

3. La diferencia entre los diámetros  $D_r$  y  $D_o$  representa el desgaste que ha sufrido el dado.

Al hacer estas consideraciones es evidente que para lograr un monitoreo confiable del desgaste en la zona crítica o radio que muestra el perfil, es necesario hacer mediciones en diferentes puntos de ese radio, para lo cual se necesitan anillos de medición que tengan diferentes diámetros (por lo menos tres diámetros distintos).

#### 4.3.4. ECUACIONES Y EJEMPLO DE MEDICION.

Para realizar una medición se deben tener datos precisos de las siguientes dimensiones:

$h_p$  - altura del perno medida desde la cara superior del anillo de medición.

$h_m$  - altura ente la cara superior del anillo de medición y el punto de contacto con la pieza.

$h_r$  - altura entre la cara superior del anillo de referencia y el borde de referencia.

La altura que existe entre el borde de referencia y el punto donde el anillo toca a la pieza lo llamaremos  $h_x$ . Si tomamos en cuenta la figura 4.2. esta altura se puede calcular de la siguiente forma:

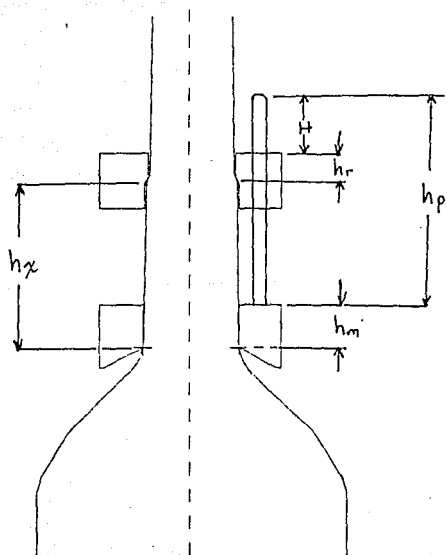
$$h_m + h_p = h_x + h_r + H \quad (4.1)$$

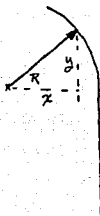
Despejando  $h_x$ :

$$h_x = h_m + h_p - h_r - H \quad (4.2)$$

Para encontrar el diámetro  $D_o$  que debe existir a esa altura  $h_x$ , es necesario hacer una análisis geométrico. Si se considera que el dado, y por lo tanto la pieza forjada, tiene las dimensiones que se muestran en la figura 4.3, entonces:

FIG.4.2. Alturas para medición





$$h_x = 49.4 + y \quad (4.3)$$

$$y = h_x - 49.4 \quad (4.4)$$

$$x = (r^2 - y^2)^{1/2} \quad (4.5)$$

$$D_o = 2[30.4 - x] \quad (4.6)$$

Resumiendo, los pasos para obtener  $D_o$  son:

1. Medir H

2. Obtener  $h_x$

$$h_x = h_m + h_p - h_r - H$$

3. Obtener x

$$x = [r^2 - (h_x - 49.4)^2]^{1/2}$$

4. Obtener  $D_o$

$$D_o = 2[30.4 - x]$$

Ejemplo:

$$\text{Sí } h_m = 20 \text{ mm}$$

$$h_r = 20 \text{ mm}$$

$$h_p = 70 \text{ mm}$$

$$r = 15.875 \text{ mm}$$

Se colocan los anillos y se encuentra una H de 19 mm.

Haciendo los cálculos para  $D_o$ :

$$h_x = 20 + 70 - 20 - 19 = 51$$

$$x = [15.875^2 - (51 - 49.4)^2]^{1/2} = 15.7941$$

$$D_o = 2[30.4 - 15.7941] = 29.2116$$

El diámetro del anillo de medición es de 30 mm.

La diferencia entre estos dos diámetros es:

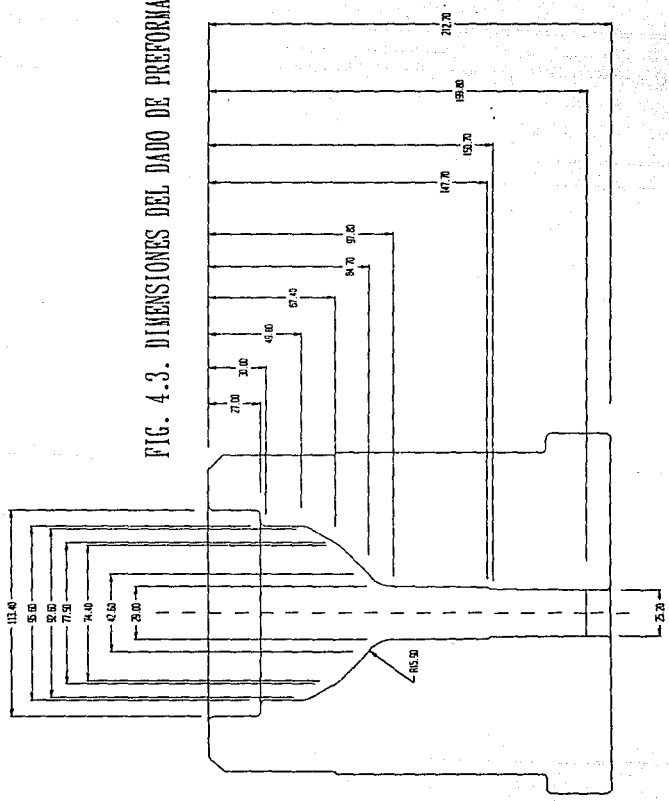
$$D_r - D_o = 30 - 29.2116 = 0.7883 \text{ mm de reducción del}$$

diámetro debido a desgaste.

Se debe hacer notar que al medir sobre la pieza, el diámetro real resulta ser mayor al diámetro original; si se midiera sobre el dado sucedería lo mismo.

102

FIG. 4.3. DIMENSIONES DEL DADO DE PREFORMADO



#### 4.4. ANALISIS DEL ERROR

Aún cuando el acero herramental H13 se usa precisamente porque el alto contenido de cromo impide que la estructura sufra deformaciones al cambiar de temperatura, sí existe un coeficiente de expansión térmica.

Para hacer un análisis del error que puede existir al determinar el diámetro  $D_0$  a partir de la altura  $H$ , podemos obtener una ecuación que tome en cuenta los cambios dimensionales debidos a la temperatura.

Para obtener una dimensión lineal después de que ha sufrido un cambio de temperatura:

$$l_f = l_o (1 + \alpha \Delta T) \quad (4.7)$$

donde:

$$\begin{aligned}
 l_f & - \text{dimensión final} \\
 l_o & - \text{dimensión original} \\
 \alpha & - \text{coeficiente de expansión térmica} \\
 \Delta T & - \text{incremento de temperatura}
 \end{aligned}$$

Para el acero H13 la sección 3.6. muestra una tabla para  $\alpha$  (tabla 3.2). Por lo tanto, la ecuación se obtiene de la siguiente forma:

$$h_u = h_m - h_p - h_r - H = C_1 - H \quad (4.8)$$

$$x = [ (15.8 (1 + \alpha \Delta T))^2 - (h_u - (49.4 (1 + \alpha \Delta T)))^2 ]^{1/2} \quad (4.9)$$

$$D_o = 60.8 (1 + \alpha \Delta T) - 2x \quad (4.10)$$

Por lo tanto:

$$D_o = D_o (H, \alpha, \Delta T)$$



de donde:

$$D_o = 60.8 (1 + \alpha \Delta T) - 2 \{ [15.8 (1 + \alpha \Delta T)]^2 - [C - H - (49.4 (1 + \alpha \Delta T))]^{1/2} \} \quad (4.11)$$

Si se considera que el dado está a 350 C y sufre cambios de temperatura de alrededor de 50 grados, el coeficiente tiene un valor de  $14 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ .

Para hacer un análisis del error Holman [1] propone lo siguiente: al tener una función

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

el error está dado por:

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_{x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_{x_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.12)$$

Ya que

$$D_o = D_o(H, \alpha, \Delta T)$$

$$w_{D_o} = \left[ \left( \frac{\partial D_o}{\partial H} w_H \right)^2 + \left( \frac{\partial D_o}{\partial \alpha} w_\alpha \right)^2 + \left( \frac{\partial D_o}{\partial \Delta T} w_{\Delta T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial D_o}{\partial H} = \{ [15.8 (1 + \alpha \Delta T)]^2 - [C_1 - H - (49.4 (1 + \alpha \Delta T))] \}^{-1/2} \times 2 [C_1 - H - (49.4 (1 + \alpha \Delta T))] \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial D_o}{\partial \alpha} = 60.8 \Delta T - \{ [15.8 (1 + \alpha \Delta T)]^2 - [C_1 - H - (49.4 (1 + \alpha \Delta T))] \}^{-1/2} \times \{ 2 [15.8 (1 + \alpha \Delta T)] [15.8 \Delta T] - 2 [C_1 - H - (49.4 (1 + \alpha \Delta T))] (49.4 \alpha) \} \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial D_o}{\partial \Delta T} = 60.8 \alpha - \{ [15.8 (1 + \alpha \Delta T)]^2 - [C_1 - H - (49.4 (1 + \alpha \Delta T))] \}^{-1/2} \times \{ 2 [15.8 (1 + \alpha \Delta T)] [15.8] - 2 [C_1 - H - (49.4 (1 + \alpha \Delta T))] (49.4 \alpha) \} \quad (4.16)$$

Si se tienen los siguientes valores:

$$H = 19 \text{ mm} \quad C_1 = 70 \text{ mm}$$

$$\alpha = 14 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$$

Y

$$w_H = 0.5 \text{ mm}$$

$$w_{\Delta T} = 10^{\circ}\text{C}$$

$$w_{\alpha} = 2 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$$

Calculando:

$$\frac{\partial D_o}{\partial H} = 0.19899354$$

$$\frac{\partial D_o}{\partial \alpha} = 1943.71262616$$

$$\frac{\partial D_o}{\partial \Delta T} = 5.442395 \times 10^{-4}$$

$$w_{D_o} = [(0.1989 \times 0.5)^2 + (1943.7 \times 2 \times 10^{-6})^2 + (5.44 \times 10^{-4})^2]^{1/2}$$

$$w_{D_o} = 9972 \times 10^{-8} \text{ mm}$$

$$w_{D_o} = 0.0999 \text{ mm} \approx 0.1 \text{ mm}$$

Si los resultados se dibujan como vectores:

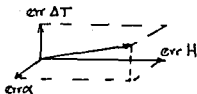
Donde:

$$\text{err } H = 0.9949 \text{ mm}$$

$$\text{err } \alpha = 0.0388 \text{ mm}$$

$$\text{err } \Delta T = 0.0544 \text{ mm}$$

$$w_{D_0} = 0.1$$



Aunque los cálculos aquí mostrados toman solo estimaciones de los errores o incertidumbres que se pueden tener la momento de hacer la medición, es evidente que el error que se genera en la medición del diámetro debido a la falta de precisión al medir la altura  $H$  es muy superior a los errores por falta de precisión al medir temperatura o al determinar el coeficiente térmico.

De lo anterior se puede sacar como conclusión que si se quiere tener un cálculo preciso del diámetro  $D_0$  es necesario poner mucho cuidado al medir la altura  $H$  (lo ideal es una precisión de 0.1 mm ó más).

#### 4.5. ALTERNATIVAS DE SOLUCION

Después de analizar una serie de posibilidades en cuanto a soluciones para medir el desgaste y considerar los distintos factores que influyen en cada método, se optó por la medición indirecta a través de una forja de plomo en frío debido a su bajo costo. Sin embargo, existen otras alternativas, cada una con sus ventajas y desventajas, que vale la pena mencionar.

##### 4.5.1. MEDICION DIRECTA.

Una de las alternativas más lógicas, aunque con grandes inconvenientes es la medición directa. Este proceso consiste en diseñar un aparato que se pueda introducir al dado cada

cierto número de forjas y medir de alguna forma el desgaste en la zona crítica.

La figura 4.5 muestra el diseño de un artefacto para medir el desgaste directamente sobre el dado mientras se encuentra forjando. La idea principal consiste en detener la forja por un momento breve, introducir el aparato al dado y medir el desgaste de manera rápida. Lo anterior se hace de la siguiente forma:

1. Se para el proceso por un momento.

2. Se introduce el artefacto en el dado de manera vertical.

\* La pieza 1 recarga en la cara superior del dado.

\* La pieza 2 recarga sobre uno de los bordes y centra al aparato.

\* Los tubos 3, 4 y 5 y los anillos 6, 7 y 8 no deben tocar al dado.

3. Se hace girar la pieza 9 accionando un mecanismo que suelta los tubos 3, 4 y 5 y permite que los anillos 6, 7 y 8 recarguen sobre el radio que sufre la abrasión.

4. Se suelta la pieza 9 para fijar la posición de los tubos.

5. Se retira el aparato.

Una vez realizados los pasos anteriores se debe medir con mucha precisión la distancia o altura entre los tres anillos y la cara inferior de la pieza 1. Haciendo un análisis geométrico muy parecido al ya expuesto en este capítulo, es fácil encontrar los diámetros originales que deben existir a esas alturas y por tanto, compararlos con los diámetros reales (los de los anillos 6, 7 y 8).

Los inconvenientes de este sistema son principalmente el hecho de que el dado se encuentra a temperaturas cercanas a los 400 C, lo que implica que el operador que desé hacer la medición requerirá de protección especial como guantes, peto, anteojos y alguna clase de agarradera para no tener que poner el aparato dentro del dado con la mano; por otro lado, se debe considerar que el trabajo de forja es bastante

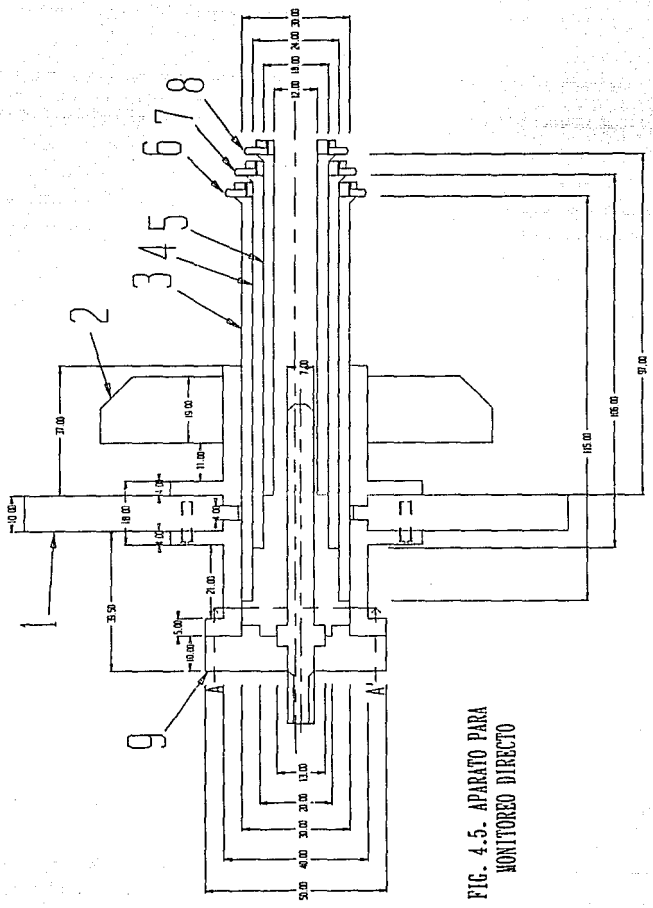


FIG. 4.5. APARATO PARA MONITOREO DIRECTO

"sucio" y los operadores están acostumbrados a estas condiciones, lo que vuelve difícil el pedirle a un obrero que realice una operación que requiere alta precisión.

#### 4.5.2. SISTEMA "VISION".

Una de las tecnologías más recientes que ha surgido para controlar los procesos de manufactura es el sistema "vision".

Este sistema, que también es llamado sistema de inspección por video, se integra por equipos muy sofisticados que normalmente cuentan con cámaras de video especiales, microprocesadores y softwares especiales.

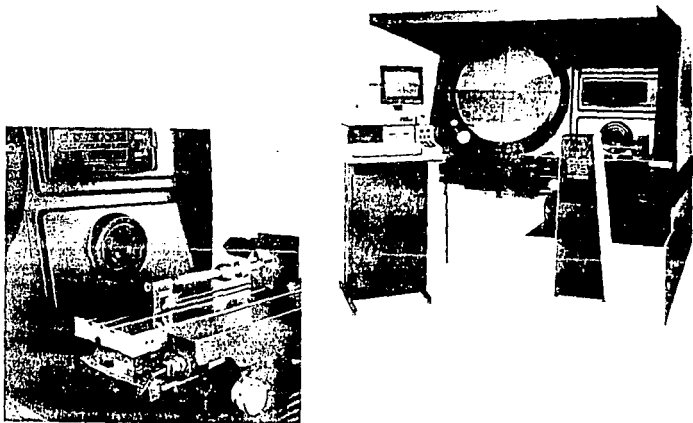
El equipo que se muestra en la figura 4.6 se llama Vidiprobe y es fabricado por la compañía OGP (Optical Gaging Products, Inc.). Este equipo permite la inspección de cualquier pieza (normalmente piezas generadas como sólidos de revolución) mediante su colocación en un cabezal que las hace girar. El sistema consta de una cámara de video especial que permite visualizar el perfil de la pieza en una pantalla grande y medir con mucha precisión las dimensiones.

Es evidente que este equipo resulta ideal para medir la dimensiones de la pieza forjada en plomo, aunque también es evidente que su costo resulta demasiado elevado para una aplicación que se puede sustituir con métodos menos costosos.

La principal meta de los sistemas de inspección por video es lograr inspeccionar y controlar los procesos de manufactura de una manera confiable y automática. Para el caso de la forja lo ideal sería una cámara montada en alguna parte de la prensa o en el sistema de lubricación automática para visualizar la zona del dado más afectada por el desgaste. Sin embargo, el desarrollo de un equipo para esta aplicación tendría que ser capaz de resistir la temperatura alrededor del dado, condiciones de humedad e impurezas en la atmósfera.

Sin duda en un futuro cercana todos los procesos de manufactura de alta calidad serán inspeccionados por sistemas de video y controlados de manera automática por programas de computo.

FIG. 4.6. Sistema Vidiprobe de inspección por video



117

**CAPITULO V**  
**APLICACION DEL SISTEMA**  
**DE MONITOREO**

Para aplicar un sistema de monitoreo como el que se describió en el Capítulo anterior a un dado que se encuentra trabajando es necesario tomar en cuenta la disposición del operador de la forja y hacer todo lo posible para que el uso del sistema sea lo más sencillo posible. Uno de los problemas más comunes al aplicar cualquier sistema de control a un proceso de manufactura es que el sistema resulta ser tan complejo o delicado que el operador pierde interés y la gente encargada de recibir o analizar los datos no recibe la suficiente información, lo que lleva al fracaso o a que los logros se vean disminuidos por falta de colaboración entre las partes.

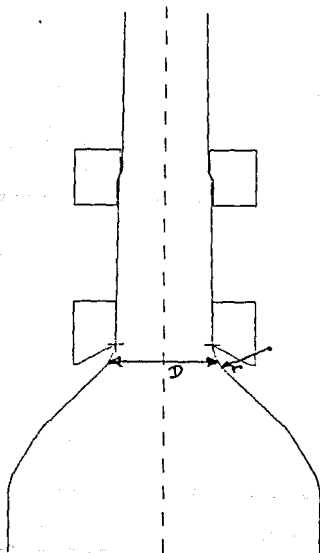
Si el sistema de monitoreo de desgaste se logra aplicar de manera efectiva, uno de los logros más significativos será el conocer más de cerca el proceso de forja en sí. Conforme se hacen estudios se ha visto que los procesos de desgaste resultan ser mucho muy complejos y vale la pena hacer todo lo posible por entenderlos.



### 5.1 CONSIDERACIONES SOBRE LA FORMA DE MONITOREAR

Si se observa la figura 5.1, queda claro que en nuestro estudio nos interesa medir la mayor cantidad posible de puntos sobre el perfil (especialmente el radio), pero el sistema de monitoreo solo permite medir un número finito (e incluso reducido) de puntos, dicho de otra forma, variaciones de diámetro debido a desgaste.

FIG. 5.1. Radio y Diámetro a medir



Lo anterior nos lleva a hacer una serie de consideraciones tales como:

- Se deben escoger sólo tres o cuatro anillos de medición que midan diámetros distintos y representativos.

- La altura H se debe medir de forma muy precisa.

- Los resultados que se obtengan deben ser estudiados de una forma teórica y muy precisa.

## 5.2. DETERMINACION DE LOS ANILLOS DE MEDICION

Como se puede ver en la figura que muestra las dimensiones del dado, el perfil del dado tiene un radio (de 15.875 mm) sobre el cual se deben medir las variaciones en el diámetro. Si en la figura 5.1. se toma el diámetro que existe en la parte superior del radio, vemos que tiene un valor de de 29.1 mm y en su parte inferior es de 38.8 mm; esto nos lleva a pensar que los anillos pueden constar de diámetros con los siguientes valores:

- \* Un anillo con un diámetro un poco mayor a los 29.1 mm
- \* Un anillo con diámetro promedio de 34 mm.
- \* Un anillo con diámetro un poco menor de 38.8 mm.

Al usar tres anillos de medición distintos para cada pieza monitoreada, es claro que el equipo deberá costar de:

- Un anillo de referencia
- Tres anillos de medición cada uno con dos prisioneros para sujeción de los pernos.
- Seis pernos.

Esto es lo que hace necesario el medir muy cuidadosamente las dimensiones de todas las piezas: altura del anillo de referencia, altura de los tres anillos y alturas de los pernos una vez fijados en los anillos.

Una de las razones por las que no es buena idea el usar dos pernos y ponérselos y quitárselos a los anillos cada vez que se hace una medición, es que la altura  $h_p$  tendría que ser medida en el momento de la medición y para cada anillo, lo que provocaría una variable más en los cálculos y pérdida de precisión.

### 5.3. PROGRAMA PARA MONITOREO

A continuación se muestra un programa llamado: "Programa de cálculo de variación de diámetro debido a desgaste" realizado en el lenguaje dBase y que tiene por finalidad el facilitar el manejo de los datos y cálculos al momento de hacer mediciones sobre la pieza forjada en plomo en la campana de preformado.

Al principio, el programa pregunta una serie de datos:

- $H_m$  - Altura de los anillos de medición.
- $H_r$  - Altura del anillo de referencia.
- $R$  - Radio original del perfil.
- $D_{r1}$  - Diámetro del primer anillo de medición.
- $H_{p1}$  - Altura del perno del primer anillo.
- $D_{r2}$  - Diámetro del segundo anillo de medición.
- $H_{p2}$  - Altura del perno del segundo anillo.
- $D_{r3}$  - Diámetro del tercer anillo de medición.
- $H_{p3}$  - Altura del perno del tercer anillo.

Luego el programa pregunta que número de pieza se está midiendo; esto es, la cantidad de piezas que se han forjado en el dado. Después pregunta los valores de  $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_3$ , que son las alturas medidas (valor de  $H$ ) para cada anillo. Una vez hecho esto, muestra los valores del diámetro que originalmente existía en esa altura, el diámetro que realmente existe y la diferencia entre estos dos diámetros. la operación se puede repetir para otra pieza.

10

\* PROGRAMA DE CALCULO DE VARIACION DE DIAMETRO DEBIDO A DESGASTE

CLEAR

SET TALK OFF

SET STATUS OFF

SET SCOREBOARD OFF

@ 1, 0 TO 3, 79

@ 22, 39 TO 24, 79

SET COLOR TO /W

@ 2, 1 SAY SPACE(78)

@ 2, 15 SAY "CALCULO DE VARIACION DE DIAMETRO DEBIDO A DESGASTE"

@ 23, 40 SAY " Realizado por: Roberto Gonzalez Ojeda "

SET COLOR TO

STORE " " TO REP

DO WHILE .T.

@ 4, 0 CLEAR TO 21, 79

@ 4, 0 TO 21, 79 DOUBLE

@ 19, 1 TO 19, 78 DOUBLE

@ 14, 1 TO 14, 78

STORE 0 TO HM,HR,R,DRI,DR2,DR3,HP1,HP2,HP3

STORE "? " TO IMP

@ 20, 19 SAY "DESEA IMPRIMIR LOS CALCULOS ? (S/N) " GET IMP PICTURE "!"

READ

@ 20, 5 SAY SPACE(70)

IF IMP = "S"

STORE 15 TO I

STORE " " TO PAS

@ 20, 19 SAY "ENCIENDA SU IMPRESORA Y PRESIONE [ENTER]"

SET COLOR TO X/X,X/X,X

@ 20, 17 GET PAS PICTURE "!"

READ

SET COLOR TO

ENDIF

DO WHILE .T.

@ 20, 5 SAY SPACE(70)

@ 20, 19 SAY "INDIQUE LAS CONSTANTES PARA ESTE CALCULO"

@ 5, 9 SAY "Altura del anillo de medición:

Hm =        \*\*"

@ 6, 9 SAY "Altura del anillo de referencia:

Hr =        \*\*"

@ 7, 9 SAY "Radio original:

R =         \*\*"

@ 8, 9 SAY "Diametro real 1:

Dr1=       \*\*"

@ 9, 9 SAY "Altura de perno 1:

Hp1=       \*\*"

@ 10, 9 SAY "Diametro real 2:

Dr2=       \*\*"

@ 11, 9 SAY "Altura de perno 2:

Hp2=       \*\*"

@ 12, 9 SAY "Diametro real 3:

Dr3=       \*\*"

@ 13, 9 SAY "Altura de perno 3:

Hp3=       \*\*"

@ 5, 60 GET HM PICTURE "##.####"

@ 6, 60 GET HR PICTURE "##.####"

@ 7, 60 GET R PICTURE "##.####"

@ 8, 60 GET DRI PICTURE "##.####"

@ 9, 60 GET HP1 PICTURE "##.####"

@ 10, 60 GET DR2 PICTURE "##.####"

@ 11, 60 GET HP2 PICTURE "##.####"

@ 12, 60 GET DR3 PICTURE "##.####"

@ 13, 60 GET HP3 PICTURE "##.####"

READ

@ 20, 5 SAY SPACE(70)

STORE "? " TO SIG

@ 20, 21 SAY "ESTAN LOS DATOS CORRECTOS ? (S/N) " GET SIG PICTURE "!"

READ

@ 20, 5 SAY SPACE(70)

188

```

IF SIG = "H"
  STORE "2" TO FOL
  @ 20, 18 SAY "DESEA CONTINUAR CON EL CALCULO ? (S/N) " GET FOL PICTURE "!"
  READ
  @ 20, 5 SAY SPACE(70)
  IF FOL = "N"
    CLEAR
    RETURN
  ENDIF
LOOP
ENDIF

EXIT
ENDDO

DO WHILE .T.
  @ 4, 0 CLEAR TO 21, 79
  @ 4, 0 TO 21, 79 DOUBLE
  @ 19, 1 TO 19, 78 DOUBLE
  @ 14, 1 TO 14, 78
  @ 5, 9 SAY "Altura del anillo de medición:           Hm =      "
  @ 6, 9 SAY "Altura del anillo de referencia:         Hr =      "
  @ 7, 9 SAY "Radio original:                             R =      "
  @ 8, 9 SAY "Diametro real 1:                          Dr1=     "
  @ 9, 9 SAY "Altura de perno 1:                          Hp1=     "
  @ 10, 9 SAY "Diametro real 2:                          Dr2=     "
  @ 11, 9 SAY "Altura de perno 2:                          Hp2=     "
  @ 12, 9 SAY "Diametro real 3:                          Dr3=     "
  @ 13, 9 SAY "Altura de perno 3:                          Hp3=     "
  @ 5, 60 SAY HM PICTURE "##.#####"
  @ 6, 60 SAY HR PICTURE "##.#####"
  @ 7, 60 SAY R  PICTURE "##.#####"
  @ 8, 60 SAY DR1 PICTURE "##.#####"
  @ 9, 60 SAY HP1 PICTURE "##.#####"
  @ 10, 60 SAY DR2 PICTURE "##.#####"
  @ 11, 60 SAY HP2 PICTURE "##.#####"
  @ 12, 60 SAY DR3 PICTURE "##.#####"
  @ 13, 60 SAY HP3 PICTURE "##.#####"
  IF IMP = "S"
    IF REP / "S"
      SET COLOR TO /W*
      @ 23, 1 SAY "UN MOMENTO, IMPRIENDO .."
      SET COLOR TO
      SET DEVICE TO PRINT
      @ 2, 15 SAY "CALCULO DE VARIACION DE DIAMETRO DEBIDO A DESGASTE"
      @ 5, 9 SAY "Altura del anillo de medición:           Hm =      "
      @ 5, 60 SAY HM PICTURE "##.#####"
      @ 6, 9 SAY "Altura del anillo de referencia:         Hr =      "
      @ 6, 60 SAY HR PICTURE "##.#####"
      @ 7, 9 SAY "Radio original:                             R =      "
      @ 7, 60 SAY R  PICTURE "##.#####"
      @ 8, 9 SAY "Diametro real 1:                          Dr1=     "
      @ 8, 60 SAY DR1 PICTURE "##.#####"
      @ 9, 9 SAY "Altura de perno 1:                          Hp1=     "
      @ 9, 60 SAY HP1 PICTURE "##.#####"
      @ 10, 9 SAY "Diametro real 2:                          Dr2=     "
      @ 10, 60 SAY DR2 PICTURE "##.#####"
      @ 11, 9 SAY "Altura de perno 2:                          Hp2=     "
      @ 11, 60 SAY HP2 PICTURE "##.#####"
      @ 12, 9 SAY "Diametro real 3:                          Dr3=     "
      @ 12, 60 SAY DR3 PICTURE "##.#####"
      @ 13, 9 SAY "Altura de perno 3:                          Hp3=     "
    
```

123

```

@ 13, 60 SAY HP3 PICTURE "###.#####"
SET DEVICE TO SCREEN
@ 23, 1 SAY SPACE(28)
ENDIF

ENDIF
STORE 0 TO N,H1,H2,H3
DO WHILE .T.
@ 20, 5 SAY SPACE(70)
@ 20, 21 SAY "AHORA INDIQUE LOS SIGUIENTES VALORES"
@ 15, 9 SAY "Numero de pieza forjada: N ="
@ 16, 58 SAY "H1 ="
@ 17, 58 SAY "H2 ="
@ 18, 58 SAY "H3 ="
@ 15, 39 GET N PICTURE "###.###"
@ 16, 63 GET H1 PICTURE "###.#####"
@ 17, 63 GET H2 PICTURE "###.#####"
@ 18, 63 GET H3 PICTURE "###.#####"
READ
@ 20, 5 SAY SPACE(70)
STORE "?" TO SIG
@ 20, 21 SAY "ESTAN LOS DATOS CORRECTOS ? (S/N) " GET SIG PICTURE "!"
READ
@ 20, 5 SAY SPACE(70)
IF SIG = "N"
STORE "?" TO FOL
@ 20, 18 SAY "DESEA CONTINUAR CON EL CALCULO ? (S/N) " GET FOL PICTURE "!"
READ
@ 20, 5 SAY SPACE(70)
IF FOL = "N"
CLEAR
RETURN
ENDIF
LOOP
ENDIF

EXIT
ENDDO

SET COLOR TO /N*
@ 23, 1 SAY "UN MOMENTO, CALCULANDO ..."
SET COLOR TO
D01 = 2*(30.4-SQRT((R*R)-((HM+HP1-HR-H1-49.4)*(HM+HP1-HR-H1-49.4))))
D02 = 2*(30.4-SQRT((R*R)-((HM+HP2-HR-H2-49.4)*(HM+HP2-HR-H2-49.4))))
D03 = 2*(30.4-SQRT((R*R)-((HM+HP3-HR-H3-49.4)*(HM+HP3-HR-H3-49.4))))
DI1 = DR1-D01
DI2 = DR2-D02
DI3 = DR3-D03
@ 23, 1 SAY SPACE(28)
DO WHILE .T.
@ 4, 0 CLEAR TO 21, 79
@ 8, 5 TO 16, 75
@ 5, 26 TO 7, 51 DOUBLE
@ 17, 5 TO 19, 75
@ 6, 28 SAY "PARA LA PIEZA:"
@ 6, 44 SAY N PICTURE "###.###"
@ 9, 32 SAY "DIAMETRO 1 DIAMETRO 2 DIAMETRO 3"
@ 11, 8 SAY "Diametro Original"
@ 13, 8 SAY "Diametro real"
@ 15, 8 SAY "Diferencia"
@ 11, 32 SAY DR1 PICTURE "###.#####"
@ 11, 47 SAY DR2 PICTURE "###.#####"
@ 11, 63 SAY DR3 PICTURE "###.#####"

```

124

```

@ 13, 32 SAY D01 PICTURE "###.#####"
@ 13, 47 SAY D02 PICTURE "###.#####"
@ 13, 63 SAY D03 PICTURE "###.#####"
@ 15, 32 SAY D11 PICTURE "###.#####"
@ 15, 47 SAY D12 PICTURE "###.#####"
@ 15, 63 SAY D13 PICTURE "###.#####"
STORE " " TO PAU
@ 18, 10 SAY SPACE(60)
@ 18, 19 SAY "PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR"
SET COLOR TO %/X,X/X,X
@ 18, 17 GET PAU
READ
SET COLOR TO
@ 18, 10 SAY SPACE(60)
IF INP = "S"
  SET COLOR TO /W*
  @ 23, 1 SAY "UN MOMENTO, IMPRIMIENDO .."
  SET COLOR TO
  SET DEVICE TO PRINT
  IF I >= 50
    STORE 2 TO I
    EJECT
    ENDIF
  @ I, 28 SAY "PARA LA PIEZA:"
  @ I, 44 SAY N PICTURE "###,###"
  STORE I+2 TO I
  @ I, 32 SAY "DIAMETRO 1   DIAMETRO 2   DIAMETRO 3"
  STORE I+2 TO I
  @ I, 8 SAY "Diametro Original"
  @ I, 32 SAY DR1 PICTURE "###.#####"
  @ I, 47 SAY DR2 PICTURE "###.#####"
  @ I, 63 SAY DR3 PICTURE "###.#####"
  STORE I+2 TO I
  @ I, 8 SAY "Diametro real"
  @ I, 32 SAY D01 PICTURE "###.#####"
  @ I, 47 SAY D02 PICTURE "###.#####"
  @ I, 63 SAY D03 PICTURE "###.#####"
  STORE I+2 TO I
  @ I, 8 SAY "Diferencia"
  @ I, 32 SAY D11 PICTURE "###.#####"
  @ I, 47 SAY D12 PICTURE "###.#####"
  @ I, 63 SAY D13 PICTURE "###.#####"
  STORE "S" TO REP
  STORE I+4 TO I
  SET DEVICE TO SCREEN
  @ 23, 1 SAY SPACE(28)
  ENDIF
  EXIT
  ENDDO
  STORE "2" TO SIG
  @ 18, 20 SAY "DESEA REALIZAR OTRO CALCULO ? (S/N) " GET SIG PICTURE "!"
  READ
  IF SIG = "N"
    EXIT
    ENDIF
  LOOP
  ENDDO
  EXIT
  ENDDO
  IF INP = "S"

```

EJECT  
ENDIF  
CLEAR  
RETURN

#### 5.4. EJEMPLO DE APLICACION DEL PROGRAMA

En el ejemplo que se muestra se puede ver como después de pedir todas las constantes, el programa calcula el diámetro original, el real y la diferencia entre estos dos diámetros para un cierto número de piezas forjadas.

Sin duda los resultados más importantes son las diferencias entre diámetros, ya que indican la cantidad de material que se ha perdido debido a la abrasión. Si se tienen suficientes datos, es posible hacer una gráfica que tenga la siguiente forma:

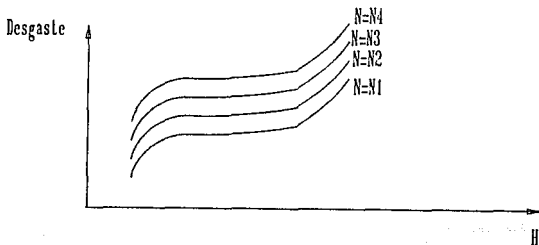


FIG. 5.2. CURVAS DE DESGASTE CONTRA ALTURA



Donde el eje H indica las alturas H1, H2 y H3 medidas en cada paso, el eje de desgaste indica la variación de diámetros y las curvas N representan el número de piezas que se han forjado en el dado. Una vez que se tiene esta gráfica, se pueden hacer otras que indiquen el desgaste con respecto al número de piezas forjadas para una altura ya determinada (figura 5.3).

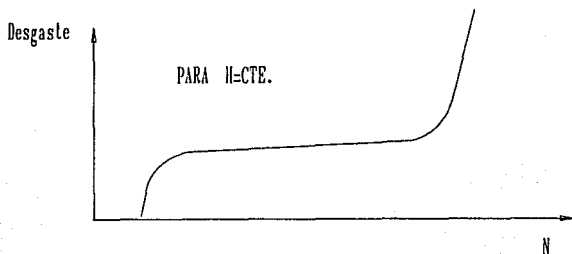


FIG. 5.3. CURVA DE DESGASTE OBTENIDA

127

CALCULO DE VARIACION DE DIAMETRO DEBIDO A DESGASTE

Altura del anillo de medición:	Hm = 20.000000 mm
Altura del anillo de referencia:	Hr = 20.000000 mm
Radio original:	R = 15.875000 mm
Diámetro real 1:	Dr1= 30.000000 mm
Altura de perno 1:	Hp1= 70.000000 mm
Diámetro real 2:	Dr2= 33.000000 mm
Altura de perno 2:	Hp2= 70.000000 mm
Diámetro real 3:	Dr3= 38.000000 mm
Altura de perno 3:	Hp3= 70.000000 mm

PARA LA PIEZA: 12

	DIAMETRO 1	DIAMETRO 2	DIAMETRO 3
Diametro Original	30.000000	33.000000	38.000000
Diametro real	29.211671	31.091037	35.513195
Diferencia	0.788329	1.908963	2.486805

PARA LA PIEZA: 20

	DIAMETRO 1	DIAMETRO 2	DIAMETRO 3
Diámetro Original	30.000000	33.000000	38.000000
Diámetro real	29.173706	30.943301	35.214408
Diferencia	0.826294	2.056699	2.785592

PARA LA PIEZA: 30

	DIAMETRO 1	DIAMETRO 2	DIAMETRO 3
Diámetro Original	30.000000	33.000000	38.000000
Diámetro real	29.140839	30.801625	34.925254
Diferencia	0.859161	2.198375	3.074746

128

	PARA LA PIEZA:	40	
	DIAMETRO 1	DIAMETRO 2	DIAMETRO 3
Diámetro Original	30.000000	33.000000	38.000000
Diámetro real	29.113055	30.665925	34.645411
Diferencia	0.886945	2.334075	3.354589

## 5.5. RESULTADOS

Es evidente que para lograr mayor precisión en la determinación de las curvas de desgaste es necesario medir cada pieza con un mayor número de anillos y, por supuesto, hacer los cálculos con algún programa de métodos numéricos.

Una vez que se tienen las curvas de desgaste se debe hacer un análisis cuidadoso para establecer la velocidad del desgaste y obtener datos referentes al momento óptimo para detener el proceso de forja y mandar el dado a recuperación.

Otro de los resultados importantes que se pueden obtener con este monitoreo es el determinar la eficacia de modificaciones en el proceso que tienen como fin incrementar la vida del dado; tales como la lubricación automática, el cambio de condiciones en la temperatura, el bruñido<sup>1</sup>, etc.

Aunque el sistema de monitoreo que aquí se presenta está diseñado para una aplicación particular, sus aplicaciones en otros dados pericidos son muy sencillas de implementar. Debido a que una gran parte de los dados herramientales para forja se fabrican en tornos, es muy común encontrar partes o secciones con radios que sufren desgaste (abrasión normalmente); lo que le dá sentido a la utilización de sistemas de monitoreo de este tipo.

### NOTA AL CAPITULO CINCO:

1 - BRUÑIDO: Tratamiento que consiste en endurecer la superficie del dado por medio de deformación plástica aplicada con una herramienta que toca a la superficie de forma puntual.

**CAPITULO VI  
CONCLUSIONES**

Uno de los medios indispensables para crear estándares de calidad confiables y reducir los costos en todos los procesos de manufactura es la implantación de sistemas de control. Estos sistemas deben ser capaces de profundizar lo más posible en las condiciones particulares del proceso para, de esta manera, entender cuales son las fallas , los aciertos y los excesos de los procesos.

Como se vió en el Capítulo Uno, el trabajo en metales implica el uso de algún herramental. En el proceso de forja el herramental o dado se usa para producir el mayor número de piezas posibles con una cierta calidad ya especificada que tiene que ver con la rugosidad de la superficie, las dimensiones, las propiedades mecánicas debidas a la deformación. etc.

Aún cuando el proceso de forja es, tal vez, el proceso de formado de metales más antiguo del mundo, la forja moderna resulta ser uno de los campos de la manufactura en donde menos estudios sobre desgaste se han realizado. Esto nos lleva a la necesidad de profundizar en estos fenómenos, no solo de una manera práctica (la experiencia en la forja es amplia), sino de forma teórica.

En el Capítulo Dos se hizo una explicación de los diferentes mecanismos de desgaste que puede sufrir un dado para forja, y también se explica como, aunque se presenten

dos o más mecanismos de desgaste en un solo lugar, solo uno predomina. Esto, aunque parece una ventaja para estudios como éste, resulta ser un problema a resolver, debido a lo siguiente. Al estudiar un proceso de desgaste, entenderlo y encontrar soluciones o medios que permitan decrementar su avance y permitir que se forjen más piezas con el mismo dado, es muy posible que, al llegar el dado a tiempos de operación no alcanzados antes, otros mecanismos de desgaste aparecen (por ejemplo la fatiga) y se deben encontrar nuevas soluciones que por lo general son muy distintas a las originales.

En este trabajo se analizó el desgaste que sufre un dado utilizado para forja en caliente y se encontró que la abrasión es lo que más afecta a una sección del dado. Como se vió, la abrasión es un tipo de desgaste que consiste en la pérdida de material debido a que la pieza o tocho "raya" al dado. Aunque en realidad la pieza no puede rayar al dado (el acero que se forja es mas suave que la superficie del dado), la formación de óxidos implica la existencia de partículas lo suficientemente duras como para desgastar la superficie del dado.

La vida útil de un dado resulta de la combinación de varios factores como la lubricación, el tratamiento superficial y, a final de cuentas, el diseño del mismo dado. Sin embargo, el monitoreo del desgaste resulta ser una opción más para lograr vidas mayores.

En principio, el monitoreo de desgaste permite visualizar el avance que sufre un dado en la pérdida de material y, de esta manera, evaluar los alcances de los tratamientos superficiales (e. g. sulfunitrurado), la aplicación de lubricación automática, los cambios de diseño e, incluso, procesos suplementarios como el bruñido. Sin embargo, el monitoreo se puede convertir en una herramienta más para incrementar la vida de un dado. Al conocer la curva de desgaste en una determinada zona del dado, también es posible determinar de forma precisa el momento en que el

dado debe ser mandado a recuperación. Lo anterior permite que el dado nunca llegue a condiciones de desgaste acelerado, lo que incrementa sus expectativas de vida útil.

El sistema de monitoreo que aquí se presenta resulta ser el más económico dentro de una serie de opciones que van desde aparatos mecánicos hasta sistemas computarizados de inspección. Es necesario entender que, aún cuando el sistema aquí mostrado se diseñó para una aplicación particular, tiene características que permiten su adecuación a otros dados. Esta característica y su facilidad de uso lo hacen una opción de fácil aplicación que, implementado de forma cuidadosa, puede arrojar muy buenos resultados.

Por otra parte, es muy importante entender que los esfuerzos que se hagan por conocer el proceso de forja más a fondo permitirán aumentar la calidad de la producción, reducir costos y revalorar los procedimientos que se emplean. El proceso de la forja, desde el diseño de los dados hasta la elección de los materiales a usar, responde a necesidades muy específicas y se basa tanto en experiencia de muchos años como en estudios teóricos muy avanzados; sin embargo, el estudio de los fenómenos tribológicos es bastante reciente y la aplicación de conceptos teóricos tales como el desgaste, la lubricación y la fricción han tenido poca profundidad en nuestro país. Una de las principales expectativas de este trabajo es lograr incrementar el interés por conocer y entender a fondo las causas y efectos de una buena lubricación, desgaste mínimo, disminución de coeficientes de fricción, control de temperaturas y, a final de cuentas, control del proceso de forja por medio del monitoreo.

**BIBLIOGRAFIA**

- AVNER, Sydney H., Introducción a la Metalurgia Física, México, Mc Graw Hill, 1979, (2a Ed).
- CARPENTER, Matched Tool and Die Steels, USA, Cartech, 1985.
- HARRIS, J.N., Trabajo Mecánico de los Metales, Teoría y Práctica, México, CECSA, 1987.
- HOLMAN, Jack P., Métodos Experimentales Para Ingenieros, México, Mc Graw Hill, 1984, (4a Ed).
- LAROUSSE, Pequeño Larousse de Ciencias y Técnicas, México, Editorial Larousse, 1975.
- RESNICK, Robert y HALLIDAY, David, Física, México, CECSA, 1977, (t. 1).
- RUSEK, Piotr, Introducción a la Tribología, México, IIIa. reunión Nacional de Análisis de Esfuerzos, 1986.
- SCHEY, John A., Tribology in Metalworking, Friction, Lubrication and wear, USA, American Society for Metals, 1983.



- -----, Introduction to Manufacturing Processes, USA, Mc Graw Hill, 1984, (4a. Ed.).
- SHIGLEY, Joseph E. y MITCHELL, Larry D., Diseño en Ingeniería Mecánica, México, Mc Graw Hill, 1979, (2a. Ed.).
- THORTON, Peter y COLANGELO, Vito, Ciencia de Materiales Para Ingeniería, México, Prentice Hall, 1987.
- WASIUNYK, Piotr, Kucie Matricowe (en polaco), Varsovia, WNT, 1968.

#### REFERENCIAS

- [1] F. P. Bowden y D. Tabor, The Friction and Lubrication of Solids, Clarendon Press, Oxford, Pt. I, 1950, y Pt. II, 1964.
- [2] D. Tabor, Proc. Roy. Soc. (London), A251, 1959, pp. 378 - 393.
- [3] I. V. Kragelski, Friction and Wear, Butterworth, Washington, 1965.
- [4] T. Wanheim y N. Bay, CIRP, 27, 1987, pp. 189 - 194.
- [5] J. T. Burwell, Wear, 1, 1957, pp. 119 - 141.
- [6] Archard.
- [7] P.W. Wallace y J. A. Schey, en Proc. 8th. Int. MTDR Conf., Pergamon, Oxford, 1968, pp. 1361 - 1380.

- [8] H. Tolkien, Werkstatt Technik, 51, 1961, pp. 102 - 105  
(en Aleman)
- [9] W. C. Keung, T. A. Dean y L. F. Jesch, en Proc. 3a. NAMRC, SME, Dearbon, MI, 1975, pp. 72 - 84.
- [10] P. W. Wallace y J. A. Schey, Trans, ASME, Ser F., J. Lub. Tech., 93, 1971, pp. 317 - 323.
- [11] A. Thomas, Metal Forming, 38, 1971, pp. 41 - 45.
- [12] R. Sharma u D. J. Arrowsmith, Wear, 74, 1981 pp. 1 - 10.
- [13] P. Wasiunyk, Kucie Matrycowe, Varsovia, WNT, 1968, pp. 368 - 370.
- [15] J. P. Holman, Métodos Experimentales para Ingenieros. México, Mc Graw Hill, 1984, (2a Ed.), pp. 55 y 56.