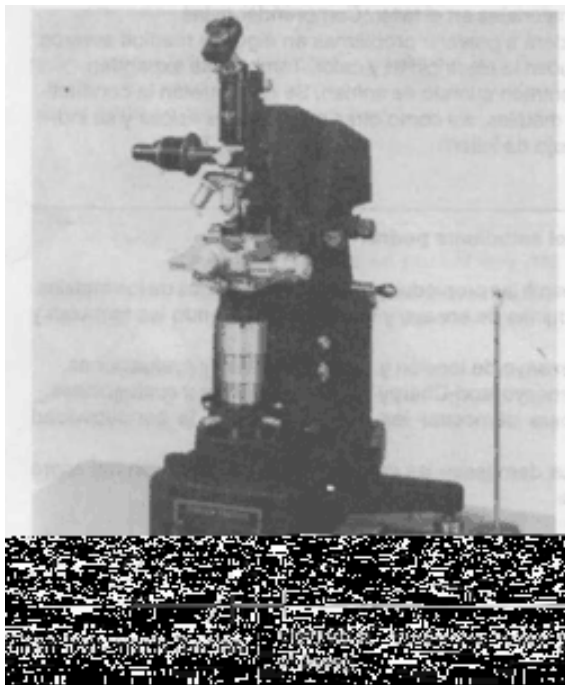
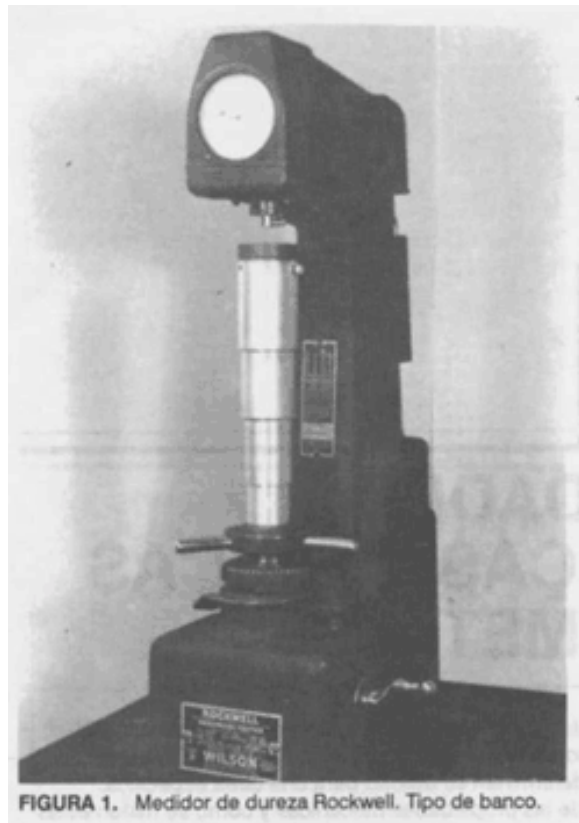


CAPITULO 5 PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LOS METALES

En este capítulo se comentan los conceptos de resistencia material elasticidad, fragilidad, plasticidad, termofluencia, *corrosión* y otros. Estas *propiedades mecánicas* de un material determinan su utilidad para una tarea específica. Comprender la naturaleza de las propiedades mecánicas y cómo se miden éstas ayudara a la selección de materiales en el taller. Comprender estas características también ayudará a prevenir problemas en algunos medios severos. Todos los metales conducen la electricidad y calor. También se expanden cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. Se compararán la conductividad y expansión de los metales, así como otras *propiedades físicas* y se indicaran sus efectos, en el trabajo de Taller.

OBJETIVOS Al terminar este capítulo, el estudiante podrá:

1. Definir y describir correctamente las propiedades mecánicas y físicas de los metales.
2. Describir las diferentes máquinas de ensayo y sus usos, incluyendo la fórmulas y cálculos necesarios-
3. Preparar muestras para el ensayo de tensión y rápidas pruebas y evaluaciones.
4. Preparar muestras para el ensayo Izod-Charpy y realizar pruebas y evaluaciones.
5. Realizar un experimento para demostrar las diferencias entre la conductividad térmica de los metales,
6. Realizar un experimento que demuestre las características de oxidación del acero dulce y del acero inoxidable.



Antes de proceder a la lectura de este capítulo. véase en el glosario las definiciones de las siguientes propiedades mecánicas' fragilidad, ductilidad, elasticidad, dureza, maleabilidad, plasticidad, resistencia mecánica, tenacidad, resistencia a la fatiga, corrosión por oxidación de los metales a alta temperatura y termofluencia. Cada propiedad mecánica puede probarse por medios mecánicos y luego evaluarle para determinar la utilidad del metal o el correcto tratamiento térmico para un uso determinado. Las propiedades físicas, tales como las conductividades eléctrica y térmica o la expansión térmica también pueden medirse por medios diferentes.

DUREZA

La dureza de los metales puede presentar grandes variaciones. Por ejemplo, el acero para herramientas endurecido mediante; tratamientos térmicos que se utiliza para herramientas de corte, puede ser ablandado mediante un tratamiento térmico llamado recocido, de tal manera que pueda ser formado en frío con facilidad. Muchos metales no ferrosos como cobre, aluminio, estaño y plomo son mucho más blandos que los metales ferrosos, sin embargo algunas aleaciones no ferrosas también pueden ser endurecidas mediante tratamientos térmicos (mas detalles en el capítulo 14, "tratamiento térmico de metales no ferrosos").

La mayoría de los metales se endurecen un poco debido al trabajo en frío (formado, doblado, laminado y estirado de alambres). Esta condición de endurecimiento por trabajo en ocasiones se llama revenido (no confundirlo con el revenido de aceros endurecidos). La propiedad de dureza se mide en los instrumentos Brinell y Rockwell como la resistencia a la penetración (figura 1).

Estos dos durómetros son los de uso mas generalizado en aplicaciones industriales.

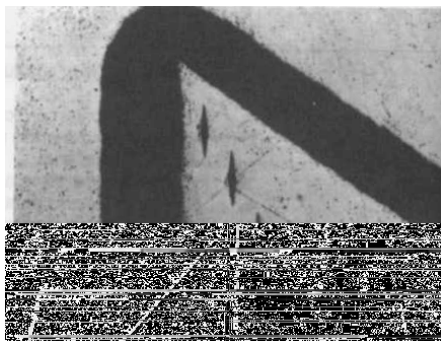
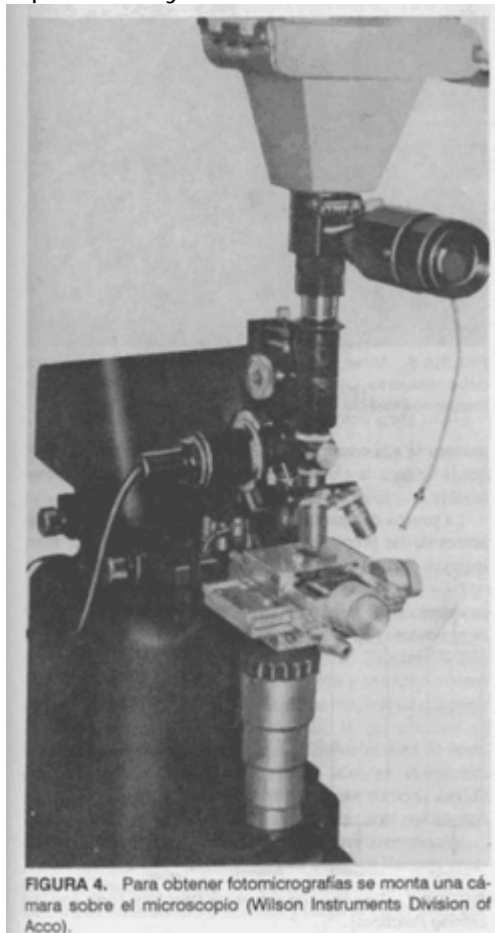


FIGURA 3. Indentaciones en los dientes de una hoja de sierra. Nótese que las indentaciones son más pequeñas en el borde trabajado en frío En el montaje, los dos grupos de dientes se interlazan para evitar que se redondeara el borde al pulir la muestra (Wilson Instruments División of Acco).

En el capítulo 6 se describe su operación y uso.



En operaciones de campo y en los casos *en* que el material que ha de ser probado es demasiado voluminoso para colocarlo en un probador de dureza portátiles *que miden de acuerdo* con la escala Rockwell o la Brinell.

En los laboratorios de metalurgia se utilizan también microdurometros que también miden la resistencia a la penetración. Un ejemplo es el instrumento Tukon (figura 2), el cual utiliza el indentador y la escala Knoop.(Véase el apéndice 1, tabla 4 "Tabla de conversión de dureza".) Algunas de sus ventajas son:

1. Inspección microscópica y medición de la indentación con el mismo instrumento.
2. mayor sensibilidad del durómetro. Se pueden probar secciones más pequeñas y mas delgadas puesto que se utiliza una carga mas ligera (100 μ g o menos) (figura 3)

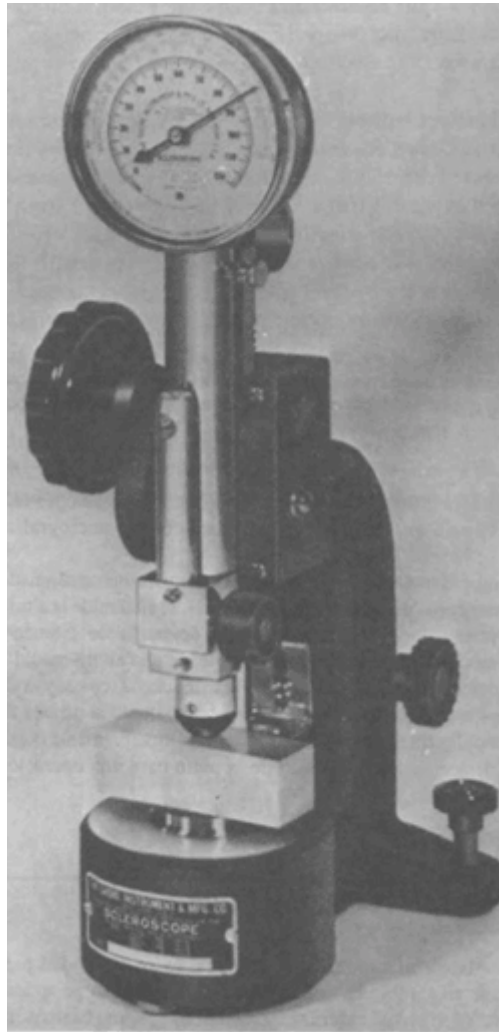


FIGURA 5a. Modelo D de un escleroscopio. Con este modelo pueden probarse partes pequeñas. Los escleroscopios son muy sencillos en su operación y no dañan las superficies terminadas (Shore U.S.A. marca #757760, Scleroscope U.S.A. marca #723850).

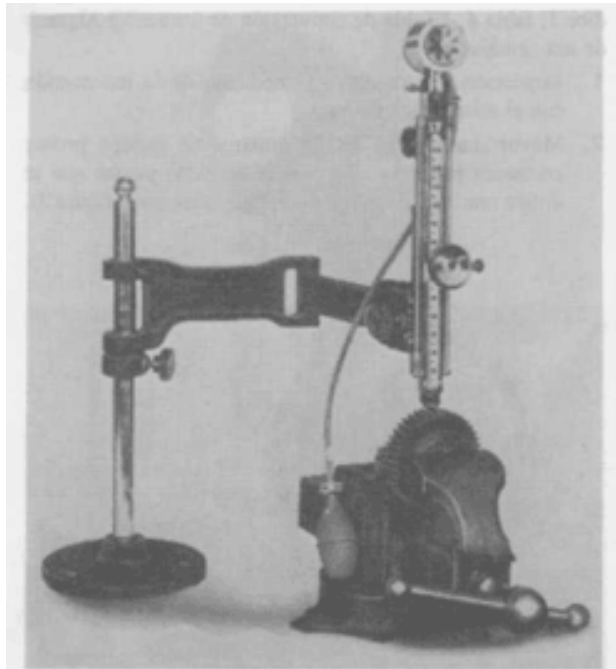


FIGURA 5b. Para realizar una prueba de dureza de un engrane se utiliza una prensa de mano junto con el escleroscopio modelo C-2 (Shore U.S.A. marca #757760, Scleroscope U.S.A. marca #723950).

3, Puede adaptarse directamente sobre el microscopio una cámara instantánea (figura 3) para obtener micrografías de la zona de prueba.

La dureza elástica se mide con un instrumento llamado escleroscopio de Shore (figuras 5^a y 5b), el cual mide la altura del rebote de un pequeño martillo de punta de diamante después de caer por su propio peso desde una altura medida, La dureza se relaciona con la resistencia al corte y a la abrasión cuando se mide en taller por medio de la prueba de la lima (figura 6). Esta prueba se utiliza principalmente como una de aceptación o rechazo de la parte para una operación de maquinado.

RESISTENCIA MECÁNICA

La resistencia mecánica de un metal es su capacidad para resistir un cambio en su forma o tamaño cuando se aplican sobre el fuerzas externas. Existen tres tipos básicos de esfuerzos: de tensión, de compresión y de corte (figura 7). Cuando se considera La resistencia mecánica, debe conocerse el Tipo de esfuerzo al cual estará sometido el material. El acero tiene iguales resistencias a la tensión y a la compresión, pero el hierro colado tiene baja resistencia a la tensión y alta resistencia a la compresión.

La resistencia al corte es menor que la resistencia a la tensión en casi todos los metales. Véase la tabla 1.



FIGURA 6. Antes de efectuar un corte con una máquina debe realizarse una prueba de la lima para determinar la maquinabilidad de una pieza (Lane Community College).

La prueba de tensión se utiliza para obtener información acerca de las propiedades mecánicas de un material. Éstas incluyen ductilidad, resistencia a la tensión, límite proporcional

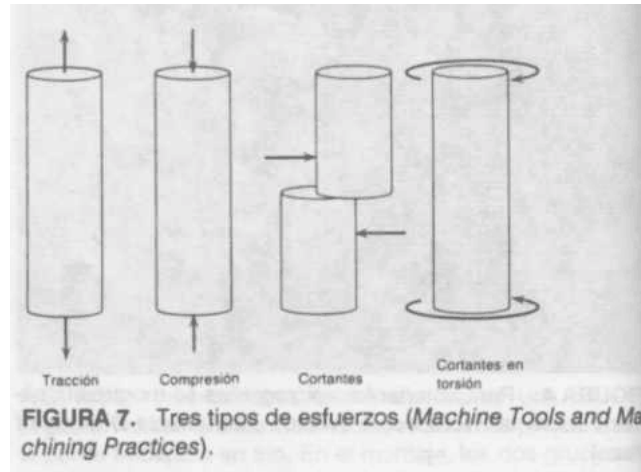


Tabla 1 Resistencia del material						
Material	Módulo de elasticidad (lb/pulg. ²)	Esfuerzo unitario permisible de trabajo				Fibra extrema en flexión
		A la tracción	En compresión	Cortante		
Hierro colado	15,000,000	3,000	15,000	3,000		
Hierro forjado	25,000,000	12,000	12,000	9,000	12,000	
Acero estructural	29,000,000	20,000	20,000	13,000	20,000	
Carburo de tungsteno	50,000,000					

Material	Límite elástico (lb/pulg. ²)		Resistencia a la tracción		
	En tracción	En compresión	En tracción	En compresión	Cortante
Hierro colado	6,000	20,000	20,000	80,000	20,000
Hierro forjado	25,000	25,000	50,000	50,000	40,000
Acero estructural	36,000	36,000	65,000	65,000	50,000
Carburo de tungsteno	80,000	120,000	100,000	400,000	70,000

límite elástico, módulo de elasticidad, resiliencia, punto cédente, resistencia a punto cédente, resistencia final y resistencia a la ruptura.

La resistencia a la tracción de un material en libras por pulgada cuadrada, puede determinarse si se divide la carga máxima (en libras) entre el área de la sección transversal original (en pulgadas cuadradas) antes del ensayo. Por tanto,

$$\text{Resistencia a la tracción (LPC)} = \frac{\text{carga máxima (libras)}}{\text{Área de la sección transversal original (pulg. cuad.)}}$$

En otras palabras, la resistencia de los materiales se expresa en términos de libras por pulgada cuadrada. Esto se llama esfuerzo unitario (figura 8). El esfuerzo unitario es igual a la carga dividida entre el área total.

$$\text{Esfuerzo unitario} = \frac{\text{carga}}{\text{área}}$$

Cuando se aplica un esfuerzo sobre un metal éste cambia su forma. Por ejemplo, un metal en esfuerzo de compresión se acortará y uno en esfuerzo de tracción se alargará. A este cambio de forma se le llama deformación y se expresa como pulgadas de deformación por pulgada de longitud de material. Conforme se incrementa el esfuerzo, la deformación se incrementa en proporción directa dentro de la zona de comportamiento elástico. Cuando se retira la carga, el material recupera su forma original.

Esto se conoce como la *Ley de Hooke*. Sin embargo, cuando se aplica una carga por encima del límite elástico, el metal se deforma permanentemente. Los metales son “jalados” en una máquina llamada ensayador de tracción (figura 9). En la máquina se coloca una muestra de dimensiones conocidas y luego se carga hasta que se rompe (figura 10). Algunas veces se utilizan instrumentos para obtener un registro continuo de la carga y de la cantidad de deformación (figura 11). Esta información se pone en una gráfica que se conoce como diagrama esfuerzo-deformación (figura 12),

Con esta información se elabora una gráfica llamada diagrama de esfuerzo-deformación (figura 12). Si no se utiliza un graficador de esfuerzo-deformación, la prueba de tensión puede realizarse marcando primero la muestra con un punzón(longitud de medición)- A continuación se mide el área de la sección transversal reducida con un micrómetro o calibrador que mida en milésimas de pulgada.

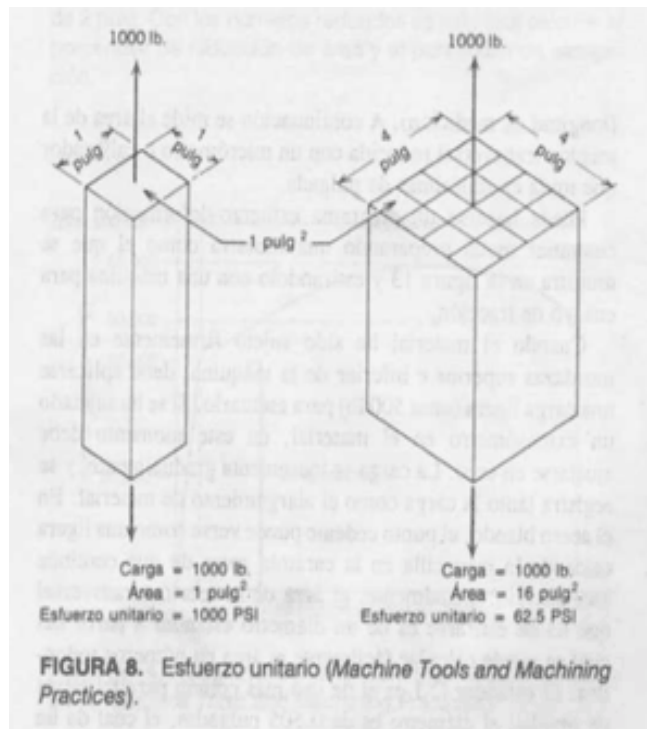


FIGURA 9a. Máquina universal para ensayos de tensión (Cortesía de W. C. Dillon & Company, Inc.).

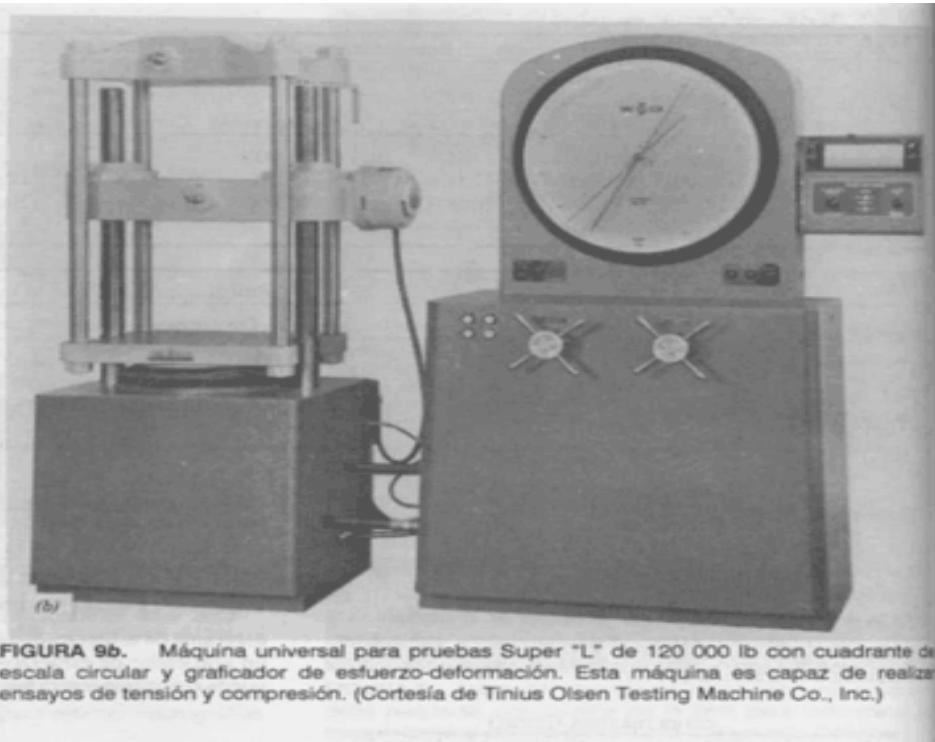
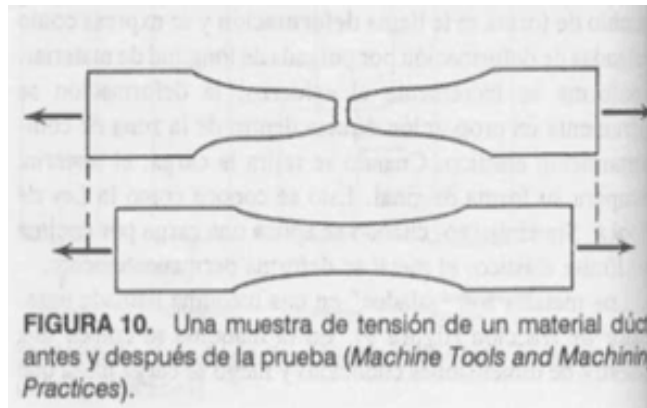


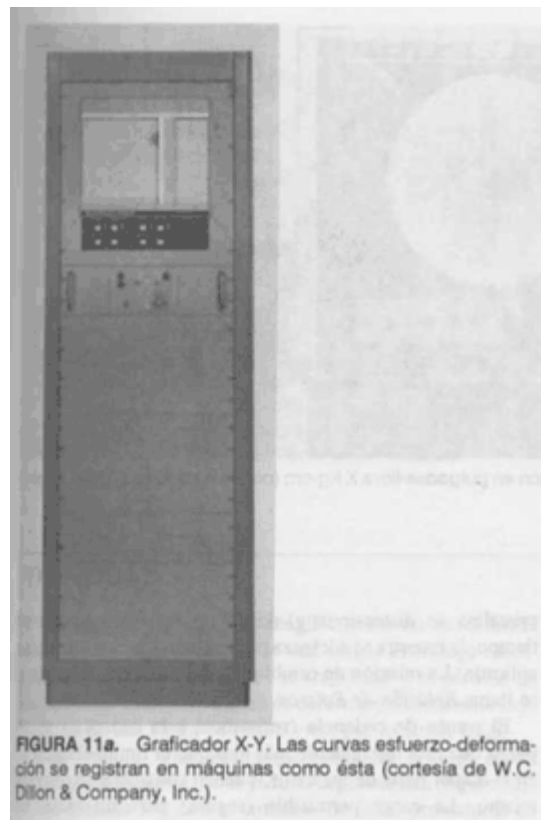
FIGURA 9b. Máquina universal para pruebas Super "L" de 120 000 lb con cuadrante de escala circular y graficador de esfuerzo-deformación. Esta máquina es capaz de realizar ensayos de tensión y compresión. (Cortesía de Tinius Olsen Testing Machine Co., Inc.)

Puede hacerse un diagrama esfuerzo-deformación para cualquier metal preparando una muestra como el que se muestra en la figura 13 y estirándolo con una máquina para ensayo de

tracción.

Cuando el material ha sido sujeto firmemente en las mordazas superior e inferior de la máquina, debe aplicarse una carga ligera (unas 500 lb) para asentarlos. Si se ha sujetado un extensómetro en el material, en este momento debe ajustarse en cero. La carga se incrementa gradualmente, y se registra la carga como el alargamiento de material. En el acero blando, el punto cédente puede verse como una ligera caída de la manecilla en la carátula antes de que continúe ascendiendo. Usualmente, el área de la sección transversal que ha de estirarse es de un diámetro estándar a partir del cual se puede calcular fácilmente el área en números redondos. El estándar C-I es el de uso más común para muestras de prueba; el diámetro es de 0.505 pulgadas, el cual da un área de 0.2 pulg². En este caso se utiliza una longitud calibrada específica de 2 pulgadas \pm 0.0005 de pulgada. Para este propósito se utiliza un punzón con dos puntas separadas una de otra 2 pulgadas. La muestra se coloca en la máquina de ensayo de tensión y se jala lentamente. Si se utilizan un medidor de deformaciones y un graficador X-Y, se obtienen en forma automática el diagrama. Los sistemas computarizados poco a poco han ido reemplazando a los graficadores X-Y. Si no se dispone de graficador, puede detenerse a





Intervalos la máquina para anotar la carga, o esfuerzo, y medir la deformación o la distancia entre las marcas del punzón. Con algún equipo, pueden tomarse las lecturas sin necesidad de detener la máquina. Luego, estos incrementos esfuerzo-deformación pueden registrarse en una gráfica para producir



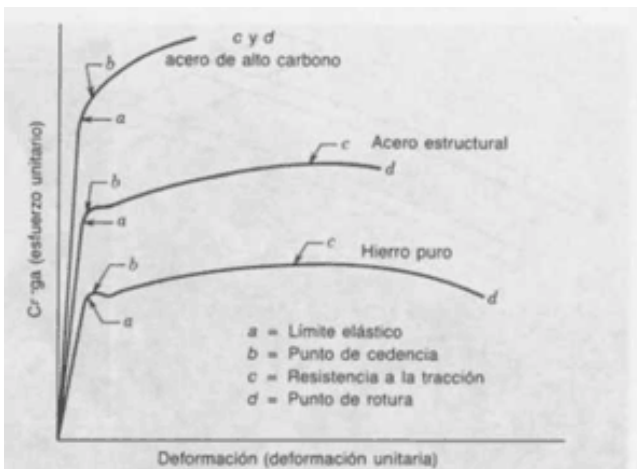


FIGURA 12. Diagrama esfuerzo-deformación. En este diagrama se muestran varias curvas esfuerzo-deformación (*Machine Tools and Machining Practices*).

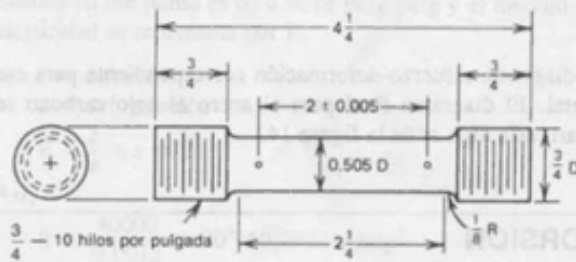


FIGURA 13. Esta muestra estándar de prueba tiene una sección transversal de 0.200 pulg^2 y una longitud calibrada de 2 pulg. Con los números redondos es más fácil calcular el porcentaje de reducción de área y el porcentaje de elongación.

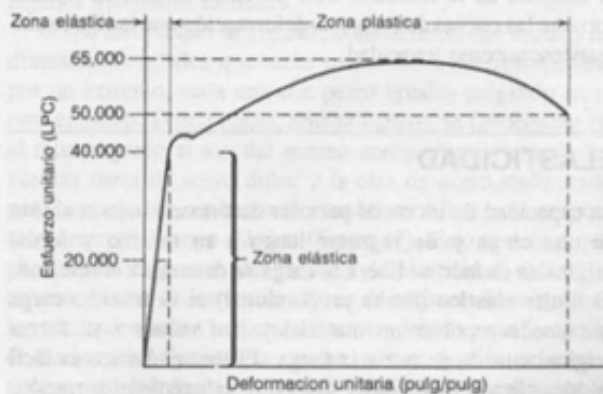


FIGURA 14. Diagrama esfuerzo-deformación para un acero dúctil (*Machine Tools and Machining Practices*).



FIGURA 15. Torsiómetro. Esta máquina mide el momento de torsión en pulgadas-libra X Kg-cm (cortesía de *Tinius Olsen Testing Machine Co., Inc.*)

el

diagrama esfuerzo-deformación correspondiente para ese metal. El diagrama final para el acero al bajo carbono se parecería algo al de la figura 14.

TORSIÓN

La prueba de torsión es útil para probar piezas que se someten a cargas de torsión tales como flechas, ejes y herramientas giratorias. Un torsiómetro (figura 15) dispone de una cabeza de torsión que sujeta a la muestra y aplica un movimiento de torsión. El otro extremo de la muestra es sujetado por una cabeza de medición, y un dispositivo de medición mide el desplazamiento angular de puntos en extremos opuestos de la longitud de la muestra. Con los datos de torsión pueden trazarse las curvas de esfuerzo-deformación que indican tanto resistencia como tenacidad.

ELASTICIDAD

La capacidad de un metal para ser deformado bajo la acción de una carga y de regresar luego a su tamaño y forma originales cuando se libera la carga se denomina elasticidad. El límite elástico (límite proporcional) es la máxima carga que puede soportar un material y aun volver a su forma original cuando se retira la carga. El límite elástico es fácil de identificar en cualquier diagrama esfuerzo-deformación. Es el punto en donde termina la línea recta de la gráfica esfuerzo-deformación (figura 14). Cuando un metal se somete a una tensión dentro de su intervalo elástico, la estructura cristalina se distorsiona y alarga ligeramente. Al mismo tiempo, la muestra se adelgaza perpendicularmente a la fuerza aplicada. La relación de cambio lateral a cambio de longitud se llama *Relación de Poisson*.

El punto de cedencia (resistencia a la cedencia) es un punto que está ligeramente más alto que

el límite elástico y en la mayor parte de los casos, pueden considerarse como el mismo. La carga permisible (segura) para un metal en servicio debe estar muy por debajo del límite elástico o esfuerzo de cedencia. Las cartas de propiedades mecánicas que se incluyen en los manuales de los metales contienen datos tales como el punto de cedencia, la resistencia a la tracción y la dureza.

PLASTICIDAD

Una sustancia que sea perfectamente plástica, tal como la arcilla de modelaje, no volverá a tomar sus dimensiones originales cuando se retira la carga, no importan qué tan pequeña sea ésta. Los metales sufren flujo plástico cuando se someten a esfuerzos superiores a sus límites elásticos. Por esta razón, la zona de la curva esfuerzo-deformación situada después del límite elástico en la figura 12 se denomina rango plástico. Esta propiedad es la que hace tan útiles a los metales. Cuando se aplica suficiente fuerza en el laminado, el prensado o el forjado, los metales pueden conformarse ya sea en estado caliente o en estado frío a formas útiles. Muchos metales tienden a endurecerse por trabajo cuando se conforman en frío. lo cual, en la mayoría de los casos, incrementa su utilidad. Cuando se alcanza cierto límite, tienen que recocerse para que puedan recibir más trabajo en frío.

FRAGILIDAD

Se dice que un material es frágil cuando no se deforma plásticamente bajo la acción de una carga. El trabajo mecánico en frío excesivo provoca la fragilidad y la pérdida de ductilidad. El hierro colado no se deforma plásticamente bajo la acción de una carga de rotura y es, por lo tanto, frágil.

Una "entalla" muy aguda que concentre la carga en un (área pequeña también puede reducir la plasticidad (figura 16). Las entallas son causas comunes de fallas prematuras en partes. Algunos ejemplos de entallas indeseables (concentradores de esfuerzos) son las socavaciones de soldadura, los hombros abruptos sobre flechas maquinadas y los ángulos agudos sobre forjados y colados.

RIGIDEZ (MÓDULO DE ELASTICIDAD)

La rigidez se expresa por medio del modulo de elasticidad, conocida también como el módulo de Young, Dentro del rango elástico, si el esfuerzo se divide entre la deformación correspondiente a cualquier punto dado. el resultado será el modulo de elasticidad del material. Por lo tanto, el módulo de elasticidad se representa por la pendiente de la curva esfuerzo-deformación por abajo del limite elástico.

$$\text{modulo de elasticidad en psi } \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2} = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación}}$$

deformación

Ejemplo

En la figura 14. el esfuerzo en el límite elástico (o proporcional de 40000 lb/pulg². Supóngase que la deformación

medida en ese punto es de 0,0013 pulg/pulg y el módulo de elasticidad se representa por E.

$$s = \text{esfuerzo}$$

$$e = \text{deformación}$$

$$E = s/e \quad \text{o} \quad s = Ee$$

Así,

$$E = 40000/0.0013 = 30\,769,230 \text{ lb/pulg}^2$$

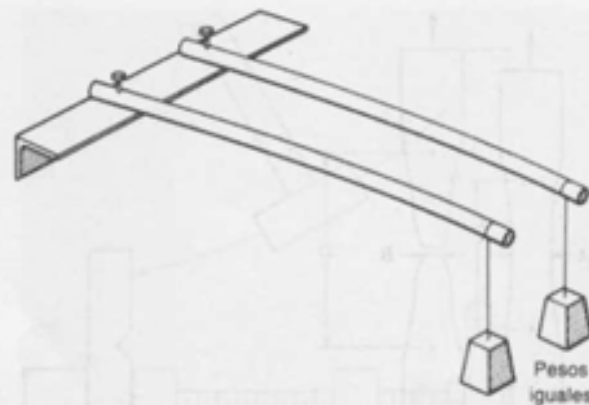
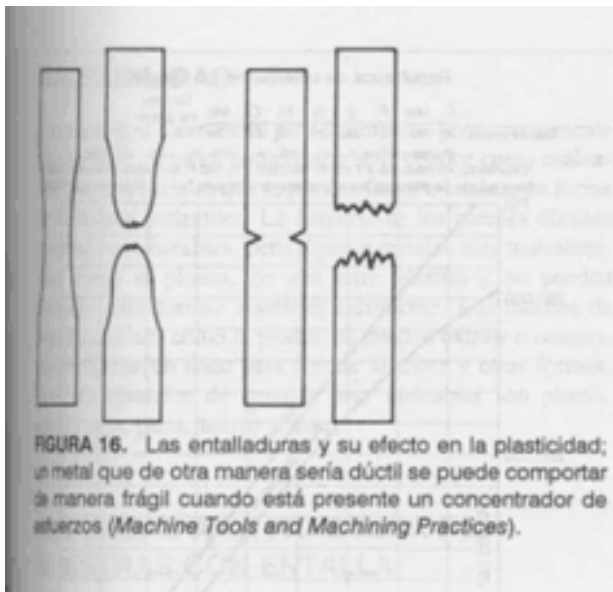
Y si la deformación se mide en el punto de 20.000 lb/pulg² de esfuerzo, será la mitad de la del ejemplo anterior debido a que el rango elástico es proporcional. Por tanto.

$$E = 20.000/0.00065 = 30\,769.230$$

En la tabla 1 se indican los módulos de elasticidad para algunos materiales comunes.

Como un ejemplo de rigidez, considérense dos varillas de dimensiones iguales que están suspendidas horizontalmente por un extremo, cada una con pesos iguales colgando en el otro extremo. Desde luego, ambas varillas se flexionaran en el mismo grado si son del mismo acero.

Aun si una de las varillas fuera de acero dulce y la otra de acero endurecido para herramienta, ambas se flexionarían en la misma proporción dentro del rango elástico (figura 17). Esto se debe a que para todos los aceros el módulo de elasticidad es casi el mismo. Si una de las varillas fuera de carburo de tungsteno, los resultados serían bastante diferentes debido a que la varilla de carburo se flexionaría mucho menos que la de acero, porque su módulo de elasticidad es considerablemente más alto que el del acero. La deflexión, de la manera en que se relaciona con el módulo de elasticidad, también es válida para la torsión como se mide en un torsiómetro. Dentro del intervalo elástico también pueden probarse la tensión y la compresión,



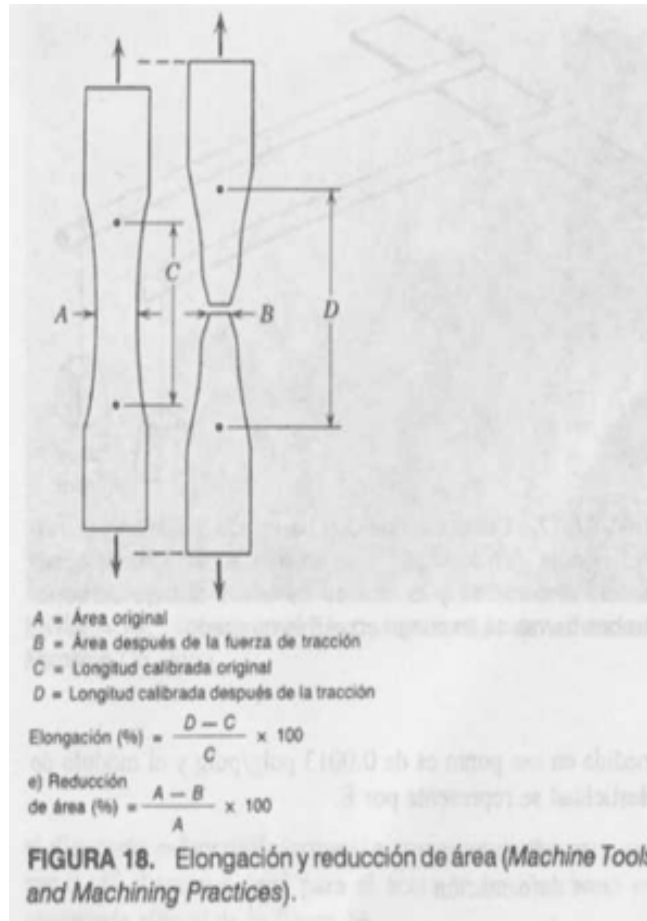
DUCTILIDAD

La propiedad que le permite a un metal deformarse permanentemente cuando se le carga en tracción, se conoce como ductilidad. Cualquier metal que pueda estirarse para formar alambre es dúctil. El acero, el aluminio, el oro, la plata y el níquel son ejemplos de metales dúctiles.

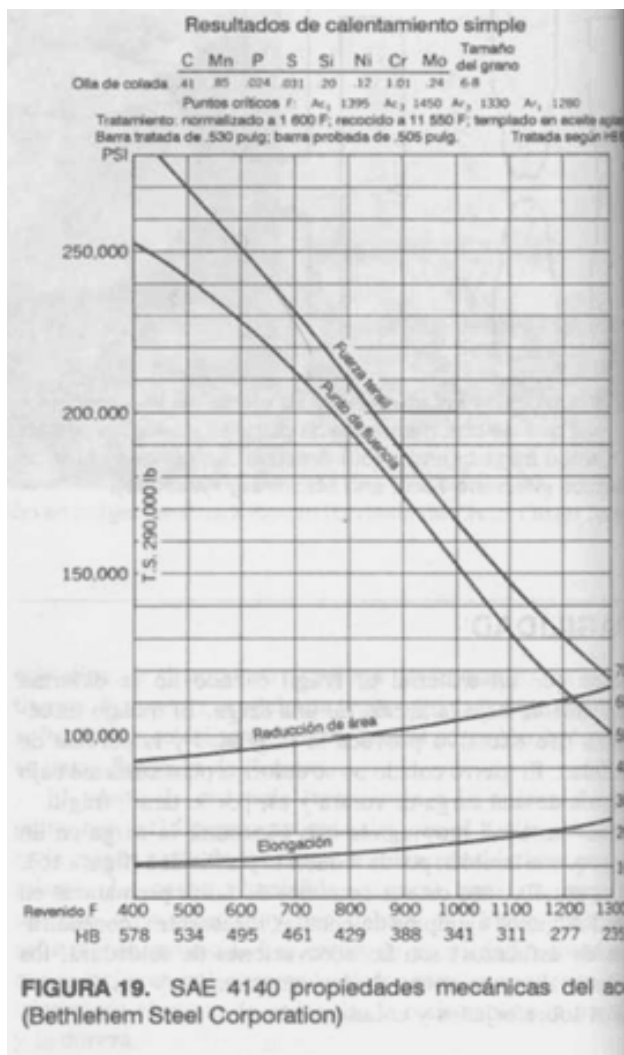
La ductilidad se determina mediante la prueba de tracción. En esta prueba se miden el área de la sección transversal y la longitud calibrada entre dos marcas de las muestras de prueba antes y después de estirarlos. El porcentaje de elongación (incremento en longitud) y el porcentaje de reducción de área (disminución del área de la sección transversal en el punto más angosto) son medidas de la ductilidad. La cantidad de elongación antes de que la muestra se rompa es un indicador de la cantidad de deformación plástica (trabajo en frío) que puede ocurrir en dicha muestra de metal. Estos datos son útiles para las operaciones de formado en frío durante la manufactura,

El porcentaje de reducción de área se refiere al estrechamiento de la muestra y a la

diferencia entre el área original y el área del punto roas pequeño después de que se rompe la probeta. Esta es una medida de la plasticidad fragilidad ambas de la probeta. Un pequeño porcentaje de reducción (más o menos un 30%) mostraría muy poca deformación los extremos rotos y mostraría en su mayor parte una *fractura* frágil, en tanto que un 80% de reducción indicaría mucho estrechamiento y muy poca *fractura* frágil. El método que utiliza para calcular estos valores se muestra en la figura 18.



Los fabricantes facilitan gráficas de propiedades *mecánicas* (figura 19) para aceros específicos. Éstas se basan prueba de tensión y contienen la resistencia a la tensión, el punto cedente, la reducción de área y la elongación con en varias durezas obtenidas con diferentes temperaturas de templado. Según se observa en la figura 19, estas propiedades a menudo se relacionan con la dureza de la muestra. Un metal muy duro en general es frágil y poco dúctil blando en general es plástico, con muy poca tendencia a volverse frágil en condiciones normales.



MALEABILIDAD

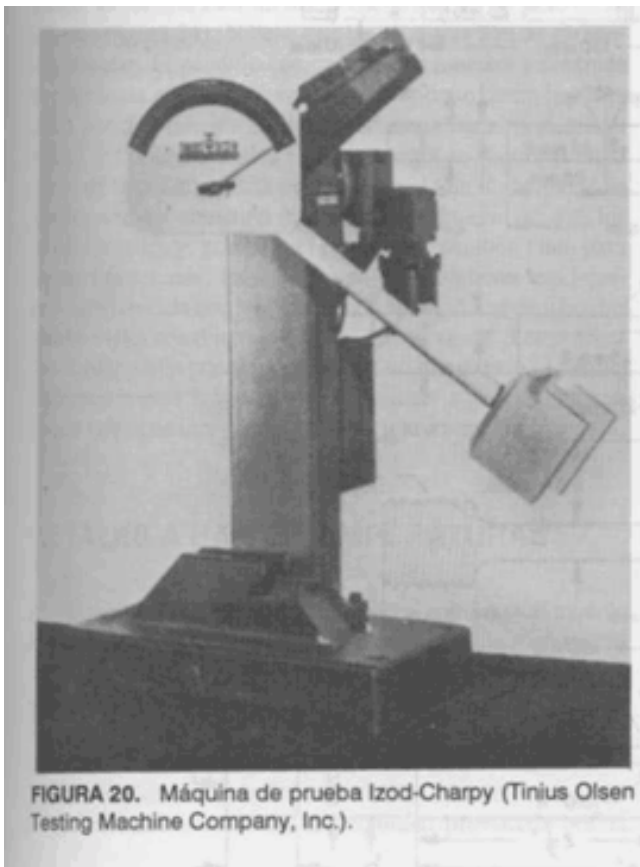
A la capacidad de un metal para deformarse permanentemente cuando se le carga en compresión se le conoce como maleabilidad.

Los metales que se pueden forjar o laminar en forma de hojas son maleables.

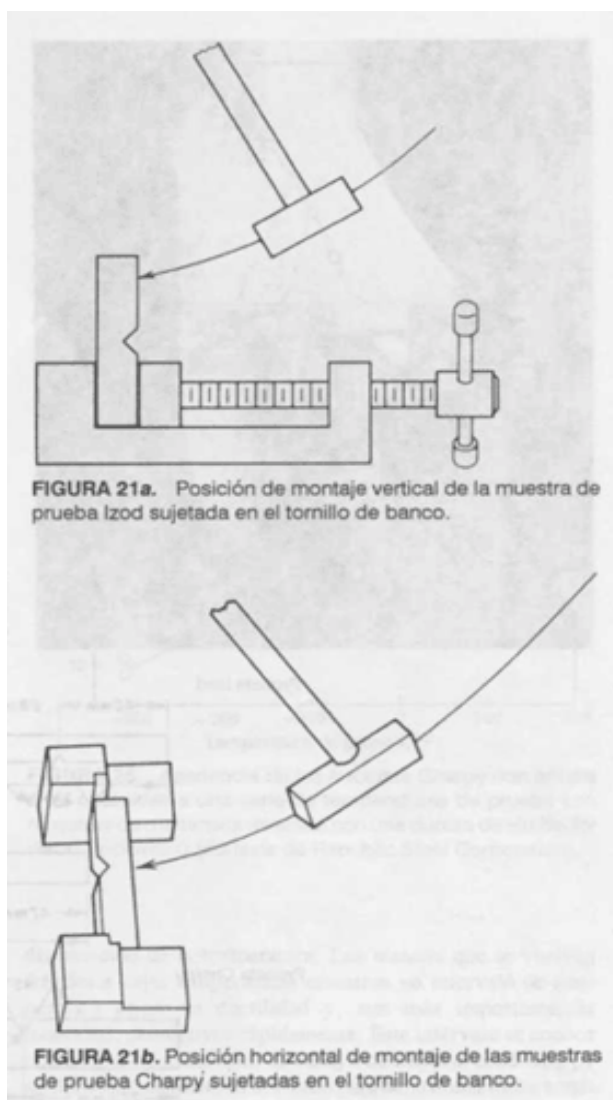
La mayoría de los metales dúctiles también son maleables, pero algunos metales muy maleables como el plomo, no son muy dúctiles y no pueden estirarse para formar alambres fácilmente. Los metales de baja ductilidad como el plomo, se pueden extruir o comprimir mediante un dado para formar alambre y otras formas. Algunos ejemplos de metales muy maleables son plomo, estaño, oro, plata, hierro y cobre.

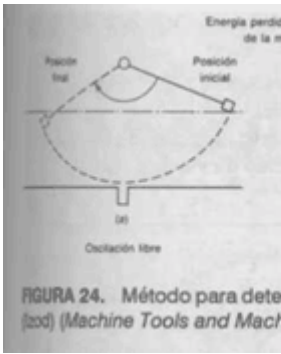
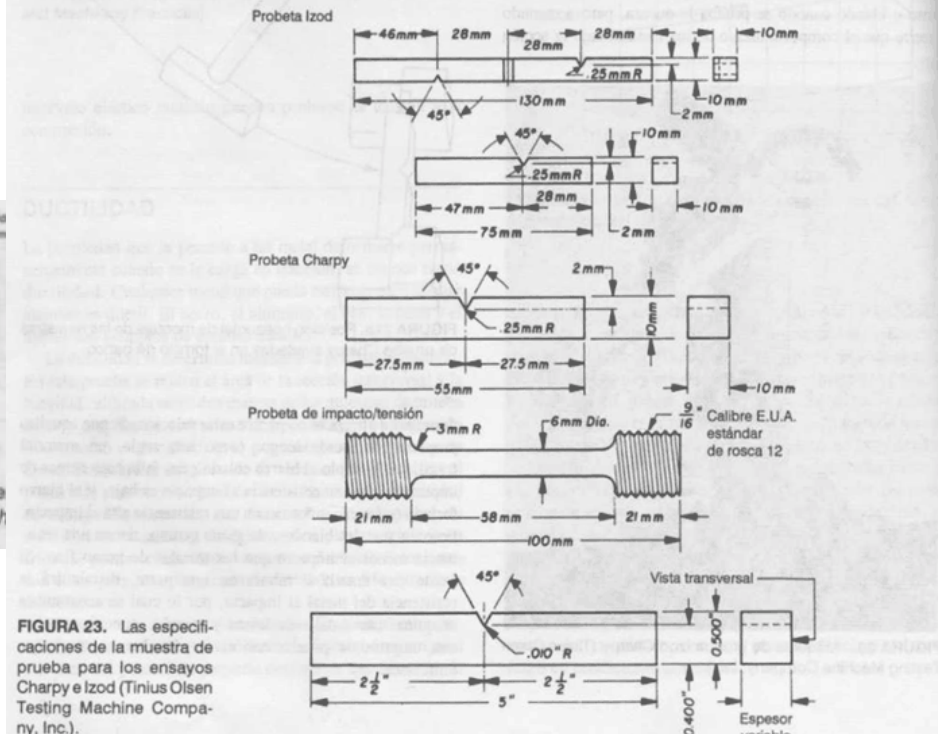
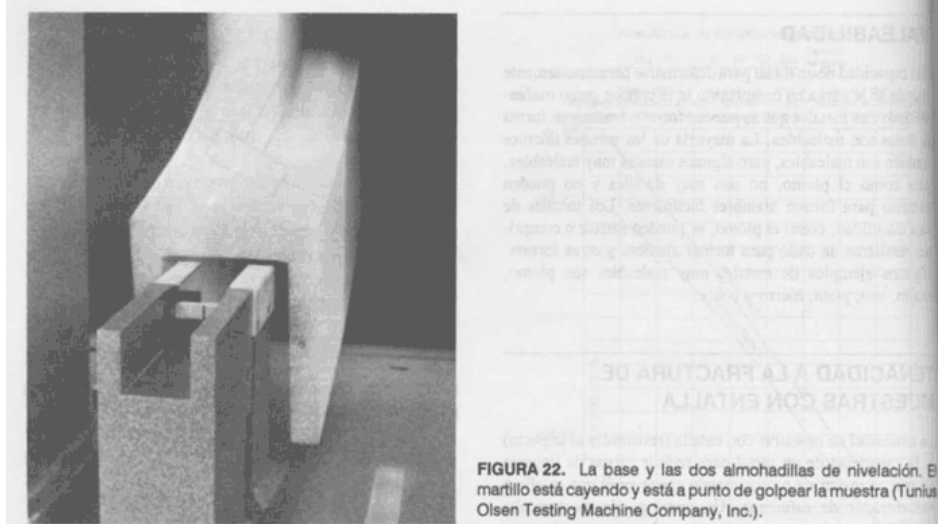
TENACIDAD A LA FRACTURA DE MUESTRAS CON ENTALLA

La tenacidad de muestras con entalla (resistencia al impacto) es la capacidad de un metal para resistir cargas de impacto sin que se produzca rotura cuando existe en él una entalla o concentrador de esfuerzos. Un metal puede mostrar alta ductilidad o resistencia cuando se prueba a la tracción o ser duro o blando cuando se prueba la dureza, pero a menudo ocurre; que el comportamiento de los metales bajo la acción de cargas de impacto no parece estar relacionado con aquellas propiedades.



Desde luego, como una regla, un material frágil, por ejemplo el hierro colado gris, falla bajo cargas de impacto: o sea, su resistencia al impacto es baja, y el hierro forjado o el acero dulce tienen una resistencia alta al impacto. Pero los metales blandos, de grano grueso, tienen una resistencia menor al impacto que los metales de grano fino. Si existe una entalla o ranura en una parte, disminuirá la resistencia del metal al impacto, por lo cual se acostumbra maquinar una entalla de forma y tamaño específicos sobre una muestra de prueba con el fin de obtener resultados uniformes.





El aparato que se utiliza para medir la tenacidad a la fractura se llama maquina de ensayo Izod-Charpy (figura 20). Las diferencias principales entre los métodos de prueba Izod y Charpy consisten en el modo de soporte de la muestra y en la característica de este último (figuras 21a y 21b). pero los resultados son prácticamente los mismos. La base (figura 20) tiene almohadillas de nivelación para ajustar la máquina. El martillo incide montándose sobre el soporte tipo yunque y el punto de golpeo *está* en el martillo. Para ambas pruebas se utilizan muestras estándar (figura 23). La máquina de prueba consiste de un tomillo en el cual se sujeta la muestra. Luego, se permite caer un brazo oscilante con un peso en su extremo (figura 24), Nótese que las muestras son de geometría estándar. El péndulo cae, golpea a la muestra y continúa su viaje hacia adelante. Pero no se eleva Unto como la altura de su posición inicial. La diferencia entre las alturas inicial y final del péndulo indica cuánta energía se absorbió en la rotura de la muestra. Esta energía se mide en libras-pie. Los metales tenaces absorben más Libras-pie de energía que los metales frágiles y por ello, el péndulo DO oscilará tanto para los metales tenaces. Esta prueba sólo puede tener una interpretación limitada con respecto a la fragilidad debido a ciertas variables tales como metales a bajas temperaturas. Las pruebas Izod-Charpy sólo pueden indicar que un metal dado es parcial o completamente frágil cuando se somete a prueba con una entalla que tiene una geometría dada a una temperatura dada.

