



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS  
VERITATE SOLA NOVIS INPONETUR VIRILISTOGA. 1948

*Facultad de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Procesos Tecnológicos*

# *Trabajo de Diploma*

*Título: "Estado del arte del bruñido por bola para  
el acabado superficial de las piezas"*

*Autor: Yodsamy Morales Caro.*

*Tutores: Ing. Carlos Sánchez Cabrera.*

*Dr. C. Silvio Díaz Rojas.*

*Curso Escolar: 2006-2007*

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



## **Resumen**

El presente trabajo tiene como objetivo de estudio el tratamiento superficial de las piezas mediante la deformación plástica superficial (DPS), considerándose una de sus variantes, el proceso llamado bruñido por bola, empleado para el acabado final de piezas mediante la aplicación de elementos deformantes (bolas) que actúan sobre la superficie tratada. Este proceso permite sustituir esquemas tecnológicos tradicionales para el tratamiento superficial de las piezas con el fin de aumentar la eficiencia energética y disminuir la contaminación del medio ambiente.

Nos proponemos además dar a conocer las particularidades de este método que aún no está lo debidamente difundido que debiera y llamar la atención sobre sus ventajas tecnológicas y energéticas.

## **Abstract**

The study purpose of this research paper is the superficial treatment of the pieces through the superficial plastic deformation (SPD) by taking into account the ball burnishing process which is one of its variants. This process is used for the very final work in the pieces by applying deforming elements (balls) which will take part on the treated surface. It also allows the substitution of traditional technologic schemes for the superficial treatment of the pieces so as to increase the energy efficiency and diminish the pollution of the environment.

Besides, we propose to give information about the specific details of this method which is not still appropriatly known as it must be and to get the readers attention on its technologic and energy advantages.

## Índice

<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo I Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Elementos básicos</b>	
1.1.1 Estructura cristalina	
1.1.2 Concepto de geometría de los cristales.....	4
1.1.3 Teoría de las dislocaciones.....	9
1.1.4 Teoría y concepto de la deformación plástica.....	26
<b>1.2 Mecanismos de endurecimiento superficial.....</b>	<b>35</b>
<b>Capítulo II El bruñido por bolas para el acabado superficial de las piezas.....</b>	<b>42</b>
<b>2.1 Breve de los procesos de tratamiento mecánico por deformación plástica superficial</b>	
<b>2.2 Ventajas del bruñido por bolas.....</b>	<b>45</b>
<b>2.3 Generalidades.....</b>	<b>47</b>
2.3.1 Herramientas	
2.3.2 Material de la bola de bruñir.....	48
2.3.3 Dimensiones de la bola de bruñir.....	49
2.3.4 Máquina herramientas	
2.3.5 Materiales.....	50
2.3.6 Forma y dimensiones de la pieza	
2.3.7 Condiciones de lubricación	
2.3.8 Aplicaciones.....	51
2.3.9 Diseño experimental	
2.3.10 Método o software empleados para procesar la información.....	52
<b>2.4 Parámetros de entrada</b>	
2.4.1 Fuerza, Presión, Profundidad de penetración	
2.4.2 Frecuencia de giro, Velocidad.....	53
2.4.3 Avance	

2.4.4 Número de pasadas, Tiempo.....	54
2.4.5 Rugosidad superficial inicial	
2.4.6 Dureza superficial inicial	
<b>2.5 Parámetros respuesta.....</b>	<b>55</b>
2.5.1 Rugosidad superficial final	
2.5.2 Incremento de la rugosidad superficial final.....	56
2.5.3 Dureza superficial final	
2.5.4 Microdureza y profundidad de capas endurecidas	
2.5.5 Tensión residual compresiva	
2.5.6 Resistencia al desgaste.....	57
2.5.7 Resistencia a la corrosión	
2.5.8 Resistencia a la fatiga.....	58
<b>2.6 Bruñido de baja plasticidad</b>	
<b>Conclusiones.....</b>	<b>61</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>62</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>63</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>72</b>

### **Introducción**

La deformación plástica superficial (DPS) y en particular el proceso de bruñido por bola constituye un método de tratamiento superficial de las piezas para incrementar sus cualidades físico-mecánicas y de acabado aprovechando las características de plasticidad de los metales, lo cual puede evitar en muchos casos el empleo de esquemas tecnológicos tradicionales como el rectificado y el tratamiento térmico, que son altamente consumidores de energía y potencialmente contaminantes del medio ambiente.

De la consulta de la literatura especializada sobre esta temática resulta evidente que dicho método de elaboración le comunica a las piezas un incremento de la dureza superficial, resistencia al desgaste, a la fatiga y a la corrosión, además de que mejora sustancialmente el acabado superficial. Así mismo se reporta que dicha técnica requiere del uso del herramental específico para su aplicación y del conocimiento del régimen apropiado de trabajo de dicho herramental ha partir del tipo de material tratado y del resultado deseado (buen acabado, dureza, resistencia al desgaste, a la fatiga, etc.).

El bruñido por bola simple puede resultar ventajoso en el mejoramiento de las cualidades superficiales de las piezas tratadas siempre y cuando el proceso se realice para determinadas condiciones dadas (material de la pieza y propiedades físico-mecánicas, acabado superficial previo, entre otras) y que el conjunto de parámetros, que determinan el régimen del bruñido por bola, se seleccionen correctamente según los resultados que se quieran obtener.

### **Hipótesis**

“El proceso de deformación plástica superficial mediante el bruñido por bola es un método alternativo respecto a los esquemas tecnológicos tradicionales empleados para aumentar la calidad de las superficies de las piezas. Su empleo y utilización tiene plena actualidad en una amplia gama de materiales, piezas y tipos de máquinas herramientas”

### **Objetivos**

El objetivo de la tesis es el proceso de bruñido por bola como alternativa de tratamiento mecánico por deformación plástica superficial para la sustitución de esquemas tecnológicos tradicionales con el fin, fundamentalmente, de mejorar el acabado superficial y aumentar la dureza superficial en piezas, entre otras ventajas y para contribuir a crear una cultura tecnológica sobre el empleo de los procesos por DPS.

Los objetivos específicos son:

1. Recopilar información sobre las operaciones de acabado que emplean la deformación plástica superficial.
2. Demostrar la actualidad del uso del bruñido por bola mediante los resultados de una actualizada búsqueda y revisión bibliográfica.
3. Exponer las principales características de este tipo de tratamiento mecánico

### **Tareas de la investigación**

Para alcanzar los objetivos anteriormente planteados se acometieron las siguientes tareas:

- 1.- Revisión bibliográfica de temas de Ciencia de materiales y Resistencia de materiales asociados a los procesos por deformación plástica superficial.
- 2.- Revisión bibliográfica de los principales procesos que emplean como principio la deformación plástica superficial.
- 3.- Revisión bibliográfica y compilación de la información más importante que se utiliza para la aplicación del bruñido por bola.

## **CAPÍTULO I. “TEORÍA DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA Y SU RELACIÓN CON LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA SUPERFICIAL”**

### **1.1 Elementos básicos**

#### **1.1.1 Estructura cristalina**

Los cristales de los metales tienen por lo general pequeñas dimensiones. Por esto los objetos metálicos están formados por un número muy grande de cristales. Esta estructura se llama policristalina.

En un agregado policristalino los cristales aislados no tienen la posibilidad de tomar una forma regular. La diferencia de los granos aislados consiste en la diversa orientación de la red cristalina. En el caso general, la orientación de la red cristalina en el grano es casual y con igual grado de probabilidad puede encontrarse cualquier orientación en el espacio.

Sin embargo, este estado es único. La deformación plástica en frío (laminación, estirado, bruñido, etc.) ocasiona una orientación predominante en los granos (textura). El grado de la orientación predominante puede ser diverso y varía desde la distribución casual hasta un estado tal, en que todos los cristales tienen la misma orientación.

El carácter y el grado de infracción de la regularidad o perfección de la estructura cristalina determinan en gran medida las propiedades de los metales [Gul90].

Prácticamente todos los metales industriales cristalizan en el sistema cúbico centrado de caras (CCC) y de cuerpo (CC) y en el sistema hexagonal. Entre los metales cuya producción anual supera el millón de toneladas (hierro, aluminio, cobre, zinc y plomo) todos con excepción del Zinc que es hexagonal, cristalizan en el sistema cúbico centrado de caras (el hierro puede cristalizar, además, en el cúbico centrado en el cuerpo). Los restantes metales para aplicaciones estructurales, con consumos notablemente inferiores a los cinco anteriores, cristalizan, prácticamente todos, en el sistema hexagonal y en el cúbico centrado en el cuerpo.

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

---

La estructura cristalina cúbica no solo es la más frecuente en los metales sino también la más elemental. La figura 1 corresponde a una red cúbica simple de parámetro  $a = OA = OB = OD_1$ .

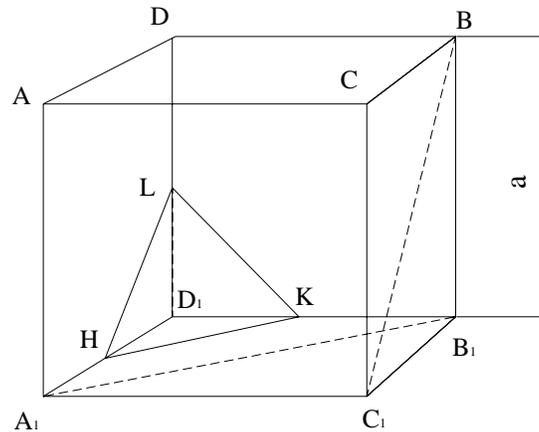


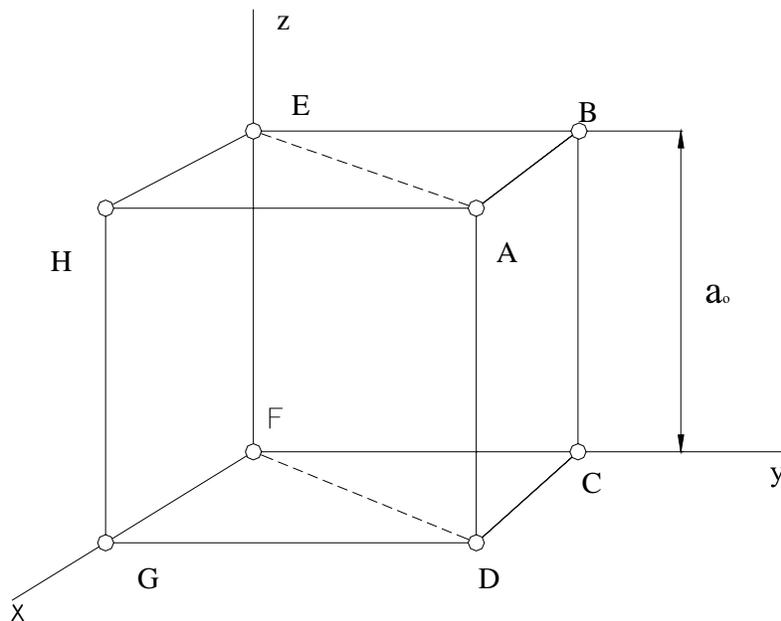
Figura 1.

Para identificar los planos cristalográficos de esa celda elemental se emplea habitualmente la notación de *Miller*.

### 1.1.2 Concepto de geometría de los cristales

Los análisis de la difracción de los rayos X muestran que los átomos en un cristal de un metal están dispuestos en un patrón tridimensional regular y repetido. El procedimiento más sencillo para representar la ordenación atómica de los metales es el que proporcionan las redes cristalinas, con las que se obtienen una imagen mental de los átomos como si fueran esferas duras situadas en posiciones determinadas de una ordenación geométrica.

La estructura cristalina más elemental es la red cúbica simple (Figura 2). Se trata del tipo de célula unidad que se encuentra en los cristales iónicos, por ejemplo, en el NaCl y LiF, pero no se encuentra en ninguno de los metales.



**Figura 2. Red cúbica simple**

A través de uno de los vértices de la célula se trazan tres ejes perpendiculares entre sí. Los planos y direcciones cristalográficas se especificarán con respecto a estos ejes utilizando los índices de *Miller*. Un plano cristalográfico se especifica en función de la longitud de sus intersecciones sobre los tres ejes, medida a partir del origen de los ejes de coordenadas. Para simplificar las fórmulas cristalográficas se utilizan los inversos de esta intersecciones, que se reducen a un mínimo común denominador para obtener los índices de *Miller* ( $h\ k\ l$ ) del plano [Per92].

Según [Gul90] las tensiones aplicadas a un material provocan su deformación. La deformación puede ser elástica, que desaparece una vez que se quita la carga, y la plástica, que se conserva después de eliminar aquella.

Por muy pequeña que sea la tensión aplicada, produce una deformación; las deformaciones iniciales son siempre elásticas y su magnitud es directamente proporcional a la tensión.

En la deformación plástica una parte del cristal se traslada (desplaza) con respecto a la otra. Si se quita la carga, la parte desplazada del cristal no retorna

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

a la posición inicial; la deformación se conserva. Estos desplazamientos se descubren en el análisis micro estructural.

Además, la deformación plástica va acompañada de una división de los bloques del mosaico dentro de los granos, y si los grados de deformación son considerables, se observa también un cambio notable en la forma de los granos y de su distribución en el espacio, produciéndose grietas entre los granos (y a veces dentro de ellos).

En la deformación plástica podemos llegar a la conclusión de que el proceso de desplazamiento se efectuará en el cristal con una facilidad tanto mayor, cuantas más dislocaciones haya en el metal. En un metal en que no haya dislocaciones, el desplazamiento sólo es posible a expensas del desplazamiento simultáneo de todas las partes del cristal. En el caso en que las tensiones no originen dislocaciones, la resistencia del metal sin dislocaciones debe ser igual a la teórica.

La importancia en la ingeniería de la estructura física de los materiales sólidos se explica en [Smi78] y depende principalmente de la disposición de los átomos, iones o moléculas que constituyen el sólido y de las fuerzas de enlace entre ellos. Si los átomos o iones de un sólido se ordenan en una disposición que se repite en tres dimensiones, forman un sólido del que se dice tiene una estructura cristalina y nos referiremos a él como un “sólido cristalino o material cristalino”. Ejemplos de materiales cristalinos son metales, aleaciones y algunos materiales cerámicos.

El ordenamiento atómico en sólidos cristalinos puede representarse asimilando los átomos a los puntos de intersección de una red de líneas en tres dimensiones. Tal red se llama retículo espacial y puede ser descrita como una disposición de puntos tridimensional infinita.

En realidad no existen cristales perfectos, sino que contienen varios tipos de imperfecciones y defectos, los cuales afectan a muchas propiedades físicas y mecánicas, que a su vez tienen repercusión sobre propiedades interesantes desde el punto de vista de la ingeniería.

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

Las imperfecciones de la red cristalina están clasificadas de acuerdo con la geometría y la forma. Las tres principales divisiones son: (1) defectos puntuales de dimensión cero; (2) defectos de línea o de una dimensión (dislocaciones); (3) defectos de dos dimensiones, los cuales incluyen superficies externas y bordes de grano interno.

La deformación en frío va modificando de modo importante algunas características del material metálico: los materiales metálicos adquieren acritud por deformación en frío.

La acritud se analiza en [Per92] como una propiedad característica del estado metálico, que no presentan los polímeros ni los materiales cerámicos. La acritud es el aumento de dureza que adquiere un material por deformación en frío.

El grado de acritud que adquiere un material depende de factores externos al material metálico pero sobre todo depende del grado de deformación en frío que el material experimente y de la naturaleza del material (sistema cristalino, energía de defectos de apilamiento, tamaño de grano, pureza del metal, etc.).

Si la carga no sobrepasa el límite convencional de fluencia, después de eliminarla no ocurrirán variaciones en el metal, pero si la carga supera el límite de fluencia, después de eliminar la carga persistirá una deformación. Si luego se vuelve a someter al metal a la acción de la carga, su aptitud para la deformación plástica habrá disminuido y el límite de fluencia se elevará, es decir, para provocar la deformación plástica habrá que aplicar una tensión mayor. Esto significa que el metal se ha hecho más resistente. El aumento de la dureza y de la resistencia a la tracción producido por la deformación plástica se llama acritud [Gul90].

A medida que aumenta el grado de deformación (disminuyendo la sección transversal), aumenta la tensión de rotura y disminuye el alargamiento relativo. La deformación plástica introduce importantes variaciones en la estructura del metal.

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

La estructura cristalina de un metal deformado plásticamente no solo se caracteriza por la deformación de la red cristalina, sino también por una determinada orientación de los granos, es decir, por su textura.

Los cristales orientados irregularmente, al ser sometidos a la acción que produce la deformación, vuelven sus ejes de mayor resistencia poniéndolos en la dirección que sigue la deformación.

Con el aumento de la deformación crece el grado de texturización y cuando los grados de deformación son grandes alcanza el 100%, es decir, todos los granos resultan estar igualmente orientados.

No debe pensarse que como resultado de la deformación se hace el grano más pequeño. En realidad solo se deforma, se aplasta y de equiaxial pasa a tener los ejes desiguales (como una torta o galleta), conservando la misma área de sección transversal.

Son muy numerosos los desplazamientos que demuestran que la traslación de una parte del cristal con respecto a la otra transcurre de acuerdo con el mecanismo de dislocación antes descrito. Estos desplazamientos se ven bien en el metal pulido (antes de la deformación) y con frecuencia recibe el nombre de rayas de *Chernov- Luders*.

Aumenta la magnitud de las tensiones internas limitadas (localizadas) por los pequeños volúmenes. Con el aumento de la deformación disminuye la densidad del metal. A medida que nos acercamos a las zonas más deformadas, la densidad disminuye. La disminución de la densidad cuando el grado de deformación plástica es grande se debe a la formación de poros dentro de los granos y entre ellos (destrucción). La disminución apreciable de la densidad comienza cuando la deformación llega a una magnitud determinada.

Por lo tanto, la deformación plástica hace que varíe la estructura interna del grano y su forma y, una vez que este alcanza una magnitud determinada, que disminuya su densidad a causa de la formación de discontinuidades [Gu190].

### 1.1.3 Teoría de las dislocaciones

Se conoce que gran parte de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los cristales reales se debe fundamentalmente a sus defectos, son éstos los que hacen posible una gran gama de comportamientos en los sólidos cristalinos por lo que la estructura, concentración, nucleación y crecimiento de los defectos es de gran interés para todo aquel que desee entender la vida y desarrollo de los materiales cristalinos.

En [Gul90] se hace un análisis profundo de la teoría de este fenómeno y se aprecia que dentro de los defectos, los más importantes son los lineales o dislocaciones. La teoría de las dislocaciones en los cristales comenzó cuando *Taylor, Orowan y Polanyi* en 1934 trataron de comprender los procesos atómicos involucrados en el deslizamiento de los cristales, cuyos hechos más relevantes eran:

a).- Una parte del cristal se desliza como una unidad a través de la parte vecina según una dirección denominada, dirección de deslizamiento, que yace en la superficie o plano de deslizamiento. La línea donde se intercepta esta superficie con la cara externa del cristal se denominó línea de deslizamiento o banda de deslizamiento. (Figura3).

b).-El espaciado de las bandas o líneas de deslizamientos así como la cantidad de deslizamiento sobre una banda son muy variables.

c).- La dirección de deslizamiento es prácticamente siempre un vector de la red de máximo empaquetamiento, es decir, en la red fcc será el (110), bcc será (111) en la hcp el (2110). (Figura4).

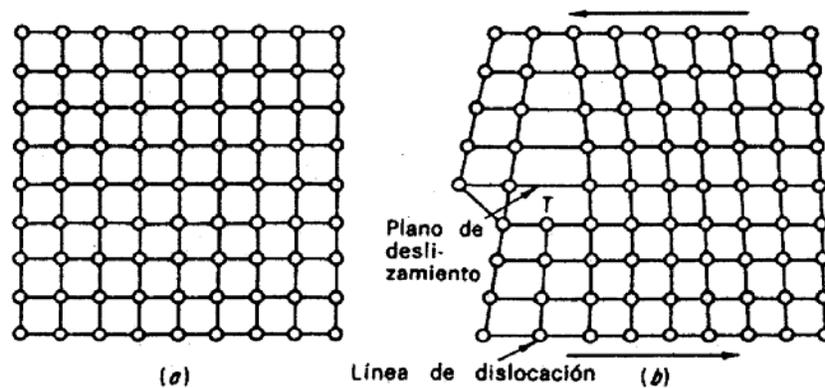


Figura 3. Plano de deslizamiento y dirección de deslizamiento.

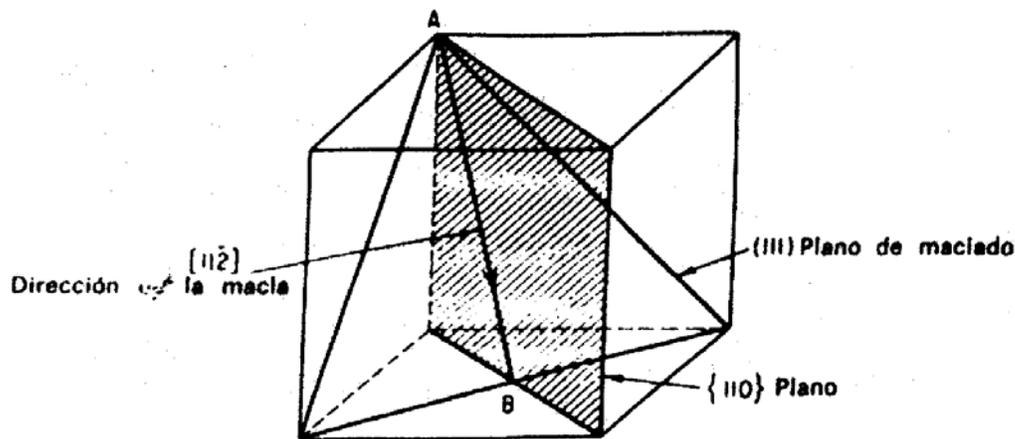


Figura 4. Plano de deslizamiento (111)

d).- El plano de deslizamiento es generalmente, pero no siempre un plano de empaquetamiento denso (111) en la fcc, (0001) en la hcp mientras que en la bcc no se define un plano determinado de deslizamiento. (Figura4).

e).- El deslizamiento comienza sobre un sistema dado (un plano y una dirección) cuando la tensión cizalladora sobre un sistema alcanza un valor crítico (Ley de *Schmid*). La componente normal del esfuerzo sobre el sistema posee un efecto muy débil. La magnitud del esfuerzo crítico de cizalladura es muy variable afectándose por la pureza del cristal, temperatura, velocidad tensional, etc.

También es necesario destacar la naturaleza cristalográfica del deslizamiento pues este ocurre siempre a lo largo de una dirección cristalográfica de máximo

empaquetamiento en el plano de deslizamiento, aún cuando la tensión aplicada no sea precisamente orientada a lo largo de esta dirección.

- **Geometría de las dislocaciones**

Podemos considerar que, en general, una dislocación tiene dos componentes, una de borde y otra de tornillo. En la figura 5 se ilustra la geometría de las irregularidades de la red cristalina descrita por estas dos componentes; éstas se concederán como dos clases de dislocaciones simples. Con objeto de simplificar, se representa una dislocación por líneas de dislocaciones, las que describen el centro de la dislocación, y están representadas en la figura 5.

El vector de *Burgers*  $b$  es una propiedad de la dislocación (ver la figura 6). Este describe simultáneamente la magnitud y dirección del deslizamiento. Un circuito de átomos alrededor de la dislocación, está incompleto por una distancia igual perfecta, que estaría completo. La longitud del vector de *Burgers* es una distancia atómica integral ya que la red cristalina debe tener continuidad a través de las regiones deslizadas y son deslizar.

Si examinamos el movimiento de una dislocación de borde y una de tornillo (figura 6), se observa que la línea de la dislocación representa el límite entre las regiones deslizadas y sin deslizar del cristal. Bajo esta condición, una línea de dislocación deberá interceptar la superficie del cristal o cortarse a sí misma en su interior. \*

\* Cuando tres dislocaciones se encuentran en un punto en un cristal (nodo), la suma de sus vectores de  $b_1 + b_2 + b_3 = 0$ .

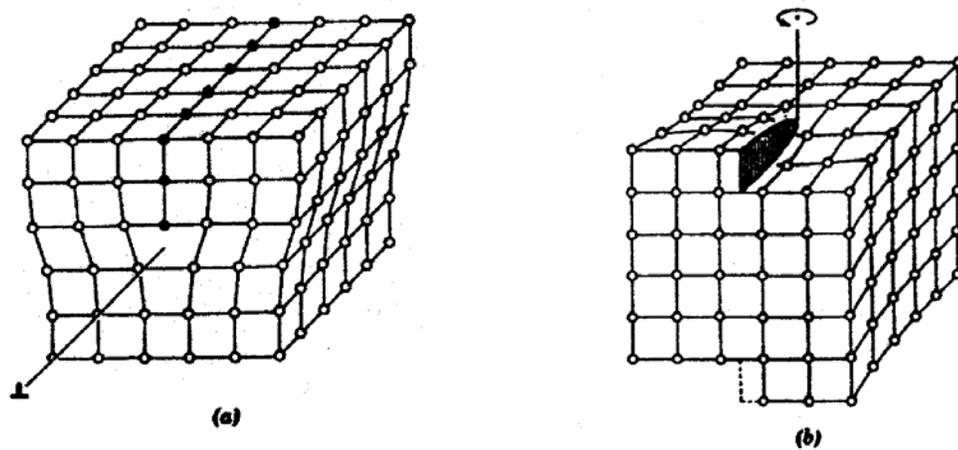


Figura 5. Geometría de las dislocaciones simples.(a) dislocación de borde y (b) de tornillo.

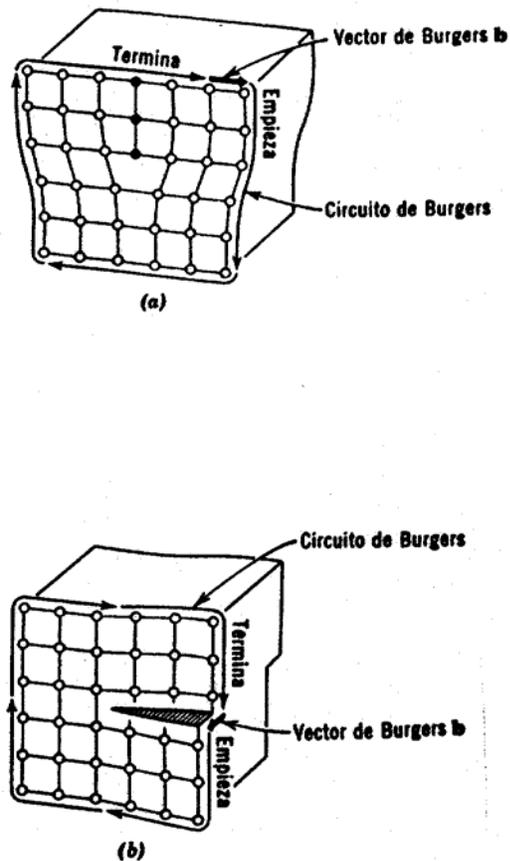


Figura 6 Vector de *Burgers* y circuito de *Burgers* de: (a) una dislocación de borde; (b) una dislocación de tornillo.

A través del cristal la línea de la dislocación puede extenderse como una dislocación pura de borde, en unas regiones, como una dislocación de tornillo en

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

otras y como un híbrido de ambas regiones diferentes a las anteriores. El vector de *Burgers* de una dislocación de borde es perpendicular a la línea de la dislocación; el de una dislocación de tornillo es paralela a la línea de la dislocación; y el de una dislocación híbrida hace un ángulo con la línea de la dislocación. Como se muestra en la figura 7, un circuito de dislocación cerrado tiene características de borde en algunas regiones, y de tornillo en otras, pero su vector de *Burgers* es el mismo en todos los puntos a lo largo de la dislocación. Observe que el signo de la dislocación cambia en lados opuestos del circuito. Entonces, si se efectúa un circuito en la dirección de las manecillas del reloj, alrededor de la dislocación de borde de la figura 7, dando cara a la sección desconectada, el vector de *Burgers* será igual al que se obtenga al hacer un circuito similar alrededor de la dislocación de tornillo, después de seguir la línea de la dislocación a través del cristal hasta la cara, en la sección desconectada, de la cual emerge ésta. Observe que esto es similar a efectuar un circuito en la dirección contraria a las manecillas del reloj, alrededor de la dislocación de tornillo de cara a la superficie desconectada, pero desde fuera del bloque. El vector de *Burgers* y la línea de la dislocación de una de borde o mixta, definen al plano de deslizamiento. En condiciones normales estas dislocaciones están obligadas a moverse en este plano de deslizamiento. Por otro lado, el vector de *Burgers* y la línea de la dislocación de una pura de tornillo, son paralelos y no definen un plano único. La dislocación de tornillo queda entonces en libertad de moverse en cualquiera de los diferentes planos en los cuales está contenido el vector de *Burgers*.

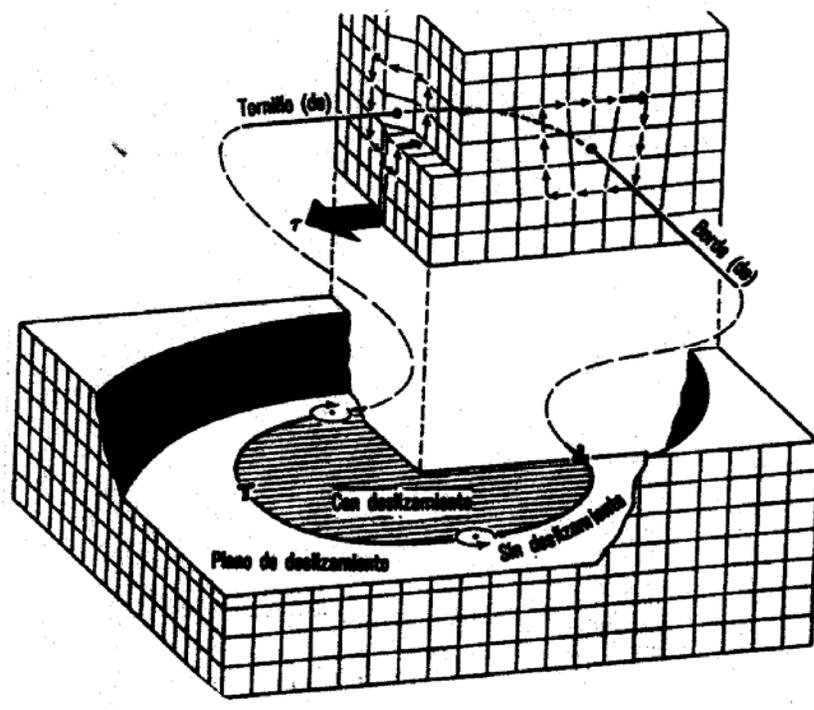


Figura 7. Geometría de un circuito de dislocación cerrado mostrando en una sección separada regiones con dislocaciones puras de borde y de tornillo (helicoidal)

- **Energía de una dislocación**

Las dislocaciones no son termodinámicamente estables. Su presencia siempre aumenta la energía libre del cristal. Sin embargo, es imposible eliminar las dislocaciones de la red cristalina completamente, y las retenidas adquieren configuraciones metaestables. Considerando la energía de una dislocación se puede tener argumentos para explicar lo siguiente:

- 1.- ¿Por qué se requiere un esfuerzo menor para mover una dislocación, que para mover un plano atómico completo a través de la misma distancia?
- 2.- ¿Por qué un material cristalino se endurece con un aumento en la deformación?
- 3.- ¿Por qué el recocido y la recristalización ablandan un material?
- 4.- ¿Por qué se forman límites de grano de ángulo pequeño y por qué son tan estables?
- 5.- ¿Por qué el endurecimiento por dispersión o precipitación aumenta el esfuerzo de cedencia de cristales?

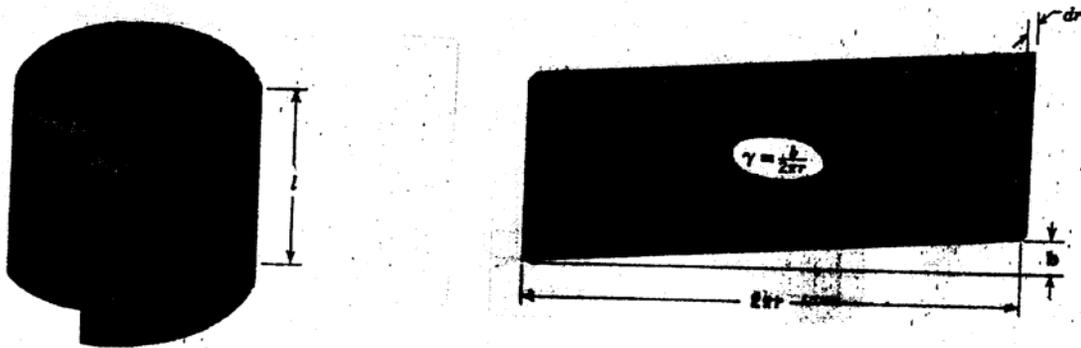
CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

6.- ¿Por qué las dislocaciones en cristales CCC se dividen en dislocaciones parciales?

7.- ¿Por qué las figuras de corrosión indican en dislocaciones parciales, para hacer una estimación de la energía de una dislocación?

Considere un cristal cilíndrico de longitud  $l$ , con una dislocación de tornillo de vector de *Burgers*  $b$  a lo largo de su eje. La deformación cortante elástica  $\gamma$ , en una sección angular delgada de radio  $r$  y grueso  $dr$  es (ver la figura 8.):

en donde  $b = b$        $\gamma = b / 2 \pi r$



**Figura 8. Modelo geométrico para el cálculo de la deformación cortante alrededor de una dislocación de tornillo.**

La energía por unidad de volumen de la región anular delgada  $dE / dV$  es:

$$dE / dV = 1 / 2 \gamma^2 = 1 / 2 G \gamma^2 = G / 2 (b / 2\pi r)^2$$

en donde  $G$  es el módulo elástico cortante. El volumen del anillo es:

$$dV = 2 \pi r l dr$$

y de esto modo:

$$dE = IGb^2 / 4 \pi . dr / r$$

La energía de deformación resultante de la presencia de esta dislocación, puede calcularse por integración desde algún límite inferior  $r_0$  hasta otro superior  $R$ .

$$E = \int_{r_0}^R Gb^2 / 4\pi . dr / r = IGb^2 / 4\pi \ln (R / r_0) + E_0$$

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

Si se escoge como límites  $\gamma_0 = 0$  o  $R = \infty$ , la integral es infinita, lo cual está fuera de la realidad. La dificultad es escoger  $\gamma_0 = 0$  se debe a que la ley de *Hooke* no es válida para la elevada deformación presente en el centro de la dislocación. El valor de  $R = \infty$  está también fuera de la realidad, ya que para valores grandes de  $\gamma$ , el campo de deformación de una dislocación, se cancela con el de otras. Se ha demostrado que si  $\gamma_0$  se toma como  $b$ , la energía de deformación real dentro del núcleo,  $E_0$ , es sólo una fracción pequeña de la energía total y puede despreciarse. Ya que la energía es poco sensible a  $R/\gamma$ , la relación usada es  $\ln(R/\gamma_0) = 4\pi$ . Dentro del límite de estas aproximaciones la energía de la dislocación es, tornillo:

$$E \approx IGb^2$$

mientras que la energía de una dislocación de borde está dada por:

$$E = \frac{1}{1-\nu} \cdot IGb^2 / 4\pi \ln(R/\gamma_0) + E_0 \approx IGb^2 / 1-\nu$$

donde  $\nu$  es el Coeficiente de *Poisson*. Si  $\nu = 1/3$ , la energía de una dislocación de tornillo de igual longitud. Debido a que la energía de una dislocación más estable son aquéllas con los vectores de *Burgers* más pequeños (vectores en direcciones compactas). Las ecuaciones muestran también que la energía de línea es equivalente a una tensión superficial, una energía de línea es equivalente a una tensión lineal. De esta manera una dislocación curvilínea tendrá una tensión lineal  $T$ , esto es un vector actuando a lo largo de la línea de tal manera que:

$$T = \partial E / \partial l \approx Gb^2$$

La figura 9 indica la geometría de los campos de esfuerzos alrededor de las dislocaciones de borde y de tornillo.

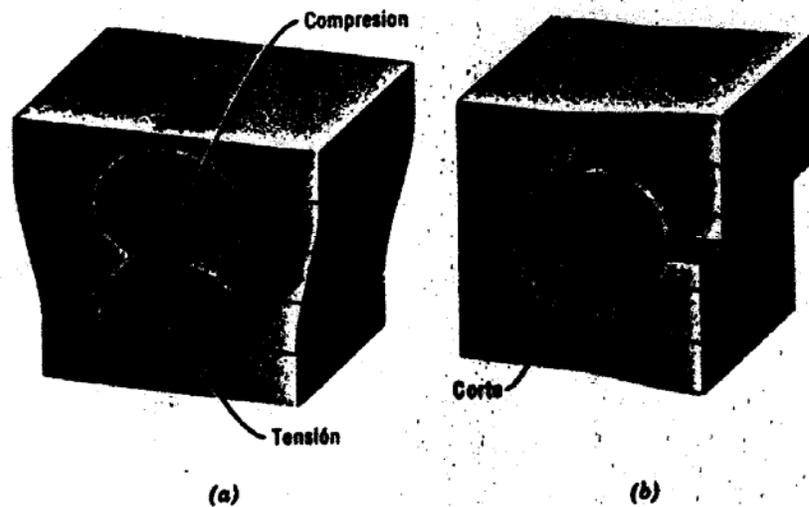


Figura 9. Geometría de los campos de esfuerzo y deformación alrededor de:  
(a) una dislocación de borde      (b) una de tornillo

- **Movimiento de dislocaciones**

Como el caso más simple de movimientos de dislocaciones consideramos el movimiento en un monocristal de la dislocación de borde de la figura 10 la cual se mueve hacia la derecha bajo la influencia de un esfuerzo cortante  $\tau$ . Este deberá realizar un trabajo para separar al átomo 1 de su vecino inmediato, el átomo 2; al mismo tiempo, sin embargo, el átomo 3 se desplaza a una posición más cercana a la distancia de equilibrio con su vecino inmediato, el átomo 4, cediendo así una cantidad de energía elástica almacenada caso igual a la que se almacena al desplazar el átomo 1. Si el esfuerzo mueve la dislocación hacia la derecha, ésta emerge de la superficie del bloque y da origen a un escalón (ver la figura 11). En este momento la dislocación se ha desplazado a través del plano de deslizamiento dando origen a una unidad de deslizamiento. Note que la dislocación de borde de la figura 10 se mueve en dirección paralela a su vector de *Burgers*, mientras que la dislocación de tornillo lo hace en forma perpendicular.

CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

Es fácil de decir que una misma deformación puede producirse con mucho menos trabajo si hay una dislocación presente.

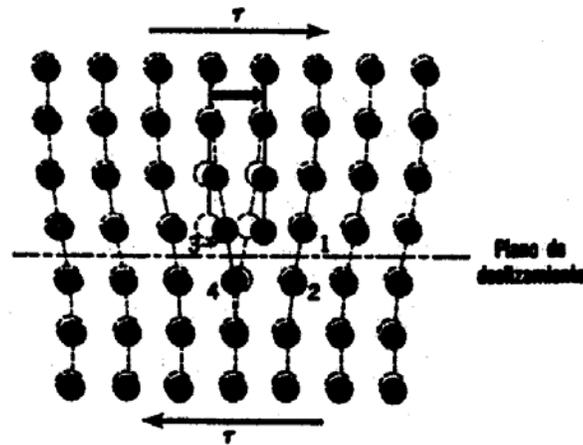


Figura 10. Cambios de ordenación atómica alrededor de una dislocación de borde a medida que ésta se desplaza bajo la acción de un esfuerzo.

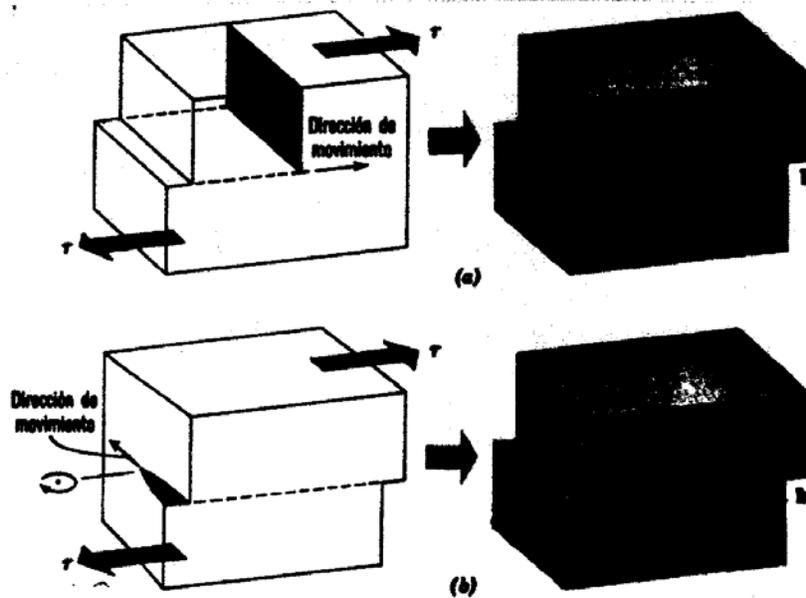


Figura 11. La creación de un escalón de deslizamiento por: (a) un dislocación de borde y (b) una dislocación de tornillo, a medida que cada una recorre el plano de deslizamiento bajo la acción de un esfuerzo cortante.

Supongamos ahora que cuando la dislocación de borde se desliza a lo largo de su plano de deslizamiento, encuentra a su paso un obstáculo que no puede

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

cortar tan fácilmente como el material de la matriz (como, por ejemplo, un par de partículas de precipitado señaladas con los puntos B y C de la figura 12). El esfuerzo aplicado produce una fuerza "normal"  $T \sin \theta$  sobre el segmento de la línea de la dislocación, el cual se arquea entre los puntos fijos. Esta fuerza es compensada por la componente paralela de la tensión lineal de dislocación  $T$ , obteniéndose entonces:

$$T \sin \theta = 2T \sin \theta$$

en donde  $l$  es la distancia entre B y C. Sustituyendo  $T$  en la ecuación por su equivalente de la ecuación ( $T = Gb$ )

$$T = 2Gb / l \cdot \sin \theta$$

De esta ecuación se puede deducir que se requiere un esfuerzo creciente para producir un arqueamiento continuado del segmento de la línea de la dislocación hasta el momento en que éste sea semicircular; en este momento  $\theta = 90^\circ$  y el esfuerzo  $T$  adquiere su valor máximo:

$$T_{\text{máx}} = 2Gb / l$$

De acuerdo con la ecuación, una dislocación que no encuentre ningún obstáculo ( $\sin \theta = 0$ ), debería ser capaz de deslizarse con un valor de esfuerzo infinitamente pequeño. Sin embargo, si ésta encuentra obstáculos, el esfuerzo requerido será mayor entre menor sea el valor de  $l$ .

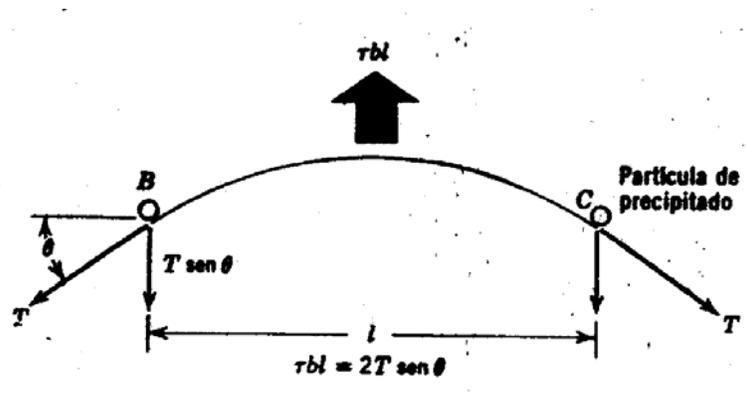


Figura 12. Modelo geométrico para el cálculo de la tensión lineal de una dislocación, desarrollada cuando ésta encuentra los obstáculos B y C y empieza a doblarse entre ellos.

Bajo ciertas circunstancias es posible que las dislocaciones eviten los obstáculos cambiándose a otros planos de deslizamiento. La figura 13 a) ilustra este cambio

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

efectuado por una dislocación de tornillo durante se deslizamiento; el proceso se denomina deslizamiento cruzado. Ya hemos mencionado antes que una dislocación de borde o mixta está por lo general restringida a moverse en un plano que contiene la línea de la dislocación y el vector de *Burgers*. Sin embargo, si puede eliminarse la hilera inferior de átomos de la mitad de plano extra en una dislocación de borde, o si se agrega una hilera extra de átomos, la mitad de plano terminará entonces en un plano paralelo contiguo y la dislocación estará entonces en libertad de moverse en este nuevo plano. Este proceso denominado escalamiento de dislocaciones se realiza por difusión de vacancias a la dislocación y por translación de átomos de la hilera inferior en la mitad extra de plano hacia vacancias adyacentes; del mismo modo, la dislocación puede hacer un escalamiento descendente produciendo vacancias en el volumen inferior adyacente a la mitad de plano. Debido a que la concentración de equilibrio de vacancias aumenta con la temperatura, la posibilidad de escalamiento de dislocación es sensible a una variación de este parámetro. El escalamiento de una dislocación de borde se ilustra en la figura 13 b).

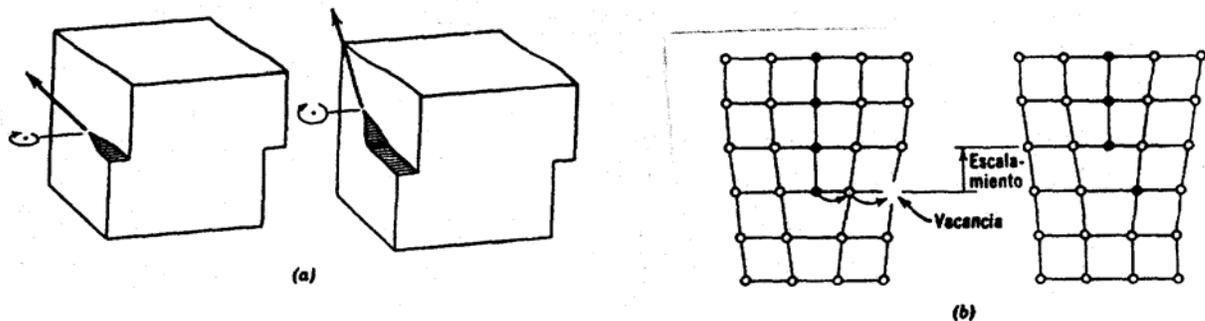


Figura 13. (a) Deslizamiento cruzado de una dislocación de tornillo, y (b) escalamiento de una dislocación de borde.

*Pierls* y *Nabarro* calcularon que la tensión para el movimiento de las dislocaciones en una estructura era:

$$T_0 = 2G / 1 - u \cdot \exp - (2\pi a/b (1 - w))$$

u: Módulo de *Poisson*

w: Ancho de la dislocación

a: Distancia entre planos

b: Distancia entre los átomos en el plano de deslizamiento.

Así mientras más separados están los planos y más compacto sea el plano de deslizamiento menor será la tensión necesaria para mover las dislocaciones; es por eso que en todo proceso de deformación plástica se ha observado que las dislocaciones se mueven por aquellos planos de empaquetamiento denso.

- **Interacciones entre dislocaciones paralelas**

Si los campos de esfuerzo de dos dislocaciones se cancelan entre sí, las dislocaciones se atraen y, si éstos se refuerzan, las dislocaciones se rechazan. Por medio de reacciones mutuas las dislocaciones modifican su energía libre total. La razón de cambio de la energía con la distancia de la fuerza entre ellas.

Las ecuaciones que ha continuación veremos expresar los componentes angulares y radiales  $(F/e)_n$  y  $(F/e)_\theta$  de la fuerza por unidad de longitud  $F/e$ , entre dos dislocaciones con línea paralelas dadas en coordenada polares.

$$(F / l) = cb_1 \cdot b_2 / r \quad (\text{para dislocaciones de borde y de tornillo})$$

$$(F / l)_o = \{ Cb_1 \cdot b_2 \sin 2\theta \quad (\text{dislocaciones de borde})$$

$$\{ \text{cero} \quad (\text{dislocaciones de tornillo})$$

Aquí la fuerza es proporcional al producto escalar de los dos vectores de *Burgers*, y C es igual  $G / 2\pi$  para dislocaciones de tornillo y  $G / [2\pi (1 - \nu)]$  para dislocaciones de borde,  $\theta$  es el ángulo entre el plano de deslizamiento y el plano que contiene las líneas de las dislocaciones mientras que r es la distancia de separación entre éstas.

Las dislocaciones de tornillo de signo opuesto e igual vector de *Burgers* se atraerán con una fuerza por unidad de longitud de  $Gb_2 / \pi r$ . Si no existen obstáculos se acercan y aniquilan una a otra dejando una red cristalina perfecta. Las dislocaciones de tornillo con signos y vectores de *Burgers* iguales se rechazan con una fuerza por unidad de longitud de la misma magnitud.

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

Debido a sus campos de esfuerzo es factible un gran número de interacciones entre las dislocaciones de borde paralelas. Bajo la acción del mismo esfuerzo cortante las dislocaciones de borde de signo opuesto se desplazan en direcciones opuestas, produciendo un deslizamiento en el mismo sentido, como se muestra en la figura 14. A continuación se hace un resumen de varias interacciones simples entre dislocaciones de borde paralelas. Estas mismas se ilustran en la figura 15.

1.- Dos dislocaciones de borde paralelas, con signos iguales y en un mismo plano de deslizamiento o en planos cercanos, se rechazan. Dos dislocaciones de borde paralelas, de mismo signo, pero en planos muy separados uno del otro, se atraen o rechazan dependiendo de que el ángulo entre la dirección de deslizamiento y una línea uniendo las dos dislocaciones, sea respectivamente mayor a  $45^\circ$ .

2.- Dos dislocaciones paralelas, con signo opuesto y en el mismo plano de deslizamiento o en planos muy cercanos, se atraen: a).- si están en el mismo plano se acercan, aniquilan una a la otra y dejan una red cristalina perfecta; b).- si están en planos vecinos se atraen y aniquilan, pero dejan una hilera de vacancias a una de átomos intersticiales.

3.- Los átomos de soluto intersticiales, de tamaño pequeño, emigran a la región bajo tensión de una dislocación de borde ya que allí contribuyen a disminuir la energía de deformación; en forma similar, los átomos sustitucionales pequeños emigran a la región de compresión de la misma dislocación, en donde reemplazando a un átomo de la matriz, de mayor tamaño, disminuyendo la energía de deformación. Por el contrario, debido a que no hay un cambio en volumen asociado con una dislocación de tornillo, no existe una tendencia similar a la anterior para la locación de los átomos de soluto.

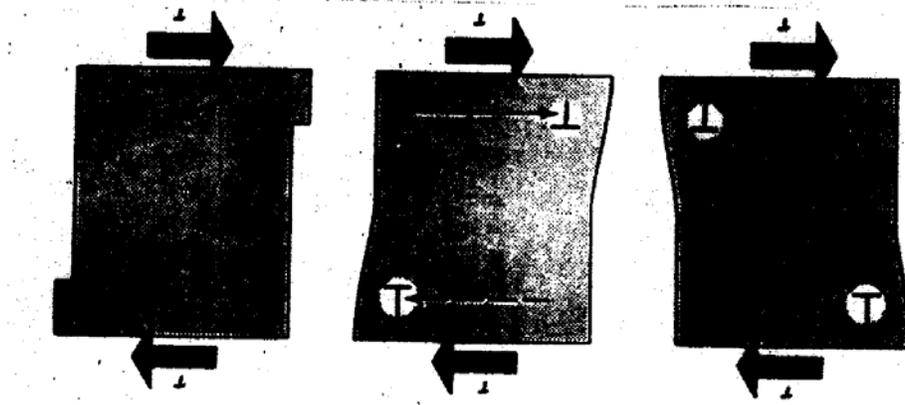


Figura 14. Bajo la acción de un esfuerzo cortante  $T$ , las dislocaciones de signo opuesto se desplazan en direcciones opuestas produciendo un deslizamiento en el mismo sentido.

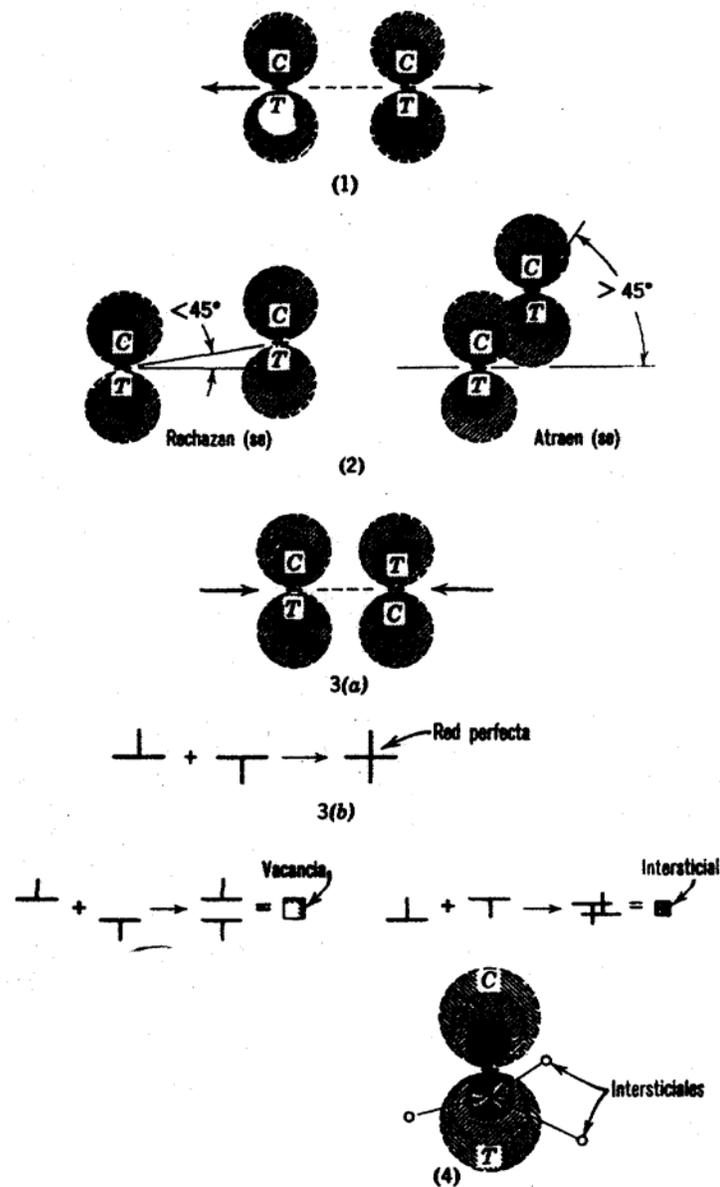


Figura 15. Interacciones simples entre dislocaciones paralelas. Las regiones marcadas C y T son, respectivamente, las zonas de compresión y tensión en el área inmediata a la dislocación.

- 1.-Dislocaciones similares en planos iguales o muy cercanos se rechazan.
- 2.-Dislocaciones similares en planos muy separados pueden atraerse a rechazarse dependiendo del valor del ángulo entre el plano de deslizamiento y la línea que une las dos dislocaciones.

CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

3.- Dislocaciones diferentes en los mismos planos o en planos cercanos se atraen.

a).- Si están en el mismo plano se aniquilan y dejan una red cristalina perfecta.

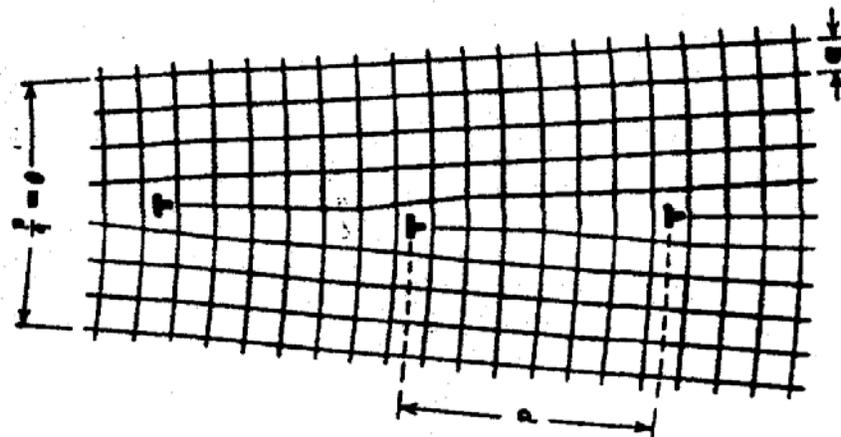
b).- Si están en planos adyacentes se aniquilan y dejan vacancias o intersticiales.

4.- Los átomos intersticiales pequeños son atraídos por la región de tensión en la dislocación.

La energía de un cristal que contiene dislocaciones de borde puede disminuir si éstas se ordenan una arriba de la otra, formando paredes estables de dislocaciones, como las mostradas en la figura 16. Estas paredes son en realidad un límite de grano de ángulo pequeño el cual se conoce también como un límite de flexión. La estabilidad temporal de los límites de flexión, es un resultado de la ausencia de esfuerzos en los planos de deslizamiento de las dislocaciones individuales así como de la cancelación de campos de esfuerzo de largo alcance. El ángulo de error de orientación a través de este límite es:

$$\text{sen } \theta = \theta = b / d$$

en donde d es la distancia entre las dislocaciones. Los límites de grano de pequeño, pocas veces son sólo límites de flexión; en vez de esto, las redes cristalinas están normalmente fuera de fase una con la otra.



**Figura 16. Límite de grano de ángulo pequeño producido por una ordenación lineal de dislocaciones de borde del mismo sentido.**

Mediante la teoría de las dislocaciones es posible explicar:

- La deformación plástica y elástica
- La rotura de los materiales
- El fenómeno de acritud
- El endurecimiento de algunas soluciones sólidas.

#### **1.1.4 Teoría y concepto de la deformación plástica**

Según [Smi78] cuando una pieza de metal es sometida a una fuerza de tensión uniaxial, se produce una deformación del metal. Si vuelve a sus condiciones originales cuando la fuerza cesa, se dice que el metal ha experimentado una deformación elástica. Si el metal es deformado hasta el extremo de que no pueda recuperar completamente sus dimensiones originales, se dice que ha experimentado una deformación plástica. Durante esta deformación los átomos del metal son desplazados permanentemente de sus posiciones originales y toman nuevas posiciones, la capacidad de ser deformados plásticamente en gran extensión sin sufrir fractura, es una de las propiedades de los metales más útil para la ingeniería.

Para [Per92] la deformación plástica de un metal no solamente pone en movimiento sus dislocaciones sino que genera gran número de nuevas dislocaciones a partir de las previas existentes (mecanismo de *Frank Read*). Las dislocaciones, al desplazarse (y producir una ultramicroplasticidad), demandan esfuerzos externos crecientes para poder proseguir su movimiento.

La deformación plástica de un monocristal en frío, que resulta la integración de micro deformaciones producidas por movimiento de dislocaciones, endurece progresivamente al cristal.

La variedad de materiales metálicos aptos que existen para deformarse implica que existan variadas formas concretas de alcanzar el inicio de sus condiciones de fluencia y las correspondientes funciones de fluencia. Sin embargo algunas propiedades básicas de las funciones iniciales de fluencia conciernen sólo a la

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

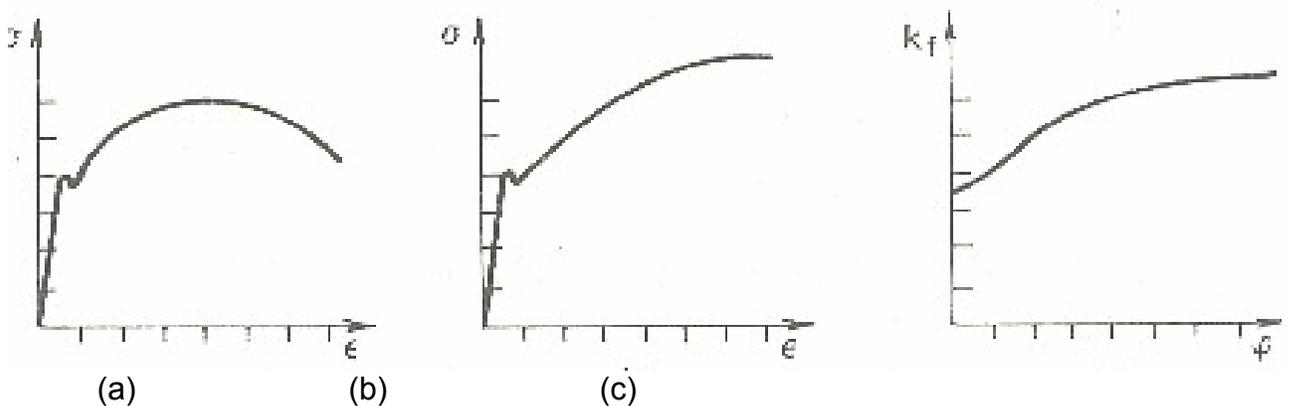
---

clase de materiales estables; esto es, la curva tensión ( $\sigma$ )-deformación ( $\epsilon$ ), en su parte plástica:

$$\sigma = K\epsilon^n$$

Como se ve, la función crece uniformemente, y cualquier incremento de  $d\sigma > 0$  provoca un positivo incremento en la deformación  $d\epsilon > 0$ ; por fortuna, los principales materiales de importancia ingenieril, desde el punto de vista de la conformación, pertenecen a este grupo de materiales.

La idea de caracterizar la plasticidad para operaciones de conformación sobre las bases de los datos clásicos del ensayo de tracción es predominante desde los últimos 30 años; pero si se estudia con detenimiento la literatura técnica, se observa que tal aproximación esta siendo considerada y sobre esa misma base, otras mejores aproximaciones comienzan a ser buscadas



**Figura 17. Paso de una curva de tensión-deformación convencional obtenida en un proceso de tracción de la curva de fluencia del material: a) curva convencional, b) curva de tensiones reales, c) curva de tensiones reales una vez eliminada la parte elástica.**

En la figura 17, se muestra la representación convencional de una curva tensión vs. deformación. Es sabido que el valor de la tensión es el coeficiente de la fuerza aplicada a la probeta sobre el área inicial de la misma, por lo cual aparentemente, a partir de una deformación determinada, el valor de tensión necesario para seguir deformando la probeta parece disminuir. Si se plotea en ( $\sigma$ ) el valor real de la fuerza aplicada sobre el área instantánea, desaparece este efecto obteniéndose la curva b. En nuestro caso, que perseguimos la

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

deformación plástica apreciable, esta representa un valor muy pequeño comparados con las antes mencionadas, por lo que se desprecian (curva c). Esta curva es la curva de fluencia o curva plástica del material.

Los factores principales que actúan sobre la resistencia de conformación  $K_f$  son los siguientes:

- **Material:** La resistencia de conformación  $K_f$  depende de la composición química del material aumentando con el contenido de carbono.
- **Grado de conformación:** Representa el comportamiento normal de todos los materiales cuando la temperatura de trabajo es inferior a la de recristalización, la resistencia de conformación  $K_f$  aumenta a medida que aumenta el grado de conformación, es decir, que para continuar deformando un material, hacen falta valores mayores de tensiones.
- **Temperatura de conformación:** Se habla de conformación en caliente cuando la temperatura a la cual se realiza el proceso de conformación es mayor que la de recristalización del material conformado. En comparación con los procesos en frío donde la temperatura a la cual se realiza el proceso de conformación es menor que la de recristalización del material conformado, en caliente se obtienen valores de  $K_f$  muchos menores, Figura18.

CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

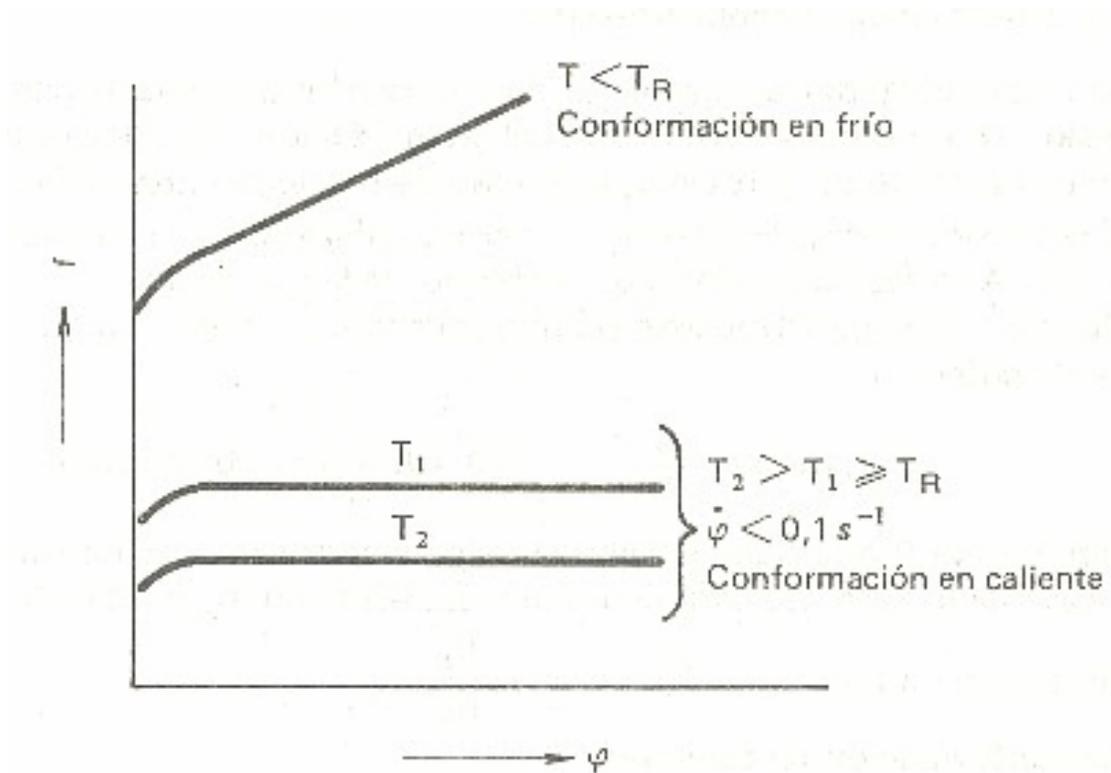


Figura 18. Curvas de fluencia para un mismo material a diferentes temperaturas.

- **Velocidad de conformación:** En la conformación en frío este efecto es despreciable.

	Conformación en frío ( $T < T_R$ )	Conformación en caliente ( $T > T_R$ )
<b>Influencia fundamentales sobre <math>K_f</math></b>	Material de la pieza. Grado de conformación	Velocidad de conformación Temperatura de conformación
<b>Influencia menores sobre <math>K_f</math></b>	Velocidad de conformación Temperatura de conformación	Grado de conformación
<b>Ventajas</b>	Aumento de la resistencia por endurecimiento en frío Mayor exactitud del trabajo	Menores valores de fuerzas Mayor capacidad de conformación
<b>Desventajas</b>	Mayores valores de fuerzas y tensiones. Capacidad de conformación limitada.	Necesidad de instalación de calentamiento Menor exactitud del trabajo

Tabla 1. Comparación de la conformación en frío y en caliente.

En la Tabla 1 se resumen los factores que afectan a  $K_f$  en la conformación en frío y en caliente.

El análisis exacto del desarrollo de los procesos de conformación se está intentando realizar, según algunos reportes novedosos, por el seguimiento a cada instante del continuo cambio en forma y posición de la superficie de fluencia; el estudio aproximado de la transformación de la superficie de fluencia se puede realizar por los criterios del endurecimiento por deformación.

En las operaciones de conformación del metal, en que unas zonas están obligadas a no deformarse mientras otras son forzadas a adaptarse a una forma determinada, es necesario que el metal pueda deformarse sin que se produzcan deformaciones extremas localizadas. El alargamiento uniforme es una medida de tal posibilidad.

El parámetro de endurecimiento es un valor intrínseco para cada material y obviamente depende del estado alcanzado por la deformación; en general, las relaciones de éste y la deformación plástica son no algebraicas. El coeficiente de endurecimiento ( $n$ ) caracteriza además, el cambio estructural en el material debido a la deformación plástica. Aunque la acritud es siempre creciente con la deformación, no siempre se acepta la tesis planteada por los investigadores *A. Chokshi* y *J. A. Pero-Sanz Elorz*, en cuanto a que el coeficiente  $n$  es un indicador del ritmo creciente de la acritud. En este sentido otros autores afirman que el crecimiento de la acritud queda definido en todo caso, por la tangente  $d\sigma/d\varepsilon$  a la curva del modelo de *Ludwick* y, por tanto, resulta igual a:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = n \cdot K \cdot \varepsilon^{n-1}$$

El ritmo de la acritud, aún siendo proporcional al coeficiente de endurecimiento ( $n$ ), varía con la deformación, con el cociente de los valores  $\sigma/\varepsilon$  alcanzados hasta ese instante en el proceso de deformación, y por tanto disminuye con la deformación.

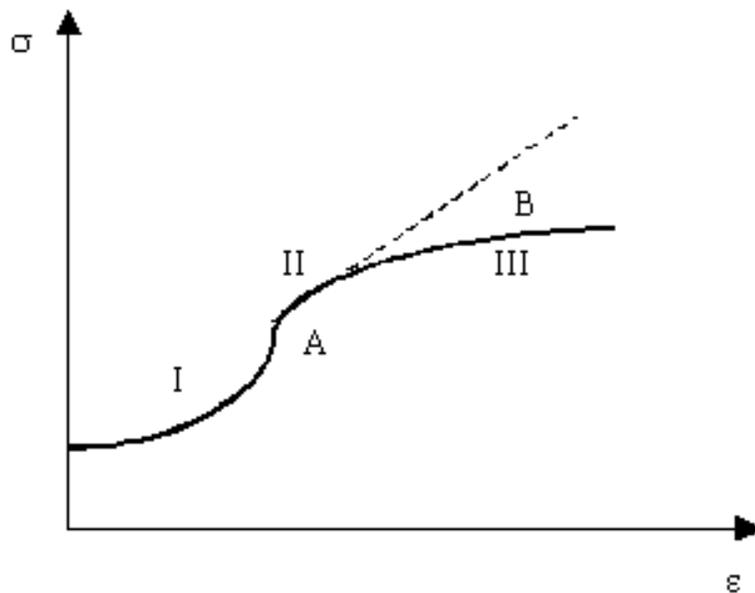


Figura 19. Estado genérico en la curva de endurecimiento por deformación.

En la figura 19 se observan las zonas siguientes:

- **Zona I**, Es una zona de baja sensibilidad al endurecimiento por deformación, sólo se manifiestan pequeños cambios en la dureza del material.
- **Zona II**, Se considera como etapa de flujo laminar, ocurriendo un incremento de la dureza y una alta sensibilidad del material al endurecimiento.
- **Zona III**, Caracterizada por un incremento en la dureza y un decrecimiento en la sensibilidad al endurecimiento por parte del material.

En resumen, como el alargamiento uniforme es similar al coeficiente de endurecimiento, se puede deducir que se comportará bien durante la deformación un metal con elevado coeficiente de endurecimiento, o lo que es lo mismo, mientras mayor sea el valor de  $n$ , mayor deformación aceptará el material antes de la estricción: porque precisamente el endurecimiento evita que la estricción siga teniendo lugar.

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

El fundamento metalúrgico del endurecimiento (o acritud) son los defectos cristalinos lineales, dislocaciones cristalinas, existentes en el interior de los cristales, su multiplicación durante la deformación en frío y las reacciones entre ellas a través del curso de esa deformación. Otra conclusión importante a plantear, que se desprende de los trabajos investigativos consultados, es que sobre el coeficiente de endurecimiento influyen, fundamentalmente:

- La naturaleza de la carga actuante.
- La velocidad de aplicación de la carga externa.
- El sistema cristalino al que pertenece el material.
- La energía de los defectos internos (dislocaciones).
- El tamaño del grano.
- La composición química y la pureza del material.
- El estado en que se encuentra el material.

Desde el punto de vista matemático, un modelo plástico queda perfectamente definido por varios elementos básicos. Estos elementos básicos son:

- Criterio de plasticidad.
- Ley de fluencia.
- Ley de rigidización.
- Criterio de rotura.

Existe una superficie denominada superficie de fluencia que esta muy vinculada con estos elementos básicos. Esta superficie de fluencia, no es más que el contorno que delimita el dominio elástico y a la ecuación que lo define analíticamente en el hiperespacio de tensión, se le denomina criterio de plasticidad. La superficie de fluencia puede evolucionar durante los procesos de plastificación, debido a que las deformaciones permanentes que va sufriendo el material modifica su estructura.

Las superficies de fluencia pueden expandirse, contraerse o mantenerse constantes. En el caso que el dominio elástico se amplía, es decir, la superficie

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

de fluencia se expande, se dice que el material es rigidizable, el caso contrario se denomina reblandeciente y si permanece constante, es un plástico perfecto.

Se denomina superficie de rotura a la zona del espacio de tensiones que limita el dominio hasta donde el material puede experimentar rigidización. Al llegar a la superficie de rotura, las tensiones permanecen constantes y solo se producen deformaciones plásticas. En los materiales perfectamente plásticos estas dos superficies coinciden. En los materiales rigidizables la superficie de rotura puede coincidir con la superficie última de fluencia o ser un lugar geométrico de posición singular sobre la familia de curvas de fluencia.

Como ya se ha señalado, durante el proceso de plastificación la superficie de fluencia evoluciona, cambia de forma y magnitud. Para establecer una teoría matemática de la plasticidad es necesario precisar cómo cambia esta superficie de fluencia, es decir, definir una función de carga completa. Con relación a este aspecto se han realizado varios trabajos, los cuales definen las leyes de rigidización. Al respecto otras investigaciones se han hecho, como la definición de la curva de fluencia inicial, la rigidización isotrópica, la cinemática, la cinemática modificada, las superficies de cargas planas actuando independientemente.

Existen otras teorías matemáticas de plasticidad que parten de la simplificación de admitir que la función de potencial plástico coincide con el criterio de plasticidad. A esta hipótesis de trabajo se denomina ley de fluencia asociada o ley de normalidad, ya que en los espacios de tensión de incrementos de deformación, el vector representativo de estos últimos es normal a la superficie de fluencia. Esta regla de normalidad permite demostrar importantísimos teoremas como el de unicidad de la distribución de tensiones bajo determinadas condiciones de contorno de la solución plástica, como punto de acumulación de soluciones incompletas.

Para formular una verdadera teoría matemática de la plasticidad es necesario tener claros los postulados de estabilidad y sus consecuencias:

- Continuidad

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

---

- Consistencia
- Irreversibilidad (crecimiento positivo de la entropía).
- Unicidad.

Los dos primeros postulados quedan establecidos al definir los procesos de carga en relación con la aparición de deformaciones plásticas. La tercera condición queda definida suficientemente con un comportamiento convexo del potencial plástico. La unicidad de la solución plástica fue demostrada con anterioridad estableciendo la identidad entre el potencial plástico y la función de fluencia. Desde el punto de vista general se ha formulado un principio muy abarcador y profundo: el postulado de elasticidad, el cual toma en cuenta los efectos de estabilidad local y general. La regla de la normalidad es una consecuencia inmediata de dicho postulado y de ella se deduce la unicidad de la solución.

Como ya ha sido señalado, otro de los elementos básicos que guardan una relación muy estrecha con las invariantes de los modelos plásticos y elastoplásticos es el criterio de rotura o fallo, el cual presenta una importancia primordial en la obtención y formulación de estos modelos.

Después de haber realizado un análisis detallado de la teoría de plasticidad, se llega a precisar una de las dificultades esenciales que se presentan en el proceso de obtención y aplicación de las ecuaciones constitutivas derivadas de esta teoría, debido a que las relaciones tensión-deformación en estos materiales plásticos viene dada por una expresión diferencial. Estas expresiones no tiene solución exacta por integración, porque la deformación depende de la trayectoria de tensiones del estado inicial al final, entre otros aspectos y condiciones que debe cumplir el tensor de plasticidad, lo que implica recurrir a soluciones incrementales, donde se simula el proceso de plastificación. Este inconveniente matemático complica y dificulta la aplicación y diversificación de la teoría de plasticidad en la solución de diferentes problemas de ingeniería, con el uso de los modelos plásticos y elastoplásticos.

También se puede destacar que los modelos plásticos y elastoplásticos, a pesar de tomar en cuenta el fenómeno de la rotura del material, no resuelven de forma general e integral el fenómeno de modelación del estado tenso-deformacional en un punto de un material dado, porque desprecian, al igual que los modelos elásticos, la esencia no estacionada de los fenómenos físicos reales.

## **1.2 Mecanismos de endurecimiento superficial**

Según [Cal98] se han postulado diversas teorías para explicar los mecanismos endurecimiento y la consolidación de los sólidos, y con su ayuda se han desarrollado nuevos materiales.

Es innegable que la estructura es un factor primordial para definir el comportamiento mecánico de los sólidos. Este parámetro depende en primer lugar de la composición química y, además, de los procesos mecánicos y térmicos posteriores; estos últimos incluyen la fundición, sinterización, trabajado en caliente y tratamientos térmicos. Estas etapas de la producción afectan las propiedades mecánicas debido a su efecto en el tamaño de grano, gradientes de concentración, inclusiones, huecos, fases metaestables, fases dispersas y otros tipos de imperfecciones cristalinas. Ya se indicó que el endurecimiento por deformación (cuyo origen es la acumulación de dislocaciones durante la deformación plástica), es uno de los mecanismos más importantes de consolidación de los metales. También es importante la descripción del endurecimiento por difusión.

- **Deformación en frío**

En la laminación, estirado y otros procesos de deformación en frío, aproximadamente el 90 por ciento de la energía requerida se disipa como calor. El resto se almacena en la red cristalina aumentando así la energía interna. Esto constituye de 0,01 a 1 caloría/gramos, y aumenta con el punto de fusión o el contenido de aleación en el material. La energía almacenada aumenta a la par con la deformación hasta alcanzar un valor de saturación. También aumenta si la temperatura de deformación es menor. Parte de este almacenamiento puede

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

atribuirse a la formación de vacancias y parte a energía de maclado y de error de apilamiento, pero en su mayoría se debe a la generación de las dislocaciones. Su densidad aumenta de  $10^6$  a  $10^{12}$  dislocaciones por centímetro cuadrado al pasar de un material totalmente recocido a uno severamente endurecido.

Por lo general, la dureza y el límite de cedencia aumentan con la deformación en frío. Los granos de un material deformado en frío tienden a alargarse y a adquirir una orientación cristalográfica preferente (“textura”). Si la deformación es elevada la densidad disminuye ligeramente; al mismo tiempo disminuye la conductividad eléctrica y aumenta la expansión térmica. Sin embargo, es mucho más importante el aumento en reactividad química que produce la deformación en frío, ya que esto conduce a una mayor velocidad de corrosión. El latón severamente deformado en frío exhibe el fenómeno de “grietas del proceso de elaboración”, el cual es una variedad del fenómeno de ruptura por esfuerzo y corrosión (el fenómeno se presenta al sumergir el material en cloruro mercurioso o soluciones amoniacales).

Los efectos nocivos de la deformación en frío pueden eliminarse por medio de un tratamiento térmico. En este tratamiento es costumbre distinguir tres regiones de temperatura, a saber: recuperación, recristalización y crecimiento de grano. Durante la recuperación no se observan cambios en la estructura de los granos. La conductividad eléctrica se aproxima a la del metal recocido y los rayos X indican sin lugar a error la disminución de esfuerzos internos en la red cristalina. Esta última observación explica por qué los tratamientos térmicos de recuperación tienen tanta aplicación.

La fuerza promotora de los procesos de recuperación y recristalización es la energía de deformación almacenada. A medida que la temperatura del tratamiento término se eleva a un nivel superior al del intervalo de recuperación, se liberan los esfuerzos internos y se produce una poligonización de la estructura. Esta última es el resultado de la agrupación de dislocaciones en configuraciones de baja energía tales como los límites de grano de bajo ángulo. Por escalamiento de estas dislocaciones se produce un enrejado poligonal.

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

A una temperatura superior a la de recuperación, si inicia un proceso de sustitución de la estructura deformada, por granos totalmente libres de esfuerzos. Esto indica el comienzo de la recristalización. Como es de esperar la densidad de dislocaciones disminuye también en forma apreciable. Un aumento de la temperatura de tratamiento térmico produce un aumento en el tamaño de grano.

Desde un punto de vista práctico, la temperatura de recristalización se define como aquella a la cual se obtendrá una estructura de granos totalmente nueva en un período de una hora. Una definición más estricta muestra, no una temperatura definida, sino un intervalo de temperaturas, cuyo nivel inferior depende del tamaño inicial de grano, la composición, la cantidad de deformación previa, el ciclo de temperatura y el tiempo.

- **Endurecimiento por deformación**

La figura 20 muestra las curvas de tensión de varias muestras de cobre policristalinas y monocristalinas. Es evidente que el cobre policristalino es más resistente que un monocristal del mismo metal, el cual exhibe deslizamiento simple. Sin embargo, cuando en un monocristal de cobre se orienta en tensión de manera que posee seis sistemas de deslizamiento activos, la curva no es muy diferente a la del material policristalino. En todas las curvas de la figura 20 es evidente que el esfuerzo, necesario para continuar el flujo plástico aumenta con el de la deformación.

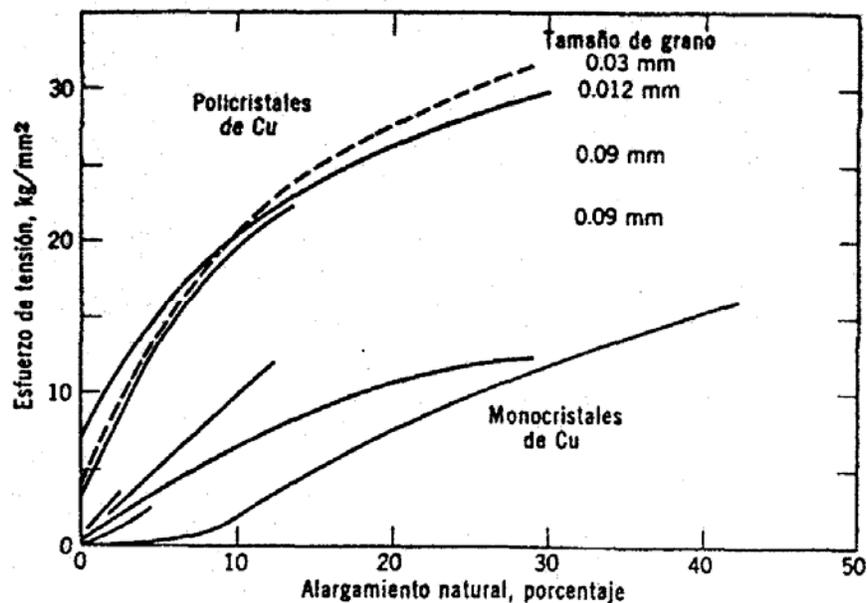


Figura 20. Curvas de tensión vs. alargamiento de monocristales y policristales de cobre.

En la curva de la derecha, representando un cristal orientado para producir deslizamiento simple, el deslizamiento inicial es aquél mostrado en la etapa 1, en la cual la velocidad de endurecimiento es muy baja. En la etapa 2, el esfuerzo necesario para el flujo plástico aumenta casi linealmente con la deformación. En la etapa 3, la velocidad de endurecimiento disminuye a medida que la deformación continúa. Cuando existen seis sistemas de deslizamiento operantes desde la iniciación de la deformación en tensión, la pendiente de la curva es más pronunciada. El endurecimiento es mucho mayor, aun cuando la pendiente de la curva es bastante pronunciada desde el principio. Esta pendiente (velocidad de endurecimiento), disminuye al aumentar el flujo plástico. Esta última curva es semejante a la de un material policristalino. En todos los granos de la muestra policristalina se produce deslizamiento múltiple, para conservar así la continuidad de la deformación a través de los límites de grano.

Nuestros conocimientos experimentales del mecanismo de deformación provienen principalmente de microscopía electrónica por transmisión. Diferentes investigadores han demostrado que en los metales CC y CCC, la deformación

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

inicial produce un enrejado de dislocaciones. Si la deformación continúa, este enrejado se ensancha y deja una estructura celular visible. La densidad de dislocaciones dentro de cada celda es mucho menor. La deformación a temperaturas elevadas conduce a una estructura celular bien definida, y a temperaturas inferiores a la ambiente produce enrejados complicados. Sin embargo, se ha demostrado que aquellas aleaciones que tienen energías de falla de apilamiento pequeñas, exhiben por lo general enrejados de dislocaciones bien definidos.

Se han postulado cinco mecanismos diferentes para describir el endurecimiento por deformación o trabajo. La figura 21 las muestra esquemáticamente. La parte superior de la figura 21 tiene su origen en el trabajo original de *Taylor*, en el cual se consideraba que el endurecimiento provenía de interacciones elásticas entre dislocaciones. La ecuación A en esta figura supone que el esfuerzo necesario para empujar una dislocación a través de un conjunto de ellas deberá ser de magnitud semejante al valor promedio de los esfuerzos internos producidos por estos defectos. La ecuación y los símbolos en B representan un modelo en el cual una superred de apilamientos está rodeada por dislocaciones inmóviles. La teoría supone que el esfuerzo retroactivo de los grupos de dislocaciones apiladas impide el movimiento de las nuevas que se producen. *Basinski* imagina un proceso que envuelve interacciones elásticas entre dislocaciones que se mueven en un plano de deslizamiento. Aquéllas que interceptan el plano de deslizamiento ilustran los bosques de dislocaciones. De acuerdo con *Mott y Hirsch* el esfuerzo para flujo plástico depende del modo en que los codos impiden el movimiento de las dislocaciones. Según esta última opinión el número de codos que se forma está relacionado con la densidad de bosques de dislocaciones. El último esquema E, está basado en la suposición de que el esfuerzo de flujo debe ser suficiente para arquear las dislocaciones fuera de los enrejados.

CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

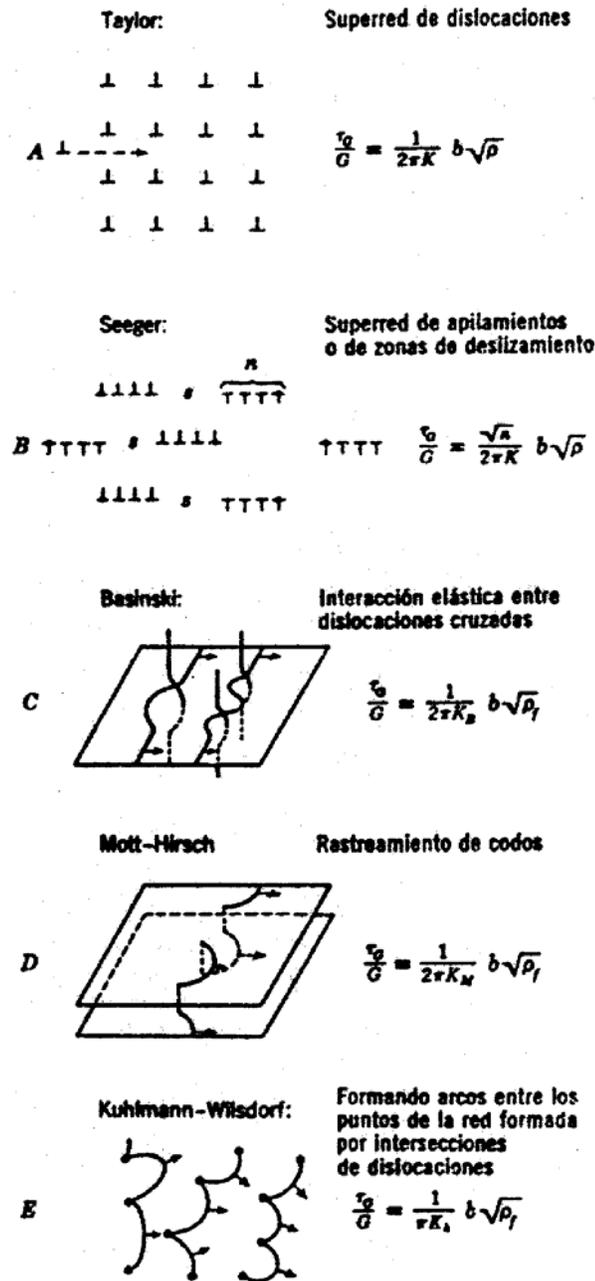


Figura 21. Comparación de cinco modelos de endurecimiento de acuerdo con *Wiedersich*;  $\rho$  significa la densidad de dislocaciones paralela a la dislocación de deslizamiento y  $\rho_f$  es la densidad de bosques de dislocaciones.

- **Endurecimiento por difusión**

La consolidación por medio de una dispersión fina de obstáculos puede también obtenerse a través de un proceso de reacción superficial y difusión de ciertos

## CAPÍTULO I: Teoría de la deformación plástica y su relación con los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial.

gases (nitruración, cementación y carbonitruración) en sólido. Si el acero contiene adiciones pequeñas de elementos de aleación tales como aluminio, cromo, vanadio, titanio y molibdeno se forma una dispersión fina de nitruros, carburos y otras fases, las cuales aumentan notablemente la dureza de la superficie y resistencia al desgaste.

## CAPÍTULO II. “EL BRUÑIDO POR BOLA PARA EL ACABADO SUPERFICIAL DE LAS PIEZAS”

### 2.1 Breve caracterización de los procesos de tratamiento mecánico por deformación plástica superficial

Las operaciones de acabado tienen una gran importancia porque se emplean para la terminación final de las piezas y de ellas dependen mucho el funcionamiento posterior de las mismas. Se pueden clasificar en primarias, como el rectificado, donde se logra un acabado superficial  $R_a$  promedio entre 0,1 y 1,6  $\mu\text{m}$ , y secundarias, con las que se logra obtener un acabado  $R_a$  promedio superior pero son menos empleadas. Según [Dia06], entre ellas están:

1. Superacabado (*Superfinish*). Acabado superficial: 0,025 - 0,2  $\mu\text{m}$
2. Lapeado (*Lapping*). Acabado superficial: 0,05 - 0,4  $\mu\text{m}$
3. Pulido o Alisado (*Polishing*). Acabado superficial: 0,1 - 0,4  $\mu\text{m}$
4. Bruñido (*Burnishing*). Esta operación tecnológica puede realizarse por:
  - Remoción de metal o arranque de virutas con herramientas abrasivas. La operación es conocida también como Joneado (*Honing*), con valores de acabado superficial de 0,1 - 0,8  $\mu\text{m}$ .
  - Deformación plástica superficial (DPS)

Los procesos por deformación plástica superficial se pueden clasificar según el elemento deformante empleado. Entre los más conocidos están:

1. (*Roller burnishing*): Conocido también como rodillado o rodilado, empleado para el acabado final de piezas mediante la aplicación de elementos deformantes (rodillos) que actúan sobre la superficie tratada. (Anexo I, Figuras 1 y 2)
2. Bruñido por bola (*Ball burnishing*): Este proceso está ampliamente difundido y ofrece casi las mismas ventajas del anterior. Se puede realizar con diferentes tipos de dispositivos que clasifican el proceso según la forma de sostener la bola en la herramienta:
  - Mecánicamente (por muelle) [Has96], [Has97], [Has98], [Has00]
  - Hidrostáticamente [Klo98], [Dia06] (Anexo I, Figura 3)

- En una guía (para diámetros interiores) [Dia06]

3. Bruñido por herramienta de diamante (*Diamond burnishing*): Se emplea para alisar, logrando un buen acabado en superficies cilíndricas exteriores de cualquier diámetro y en interiores de gran diámetro, así como en superficies planas frontales. Se recomienda con efectividad para piezas con dureza superior a 50 HRC [Dia06]. (Anexo I, Figura 5)

4. Bruñido de baja plasticidad (*Low plasticity burnishing*): Se realiza con una herramienta de bola sostenida hidrostáticamente, en piezas de geometría compleja que van a trabajar a altas temperaturas, donde existirá un relajamiento de la capa compresiva por dichas temperaturas. Este bruñido origina tensiones residuales compresivas altamente profundas y resistentes al calor con una deformación plástica mínima [Dia06]. (Anexo I, Figura 6)

5. Bruñido vibratorio o vibrorodilado (*Vibratory burnishing*): Esta operación puede estar combinada con una acción de golpeteo que requiere el uso de dispositivos y de una máquina especial, y se puede lograr con el empleo de levas o con herramientas especiales con movimiento cicloidal de manera recíprocamente-traslatoria. Puede golpear la superficie de la pieza hasta 2000 veces por minutos, lográndose, en ocasiones, un aumento del endurecimiento superficial por deformación de hasta un 30% [Dia06].

6.- Bruñido por cuña (*Wedge burnishing*) Se realiza con una herramienta en forma de cuña y solo para superficies exteriores con el objetivo fundamental de mejorar el acabado superficial. (Anexo I, Figura 7)

7. Lanzamiento de granallas o chorreado de municiones (*Shot peening*): En este proceso un torrente de metal, vidrio o partículas de sílice es aplicado con aire a alta velocidad contra la superficie de la pieza metálica de una manera definida y controlada. Se emplea en piezas que trabajarán sometidas a esfuerzos cíclicos [Dia06]. (Anexo I, Figura 8)

8. Impacto por vibración ultrasónica (*Ultrasonic vibration impact*): Se realiza a partir de una herramienta especial de bruñido ultrasónico conectada a una fuente y con ayuda de un fluido de trabajo, la profundidad de la capa deformada es pequeña (respecto a otros procesos) [Dia06].

9. Impacto por láser (*Laser shock*): Bajo la irradiación del láser de alta potencia, una onda de choque es generada. En este caso el láser absorbe la energía del calor de una fina capa superficial a alta temperatura. La evaporación de la superficie genera una ola de choque de compresión la cual se propaga dentro de la pieza y un plasma caliente de baja densidad se expande en dirección a la irradiación del láser. La ola de choque generada altera las micro estructuras superficiales y el estado de los niveles de tensión [Pre00], [Dia06]. (Anexo I, Figura 9)

10. Combinados: Son procesos donde se combinan las ventajas de uno con las del otro. Entre otros se han visto:

- De torneado electroquímico y bruñido por rodillo [Dia06]
- De corte del metal y bruñido por bola [Dia06]
- De maquinado por descarga eléctrica (electroerosivo) y bruñido por bola [Lin01], [Dia06], [Yan02]
- De lanzamiento de granallas y bruñido por bola [Dia06]

También hay elaboración de superficies por deformación plástica en ciertas herramientas de diseño muy especial, como algunas de las que se emplean en el proceso de brochado. En dichas brochas las últimas aristas cortantes en realidad no remueven metal sino que repasan o alisan la superficie deformándola plásticamente, mejorando así la calidad superficial y obteniendo otras ventajas que se verán más adelante.

Estos procesos por DPS se eligen en dependencia de las dimensiones, la configuración geométrica, el material de la pieza a tratar, condiciones de producción, entre otros factores, y para la aplicación efectiva de los mismos en la producción es necesario realizar investigaciones, ensayos y experimentos previos que permitan alcanzar el efecto óptimo, teniendo en consideración las condiciones concretas de explotación de las piezas a elaborar [Dia06].

Según [Dia06] el bruñido vibratorio o vibrorodilado y el lanzamiento de granallas son métodos dinámicos, pues se ejerce una acción dinámica durante la cual la fuerza actuante sobre la superficie cambia con periodicidad. El resto de los

métodos se pueden considerar estáticos, pues la herramienta actúa sobre la superficie de la pieza ejerciendo una fuerza constante.

Después de establecidos los procesos de tratamiento por deformación plástica superficial más importantes, se puede afirmar que el bruñido por bola y el bruñido por rodillo son los tratamientos más utilizados en la producción científica revisada.

## 2.2 Ventajas del bruñido por bolas

- Buen acabado superficial. Se pueden lograr valores de acabado superficial Ra de 0,1 a 0,5  $\mu\text{m}$ , conocidos como acabado de “espejo”. Además no quedan marcas ni huellas de herramientas [Dia06].
- Endurecimiento superficial. Se crea por la formación extensiva de dislocaciones y en ocasiones debido a la formación de otras fases generadas durante la deformación. Además el bruñido condensa y afina la estructura del grano de la superficie del metal provocando una compactación de la superficie y por tanto un aumento de la dureza superficial entre 5-10% o más. Ese incremento depende de:
  - a) El tipo de material y sus características
  - b) Las características de la herramienta
  - c) Los parámetros de régimen de elaboración [Dia06]
- Precisión. Se pueden obtener tolerancias estrechas con medidas exactas [Dia06].
- Provoca mejorías en las propiedades físico-mecánicas de la superficie, logrando aumentar la vida útil de la pieza. Aumenta la resistencia al desgaste, porque al bruñirse la superficie casi se igualan el tamaño de las crestas y los valles provocando que el desgaste de dicha superficie, al entrar en contacto con otra, sea mínimo. La resistencia a la fatiga aumenta de un 26 a un 35% por la acritud y la aparición de altas tensiones residuales compresivas en la capa superficial. Cualquier esfuerzo en la pieza debe sobrepasar esos valores de tensiones residuales, que eliminan los focos que pudieran provocarla como son los

- poros, las hendiduras y las marcas o huellas dejadas por la herramienta después del maquinado. También aumenta la resistencia a la corrosión, porque al reducirse la porosidad y las marcas de herramientas las sustancias reactivas o contaminantes tienen menos posibilidad de corroer la superficie bruñida [Dia06].
- Elimina o reemplaza costosas operaciones secundarias de acabado en máquinas herramienta de alto consumo de energía eléctrica. El empleo de este proceso conlleva bajos costos de operación y no se requiere para efectuar esta operación de operarios especializados. Es un método muy económico para obtener un gran acabado superficial, además de no requerir una inversión capital para realizarlo [Dia06].
  - Puede corregir los defectos que puedan haber aparecido en operaciones previas de maquinado tales como conicidad, falta de cilindridad y otros [Dia06].
  - Las diferentes piezas de estas herramientas son intercambiables, por lo que resulta sencillo, fácil y rápido el mantenimiento y el cambio de piezas gastadas o deterioradas, lo que ayuda a prolongar la vida útil de la herramienta [Dia06].
  - Elaboración rápida, ahorra tiempo y aumenta la productividad, pues el proceso es breve, comparado con otros similares de acabado antes mencionados que consumen más tiempo [Dia06].
  - Debido al empleo de fluido de trabajo se disminuye la fricción y se refrigera el proceso y por ende el calor generado no provoca sus negativos efectos (defectos térmicos) [Dia06].
  - Es un proceso ecológicamente más limpio, pues no se generan desperdicios, al no haber arranque de virutas, y se ahorra materia prima. Existe la posibilidad de evitar los tratamientos térmicos y termo-químicos disminuyendo así la contaminación del medio ambiente por la no emisión de gases. Se ahorra además energía eléctrica y otros recursos (por lo expresado anteriormente y por la corta duración y rapidez de este proceso). Se disminuye también el nivel de ruido [Dia06].

- Puede realizarse en máquinas herramienta convencionales y en máquinas herramienta con control numérico [Dia06].
- Por el buen acabado que ofrece se emplea en ocasiones como paso previo en los procesos de recubrimientos metálicos superficiales (cromados, niquelados, entre otros) [Dia06].

## **2.3 Generalidades**

### **2.3.1 Herramientas**

La herramienta utilizada para el proceso de bruñido es de fácil fabricación y montaje, entre sus partes principales se encuentra la bola de bruñir que es la encargada de establecer el contacto bola-pieza, existen 3 formas de sujeción de la bola en la herramienta:

1. Rosca (Husillo) [Bou03], [Bou04], [EIA05], [Bou05]. La compresión se logra mediante un husillo que se desplaza al accionar un calibrador roscado.
2. El de muelle [Has96], [Has97], [Has98], [Has00], [Shi03] en el que la bola de bruñido es soportada por cuatro bolas pequeñas para reducir el efecto de la adherencia durante el proceso de bruñido por bola. Cuando la bola de bruñido es presionada contra la superficie de la pieza, el resorte que soporta la bola (Figura.22) va a ser comprimido. La bola de bruñir rota debido a la fricción causada por el ajuste entre ella y la superficie de la pieza.
3. Hidrostáticamente [Klo98], [Hil00], [Luc05], [Zha05], [Lop05a], [Lop06], [Wag06] en la cual la fuerza normal es constante y proporcional con la presión del fluido así la bola puede girar libremente y en cualquier dirección (Figura. 23) por lo que ofrece una larga vida y un fácil mantenimiento. Para su empleo se requiere de una instalación hidráulica. (Anexo I, Figura 4)

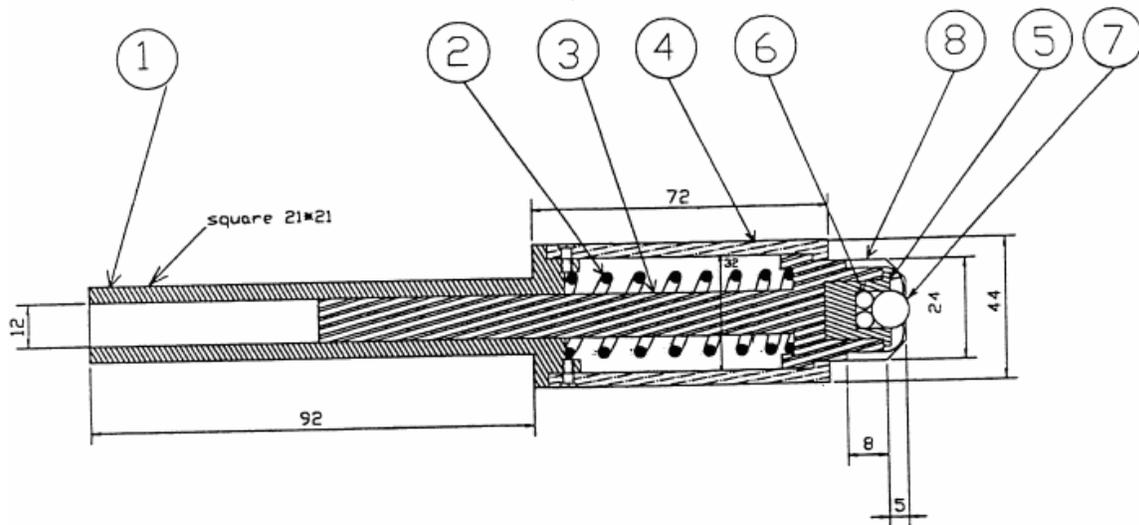


Figura 22 Herramienta de bruñido por bola colocada por muelle

- |                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| 1- Cilindro              | 5- Ajustador de la bola  |
| 2- Muelle de calibración | 6- Bolas sostenidas      |
| 3- Vástago corredizo     | 7- Bola de bruñir        |
| 4- Cubierta              | 8- Contenedor de la bola |

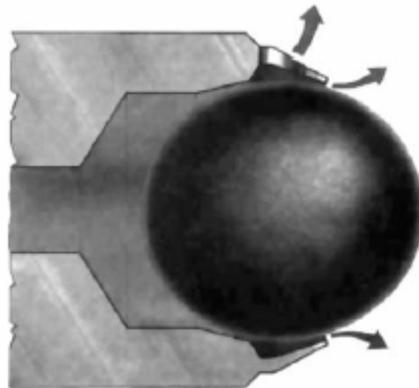


Figura 23 Herramienta del bruñido por bolas colocada hidrostáticamente.

### 2.3.2 Material de la bola de bruñir

Para escoger el material de la bola se debe tener en cuenta que sus características físico-mecánicas sean las mejores ya que es la que va a establecer el contacto con la pieza. Los diferentes autores consultados utilizan frecuentemente como material del elemento deformante o bola de bruñir el acero al carbono aleado con cromo [Has96], [Has98], [Has00], [Bou03], [Bou04], [Bou05], los aceros de herramienta [Has97], otros de los metales utilizados en el

proceso de bruñido como herramienta de bruñir es el metal duro (WC) [Zha05] y el  $ZrO_2$  [Lee93], [Lin01]. También son utilizados los no metales como por ejemplos los cerámicos [Klo98], [Lop05a], [Luc05] y dentro de ellos especialmente los de nitruro de silicón [Lop06].

### 2.3.3 Dimensiones de la bola de bruñir

La dimensión de la bola de bruñir constituye un elemento importante dentro del proceso de bruñido, ya que es la que va a tener el contacto físico con la pieza de trabajo, su diámetro influye en el área de contacto con la pieza.

A partir de la literatura revisada se encontró que hay bolas de diferentes diámetros, uno de los valores más frecuentes fue: de  $10mm$  [Has97], [Has98], [Shi03], [EIA05], de diámetro  $9mm$  [Has00], [Bou03], [Bou04], [Bou05], otros de los diámetros utilizados es el de  $12mm$  [Lop05b] y algunos utilizan diámetros entre  $4-6mm$  [Sto96], [Luc05], este último ( $6mm$ ) es el utilizado en sus experimentos por los autores [Klo98], [Hil00], [Alt03], [Koc05], [Lop05a], [Zha05], [Lop06].

### 2.3.4 Máquinas herramienta

En las máquinas herramientas es donde va soportada la herramienta de bruñir, por esta razón todos los parámetros de entrada para el proceso de bruñido están relacionados con las características de dichas máquinas. Se pueden utilizar diversas máquinas herramienta en este proceso:

- Tornos paralelos convencionales [Has96], [Has97], [Has98], [Has00], [Hil00], [Bou03], [Bou04], [Bou05], [EIA05], [Zha05],
- Centros de maquinado CNC [Lop05a], [Lop05b], [Lop06], [Shi03], [EIW98]
- Centro vertical de maquinado [Loh89a], [Loh89b], [Lee92], [Lee93].

### 2.3.5 Materiales

Los materiales de las piezas en bruto son diversos, desde aceros hasta metales no ferrosos y aleaciones de todo tipo, entre otros. Algunos ejemplos de esta amplia gama se muestra a continuación: AISI 1025 [EIA05], AISI 1042 [Bou04], [Bou05], AISI 1045 [Loh89a], [Loh89b], [Lee92], AISI 316L (acero inoxidable) [Lee93], Acero PDS 5  $\approx$  AISI P20 [Shi03], Acero inoxidable Duplex [Bou03], Aleación de aluminio [Has00], [Has96], [Has97], Latón [Has96], [Has97], [Has98], [Has99], [Has00], aleación de Mg AZ80 [Hil00], [Zha05], DIN 100 Cr 6 [Klo98], aleación de titanio  $\beta$  metaestable (TIMETAL LCB) [Koc05], hierro fundido GS-60 [Lop05b], Inconel 718 (aleación de níquel) [Lop06], acero tratado térmicamente [Luc05], aleación 70/30 Cu-Zn [Fat88], Acero LH 15 [Sto96], aleación Al-Zn-Mg [Yan02]. En algunas ocasiones estos materiales son sometidos a un tratamiento térmico previo o le aplicaron algún proceso de maquinado antes de bruñido.

### 2.3.6 Forma y dimensiones de las piezas

El proceso de bruñido por bolas es aplicable a casi todo tipo de pieza y dimensiones, esto depende en gran medida de las maquinas herramienta existente en el taller y de los accesorios disponibles, poniéndose de manifiesto en las piezas cilíndricas empleadas por [Hil00] y [Zha05] donde también fueron utilizadas este tipo de piezas para las pruebas realizadas en diámetros de: *25mm* [Has96], [Has98], *28mm* [Has97], *30mm* [Has00], *50mm* [EIA05], *60mm* [Bou03], [Bou04], [Bou05], *200mm* [Klo98]. También se emplean las piezas de superficies de forma libre [Lee92], [EIW98], [Shi03], [Lop05a] y piezas planas [Loh89a], [Lee93], [Yan02].

### 2.3.7 Condiciones de lubricación

Según la bibliografía consultada el uso de los lubricantes es variado en cuanto a tipo, un ejemplo de esto se manifiesta en que algunos autores usan lubricantes [Lop05a] a base de aceites [Bou03], [Bou04], [Bou05], algunos utilizan este último (aceite) pero emulsionado [Klo98], [EIA05], otros prefieren las grasas y

aceites de máquinas [Lee93]. Otros lubricantes que se emplean son: el kerosene [Lee93] y el lubricante plástico LT4 [Sto96]. En el caso de otros autores los procesos fueron realizados sin emplear lubricantes [Has96], [Has97], [Has00]. El uso de lubricantes para este proceso es importante ya que impide las altas temperaturas mejorando la fricción entre herramienta-pieza.

### **2.3.8 Aplicaciones**

El proceso de bruñido se aplica a todas las piezas que requieran un buen acabado superficial, entre algunas de ellas están:

- Bombas de agua de mar de centrales termoeléctricas [Bou03]
- Pistones de máquinas hidráulicas [Klo98]
- Moldes y troqueles [Lop05a]
- Pieza de un motor de avión [Pre02b], [Pre02d], [Gab02], [Gab01], [Pre03a], [Mig03], [Lop06]
- Moldes de inyección de plástico [Shi03]
- Prótesis ortopédica de fémur [Hor02], [But05]
- Junta soldada por fricción [Pre02c], [Jay03]
- Estructura de aviones [Pre01], [Pre03a],

### **2.3.9 Diseño experimental**

Los más utilizados en las consultas realizadas son: el diseño de compuesto central donde se realizaron 10 experimentos [Has98], el factorial [Luc05], [Loh89a], [Loh89b], en otros casos utilizaron el factorial completo [Lee92] y fue utilizado también el modelo de Taguchi [Lee93], [Lin01]. Otros autores utilizaron para el procesamiento de sus resultados la combinación del modelo de Taguchi y el factorial completo [Shi03].

### **2.3.10 Método o software empleado para procesar la información**

Para estudiar el comportamiento de los parámetros de las cualidades superficiales de las piezas tratadas por el bruñido por bolas son muy útiles las técnicas de diseño de experimentos.

En la revisión efectuada los software empleados para procesar la información obtenida son: el método de elementos finitos [Alt03], [Bou05], [Wag06], el método de superficie de respuesta (RSM) [Fat88], [Has98], [Shi03] y el CATIA [Lee93].

## **2.4 Parámetros de entrada**

### **2.4.1 Fuerza, Presión, Profundidad de penetración**

Los parámetros de entrada fuerza, presión o profundidad de penetración, son utilizados por los investigadores indistintamente, unos mantienen constante sus valores y otros los variaban para obtener diferentes resultados y así poder arribar a diferentes conclusiones, en la fuerza se utilizan valores de 70–230N [EIA05], de 49–350N [Has00], de 50–350N [Has96], de 50–300N [Has97], de 20–300N [Has98], de 70–400N [Hil00], de 250–500N [Lop05a], de 200–800N [Shi03], de 50–400N [Sha05], de 200–1300N [Sto96], 70–140N y otros experimentos con 50–100N [EIW98]. Otros emplearon valores de fuerzas constantes en sus experimentos, ejemplos de estos valores son: 350N [Bou03], 150N [Bou04], [Bou05], 550N [Koc05], 4000N [Lop05b]. En otros casos se emplean valores de presiones y como ejemplo están: 20–50MPa [Klo98], de 30–38MPa [Luc05] y constante de 40MPa [Alt03]. También se utiliza la combinación de la fuerza con la presión y ejemplo de esto son los siguientes valores de 250–500N y la presión de 10–20MPa [Lop06]. Otro de los parámetro, pero menos usado, es la profundidad de penetración donde en un caso fue de 20 $\mu$ m [Lee93]. La variación en los rangos se realiza a criterio de cada investigador.

### 2.4.2 Frecuencia de giro, Velocidad

La Velocidad, en la cual la superficie de la pieza de trabajo y la herramienta pasan una a otra en el punto de contacto. La velocidad típicamente define un movimiento giratorio.

En los experimentos consultados existen diferentes valores de velocidad, ejemplo de estas variaciones son:  $9.6-110.4\text{ m/min}$  [EIA05],  $13.35-43.6\text{ m/min}$  [Has96],  $60-210\text{ m/min}$  [Klo98], de  $10-15\text{ m/min}$  [Lop05a],  $0.2-1.2\text{ m/min}$  [Shi03]. También otros mantienen el valor de la velocidad constante como es el caso de  $0.1\text{ m/min}$  [Bou03], [Bou04],  $25.8\text{ m/min}$  [Has00],  $24\text{ m/min}$  [Has98],  $0.3\text{ m/min}$  [Lee93],  $100\text{ m/min}$  [Alt03] y  $15\text{ m/min}$  [Lop05b], [Lop06]. En otros experimentos combinan la frecuencia de giro con la velocidad, se tiene en cuenta las dos variables; la frecuencia de giro de  $230\text{ rpm}$  y la velocidad de  $20.23\text{ m/min}$  [Has97]. En una ocasión se toma como variable solamente a la frecuencia de giro de  $36\text{ rpm}$  [Zha05].

### 2.4.3 Avance

El avance, definido como la velocidad de penetración de la herramienta en el material. Típicamente define un movimiento lineal o de contorno.

Los valores de avance son dados, según la bibliografía, por rangos y otros son mantenidos constante, como ejemplo:  $0.04-0.019\text{ mm/rev}$  [EIA05], de  $0.1-0.28\text{ mm/rev}$  [Bou04], [Bou05],  $0.03-0.2\text{ mm/rev}$  [Has96],  $0.02-0.012\text{ mm/rev}$  [Klo98],  $0.06-0.2\text{ mm/rev}$  [Luc05]. Como ejemplos de avances constantes se encontró:  $0.06\text{ mm/rev}$  [Bou03],  $0.1\text{ mm/rev}$  [Has97], [Has98], [Has00],  $0.04\text{ mm/rev}$  [Sto96],  $0.06\text{ mm/rev}$  [Alt03].

#### 2.4.4 Número de pasadas, Tiempo

El número de pasadas es la cantidad de veces que la herramienta recorre la longitud de la pieza a bruñir en un intervalo de tiempo, este número de pasadas puede variar en dependencia de la ductilidad del material así como del proceso de maquinado empleado, se emplean números de pasadas de 1–5 [Has96], [Has98], de 1–6 [Has97] o solamente una pasada [Bou03], [Bou04], [Bou05], [Has00] que es la más frecuente. En ocasiones se toma como referencia el tiempo de bruñido, ejemplo  $t = 20 \text{ min}$  [Lop05b].

#### 2.4.5 Rugosidad superficial inicial

La rugosidad superficial inicial ( $R_a$ ) está directamente relacionada con los procesos aplicados a la pieza antes del bruñido así como el material de la pieza a bruñir, como ejemplo se tiene que:  $0.68 \mu\text{m}$  en el torneado y en el rectificado es de  $0.59 \mu\text{m}$  [Bou03], en otro caso  $0.96 \mu\text{m}$  en el torneado y de  $0.73 \mu\text{m}$  en el rectificado [Bou04]. En otros materiales la rugosidad superficial previa de los materiales son: aluminio de  $5.42–5.98 \mu\text{m}$  y el latón de  $4.78–5.27 \mu\text{m}$  [Has97]. También:  $5.92 \mu\text{m}$  [Has98],  $0.3 \mu\text{m}$  [Klo98],  $1 \mu\text{m}$  [Shi03],  $0.12 \mu\text{m}$  [Sto96] y  $4 \mu\text{m}(R_m)$  [Loh89b].

#### 2.4.6 Dureza superficial inicial

La dureza es la capacidad de un material para resistir rayado, indentación o penetración. Los materiales de pieza de trabajo con dureza aumentada generan más calor y son más difíciles de maquinar.

Los valores de dureza superficial varían, esto viene dado por el tipo de material y a los procesos de tratamientos a los que la pieza fue sometida anteriormente al bruñido, según la bibliografía consultada los valores de dureza encontrados son: de  $42–43 \text{ HRB}$  en aluminio y de  $62–63 \text{ HRB}$  en latón [Has97],  $62 \text{ HRC}$  [Klo98],  $52 \text{ HRC}$  [Lop05a],  $152 \text{ HB}$  y  $236 \text{ HB}$  [Lop05b]. En otro de los ejemplos se tiene

varios valores de durezas 43.8–46.5HRC [Lop06], 64HRC [Luc05], 338HV [Shi03], 63HRC [Sto96].

## 2.5 Parámetros respuesta

### 2.5.1 Rugosidad superficial final

En sentido general con la utilización del proceso de bruñido por bolas se disminuye considerablemente la rugosidad superficial de la pieza, algunas de estas piezas antes de someterlas a los procesos de bruñido son previamente tratados o combinados con otros procesos. Debido al tratamiento mecánico, el aplastamiento al que es sometido el material provoca un endurecimiento superficial de la pieza bruñida. Este endurecimiento es provocado por la deformación plástica en frío a que se ve sometido el material. Ejemplos de valores de rugosidad superficial final ( $R_a$ ) en los experimentos revisados son:  $0.1\mu m$  [Has96],  $1.31\mu m(R_z)$  [Klo98],  $0.772\mu m(R_m)$  [Loh89] y  $0.06\mu m$  [Sto96]. Otros de los valores los autores los dan en intervalos como por ejemplo: de  $0.01-0.012\mu m$  para aluminio y de  $0.3-0.4\mu m$  para latón [Has97], de  $0.357-1.94\mu m$  [Has98], de  $0.22-0.82\mu m$  [Luc05], de  $0.07-0.55\mu m$  [Shi03], de  $0.5-0.7\mu m$  [Sha05], de  $0.29-0.55\mu m(R_m)$  [Lee92],  $0.6-0.9\mu m(R_m)$  [Lee93],  $(0.07-0.27)\mu m$  [Lop05a]. Otro fueron medidos por combinación de procesos, ejemplos: Torneado+Bruñido  $0.175\mu m$  y Rectificado+Bruñido  $0.16\mu m$  [Bou03], Torneado  $0.23\mu m$  y Rectificado  $0.19\mu m$  [Bou04]. Otro caso  $(0.85-1.08)\mu m$  y  $(0.95-1.04)\mu m$  [Lop05b].

Cuando la fuerza de bruñido excede un cierto límite la rugosidad superficial comienza a aumentar debido al incremento en trabajo de endurecimiento de la superficie metálica debido al aumento en la cantidad de deformación. Este aumento en el trabajo de endurecimiento provocará deterioro en la superficie metálica. Este límite depende de la consideración del metal y su capacidad de aceptar la deformación.

### **2.5.2 Incremento de rugosidad superficial final**

Otros autores expresan la rugosidad superficial final como el incremento, tal es el caso de: 60% [Has96], de 30-50% [Klo98] y de 33-35% [Loh89a].

### **2.5.3 Dureza superficial final**

Ocurre que al utilizar el proceso de bruñido por bolas se nota que hay un aumento de la dureza superficial, con el aumento de la fuerza compresiva y con el incremento del número de veces que pasa la herramienta de bola. Como ejemplo se encontró: en el aluminio con  $83HRC$  y el latón de  $90-95HRC$  [Has97],  $59HRC$  [Lop05a],  $480HV$  [Shi03],  $239HB$  [Lop05b].

### **2.5.4 Microdureza y profundidad de la capa endurecida**

La microdureza de los materiales compuestos de matriz metálica esta afectada por la presencia de partículas de refuerzo en la subsuperficie del material. La microdureza está directamente relacionada a las propiedades de desgaste del material compuesto.

En la zona superficial la dureza alcanza sus valores máximos, y disminuye a medida que aumenta la profundidad de la capa hasta hacerse constante. Esto se debe a que la región confinada a la superficie esta sujeta al trabajo máximo de endurecimiento.

Según la bibliografía consultada se encontraron valores de:  $0.075mm$  (Bruñido) y  $0.035mm$  (Rectificado) [Bou03], también  $0.1mm$  [Klo98] y de  $0.7-0.8mm$  [Zha05].

### **2.5.5 Tensión residual compresiva**

Durante los procesos por deformación plástica superficial de compresión directa, entre los que se encuentra el bruñido por bola, surgen elevadas tensiones residuales de compresión una vez finalizados los mismos con un valor máximo en las capas subsuperficiales (zona muy cercana a la superficie) y que

disminuyen con rapidez al aumentar la distancia desde la superficie, estas altas tensiones permiten un aumento de la resistencia a la rotura por fatiga y también un aumento de la resistencia al agrietamiento por corrosión y dependen del material y del proceso de elaboración.

Por tanto es un valor muy importante y como ejemplo se tiene que: el Torneado+Bruñido  $-420MPa$  y el Rectificado+Bruñido  $-280MPa$  [Bou03]. En alguno de los caso los valores fueron medidos por la utilización de difracción por rayos x como son: [Bou05], [Koc05], [Wag06]. En otros ejemplos: Torneado+Bruñido  $-600MPa$  y el Rectificado+Bruñido  $-900MPa$  [Bou04],  $-1600MPa$  [Klo98] y  $-345MPa$  [Zha05].

### **2.5.6 Resistencia al desgaste**

Con la aplicación del bruñido la pieza adquiere una mejor rugosidad superficial, una mayor dureza, etc. Como la dureza superficial suele considerarse la base de una buena resistencia al desgaste. Sin embargo, la dureza por sí sola no es suficiente para proporcionar a una superficie resistencia al desgaste: el mejor rendimiento suele conseguirse mediante una combinación de dureza y tolerancia que es obtenida con el proceso de bruñido. Aunque dependen en gran medida del mecanismo ante la resistencia y de cada caso en concreto.

### **2.5.7 Resistencia a la corrosión**

En el proceso de bruñido se obtiene como resultado una superficie de la pieza prácticamente pulida, esto mejora considerable la resistencia a la corrosión del material. También en los aceros inoxidable, la acción de los elementos aleados es sustancial, además de estructural, y depende del porcentaje del o los elementos de la aleación. El cromo es el elemento aleado que más influye en la resistencia a la corrosión de los aceros. Un 12% de cromo ya impide la corrosión por el aire ambiente húmedo. El Níquel mejora la resistencia a la corrosión de los aceros al cromo. Los aceros inoxidable son resistentes a la corrosión atmosférica.

### **2.5.8 Resistencia a la fatiga**

La resistencia a la fatiga es la resistencia que ofrece un material a los esfuerzos repetitivos. Al aplicarle el proceso de bruñido a la pieza, esta adquiere mayor dureza en su superficie y con esto aumenta su resistencia a esfuerzos externos. La fatiga depende de una serie de factores. Además de la composición, estado y procedimiento de obtención del material, hay que considerar la clase y frecuencia de las sollicitaciones y, especialmente, la configuración de los elementos constructivos (distribución de fuerzas, tensiones máximas, superficie). La denominación "resistencia a la fatiga" se utiliza como concepto genérico para todos los casos de sollicitación alternativas. Aumenta mediante la formación de soluciones cristalinas, la conformación en frío y el endurecimiento.

### **2.6 Bruñido de baja plasticidad**

El bruñido de baja plasticidad (*Low plasticity burnishing*) se realiza con una herramienta de bola sostenida hidrostáticamente, con todos los dispositivos que conlleva esta instalación hidráulica (Anexo I, Figura 4): bomba, conductos, filtro y recipiente, en piezas de geometría compleja que van a trabajar a altas temperaturas, donde existirá un relajamiento de la capa compresiva por dichas temperaturas. Este bruñido origina tensiones residuales compresivas altas en capas profundas y térmicamente estables con una deformación plástica mínima. El propósito más importante de este proceso es lograr tensiones residuales compresivas por debajo de la superficie de la pieza, en capas deformadas con rango de profundidad de 2 a 10  $\mu\text{m}$ . Esto es especialmente interesante en las aleaciones resistentes al calor (como la aleación base níquel Inconel 718 [Pre00], [Gab02a], [Gab02b] y la de base cobalto Haynes 25) usadas en piezas sometidas a altas temperaturas y que trabajan próximas a las cámaras de combustión de motores de aviones y en algunos segmentos del anillo y alabes de las partes frías de dicho motor [Pre03a], [Pre02b], [Pre02d], [Mig03], [Gab02a], [Gab02b], estas últimas fabricadas de aleaciones de titanio (principalmente Ti-6Al-4V) [But05], [Hor02], [Pre03a], [Pre02b], [Pre02d], [Gab02b], [Mig03], también tiene aplicaciones en la estructura de aviones

[Pre01], [Pre03a], en implantes médicos (prótesis ortopédica de fémur) [But05], [Hor02], equipos de la industria del petróleo, juntas soldadas por fricción [Jay03], [Pre02c], piezas de la industria automotriz, equipamiento hidráulico y neumático (bombas, turbinas, compresores, ventiladores). Específicamente en este tipo de tratamiento las tensiones residuales compresivas están directamente relacionadas a un incremento de la vida a la fatiga.

Se le llama roleado profundo (*Deep rolling*) cuando es aplicado al titanio y otras superaleaciones. Los beneficios del bruñido de baja plasticidad son los siguientes:

- Las tensiones residuales compresivas son altamente profundas, pero con un nivel bajo de funcionamiento en frío por debajo de la superficie bruñida. La magnitud de la compresión a la superficie es comparable con el bombardeo de municiones.
- La estabilidad térmica y mecánica de los motores, la retención de la compresión en las capas subsuperficiales en el bruñido de baja plasticidad proporciona un 30% de incremento en el límite de resistencia a la fatiga por encima del que ofrece el bombardeo de municiones después de que las piezas estén expuestas a temperaturas elevadas (más de 500 °C).
- Por consiguiente, hay un elevado incremento en la vida útil, referido a un alto límite de resistencia a la fatiga y a la resistencia por daños por la introducción de objetos extraños y de pequeñas partículas duras. El bruñido de baja plasticidad crea altas tensiones residuales y esta siendo aplicado en la soldadura con movimiento de fricción.
- Este bruñido logra alcanzar un mejoramiento en la calidad de las superficies metálicas dúctiles, en contraste con el bombardeo de municiones. La mejor solución es la aplicación sucesiva del bruñido después del bombardeo de municiones.

Aunque el impacto o choque con láser ofrece mejores resultados desde el punto de vista de los valores de las tensiones residuales, este tratamiento es más económico y barato.

En la bibliografía consultada se ofrece variada información sobre este tratamiento específico, respecto a la dimensión de la bola solo [Gab02a], ofrece el dato de 19 mm. Las máquinas herramientas que fueron utilizadas por los autores son: Centros de torneado CNC [But05], [Hor02], [Jay03], [Pre02a], [Pre03a], [Pre00], [Pre02b], [Pre02c], [Pre02d], [Pre03b], [Mig03], Centro vertical de maquinado CNC [Pre01], Tornos CNC [Gab02a] y tornos paralelos y fresadoras verticales convencionales [Gab02b]. En estas pruebas fueron estudiados el comportamiento de varios materiales, algunos ya se han mencionado, ejemplo de otros materiales son las aleaciones de aluminio 2219-T8751 [Jay03], [Pre02c], la 7075-T6 [Pre01], [Pre02a], [Pre03b], [Mig03] y la 2024-T3 (Duro aluminio) [Liu06] y el Acero AISI 4340 [Mig03].

Según las formas y dimensiones de las piezas en las consultas realizadas, todas las piezas son de forma plana con dimensiones de 914x152x9,5 mm [Jay03], [Pre02c], con 12,5 mm de espesor [Pre01], [Pre02a], con 13 mm de espesor [Pre03b] y con 19 mm de espesor [Liu06]. Se encontró información procesada por el Método de Elementos Finitos (MEF) [But05], [Hor02] y el Método de Taguchi [Pre00].

En la búsqueda realizada se logró establecer varios parámetros de salida o respuesta con sus resultados, por ejemplo un aumento considerable de la dureza superficial final 89 HRC [Pre01], [Pre03b], tensiones residuales compresivas medidas por difracción por rayos x [But05], [Gab02b], [Hor02], obteniendo valores de -1034 MPa [Hor02], -450 MPa [Jay03], [Pre02c], -690 MPa [Pre03a], [Pre02d]. Profundidades de capas endurecidas de 0,762 mm [Hor02], 1,25 mm [Pre01], 1,2 mm [Pre00], 1,3 mm [Pre02d], se obtuvieron incrementos de la resistencia a la fatiga de un 40% [Hor02] y de un 80% [Jay03].

## **Conclusiones**

- I.El bruñido por bola es un proceso de tratamiento por deformación plástica superficial y tiene plena actualidad, resultando una variante tecnológica apropiada de operación secundaria para el acabado final de piezas cuando se requiere no solo mejorar el acabado superficial, sino también las propiedades físico-mecánicas superficiales lo que proporciona una mayor resistencia al desgaste, mayor resistencia a la corrosión, mayor resistencia a la rotura por fatiga y una mayor durabilidad.
- II.Los materiales empleados, las máquinas herramienta convencionales usadas así como las aplicaciones principales son similares a las de la industria mecánica nacional cubana.
- III.En particular el bruñido por bola constituye una variante de tratamiento por deformación plástica superficial muy sencilla y de fácil implementación por lo que es recomendable su generalización en las condiciones particulares del país por su flexibilidad y menor costo en comparación con otros métodos de tratamiento por deformación plástica superficial.

## **Recomendaciones**

1. Continuar las investigaciones de este método de elaboración en frío y su aplicación en las industrias del país como una alternativa para el tratamiento superficial de las piezas que requieran alta resistencia a la rotura, a la fatiga y al desgaste.
2. Realizar el diseño de la herramienta y el diseño de experimentos para implementarlo en nuestros talleres.
3. Realizar un análisis del impacto ambiental y económico de esta operación de acabado.

## **Bibliografía**

- [Alt03] Altan Taylan, “Finite element modeling of ball burnishing and selection of process parameters”, Colaborative Research, October 2003, Ohio State University.
- [But05] Butler David, “Burnishing for fatigue strength”, Advance materials and Processes, October 2005, Pag. 66-68, Lambda Technologies.
- [Bou03] Bouzid Sai W., Lebrun J.L., “Influence of finishing by burnishing on surface characteristics”, Escuela Nacional de Ingenieros, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 12, No. 1, 2003, Pag. 37-34, Sfax, Tunes.
- [Bou04] Bouzid W., Tsumarev O., Sai K., “An investigation of surface roughness of burnished AISI 1042 steel”, Escuela Nacional de Ingenieros, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 24, 2004, Pag. 120-125, Tunes.
- [Bou05] Bouzid W., Sai K., “Finite element modeling of burnishing of AISI 1042 steel”, Escuela Nacional de Ingenieros, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 25, 2005, Pag. 460-465, Tunes.
- [Cal98] Callister, W. D., “Materials Science and Engineering. An Introduction”, Mc Graw-Hill.
- [Cat01] Cogsdill Tool Products, Inc., “Catalogue product data”, 2001, USA.

- [Cuz86] Cuznezov, A., Macximov, I., Giudice, E. D., “Working by combined cutting and plastic deformation: Proposal of a mathematical model”, *Lamiera*, Vol. 23, No. 12, December 1986, Pag. 75-79, Italy.
- [Dia06] Díaz Rojas, Silvio. “Implementación de un procedimiento metodológico para la elaboración de piezas por bruñido con rodillo simple”, Tesis doctoral, UCLV, 2006.
- [Dor86] Dorofev, Y. N., “Production of regular micro-reliefs by a cycloidally moving tool” *Soviet Engineering Resource*, Vol. 6, No. 5, 1986, Pag. 11-13, USSR.
- [EIA05] El-Axir M.H, Ibrahim A. A., “Some surface characteristics due to center rest ball burnishing”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, 2005, Pag. 47-53, Menoufia University, Egypt.
- [EIW98] El-Wahab A. I., Abdelhay A. M., “A new algorithm and toll design for CNC profile burnishing”, *International Journal of production Research*, Vol. 37, No. 7, 1998, Pag. 1977-1985, Helwan University, Egypt.
- [Fat88] Fattouh M., El-Axir H., Serage S. M., “Investigation into the burnishing of external cylindrical surface of 73/30 Cu-Zn alloy”, *Wear*, Vol. 127, Issue 2, October 1988, Pages 123-137, Menoufia University, Egypt.
- [Gab01] Gabb Timothy P., Telesman Jack, Kantzos Peter T., “Improved method being developed for surface enhancement of metallic materials”, *Proyecto*, June 2001, NASA, USA.
- [Gab02] Gabb Timmothy P., Telesman Jack, Kantzos Peter T., Prevey Paul S., “Surface enhancement of metallic materials”, *Advance materials and*

Processes, January 2002, Pag. 69-72, Centro de Investigaciones Glenn, NASA; Lambda Research, USA.

[Gul90] Guliaev, A. P., "Metalografía", Tomo I y II, Edición MIR, 1990, URSS.

[Han02] Han, C. H., Pyoun, Y. S., Kim, C. S., "Ultrasonic micro-burnishing in view of eco-materials processing", Processing Journal, Vol. 4, No. 1, 2002, Pag. 25-28, Advance in Technology of Materials and Materials, Australia.

[Has96] Hassan A. M., Al-Bsharat A. S., "Influence of burnishing process on surface roughness, hardness and microstructure of some non ferrous metals", Wear, Vol. 199, 1996, Pag. 1-8, Jordan University of Science and Technology, Jordania.

[Has97] Hassan A. M., "The effects of ball and roller burnishing on the surface poughness and hardress of some non ferrous metals", Journal of Material Processing Technology, Vol. 72, 1997, Pag. 385-391, Jordan University of Science and Technology, Jordania.

[Has98] Hassan A. M., Al-Jalil H. F., Ebied A. A., "Burnishing force and number of ball passes for the optimum surface finish of brass components", Journal of materials Processing Technology, Vol. 83, 1998, Pag. 176-179, Jordan University of Science and Technology.

[Has99] Hassan A. H., Al-Dhfi S. Z. S., "Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 96, Issues 1-3, Nov. 99, Pag. 73-80, Jordan University of Science and Technology.

- [Has00] Hassan A. M., Momani A. M. S., "Further improvements in some properties of shot peened components using the burnishing process", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, 2000, Pag. 1775-1786, Jordan University of Science and Technology, Jordania.
- [Hil00] Hilpert M., Wagner L., "Corrosion Fatigue behavior of the high strength magnesium alloy AZ 80", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 9, No. 4, August 2000, Pag. 402-407, Technical University of Brandenburg, Alemania.
- [Hor02] Hornbach Douglas J., Prevey Paul S., Loftus Edmund F., "Application of LPB to improve the performance fatigue of Ti-6Al-4V femoral hip stems", Journal of Testing and Evaluation, Sept. 2002, Lambda Technologies, USA.
- [Jay03] Jayaraman N., Prevey Paul S., Mahoney M., "Fatigue life improvement of an aluminum alloy FSW with LPB", Proceeding 132<sup>nd</sup> TMS Annual Meeting, March 2-6 2003, San Diego, USA.
- [Klo98] Klocke F., Liermann J., "Roller burnishing of hard turned surfaces", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 38, No. 5-6, 1998, Pag. 419-423, Technical University of Aachen, Alemania.
- [Koc05] Kocan M., Rack H. J., Wagner L., "Fatigue performance of metastable  $\beta$  Titanium alloys: Effects microstructure and surface finish", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 14, No. 6, Dic. 2005, Pag. 765-772, Clausthal University of Technology, Alemania.

- [Leb82] Lebedko, A. I., "Increasing the service life of textile machinery by surface strain hardening", *Metalovedenie Termicheskoi Obrabotka Met.*, No. 4, April 1982, Pag. 54-55, USSR.
- [Lee92] Lee S. S. G., Tam S. C., Loh N. H., Miyazawa S., "An investigation into the ball burnishing of an AISI 1045 free form surface", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 29, Issues 1-3, January 1992, Pag. 203-211, Nanyang Technology University, Singapore.
- [Lee93] Lee S. S. G., Tam S. C., Loh N. H., "Ball burnishing of 316 L stainless steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 37, Issues 1-4, Feb. 1993, Pag. 241-251, Nanyang Technological University.
- [Lin01] Lin Y. C., Yan B. H., Huang F. Y., "Surface improvement using a combination of electrical discharge machining with ball burnishing machining based on the Taguchi Method", *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, Vol. 18, No. 9, Oct. 2001, Pag. 673-682, National Central University, Taiwan.
- [Liu06] Liu Xiaodong, Frankel G. S., "Effects of compressive stress on localized corrosion in AA2024-T3", *Corrosion Science*, Vol. 48, 2006, Pag. 3309-3329, Dpto. de Ciencias de los materiales e Ingeniería, Universidad del estado de Ohio.
- [Loh89a] Loh N. H., Tam S. C., "Statistical analyses of the effects of ball burnishing parameters on surface harness", *Wer*, Vol. 129, Issue 2, February 1989, Pages 235-243, Nanyang Technological University, Singapore.
- [Loh89b] Loh N. H., Tam S. C., "A study of the effects of ball burnishing parameters of surface roughness using factorial design", *Journal of*

Mechanical Working Technology, Vol. 18, Issue 1, January 1989, Pag. 53-61, Nanyang Technological University, Singapore.

[Lop05a] López de Lacalle L. N., Lamikiz A., Muñoa J., Sánchez J. A., “Quality improvement of ball and milled sculptured surfaces by ball burnishing”, International Journal of Machina tools and Manufacture, Vol. 45, 2005, Pag. 1659-1668, Universidad del País Vasco, España.

[Lop05b] López de Lacalle L. N., “Pruebas de pulido por bruñido por bola en moldes y matrices”, Informe de investigación, 2005, Universidad del País Vasco, España.

[Lop06] López de Lacalle L. N., Lamikiz A., Sánchez J. A., Arana J. L., “The effect of ball burnishing on heat treated steel and Inconel 718 milled surfaces”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, May 2006, Universidad del País Vasco, España.

[Luc05] Luca L., Neagu-Ventzel S., Marinescu I., “Effects of working parameters on surface finish in ball burnishing of hardened steels”, Precision Engineering, Vol. 29, 2005, Pag. 253-256, University of Toledo, USA.

[Mak86] Makhnenko, V. I., Kravtsov, T. G., “Thickness of plastically strained layer at ultrasonic impact treatment of hard-surface products”, Avtomotichkia Svarka, No. 8, 1986, Pag. 28-30, USSR.

[Mig03] Migala Thomas S., Jacobs Terry L., “LPB: An affordable, effective means of surface enhancement”, Surface Enhancement Technologies, USA.

[Nee82] Nee A. Y. C., Venkatesh, V. C., “Bore finishing-The Ballizing process”, Journal of Mechanical Working Technology, Vol. 6, 1982, Pag. 215-226, The Netherlands.

- [Nik01] Nikiforov, A. V., Volkov, Y. S., Kanadze, S. A., Gorskij, I. M., “Efficiency of the combined processing in repair technology”, Tyazheloe Mashinostroenie, Vol. 2, February 2001, Pag. 24-27, Rusia.
- [Pre00] Prevey P. S., Telesman J., Gabb T., Kantzos P., “FOD resistance and fatigue crack arrest in low plasticity y burnishing IN 718”, Proceeding of 5<sup>th</sup> National Turbine Engine Conference, USA, March 7-9 2000, Lambda Research y NASA.
- [Pre01] Prevery Paul S., Cammett John, “Low cost corrosion damage mitigation and improve fatigue performance of LPB 7075-T6”, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 10, Issue 5, October 2001, Pag. 548-555, Lambda Research, NAVY, USA.
- [Pre02a] Prevey Paul S., Cammett John T., “The influence of surface enhancement by LPB on the corrosion fatigue performance of AA 7075-T6”, Proceeding of 5<sup>th</sup> International Aircraft Corrosion Workshop, Maryland, USA, Aug. 2002, Pag. 20-23, Lambda Research, NAVY, USA.
- [Pre02b] Prevey P. S., Hornbach D. J., Jacobs T. L., Ravindranath R., “Improved damage tolerance in Titanium alloy fan blades with LPB”, Proceeding of International Surface Engineering Conference, Columbus, USA, Oct. 7-10 2002, Lambda Research, NAVY.
- [Pre02c] Prevey P. S., Hornbach D., Mason P., Mahoney M., “Improving corrosion fatigue performance of AA 2219 friction stir weld with LPB”, Proceeding if International Surface Engineering Conference, Columbus, USA, Oct. 7-10 2002, Lambda Research, Rockwell Scientific.

- [Pre02d] Prevey P. S., Hornbach D. J., Cammet J. T., Ravindranath R., “Damage tolerance improvement of Ti-6-4 fan blades with LPB”, Proceeding of 6<sup>th</sup> Joint FAA/NASA aging aircraft Conference, USA, Sep. 16-19 2002, Lambda Research, NAVY.
- [Pre03a] Prevey Paul S., Hornbach D., Ravindranath R., Cammett J. T., “Application of LPB to improve damage tolerance of a Ti-GAL-4V first stage fan blade”, Proceedings of 44<sup>th</sup> AIAA, ASME, ASCE, AHS Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Norfolk, USA, April 7-10, 2003, Lambda Research, NAVY.
- [Pre03b] Prevey P. S., Jayaraman N., Cammett J. T., “Mitigation of active corrosion fatigue and corrosion pit initiated fatigue in AA 7075-T6 with LPB”, Proceeding of ASIP Conference, Savannah, USA, Dec. 2-4 2003, Lambda Research, NAVY.
- [Shi03] Shiou F. J., Chen C. H., “Free form surface finish of plastic injection mold by using ball burnishing process”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 140, 2003, Pag. 248-254, National Taiwan University of Science and Technology, Taiwan.
- [Sto96] Stodolnik B., “The influence of burnishing on the contact fatigue life of rings in rolling bearing”, Tribología, Vol. 27, 1996, Pag. 753-759, Polonia.
- [Smi78] Smith, W. F., “Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los metales”, Mc Graw-Hill, 1978, España.
- [Sur03b] Surface Enhancement Technologies, “Low plasticity burnishing”, USA, Obtenido de la red mundial el 25 de marzo de 2003, <http://www.surfaceenhancement.com>

- [Wag06] Wagner K., Putz A., Engel U., "Improvement of tool life in cold forging by local optimized surfaces", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, 2006, Pag. 206-209, University of Erlangen, Alemania.
- [Wen01] Wendt, J., Hilpert, M., Kiese, J., Wagner, L., "Surface and environmental effects on the fatigue behavior of wrought and cast magnesium alloy", *Minerals, Metals and Materials Society/AIME, Magnesium Technology 2001*, Pag. 281-285, USA.
- [Yan02] Yan B. H., Lin Y. C., Hvang F. Y., "Surface modification of Al-Zn-Mg alloy by combined electrical discharge machining with ball burnishing machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, Issue 8, Jun 2002, Pag. 925-934, National Central University, Taiwan.
- [Yil03] Yilbas B. S., Shuja, S. Z., Arif, A., Condal, M. A., "Laser shock processing of steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 135, Issue 1, 1 April 2003, Pag. 6-17, The Netherlands.
- [Zel00] Zelinski, P., "Herramientas de bruñido para portaherramientas universales de torneado", *Revista Metalmecánica Internacional*, Vol. 5, Edición 7, Diciembre 2000, Pag. 8, Colombia.
- [Zha05] Zhang P., Lindemann J., "Effect of roller burnishing on the high cycle fatigue performance of the high strength magnesium alloy AZ 80", *Scripta Materialia*, Vol. 52, 2005, Pag. 1011-1015, Technical University of Braunschweig, Alemania.

## Anexos

Anexo I: Fotos de los distintos tipos de bruñido.

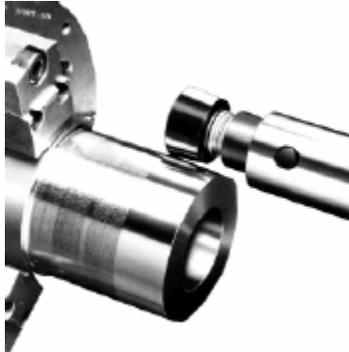


Figura 1 Bruñido por rodillo simple.

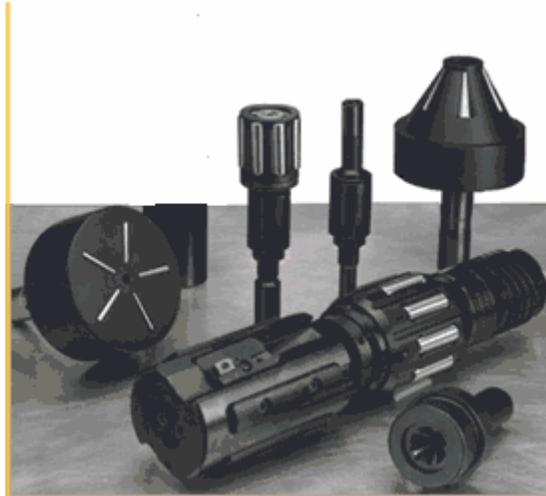
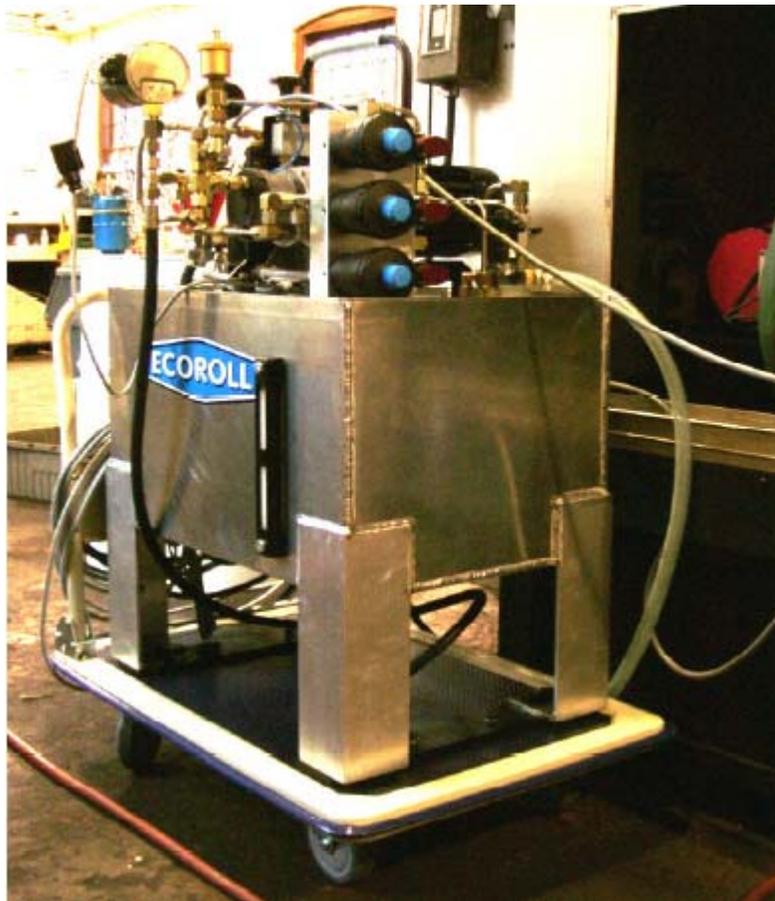


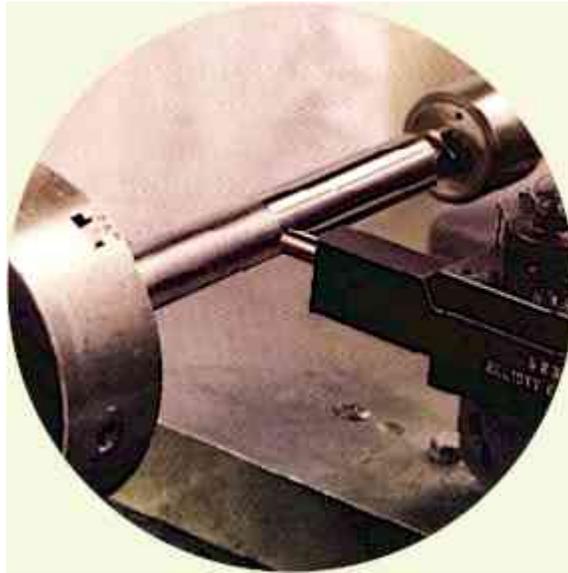
Figura 2 Herramientas de exteriores e interiores del rodilado de varios rodillos.



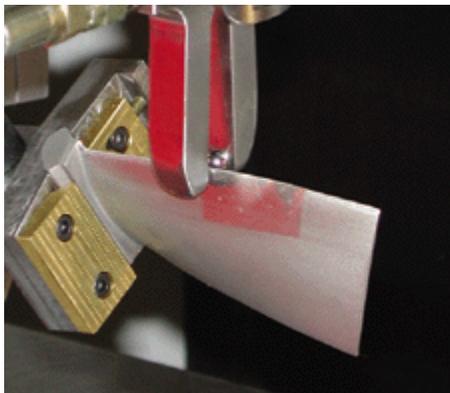
**Figura 3 Herramienta del bruñido por bolas colocada hidrostáticamente.**



**Figura 4 Instalación de bombeo**



**Figura 5** Bruñido por herramienta de diamante.



**Figura 6** Bruñido de baja plasticidad.

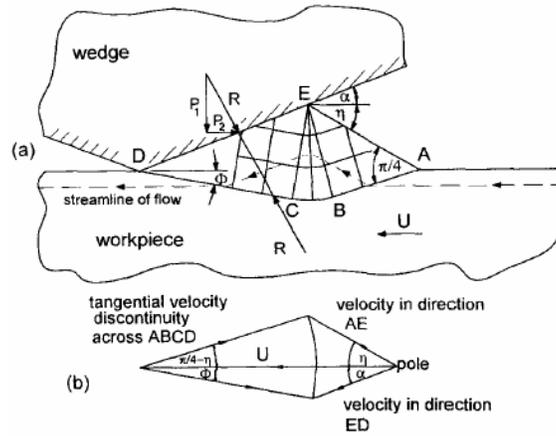


Figura 7 Bruñido por cuña.

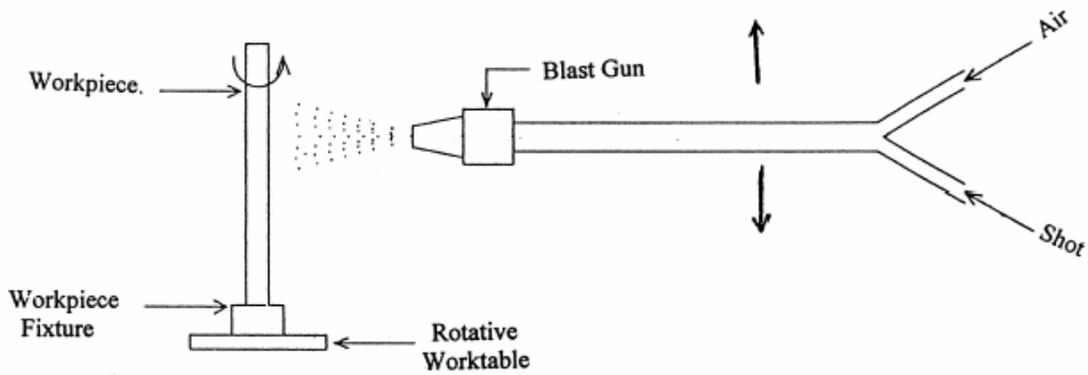


Figura 8 Representación esquemática del proceso de lanzamiento de granallas o municiones

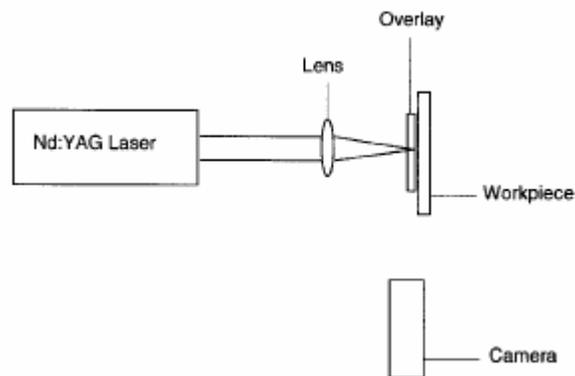


Figura 9 Impacto por laser.

