

308917



**UNIVERSIDAD PANAMERICANA**

**ESCUELA DE INGENIERIA**

**CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA U.N.A.M.**

14  
29

**ESTUDIO DE LOS DAÑOS PRODUCIDOS EN  
METALES POR CORTES MECANICOS**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**  
**AREA: INGENIERIA MECANICA**  
**PRESENTA**  
**LUIS GONZALEZ LIÑERO**

**DIRECTOR:**  
**FIS. MARIANO ROMERO VALENZUELA**

**MEXICO, D.F.**

**1995**



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

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

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

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

# CONTENIDO

INTRODUCCION	2
CAPITULO 1. MECANICA DEL CORTE DE METALES	3
(1.1) Proceso de formación de la hojuela	3
(1.2) Desarrollo histórico	5
(1.3) Método de formación de la hojuela plana	6
(1.4) Relaciones matemáticas simplificadas	18
(1.5) Efecto de las operaciones de maquinado en las propiedades físicas de los materiales de trabajo	25
CAPITULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS	30
(2.1) Descripción del equipo	30
(2.2) Cortes de distintos materiales variando algunos parámetros	36
(2.3) Análisis de microestructura al microscopio óptico	42
(2.4) Análisis de microestructura al microscopio electrónico de barrido	47
(2.5) Conclusiones y resultados	50
BIBLIOGRAFIA	51

## INTRODUCCION

Los procesos de maquinado en metales provocan daños microestructurales y profundas modificaciones en las propiedades de los materiales. Estos cambios influyen significativamente en la resistencia mecánica de las piezas trabajadas.

El presente trabajo intenta analizar la relación que existe entre la modificación de las propiedades del material como la dureza, el espesor (y otras dimensiones físicas), etc. con los parámetros más importantes del proceso de maquinado como la velocidad y profundidad del corte.

Para lograr nuestro objetivo utilizaremos un ultramicrotomo electrónico que nos permite jugar con distintas combinaciones de dichos parámetros; las velocidades y las profundidades pueden variarse entre 0.1 y 100 mm/s y entre 1 y 2,475  $\mu\text{m}$  respectivamente.

Además, sabiendo cuáles son los daños microestructurales que provoca el ultramicrotomo podemos predecir la fiabilidad de los análisis de microscopía electrónica realizados en muestras obtenidas con este aparato.

El estudio de las modificaciones producidas por el corte utilizando este microtomo nos ofrece un resultado adicional: nos permite conocer la fiabilidad de los análisis de microscopía electrónica realizados en muestras obtenidas con este aparato.

# CAPITULO I

## MECANICA DEL CORTE DE METALES

### (1.1) PROCESO DE FORMACION DE LA HOJUELA

El proceso de formación de la hojuela cuando se cortan metales involucra la deformación plástica de la capa removida y, a veces, también su ruptura.

El proceso de formación de la hojuela determina el proceso de corte como un todo. Del proceso de formación de la hojuela depende la magnitud de las fuerzas de corte, el consumo de potencia y la cantidad de calor disipada durante el proceso de corte, la precisión del componente maquinado y la calidad de su capa superficial, las condiciones de operación de la máquina herramienta, las herramientas, etc. Un conocimiento de las leyes que gobiernan el proceso de formación de la hojuela es, por lo tanto, de gran importancia para la solución fundamental de cuestiones prácticas relacionadas con el corte de metales.

El proceso de formación de la hojuela depende de muchos factores y es definido básicamente durante el corte libre y restringido, durante el corte a ángulos rectos y a ángulos oblicuos. Las leyes básicas que gobiernan el proceso de formación de la hojuela son, de cualquier forma, comunes a todos los casos de corte. Por lo tanto, pueden ser vistas como aplicables al más simple de los casos, esto es, al corte libre en ángulo recto.

Se pueden distinguir varios tipos de hojuelas de acuerdo a si el proceso de deformación plástica durante la formación de la hojuela va acompañado de ruptura de la capa removida y también de acuerdo a las características de estas rupturas. La hojuela continua es la más común.

Este capítulo trata los elementos de la mecánica de formación de la

hojuela continua para el caso más simple de corte, es decir, para el corte libre en ángulos rectos a baja velocidad y sin deformación plástica de contacto secundaria a lo largo de la superficie de contacto de la hojuela. Una velocidad baja de corte se entiende aquí como una velocidad a la cual la influencia del efecto de temperatura-velocidad en el proceso de deformación plástica es tan pequeño que puede ser ignorado.

## (1.2) DESARROLLO HISTORICO

La investigación de la formación de la hojuela comenzó con el científico francés H. Tresca ya en 1873 aunque las teorías fundamentales sólo se han desarrollado en las últimas cuatro o cinco décadas. La comprensión de la hojuela fue reconocida correctamente por Tresca que escribió que el material de la pieza de trabajo comienza a fluir sobre la cara de la herramienta en dirección hacia arriba, cortándose a lo largo de un plano oblicuo a medida que ésta avanza. Midió la longitud de la hojuela y llegó a la conclusión de que su extensión era de sólo la mitad o la tercera parte del recorrido de la herramienta. Después veremos que la conclusión de Tresca era correcta y que los factores de compresión del orden de 2 ó 3 ocurren muy frecuentemente en la práctica.

Muchos otros científicos anteriores se interesaron en el problema del cizallamiento de metales bajo corte, entre ellos Thime (1877), Haussner (1892), Reauleaux, Tallner, Schmidhammer, Kurrein, Eckhard y otros; de cualquier forma, ellos no llegaron a ninguna conclusión importante. El estudio de Coker en modelos plásticos comprobó que existe un plano de cizallamiento -después veremos que en realidad es una familia de planos- que va desde la punta de la herramienta a la superficie de la pieza maquinada.

El ingeniero finlandés V. Piispanen, contribuyó considerablemente al desarrollo de las teorías acerca del cizallamiento en metales, manteniendo correspondencia acerca de estos problemas con Kronenberg en 1936. Simultáneamente, un antiguo colaborador de Kronenberg, M. E. Merchant, que no estaba al tanto de este desarrollo y J. Krystoff desarrollaron teorías de cizallamiento metálico. Muchos otros han investigado estas cuestiones, incluyendo aspectos nuevos como el calor producido al cortar el metal, la microestructura de los metales y otros aspectos.

### (1.3) METODO DE FORMACION DE LA HOJUELA PLANA

El proceso de formación de la hojuela durante el corte libre en ángulos rectos puede ser visto como un caso de deformación plana si el ancho de la capa de metal removido es considerablemente mayor que su espesor. Es, por lo tanto, conveniente llamar a este proceso "proceso de formación de la hojuela plana".

De acuerdo con Thime y Zvorykin, las deformaciones de corte durante la transformación de la capa de corte en la hojuela ocurren a lo largo de un cierto plano único. La suposición de que la formación de la hojuela ocurre sólo por medio de este tipo de corte nos lleva al método de la formación de la hojuela mostrado en la Fig.1. De acuerdo con este método, una capa de corte de metal de espesor ( $a$ ) se convierte en una hojuela de espesor ( $a_1$ ) como resultado del cizallamiento a lo largo del plano OA inclinado a un ángulo  $b$  con respecto al plano de corte.

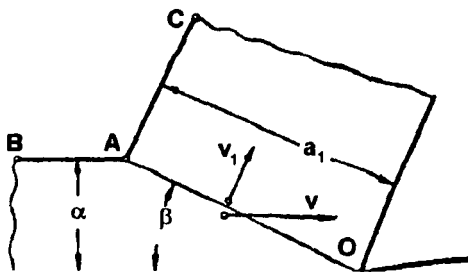


Fig. 1. Método de formación de hojuela plana con un solo plano de cizallamiento.

Los inconvenientes de este método (Fig.1) son: la presencia de un solo plano de corte OA y la ausencia de una conexión suave entre la superficie externa de la capa de corte del metal con la hojuela (punto A). La existencia de un solo plano de corte es imposible por dos razones. Primeramente, debe existir un gradiente de esfuerzos infinitamente grande en este plano ya que los puntos de cedencia del material no endurecido por trabajo y del material endurecido por trabajo difieren por un factor de 2-4.



Después, una partícula de material maquinado en el plano de corte debe recibir unas aceleraciones infinitamente grandes ya que su velocidad de movimiento cambia instantáneamente de  $v$  a  $v_1$  (Fig. 1). En consecuencia, entre la hojuela y el material maquinado hay una zona de transición de deformación plástica dentro de cuyos límites los esfuerzos de corte cambian continuamente así como también cambia el grado de deformación plástica y las velocidades de movimiento de las partículas de material maquinado. Esta zona de transición puede ser llamada convenientemente la zona de formación de la hojuela o la zona plástica.

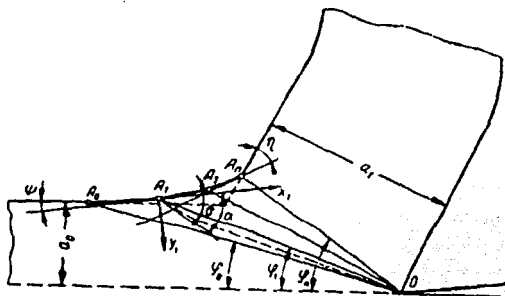


Fig. 2. Proceso de formación de la hojuela plana según Briks.

Ya en 1896 Briks criticaba justamente el método del plano de corte único y sugería un esquema mostrado en la Fig. 2. Briks hacía la sugerencia de que el corte plástico en la superficie de trabajo ocurre en una familia de planos arreglados en forma de abanico y que pasan por el borde del elemento cortante (planos  $OA_0$ ,  $OA_1$ ,  $OA_2$ , ...,  $OA_n$  en la Fig. 2). El mostró que las superficies exteriores de la superficie de trabajo y de la hojuela no se intersectan directamente sino que están separadas por una cierta superficie de transición  $A_0A_n$ . El esquema de Briks también tiene sus inconvenientes. Primero, Briks supone que la superficie de transición no se une suavemente con la superficie exterior de la hojuela sino que la intersecta de tal forma que la tangente a la superficie de transición en el

punto  $A_{\eta}$  forma un cierto ángulo  $\eta$ , que es aproximadamente la mitad del ángulo de corte con la superficie exterior de la hojuela. Las partículas del material maquinado deben entonces recibir unas aceleraciones infinitamente grandes cuando pasan por el plano  $OA_{\eta}$ . Segundo, Briks consideraba que las líneas de corte eran rectas. De las condiciones de frontera en la superficie de transición se sigue que todas las líneas de corte deben formar ángulos iguales a  $\pi/4$  con las tangentes a esta superficie. Esto sólo es posible si las líneas de corte están curvadas. Por ejemplo, la línea de corte recta  $OA_1$  forma un ángulo  $\delta$  menor a  $\pi/4$  con la tangente  $x_1$ ; en realidad este ángulo debe ser  $\pi/4$ , en cuyo caso la línea de corte debe tomar la forma de la curva mostrada en la Fig. 2 por una línea punteada. De hecho, los esfuerzos  $\sigma_{x_1}$  y  $\sigma_{y_1}$  en el punto  $A_1$  son los esfuerzos principales ya que no existen cargas externas en la superficie de transición  $A_0A_{\eta}$ . La línea del esfuerzo tangencial máximo en el punto  $A_1$  entonces forma un ángulo  $\alpha = \pi/4$  con tangente  $x_1$ . Tercero, Briks acepta sin ninguna dificultad que el proceso de la deformación plástica en la zona de formación de la hojuela ocurre únicamente debido al corte a lo largo de una familia de planos arreglados en forma de abanico. Es claro que si esto es así, la condición de continuidad no es observada.

Cada proceso de deformación plástica involucra corte y está caracterizado, por lo tanto, por las líneas del esfuerzo máximo tangencial. Esto es, por las curvas características o planos de deslizamiento.

Si comenzamos con las propiedades generales de las curvas características, entonces, cuando no haya fuerzas de fricción en la superficie, se puede describir un estado de esfuerzos en las zonas inmediatamente adyacentes a la curva de transición (zona A) y hacia el borde de corte (zona B) por las líneas de cizallamiento mostradas en la Fig. 3.

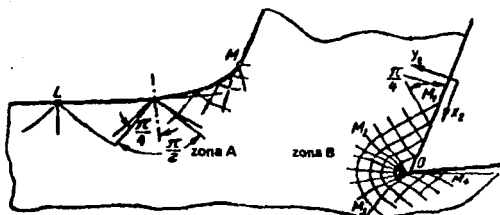


Fig. 3. Líneas de deslizamiento en la zona A adyacente a la frontera exterior del material deformado y en la zona B adyacente al borde de corte con un coeficiente de fricción cero en la superficie de contacto.

Las líneas de cizallamiento en la zona A son dos familias de curvas mutuamente ortogonales, el ángulo entre las tangentes a un par de curvas colindantes de una familia permanece constante a medida que se mueven a lo largo de estas líneas. En los puntos de intersección con la curva de transición, las tangentes a las líneas de corte y las normales a la curva de transición forman un ángulo de  $\pi/4$ . Esto va unido al hecho de que las normales a la curva de transición coinciden en dirección con uno de los esfuerzos principales. Se pueden ver tres regiones en la zona B. La región  $M_1OM_2$  se caracteriza por dos familias de líneas de corte rectas, mutuamente ortogonales que intersectan la cara con ángulos de  $\pi/4$ . La región  $M_2OM_3$  tiene un punto singular O a través del cual pasa una familia de líneas rectas con forma de abanico. La segunda familia toma la forma de arcos de círculo concéntricos. En la región  $M_3OM_4$  las líneas de corte son rectas e intersectan la superficie libre con la herramienta a un ángulo de  $\pi/4$  si uno supone que la superficie libre hace contacto con la superficie acabada de maquinarse.

Cuando hay fricción en las superficies de contacto, las familias de curvas características tomarán una forma diferente ya que las condiciones de frontera cambian. Por ejemplo, en la zona  $M_1OM_2$  las fuerzas de fricción entre la hojuela y la cara provocan una rotación en contra de las manecillas del reloj de las líneas de corte. Las fuerzas de fricción en la

superficie trasera, por consiguiente, causarán una rotación de las líneas de corte en la zona  $M_3OM_4$  en el sentido de las manecillas del reloj. La acción de las fuerzas de fricción entonces resulta en un estrechamiento de la región  $M_2OM_4$  (Fig. 4).

Es claro que esta rotación de las líneas de corte está conectada con un cambio en la orientación de los esfuerzos principales en la superficie de contacto de la hojuela con la superficie frontal. Usando círculos de esfuerzos no es difícil mostrar que a un ángulo de fricción  $\theta$  los ejes de los principales esfuerzos normales en la superficie de contacto hacen ángulos de  $\theta$  con la superficie frontal y con la normal a ella. Las líneas de corte entonces hacen ángulos de  $\pi/4 + \theta$  con la superficie frontal y la normal a ella (Fig. 4).

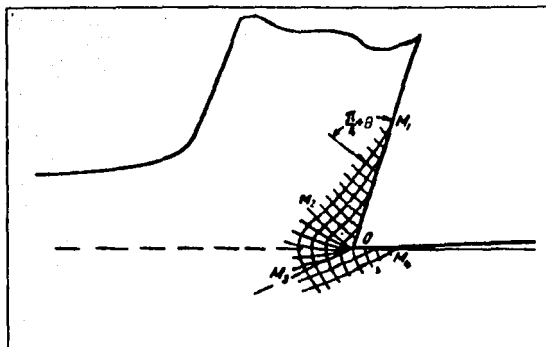


Fig. 4. Líneas de cizallamiento en la zona adyacente al borde de corte con un coeficiente de fricción en las superficies distinto de cero.

Tomando en cuenta todas las consideraciones anteriores, uno puede imaginar un arreglo de las líneas de corte a través de toda la zona plástica aproximadamente en la forma mostrada en la Fig. 5. Las líneas de corte continuas penetrando la zona plástica LOM (o la zona de formación de la hojuela) son mostradas en la Fig. 5 de tal forma que sus inicios y sus finales coinciden con las líneas de deslizamiento correspondientes en las zonas A y B.

Porciones de la segunda familia mutuamente ortogonal de líneas de corte se muestran por líneas punteadas en la Fig. 5 ya que para las condiciones de corte que serán discutidas la intensidad del corte a lo largo de estas líneas es comparativamente menor. Bajo ciertas condiciones, estas direcciones de corte asumen un papel más importante como, por ejemplo, a ángulos de corte pequeños y coeficientes de fricción altos. Cuando la hojuela está influida fuertemente por fricción en la superficie frontal, las líneas punteadas alrededor del punto O se convierten en la dirección principal de corte. "El flujo de metal" ocurre a lo largo de estas líneas adyacentes al borde de corte. El contorno de la zona secundaria de corte se define por estas mismas líneas.

De acuerdo con la Fig. 5 la zona plástica LOM está limitada por la línea de corte OL, a lo largo de la cual ocurre la primera deformación plástica en el corte, la línea de corte OM a lo largo de la cual ocurre la última deformación de corte, y la línea LM, que es la sección deformada de la superficie exterior del corte. Dentro de la zona plástica LOM hay una familia de líneas de corte a lo largo de las cuales se forman sucesivamente las deformaciones de corte crecientes. Durante el proceso de corte, la zona plástica LOM se mueve con el cortador. Las partículas de la superficie de trabajo pasan a través de la zona plástica intersectando las líneas de corte en turno y son sujetas a deformaciones sucesivamente crecientes desde cero hasta un cierto valor máximo peculiar de la hojuela final.

La línea OL en la Fig. 5 puede ser llamada convenientemente la frontera inicial de la zona de formación de la hojuela (zona plástica), y la línea OM la frontera final de la zona de formación de la hojuela. La línea LM puede ser llamada la frontera exterior de la zona de formación de la hojuela.

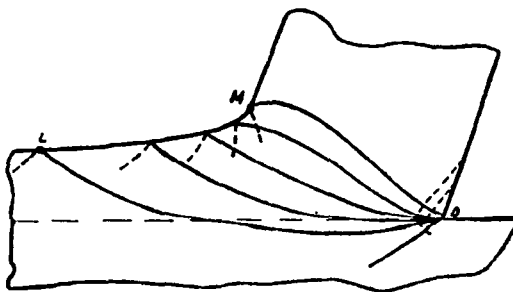


Fig. 5. Representación esquemática de las líneas de deslizamiento en la zona de la formación de la hojuela.

Zorev llega a las siguientes conclusiones:

1. Cuando se cortan metales plásticos a bajas velocidades, la deformación plástica se propaga a una distancia considerable por delante de la herramienta de corte. La zona plástica (la zona de formación de la

hojuela), producida de tal forma, tiene una anchura que es comparable con la profundidad del corte.

2. Dentro de la zona plástica no hay un único plano de corte sino una multitud de superficies de deslizamiento sobre las cuales toma lugar el corte plástico sucesivamente.

3. Dentro de la zona plástica, de su frontera inicial a la final, los esfuerzos de corte crecen desde aquéllos del material maquinado no endurecido por trabajo hasta el esfuerzo de corte del material de la hojuela endurecido por trabajo. La deformación de corte aumenta de cero a un valor máximo encontrado en la hojuela.

4. El estado de esfuerzo de la zona plástica es no uniforme y no-uniaxial. Ya que la capa de metal maquinada se transforma en una hojuela por medio de deslizamiento sucesivo dentro de la zona plástica, el proceso de deformación plástica durante la formación de la hojuela no es un caso de carga simple. Debido a esto una solución precisa del problema de la formación de la hojuela no se puede obtener por los métodos conocidos de mecánica plástica.

5. Una solución aproximada puede ser obtenida al desarrollar la hipótesis de Briks del arreglo en forma de abanico de los planos de corte en la zona plástica. En este caso, las líneas de corte se suponen rectas y con su origen en un único punto localizado en el borde de corte.

6. La función de los esfuerzos tangenciales en la zona plástica puede encontrarse de la condición de equilibrio al introducir un coeficiente que tome en cuenta el grado de complejidad del estado de esfuerzo.

7. La distribución de la deformación de corte en la zona plástica puede encontrarse de la forma de la frontera exterior de la capa maquinada que cambia gradualmente a medida que ella pasa dentro de la frontera exterior de la hojuela. En este caso debe notarse que las deformaciones de corte a lo largo de la primera familia de curvas características puede estar acompañada por deformaciones de corte a lo largo de la segunda

(mutuamente ortogonales) familia de curvas características. En otras palabras, un proceso de corte puro puede complicarse por esfuerzo compresivo.

8. Las fronteras de la zona plástica pueden ser determinadas de las siguientes condiciones de frontera:

(a) para la frontera inicial de la zona plástica -igualando el esfuerzo de corte en esta frontera con el esfuerzo de corte del material no endurecido por trabajo que está siendo maquinado y de la intersección de la frontera exterior de la zona plástica con la frontera exterior de la capa que está siendo removida;

(b) para la frontera final de la zona plástica -igualando los esfuerzos de corte en esta frontera con el esfuerzo de corte del material endurecido por trabajo de la hojuela y de la intersección de la frontera exterior de la zona plástica con la frontera exterior de la hojuela.

9. La deformación de corte de la hojuela puede tomarse como la deformación de corte máxima en la zona plástica, la cual se alcanza en la frontera final de la zona plástica.

10. El ángulo entre el plano de corte y el eje principal de la deformación tensil de la hojuela puede tomarse como la suma del ángulo formado por la dirección de cizallamiento con el plano de corte y el ángulo formado por el eje principal de la deformación tensil con la dirección de cizallamiento.

11. El ángulo formado por el eje principal de deformación tensil con la dirección de corte puede tomarse como el ángulo entre la dirección de corte y el eje mayor de la elipse formada como resultado de la deformación de corte de un círculo marcado en el costado de la superficie maquinada.

12. La razón de corte puede tomarse como la razón geométrica de la profundidad de corte, la anchura de la hojuela y la distancia del plano de



corte al punto en donde la frontera exterior de la hojuela se encuentra con la frontera exterior de la zona plástica.

13. La fuerza de formación de la hojuela puede encontrarse del equilibrio del volumen de la hojuela contenida entre la superficie frontal de la herramienta y la zona plástica.

14. Las relaciones matemáticas derivadas de acuerdo con los enunciados hechos en los párrafos 6-13 concuerdan satisfactoriamente con los datos experimentales obtenidos durante el corte libre en ángulo recto bajo las condiciones que producen una hojuela continua sin cizallamiento secundario en la superficie inclinada y excluyendo la acción del factor de temperatura-velocidad. Esto se refiere en particular a aquellas características del proceso de formación de la hojuela como las fronteras de la zona plástica, la dirección de los ejes principales de deformación, la disminución de la longitud de la hojuela y su fuerza de formación. Esto provee una base para determinar que las relaciones matemáticas derivadas toman en cuenta satisfactoriamente la acción de los factores básicos que determinan el proceso de formación de la hojuela.

15. Dentro de los factores básicos que influyen directamente el proceso de formación de la hojuela están: (1) el ángulo de inclinación, (2) el ángulo de acción de la fuerza de formación de la hojuela y (3) la resistencia a la deformación la zona plástica.

16. El ángulo de inclinación influye directamente en el proceso de formación de la hojuela al fijar la dirección de salida de la hojuela, de la que dependen la magnitud y la dirección de cizallamiento en la zona plástica. A medida que aumenta el ángulo de inclinación, la dirección de salida de la hojuela se acerca más y más al plano de corte, y como resultado la dirección de cizallamiento en la zona plástica se vuelve más favorable, su valor cae y el proceso de formación de la hojuela se facilita.

17. El ángulo de acción influye directamente en el proceso de formación como un factor que determina la dirección de acción de la

fuerza externa en la zona plástica de la que dependen los estados de deformación y de esfuerzo en la misma zona. A medida que el ángulo de acción disminuye, la dirección de cizallamiento en la zona plástica se vuelve más favorable, sus valores disminuyen y el proceso de formación de la hojuela se facilita.

18. El ángulo de acción es la diferencia entre el ángulo de fricción de la superficie inclinada y el ángulo de inclinación. El ángulo de acción, por lo tanto, disminuye a medida que el coeficiente de fricción cae y el ángulo de inclinación aumenta. formación de la hojuela como las fronteras de la zona plástica, la dirección de los ejes principales de deformación, la disminución de la longitud de la hojuela y la fuerza de formación de la hojuela. Esto provee una base para determinar que las relaciones matemáticas derivadas satisfactoriamente toman en cuenta la acción de los factores básicos que determinan el proceso de formación de la hojuela.

Por lo tanto, aunado a la influencia directa en el proceso de formación de la hojuela ( ver párrafo 16), el ángulo de inclinación también tiene una influencia indirecta por medio de un cambio en el ángulo de acción. Las influencias directa e indirecta del ángulo de inclinación son similares en carácter de tal forma que la acción total del ángulo de inclinación en el proceso de formación de la hojuela es muy considerable.

19. Como una reducción en el coeficiente de fricción en la superficie frontal reduce el ángulo de acción, esto, de acuerdo con el párrafo 18, provoca un facilitamiento del proceso de formación de la hojuela.

20. Un aumento en la resistencia a la deformación en el material maquinado a uno y al mismo valor para el cizallamiento hace más difícil el proceso de formación de la hojuela. Al aumentar la resistencia a la deformación, el carácter del estado de esfuerzo y de deformación cambia. Estos cambios provocan que la dirección de cizallamiento en la zona plástica se vuelva más favorable, su magnitud disminuya y, por lo tanto, se

facilite el proceso de formación de la hojuela. Como resultado, la deformación de la hojuela y encogimiento caen al mismo tiempo que ocurre un cierto aumento en la fuerza y en el trabajo de formación de la hojuela.

21. La resistencia del material maquinado a la deformación en la zona plástica depende no sólo de sus propiedades mecánicas sino también del endurecimiento por deformación que recibe durante la deformación plástica. La resistencia del material maquinado a la deformación en la zona plástica entonces depende del esfuerzo de fluencia del material maquinado y de su capacidad para ser endurecido por deformación.

22. El avance y la profundidad de corte prácticamente no tienen ninguna influencia directa en el proceso de formación de la hojuela. La influencia de la profundidad de corte básicamente puede hacerse sentir sólo a través de un cambio en el ángulo de acción si al mismo tiempo el coeficiente de fricción en el borde frontal cambia.

23. Las relaciones matemáticas derivadas no toman en cuenta la influencia de la velocidad en el proceso de formación de la hojuela. El esquema de formación de hojuela usado en este desarrollo hace posible, de cualquier forma, explicar la influencia directa de la velocidad en el proceso de formación de la hojuela.

#### (1.4) RELACIONES MATEMATICAS SIMPLIFICADAS

Las relaciones matemáticas citadas para el proceso de formación de la hojuela son complicadas pero se pueden simplificar por un número de suposiciones. Con este objeto introduciremos el concepto de un plano y de un ángulo de cizallamiento específicos. Por plano específico de cizallamiento entenderemos la línea que pasa a través del borde de corte y la línea de intersección de las superficies exteriores de la capa de la hojuela que está siendo removida. En la Fig. 6 se muestra este plano como una línea recta que pasa a través de los puntos O y P. Por ángulo específico de cizallamiento entenderemos el ángulo entre el plano específico de cizallamiento y el plano de corte. En la Fig. 6 este ángulo está denotado por  $\phi_{sp}$ . El ángulo específico de cizallamiento  $\phi_{sp}$  está conectado con la razón de corte  $\xi$  (recíproco del factor de compresibilidad) por la simple relación (1) que ha sido establecida por Thime. Esta relación puede ser obtenida de las razones geométricas de los triángulos rectos OPN y OPK en la Fig. 6:

$$\xi = \frac{\cos(\phi_{sp} - \gamma)}{\sin \phi_{sp}} \quad (1)$$

De la fórmula (1) se sigue que

$$\tan \phi_{sp} = \frac{\cos \gamma}{\xi - \sin \gamma} \quad (2)$$

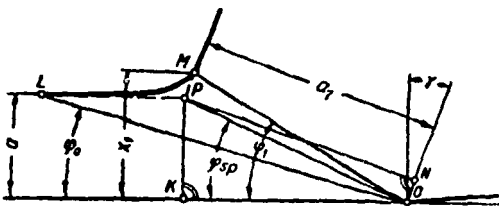


Fig. 6. Diagrama del arreglo de las fronteras de la zona de formación de la hojuela y del plano nominal de cizallamiento con respecto a cada uno.

Si tratamos a la hojuela continua como un cuerpo estacionario e independiente podemos establecer algunas relaciones de fuerzas al descomponer la fuerza de corte resultante ( $P_R$ ) en tres sistemas de fuerzas diferentes (Fig. 7).

Los tres sistemas de fuerzas se pueden ver de la Fig. 7 El primero consiste de la fuerza principal de corte ( $P$ ) que actúa en la dirección de la velocidad de corte. La fuerza de avance ( $P_2$ ) actúa perpendicularmente a la fuerza principal de corte  $P$ . Estas dos fuerzas juntas forman el primer sistema en el que se puede descomponer la resultante  $P_R$ .

Otro sistema de componentes (Fig. 7) consiste en la fuerza de fricción  $P_T$  actuando a lo largo de la cara de la herramienta  $AC$  en conjunción con la fuerza normal  $P_N$  que actúa perpendicularmente a la cara de la herramienta. El tercer sistema en el que se puede descomponer  $P_R$  está compuesto por la fuerza de corte  $P_S$  (Fig. 7), actuando en el plano de corte  $AB$  y de la fuerza de compresión  $P_D$ , que actúa perpendicularmente al plano de corte. En la figura 1 se ve que la profundidad del corte ( $t_1$ ) que existe antes de la formación de la hojuela se transforma en el espesor ( $t_2$ ) de la hojuela después de que ésta ha sido generada.

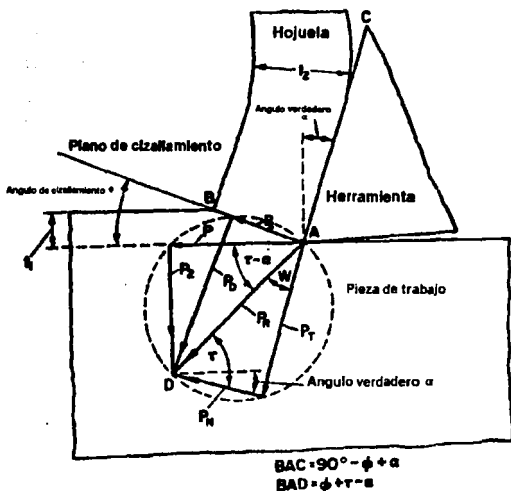


Fig. 7. Los tres sistemas de componentes de fuerzas en un corte bidimensional. Las flechas muestran la acción de la herramienta en el trabajo y en la hojuela.

A la relación  $t_1/t_2$  se le conoce como la compresión de la hojuela o factor de compresión y se le designa por la letra  $\lambda$ . El inverso del factor de compresión de la hojuela a veces se usa bajo el nombre de "relación de corte".

Las siguientes relaciones matemáticas se pueden derivar del triángulo ABC (Fig. 8):

$$t_1 = AB \cdot \text{sen } \phi \quad (3)$$

Más aún:

$$t_2 = AB \cos (\phi - \alpha) \quad (4)$$

Entonces:

$$\frac{t_2}{t_1} = \lambda = \frac{\cos(\phi - \alpha)}{\text{sen } \phi} \quad (5)$$

Resolviendo para el ángulo de cizallamiento  $\phi$ :

$$\tan \phi = \frac{\cos \alpha}{\lambda - \text{sen } \alpha} \quad (6)$$

El valor del ángulo de cizallamiento  $\phi$  se obtiene de la ecuación (6) como una función del ángulo de pendiente real  $\alpha$  de la herramienta y el factor de compresión  $\lambda$ .

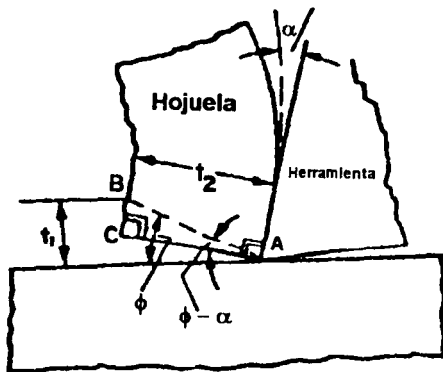


Fig. 8. Derivación de la ecuación del ángulo de cizallamiento.

La figura 9 es una representación gráfica de la ecuación (6) de la que el ángulo de cizallamiento  $\phi$  se puede determinar fácilmente para ángulos de pendiente verdadera de  $\alpha = +20^\circ$ ,  $\alpha = 0^\circ$  y  $\alpha = -20^\circ$  y para factores de compresión  $\lambda$  de 1 a 6. Se verá de la Fig. 9 que el ángulo de cizallamiento  $\phi$  aumenta cuando el factor de compresión  $\lambda$  disminuye. El efecto del ángulo de pendiente verdadera  $\alpha$  en el ángulo de cizallamiento  $\phi$  es considerablemente menor en el caso de factores de compresión de la hojuela grandes que en el caso de factores pequeños.

Como es sencillo determinar la razón de corte experimentalmente, también se puede determinar experimentalmente con facilidad el ángulo de cizallamiento específico  $\phi_{sp}$  con ayuda de la fórmula (2). Esta peculiaridad del ángulo de cizallamiento específico muestra ser útil cuando se producen las relaciones simplificadas del proceso de formación de la hojuela. En la Fig. 6 puede verse que el ángulo  $\phi_{sp}$  es ligeramente menor que el ángulo  $\phi_1$ , que determina la posición de la frontera final de la zona plástica, pero

es considerablemente mayor que el ángulo  $\phi_0$  que define la posición de la frontera inicial de la zona plástica. Los cálculos muestran que el cociente de ángulos  $\phi_{sp}/\phi_1$  generalmente es cercano al coeficiente  $k$ , que da razón del carácter del estado de esfuerzo y deformación de la zona plástica. Uno puede entonces tomar que  $\phi_{sp}$  es aproximadamente igual a  $k\phi_1$ .

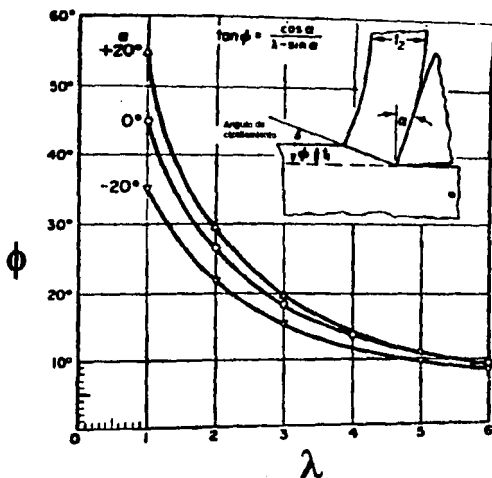


Fig. 9. Ángulo de cizallamiento como función del factor de compresión de la hojuela.



Para simplificar las relaciones fundamentales, supongamos que la frontera final de la zona plástica está muy cerca del plano específico de cizallamiento. Entonces

$$\phi_1 \text{ es aproximadamente igual a } \phi_{sp} \quad (7)$$

$$x_1 \text{ es aproximadamente igual a } a. \quad (8)$$

Tomando en cuenta lo anterior, la deformación de cizallamiento en la frontera final de la zona plástica es:

$$e_{sp} = \cot \phi_{sp} + \tan (\phi_{sp} - \gamma). \quad (9)$$

Notamos que de las fórmulas (2) y (9) se sigue que la relación simple entre la deformación y la razón de corte:

$$\epsilon_{sp} = \frac{1 - 2\xi \operatorname{sen} \gamma + \xi^2}{\xi \operatorname{cos} \gamma} \quad (9a)$$

La expresión simplificada para determinar los esfuerzos tangenciales en la frontera final de la zona plástica es

$$\tau_{sp} = \frac{R \operatorname{cos}(\phi_{sp} + \omega) \operatorname{sen} \phi_{sp}}{ab} \quad (10)$$

Las relaciones (9) y (10) son aproximadas en virtud de las suposiciones (7) y (8). Como  $\phi_{sp}$  es menor que  $\phi_1$ , y  $a$  es menor a  $x_1$ , la fórmula (9) nos da valores algo aumentados para la deformación y la fórmula (10) valores algo aumentados para el esfuerzo.

A velocidades de corte altas, la zona plástica se estrecha considerablemente. La frontera final de la misma se acerca al plano específico de cizallamiento. Como resultado de estas suposiciones (7) y (8) se aproximan a la realidad y las inexactitudes de las relaciones aproximadas (9) y (10) se reducen. Gracias al gran estrechamiento de la zona plástica, la dirección principal de los cizallamientos a altas

velocidades de corte se puede caracterizar por la dirección del plano específico de cizallamiento. Por lo tanto, podemos obtener una fórmula simplificada para el ángulo  $\beta_1$  entre los ejes principales de la deformación de la hojuela por tensión y de la velocidad de corte. Toma la forma siguiente:

$$\beta_1 = \phi_{sp} + \operatorname{arccot}\left(\frac{\varepsilon_1}{2} + \sqrt{1 + \frac{\varepsilon_1^2}{4}}\right) \quad (11)$$

### (1.5) EFECTO DE LAS OPERACIONES DE MAQUINADO EN LAS PROPIEDADES FISICAS DE LOS MATERIALES DE TRABAJO.

A pesar de que las propiedades de maquinabilidad usualmente se consideran como funciones de las propiedades físicas del material de trabajo tales como la dureza, etc., el problema inverso ha ganado atención; esto es, qué efecto tienen las operaciones de maquinado en la resistencia del material de trabajo.

E. G. Herbert está entre los primeros que investigaron estos efectos usando el péndulo de dureza que él había desarrollado. Su interés particular estaba dirigido a la determinación de la dureza de las hojuelas y en menor medida al cambio en las propiedades físicas del material de trabajo en sí. Concluyó que las hojuelas de acero eran cerca de 115 por ciento más duras que el material original. En el caso de latón el aumento en dureza era de sólo el  $12\frac{1}{2}$  por ciento mientras que las hojuelas de hierro fundido no mostraron ningún aumento.

Siebel y Leyensetter han hecho pruebas para encontrar cómo se afecta el límite de resistencia por la velocidad de corte. Sólo en el caso de avances pequeños (0.001 in./rev) y profundidades de corte de alrededor de 0.04 in. encontraron algún efecto. Un aumento en la velocidad de corte de 66 ft/min a cerca de 420 ft/min, produjo un aumento del 25 por ciento en el límite de resistencia. El efecto de las operaciones de maquinado en el límite de resistencia también se toma en consideración en las industrias automotrices americanas como muestra la fig. 10. A mayor dureza Brinell, mayor el efecto.

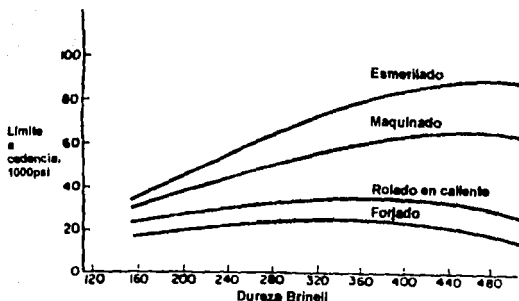


Fig. 10. Efecto del maquinado en el límite a cedencia (según Lipson, Noll y Clock).

Henriksen midió los esfuerzos residuales causados por cepillado y torneado y ha entrado así a un terreno donde se necesita considerablemente más investigación. Algunas averías de estructuras simples y complejas de maquinaria podrán ser explicadas y controladas después de que se hayan hecho investigaciones exitosas, evitando fallas misteriosas y cuidando vidas y costos. Investigaciones teóricas de una naturaleza similar han sido llevadas a cabo también por Thomsen en la Universidad de California en Berkeley.

Henriksen empleó herramientas con varias formas de bordes de corte investigando el efecto del avance, la profundidad del corte y el ángulo de pendiente real. En el caso del cepillado con herramientas con un radio de boca de 0.04 in, el ángulo de pendiente real afecta al esfuerzo residual considerablemente (Fig. 11). El esfuerzo residual aumentó más de 100 por ciento cuando el ángulo de pendiente había cambiado sólo  $6^\circ$  en el caso de maquinado con un avance de 0.008 in. Un mínimo de esfuerzo residual ocurrió siempre a un ángulo real de  $18^\circ$ ; aún no se ha encontrado la causa de esto.

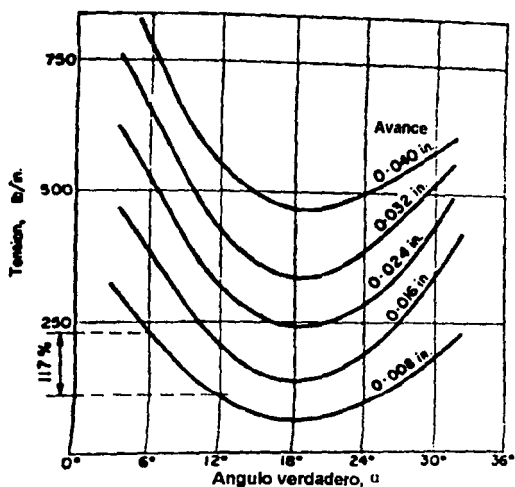


Fig. 11. Esfuerzos de maquinado (según Henriksen).

Un aumento en la velocidad de corte provoca una ligera reducción en el esfuerzo residual a avances de 0.010 in., y una reducción mayor a avances de 0.020 in. En algunos casos los esfuerzos residuales pueden lograr valores que se acercan a los esfuerzos permisibles del material.

Cuando el metal se cizalla, los cristales se alargan en una dirección diferente de la de cizallamiento. Esto se puede demostrar por medio de un paquete de cartas (Fig. 12) que se mueve sobre la cara de la herramienta a medida que ésta progresa. Círculos pintados en el lado de las cartas para representar la forma de los cristales antes de entrar al plano de cizallamiento se alargan para formar elipses al dejar el plano de cizallamiento.

El esfuerzo de corte se define en general como la relación del desplazamiento de una capa de material a la altura de la misma. En el caso de corte de metales, el esfuerzo de corte ( $\epsilon$ ) se representa entonces (Fig. 14a) por

$$\varepsilon = \frac{\Delta s}{\Delta x} \quad (12)$$

Se supone que la dimensión  $\Delta x$  (Fig. 13) es igual a la distancia media de los monocristales y, por lo tanto, es una cantidad muy pequeña. El índice de esfuerzo es, por lo tanto, considerablemente mayor en el corte de metal que en cualquier otro proceso de cizallamiento como el que ocurre en la prueba de tensión.

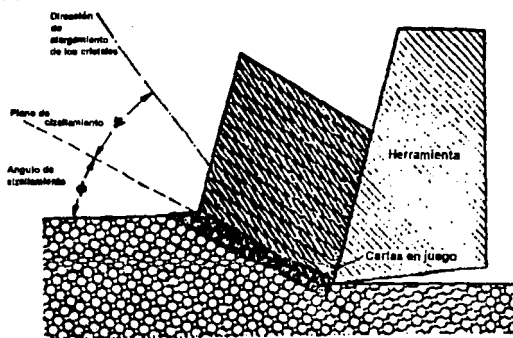


Fig. 12. Modelo que ilustra la dirección del alargamiento de los cristales en el corte.

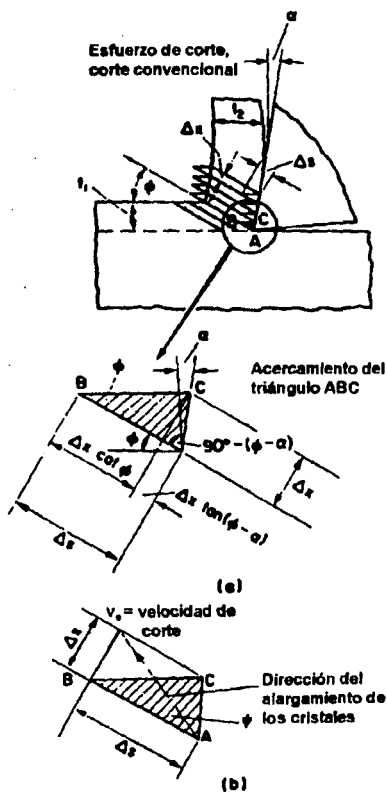


Fig. 13 Esfuerzo de corte con acercamiento.

## CAPITULO 2.

### DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

#### (2.1) DESCRIPCION DEL EQUIPO

Para las observaciones utilizamos un microscopio óptico Olympus/VANOX modelo AH MT3 con un par de cámaras fotográficas de 35 mm, un monitor de televisión Hitachi y un impresor de gráficas de video Sony integrados.

También empleamos un microscopio electrónico de barrido marca Jeol Technics, modelo JSM-T20. Tiene una resolución de 15 nm y una magnificación de 35x a 10,000x. El sistema de fotografía del microscopio electrónico era Yashica de película profesional.

El microdurómetro utilizado fue marca Shimadzu. Consiste en un microscopio con un dispositivo incorporado que aplica la carga a la muestra.

Como elemento de corte utilizamos un ultramicrotomo -Polycut S-, construido por la compañía Reichert-Jung. Sus principales características son las siguientes: el Polycut S es un microtomo de deslizamiento, operado por motor y controlado por microprocesador para seccionar especímenes grandes. Tiene disponibles un juego de tres cuchillas y sostenedores de navajas para distintas aplicaciones. Los controles están ubicados en una unidad de control separada. Puede ser operado manual o automáticamente. La altura de la cuchilla se regula por motor y el espesor de la sección puede ser seleccionado entre 1  $\mu\text{m}$  y 2,475  $\mu\text{m}$ . También existe una amplia gama de sujetadores de especímenes para muestras grandes o pequeñas, duras o suaves. La platina -movida por motor- puede ser orientada con respecto a dos ejes. La velocidad de corte y la longitud del recorrido pueden ser seleccionadas para adecuarse a la aplicación.



Muchos accesorios existen para cumplir requerimientos especiales, por ejemplo, se puede montar en el sujetador de la cuchilla un microscopio estereoscópico con un acoplamiento opcional para cámara.

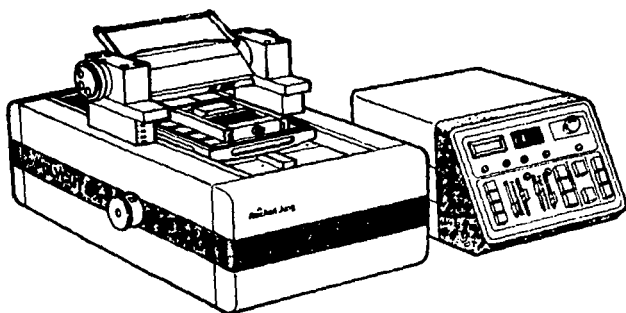


Fig. 14. Ultramicrotomo Polycut S.

## ESPECIFICACIONES TECNICAS

Espesor de la sección 1-275  $\mu\text{m}$ ,  
con multiplicación 9-2,475  $\mu\text{m}$ .

Movimiento de la navaja 70 mm, vertical.

Retracción de la navaja aprox. 100  $\mu\text{m}$ .  
durante el regreso

Disposición oblicua de la navaja  
fija 45 grados.  
variable 45-68 grados.

Tamaño máximo del espécimen 25x20x7 cm.

Platinas para parafina 25x20 cm.  
16x12 cm.  
12x 8 cm.  
8x 6.5 cm.

para celloidin 25x19 cm.  
20x12 cm.

Abrazadera del espécimen 44x58 mm.

Sujetador de especímenes redondos diám.: 6,15,25 mm.

Orientación del espécimen +/- 4.8 grados.

<b>Rotación del espécimen</b>	<b>aprox., +/- 3 y 90 grados.</b>
<b>Velocidad de corte</b>	<b>0.1 mm/s - 100 mm/s.</b>
<b>Velocidad de regreso</b>	<b>hasta 100 mm/s.</b>
<b>Velocidades del movimiento de la cuchilla</b>	<b>lenta/rápida.</b>
<b>Fuente de potencia</b>	<b>110 V/240 V.</b>
<b>Frecuencia</b>	<b>50 Hz y 60 Hz.</b>
<b>Dimensiones:</b>	
<b>Micrótopo (AlxAnxP)</b>	<b>37x42x75 cm.</b>
<b>Unidad de control</b>	<b>22x27.5x44 cm.</b>
<b>Peso:</b>	
<b>Micrótopo:</b>	<b>aprox. 96 kg.</b>
<b>Unidad de control</b>	<b>aprox. 15 kg.</b>

## CUCHILLAS DEL MICROTOMO

$\alpha$  = ángulo de espacio libre (con respecto al portanavajas)

$\beta$  = ángulo de la cuña

$\gamma$  = ángulo de la faceta exterior superior

$\delta$  = ángulo de la faceta exterior inferior

$\delta' = \delta$  = ángulo alternativo a  $\delta$

$\varepsilon$  = ángulo de la faceta

$\lambda$  = ángulo de inclinación ( $\alpha + \delta'$ )

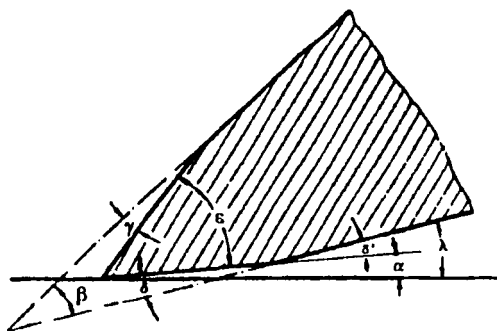


Fig.15. Geometría del borde de corte de una navaja.

Las fuerzas laterales ( $F_1$  y  $F_2$ ) dependen del ángulo de cuña  $\beta$ :

A un ángulo de cuña pequeño (e.g.  $30^\circ$ ) se producen grandes fuerzas laterales que actúan en el objeto.

A un ángulo de cuña grande (e.g.  $60^\circ$ ) las fuerzas laterales son menores. De cualquier forma, se aumenta la estabilidad del borde de corte.  $F$  permanece constante.

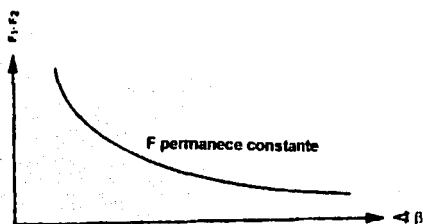
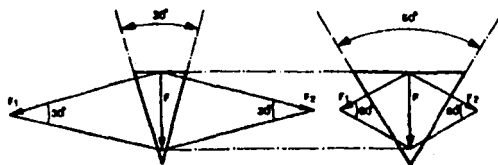


Fig. 16. Fuerzas laterales contra ángulo de cuña.

## (2.2) CORTES DE DISTINTOS MATERIALES VARIANDO ALGUNOS PARAMETROS

Se escogieron tres metales con diferentes grados de dureza: plomo, aluminio y zinc con valores de dureza Rockwell F de 35 y 50 para el aluminio y el zinc respectivamente. El plomo era demasiado suave para esta escala. Con esto podemos generalizar nuestros resultados al espectro de metales más usados en la actualidad pues tenemos un ejemplo de metales suaves -plomo-, de aluminio -cuya importancia en la industria actual es muy grande- y de materiales con durezas como la de los bronce y latones -zinc.

Para todos los cortes se utilizó un ángulo de cuchilla de  $50^\circ$  -intermedio entre los posibles- y se hicieron cortes de 20, 5 y  $1\ \mu\text{m}$  de profundidad de cada uno de los materiales, a una velocidad media-baja (aproximadamente 5 mm/s). Después se hicieron más cortes -todos de  $1\ \mu\text{m}$ - de los tres materiales, variando la velocidad (de 0.2 mm/s a 100 mm/s). Una vez que se tuvieron todas las muestras debidamente catalogadas, se procedió a la medición de las propiedades físicas y a la fase de fotografía microscópica.

Se fotografiaron al microscopio óptico todas las muestras de 20 y 5 mm y se seleccionaron las muestras de  $1\ \mu\text{m}$  con las velocidades de corte más alta, más baja e intermedia (100, 0.2 y 5 mm/s respectivamente). Estas impresiones (108 fotografías) constituyen la base para el análisis de microestructura en el rango de ampliación de 25 a 100 veces.

También se fotografiaron las mismas muestras con el microscopio electrónico de barrido (50 fotografías) para después poder estudiar los cambios en la microestructura con una resolución mayor. Esta vez se usaron ampliaciones del orden de 500 a 3500 veces. Ambos análisis -microscopía óptica y electrónica- serán abordados y detallados posteriormente con mayor profundidad.

Un aspecto importante que no podíamos dejar de cuantificar era el cambio en la dureza del material debido a la deformación. Hubo que utilizar otras escalas (Vickers y Knoop) ya que, como los espesores eran tan pequeños, la escala Rockwell resultaba inservible.

Por último, se hicieron mediciones en cortes transversales de las hojuelas para poder observar el cambio en su espesor y con ello el factor de compresibilidad del material. Para este experimento se utilizaron sólo algunas muestras.

### MODIFICACION EN EL VALOR DE LA DUREZA

Los materiales antes de cortar y pulidos con lija del número 600 (grano fino) para eliminar daños anteriores tenían las siguientes durezas (Vickers): plomo, 4.629; aluminio, 35.037; zinalco, 103.93. Para estas mediciones se utilizó la escala Vickers con una carga de 100 g por 15 s. La fórmula de la dureza Vickers es la siguiente:

$$H_{MV} = 1854.4 P/d^2$$

en donde  $P$  es la carga en gramos y  $d$  el promedio de las diagonales de la incisión en micras.

Se hicieron cortes de 20  $\mu\text{m}$  de profundidad y se midió la microdureza en la cara libre de la pieza de trabajo. Los resultados fueron los siguientes: plomo, 3.769; aluminio, 34.94; y zinalco, 102.66. Como puede observarse, en los tres casos el valor de la microdureza disminuyó en lugar de aumentar. Esto podemos atribuirlo a que el corte es tan fino que, en vez de producir esfuerzos en la pieza de trabajo, los alivia. Esto es, que los daños que tenía el material no habían sido eliminados del todo con la lija y al cortar con el micrótopo fueron quitados completamente -la cara libre queda con un acabado como de espejo después del corte.

Ahora bien, en las hojuelas si esperábamos encontrar una modificación importante ya que la teoría indicaba que un porcentaje altísimo -casi del 100 %- de la fuerza compresiva actúa sobre la hojuela y la simple observación de los especímenes lo comprobaba ya que las hojuelas, en algunos casos, no tenían ni la cuarta parte de la longitud de la pieza de trabajo. Esto se veía acentuado al aumentar la velocidad de corte. Además, en la mayoría de los cortes, las virutas mostraban tendencia a enrollarse si no es que lo hacían de hecho; esta deformación plástica indica que la dureza había sido modificada. Todavía más, las observaciones al microscopio óptico -también a simple vista eran perceptibles- revelaban que una de las caras de la hojuela estaba profusamente arrugada -mientras que la otra no- con lo que se mostraba que había esfuerzos importantes dentro de la hojuela.

Sólo en el aluminio de 20  $\mu\text{m}$  de espesor (5 mm/s) fue posible medir la dureza con la escala Vickers; el valor fue de 57.84 con lo que se comprueba un aumento considerable.

Para las demás muestras se requería una medición más superficial pues si no, como los espesores son tan pequeños, se estaría midiendo la dureza de la platina del microdurómetro. Esto lo logramos gracias a la escala Knoop que se diferencia de la Vickers en que una de las diagonales de la incisión es mayor y así es posible usar una carga menor (25 g).

Nuevamente medimos primero en las piezas antes de hacer los cortes. El plomo resultó fuera de escala -por su baja dureza-; el aluminio tenía un valor de 48.89 KHN y el zinalco de 125.2 KHN.

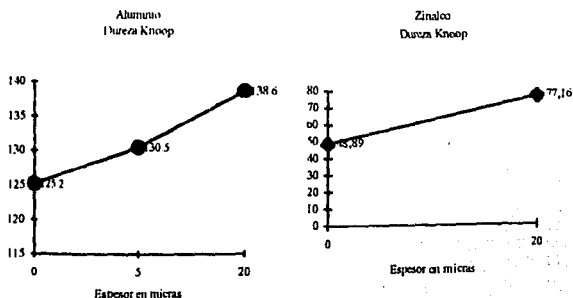
Intentamos medir la diferencia de dureza entre ambas caras de la hojuela, cosa que no fue posible ya que una de las caras estaba tan arrugada que no se imprimía la huella del microdurómetro. Los resultados obtenidos fueron:

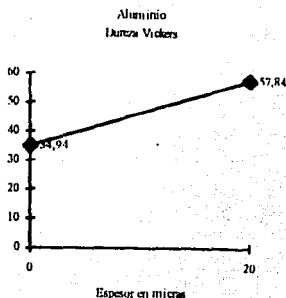


Para el zinalco: laminilla de 20  $\mu\text{m}$ , cara oscura, 138.6 KHN; laminilla de 5  $\mu\text{m}$ , también cara oscura, 130.5; tanto las caras brillantes de las muestras como las hojuelas de 1 mm resultaron inmedibles.

Para el aluminio - curiosamente- el único valor que pudo ser medido fue el de la hojuela de 20  $\mu\text{m}$  en la cara brillante, arrojando un valor de 77.16. Los demás fueron inmedibles por las arrugas (cambios pronunciados de profundidad) y por una distribución no uniforme de la dureza a lo largo de la superficie del material. Esta es una indicación de que los esfuerzos sufridos en la superficie tampoco fueron uniformes. Las zonas de la viruta al principio del corte sufren una deformación menor que las que están al final del paso de la herramienta.

En ambos casos comprobamos que si se da un aumento en la dureza como habíamos supuesto, y vemos, además, que el cambio de dureza en el aluminio es el mismo independientemente de la escala utilizada. Los resultados de las mediciones de los cambios en la dureza de los materiales maquinados con respecto a la profundidad del corte aparecen en las siguientes gráficas.





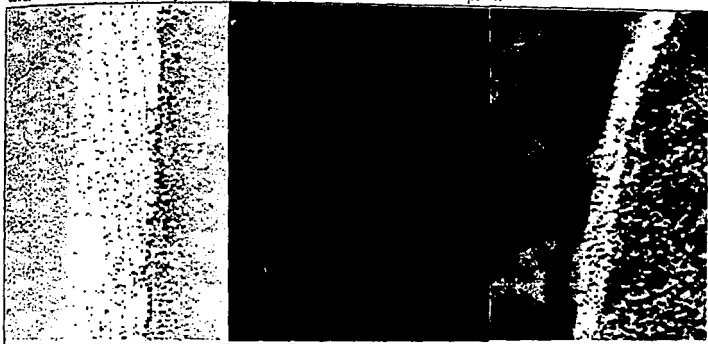
## MODIFICACION EN EL ESPESOR

El corte produce, como ya mencionamos antes, una compresión en la viruta. Esto quedó comprobado al medir el espesor de las hojuelas obtenidas. Los resultados fueron los siguientes: el zinalco cortado con una profundidad de 20  $\mu\text{m}$  resultó de 40  $\mu\text{m}$ , es decir, un aumento de 100 %. El zinalco de 1  $\mu\text{m}$  provocó hojuelas distintas de acuerdo con la velocidad de corte: el de 0.6 mm/s, 6  $\mu\text{m}$ ; el de 50 mm/s, 7 mm; esto representa un cambio del 700 %.

Por su parte, el aluminio también mostró aspectos interesantes. La muestra de 1  $\mu\text{m}$ , cortada a 0.6 mm/s aumentó a 12  $\mu\text{m}$  y la de 50 mm/s a 10  $\mu\text{m}$ . O sea, un aumento de alrededor de 1000 %. Como era de esperar, el aluminio de mayor profundidad (en este caso 5  $\mu\text{m}$ ) tuvo un aumento mucho menor en su espesor: produjo una hojuela de 15  $\mu\text{m}$  (cambio de 500 %).

El plomo, muy difícil de manejar por quebradizo, sólo pudo ser medido en dos casos: la hojuela de 20  $\mu\text{m}$ , cortada a 4 mm/s que resultó ser de 100 mm y una de 1  $\mu\text{m}$  a 3 mm/s que fue de 5  $\mu\text{m}$ . Esto es un aumento de 500 % para ambos casos.

En las siguientes figuras se presentan vistas transversales de los materiales a 100x con su respectiva escala de medición. A la derecha, aluminio de 5  $\mu\text{m}$  y a la izquierda, zinalco de 20  $\mu\text{m}$ .

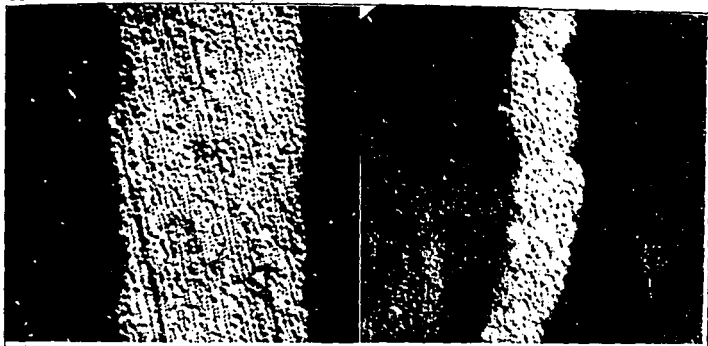


### (2.3) ANALISIS DE MICROESTRUCTURA AL MICROSCOPIO OPTICO

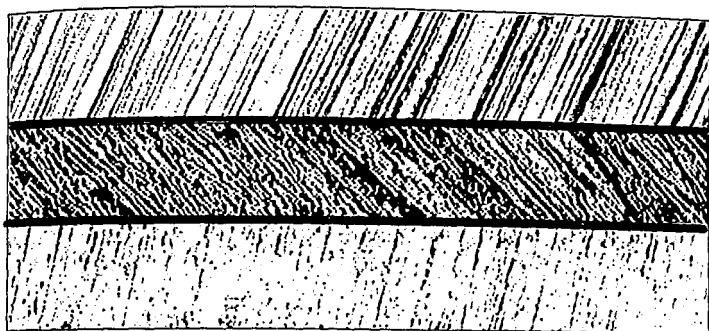
Lo primero que apreciamos es que existe una diferencia muy marcada entre ambas caras de la hojuela. A simple vista, una ofrece un aspecto brillante y arrugado, mientras que la otra se ve oscura y lisa. Al utilizar el microscopio óptico descubrimos que la cara del lado del corte (la oscura) efectivamente está lisa y el único relieve que presenta son unas leves estrías en la dirección del movimiento de la herramienta. La otra superficie, por contra, muestra una gran profusión de arrugas. Esto puede verse en las siguientes imágenes. Se trata de la viruta de plomo de 1  $\mu\text{m}$  cortada a 5 mm/s vista a 50x.



El hecho de que las arrugas sólo aparezcan en una de las superficies indica que en realidad no se trata de un doblez de toda la hojuela sino, más bien, de una variación no uniforme del espesor de la hojuela debido a la irregular compresión. En las figuras vemos como cambia el grosor de las muestras principalmente por alteraciones del relieve en sólo una de las caras. A la izquierda, zinalco de 20  $\mu\text{m}$  (250x) y a la derecha, de 1  $\mu\text{m}$ , cortado a 0.2 mm/s (500x).

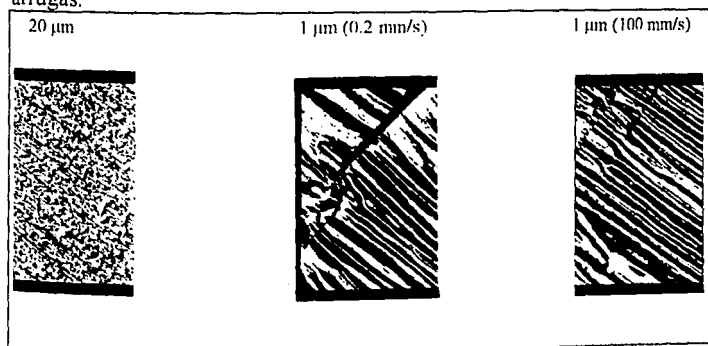


Ya habíamos dicho que los daños y modificaciones se dan principalmente en la hojuela y no en el material cortado. Las siguientes gráficas muestran las caras libres de las piezas de trabajo del plomo (80x), del aluminio (100x) y del zinalco (80x) -en ese mismo orden- después de haber sufrido cortes. Podemos observar que salvo el rayado de la cuchilla -muy superficial- la pieza de trabajo no ha sufrido ningún otro daño de importancia. Esto constata los resultados de las mediciones de dureza realizados antes y después del corte.

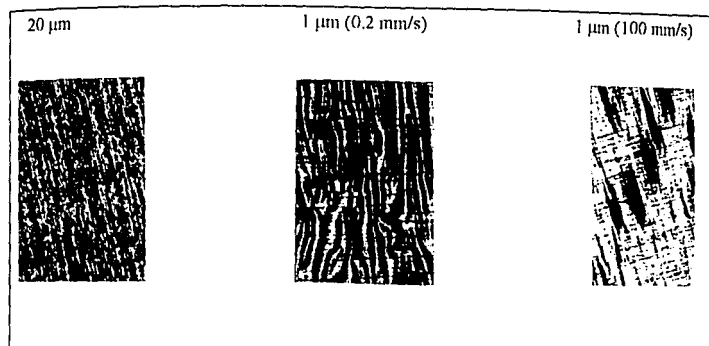


Al analizar las hojuelas, destaca que su grado de compresión y, por consiguiente, de densidad de arrugas, es directamente proporcional a la velocidad de corte e inversamente proporcional a la profundidad del mismo.

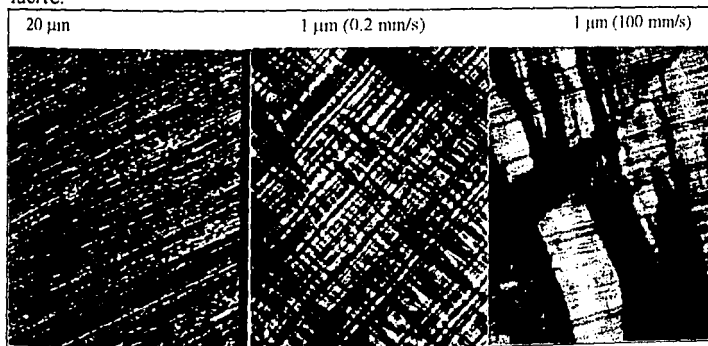
Vemos como para el zinalco a  $20\ \mu\text{m}$  la distribución del espesor es muy uniforme y, por lo tanto, no se aprecian "pliegues" mientras que en las otras dos fotografías, que representan cortes de  $1\ \mu\text{m}$ , se ven claramente. Todas las gráficas tienen la misma ampliación ( $25\times$ ). Es claro que conforme aumenta la velocidad de corte aumenta la densidad de las arrugas.



En el aluminio se conserva la misma relación en cuanto al espesor pero respecto a la velocidad ésta se invierte. Ahora, conforme aumenta la velocidad de corte el grado de arrugamiento disminuye.



En el plomo se comporta de la misma forma que en el aluminio pero aparece un fenómeno que si ya se había presentado en los otros metales, no lo había hecho de forma tan dramática: al aumentar la velocidad de corte y disminuir el espesor se da un agrietamiento muy fuerte.



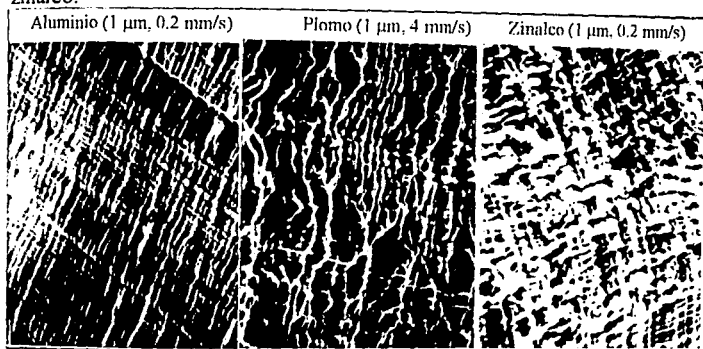
La similitud de comportamiento entre el aluminio y el plomo se debe a que ambos tienen la misma microestructura (cF); el zinalco (material de dos fases) debe a su composición su conducta tan peculiar.

Respecto al agrietamiento, vemos que se da tanto en el plomo como en el zinalco y prácticamente no se presenta en el aluminio. Nuevamente recurrimos a la estructura interna para encontrar una explicación. El zinalco se rompe porque la deformación, como veremos más adelante, se lleva a cabo por deslizamiento de unos granos sobre otros. Esto produce grietas a nivel microscópico que inducen las fracturas a mayor escala. En el plomo, con una estructura molecular de tipo cristalino, ese agrietamiento se da por la debilidad de los enlaces; el plomo es un material muy suave, con una dureza siempre por debajo del límite inferior de nuestra escala de medición. El aluminio con la misma estructura pero con una fuerza cohesiva mayor no es tan susceptible de fracturarse.



## (2.4) ANALISIS DE MICROESTRUCTURA AL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO

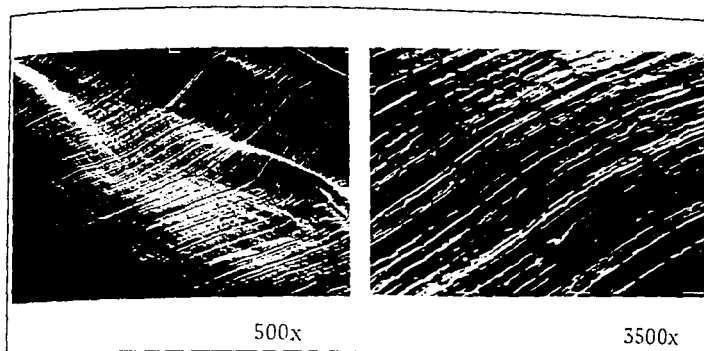
A nivel microestructural, los cambios son importantes. Lo primero que vemos es que la diferencia entre las caras se mantiene con una muy lisa y otra con mucho relieve. Ya mencionamos que tanto el aluminio como el plomo tienen la misma forma cristalina (cF) y que el zinalco es un material bifásico, por lo tanto, podemos esperar comportamientos semejantes en el aluminio y en el plomo y radicalmente distinto en el zinalco.



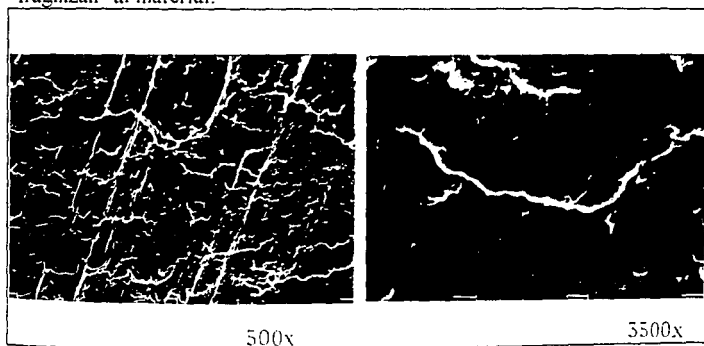
3500x

Como se ve en las fotografías, el plomo, el aluminio y el zinalco presentan la configuración que cabía esperar. Los dos metales cF, cuyo mecanismo de deformación es el deslizamiento de planos atómicos, muestran estos planos claramente. De igual manera, el zinalco -que se deforma por deslizamiento de granos- muestra una superficie en la que parecen brotar los distintos granos.

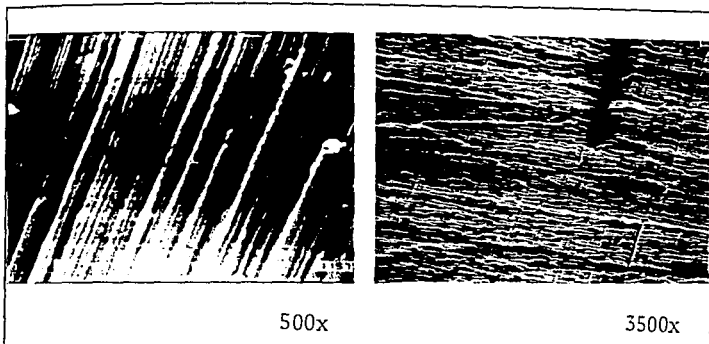
A este nivel, también puede observarse por qué el plomo se vuelve tan quebradizo. En la foto se ve la gran cantidad de microgrietas que existen en su superficie. Además puede apreciarse, a pesar de la ampliación (3500x), lo liso que queda la cara que toca la herramienta.



En el zinalco no se da una superficie tan lisa sino que parece que la navaja va rompiendo los distintos granos y deja unos a modo de "escalones". Claro está, aún así, su relieve es mucho menos pronunciado que el de su reverso. Como la deformación se da por el deslizamiento de unos granos sobre otros, aparecen grietas en las fronteras de grano que "fragilizan" al material.



El aluminio sí llega a presentar algunas grietas, aunque en menor medida que los otros materiales. Su cara de corte queda muy lisa y mantiene la misma configuración que a nivel macroscópico (rayado superficial efecto de la herramienta)



ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

## (2.5) CONCLUSIONES Y RESULTADOS

1. El corte no provoca daños en la superficie de trabajo pero si modifica profundamente la estructura y las propiedades de la hojuela producida.
2. La viruta cambia su espesor ensanchándose de acuerdo con su factor de compresibilidad que depende del material, de la velocidad y profundidad de corte.
3. El cambio de espesor es más pronunciado en el aluminio y en el plomo (materiales cF) que en el zinalco (deformación por deslizamiento de granos).
4. Como consecuencia del cambio de espesor se modifica la dureza. Se endurecen más los metales cF (aluminio y plomo) y menos el zinalco.
5. La cara opuesta al corte de la hojuela sufre la mayor compresión, arrugándose, mientras que la cara que toca la herramienta queda muy lisa (sufre tensión).
6. Las arrugas no son simples dobleces sino cambios de espesor a lo largo de toda la viruta.
7. Los materiales de dos fases se agrietan por las fronteras de grano (separación de granos).
8. Los materiales suaves como el plomo tienden a agrietarse conforme aumenta la velocidad y conforme disminuye el espesor.
9. En el aluminio el agrietamiento es prácticamente inexistente.

**BIBLIOGRAFIA**

Kronenberg, M., MACHINING SCIENCE AND APPLICATION, (Theory and Practice For Operation and Development of Machining Processes), Oxford, 1a edición en inglés, Ed. Pergamon Press Ltd., 1966

Manual de operaciones del micrótopo POLYCUT S, Reichert-Jung

Nix, Tetelmann, THE PRINCIPLES OF ENGINEERING MATERIALS, New Jersey, Ed. Prentice Hall, 1973

Torres Villaseñor, G.; Negrete, J. y Valdés, L., PROPIEDADES Y USOS DEL ZINALCO, Revista Mexicana de Física 31, No. 3 (1985), pp 489-501

Torres Villaseñor, G., COMPORTAMIENTO MECANICO DE ALEACIONES Zn-Al (Posibilidad de Sustituir al Al), Memorias del Congreso Al en LA, pp 356-369

Van Vlack, Lawrence H., MATERIALES PARA INGENIERIA, México, Ed. CECSA, 1991

Zorev, N:N., METAL CUTTING MECHANICS, Oxford, 1a edición en inglés, Ed. Pergamon Press Ltd., 1966