

308917
UNIVERSIDAD PANAMERICANA

ESCUELA DE INGENIERIA

14

CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE ALGUNAS PROPIEDADES
MECÁNICAS DE UNA NUEVA CERA MAQUINABLE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO
ELECTRICISTA

AREA: INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

PRESENTA:

FRANCISCO RODRÍGUEZ MANCILLA

DIRECTOR DE TESIS: FÍS. MARIANO ROMERO VALENZUELA

MÉXICO, D.F.

2000

283699



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 esta 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.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	3
<u>CAPÍTULO PRIMERO</u>	<u>6</u>
MATERIALES BAJO ESTUDIO	6
1.1. HIMACH-WAX.	6
1.2. CERA COMERCIAL.	10
<u>CAPÍTULO SEGUNDO</u>	<u>14</u>
PRUEBAS APLICABLES A LA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES	14
2.1. DUREZA.	14
2.2. PRUEBAS DE TENSIÓN.	28
2.3. PRUEBAS DE COMPRESIÓN.	38
2.4. TENACIDAD.	39
2.5. MECÁNICA DEL CORTE DE MATERIALES.	44
2.6. ASPEREZA SUPERFICIAL.	59
<u>CAPÍTULO TERCERO</u>	<u>66</u>
ELABORACION DE PRUEBAS	66
3.1. PRUEBAS DE DUREZA.	66
3.2. PRUEBAS DE TENSIÓN.	69
3.3. PRUEBAS DE IMPACTO.	74
3.4. PRUEBAS DE MAQUINABILIDAD Y RUGOSIDAD	77
PROGRAMA CNC	79
<u>CAPÍTULO CUARTO</u>	<u>80</u>
RESULTADOS	80
4.1. PRUEBAS DE DUREZA.	80
4.2. PRUEBAS DE TENSIÓN.	81
4.3. PRUEBAS DE IMPACTO.	85
4.4. PRUEBAS DE MAQUINABILIDAD Y RUGOSIDAD.	86
<u>CAPÍTULO QUINTO</u>	<u>88</u>
CONCLUSIONES	88
BIBLIOGRAFÍA	91

INTRODUCCIÓN

Las ceras maquinables son como su nombre lo indica, trozos de cera con propiedades y dimensiones específicas, usualmente son utilizadas en la industria para la elaboración de prototipos rápidos o para probar la correcta programación de máquinas de control numérico y en algunos casos para elaborar modelos para procesos de fundición con métodos como el de *cera perdida*.

Aunada a todas estas utilidades, las ceras maquinables tienen una gran aplicación con fines didácticos ya que son muy utilizadas para probar la correcta programación de las máquinas de control numérico utilizadas en las universidades, esto se hace con el fin de que en caso de presentarse una incorrecta instrucción en el programa en lo referente a avance, profundidad de corte o cualquier otro parámetro de corte, la máquina o las herramientas no sean dañadas ya que la cera no las afectaría de la misma manera en que lo hubiese hecho un metal u otro material de mayor dureza o resistencia mecánica.

Actualmente sólo existe un solo distribuidor de ceras maquinables en México, debido a ello, pero sobre todo a que esta cera tiene que ser importada, su costo es sumamente elevado. En Ingeniería este es un problema típico ya que en ocasiones hay que pagar el precio de depender tecnológicamente de otro. Ante esta problemática se analizaron varias opciones de solución, quizá la más sencilla era simplemente dejar de utilizar la Cera Comercial y tener mucho más cuidado al momento de simular los programas de CNC antes de ejecutarlos, pero a fin de cuentas el riesgo, aunque menor, existe al maquinar piezas metálicas.

Otra solución, aunque no sencilla, es la planteada en este trabajo de investigación cuyo objetivo principal es el siguiente:

“Desarrollar una nueva cera maquinable capaz de sustituir a la cera que actualmente se utiliza en la universidad, presentando propiedades mecánicas tales como dureza, resistencia al impacto, maquinabilidad y acabado superficial similares y de ser posible mejores a la Cera Comercial como de ahora en adelante la denominaremos”

Es importante mencionar que la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial a través de la Dirección General de Normas, establece algunos lineamientos para los productos que se comercialicen en el territorio nacional, en este sentido se investigaron las normas concernientes a ceras con el fin de tener un parámetro de las características que debe poseer una cera maquinable; sin embargo, sólo se encontraron 3 Normas Oficiales Mexicanas y ninguna de ellas hace mención a las ceras maquinables, las tres normas investigadas son: la NOM-T-131-1990, la NOM-L-39-1980 y la NOM-T-133-1990 éstas, aunque se refieren a ceras derivadas del petróleo, no resultan de utilidad para fines de este trabajo.

En consecuencia a esta poca información el siguiente paso fue buscar normas o alguna metodología para evaluar propiedades mecánicas de ceras, aquí aunque la información también fue escasa, encontramos algunos métodos para evaluar algunas de estas propiedades, pero desgraciadamente estas pruebas requieren de instrumentos especiales fuera de nuestro alcance

Ante esta falta de instrumentos, fue necesario diseñar las pruebas de acuerdo a los recursos disponibles. En el capítulo segundo se analiza el fundamento teórico sobre el cual se sustentará el capítulo tercero donde se explica brevemente la metodología y el diseño de las pruebas realizadas. Se optó por realizar pruebas de dureza, tensión, impacto, maquinabilidad y acabado superficial ya que estas son algunas de las principales propiedades que consideramos debe poseer la cera, por ejemplo, la dureza es necesaria ya que al ser terminada una pieza, ésta deberá resistir el ser transportada y manipulada; si la cera es

CAPÍTULO PRIMERO

MATERIALES BAJO ESTUDIO

En este capítulo se hará una breve descripción de cómo fue desarrollado el nuevo material, y de igual forma se comentarán algunos aspectos generales de la Cera Maquinable Comercial.

1.1. Himach-wax.

Denominaremos Himach-wax a la nueva cera maquinable desarrollada; dicho material es el resultado de una ardua experimentación en la combinación de materiales y sus proporciones.

El primer paso fue tratar de investigar de qué está compuesta la Cera Maquinable Comercial; tratamos de hacerlo directamente con el fabricante, sin embargo, no quisieron proporcionar dicha información ya que la consideran un secreto industrial, ante esto decidimos desarrollar nuestro propio material.

La Cera Maquinable Comercial a simple vista se comporta como una cera, aunque en algunos casos presenta propiedades similares a las de un polímero tales como dureza, resistencia al impacto y un alto punto de fusión; por lo anterior concluimos que la Cera Maquinable Comercial es la mezcla de una cera y un polímero

El problema ahora era saber qué tipo de cera y polímero podíamos combinar para desarrollar un material con propiedades semejantes a la Cera Maquinable Comercial. En cuanto a la cera decidimos usar parafina y candelilla, las cuales son las ceras más comunes y como tales presentan muy bajos puntos de gota (60°C y 70°C respectivamente), la parafina es una cera translúcida y de gran resistencia

al impacto, la candelilla es de color café, y aunque muy frágil presenta gran dureza, por lo anterior decidimos usar ambas ya que poseen dos de las principales propiedades deseadas en una cera maquinable.

Ahora bien, sólo faltaba agregar un polímero el cual tuviera la propiedad de combinarse con ambas ceras; en un principio se probó con polietilenos de baja densidad, sin embargo, éstos tienen muy alto punto de fusión y no logran disolverse completamente en la mezcla de la parafina y candelilla. Para resolver este problema optamos por utilizar una cera polietilénica; probamos con algunas, siendo la más conveniente, la denominada AC-8 por su bajo punto de gota ($110^{\circ} - 115^{\circ}\text{C}.$)

Por lo anterior decidimos comenzar nuestra investigación combinando los tres materiales anteriormente descritos: parafina, candelilla y cera polietilénica (AC-8). Debido a sus bajos puntos de gota (Drop Point) son materiales ideales, ya que no se necesitarían equipos sofisticados para el calentamiento de la mezcla, bastaría una fuente de calor que nos permitiera elevar la temperatura de la mezcla por encima de la temperatura de fusión del material con mayor punto de gota, esto lo conseguimos a través de una parrilla eléctrica.

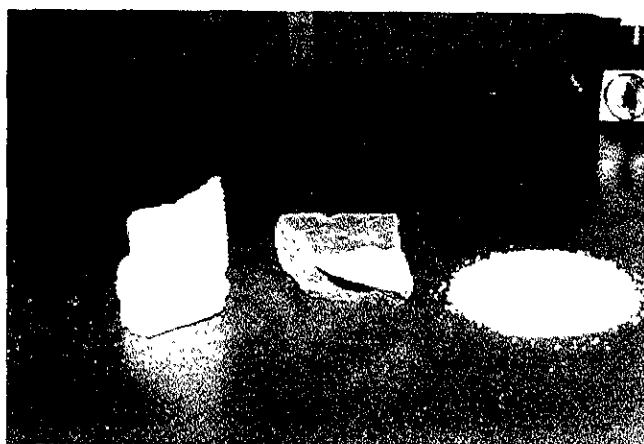


Fig. 1.1. Materias Primas (de izquierda a derecha: Parafina, Candelilla y Cera Polietilénica AC-8).

El siguiente paso fue probar la manera en que se llevaría a cabo la fusión de los tres materiales. Se utilizó un vaso de precipitado, un agitador de madera y una parrilla eléctrica, la cual cuenta con un reóstato para controlar manualmente la temperatura.

Por las distintas propiedades de los materiales, se pensó en comenzar a fundir de acuerdo con su punto de fusión, comenzando con el mayor, es decir, primero con la cera polietilénica, después la candelilla y por último la parafina, pero se presentó dificultad al momento de agitar la mezcla y se corría el riesgo de quemar la cera polietilénica.

Otra alternativa era hacer justamente lo contrario comenzando con la parafina, después la candelilla y por último la cera polietilénica; sin embargo, aunque se formó una mezcla líquida de manera rápida, se corría el riesgo de salpicar material al momento de adicionar la cera polietilénica ocasionando un accidente.

La mejor solución fue el adicionar los tres componentes al mismo tiempo realizando un movimiento lento y continuo de agitación a la mezcla. Considerando los porcentajes con los que finalmente se logró la mejor combinación transcurrió un tiempo de proceso de fusión de aproximadamente 20 minutos a una temperatura de 130°C, medida directamente sobre la mezcla y con una cantidad total de 200g. de Himach-wax.

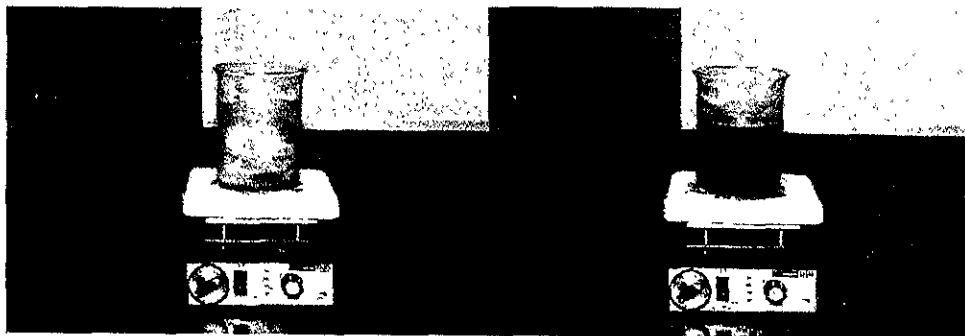


Fig. 1.2. Proceso de Fusión (200grs, 20 min., 130°C).

En cuanto a los porcentajes de cada uno de los componentes de la Himach-wax nos reservamos el derecho de mencionarlos, sin embargo fueron el resultado de una ardua experimentación ya que se probaron distintas combinaciones, observándose las repercusiones que esto tenía en el material. Por ejemplo:

- Demasiada candelilla o parafina repercutía en excesivos rechupes en las piezas.
- Un bajo porcentaje de cera polietilénica generaba un material frágil y quebradizo.
- Una gran cantidad de cera polietilénica generaba un material con poca resistencia al impacto.
- Una gran cantidad de candelilla producía una cera muy frágil y muy dura.

Cabe mencionar, que en esta etapa de la investigación, se observó que las piezas obtenidas a través de vaciar el material en estado líquido en tubos de acero a manera de moldes, presentaban grandes rechupes sobre todo en la parte central, pues en un principio decidimos acelerar el proceso de enfriamiento sumergiendo los moldes en agua. Ante esto se observó, que para obtener de la mejor manera la cera maquinable debe dejarse enfriar a temperatura ambiente.

En caso de ser requerido, puede adicionarse un pigmento o colorante especial para ceras, el cual no deberá exceder del 2% del peso total con el fin de mejorar el aspecto de la cera desarrollada; dicho pigmento no afecta las propiedades mecánicas

En costo de las materias primas para la elaboración de la Himach-wax se presenta en la Tabla 1.1., sin embargo el comparativo de costos de ambas ceras maquinables, se estudiará en capítulos posteriores.

Materia prima	Costo por kilogramo (pesos M.N.)
Parafina	22.50
Candelilla	9.50
Cera polietilénica AC-8	42.50

Tabla 1.1. Materias Primas (Costo por kilogramo).

1.2. Cera Comercial.

La información sobre esta cera es escasa. En primer lugar debido a que aparentemente sólo existe un distribuidor en México. Al contactarnos con él únicamente pudimos obtener la información que a continuación se muestra; ante esto intentamos comunicarnos directamente con el fabricante (FREEMAN Mfg. & Supply Co.), sin embargo, no pudimos obtener más información, pues lo consideran un “secreto industrial”.

La información obtenida mediante el distribuidor en México (PROMETAL Provedora Metalmecánica, S.A. de C.V.) es la siguiente:

1.2.1. Disponibilidad.

Esta cera comercial según el fabricante, se encuentra disponible en un amplio rango de bloques y barras con tamaños standard; puede ser vendida por peso en moldes propios del cliente, o simplemente ser ordenados según las necesidades específicas de los mismos.

1.2.2. Maquinabilidad.

No necesita refrigerantes o lubricantes que hacen costoso y sucio el proceso de maquinado. Ya que esta cera no es abrasiva, se autolubrica y no se funde a pesar de maquinados a altas velocidades. A diferencia del plástico o la madera, este material no se incrusta en las herramientas y con él se pueden mantener los bordes afilados de una pieza, así como también hacer cortes precisos sin perder el acabado superficial de que son capaces las herramientas.

A diferencia de los materiales a base de plásticos o madera usados para similares aplicaciones esta cera no es celular, con gránulos, o abrasiva, evitando así el desgaste de las herramientas.

Debido a su dureza, permite un correcto dimensionamiento durante las operaciones de maquinado, cada bloque está hecho para brindar superficies lisas y cuadradas para cualquier tipo de requerimientos de sujeción o duplicado.

1.2.3. Viruta.

Debido a su alto punto de inflamación (Flash Point), comparado con los plásticos, no produce residuos con extremos cortantes o afilados como un metal lo haría. Esta cera está formulada con materiales autolubricantes no tóxicos, los cuales no producen polvos dañinos durante el maquinado. Esto elimina la necesidad de colectores de polvo o el uso de lubricantes, permitiendo así una fácil inspección de la superficie que está siendo maquinada en ese momento.

1.2.4. Reciclaje.

En caso de ser recolectada toda la viruta, consecuencia de las operaciones de maquinado, ésta puede volverse a fundir en algún molde para cualquier uso futuro. Sin embargo, el fabricante no especifica bajo qué condiciones se puede hacer este reciclaje, o si la cera pierde algunas de sus propiedades.

1.2.5. Especificaciones.

Dureza = 50 - 55 Shore D

Gravedad Específica = 0.92

Softening Point = 226°F

Color = Azul

Costo

Descripción	Precio unitario USD
Bloque 2" x 6" x 24"	137.00
Bloque 3" x 6" x 12"	103.00
Bloque 3" x 12" x 24"	415.00
Bloque 6" x 12" x 12"	392.00
Barra 3" x 12"	46 00

Tabla 1.2. Costos Cera Maquinable Comercial (varias presentaciones).

CAPÍTULO SEGUNDO

PRUEBAS APLICABLES A LA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES

En este capítulo analizaremos los fundamentos teóricos para el estudio de algunas de las propiedades mecánicas de ambas ceras maquinables. Esto es de suma importancia ya que ésta será la base teórica sobre la que se fundamente el capítulo tercero, en el cual diseñaremos o adaptaremos las correspondientes pruebas para la evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales bajo estudio; pues como sabemos no existen normas internacionales y mucho menos nacionales para la evaluación de las propiedades mecánicas de una cera maquinable.

2.1. Dureza.

2.1.1. Introducción.

De forma genérica, se entiende por dureza, la resistencia superficial a la deformación de un sólido.

Aunque no es una propiedad fundamental de un material, a partir de ella se puede obtener información acerca de las características mecánicas del mismo, ya que está relacionado con las propiedades elásticas y plásticas.

El valor de dureza obtenido en un ensayo determinado sirve, sólo como comparación de ese material con otros o con él mismo tras un tratamiento efectuado sobre él.

El procedimiento de ensayo y la preparación de la muestra tienen la ventaja de ser sencillos, rápidos y en algunos casos, no destructivos. Además, a partir de la dureza de un material se puede obtener cierta información sobre sus características mecánicas, composición, resistencia al desgaste, dificultad de mecanizado e influencia de los tratamientos térmicos o mecánicos que ha sufrido.

Los diversos ensayos de dureza se pueden dividir en tres grandes grupos:

1. Ensayos de dureza al rayado.
2. Ensayos de dureza por penetración estática.
3. Ensayos de dureza elástica o dinámicos.

2.1.2. Ensayos de dureza al rayado.

Es el primer procedimiento para determinar la dureza y fue elaborado por Friedrich Mohs. Este procedimiento consiste en una escala de dureza formada por diez minerales, de forma que cada uno de ellos es rayado por el siguiente. Si un material es rayado por uno de los minerales de la escala y no por el siguiente, su dureza se encontrará entre estos dos valores de la escala.

Dentro de los ensayos de dureza al rayado, son también importantes los ensayos con la lima, en los que el material se somete a la acción de una lima de forma y dureza determinadas. Este tipo de ensayos son muy rápidos y sencillos, aunque no tan precisos.

Dentro de este tipo de ensayos destaca también el método de Martens; éste ideó un aparato con una punta piramidal de diamante con un ángulo en el vértice de 90° sobre el cual, mediante un brazo de

palanca, actúa una carga. La probeta se desplaza bajo el diamante, produciéndose así un surco en ella. Midiendo la anchura de la raya en micras, se calcula la dureza de acuerdo con la siguiente expresión:

$$M = \frac{10000}{W^2} \quad (W = \mu\text{m})$$

2.1.3. Ensayos de dureza por penetración estática.

Se utilizan diversos métodos que se diferencian en la forma de los penetradores, en la carga que se aplica y en la forma de expresar el valor de la dureza. Los más importantes son los denominados **Brinell, Vickers y Rockwell**.

2.1.3.1. Dureza Brinell.

Se caracteriza porque la impresión se produce mediante una bola de acero extraduro a la que se le aplica una carga, con el fin de que deje una huella impresa en el material.

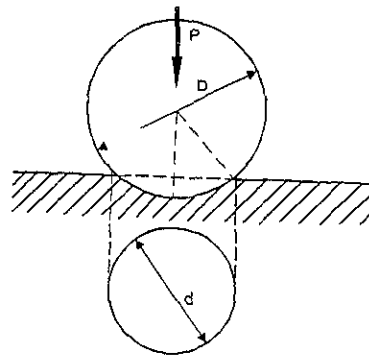


Fig.2.1. Ensayo de dureza Brinell.

La impresión de la huella será un casquete esférico. Llamando “D” al diámetro de la bola, “P” a la carga aplicada y “d” al diámetro de la huella, la dureza estará dada por:

$$H = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Este ensayo se estableció para una carga de 3,000 Kp. y un diámetro de bola de 10 mm. para determinar durezas de hierros y aceros con espesores mayores de 6 mm. Se comprobó posteriormente, que para espesores menores y para materiales más blandos, el material sufría grandes deformaciones que impedían la obtención de una huella clara y fiable. Para solucionar este problema, había que actuar con cargas distintas, lo que hacía necesario el empleo de un penetrador de diámetro distinto. Se comprobó que para que el ensayo fuera válido y cotejable las huellas tienen que ser semejantes y cumplir la relación:

$$\frac{P_1}{D_2^2} = \frac{P_2}{D_1^2} = K \quad (K = \text{cte.})$$

Descripción del método.

Se caracteriza por provocar en la pieza una huella producida por una bola de acero extraduro o en casos especiales, de carburo de wolframio, con un diámetro determinado. Al actuar sobre ella una carga también prefijada, se producirá entonces una huella en forma de casquete esférico sobre la pieza de diámetro “d” y superficie “S”.

El valor de dureza Brinell es:

$$HB = \frac{P}{S}$$

Pero como:
$$S = \pi D f = \frac{1}{2} \pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

Sustituyendo queda:
$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Por tanto, para hallar "HB" sólo hay que medir "d", ya que "P" y "D" son constantes.

Realización del ensayo.

Para ejecutar el ensayo se precisa disponer de lo siguiente:

- a) Una máquina capaz de hacer actuar sobre la bola la carga deseada, medida con un error inferior al 3%.
- b) Un microscopio con retículo graduado capaz de medir el diámetro de la huella con una precisión de 0.01 mm.

Factores que deben tenerse en cuenta en la realización de este ensayo:

- a) La elección de cargas y bolas se realiza tomando en cuenta el criterio aproximado que marca el material en cuanto a dureza y espesor. Cuanto más blando sea el material, menor debe ser la constante de ensayo "K".

- b) Del mismo modo, cuánto más delgadas sean las piezas, menores han de ser las cargas y los diámetros de las bolas.

Las precauciones que deben tenerse en cuenta son:

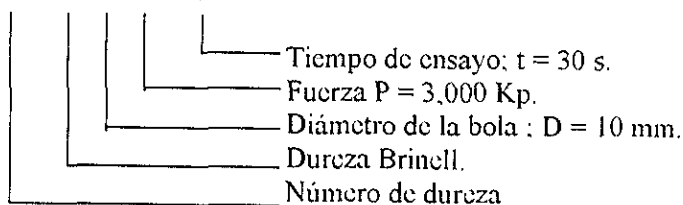
- 1) Que la zona superficial de la pieza donde se ha de realizar el ensayo esté completamente limpia, pulida, exenta de defectos y dispuesta normalmente a la dirección de la carga. En las superficies curvas es necesario rectificar una zona de tamaño adecuado.
- 2) Que el espesor de la pieza no sea inferior a 10 veces la flecha del casquete de la huella. La determinación del espesor es fundamental, pues el ensayo no debe dar lugar a que la huella quede marcada en la parte opuesta.
- 3) Que el centro de la huella diste del borde de la pieza más de $2d$.
- 4) Que la carga aumente lentamente y se mantenga constante durante cierto tiempo.

Sin embargo, el número obtenido para el valor de la dureza no tiene significación propia si no va acompañado de los valores de "D", "P" y "t".

Así, la designación de un ensayo se hace escribiendo el número de dureza seguido de las letras "HB" y de las características del ensayo: bola/carga/tiempo.

Por ejemplo:

110 HB 10/3000/30



En este tipo de ensayos, si el material tiene poco espesor, los resultados se falsean, pues la huella no es sólo superficial sino que se deforma todo el material. Para obviar este inconveniente se pueden obtener números Brinell iguales, siempre que las cargas aplicadas se mantengan proporcionales a los cuadrados de los diámetros de las bolas, porque en estas circunstancias se obtienen huellas geométricas semejantes.

A estas relaciones se les llama constantes de ensayo y se han elegido de forma que:

$$\frac{D}{4} < d < \frac{D}{2}$$

Si la cifra de dureza Brinell es superior a 500, las bolas de acero ordinario sufren deformaciones y el desarrollo no es correcto, razón por la cual se han construido bolas de carburo de wolframio que dan resultados aceptables hasta 725 unidades Brinell.

Además de la constante de ensayo y el diámetro de la bola, interviene el tiempo de duración del ensayo. En España se estipula como norma una duración de 30 segundos.

Relación entre dureza Brinell y la resistencia a la tracción.

A las ventajas de este ensayo (ser prácticamente no destructivo, poderse efectuar en diversos puntos de la misma pieza para comprobar su homogeneidad, ser rápido y fácil de ejecutar) hay que añadir la de permitir calcular aproximadamente la carga de rotura.

Experimentalmente se ha comprobado que existe una relación de proporcionalidad directa entre el número de dureza Brinell y la carga de rotura.

2.1.3.2. Dureza Vickers.

Data este método de 1925 y su razón de ser estriba en que el método Brinell, a partir de durezas superiores a 400 Kp/mm^2 no arroja resultados convincentes y para durezas mayores de 600 Kp/mm^2 , es inaplicable.

Se diferencia del Brinell en la sustitución del penetrador de bola por una pirámide cuadrangular de diamante con lo que se consigue una mayor penetración y la posibilidad de medir materiales muy duros sin sufrir deformación (hasta 1000 Kp/mm^2) debido a la gran dureza del diamante.

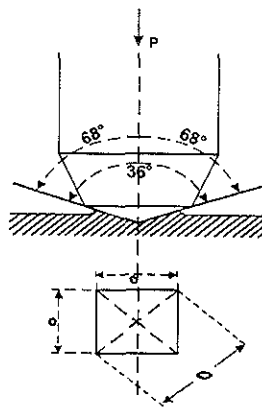


Fig.2.2. Ensayo de dureza Vickers.

Las caras opuestas de la pirámide forman un ángulo de 136° . Las cargas a las que se somete el material oscilan entre 5 y 120 Kgf., siendo el tiempo de duración de la carga de 10 a 15 segundos.

El número de dureza Vickers se define por “HV”, que se obtiene de la siguiente expresión:

$$HV = 2 P \frac{\text{sen } 68^\circ}{d^2} = 1.8544 \frac{P}{d^2}$$

P = Carga

D = Diámetro medio de la huella

2.1.3.3. Dureza Rockwell.

Tiene la ventaja sobre los dos métodos anteriores de una mayor rapidez de realización del ensayo, aunque no tiene la misma precisión.

Se utiliza como penetrador, según los casos, una bola de acero o un cono de diamante de ángulo en el vértice de 120° y con un extremo esférico de 0.2 mm de diámetro. En este ensayo no se mide la superficie de la huella, sino su profundidad.

Con el fin de obtener una superficie de referencia a partir de la cual se pueda medir la penetración del punzón, se somete éste a una pequeña carga previa (10 Kp.) que producirá una huella de profundidad h_0 . A continuación se hace actuar la carga adicional (90 a 140 Kp.) con la cual la profundidad de la huella alcanza el valor h_1 . Se retira la carga adicional y el penetrador retrocede debido a la recuperación elástica del material, quedando una profundidad permanente “h”. La penetración será $e = h - h_0$ que se mide mediante un dispositivo accionado por el penetrador.

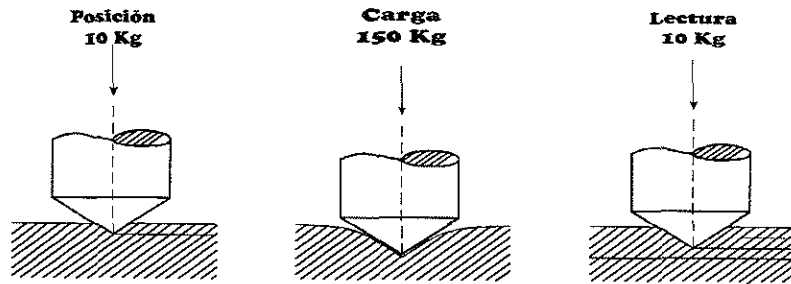


Fig.2.3. Ensayo de dureza Rockwell.

La tabla siguiente indica los distintos tipos de ensayos Rockwell, que se utilizan normalmente en la industria:

Escala	Carga mayor Kg	Tipo de marcador de muescas	Materiales típicos probados
A	60	Cono de diamante	Materiales duros en extremo, carburos de tungsteno, etc.
B	100	Bola de 1/16"	Materiales de dureza media, aceros al carbono bajos o medios, latón, bronce, etc.
C	150	Cono de diamante	Aceros endurecidos, aleaciones endurecidas y revenidas (tratadas).
D	100	Cono de diamante	Acero superficialmente cementado.
E	100	Bola de 1/8"	Hierro fundido, aleaciones de aluminio y magnesio.
F	60	Bola de 1/16"	Bronce y cobre recocidos.
G	150	Bola de 1/16"	Cobre al berilio, bronce fosfórico, etc.
H	60	Bola de 1/8"	Placa de aluminio.
K	150	Bola de 1/8"	Hierro fundido, aleaciones de aluminio
L	60	Bola de 1/4"	Plásticos y materiales suaves como el plomo.

Tabla.2.1. Diferentes tipos de ensayos de dureza Rockwell utilizados en la industria.

Para determinar la dureza en capas muy delgadas, cementadas o nitruradas y en aquellos casos en que la impresión de la huella tenga que ser pequeña, se utiliza el ensayo de dureza Rockwell superficial.

Su fundamento es análogo al de la dureza Rockwell normal, con la diferencia de que la carga inicial es de 3 Kp y la total de 15, 30 ó 45 Kp.

La dureza Rockwell se designa agregando al número de dureza las letras "HR", el símbolo del penetrador y la carga empleada.

Ejemplo: 50 HRC 150.

Las cifras de dureza Rockwell de las escalas "B" y "C" pueden convertirse en cifras Brinell mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Dureza Brinell} = \frac{7,300}{130 - HR}$$

Si $20 < HR < 40$:

$$\text{Dureza Brinell} = \frac{1,420,000}{100 - HR}$$

Si $HR > 40$:

$$\text{Dureza Brinell} = \frac{2,500}{100 - HR}$$

Con mayor frecuencia se utilizan tablas comparativas de dureza para hacer la conversión de las durezas obtenidas de un método a otro.

2.1.4. Ensayos dinámicos.

Científicamente se encuentran muy por debajo de los estáticos, ya que los valores obtenidos presentan muchos errores y una gran dispersión de los mismos, pero tienen la ventaja de que requieren de aparatos muy sencillos; son extraordinariamente rápidos y aplicables en cualquier lugar, tanto en piezas grandes como en pequeñas.

Se distinguen de los estáticos ya que éstos miden la energía elástica que es capaz de absorber el material, distinguiéndose fundamentalmente los de choque y los de retroceso.

2.1.4.1. Métodos de choque.

En este caso, la bola tiene 5 mm de diámetro y se lanza con un impulso suficiente para que deje una huella permanente de gran tamaño.

Existen diversos tipos de aparatos (Baumann, Schwarz entre otros) pero el más clásico es el de Poldi. Como puede observarse en la figura 2.4. el impulso se comunica directamente con la mano, se coloca entre el yunque y la bola una probeta de comparación cuya dureza es conocida. Midiendo las impresiones producidas en una y otra se puede obtener la dureza buscada.

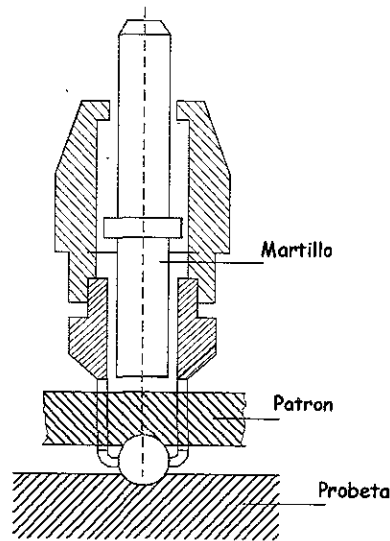


Fig.2.4. Instrumento de Poldi.

Si “ H_p ” y “ H ” son las durezas patrón y problema respectivamente, y siendo “ S_p ” y “ S ” las superficies de las huellas, se tiene:

$$H = \frac{S_p}{S} H_p ; \quad \frac{S_p}{S} = \frac{D - \sqrt{D^2 - d_p^2}}{D - \sqrt{D^2 - d^2}}$$

2.1.4.2. Método de retroceso.

Se basa en el hecho de que si se deja caer desde una altura conveniente un pequeño martillo, con una punta redondeada de diamante en un extremo sobre el material problema, la energía de caída será absorbida en producir una huella elástica, por lo que el martillo retrocederá, elevándose a una altura menor que la inicial de partida. Esta altura se toma como la medida de la dureza por retroceso.

Estos métodos se utilizan para determinaciones con materiales endurecidos que no deben presentar huella permanente, así como en el control de uniformidad en la dureza de grandes superficies o piezas que se han de comparar.

Los diferentes aparatos se distinguen en el peso del martillo, la forma de la punta de diamante y la altura de caída. Los más conocidos son el esclerómetro Shore y el duroscopecio.

En el esclerómetro Shore, el martillo cae desde una altura h_0 sobre la pieza y retrocede a la altura h_1 . Para facilitar la perpendicularidad en la caída, el martillo se desliza sin rozamiento en el interior de un tubo.

El valor h_1 se define como la dureza Shore. La escala tiene 130 divisiones, trazadas de modo que la altura h_1 para el acero eutectoide templado valga 100.

En el duroscopecio, el martillo cae sobre la pieza como la lenteja de un péndulo, midiéndose ángulos en lugar de longitudes. El ángulo inicial es de 70° y el final se toma como valor de dureza.

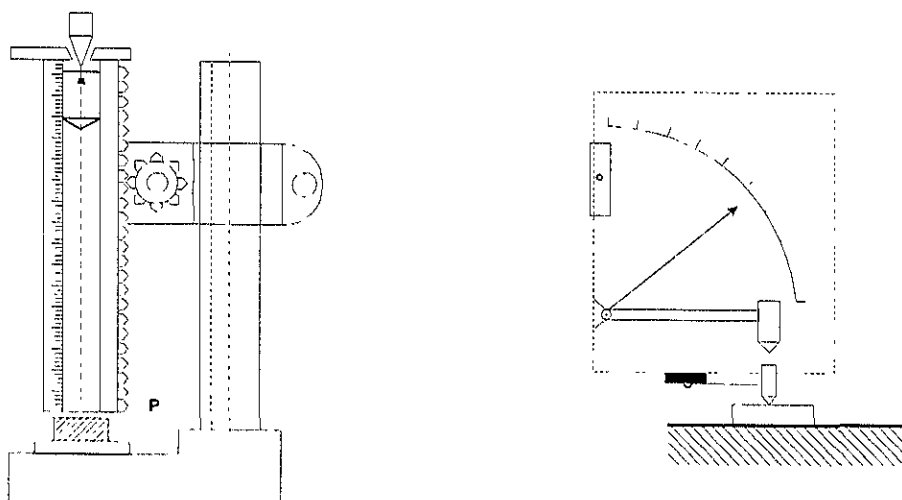


Fig.2.5. Esclerómetro Shore y Duroscopecio respectivamente.

2.1.5. Dureza de ceras.

En cuanto al estudio de la dureza de ceras existe poca información y en caso de haberla se refiere a ceras utilizadas para algunos procesos de fundición mediante el método de cera perdida o incluso para ceras con fines decorativos.

Un método común para la medición de dureza de ceras, es aquel que utiliza un instrumento equipado con un penetrador sin punta conectado a un resorte; dicho resorte mueve un indicador de una carátula graduada arbitrariamente en unidades conocidas como “Unidades de Dureza”, las cuales oscilan entre 0 y 100 unidades donde generalmente la dureza de ceras se encuentra en el rango de 20 a 100 unidades. El experimento suele llevarse a cabo en un ambiente a temperatura constante, lo cual puede ser conseguido mediante un baño de aire generado por un ventilador y algunas resistencias eléctricas reguladas por un potenciómetro o reóstato. Esta especie de durómetro generalmente es sujetado con la mano; sin embargo, la inconsistencia de los resultados ha obligado a elaborar algunos soportes o mecanismos de sujeción para dichos dispositivos.

También se han diseñado algunas pruebas de penetración, las cuales consisten en hacer mediciones de la profundidad a la cual una aguja con una carga definida penetra la muestra de cera, generalmente la carga es de 100 gramos durante cinco segundos y a una temperatura de 25° C, teniendo como unidades de penetración décimas de milímetro.

2.2. Pruebas de Tensión.

Las propiedades mecánicas de un material se determinan usualmente con pruebas de laboratorio en una muestra de material que tiene una forma geométrica específica. Estas pruebas se usan mucho en

ingeniería para obtener información básica de diseño y evaluar los materiales en relación con especificaciones de aceptación.

La prueba de tensión se realiza aplicando una carga que se incrementa (con una relación constante de deformación) a un espécimen de geometría específica, en un aparato semejante al que se muestra de modo esquemático en la figura 2.6.

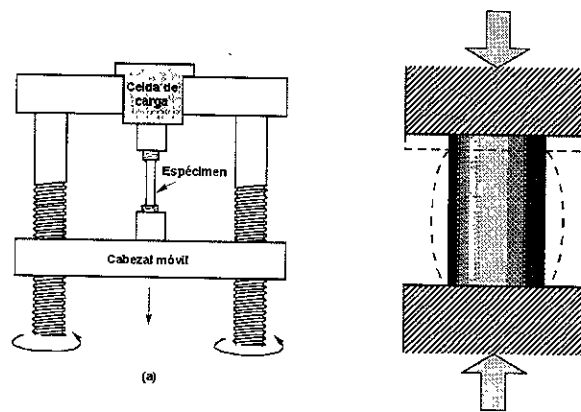


Fig. 2.6. Ilustración esquemática del sistema de pruebas de tensión.

El espécimen al que se realiza la prueba puede tener varias formas geométricas con secciones transversales diferentes (esto es, cilíndrica, rectangular, etc.), como se ilustra en la figura 2.7. para una forma típica. El requisito principal es que la sección transversal se debe conocer con toda precisión y debe ser uniforme en toda la longitud del espécimen. En cada uno de éstos se graban testigos de la longitud específica con el objeto de establecer la longitud original de referencia que se usará en los cálculos para determinar la ductilidad.

Cuando se aplica una fuerza a un material, se deforma. Cuando la fuerza se aplica de tal modo que el espécimen es estirado, esta deformación produce una elongación. Cuando la fuerza empuja contra el

espécimen, se produce una compresión. En cualquier caso, se puede expresar la deformación que resulta como una deformación unitaria (deformación por unidad de longitud) y la carga se puede poner en términos de esfuerzo.

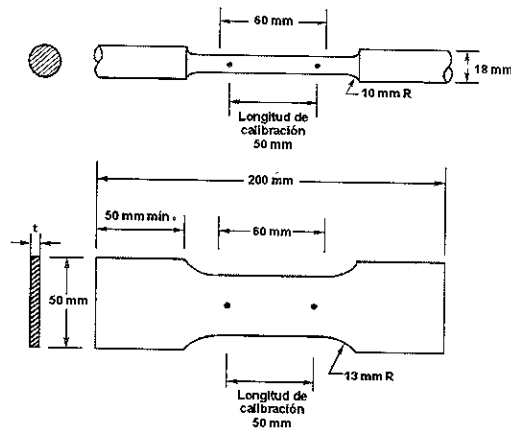


Fig. 2.7. Geometría de especímenes típicos de tensión.

A medida que se incrementa el esfuerzo en el espécimen, primero se presenta la deformación elástica en respuesta a la ley de Hooke y después la deformación plástica. Esta deformación se mide con un dispositivo llamado extensómetro sujeto al espécimen en tensión. El dispositivo se puede controlar por medios mecánicos o electrónicos, pero en cualquier caso, mide con mucha precisión el incremento de la longitud relativo a la longitud original en cada incremento de carga. Luego se convierten los datos de carga-alargamiento en datos de esfuerzo-deformación como sigue: el esfuerzo técnico (σ)

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

La deformación longitudinal promedio (deformación técnica), se obtiene determinando el alargamiento de la longitud original del testigo (Δl) y dividiendo entre la longitud testigo (l_0) como sigue:

$$e = \frac{\Delta l}{l_0}$$

2.2.1. Curva de esfuerzo deformación.

Los datos que se obtienen en la prueba de tensión se grafican como curvas de esfuerzo deformación. La figura 2.8. ilustra algunas de las curvas de esfuerzo-deformación que se pueden obtener con materiales de ingeniería típicos. La forma de la curva esfuerzo deformación dependerá del material de prueba, la historia de su proceso y la temperatura a la que se realiza la prueba.

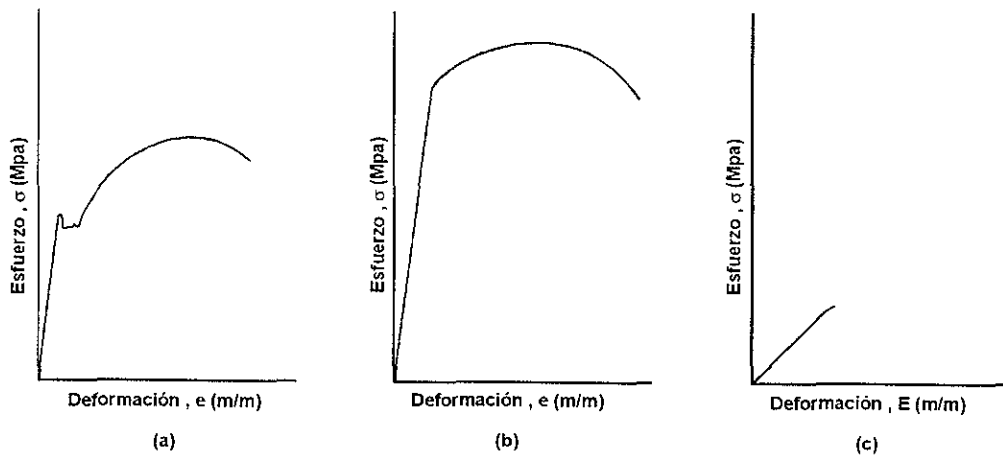


Fig.2.8. Curvas de deformación de: (a) acero al bajo carbón, SAE 1025; (b) aleación de acero, SAE 4340; (c) mármol, CaCO_3 .

Cuando los esfuerzos están en la región elástica, el espécimen recuperará sus dimensiones originales si se mueve la carga. La gráfica de la región elástica es lineal en los metales y las cerámicas; esto es, el esfuerzo es proporcional a la deformación y cumple con la Ley de Hooke como sigue:

$$\sigma = Ee$$

en la que “E” es una constante de proporcionalidad denominada módulo elástico o módulo de Young.

Con esfuerzos adicionales, el material excede su límite elástico y se presenta la deformación plástica, con lo que el material se alarga y de modo correspondiente disminuye su diámetro. Inicialmente, esta respuesta es uniforme en toda la longitud del espécimen, pero en algún punto de la estructura se presenta una inestabilidad y entonces se concentra en esta región una deformación plástica localizada. De esta forma el diámetro del espécimen se constriñe localmente (esto es, se forma un “cuello”) y principia la fractura del espécimen.

La curva de *esfuerzo-deformación* de un material puede proporcionar una gran cantidad de información valiosa sobre el mismo y su adecuación para varias aplicaciones. En la figura 2.10. se presenta una curva típica de un sistema metálico. Examinemos esta curva junto con las definiciones de varios parámetros del material que se pueden determinar de modo directo a partir de la gráfica.

1. *Límite de proporcionalidad*: es el valor más alto para el cual la relación esfuerzo-deformación es lineal. En la figura 2.10. esto sucede en el punto A.
2. *Límite elástico*: Es el esfuerzo más alto que se puede imponer al material sin que haya deformación permanente cuando se remueve la carga (punto B en la Fig.2.10.)

3. *Resistencia de fluencia* (σ_{YS}): corresponde al esfuerzo que se requiere para producir una deformación plástica pequeña y específica. Esto se determina estableciendo gráficamente una línea paralela a la porción recta de la curva de *esfuerzo-deformación* para algún valor específico de la deformación (por ejemplo, a 0.2% de la deformación). La intersección de esta línea paralela con la curva de esfuerzo-deformación proporciona la resistencia de fluencia (punto C de la Fig.2.10.). Siempre se debe anteponer al valor de la resistencia de fluencia, el valor compensatorio de la deformación para el cual se estableció (p. Ej., 0.2% resistencia de fluencia). La aplicación de este método de compensación evita la dificultad práctica de establecer con certidumbre el inicio del comportamiento plástico.
4. *Resistencia última de tensión* (RUT): es una medida de la carga máxima que puede soportar un material bajo condiciones de carga uniaxial. Se determina tomando la magnitud de la carga máxima que se obtuvo durante la prueba y dividiéndola entre el área de la sección transversal original (punto D, Fig.2 10).

$$RUT, \sigma_{TS} = \frac{P_{\max}}{A_0}$$

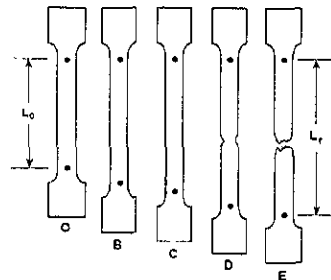


Fig. 2.9. Incremento de la longitud de la sección de calibración, disminución del área de la sección transversal.

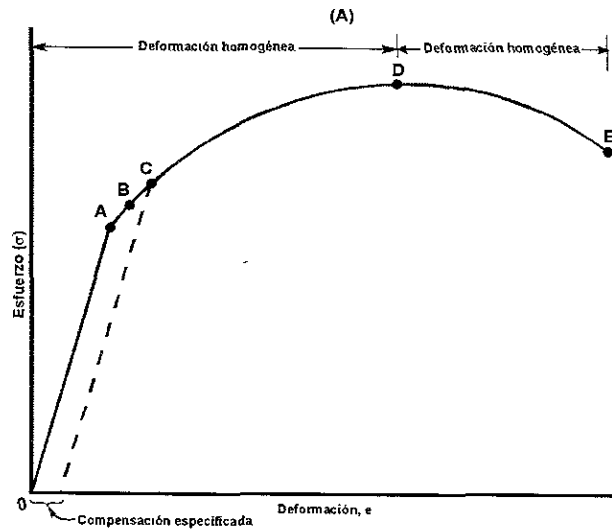


Figura 2.10. (a) Apariencia del espécimen de tensión en etapas diferentes de la prueba de tensión; (b) curva típica de esfuerzo-deformación de un metal dúctil: A límite de proporcionalidad; B, límite elástico; C, resistencia de fluencia; D, resistencia última de tensión; E, resistencia de fractura.

La resistencia última de tensión no se utiliza con frecuencia en el diseño de estructuras o equipo, porque a este nivel de esfuerzos el componente estructural ya ha sufrido una deformación plástica importante. Además, después de que se excede la resistencia última de tensión, el material puede seguir deformándose plásticamente a esfuerzos menores que el de este valor máximo, como se muestra en la figura 2.10.

5 *Módulo de elasticidad o módulo de Young (E)*: se puede determinar gráficamente a partir de la pendiente de la porción inicial recta de la curva de esfuerzo-deformación.

De la ley de Hooke

$$\sigma = Ee$$

Resolviendo para el módulo, tenemos:

$$E = \frac{\sigma}{e}$$

o bien,

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta e} \quad (\text{en la región lineal de la curva de } \textit{esfuerzo-deformación})$$

El módulo es una medida de la *rigidez* del material; mientras más alto es el módulo, menor será la deformación elástica que resulte de la aplicación de un esfuerzo dado.

2.2.2. Ductilidad.

La ductilidad es una medida de la capacidad del material para deformarse plásticamente en las condiciones de la prueba. De la prueba de tensión se derivan dos medidas de ductilidad y ambas se utilizan mucho: la reducción del área (R.A) y la elongación. Se obtienen medidas reuniendo las piezas del espécimen fracturado después de la prueba para tomar las medidas de la longitud y el diámetro finales.

La reducción del área (R.A.) es el cambio de la sección del área transversal de la barra de prueba expresado como un porcentaje y se calcula como sigue:

$$\% R.A. = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$$

en la que A_0 = área de la sección transversal original

A_f = área de la sección transversal final en la fractura

De modo semejante, el alargamiento es el incremento que se presenta en la longitud testigo del espécimen.

$$\% \text{ elongación} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100$$

en la que L_0 = longitud original

L_f = longitud final entre las marcas testigo

2.2.3. Resiliencia.

Se llama resiliencia a la habilidad de un material para absorber energía cuando se deforma elásticamente y devolverla cuando se descarga. Por lo general, esta habilidad se mide con el módulo de resiliencia (U_r), que es la energía de deformación por unidad de volumen que se requiere para esforzar al material desde una condición de esfuerzo cero hasta su resistencia de fluencia, σ_{YS} .

Matemáticamente, la energía de deformación por volumen unitario para la tensión uniaxial es el área bajo la curva de *esfuerzo-deformación*. De la definición anterior de resistencia, resulta que:

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma e$$

en la región lineal de la curva *esfuerzo-deformación*. Si se esfuerza al material hasta su resistencia de fluencia (σ_{YS}), la expresión se convierte así en:

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_{YS} e_{YS}$$

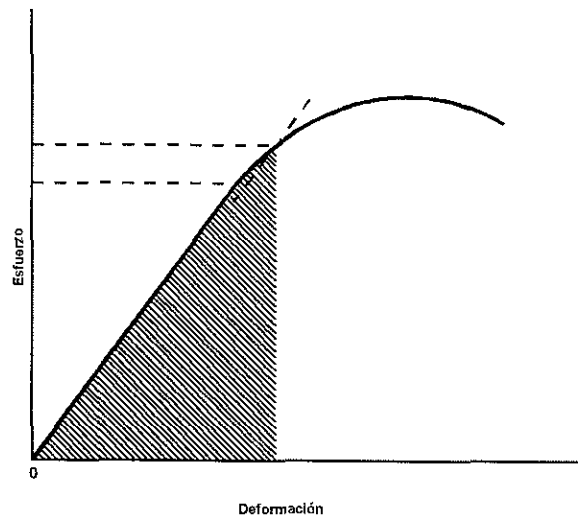


Figura 2.11. Módulo de resiliencia ilustrando el método de cálculo.

En la figura 2.11. se muestra gráficamente esta relación. Sin embargo, por la ley de Hooke:

$e = \sigma / E$. Por lo tanto, podemos establecer que:

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_{YS} \frac{\sigma_{YS}}{E}$$

$$= \frac{\sigma_{YS}^2}{2E}$$

La ecuación anterior establece que la resiliencia se maximiza en materiales con una resistencia de fluencia alta y un módulo de elasticidad bajo. Una resiliencia alta es deseable en aplicaciones como resortes mecánicos.

Efectos de temperaturas elevadas.

Las temperaturas elevadas influyen de modo notable en la resistencia de tensión y en la ductilidad de la mayoría de los materiales de ingeniería. Por lo general, a medida que se incrementa la temperatura de prueba, disminuye la resistencia en tensión mientras se incrementa la ductilidad.

La prueba de tensión a temperaturas elevadas es útil al comparar la respuesta en plazo corto de los materiales a las cargas o esfuerzos de tensión. En este sentido, la prueba produce datos comparativos con un mínimo de tiempo y de costo. Sin embargo debemos enfatizar que la prueba de tensión a temperaturas elevadas es muy inadecuada en aplicaciones de diseño que incluyan periodos sostenidos a temperaturas altas. Muchos materiales tecnológicos presentan deformaciones dependientes del tiempo a esfuerzos relativamente bajo durante temperaturas de servicio elevadas. Este tipo de deformación se llama *flujo plástico* y es muy importante en relación con el diseño y la utilización de “aleaciones a temperaturas altas”.

2.3. Pruebas de Compresión.

Muchos materiales comunes de ingeniería, como el concreto, el ladrillo y ciertas cerámicas, con frecuencia son débiles en tensión como resultado de la presencia de grietas y defectos microscópicos. Los esfuerzos de tensión tienden a propagar aquellas grietas que tienen una orientación perpendicular al eje de tensión. Las resistencias de tensión de estos materiales son bajas y pueden variar en forma considerable en cada muestra dependiendo de la distribución de los defectos; sin embargo, a pesar de esto, pueden ser muy resistentes en compresión. Por lo tanto, estos materiales se usan principalmente a compresión, que es como son más resistentes.

La prueba de compresión se realiza de una manera semejante a la de tensión excepto que las fuerzas actúan empujando los extremos del espécimen, como se muestra en la figura 2.6. La forma más usual de los especímenes es la cilíndrica, con un diámetro lo suficientemente grande para prevenir el pandeo. Después de la prueba se puede dibujar una curva de *esfuerzo-deformación* como la que se muestra en la figura 2.11. Se debe notar que la prueba de compresión se aplica muy rara vez a los materiales dúctiles; en consecuencia, la curva por lo general no se extiende mucho más allá de la región elástica. Se puede utilizar la curva para determinar los módulos y la resistencia a compresión de la misma forma como se describió antes para la prueba de tensión.

Debemos destacar que a pesar de que las curvas de *esfuerzo-deformación*, que se calculan y dibujan manualmente son válidas por completo en su representación del comportamiento en tensión y en compresión, las pruebas de esta naturaleza casi siempre se conducen en forma automática. Esto es así, en especial en los laboratorios donde se manejan muchos especímenes, como en los casos de *control de calidad*. En las pruebas automatizadas, incluso se puede programar a los aparatos para realizar las pruebas y graficar los resultados (carga contra deformación) de modo automático o presentados en una pantalla digital. Esta mecanización permite acelerar las pruebas y la interpretación de los resultados al tiempo que se mantiene la exactitud experimental. Esto es muy importante desde el punto de vista de la economía y la confiabilidad en cualquier industria o institución de investigación que debe realizar de modo rutinario pruebas de tensión o compresión en materiales de ingeniería.

2.4. Tenacidad.

Se puede definir de modo general, como la habilidad de un material de resistir la fractura cuando se encuentra sujeto a esfuerzos. Sin embargo, la resistencia de un material a la fractura puede variar ampliamente, dependiendo de la proporción de deformación. Por desgracia, se ha usado el término

“tenacidad” para describir el comportamiento de los materiales tanto a proporciones lentas de deformación (pruebas de tensión) como a proporciones rápidas (impacto).

2.4.1. Proporciones lentas de deformación: pruebas de tensión.

En algunas aplicaciones, como por ejemplo en los blindajes militares, la capacidad de un material para absorber energía mientras se deforma plásticamente, es un atributo útil. Esta propiedad, a la que a veces se conoce como tenacidad, es la habilidad de un material para absorber energía hasta el punto de la fractura. Por lo tanto, los metales que poseen resistencias de fluencia altas junto con una buena ductibilidad presentan tenacidades altas. La energía que absorbe el espécimen se puede obtener con el área bajo la curva de *esfuerzo-deformación*.

Se pueden determinar las unidades como sigue, multiplicando los esfuerzos por las deformaciones, lo cual da como resultado el trabajo por volumen unitario que se le puede aplicar al material sin que se le cause la fractura:

$$\left(\frac{\text{libras}}{\text{in}^2}\right)\left(\frac{\text{in}}{\text{in}}\right) = \frac{\text{in.lb}}{\text{in}^3} \quad \text{o} \quad \left(\frac{\text{newtons}}{\text{m}^2}\right)\left[\frac{\text{m}}{\text{m}}\right]$$

La figura 2.12. presenta las curvas de *esfuerzo-deformación* de un resorte de acero de alto carbón y de un acero estructural que se han superpuesto. Esta gráfica muestra con claridad que, a pesar de que el acero estructural tiene una resistencia de fluencia menor, también tiene una tenacidad mayor, como se mide por el área bajo la curva.

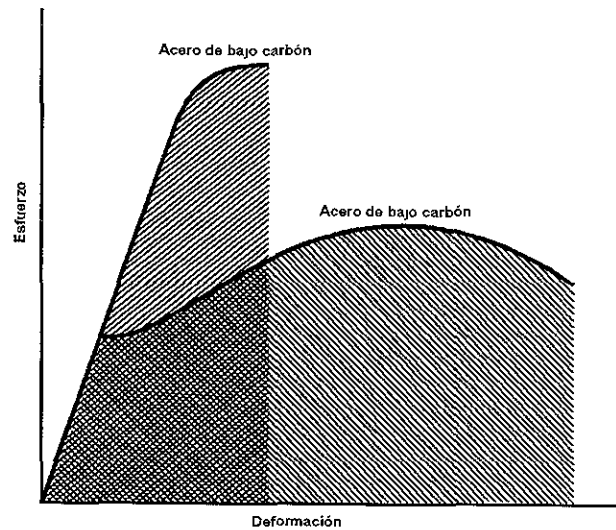


Fig. 2.12. Comparación de la tenacidad de dos aleaciones, obtenida con el área bajo la curva de *esfuerzo-deformación*.

2.4.2. Proporciones rápidas de deformación: pruebas de impacto.

La absorción de energía que se presenta en un material sujeto a cargas de impacto está relacionada con el tamaño y la configuración geométrica del espécimen de prueba, con la velocidad de aplicación de la carga de impacto y con la temperatura a la que se realiza la prueba. Estas variables se deben controlar con mucho cuidado y por este motivo se usan especímenes y procedimientos estandarizados, de los que los más comunes son la muesca Charpy V o la Izod, que son barras de prueba con muescas

Los especímenes de prueba Charpy e Izod tienen configuraciones precisas, como se muestra en la figura 2.13. La diferencia entre las pruebas es que la prueba Charpy se carga al espécimen como una viga simple y la cabeza del martillo de péndulo la golpea en el lado opuesto a la muesca, mientras que

en la prueba Izod, el espécimen se fija verticalmente como una viga en voladizo y el martillo golpea la cara de la muesca.

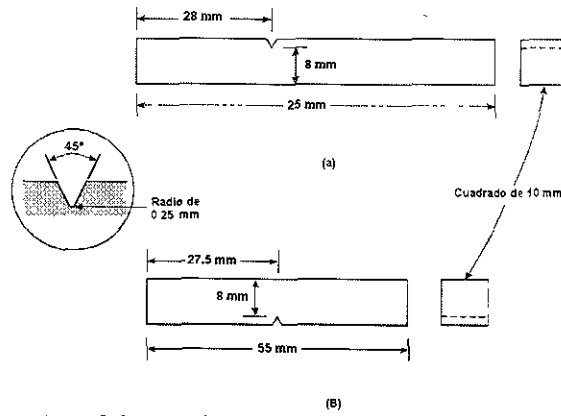


Fig. 2.13. Configuración y dimensiones de los especímenes de las pruebas de impacto Izod (a) y Charpy V-muesca (B)

En ambas pruebas se debe controlar con todo cuidado la temperatura del espécimen. Se puede obtener la energía cinética del péndulo en el punto de impacto porque se conocen el punto de salida y la masa del péndulo. Éste pierde la energía que absorbe el espécimen y la oscilación que sigue se reduce en proporción a la energía absorbida.

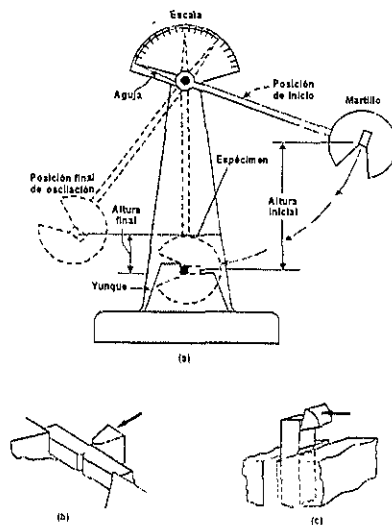


Fig. 2.14. Ilustración esquemática que muestra el aparato de prueba (a) y la configuración de los especímenes para (b) Charpy V-muesca (c) Izod.

2.4.3. Temperatura de transición del impacto.

Desafortunadamente, muchos materiales, incluyendo polímeros y metales “bcc”, que muestran tenacidad alta a una temperatura pueden tener un comportamiento frágil cuando se prueban a una temperatura menor. En los metales, este fenómeno se llama *transición dúctil a frágil*. Esta pérdida de tenacidad también se caracteriza por un cambio en la apariencia de la superficie de fractura, en donde se incrementa el porcentaje de apariencia de fractura frágil a medida que la temperatura de las pruebas disminuye. Conforme disminuye la temperatura de prueba, desciende la tenacidad y también disminuye el porcentaje de expansión lateral (o incremento del ancho de la barra de prueba)

2.4.4. Prueba de impacto en los no metales.

Las pruebas de impacto tipo Charpy e Izod se aplican no sólo a los metales sino también a los plásticos y las cerámicas, en algunas circunstancias. Los procedimientos de prueba son muy semejantes pero se utilizan máquinas de menor capacidad puesto que las energías de impacto que se encuentran son menores.

Un cambio adicional es que el espesor del espécimen de prueba no es fijo como en las pruebas con metales, sino que se puede variar. Esto da lugar a un cambio en los informes de los resultados de las pruebas, que consiste en que las unidades de energía que se requieren para la fractura se expresan por unidad de espesor de la barra de prueba. Por ejemplo, si se requieren 2 in.-lb. de energía para fracturar un espécimen de prueba Charpy de 0.250 in., el resultado se expresaría como:

$$\frac{2 \text{ pulg.-lb.}}{0.250 \text{ pulg.}} = \frac{8 \text{ pulg.-lb.}}{\text{pulg.}}$$

2.5. Mecánica del Corte de Materiales.

2.5.1. Términos y definiciones.

Todas las operaciones de corte de metales pueden ser asemejadas al proceso ilustrado en la figura 2.15., en donde la herramienta posee forma de cuña, tiene un filo recto, y su movimiento está restringido con respecto a la pieza de tal manera que una capa de material es removida en forma de viruta. La figura 2.15. (b) ilustra el caso general de corte conocido como corte *oblicuo*. Un caso especial de corte, en el cual el filo de la herramienta es perpendicular a la dirección del movimiento relativo entre la pieza y la herramienta (fig. 2.15. (a)), es conocido como *corte ortogonal*. Como el corte ortogonal, representa un problema bidimensional en lugar de uno tridimensional, es un modelo apropiado para investigaciones en las cuales es deseable eliminar tantas variables como sea posible. Por esto, la disposición simple del modelo de corte ortogonal es ampliamente usada en trabajos teóricos y experimentales.

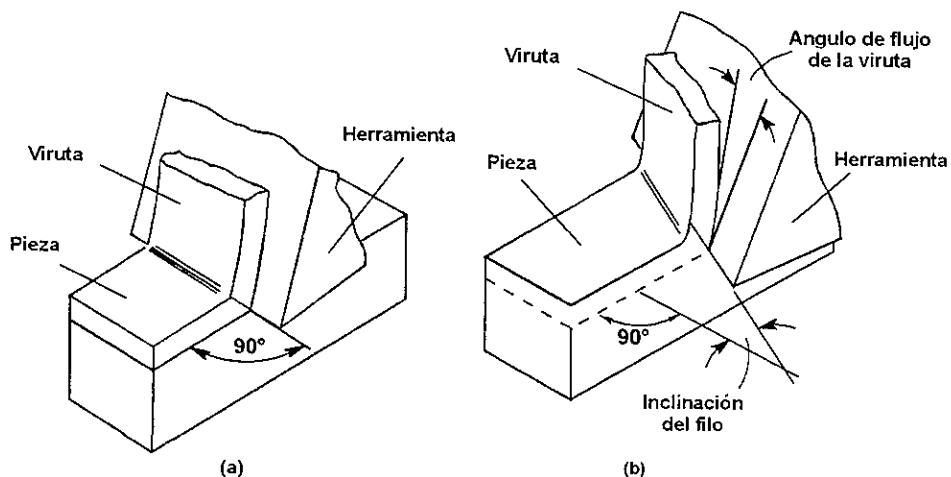


Fig. 2.15. Corte ortogonal y oblicuo. (a) Corte ortogonal; (b) corte oblicuo.

La herramienta de corte en forma de cuña, consiste básicamente en dos superficies que se intersectan para formar el filo (fig. 2.16.). La superficie sobre la cual fluye la viruta, se conoce como *superficie de desprendimiento* o más simplemente como la *cara* y la superficie apoyada posteriormente (idealmente en el filo) para dejar libre la superficie generada en la pieza es conocida como *flanco* (superficie de incidencia). Así, pues, durante el corte existe un espacio libre en forma de cuña entre el flanco de la herramienta y la superficie generada en la pieza.

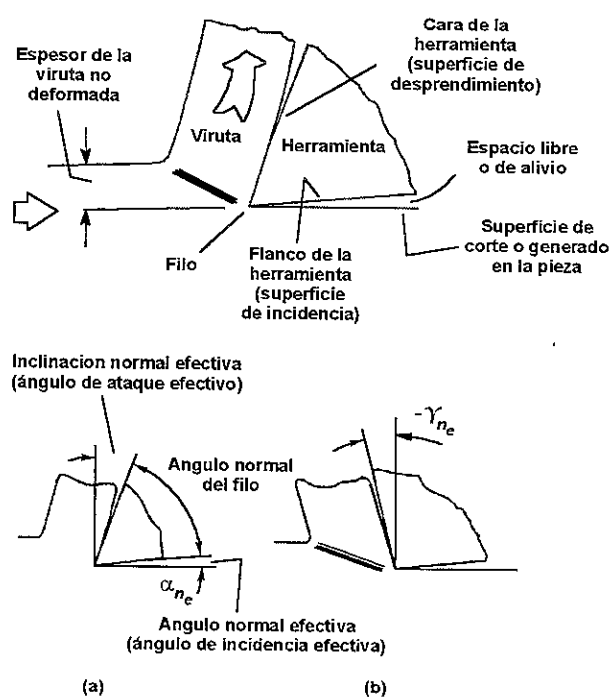


Fig. 2.16 Términos usados en el corte de metales. (a) inclinación positiva; (b) inclinación negativa.

La profundidad de cada capa de material removida por la herramienta es conocida como el *espesor de la viruta no deformada* (fig. 2.16.), y aunque esta dimensión varía a menudo en las operaciones prácticas de corte en la medida en que éste progresa, para simplicidad en el trabajo de investigación, se supone constante.

Una de las variables más importantes en el corte de metales es la pendiente de la cara de la herramienta, y esta pendiente o ángulo se especifica en el corte ortogonal por el ángulo existente entre la cara de la herramienta y una línea perpendicular a la nueva superficie de trabajo o de la pieza (fig. 2.16.). Este ángulo es conocido como *ángulo de desprendimiento* o, de acuerdo con la nueva terminología de la ISO, el ángulo de inclinación normal efectiva (ángulo de desprendimiento efectivo), la fig. 2.16. ilustra cómo se define el signo del ángulo.

El flanco de la herramienta no desempeña papel alguno en el proceso de remoción de la viruta; desde luego, el ángulo existente entre el flanco y la superficie generada en la pieza puede afectar el desgaste de la herramienta por unidad de tiempo y se denomina *ángulo de incidencia* o más exactamente ángulo normal efectivo.

De la figura 2.16. se puede concluir que la suma de los ángulos de inclinación normal (incidencia), de holgura y del filo es igual a $\pi / 2$, en donde el ángulo del filo es el ángulo existente entre la cara y el flanco.

2.5.2. Formación de la viruta.

El tipo de viruta producida durante el corte de metales depende del material que se está mecanizando y de las condiciones de corte utilizadas. Una de las técnicas más útiles para el estudio de la formación de la viruta es el dispositivo de parada rápida. Con este dispositivo es posible "congelar" o parar súbitamente la acción de corte y permitir el subsecuente examen microscópico del proceso de remoción de la viruta. En la figura 2.17. se describe un dispositivo típico de parada rápida, diseñado para usar en máquina limadora. En él, la pieza se sujeta mediante una prensa que se puede deslizar libremente en el bloque de guía. Durante el corte la prensa es restringida por el anillo de sujeción, la cual se mantiene en

posición por los pasadores fusibles (fusibles mecánicos que fallan por cizalladura) que pasan a través del bloque de guía y del anillo de sujeción. Los pasadores fusibles son diseñados para soportar la fuerza requerida para remover la viruta. Cuando el corte está parcialmente completo, una lengüeta del porta-herramientas entra en contacto con la prensa, cizalla los pasadores y empuja la prensa y el anillo de sujeción hacia adelante. Esta acción de la lengüeta suspende el corte porque la pieza se acelera rápidamente hasta alcanzar la velocidad de la herramienta. Con dispositivos diseñados cuidadosamente, el tiempo efectivo de suspensión del corte es extremadamente pequeño.

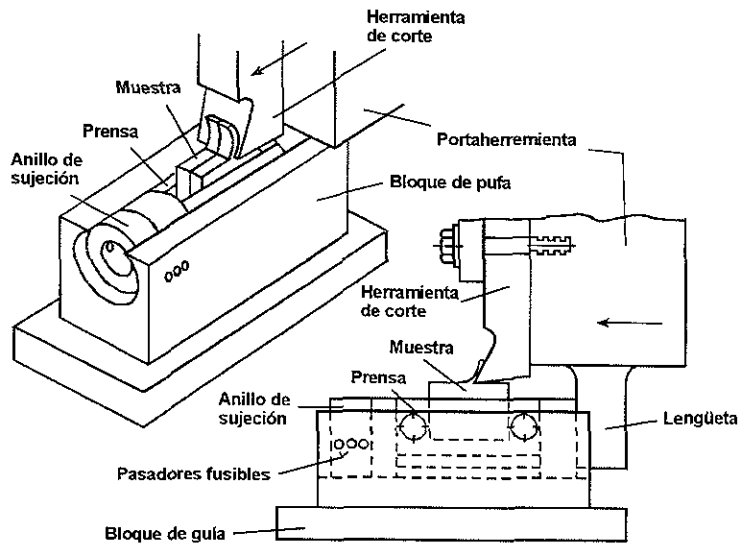


Fig. 2.17. Dispositivo de parada rápida.

Existen tres tipos básicos de formación de virutas que se encuentran en la práctica, éstos son: viruta continua, viruta continua con recercimiento de filo y la viruta discontinua. A continuación se describen cada uno de ellos

2.5.2.1. Viruta continua.

Este tipo de viruta es común cuando se mecanizan la mayoría de los materiales dúctiles, tales como hierro forjado, acero suave, cobre y aluminio. Puede decirse que el corte bajo estas condiciones es un proceso estable. Por esta razón, la mayor parte de la investigación acerca del corte de metales ha estado relacionada con la producción de viruta continua. Básicamente esta operación consiste en el cizallamiento del material de trabajo y en el deslizamiento de la viruta sobre la cara de la herramienta de corte. La formación de la viruta tiene lugar en la zona que se extiende desde el filo de la herramienta hasta la unión entre las superficies de la pieza; esta zona se conoce como *zona de deformación primaria*. Para deformar el material de esta manera, las fuerzas que se transmiten a la viruta en la interfase existente entre ella y la cara de la herramienta, son suficientes para deformar las capas inferiores de la viruta a medida que ella se desliza sobre la cara de la herramienta (zona de deformación secundaria).

2.5.2.2. Viruta continua con recrecimiento del filo.

Bajo ciertas condiciones, la fricción entre la viruta y la herramienta es suficientemente grande para que la viruta se suelde a la cara de la herramienta. La presencia de este material soldado aumenta aún más la fricción, y este aumento induce el autosoldado de una mayor cantidad de material de la viruta. El material apilado resultante es conocido como *filo recrecido*. A menudo el filo recrecido continúa aumentando hasta que se aparte a causa de su inestabilidad.

Los pedazos son entonces arrastrados por la viruta y por la superficie generada en la pieza. El estudio del recrecimiento del filo en el corte de metales es de suma importancia porque este fenómeno es uno

de los principales factores que afectan el acabado superficial y puede tener una influencia considerable en el desgaste de las herramientas.

2.5.2.3. Viruta discontinua o quebrada.

Durante la formación de viruta el material es sometido a grandes deformaciones y, si es frágil, se fracturará en la zona de deformación primaria cuando la formación de la viruta es incipiente. Bajo estas condiciones la viruta se segmenta, y esta condición se conoce como *formación de la viruta discontinua*. Se producen virutas discontinuas siempre que se mecanicen materiales tales como hierro fundido o bronce fundido, pero también pueden producirse cuando se mecanizan materiales dúctiles a muy baja velocidad y avances grandes.

2.5.3. Fuerzas que actúan sobre la herramienta de corte y su medición.

En el corte ortogonal, la fuerza resultante F_r aplicada a la viruta por la herramienta actúa en un plano que es perpendicular al filo de la herramienta (fig. 2.18.). Esta fuerza se determina usualmente en trabajo experimental, a partir de la medición de dos componentes ortogonales: una en la dirección de corte (conocida como *fuerza de corte* F_c), la otra normal a la dirección de corte (conocida como *fuerza de empuje* F_t). La medición precisa de estas dos componentes de la fuerza resultante de la herramienta, ha sido objeto de esfuerzo considerable en el pasado, y se han desarrollado varios tipos de dinamómetros para la medición de la fuerza de corte.

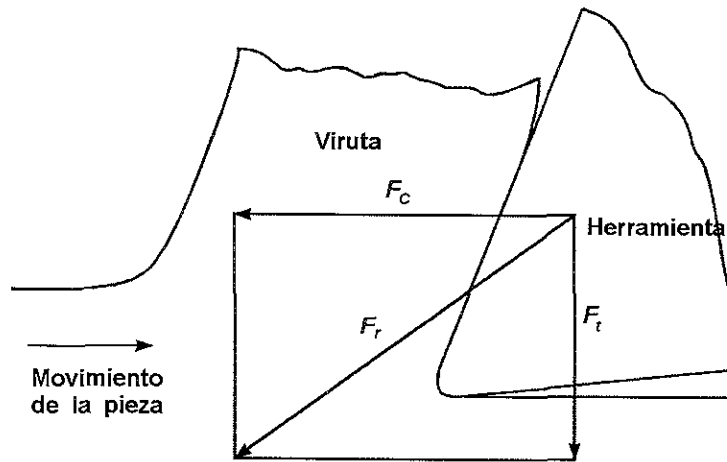


Fig. 2.18. Componentes de corte (F_c) y de empuje (F_t) de la fuerza resultante sobre la herramienta (F_r).

En la mayoría de los dinamómetros la fuerza que actúa sobre la herramienta se determina por medio de la medición de las deflexiones o deformaciones inducidas en los elementos que la soportan. Es esencial que el instrumento posea gran rigidez y frecuencias naturales altas para que la precisión dimensional de la operación de corte se mantenga y la tendencia a vibrar se minimice. El dinamómetro debe, desde luego, deflectarse o deformarse lo suficiente para permitir mediciones precisas. El diseño del dinamómetro depende, en gran parte, de la instrumentación disponible para la medición de las deflexiones o deformaciones. La figura 2.19. muestra un tipo simple de dinamómetro que permite medir dos componentes. En él la herramienta se soporta en el extremo libre de un elemento en voladizo. Las componentes vertical y horizontal de la deflexión inducida en el elemento en voladizo por la fuerza resultante sobre la herramienta se consideran como una medida de las dos componentes de dicha fuerza. Las componentes F_c y F_t de la fuerza resultante sobre la herramienta F_r , medidas con un dinamómetro, pueden utilizarse para calcular un gran número de variables importantes en el proceso de formación de viruta continua.

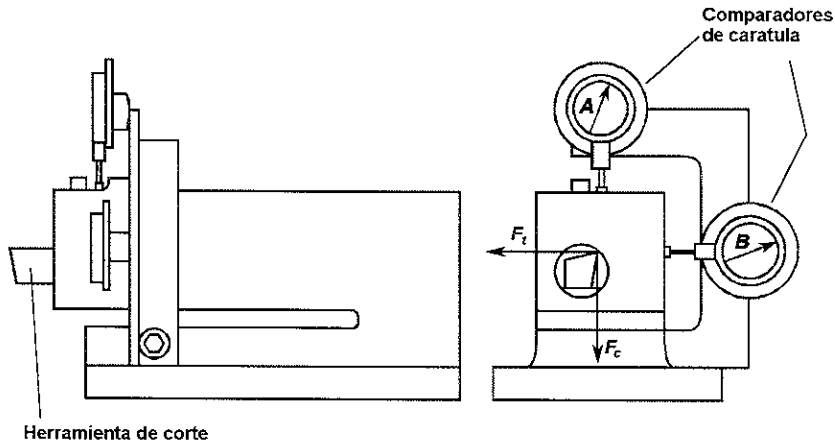


Fig. 2.19. Dinamómetro que mide dos componentes de la fuerza de corte para ser usado en un torno, el comparador A da una medida de F_c , y el comparador B da una medida de F_t .

2.5.4. Energía específica de corte.

El consumo de energía por unidad de tiempo durante el mecanizado P_m es el producto de la velocidad de corte y la fuerza de corte F_c . Así,

$$P_m = F_c V_c$$

El consumo de energía por unidad de tiempo y la remoción de metal por unidad de tiempo son proporcionales a la velocidad de corte. Un parámetro que da una indicación acerca de la eficiencia del proceso independientemente de la velocidad de corte, es la energía consumida por unidad de volumen de material removido y se conoce como *energía específica de corte* P_s . Este parámetro está dado por

$$p_s = \frac{P_m}{Z_w} = \frac{F_c}{A_c}$$

Nota: se conoce p_s también como presión específica de corte debido a sus dimensiones de fuerza por unidad de área.

donde Z_w es el metal removido por unidad de tiempo, y A_c es el área de la sección de la viruta sin cortar.

La energía específica de corte puede variar considerablemente para un material dado y es afectada por cambios en la velocidad de corte, el avance, inclinación de herramienta, etc. Desde luego, para una inclinación de la herramienta a velocidades de corte altas y avances grandes.

2.5.5. Fuerza de penetración y el "efecto de tamaño"

La fuerza resultante sobre la herramienta en el corte de metales está distribuida sobre las áreas de la herramienta que están en contacto con la viruta y la pieza. Ninguna herramienta de corte es perfectamente aguda. En la concepción idealizada que se muestra en la figura 2.20. el filo se representa por una superficie cilíndrica que une el flanco de la herramienta con la cara de la misma. Observaciones hechas en el pasado han mostrado que el radio del filo varía desde 0.005 a 0.03 mm para herramientas de acero rápido recién afiladas. A medida que el filo de la herramienta "allana" su camino a través del material, la fuerza que actúa sobre él constituye solamente una parte pequeña de la fuerza de corte para valores grandes del espesor de la viruta no deformada a_c . Para valores pequeños de a_c , desde luego, la fuerza que actúa sobre el filo es proporcionalmente grande y no puede despreciarse.

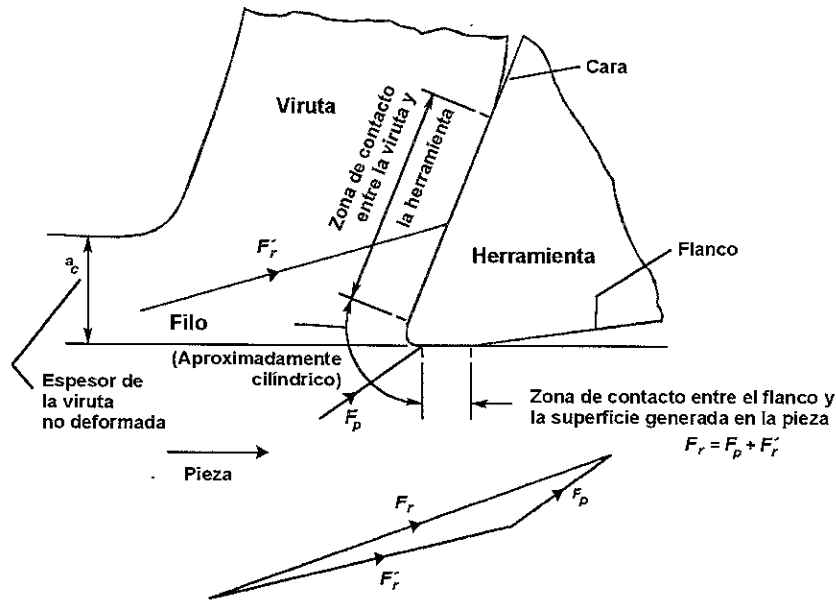


Fig. 2.20. Zonas de contacto de una herramienta de corte, donde F_r = fuerza resultante sobre la herramienta, F'_c = fuerza requerida para remover la viruta, y F_p = fuerza de penetración (actúa sobre el filo y zona de contacto entre el flanco y la superficie generada).

A causa de la magnitud de los esfuerzos que actúan cerca del filo de la herramienta, el material de la misma puede deformarse en esta región. Esta deformación podría ocasionar contacto entre la herramienta y la superficie generada en la pieza sobre un área pequeña del flanco. Desde luego, cuando se usan herramientas de corte agudas, una fuerza de fricción puede actuar en la región del flanco. Esta fuerza, de nuevo, es una parte pequeña de la fuerza de corte para avances grandes.

La fuerza que actúa sobre el filo de la herramienta no contribuye a la remoción de la viruta como tampoco lo hace la fuerza que actúa sobre el flanco; estas fuerzas se denominarán colectivamente "fuerzas de penetración" F_p .

La fuerza de penetración es causa de algunos efectos importantes y mediante ella es posible explicar el llamado "efecto de tamaño". Este término se refiere al aumento de la energía específica de corte (la

energía requerida para remover un volumen unitario de metal) a valores bajos del espesor de la viruta no deformada. Para valores relativamente pequeños del espesor de la viruta, el valor de la energía específica de corte P_s aumenta rápidamente con una disminución del espesor de la viruta. Se cree que la fuerza de penetración F_p es constante y desde luego, su contribución a la fuerza total de corte aumentará en la medida en que el espesor de la viruta disminuya. Cuando la fuerza total de corte se divide por el área de la sección de la viruta no deformada para obtener P_s , la parte de P_s que contribuye a la remoción de la viruta se mantendrá constante, y la parte que corresponde al efecto de la fuerza de penetración aumentará cuando el espesor de la viruta disminuya. El aumento en la energía específica de corte P_s , cuando el espesor de la viruta disminuye, explica la razón por la cual, en procesos como el rectificado que producen virutas muy delgadas se requiere una gran potencia para remover un volumen dado de metal.

2.5.6. Resistencia media aparente a la cizalladura del material de la pieza.

La figura 2.21 muestra un modelo idealizado de la formación de viruta continua empleado en la mayor parte del trabajo previo realizado sobre la mecánica del proceso de corte. Dos de los primeros investigadores que emplearon este modelo fueron Ernst y Merchant, quienes sugirieron que la zona de cizalladura, o zona de deformación primaria, podría representarse razonablemente por un plano, llamado *plano de cizalladura*. El ángulo de inclinación del plano de cizalladura con respecto a la dirección de corte se denomina *ángulo de cizalladura* ϕ y se determina como se explica más adelante.

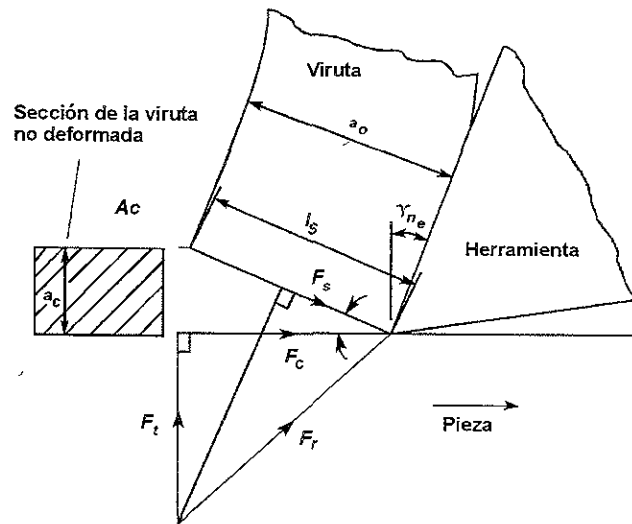


Fig. 2.21. Modelo de formación de viruta continua, donde F_r = fuerza resultante sobre la herramienta, F_c = fuerza de corte, F_t = fuerza de empuje, F_s = fuerza de cizalladura, γ_{ne} = ángulo de inclinación normal efectiva, a_c = espesor de la viruta no deformada, a_o = espesor de la viruta, A_c = sección de la viruta sin cortar, y l_s = longitud del plano de cizalladura.

De la fig. 2.21. la longitud del plano de cizalladura está dada por:

$$l_s = \frac{a_c}{\sin \phi} = \frac{a_o}{\cos(\phi - \gamma_{ne})}$$

Por lo tanto

$$\frac{a_c}{a_o} \cos(\phi - \gamma_{ne}) = \sin \phi$$

y después de algunas manipulaciones algebraicas,

$$\tan\phi = \frac{(a_c/a_o) \cos\gamma_n}{1 - (a_c/a_o) \sin\gamma_n}$$

La razón a_c/a_o es conocida como la razón de corte y se denota por r_c . Luego

$$\tan\phi = \frac{r_c \cos\gamma_n}{1 - r_c \sin\gamma_n}$$

en donde

ϕ = ángulo de cizalladura

r_c = módulo de corte (dada por a_c/a_o)

a_c = espesor de viruta no deformada

a_o = espesor de la viruta

γ_n = ángulo de inclinación normal efectiva (ángulo de desprendimiento efectivo)

En trabajo experimental, el ángulo de inclinación normal efectivo y el espesor de la viruta no deformada se conocen, y el espesor de la viruta puede determinarse ya sea directamente usando un micrómetro de extremos redondos o a partir del peso de un pedazo de viruta de longitud, conocida en la forma siguiente:

$$a_o = \frac{m_c}{l_c a_w \rho}$$

m_c = masa de la muestra de viruta

l_c = longitud del espécimen de viruta

a_w = ancho de la viruta

ρ = densidad del material de la pieza

Si la fuerza resultante sobre la herramienta se proyecta sobre una dirección paralela al plano de cizalladura, se obtiene la fuerza F_s requerida para cizallar el material de la pieza y formar la viruta. Como se muestra en la figura 2.21., esta fuerza puede expresarse en términos de las componentes de corte (F_c) y de empuje (F_t) de la fuerza resultante sobre la herramienta:

$$F_s = (F_c \cos \phi) - (F_t \sin \phi)$$

El área de cizalladura está dada por:

$$A_s \frac{A_c}{\sin \phi}$$

y así la resistencia aparente a la cizalladura del material τ_s en el plano de cizalladura es:

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} = \frac{[(F_c \cos \phi) - (F_t \sin \phi)] \sin \phi}{A_c}$$

Trabajos experimentales han demostrado que τ_s , calculado en esta forma, permanece constante para un material de trabajo dado sobre una amplia variedad de condiciones de corte. Se ha observado, desde luego, que para avances pequeños τ_s aumenta con una disminución del avance (o espesor de la viruta no deformada). Esta excepción en el carácter constante de τ_s puede explicarse por la existencia de una fuerza de penetración F_p constante. Si F_p se resta de la fuerza de corte resultante F_r , entonces se obtiene F'_r , la fuerza requerida para remover la viruta y que actúa sobre la cara de la herramienta (ver fig. 2.20):

$$F_r = F_r - F_p$$

Se ha demostrado que si se utilizan las componentes de F_r para calcular la resistencia aparente a la cizalladura del material de trabajo, esta resistencia permanece constante con respecto a cambios en el avance. Así,

$$\tau'_s = \left[(F'_c \cos \phi) - (F'_t \sin \phi) \right] \frac{\sin \phi}{A_c}$$

en donde F'_c = componente de corte F'_r ,

F'_t = componente de empuje de F'_r ,

τ'_s = propiedad constante del material de trabajo

Estudios sobre la deformación de metales para deformaciones unitarias elevadas por unidad de tiempo, han demostrado que el material se deforma a esfuerzo constante cuando la velocidad de deformación es lo suficientemente grande. En el corte de metales, se cree que las deformaciones unitarias por unidad de tiempo son del orden de 10^3 a 10^5 s^{-1} , y bajo estas condiciones se espera que la resistencia a la cizalladura del metal sea constante e independiente de la deformación unitaria por unidad de tiempo, la deformación unitaria, y de la temperatura. Sugiere que estas características de la resistencia a la cizalladura explican por qué en el corte de metales el valor de τ'_s , la resistencia media a la cizalladura del material de trabajo o de la pieza, es constante e independiente de la velocidad de corte y del ángulo de inclinación normal, en el rango en el cual se encuentran por lo común estos parámetros en el corte de metales.

2.6. Aspereza superficial.

La aspereza superficial obtenida al final de una operación de mecanizado puede considerarse como la suma de dos efectos independientes:

1. La aspereza superficial “ideal” que es un resultado de la geometría de la herramienta y del avance o velocidad de avance.
2. La aspereza superficial “natural” que depende de las irregularidades en la operación.

2.6.1. Aspereza superficial ideal.

La aspereza superficial ideal representa el mejor acabado que se puede obtener de una forma de herramienta y avance y sólo puede alcanzarse si se eliminan el filo recrocado, la vibración, las imprecisiones en los movimientos de la máquina- herramienta, etc. En la figura 2.22.(a) se ilustra este acabado para el torneado con herramienta de punta aguda.

Para efecto del análisis y comparaciones cuantitativas, es de utilidad expresar la rugosidad de las superficies mecanizadas en términos de un solo índice o factor. El índice que comúnmente se usa es el promedio aritmético R_a y puede encontrarse de la manera siguiente:

En la curva de la figura 2.22. (b), que muestra un corte de la superficie en consideración, se encuentra primero una línea media, paralela a la dirección general de la superficie, que divida la superficie de tal manera que la suma de las áreas bajo la línea sea igual a la suma de las áreas sobre la línea.

El valor R_a está dado por la suma de los valores absolutos de todas las áreas por encima y por debajo de la línea media, dividida por la longitud de muestra.

En la figura 2.22. será:

$$R_a = \frac{|área abc| + |área cde|}{f}$$

donde f es el avance.

Dado que las áreas abc y cde son iguales,

$$R_a = \frac{2}{f} (área abc) = \frac{R_{max}}{4}$$

Donde $R_{max}/2$ es la altura del triángulo abc .

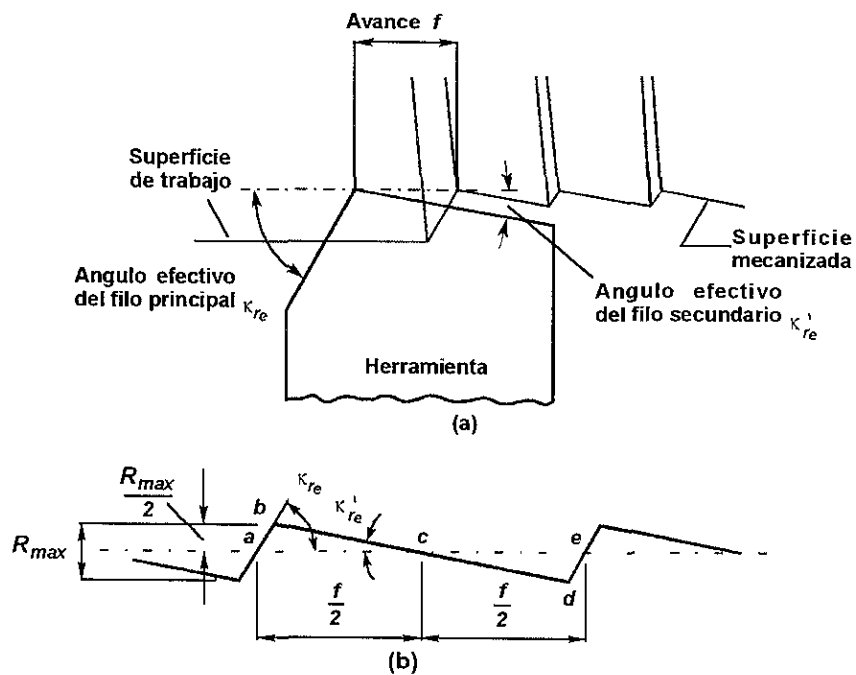


Fig.2.22 Modelo idealizado del acabado superficial para una herramienta con punta aguda donde κ_{re} = ángulo efectivo del filo principal, κ'_{re} = ángulo efectivo del filo secundario, y f = avance. (a) Superficie producida; (b) corte a través de las irregularidades superficiales.

Es importante anotar aquí que para una superficie que tenga irregularidades triangulares uniformes R_a es igual a la cuarta parte de la altura máxima de las irregularidades.

Ahora, de la geometría,

$$R_{max} = \frac{f}{\cot K_{re} + \cot K_{re'}}$$

donde K_{re} y $K_{re'}$ son los ángulos efectivos de los filos principal y secundario, respectivamente.

De las dos últimas ecuaciones tenemos:

$$R_a = \frac{f}{4(\cot K_{re} + \cot K_{re'})}$$

La ecuación anterior muestra que R_a para una superficie de ese tipo es directamente proporcional al avance.

Las herramientas de corte están generalmente dotadas de una punta redondeada y la figura 2.23. muestra la superficie producida por una herramienta de ese tipo en condiciones ideales. La obtención de una ecuación teórica que nos dé R_a para esta superficie es mucho más difícil que para el caso anterior, pero puede demostrarse que la siguiente expresión es bastante aproximada:

$$R_a = \frac{0.0331f^2}{r_c}$$

donde r_c es el radio de la punta.

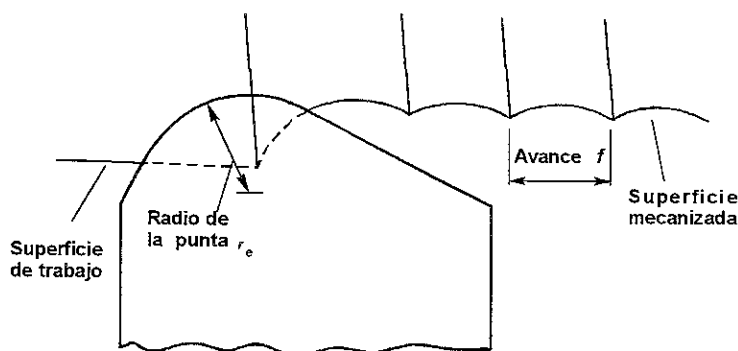


Fig. 2.23 Modelo idealizado del acabado superficial para una herramienta con punta redondeada donde r_e es el radio de la punta.

2.6.2. Aspereza superficial natural.

En la práctica generalmente no es posible obtener condiciones como las descritas anteriormente y normalmente la aspereza superficial natural contribuye en gran parte a la aspereza real. Uno de los principales causantes es el filo recrecido. Éste puede crecer y romperse continuamente introduciendo las partículas fracturadas en la viruta o en la nueva superficie de la pieza. Podría esperarse así que a mayor filo recrecido, mayor aspereza en la superficie producida y que los factores tendientes a reducir la fricción herramienta-viruta y eliminar o reducir el filo recrecido mejorarán el acabado superficial. Tales factores serían un incremento en la velocidad de corte, un cambio de herramienta de acero rápido por carburos, la introducción de materiales de corte libre como aceros resulfurados o con plomo, la aplicación del lubricante correcto a velocidades de corte bajas, etc.

Otros factores que contribuyen comúnmente a la aspereza natural son:

1. La presencia de vibraciones en la máquina-herramienta.

2. Imprecisiones en los movimientos de la máquina como por ejemplo en el carro longitudinal del torno.
3. Irregularidad en el mecanismo de avance.
4. Defectos en la estructura del mecanismo de avance.
5. Formación discontinua de viruta cuando se mecanizan materiales frágiles.
6. Ruptura del material de trabajo cuando se cortan materiales dúctiles o bajas velocidades de corte.
7. Daños superficiales causados por el flujo de viruta, etc.

La discusión anterior se ha limitado a la aspereza superficial producida por herramientas monofilas. Cuando se consideran las herramientas multifila ha de tenerse en cuenta que debido a las ligeras imprecisiones en la construcción de las mismas o a las imprecisiones del movimiento principal de la máquina herramienta, un diente es el que desempeña un papel dominante en la generación de la superficie mecanizada. Así, en el fresado circular tangencial, por ejemplo, la aspereza superficial obtenida bajo condiciones ideales puede calcularse suponiendo que la herramienta tiene sólo un diente. Haciendo sustituciones apropiadas en las ecuaciones anteriores tenemos:

$$R_a = \frac{0.0642}{d_t} \left(\frac{V_f}{n_t} \right)^2$$

donde V_f = velocidad de avance

d_t = diámetro de la herramienta

n_t = frecuencia rotacional de la herramienta

Como una guía, puede tomarse que, en general, los procesos de rectificado dan asperezas de 0.05 a $2.5\mu\text{m}$ (2 a 100μ pulg.), torneado con diamante dará de 0.1 a $1.0\mu\text{m}$ (4 a 40μ pulg.) y el fresado y torneado en general darán asperezas mayores de $1\mu\text{m}$ (40μ pulg.).

2.6.3. Medición de la rugosidad superficial.

Antes de tratar la medición de la rugosidad, es importante tener en cuenta que pueden ocurrir otras clases de imperfecciones de la superficie. Estas son las llamadas *fallas superficiales* y *ondulaciones*. Las primeras son irregularidades bastante separadas que se presentan al azar en la superficie. Pueden ser grietas o rayaduras. Las ondulaciones son una forma de imperfección regular donde la longitud de onda es mayor que un valor especificado (generalmente cerca de 1 mm). Las rugosidades son irregularidades más finas que las ondulaciones y van superpuestas sobre éstas. Un término empleado en la medición superficial es el de *los surcos*. Éste corresponde a la dirección del patrón superficial predominante y está generalmente determinado por el método de mecanizado usado para producir la superficie. Las mediciones de una superficie se hacen en ángulos rectos a los surcos.

Pueden utilizarse instrumentos para obtener un trazado aumentado de las irregularidades superficiales; este trazado se conoce como *perfil superficial*. Estos instrumentos operan por la amplificación del movimiento vertical de un palpador que se desliza a través de la superficie; pueden producir, además del registro en una tira de papel, una lectura directa de R_a . Ésta se obtiene con un rectificador de onda completa y un circuito suavizador conectado a un galvanómetro y la ondulación es eliminada automáticamente por un dispositivo ruptor de frecuencia.

La ISO recomienda una serie de valores de rugosidad y sus correspondientes grados de rugosidad para ser usados cuando se especifiquen acabados superficiales en los dibujos. La relación entre los grados y los valores de rugosidad aparecen en la tabla 2.2.

Valores de rugosidad R_a

μm	μpulg	Grados de rugosidad
50	2000	N12
25	1000	N11
12.5	500	N10
6.3	250	N9
3.2	125	N8
1.6	63	N7
0.8	32	N6
0.4	16	N5
0.2	8	N4
0.1	4	N3
0.05	2	N2
0.025	1	N1

Tabla 2.2. Valores de rugosidad recomendados por la ISO y grados para especificar el acabado superficial.

CAPÍTULO TERCERO

ELABORACIÓN DE PRUEBAS

En este capítulo se presenta la manera en que fueron realizados cada uno de los ensayos para determinar algunas de las propiedades mecánicas de los materiales bajo estudio; en algunos casos fue necesario diseñar las pruebas ya que no existen normas específicas para ceras maquinables.

Cabe mencionar, que con el fin de obtener resultados confiables se realizaron 5 mediciones por cada parámetro analizado, eliminando la mayor y la menor medición, obteniendo así el promedio de las tres restantes como valor de cada propiedad mecánica.

3.1. Pruebas de Dureza.

Como se analizó en el capítulo segundo, existen diversos métodos para medir la dureza de un material, e incluso existen muchos métodos específicos para medir la dureza de una cera o de un polímero, entre algunos de estos métodos se pueden mencionar los siguientes:

- Ensayos de dureza al rayado.
- Ensayos de dureza por penetración estática tales como los métodos Brinell, Vickers, Rockwell, y el penetrador sin punta con carátula graduada (0-100) especial para ceras.
- Ensayos de dureza elástica o dinámica tales como el método de Poldi y el método de retroceso utilizando el Esclerómetro Shore.

Ante tal cantidad de métodos para evaluar la dureza de los materiales bajo estudio optamos por evaluar cuál sería el método más adecuado; sin embargo, la principal restricción para la realización de los experimentos era el disponer de los instrumentos necesarios; por lo anterior, los únicos que teníamos a nuestra disposición eran el Durómetro Brinell, el Vickers y el Rockwell. Decidimos utilizar este último ya que es el más recomendable para materiales blandos como los polímeros debido a la magnitud de la carga y a la geometría de los penetradores.

La prueba se realizó en el Laboratorio de Pruebas Mecánicas de la UNAM, a través de un durómetro digital (Mitutoyo) bajo las siguientes condiciones:

- La temperatura ambiente de $23 \pm 2^\circ\text{C}$.
- Las probetas utilizadas deben tener un espesor mínimo de 13 mm., debiendo tener la forma adecuada de tal forma que la superficie en contacto con el durómetro sea paralela a la superficie donde se van a realizar las penetraciones, evitando en todo momento que alguna rugosidad impida el correcto asentamiento del espécimen.
- El método utilizado para esta prueba fue el siguiente:

Método Rockwell de dureza para plásticos y materiales aislantes eléctricos, cuyo número de designación ASTM es: D 785 – 89

Los parámetros para dicho método son los siguientes:

Escala de Dureza Rockwell	Carga menor (Kg.)	Carga mayor (Kg.)	Diámetro del Identador (pulgadas)	Diámetro del Identador (mm)
L	10	60	0.2500 ± 0.0001	6.350 ± 0.0025

Procedimiento:

Aunque la Norma especifica que deberán realizarse al menos 5 ensayos para obtener un valor confiable de la dureza, decidimos realizar 7 ensayos para cada material siguiendo el procedimiento que a continuación se menciona:

- 1.- Se coloca el identador de 0.25 pulgadas de diámetro en el durómetro.
- 2.- Se coloca la probeta en el durómetro.
- 3.- Se baja el identador hasta estar en contacto con la probeta.
- 4.- Se aplica una Pre-carga de 10 Kg. durante 10 segundos.
- 5.- Se oprime el botón de "Reset" del durómetro.
- 6.- Se aplica la carga mayor de 60 Kg. durante 10 segundos.
- 7.- Se retira la carga y se registra el valor de la carátula del instrumento, el cual corresponde a la dureza del material.

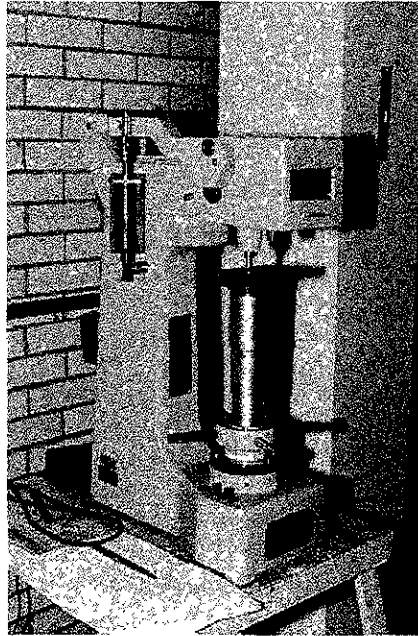


Fig. 3.1. Ensayo de Dureza (Durómetro Digital Mitutoyo UNAM).

3.2. Pruebas de Tensión.

Como se mencionó anteriormente la Prueba de Tensión se realiza aplicando una carga que se incrementa (con una relación constante de deformación) a un espécimen de geometría específica.

En nuestro caso se utilizó la Máquina para Ensayos Universales de la Universidad Panamericana (INSTRON), dicha máquina se encuentra conectada a una computadora personal, la cual a través de un Software y dada el área de la sección transversal de la probeta y el avance de las tenazas nos permite conocer los siguientes datos:

- Tiempo transcurrido de la prueba.
- Extensión de la probeta en mm. (Deformación).

- Carga aplicada (Newtons).
- Esfuerzo (Pascuales).
- Porcentaje de deformación.
- Resistencia Última de Tensión.

Condiciones:

- Las pruebas se realizaron a una temperatura aproximada ambiente de 20°C.
- En cuanto a las probetas, no existe una norma que establezca las dimensiones de las probetas para ensayos de tensión en ceras. Ante esto se optó por utilizar dimensiones idénticas a las utilizadas en ensayos para metales tales como aluminio y bronce ya que son las más comunes y sobre todo, las de mayores dimensiones aceptadas por la Máquina de Ensayos Universales (25.4 mm. de diámetro).

Las dimensiones de las probetas utilizadas se ilustran en la Figura 3.2.

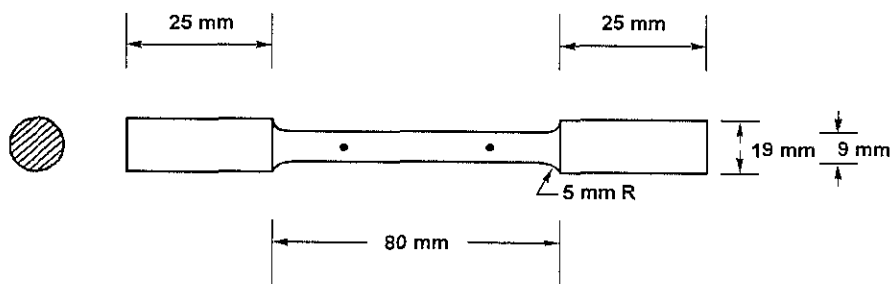


Fig. 3.2. Probeta Utilizada.

Con el fin de realizar probetas prácticamente idénticas, así como realizar los experimentos de manera homogénea se elaboró un programa para la elaboración de las probetas en la Máquina de Control Numérico, ya que de haberse hecho manualmente se incurriría en diferencias de dimensiones, las cuales alterarían los resultados de las pruebas, sobre todo si estas diferencias se presentan en las partes cónicas de la probeta, ya que suelen concentrarse esfuerzos en esta zona.

A continuación se muestra el programa elaborado.

NOMBRE DEL PROGRAMADOR: FRANCISCO RODRIGUEZ MANCILLA					
DESCRIPCION DEL PROGRAMA: PROBETA TENSION CERAS MAQUINABLES					
UNIDADES: mm.					
LARGO: 130					
DIAMETRO: 19					
HERRAMIENTAS: 6 1 7 2 8 3					
0	G71				
1	G92	2900	500		
2	M03				
3	G00	1940	-3000		
4	G01	1700	-3500	100	
5	G01	1700	-10000	100	
6	G01	1900	-10500	100	
7	G00	1900	-3000		
8	G01	1500	-4000	100	
9	G01	1500	-10000	100	
10	G01	1900	-10500	100	
11	G00	1900	-3000		
12	G01	1300	-4500	100	
13	G01	1300	-10000	100	
14	G01	1900	-10500	100	
15	G00	1900	-3000		
16	G01	1100	-5000	100	
17	G01	1100	-10000	100	
18	G01	1900	-10500	100	
19	G00	1900	-3000		
20	G01	900	-5500	100	
21	G01	900	-10000	100	

22	G01	1900	-10500	100	
23	G00	900	-10000		
24	G02	1900	-10500	100	
25	G00	3500	-9000		
26	M06	25	-1414	T4	D0
27	G00	1700	-4000		
28	G01	1700	-3000	100	
29	G01	1900	-2500	100	
30	G00	1700	-4500		
31	G00	1500	-4500		
32	G01	1500	-3000	100	
33	G01	1900	-2500	100	
34	G00	1500	-5000		
35	G00	1300	-5000		
36	G01	1300	-3000	100	
37	G01	1900	-2500	100	
38	G00	1300	-5500		
39	G00	1100	-5500		
40	G01	1100	-3000	100	
41	G01	1900	-2500	100	
42	G00	1100	-6000		
43	G00	900	-6000		
44	G01	900	-3000	100	
45	G01	1900	-2500	100	
46	G00	900	-3000		
47	G03	1900	-2500	100	
48	G00	3540	-5000		
49	M06	0	0	T2	D0
50	G00	2900	500		
51	M30				

Procedimiento:

1.- Se elaboraron 10 probetas, 5 por cada material de acuerdo con las dimensiones descritas anteriormente.

2.- Se proporcionan a la Máquina de Ensayos Universales los datos requeridos por el programa tales como: Área de la sección transversal de la probeta, avance de las mordazas, datos de la persona que elabora la prueba, etc.

3.- Se coloca la probeta en las mordazas ajustando manualmente mediante la perilla.

4.- Después de ser colocada la probeta, bastará iniciar la prueba mediante una instrucción a través de la computadora. El programa se encargará también de registrar los resultados de la prueba, éstos se analizarán más adelante.

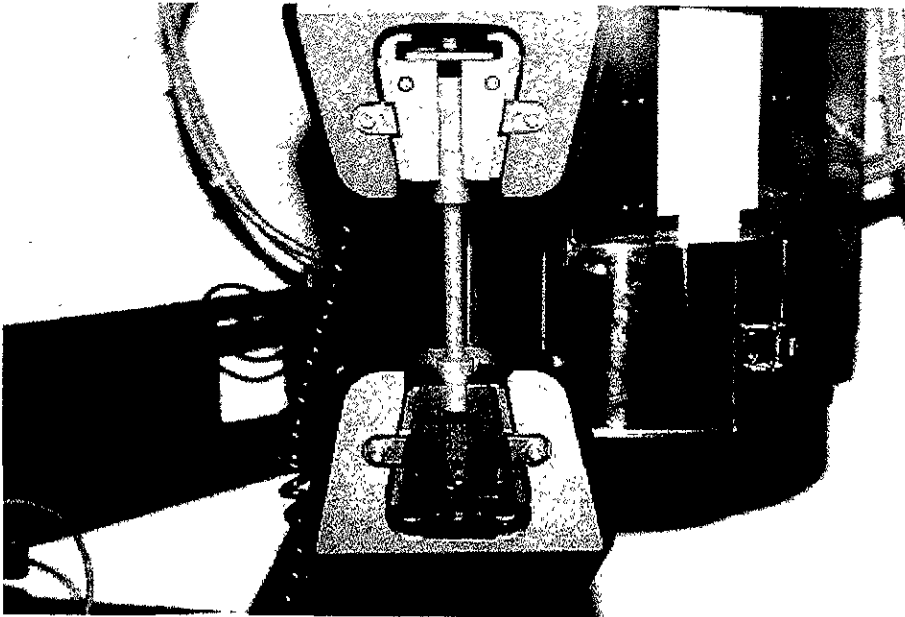


Fig. 3.3. Prueba de Tensión (Máquina de Ensayos Universales Universidad Panamericana).

3.3. Pruebas de Impacto.

Como se mencionó en el capítulo anterior algunas pruebas de impacto tales como la de Charpy e Izod se aplican no sólo a los metales, sino también a los plásticos y cerámicos en algunas circunstancias. Los procedimientos de prueba son muy semejantes pero se utilizan máquinas de menor capacidad puesto que las energías de impacto que se encuentran son menores.

Por tal motivo se buscó un dispositivo que nos permitiera realizar las pruebas de la mejor manera posible. En primera instancia, se analizó la posibilidad de utilizar la máquina con que cuenta el Departamento de Ingeniería Mecánica de la UNAM; sin embargo, como se mencionó anteriormente, los equipos más comunes están diseñados para especímenes de prueba metálicos, los cuales poseen grandes energías de impacto; en esta caso el dispositivo es de 300 Joules (Fig. 3.4.) suficiente para metales, pero para ceras es demasiado grande.

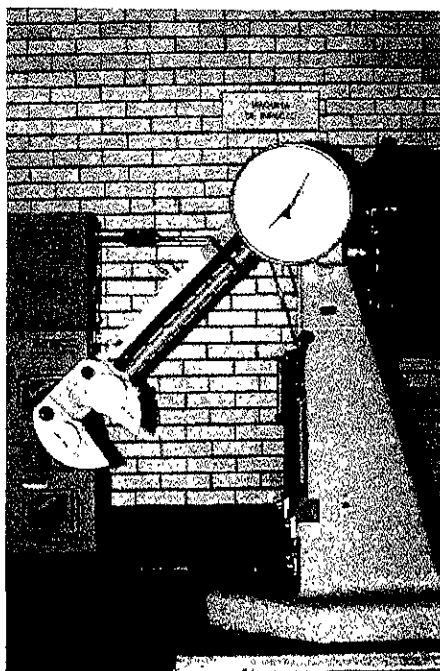


Fig. 3.4. Máquina para Pruebas de Impacto de 300 Joules (UNAM).

Afortunadamente el Instituto de Ingeniería, a través de un proyecto de Tesis, desarrolló una máquina con una capacidad de 0.341 J. (Fig. 3.5.), la cual suele ser utilizada frecuentemente para especímenes cerámicos. Por tal motivo, y siendo además el único dispositivo a nuestro alcance decidimos utilizarlo.

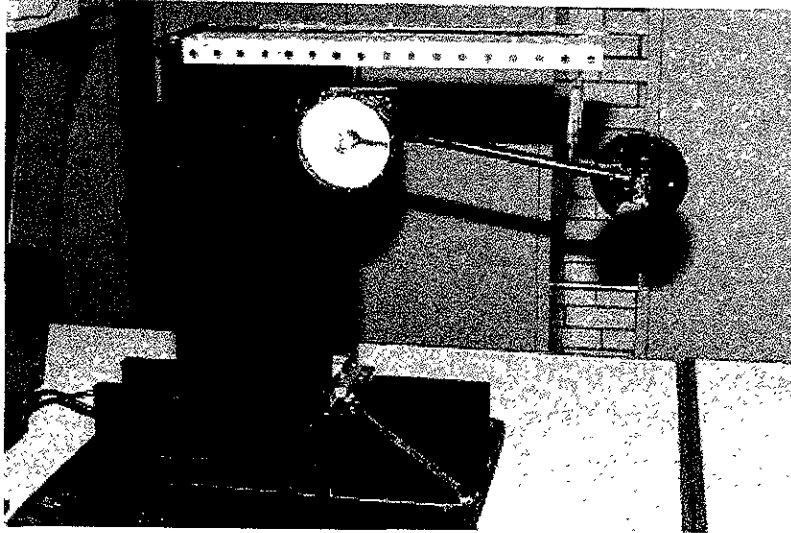


Fig. 3.5. Dispositivo para pruebas de Impacto en Cerámicos de 0.341 Joules (UNAM).

Para la realización de la prueba se tuvieron los siguientes parámetros:

Condiciones:

- Temperatura ambiente: 20°C
- Dimensiones de las Probetas: Barra de 50 mm. de longitud con sección cuadrada de 10 mm. por lado.

(Las dimensiones de las probetas fueron seleccionadas imitando las que se utilizan para algunos polímeros; sin embargo, cabe mencionar que no existe una norma para la elaboración de las

probetas para ceras maquinables, ya que como se mencionó, el dispositivo utilizado era el único disponible y cuenta con sus propios parámetros de medición.)

- Energía Potencial del péndulo a partir del punto de sujeción de: 0.341 Joules.

Procedimiento:

Se realizaron 10 ensayos: 5 para la Cera Maquinable Comercial y 5 para la Himach-wax, el procedimiento en cada caso fue el siguiente:

- 1.- Se sujeta el péndulo a través del dispositivo de sujeción.
- 2.- Se coloca la probeta
- 3.- Se coloca la aguja de la carátula en “cero”
- 4.- Se suelta el mecanismo de sujeción permitiendo caer libremente el péndulo.
- 5.- Se toma la lectura.

Interpretación de los resultados:

Como se puede ver en la figura 3.5. la carátula se encuentra graduada con una escala de 0° a 90°, los cuales corresponden directamente a 0 y 0.341 Joules de Energía de Impacto respectivamente. Los resultados de las pruebas se analizarán más adelante.

3.4. Pruebas de Maquinabilidad y Rugosidad.

En esta prueba se analizaron algunas de las propiedades de maquinado de los materiales bajo estudio.

Condiciones:

- La prueba se realizó a una temperatura ambiente de 19°C.
- Se utilizó el Torno de Control Numérico de la Universidad Panamericana.
- Se utilizó una herramienta de corte con inserto de Carburo.
- Se utilizó el Rugosímetro de la Universidad bajo los siguientes parámetros:
 - a) Rugosidad Registrada Promedio (Ra).
 - b) Desplazamiento de 0.8 mm.
 - c) Escala ISO en mm.
- Dimensiones de las probetas: 25.40 mm. de diámetro x 40 mm. de longitud

Procedimiento:

Se elaboraron 35 probetas de cada material, las cuales fueron sometidas a diferentes condiciones de maquinado (Profundidad de Corte, Avance y Velocidad de Corte (rpm)), en cada caso se realizaron 5 ensayos, registrando la Rugosidad (Ra), eliminando el mayor y el menor registro y obteniéndose así el promedio de los tres restantes.

A continuación se muestran los parámetros de corte utilizados:

Profundidad de Corte (mm.)	Avance (mm/min.)	RPM	Rugosidad Ra. (5 ensayos) ($\mu\text{m.}$)
6	100	1000	
4	100	1000	
2	100	1000	
4	100	1000	No se realiza (repetido)
4	200	1000	
4	300	1000	
4	100	1000	No se realiza (repetido)
4	100	2000	
4	100	3000	

Tabla 3.1. Parámetros de corte utilizados en las pruebas de Maquinabilidad y Rugosidad.



Fig. 3.6. Prueba de Maquinabilidad.

Para lo anterior, y con el fin de simplificar el trabajo y sobre todo con la intención de realizar experimentos homogéneos, se optó por realizar un programa para la máquina de control numérico, dicho programa se muestra a continuación:

Programa CNC

N	G	X	Z	F	H
00	92	3540	500	100	
01	M03				
02	00	3540	100		
03	00	P. CORTE	100		
04	01	P. CORTE	-2540	AVANCE	
05	01	2540	-2540	AVANCE	
06	00	3540	500		
07	M30				

Como se puede observar sólo bastará sustituir en las palabras “ P. CORTE ” y “AVANCE ” dichos parámetros, por ejemplo en el caso de tener una profundidad de corte de 6 mm. y un avance de 100 mm. / min. se tiene que: P. CORTE = 1340 y AVANCE = 100.

En el caso de las RPM éstas serán reguladas manualmente a través de la perilla en la máquina CNC.

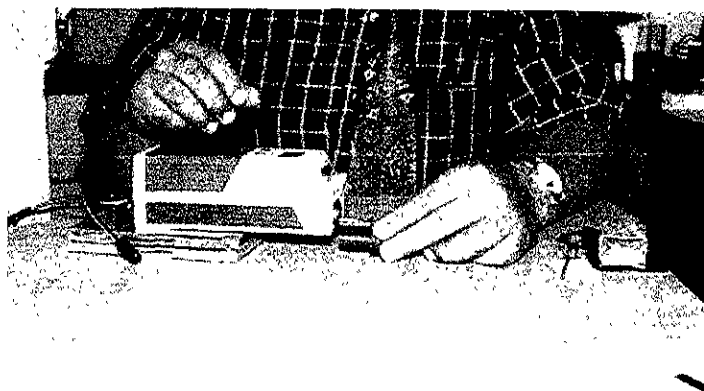


Fig. 3.7. Medición de Rugosidad (Rugosímetro de la Universidad Panamericana).

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

CAPÍTULO CUARTO

RESULTADOS

4.1. Pruebas de Dureza.

Como se mencionó en el capítulo tercero, se utilizó el Durómetro Digital del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UNAM, bajo la norma ASTM D 785 – 89 de ensayos de Dureza Rockwell para plásticos y materiales aislantes eléctricos, la cual tiene los siguientes parámetros:

- Escala de Dureza Rockwell: L
- Carga menor: 10 Kg.
- Carga mayor: 60 Kg.
- Diámetro del Identador: 0.25 ± 0.0001 (pulgadas) = 6.350 ± 0.0025 (milímetros)

Ensayo	Himach-wax Dureza Rockwell (L/10Kg./60Kg./0.25 pulgadas)	Cera Comercial Dureza Rockwell (L/10Kg./60Kg./0.25 pulgadas)
1	39.0	22.5
2	31.5	21.2
3	30.0	21.0
4	29.5	20.7
5	29.0	20.5
6	28.5	20.5
7	28.5	19.0
Promedio (Eliminado la medición mayor y menor)	29.7	20.8

Tabla 4.1. Resultados de las Pruebas de Dureza en ambos materiales.

4.2. Pruebas de Tensión.

Debido a la extensión de los resultados proporcionados por el Software de la Máquina de Ensayos Universales sólo mostraremos los resultados de dos de ellos con el fin de ilustrar los parámetros registrados en las pruebas. De igual manera en las figuras 4.1. y 4.2. se muestran las Curvas *Esfuerzo-Deformación* obtenidas de dichos datos.

Probeta: 4 (Himach-wax)				
Tiempo	Extensión	Carga	Esfuerzo	Porcentaje de
Segundos	Milímetros	Newtons	Megapascuales (Mpa)	Deformación
0	(0.0002)	3.0144	0.0471	(0.0004)
1	0.0830	44.6942	0.6983	0.1661
2	0.1665	81.1031	1.2672	0.3330
3	0.2498	114.0399	1.7818	0.4997
4	0.3332	144.4070	2.2563	0.6664
5	0.4165	171.2196	2.6753	0.8330
6	0.4998	211.7114	3.3079	0.9996
7	0.5831	219.1047	3.4235	1.1663
8	0.6665	241.3845	3.7716	1.3329
9	0.7498	261.3820	4.0840	1.4996
10	0.8332	280.6165	4.3846	1.6663
11	0.9165	298.0548	4.6571	1.8329
12	0.9998	313.9580	4.9055	1.9996
13	1.0831	330.0294	5.1567	2.1663
14	1.1665	344.8185	5.3877	2.3330
15	1.2498	359.9250	5.6238	2.4996
16	1.3331	372.7159	5.8236	2.6662
17	1.4165	14.7194	0.2299	2.8329
18	1.4998	15.5960	0.2437	2.9995
19	1.5832	15.4745	0.2417	3.1663
20	1.6664	14.6994	0.2296	3.3328
21	1.7499	14.8702	0.2323	3.4997
22	1.8331	13.7491	0.2148	3.6663
23	1.9165	13.5223	0.2112	3.8330
24	1.9998	14.4554	0.2258	3.9995
25	2.0831	14.8338	0.2317	4.1662
26	2.1665	14.2961	0.2233	4.3329
27	2.2498	14.2206	0.2221	4.4996
28	2.3331	13.2692	0.2073	4.6662
29	2.4165	15.9138	0.2486	4.8330
30	2.4998	15.2716	0.2386	4.9997
31	2.5831	14.7198	0.2299	5.1663
32	2.6665	13.0505	0.2039	5.3329
33	2.7498	15.9814	0.2497	5.4996

34	2.8331	14.5602	0.2275	5.6663
35	2.9164	14.2308	0.2223	5.8328
36	2.9998	15.1792	0.2371	5.9996
37	3.0831	14.6678	0.2291	6.1662
38	3.1665	24.5114	0.3829	6.3330
39	3.2498	27.4872	0.4294	6.4996
40	3.3332	29.6217	0.4628	6.6663
41	3.4165	30.5971	0.4780	6.8330
42	3.4998	14.4257	0.2254	6.9996

Tabla 4.2. Resultados de la Prueba de Tensión para la probeta No. 4 correspondiente a la Himach-wax (Software Máquina de Ensayos Universales IMSTRON).

Probeta: 6 (Cera Comercial)				
Tiempo	Extensión	Carga	Esfuerzo	Porcentaje de
Segundos	Milímetros	Newtons	Megapascuales (Mpa)	Deformación
0	(0.0001)	(0.4317)	(0.0067)	(0.0001)
1	0.0832	31.7264	0.4957	0.1665
2	0.1666	59.1322	0.9239	0.3332
3	0.2500	84.3281	1.3176	0.5000
4	0.3333	109.3311	1.7083	0.6667
5	0.4167	130.2234	2.0347	0.8333
6	0.5000	151.2100	2.3627	1.0000
7	0.5833	171.6672	2.6823	1.1666
8	0.6666	191.4515	2.9914	1.3333
9	0.7499	210.4925	3.2889	1.4999
10	0.8333	227.6309	3.5567	1.6666
11	0.9166	245.3518	3.8336	1.8333
12	1.0000	259.9913	4.0624	2.0000
13	1.0834	275.9416	4.3116	2.1667
14	1.1666	289.2725	4.5199	2.3333
15	1.2500	304.2710	4.7542	2.5000
16	1.3333	316.5147	4.9455	2.6665
17	1.4166	328.6409	5.1350	2.8333
18	1.5000	339.5491	5.3055	2.9999
19	1.5833	348.9903	5.4530	3.1665
20	1.6667	355.9382	5.5615	3.3333
21	1.7500	363.0393	5.6725	3.4999
22	1.8334	369.0878	5.7670	3.6667
23	1.9166	373.8942	5.8421	3.8333
24	2.0000	377.9305	5.9052	4.0000
25	2.0833	382.8230	5.9816	4.1666
26	2.1666	388.5796	6.0716	4.3332
27	2.2500	390.8870	6.1076	4.4999
28	2.3333	395.8758	6.1856	4.6666
29	2.4166	399.5657	6.2432	4.8333

30	2.5000	25.7100	0.4017	5.0000
31	2.5833	24.3268	0.3801	5.1666
32	2.6667	24.4261	0.3817	5.3333
33	2.7500	23.0257	0.3598	5.5000
34	2.8333	24.4851	0.3826	5.6666
35	2.9166	22.5425	0.3522	5.8333
36	2.9999	25.2386	0.3944	5.9999
37	3.0833	24.9195	0.3894	6.1667
38	3.1666	24.0068	0.3751	6.3331
39	3.2500	25.0801	0.3919	6.4999
40	3.3333	24.7127	0.3861	6.6665
41	3.4167	25.1859	0.3935	6.8333
42	3.5000	24.2236	0.3785	7.0000

Tabla 4.3. Resultados de la Prueba de Tensión para la probeta No. 6 correspondiente a la Cera Comercial (Software Máquina de Ensayos Universales IMSTRON).

Curva Esfuerzo-Deformación (Himach-wax)
Probeta 4

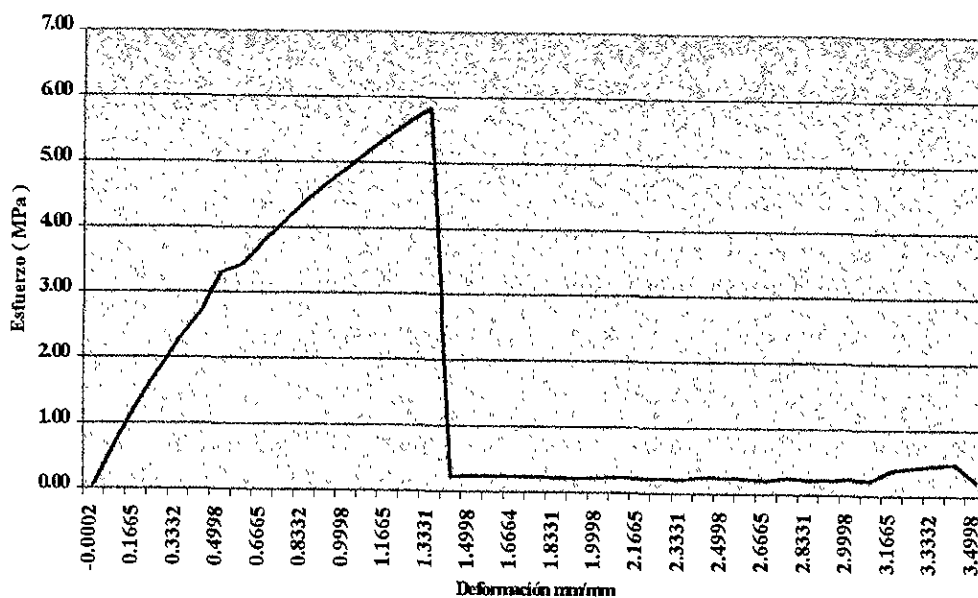


Figura 4.1. Curva Esfuerzo-Deformación Probeta 4 (Himach-wax).

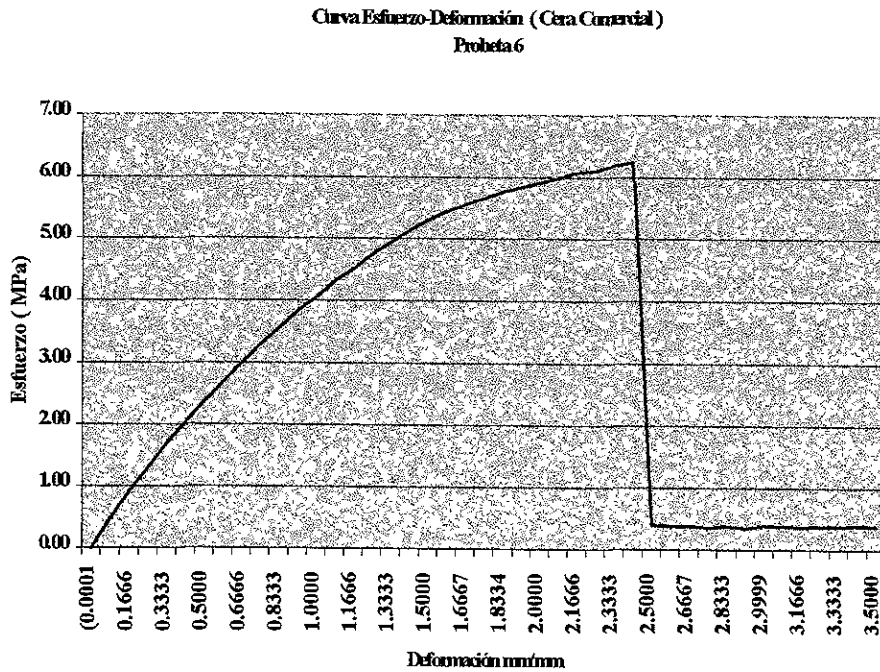


Figura 4.2. Curva Esfuerzo-Deformación Probeta 6 (Cera Comercial).

En la Tabla 4.4. se muestra la Resistencia Última de Tensión obtenida de las 10 pruebas realizadas.

Himach-wax				
Probeta	Tiempo Segundos	Extensión Milímetros	Carga Newtons	Esfuerzo Mpa
1	4	0.1666	69.2622	1.0822
2	170	0.7373	343.1302	5.3614
3	59	4.9165	378.6492	5.9164
4	16	1.3331	372.7159	5.8237
5	17	1.4167	366.2168	5.7221
Promedio	31	1.1624	360.6876	5.6357

Cera Comercial				
6	29	2.4166	399.5657	6.2432
7	28	2.3241	398.4223	6.2253
8	19	2.2589	378.5879	5.9154
9	32	2.7854	404.5872	6.3217
10	26	2.5872	392.6972	6.1359
Promedio	28	2.4426	396.8951	6.2015

Tabla 4.4. Resistencia Ultima de Tensión para los 10 ensayos realizados.

4.3. Pruebas de Impacto.

Los resultados a los 10 ensayos realizados para la Prueba de Impacto son los siguientes.

Prueba	Lectura Registrada Cera Maquinable Comercial	Energía de Impacto Cera Maquinable Comercial (Joules)	Lectura Registrada Himach-wax	Energía de Impacto Hymach-wax (Joules)
1	66°	0.2501	52°	0.1970
2	84°	0.3183	32°	0.1212
3	55°	0.2084	48°	0.1819
4	68°	0.2576	66°	0.2501
5	66°	0.2501	40°	0.1516
Promedio (eliminando la medición mayor y menor)	66.7°	0.2526	46.7°	0.1768

Tabla 4.5. Energía de Impacto registrada en los 10 ensayos realizados.

Como podemos observar, la Cera Maquinable Comercial presenta una mayor resistencia al impacto, presentándose una fractura más dúctil en el caso de la Himach-wax, pues en todos los casos presentó un mayor ángulo de fractura (prácticamente de 45°) en comparación con la Cera Comercial.

4.4. Pruebas de Maquinabilidad y Rugosidad.

Los resultados a los 70 ensayos realizados se muestran a continuación:

Himach-wax.

Profundidad de Corte (mm.)	Avance (mm/min.)	RPM	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Rugosidad Promedio Ra. (µm)
6	100	1000	0.79	0.8	0.89	0.84	0.9	0.84
4	100	1000	0.72	0.6	0.66	0.71	0.70	0.69
2	100	1000	0.52	0.62	0.64	0.59	0.61	0.62
4	100	1000	<i>Prueba</i>	<i>no</i>	<i>realizada</i>			
4	200	1000	1.08	1.14	1.13	1.31	1.28	1.18
4	300	1000	2.25	2.40	2.45	2.46	2.3	2.38
4	100	1000	<i>Prueba</i>	<i>no</i>	<i>realizada</i>			
4	100	2000	0.68	0.47	0.44	0.43	0.51	0.47
4	100	3000	0.53	0.52	0.51	0.64	0.53	0.53

Tabla 4.6. Rugosidades Promedio (Ra) para distintos avances, profundidades y velocidades de corte en la Himach-wax.

Cera Comercial.

Profundidad de Corte (mm.)	Avance (mm/min.)	RPM	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Rugosidad Promedio Ra. (μm)
6	100	1000	2.31	1.8	2.09	2.02	2.4	2.14
4	100	1000	1.81	1.91	1.96	1.82	1.97	1.90
2	100	1000	1.81	2.08	1.83	2.03	2.04	1.97
4	100	1000	<i>Prueba</i>	<i>no</i>	<i>realizada</i>			
4	200	1000	1.66	1.74	1.73	1.69	1.71	1.71
4	300	1000	2.76	2.5	2.61	2.46	2.47	2.53
4	100	1000	<i>Prueba</i>	<i>no</i>	<i>realizada</i>			
4	100	2000	1.94	1.90	1.84	1.82	1.81	1.85
4	100	3000	1.39	1.73	1.74	1.4	1.43	1.52

Tabla 4.7. Rugosidades Promedio (Ra) para distintos avances, profundidades y velocidades de corte en la Cera Comercial.

Cabe mencionar que las rugosidades (Ra) antes mencionadas corresponden al promedio de los ensayos, eliminando el mayor y el menor valor.

Los espacios en blanco corresponden a *pruebas no realizadas*, esto se debe a que la combinación de parámetros de corte ha coincidido con otras pruebas ya realizadas.

CAPÍTULO QUINTO

CONCLUSIONES

Consideramos que los objetivos establecidos al inicio de este trabajo de investigación se han cumplido satisfactoriamente debido a lo siguiente:

- Se desarrolló una nueva cera maquinable con propiedades similares a la Cera Comercial.
- Se desarrolló un proceso para la elaboración de la misma mediante utensilios sencillos y disponibles en las instalaciones de la Universidad Panamericana.
- Se desarrollaron métodos para la medición de propiedades mecánicas de ceras maquinables tales como: dureza, tensión, impacto, maquinabilidad y rugosidad. No obstante que en algunos casos no existen normas internacionales para estos experimentos es importante mencionar que este trabajo pretende básicamente comparar ambos materiales, de tal forma que, aunque las pruebas realizadas trataron de ser lo más apegadas a normas internacionales, bastará que los parámetros sean los mismos para poder así compararlas.
- La nueva cera desarrollada posee una mayor dureza y en general un mucho mejor acabado superficial que la Cera Comercial para diferentes condiciones de maquinado, sin embargo posee menor resistencia a la tracción y mucho menor resistencia al impacto. A continuación se muestran los cuadros resumen que contienen los resultados a las mediciones de las propiedades mecánicas evaluadas

Concepto	Himach-wax	Cera Comercial	Himach-wax Vs Cera Comercial
Dureza Rockwell (L/10Kg./60Kg./0.25 pulgadas)	29.7	20.8	43% más dura.
Resistencia Última de Tensión (Newtons)	360.7	396.9	9.12% menos resistente a la tracción
Energía de Impacto (Joules)	0.1768	0.2526	30% menos resistente al impacto.

Tabla 5.1. Comparativo entre los resultados obtenidos en las pruebas de Dureza, Tensión e Impacto.

Profundidad de Corte (mm.)	Avance (mm/min.)	RPM	Rugosidad Promedio Ra. (µm) Himach-wax	Rugosidad Promedio Ra. (µm) Cera Comercial	Himach-wax Vs Cera Comercial
6	100	1000	0.84	2.14	60.75% menor rugosidad.
4	100	1000	0.69	1.90	63.68% menor rugosidad.
2	100	1000	0.62	1.97	68.53% menor rugosidad
4	100	1000			
4	200	1000	1.18	1.71	31% menor rugosidad.
4	300	1000	2.38	2.53	5.93% menor rugosidad.
4	100	1000			
4	100	2000	0.47	1.85	74.6% menor rugosidad.
4	100	3000	0.53	1.52	65.13% menor rugosidad.

Tabla 5.2. Comparativo entre los resultados obtenidos en las de Maquinabilidad-Rugosidad.

- Aunque la nueva cera desarrollada en algunos casos no supera ciertas propiedades de la Cera Comercial, consideramos que un aspecto muy importante es el costo. Como se observa a continuación es muy significativo el ahorro:

Presentación	Himach-wax	Cera Comercial	Ahorro
Bloque 2" x 6" x 24"	64	1,302	95.1%
Bloque 3" x 6" x 12"	48	979	95.1%
Bloque 3" x 12" x 24"	192	3,943	95.1%
Bloque 6" x 12" x 12"	192	3,724	94.8%
Barra 3" x 12"	10	437	97.7%

Tabla 5.3. Comparativo de Costos entre ambos materiales para diversas presentaciones.

Notas:

- Los costos antes mencionados están expresados en pesos (M.N.)
 - Se utilizó un tipo de cambio de 9.5 pesos M.N. por dólar ya que la empresa que distribuye la Cera Comercial únicamente cotiza en USD.
 - Los costos de la Himach-wax sólo consideran el costo de las materias primas (no se consideran los costos de producción).
 - Se compararon los costos tomando en consideración las presentaciones en que la Cera Comercial es vendida, ya que no es posible obtener de ésta un costo por unidad de volumen o peso. En el caso de la Himach-wax se consideró un costo de 27 pesos M.N. por kilogramo y una densidad de 500 gramos por decímetro cúbico.
- Como se puede observar, el ahorro es muy significativo, sobre todo si consideramos que la mayor aplicación de estas ceras es con fines didácticos en la universidad y en la prueba de programas para las máquinas de control numérico, lo anterior le resta valor a las ventajas en algunas propiedades mecánicas de la Cera Comercial ya que una mayor resistencia a tensión o al impacto no son de relevancia con respecto al ahorro que pudiera representar el uso de la nueva cera.

BIBLIOGRAFÍA

- **Annual Book os ASTM Standards.**

D 785 – 89 Standard Test Method for Rockwell Hardness of Plasticas and Electrical Insulating Materials.

D 283 – 92 Standard Test Method for Identation Hardness of Rigid Plasticas by Means of a Brácol Impressor.

D 2240 – 91 Standard Test Method for Rubber Property Durometer Hardness.

- BENNETT Harry.

Commercial Waxes, Asymposium and Compilation.

New York Chemical.

1986.

Tercera edición.

- BERMUDEZ OLIVARES María Dolores, LAURA MATEU Félix, GINES MARTÍNEZ Nicolás y OJADOS ROCA José.

Prácticas de Ciencia de Materiales.

Universidad de Murcia

1992

- BOOTHROYD Geoffrey.

Fundamentos del Corte de Metales y de las Máquinas – Herramienta.

Traducción: Gonzalo Ferro, Adolfo León Gómez y Karoli Cserhati

México, D.F.

McGraw Hill Latinoamericana, S.A.

1978

- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial

Norma Oficial Mexicana.

NOM-T-131-1990 “Industria Hulera – Materias Primas – Estructura Molecular de Ceras del Petróleo – Método de Prueba”.

NOM-L-39-1980 “Ceras de Petróleo – Determinación de la Temperatura de Congelación”.

NOM-T-133-1990 “ Industria Hulera – Materias primas – Punto de Fusión de Ceras – Método de Prueba de Goteo y por Curva de Enfriamiento”.

- BENNETT Harry.

The Chemistry and Technology of Waxes.

New York Chemical.

1985.

Segunda edición.

- THORNTON A. Peter.

Ciencia de Materiales para Ingeniería.

Prentice-Hall Hispanoamericana.

- T.J. DROZDA and C. WICK

Tool and Manufacturing Engineer’s Handbook.

Society of Manufacturing Engineers

1983

Cuarta edición.