



# UNIDAD I

## NORMATIVIDAD PARA PRUEBAS DE MATERIALES

### 1.1.- CONCEPTOS FUNDAMENTALES

La industria moderna ha cimentado su desarrollo en un conjunto de reglas que determinan las características que deben cubrir los materiales, los productos, la maquinaria o los procedimientos.

Dichas reglas implementadas adecuadamente, constituyen los estándares o normas industriales, cuya aplicación ha sido factor determinante del desarrollo científico y tecnológico, solo alcanzado por algunos países de nuestro planeta.

Las normas establecen con precisión el reconocimiento de calidad, estimulando la confianza del consumidor, dan prestigio al fabricante, fomentan la organización de estructuras sólidas para el incremento de una producción masiva, simplificando los procesos y aumentando la eficiencia del trabajo, reducen los costos y aumentan los beneficios.

En general se dice que una norma (una regla) es la que determina dimensiones, composición y demás características que debe poseer un material producto u objeto industrial; establecido de común acuerdo con la autoridad gubernamental competente y los principales usuarios. La cual se usará como base comparativa durante un tiempo determinado.

### 1.2.- NORMAS: A.I.S.I., A.S.M.E., A.S.T.M., A.W.S., D.I.N., S.A.E., A.S.N.T., D.G.N.

En los Estados Unidos de América se establecieron las bases para el desarrollo industrial por medio de asociaciones o sociedades, las cuales son agrupaciones científicas y técnicas de profesionales. Científicos expertos que a través de comités o grupos de trabajo desarrollan las normas, teniendo por objetivo suministrar los conocimientos, experiencias y habilidades de sus miembros relativas a los materiales, productos, componentes, sistemas, servicios y múltiples actividades, de tal manera que resulten efectivamente útiles a la industria, gobierno, instituciones educativas, profesionales y público en general, a través de acciones cooperativas y especializadas.

A continuación mencionaremos algunas:



A.I.S.I.- (American Iron and Steel Institute) Instituto Americano del Hierro y el Acero.

A.S.M.E. - (American Society of Mechanical Engineers) Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.

A.S.T.M.- (American Society of testing Materials ) Sociedad Americana para prueba de Materiales.

A.W.S.- (American Welding Society) Sociedad Americana de soldadura.

S.A.E.- (Society American of Engineers) Sociedad Americana de Ingenieros.

N.E.M.A.- (Nacional Electrical Manufacturers) Asociación Nacional de Fabricantes de Aparatos Eléctricos.

A.N.S.I.- (American National Standards Institute ) Instituto Nacional Americano de Estándares.

### 1.2.1.- DEPENDENCIAS NACIONALES E INTERNACIONALES

Debido a la necesidad de producir materiales, equipos de la mejor calidad que sean competitivos mundialmente. Cada país cuenta con un departamento Gubernamental de Normalización como ejemplos tenemos:

D.G.N.- Dirección General de Normas	MEXICO
A.N.S.I.- Instituto Nacional Americano de Estándares	EE.UU.
D.I.N.- Normas Industriales de Alemania	ALEMANIA
A.B.N.T.-Asociación Brasileña de Normas Técnicas	BRASIL
N.C.- Dirección de Normas y Metrología	CUBA
B.S.- Instituto Británico de Estándares	INGLATERRA
E.N.- Comité Europeo de Normalización	EUROPA

A nivel mundial tenemos varias Organizaciones y/o Comisiones, como:

I.S.O.-	Organización Internacional de Estandarización
IEC.-	Comisión Electrotécnica Internacional
CEE.-	Comunidad Económica Europea
COPANT.-	Comisión Panamericana de Normas Técnicas
CODEX.-	Comisión de Codex Alimenticios

México por medio de la D.G.N., es miembro de la ISO., de la COPANT y de la CODEX

### 1.2.2.- N. O. M. (Norma Oficial Mexicana).

La DGN de la secretaría de Industria y Comercio de México, emite las normas y recomendaciones para los fabricantes y usuarios; además cualquier fabricante de algún producto puede conseguir un número NOM, con el cual se indica que el material o producto cubre una serie de normas. El ostentar el número NOM incrementa la confiabilidad del usuario al adquirir dicho producto.

En Ingeniería especialmente en Mecánica se pueden utilizar las normas NMX (Norma Mexicana). Todas las normas contienen las siglas iniciales seguida de un guión con una letra mayúscula, seguida de un guión y un número progresivo continuo, con un guión y el año en que se emite, y/o actualiza.

1. NORMA INDUSTRIAL.
2. NORMA DE PROCESO.
3. NORMA DE MATERIAL.
4. NORMA DE CALIDAD.
5. NORMA DE SEGURIDAD.
6. NORMA DE DIBUJO, ETC.

### 1.2.3.- A.S.T.M. (Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales).

De gran interés e importancia para quienes efectúan ensayos o inspección de materiales; la ASTM desempeña doble función.

- a) Normalización de las especificaciones y los métodos de prueba o ensaye de los materiales, los cuales se realizan por comités permanentes.
- b) Mejoramiento de los materiales de Ingeniería, la cual se logra a través de investigaciones de comités y miembros individuales, los resultados obtenidos se hacen públicos en la revista de la asociación.

### 1.2.4.- I. S. O. (Organización Internacional de Estándares).

La DGN pertenece a esta organización y toda la documentación que emite ISO puede ser adaptada por el país. En México la DGN adaptó las normas ISO 9000 y les puso el distintivo NMX -CC - número progresivo - año de emisión y las siglas IMNC.



## UNIDAD II

# ENSAYOS DESTRUCTIVOS

### 2.- ENSAYOS DESTRUCTIVOS

#### OBJETIVO.

Son aquellos que sirven para determinar las propiedades y características de un material sometidos en algunos casos hasta su última resistencia.

Estos ensayos se dividen en dos grupos:

- a) Estáticos.
- b) Dinámicos.

#### ENSAYOS ESTATICOS.

Estos son:

- ♣ Dureza.
- ♣ Tensión.
- ♣ Compresión
- ♣ Flexión.
- ♣ Torsión.

#### ENSAYOS DINAMICOS.

Los ensayos dinámicos se caracterizan por tener un movimiento para desarrollar la prueba o ensayo, los cuales son:

- ♣ Dureza.
- ♣ Impacto
- ♣ Fatiga.

### 2.1.- DUREZA.

#### PRINCIPIOS.

Cualidad de la materia que tiene que ver con la solidez y firmeza del material

## DEFINICIÓN.

Es la propiedad que tienen los materiales de resistirse a ser rayados o penetrados.

Esta propiedad no constituye una característica específica de los materiales sino que esta íntimamente ligada con las propiedades elásticas y plásticas.

## OBJETIVO.

Ensayo para determinar una característica del material por medio de una muestra.

### 2.1.1.- EQUIPOS Y MATERIALES DE PRUEBA.

#### DUROMETROS.

Existe gran variedad en lo que respecta a durómetros porque los hay para probar polímeros, cerámicos, metales y materiales compuestos.

El Durómetro tipo A-2 se usa para probar hule y plásticos suaves.

El tipo D para probar hules y plásticos duros.

Estos durómetros difieren principalmente por el punto de penetración, la magnitud de la carga aplicada al penetrador por medio de un resorte calibrado.

El durómetro tipo D tiene el penetrador más agudo y más fuertemente cargado, el resorte que acciona la penetración de la punta.

La dureza obtenida con estos durómetros es una medida de la profundidad de penetración; La cual varia desde 100 para una penetración 0 dependiendo de la profundidad de penetración la dureza se indicará automáticamente en la escala de la carátula; La máxima penetración es de 100 milésimas.

Existen durómetros para Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop y Shore.

El ensayo de dureza se puede aplicar en la maquina universal de 5 toneladas, así mismo se pueden efectuar el de tensión, compresión, corte y embutido, instalando los dispositivos adecuados para cada ensayo.

## DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN.

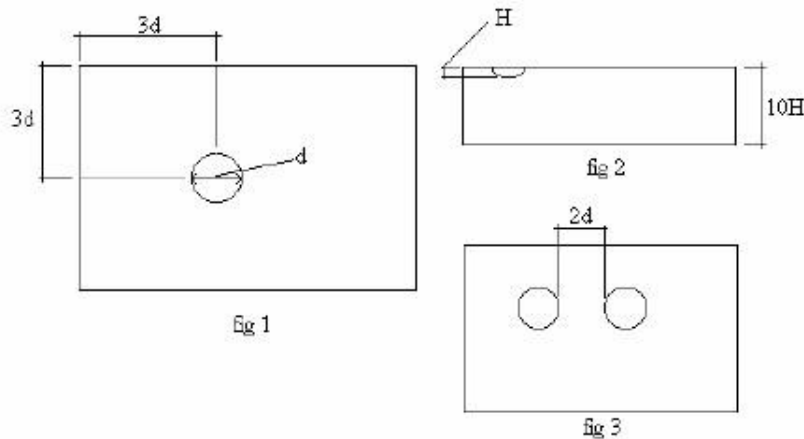
Para el ensayo de Brinell se usa el microscopio portátil de 20x, con una legibilidad de 0.01mm., para medir el diámetro de la huella que deja el penetrador sobre la superficie de la probeta.

## MATERIALES DE PRUEBA.

El ensayo se puede aplicar a materiales ferrosos, no ferrosos, aleaciones por ejemplo:

* Hierro maleable.	* Zinc.
* Aceros.	* Bronce fosforado.
* Aluminio.	* Cobre al berilio.
* Cobre.	* Plomo, etc.

El espesor de la probeta debe cumplir lo especificado en la norma que es: en la superficie opuesta al ensayo no deben aparecer huellas u otras marcas, por lo tanto el espesor debe ser cuando menos 10 veces la profundidad de la huella. La distancia del centro de la huella a la orilla de la probeta debe ser cuando menos 3 veces el diámetro de la misma. Las caras de la probeta deben ser paralelas. Una de las caras de la probeta debe estar pulida con un material de tipo fino, con el fin de evitar malos ensayos por impurezas.



- la prueba debe ser realizada a un mínimo de tres veces el diámetro de la huella de separación de cada lado de la probeta (figura 1).
- la probeta deberá tener un ancho mínimo de 10 veces la profundidad de la huella (figura 2).
- La separación entre las huellas de diferentes ensayos deberá ser de un mínimo de dos veces el diámetro de la huella (figura 3).

La probeta que usaremos son de las dimensiones siguientes 50 x 50 x 10 mm.

### 2.1.2.- PROCEDIMIENTOS Y METODOS DE PRUEBA.

El ensayo de dureza comúnmente se aplica a metales y a cualquier otro tipo de material por lo tanto se clasifican en tres grupos:

- Burdo
- Rebote.
- Penetración.



a).- Burdo. Este método se subdivide en rayado, esmerilado, corte, limado y acústico.

El ensayo de dureza tipo RAYADO.

Es para determinar la resistencia que opone un material usando diferentes minerales o polvos; este método también se conoce como rasguño de la escala de MOHS establecido en 1882. La escala mineralógica esta formada por 10 materiales que van del más suave al más duro, los minerales ocupados fueron numerados en la forma siguiente:

1. Talco laminar.
2. Yeso cristalizado.
3. Calcio.
4. Fluorita (Espato flúor).
5. Apatita.
6. Feldespato.
7. Cuarzo.
8. Topacio.
9. Corindón (Zafiro).
10. Diamante.

#### MÉTODO DE ESMERILADO (Ensayo de chispa)

La prueba de la chispa producida por una muela, usando materiales ferrosos (aceros y fundiciones) el cual consiste en tomar una muestra del material que se requiere conocer su dureza, pasándolo sobre la piedra de esmeril o contra la piedra de esmeril, la chispa puede ser de diferente coloración, intensidad y forma; en función de la dureza será la cantidad del material arrancado.

En este proceso impera la experiencia de la persona que lo efectúa, en algunos casos se tienen contratipos de materiales ya analizados que sirven de referencia.

#### MÉTODO DE CORTE

Si sometemos un material a un esfuerzo de corte, este opondrá una resistencia que dependerá de la dureza de dicho material. Entre más duro mayor resistencia opondrá (no olvide que el espesor del material también influye).

#### MÉTODO ACUSTICO

Por medio del sonido se puede comprobar la dureza de un material. Entre más elevado o más agudo es el sonido del material al golpearlo con otro, será mayor la dureza de dicho material.

b).- Ensayo de dureza dinámico.

Los primeros ensayos de dureza dinámica fueron los de RODMAN, el experimento con un penetrador piramidal en 1881. Investigaciones posteriores se llevaron a cabo utilizando un pequeño martillo con extremo esférico comprobando los ensayos de RODMAN. El escleroscopio de SHORE probablemente el dispositivo más utilizado de tipo dinámico, en el cual el rebote del balón determina la dureza del material.

c).- Dureza de penetración. (Ensayos estáticos de dureza por indentación).

Es el más empleado en la industria actualmente y se basa en la medición de una huella que produce un penetrador al incidir sobre la superficie de un material bajo una carga determinada. Estos ensayos son Brinell, Rockwell, Vickers y KNOOP.

### 2.1.3.- MACRODUREZA.

Los ensayos considerados son Brinell y Rockwell debido al tamaño de la huella que se produce al incidir el material con el penetrador.

#### 2.1.3.1.- BRINELL

Este método fue creado por el ingeniero Juan Augusto Brinell en 1900.

Consiste fundamentalmente en oprimir una esfera de acero endurecido contra una probeta manteniendo la carga durante un tiempo determinado, de acuerdo con la norma Mexicana:

NMX - B - 116- 1996 –SCFI.-Industria siderurgica.- Determinación de la dureza Brinell en materiales metálicos. Métodos de prueba.  
(ASTM – E – 140 - 1988).

La norma nos indica que para una prueba estándar, se debe de usar una esfera de 10 mm de diámetro, con una carga de 3000 Kg para metales duros y un tiempo de aplicación de 10 a 15 segundos.

Así mismo la norma considera otros materiales regulando aplicar 1500 kg para metales de dureza intermedia y 500 kg. Para metales suaves.

Los rangos de dureza para cargas que indica la norma son:

Diámetro de la esfera (mm)	Carga (kgf)	Rango Recomendado (DB)
10	3000	96 – 600
10	1500	48 – 300
10	500	16 – 100



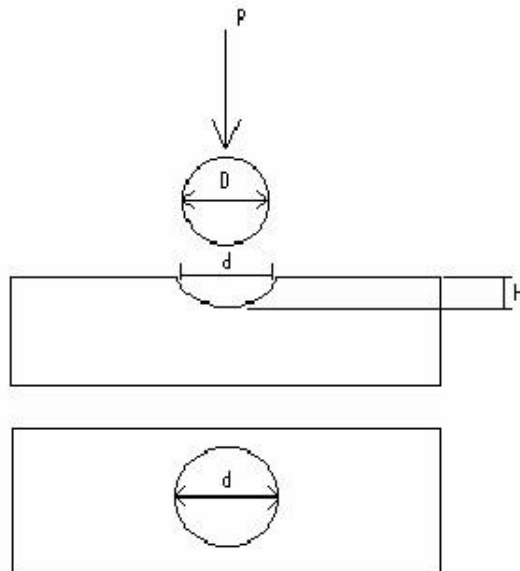
La carga "P" nunca debe exceder a 3000 kg. Esta se usará para materiales duros (Acero): la de 1 500 kg. Para materiales de dureza intermedia (cobre): la de 500 Kg. para materiales suaves (magnesio).

La norma nos indica hacer cinco ensayos distribuidos al azar y en el punto 3.2.2. Indica que la prueba de Brinell no se recomienda para materiales que tengan una dureza mayor a 630 DB. Además contiene tablas con tres columnas que indican 3000, 1500 y 500 Kgf y por renglón indican de 2.00 mm a 6.99 mm el diámetro de la huella (estos números del diámetro van incrementándose cada centésima de milímetro por lo tanto se tienen cubiertos todos los números de dureza.

Tiempos recomendados en ESIME para ensayos en diferentes materiales:

- A).- Materiales Duros (acero y hierro) de 10 a 15 segundos como mínimo. 3000 kg.
- B).- Materiales Semiduros (metales no ferrosos) de 30 a 45 segundos. 1500 kg.  
Cobre, Bronce
- C).- Materiales Suaves (magnesio y aluminio) de 120 a 180 segundos. 500kg.

El penetrador es de carbuloy (Carburo de tungsteno) en tres diámetros 10, 5, 2.5 mm.



La formula de la norma indicada es:

$$DB = \frac{2P}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad DB = \frac{P}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

En donde:

P= Carga en Kgf.



D = Diámetro del penetrador en mm.

d = Diámetro de la huella en mm.

$$DB = \frac{P}{A} = \frac{\text{fuerza}}{\text{Area _ indentada _ (casquete)}} \text{ kg / mm}^2$$

En donde:

A = Área del casquete en mm

$A = \pi D H = \text{mm}^2$

H = Profundidad de la huella.

$$H = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \text{ (mm)} \therefore DB = \frac{p}{\pi DH}$$

El número de Dureza Brinell es adimensional, pero para efectos de cálculo se le dan unidades.

Nomenclatura según norma: \_\_\_\_\_ DB en donde tenemos:

Diámetro del balón = 10 mm

Carga = 3000 Kg

Duración = 10-15 seg.

Si desea efectuar un ensayo NO NORMALIZADO tiene que indicar los datos siguientes de acuerdo a la norma

\_\_\_\_\_ DB  
Diámetro del balón      carga      tiempo

La norma considera Dureza Brinell especial (Ley de Batsón y Becker).

En la industria es común el uso de penetradores de 5 y 2.5 mm de diámetro los cuales según la norma NMX - B - 116 - 1996, el número obtenido tiene una correspondencia a los números de dureza tabulados.

Estos penetradores se pueden usar cuando las probetas son muy pequeñas o delgadas. Para estos ensayos que son especiales la relación entre la carga y el diámetro del penetrador debe ser:

- Para hierro y acero  $P = 30 D_2$
- Para aluminio bronce y latón.  $P = 15 D_2$
- Para materiales sumamente suaves.  $P = 5 D_2$

Los resultados de estos ensayos corresponden a los que se obtuvieron con un penetrador de 10 mm. de diámetro; siempre y cuando la relación de la carga con respecto al cuadrado del diámetro de la bola (penetrador) permanece constante.

La interpretación de las cifras de dureza es importante porque queda implícita en todas las propiedades mecánicas del material.

## RELACIÓN ENTRE LA DUREZA BRINELL Y EL ESFUERZO A LA Tensión

Para calcular el esfuerzo de tracción o tensión en función de la dureza Brinell se utiliza la LEY DE DOHMER la cual establece.

$$\sigma_t = K (DB)$$

En donde:

K = Constante que depende de la dureza Brinell teniendo dos valores 490 ó 515.

Si DB > 165; K=490.

Si DB < 165; K= 515.

En el cálculo del esfuerzo de tensión se utiliza la dureza Brinell calculada. Como la resistencia a la tensión se obtiene con la ley de DOHMER el resultado lo da en lb/plg<sup>2</sup>, si se requiere en Kg/cm<sup>2</sup> se debe multiplicar por 0.0703.

La ley de DOHMER se puede aplicar a materiales ferrosos y no ferrosos.

## CALCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR

Se obtiene determinando la diferencia entre los números Brinell tabulado y calculado.

$$\% E = \left| \frac{DB - DB_{CAL}}{DB_{TAB}} \right| 100$$

Los valores ocupados se consideran como valores absolutos, por lo tanto nunca debe resultar negativo.

## DETERMINACIÓN APROXIMADA DEL CONTENIDO DE CARBONO

Se obtiene utilizando la siguiente formula.

$$\%C = \frac{\sigma_T - 40000}{100000}$$

$\sigma_T$  = Esfuerzo a la tensión calculado en lb/plg<sup>2</sup>.

40000 = Esfuerzo a la tracción o tensión del hierro en lb/plg<sup>2</sup>.

100000 = Constante.



## PROCEDIMIENTO DE LA PRÁCTICA

### Operación 1

- Se coloca la probeta sobre la mesa de trabajo o yunque.

### Operación 2:

- Girar el volante elevando la mesa de trabajo hasta que haga contacto la probeta con el penetrador.

### Operación 3:

- Se cierra la válvula de descarga.

### Operación 4:

- Con la palanca, se inicia el incremento de carga, la cual puede ser de 500, 1500 o 3000 kg. El tiempo de aplicación depende del material que se este probando.

### Operación 5:

- Transcurrido el tiempo, recuerde que para 3000kg. Son 10 segundos de aplicación, se abre la válvula de descarga.

### Operación 6:

- Gire el volante en el sentido contrario al de las manecillas del reloj, retire la probeta y con el microscopio de 20 X, proceda a medir el diámetro de la huella.

### Operación 7:

- Con el diámetro de la huella, la carga aplicada, obtenga el numero Brinell en las tablas de dureza.

## MAQUINA DE DUREZA BRINELL

MARCA : AKASHI

CAPACIDAD: 4000 Kg.

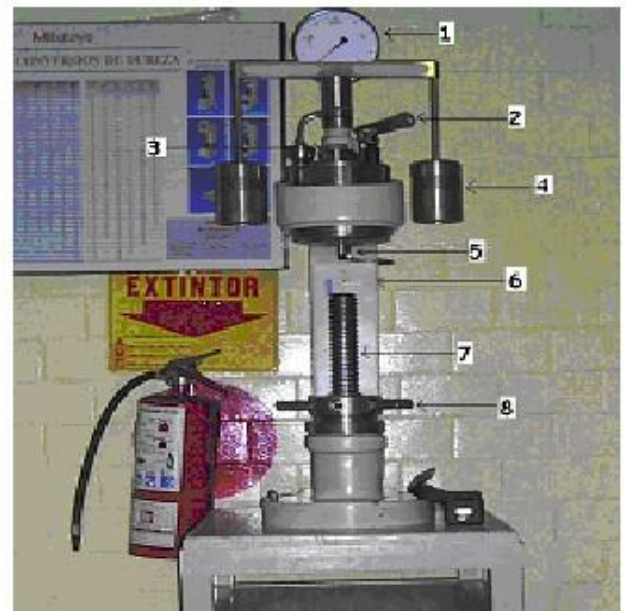
MECANICA – HIDRAULICA

Partes:

- 1.- Carátula, cada raya equivale a 100Kg.
- 2.- Palanca de carga
- 3.- Válvula de descarga
- 4.- Balancín con dos platillos: sirve para colocar los contrapesos, de cada lado

se colocan dos de 500 y dos de 125 Kg. Respectivamente, Se considera el balancín (tara) que equivale a 500 Kg. complementando los 3000 Kg.

- 5.- Vástago roscado para fijar el porta penetrador
- 6.- Estructura de la maquina
- 7.- Husillo y mesa de trabajo
- 8.-Volante para elevar o bajar el husillo
- 9.- Portapenetrador con rosca en el interior y penetrador de 10 mm.
- 10.- Mesa de trabajo o yunque para colocar la probeta plana





### EJEMPLO # 1

Tenemos una probeta de acero la cual se sometió a un ensayo Brinell estandarizado usando un tiempo de 20 segundos, el diámetro de la huella fue de 4.46 mm.

#### OBTENER:

- Dureza Brinell tabulada y calculada.
- Profundidad de la huella.
- El área del casquete.
- Porcentaje de error,
- Esfuerzo de tensión calculado y tabulado.
- Porcentaje de carbono.
- Indicar aproximadamente que tipo de material fue ensayado.

#### TABLA DE DATOS

ORDEN	MATERIAL	CARGA (Kgf)	HERRAMIENTA (mm)	TIEMPO (s)	HUELLA (mm)	OBSERV:
1	FERROSO	3000	10	20	4.46	

## TABLA DE RESULTADOS

ORDEN	DB <sub>T</sub>	DB <sub>c</sub> Kg/mm <sup>2</sup>	H (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	%E	σ <sub>TT</sub> Kg/cm <sup>2</sup>	σ <sub>TC</sub> Kg/cm <sup>2</sup>	%C	OBSERV.
1	181	181.948	0.524	16.488	0.523	6100	6267.5623	0.491	Nota No. 1

$$DB = \frac{2P}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d_2^2} \right)}$$

$$DB = \frac{2(3000)}{\pi (10) \left( 10 - \sqrt{10^2 - 4.46^2} \right)}$$

$$DB = 181.9487 \text{ Kg/mm}^2$$

$$H = \frac{D - \sqrt{D^2 - d_2^2}}{2}$$

$$H = \frac{10 - \sqrt{10^2 - 4.46^2}}{2} = 0.524 \text{ mm}$$

$$A = \pi DH = \pi (100 \text{ mm}) (0.524 \text{ mm}) = 16.488 \text{ mm}^2$$

$$\% E = \left| \frac{DB - DB_{CAL}}{DB_{TAB}} \right| 100$$

$$\% E = \left| \frac{181 - 181.94847}{181} \right| 100 = 0.524$$

$$DB_c > 165; K=490$$

$$\sigma_{TC} = K (DB) = (490) (181.948) = 89154.52 \text{ lb/plg}^2 (0.0703 \text{ Kg/cm}^2) = 6267.562 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\% C = \frac{\sigma_T - 40000}{100000}$$

$$\% C = \frac{89154.52 \text{ lb / p lg}^2 - 40000}{100000} = 0.4915$$

NOTA No.1: El material ensayado por tener los valores más aproximados a los calculados es un acero 0.2 %C laminado en frío debido a que tiene una dureza Brinell de 160 y un esfuerzo a la tensión de 80000 lb/plg<sup>2</sup>

### EJEMPLO #2 (RESOLVER EN CLASE)

Efectuamos un ensaye en un material ferroso aplicando una P = 3000 Kg durante 15 segundos con un penetrador de 10 mm la huella obtenida es de 4.96 mm.

#### OBTENER:

- Dureza Brinell tabulada y calculada.
- Profundidad de la huella.
- El área del casquete.
- Porcentaje de error.
- Esfuerzo de tensión calculado y tabulado.
- Porcentaje de carbono.
- Indicar aproximadamente que tipo de material fue ensayado.

#### TABLA DE DATOS

ORDEN	MATERIAL	CARGA (Kgf)	HERRAMIENT A (mm)	TIEMPO (s)	HUELLA (mm)	OBSERV:
1	FERROSO	3000	10	15	4.96	

#### TABLA DE RESULTADOS

ORDEN	DB <sub>T</sub>	DB <sub>C</sub> Kg/mm <sup>2</sup>	H (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	%E	σ <sub>TT</sub> Kg/cm <sup>2</sup>	σ <sub>TC</sub> Kg/cm <sup>2</sup>	%C	OBSERV.
1									Nota No. 1

La dureza tabulada la puede obtener por interpolación o consultar la tabla de la norma.

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

$$DB = \frac{2(\dots\dots\dots \text{kg})}{\pi (\dots\dots\dots) \left( \dots\dots\dots - \sqrt{\dots\dots\dots^2 - \dots\dots\dots^2} \right)}$$

$$DB = \dots\dots\dots \text{Kg/mm}^2$$

$$H = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$



$$H = \frac{10 - \sqrt{\dots - \dots}}{2} = \dots \text{mm}$$

$$A = \pi DH = \pi (\dots \text{mm}) (\dots \text{mm}) = \dots \text{mm}^2$$

$$DB < 165; K=515$$

$$\sigma_{TC} = K (DB) = (\dots) (\dots) = \dots \text{lb/plg}^2 (0.0703) \text{ Kg/cm}^2$$

$$= \dots \text{Kg. /cm}^2$$

$$\% E = \left| \frac{DB - DB_{CAL}}{DB_{TAB}} \right| 100 \therefore \% E = \left| \frac{\dots - \dots}{\dots} \right| 100 = \dots$$

$$\% C = \frac{\sigma_T - 40000 \text{ lb / p lg}^2}{100000 \text{ lb / p lg}^2}$$

$$\% C = \frac{\dots \text{ lb / p lg}^2 - 40000 \text{ lb / p lg}^2}{100000 \text{ lb / p lg}^2} =$$

Cuando el diámetro de la huella que se midió no aparece en sus tablas de dureza y tiene que calcular la dureza y el esfuerzo a la tensión tabulada, tendrá que interpolar de la siguiente manera, con el dato de la huella 4.96 mm nos vamos a la tabla de durezas y en la columna de Brinell carga a 3000 Kgf; existe un número de huella menor y otro mayor, así mismo tenemos los datos correspondientes al esfuerzo máximo de tensión tabulado.

	Diam. Huella (mm)	DB	$\sigma_{TC}$ Kg/cm <sup>2</sup>
- 0.05	4.91	148	5000
	4.96	X	Y
+ 0.03	4.99	143	4780
Diferencial Total	0.08	5	220

Para calcular la dureza Brinell interpolamos los datos del diámetro de la huella y los números de Dureza Brinell usando la formula siguiente:



## DUREZA BRINELL

$$X = \left| \frac{(\text{Dif (+) o (-) del diametro de la huella})(\text{Dif .total DB}_T)}{\text{dif .total de los diametros de la huella}} \right|$$

$$X_A = \left| \frac{(-0.05)(5)}{0.08} \right| = -3.125 \therefore \text{DB} = 148 - 3.125 = 144.875 \text{ Kg / mm}^2$$

$$X_B = \left| \frac{(0.03)(5)}{0.08} \right| = 1.875 \therefore \text{DB} = 143 + 1.875 = 144.875 \text{ Kg / mm}^2$$

## ESFUERZO A LA TENSIÓN

$$Y = \left| \frac{(\text{Dif (+) o (-) del diametro de la huella})(\text{Dif .total } \sigma_T)}{\text{dif .total de los diametros de la huella}} \right|$$

$$Y_A = \left| \frac{(-0.05)(220)}{0.08} \right| = -137.5 \therefore \text{DB} = 5000 - 137.5 = 4862.5 \text{ Kg / cm}^2$$

$$Y_B = \left| \frac{(0.03)(220)}{0.08} \right| = 82.5 \therefore \text{DB} = 4780 + 82.5 = 4862.5 \text{ Kg / mm}^2$$

### 2.1.3.3.- ROCKWELL

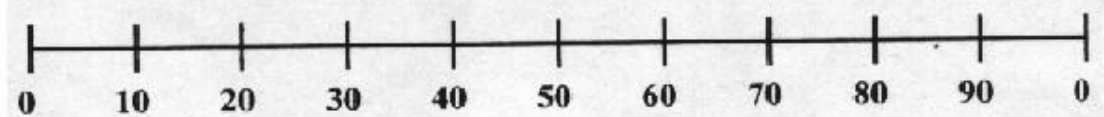
Este ensayo es similar al de Brinell, el número de dureza encontrado es una función de la penetración bajo una carga estática; Difiere del ensayo Brinell por el tipo de penetradores y porque las cargas son menores, de ahí que la huella resulte menor y menos profunda.

Este procedimiento esta normalizado con la NMX -B -119-1983-SCFI Industria siderurgica-Dureza Rockwell (ASTM - E - 18).

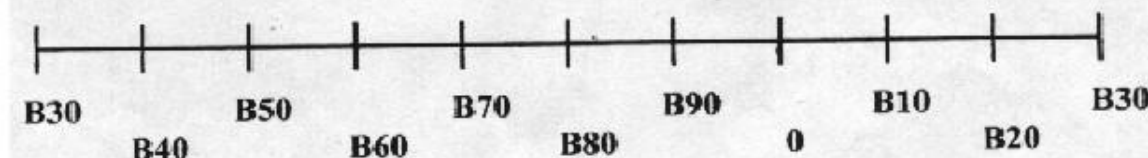
En esta prueba se usa también una máquina calibrada para presionar un penetrador de diamante esférico - cónico (BRALE) con ángulo incluido de 120° debido a que es de tipo piramidal. La carga a aplicar para RA es de 60 Kgf y para RC es igual a 150 Kgf las lecturas del número obtenido se leen en la escala de números negros; se ocupa también penetradores esféricos de acero por ejemplo para Rockwell B su diámetro es de 1.588 mm (1/16") aplicando una carga de 100 Kgf, la lectura de las durezas se obtienen de la carátula de color rojo. Los diámetros de los penetradores pueden variar hasta 12.70mm (½ pulgada).

Las máquinas dentro de la escala, tienen dos series de números de color negro y rojo.

Dureza Rockwell "C".-En color negro., El penetrador de diamante, carga 150Kg



Dureza Rockwell "B".- Color rojo., El penetrador esférico 1.588mm, carga 100 Kg



CAMPOS DE APLICACIÓN DE CADA ESCALA (SEGÚN LA NORMA)

ESCALA	PENETRADOR	CARGA MAYOR	COLOR	NUMEROS	APLICACION TIPICA DE LAS ESCALAS
A	DIAMANTE	60	NEGROS	Carburos Cementados, acero delgado y acero de superficie endurecida no profunda.	
B	ESFERICO 1.588mm	100	ROJOS	Aleaciones de cobre, aceros suaves, aleaciones de aluminio, hierro maleable	
C	DIAMANTE	150	NEGROS	Aceros, Hierros colados duros, hierro maleable perlítico, acero de superficie profunda endurecida y otros materiales mas duros que B100	
D	DIAMANTE	100	NEGROS	Aceros delgado, y aceros de superficie endurecida media, y hierro perlítico maleable.	
E	ESFERICO 3.175mm	100	ROJOS	Fundiciones, aleaciones de aluminio y magnesio, metales para chumaceras.	
F	ESFERICO 1.588mm	60	ROJOS	Aleaciones de cobre recocidas, metales delgados y suaves en hojas.	
G	ESFERICO 1.588mm	150	ROJOS	Hierro maleable, aleaciones de cobre, Níquel y de cobre-níquel zinc. Limite superior G92 para evitar posible aplastamiento del penetrador esférico.	
H	ESFERICO 3.175mm	60	ROJOS	Aluminio, Zinc, Plomo	
K	ESFERICO 3.175mm	150	ROJOS	Metales para chumaceras y otros Materiales muy suaves o delgados. Úsese el penetrador mas pequeño y la	

				carga mas grande que no deje huella en la superficie opuesta de la prueba.
L	ESFERICO 6.350mm	60	ROJOS	
M	ESFERICO 6.350mm	100	ROJOS	
P	ESFERICO 6.350mm	150	ROJOS	
R	ESFERICO 12.70mm	60	ROJOS	
S	ESFERICO 12.70mm	100	ROJOS	
V	ESFERICO 12.70mm	150	ROJOS	

#### NUMERO DE DUREZA ROCKWELL

Es un número derivado del incremento neto de la profundidad de la huella, debido a la aplicación de una carga sobre un penetrador dicha carga se incrementa a partir de una fija denominada menor (10Kg) hasta una carga denominada mayor la cual puede ser 60, 100, 150 Kgf.

Los penetradores para determinar la dureza Rockwell son varios; uno es de diamante esférico-cónico que tiene un ángulo incluido de  $120^\circ \pm 0.5^\circ$ , en su extremo esférico tiene un radio de 0.200 mm (penetrador llamado Brale), se utiliza para obtener dureza Rockwell C, A y D. La carga menor  $F_0 = 10$  Kgf, mas la carga adicional ( $F_1$ ) 50, 90 ó 140 Kgf nos da la carga mayor ya que  $F_0 + F_1 = 60, 100, 150$  Kgf.

#### RECOMENDACIONES DEL USO DE ESCALAS

DRB: Penetrador esférico de 1.588 mm (1/16") de diámetro, carga de 100 Kg para ensayar aleaciones de cobre, aceros suaves, aleaciones de aluminio y hierro maleable.

DRC: Penetrador de diamante (Brale), carga de 150 Kg. para ensayos de acero, hierro colado duro, hierro maleable perlítico, titanio, acero con superficie profunda endurecida y otros materiales más duros que DRB 100.

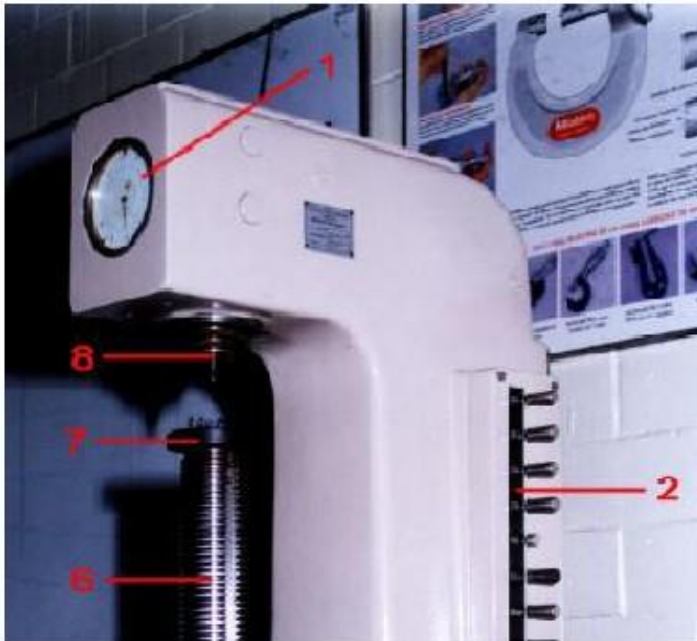
#### 2.1.3.4.- MAQUINA OTTO WOLPERT

En la parte superior tiene una carátula con 2 escalas grandes y una pequeña. Las escalas grandes del 0-100 de color negro indican Rockwell C y los números B0-100 es para Rockwell B. La carátula pequeña marcada de 0-10 en la posición #3 tiene una indicación

en rojo. La cual marca la cantidad de vueltas que da la manecilla grande que por procedimiento nos indica la precarga que siempre es de 10kg. Cuando la aguja grande da 2½ vueltas.

En la parte inferior de la carátula se tiene el porta penetrador y con un tornillo se asegura que el penetrador colocado no se mueva. Se tiene la mesa de trabajo o yunque en este caso es plana pero se pueden montar mesas de trabajo para probetas circulares en diferentes diámetros.

Husillo que sirve para mover la mesa de trabajo. Volante para que al girarlo en el sentido de las manecillas del reloj se eleve la mesa de trabajo. En la parte lateral derecha hay 2 palancas, la palanca larga es de descarga y la palanca corta es de carga. Del mismo lado tenemos botonera para seleccionar 8 diferentes cargas al oprimir el botón en esa posición (15,625; 31,25; 62,5; 100; 125; 150; 187,5; 250 kg.).



- 1.- carátula de escalas
- 2.- selector de cargas
- 3.- volante para la mesa de trabajo
- 4.- palanca de carga
- 5.- palanca de descarga
- 6.- husillo
- 7.- mesa de trabajo
- 8.- porta penetrador

## DUREZAS ESPECIALES

La escala "N": Se usa para materiales similares a los probados o ensayados en las escalas A, C, y D. pero de calibres muy delgados, superficies endurecidas o cuando se requiere una penetración muy pequeña, el número de dureza se obtiene leyendo la escala negra.



La escala "T": Se usa para materiales similares a los probados en las escalas B, F, G, cuando se requieren penetradores muy pequeños o la pieza es de calibre muy pequeño, recuerde leer la dureza en la escala negra.

Las escalas "W", "X", "Y": Se usan para materiales muy suaves.

CARGA MAYOR	ESCALA "N" PENETRADOR BRALE	ESCALA "T" PENETRADOR ESF. 1.588 mm.	ESCALA "W" PENETRADOR ESF. 3.175 mm.	ESCALA "X" PENETRADOR ESF. 6.35 mm.	ESCALA "Y" PENETRADOR ESF. 12.7 mm
15	15N	15T	15W	15X	15Y
30	30N	30T	30W	30X	30Y
45	45N	45T	45W	45X	45Y

CARGA MENOR 3 Kg.

Se efectuó un ensayo de dureza Rockwell obteniendo los siguientes datos DRB 88, DRB 90, DRB 89, determinar.

- Tipo de penetrador usado.
- Carga aplicada.
- Color de la escala donde se efectuaron las lecturas.
- Promedio de la dureza Rockwell,
- Comparativamente indique la dureza Brinell tabulada.
- Dureza Brinell calculada.
- Porcentaje (%) de error.
- Esfuerzo a la tensión tabulada.
- Esfuerzo a la tensión calculada.
- Indique aproximadamente en que material se efectuó el ensayo.

#### 2.1.4.- MICRODUREZA.

Se consideran ensayos de micro dureza VICKERS y KNOOP, debido a que su huella es muy pequeña.

##### 2.1.4.1.- ENSAYO DE DUREZA VICKERS.

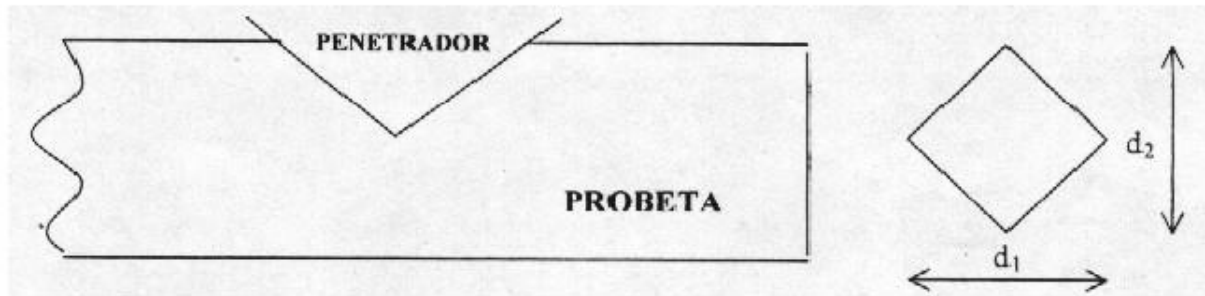
Es una prueba por penetración, en la cual se utiliza una máquina calibrada para aplicar una carga predeterminada compresiva sobre la superficie del material bajo la acción de un penetrador piramidal de diamante con base cuadrada y un ángulo de 136° entre las caras.

Se deben medir la longitud de las diagonales de la huella resultante después de retirar la carga.

## NUMERO DE DUREZA VICKERS.

Es un número dependiente de la carga aplicada, la cual siempre se deberá representar anteponiendo un número a las letras DV.

Para el cálculo se utiliza la siguiente ecuación, considerando:



$$DV = \frac{2 P \sin \alpha}{d^2}$$

P en Kilogramos  $DV = 1.8544 P/d \text{ kg/mm}^2$

P en Newton  $DV = 0.1891 P/d \text{ N/mm}$

En donde:

P = Carga aplicada en Kg o N.

$\alpha$  = Angulo entre las caras opuestas del diamante, es  $136^\circ$ .

d = Diagonal media de la huella.

El número seguido por las letras DV, además de un número subfijo que indica la carga y un segundo número subfijo indica la duración de aplicación de la carga cuando este último difiere del tiempo normalizado que es de 10 a 15 segundos, ejemplo 440DV30/20. El ejemplo representa que la dureza es 440 bajo una carga de 30 Kg aplicados durante 20 segundos.

La norma NMX-B118-1974-SCFI.- Determinación de dureza Vickers en materiales metálicos.

Nos indica que estas pruebas pueden efectuarse desde 1 gramo fuerza hasta 120 KgF. En la práctica el número de DV se mantiene constante para cargas de 5 KgF o mayores.

Para cargas menores el número varia dependiendo de la carga aplicada. Las tablas de la norma indican los números DV para cargas de prueba de 1 Kg.



El equipo de ESIME Azcapotzalco tiene su microscopio integrado, selector de tiempo, selector de carga y dependiendo de las dimensiones  $d_1$ ,  $d_2$ , la máquina automáticamente nos indica el número de dureza.

La máquina AKASHI de Mitutoyo tiene una capacidad de 20 Kg; con selectores de carga de 0.3; 0.5; 1; 2.5; 10 y 20 Kg. El selector de tiempo de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 segundos. Además cuenta con un selector HV y HK.

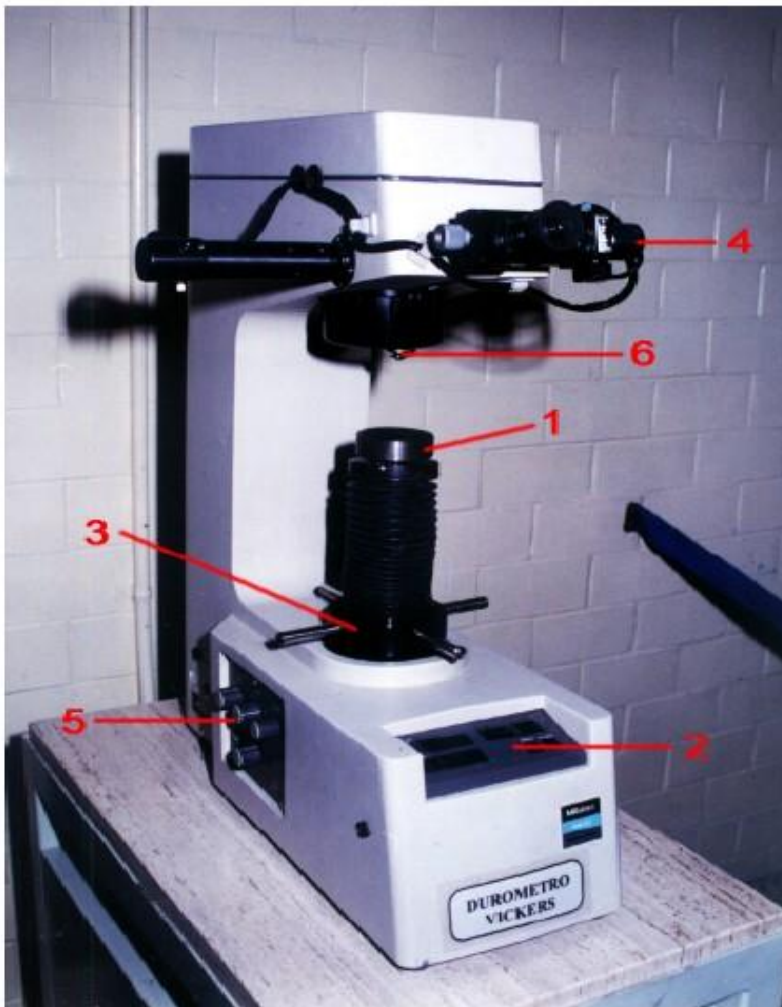
#### 2.1.4.2. - MAQUINA AKASHI (Marca Mitutoyo modelo AVK-C1).

1. Oprima el botón energizando el equipo, verificando que la lámpara de iluminación encienda, verifique lo mismo en la pantalla D1, D2 así como la pantalla indicadora de dureza HV.
2. Seleccione la mesa de trabajo o yunque.
3. Coloque el material a ensayar sobre la mesa de trabajo.
4. Manualmente gire el volante de elevación, verifique que el microscopio este en posición de trabajo.
5. Observen el microscopio y continúe elevando la mesa de trabajo, en el momento en que usted observe la textura de su material (surcos de acabado dejado por la lija)  
Nota: Este ajuste se lleva a cabo con mucho cuidado porque puede dañar el lente del microscopio.
6. El microscopio del lado derecho tiene una perilla moleteada con la que al girar ajusta las líneas que van a determinar la separación entre vértices (la línea principal tiene signos de + y -).
7. Girar torreta colocando el penetrador en posición de trabajo (tiene muesca de localización).  
Nota: Recuerde que este penetrador es de base cuadrada con ángulo incluido de  $136^\circ$ .
8. Del lado derecho en la parte posterior tengo selector de carga (0,3; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20). Se selecciona 10 Kg. del lado izquierdo de la maquina existen la perilla selectora de lente X5, X10, X20, X40 (seleccionamos X20), además tiene selector de tiempo 5, 10, 15, 20, 25, 30, seg. Existe selector de dureza HV, HK (seleccionamos HV). Existe control de iluminación, perilla con la cual controla la intensidad de luz de la lámpara.
9. Se oprime el botón Zero obteniendo en las tres pantallas de 0,0.
10. Oprimir el botón de start, automáticamente la maquina efectúa la penetración, apareciendo en las 3 pantallas nuevamente ceros.
11. Se gira la torreta en sentido inverso a las manecillas del reloj, colocando el microscopio sobre la huella.  
Nota: Efectúe la operación de giro con cuidado porque se puede mover la probeta.
12. Observe por el microscopio su huella con la perilla moleteada del lado izquierdo recorrer la línea hasta el vértice.



13. Con la perilla moleteada lado derecho empiezo a correr la línea hasta el otro extremo (obteniendo así la medición D1), si esta de acuerdo oprima el botón negro localizado en la parte derecha del microscopio debajo de la perilla moleteada.
14. Se gira sistema de perilla inferior en sentido antihorario.
15. Observo por el microscopio y con la perilla inferior giro moviendo al mismo tiempo las 2 líneas (recuerde que la principal es la de +, -), si la línea que indica la abertura coincide con el vértice contrario (superior) puede dar la lectura por buena, si no coincide con la perilla moleteada superior ajuste la abertura, si esta de acuerdo en este ajuste oprimir el botón nuevamente, la maquina registra lectura y da dureza.
16. Girar el microscopio a posición normal.
17. Girar volante de husillo en sentido antihorario y retirar probeta.

#### Partes de la maquina



- 1.- Mesa de trabajo
- 2.- Pantallas
- 3.- Volante de elevación
- 4.- Microscopio
- 5.- Selector de dureza
- 6.- Porta penetrador
- 7.- Selector de cargas

#### 2.1.4.3.- DUREZA KNOOP

El penetrador KNOOP se fabrica en diamante produciendo una huella en forma de pirámide rómbica con ángulos de  $172^{\circ}30'$  y  $130^{\circ}$ . El cual tiene una razón proporcional entre las diagonales corta y larga de 7 a 1, este penetrador se puede montar en la máquina Vickers.

El aparato TUKON en el que se puede utilizar el penetrador KNOOP puede aplicar cargas de 25 a 3600 gr. El equipo es totalmente automático para efectuar la penetración, además cuenta con un microscopio de alta magnificación. Este equipo se ocupa para piezas muy pequeñas como las de un reloj de pulsera o cualquier otra pieza pequeña.

#### 2.1.5.- CONVERSIÓN DE DUREZAS

Los números de Dureza Vickers y Brinell son similares para materiales que están entre el rango de 103 y 247. En durezas mayores empieza una divergencia debido a la deformación producida por el penetrador.

##### RELACIÓN ENTRE EL MÉTODO DE DUREZA ROCKWELL Y BRINELL

Pentreko realizó estudios relacionando las escalas Rockwell y Brinell obteniendo lo siguiente.

Para valores de dureza DRC entre 10 y 40

$$DB = \frac{1520000 - 4500(DRC)}{(100 - DRC)^2}$$

Para valores de dureza DRC entre 41 y 70

$$DB = \frac{25000 - 10(57 - DRC)^2}{100 - DRC}$$

Para valores de dureza DRB

$$DB = \frac{7300}{130 - DRB}$$

Para valores de dureza DRE

$$DB = \frac{3570}{130 - DRE}$$

## 2.2.- TENSION

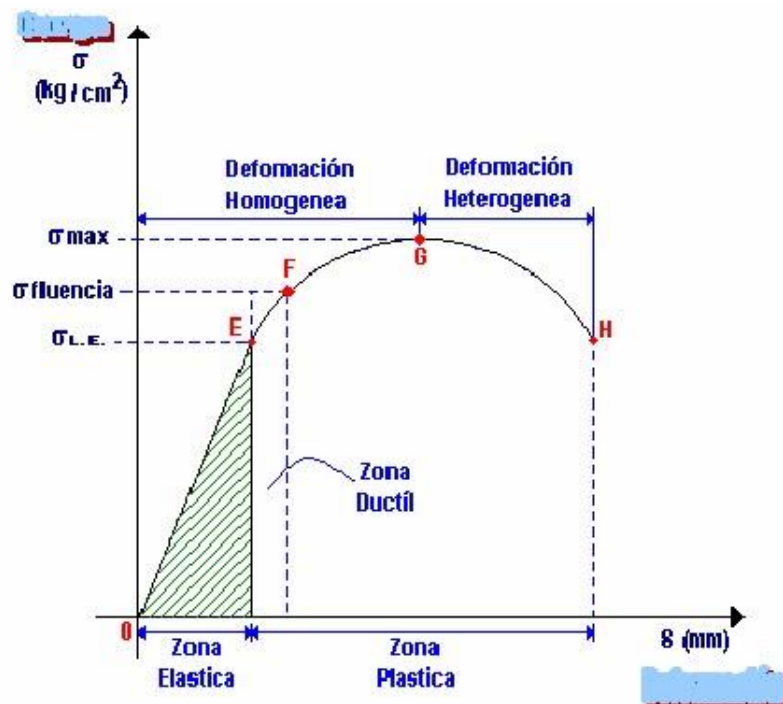
El ensayo es para determinar las propiedades de un material por medio de una muestra, en la cual se busca determinar hasta su última resistencia implicando con esto su deterioro o destrucción.

### 2.2.1.- CURVA DE CARGA Y DEFORMACIÓN NOMINAL

La diferencia entre la curva carga-deformación y una curva esfuerzo-deformación es que en la primera usamos directamente para graficar la carga aplicada por la maquina en kilogramos.

Y en la segunda el esfuerzo que se obtiene considerando el área de la muestra probada y se grafican los datos kg/cm<sup>2</sup>. En ambas curvas se consideran las deformaciones.

Curva Esfuerzo -Deformación Nominal (Kg/cm<sup>2</sup>-mm)



E = Limite Elástico

F = Punto de Fluencia o Cedencia

G = Carga máxima  
H = Punto de Ruptura

$$\sigma = \frac{P}{A_1}$$

RUPTURA  
MAXIMA  
CEDENCIA  
LIM . ELÁSTICO

#### SECCION "OE"

La línea recta que indica el alargamiento proporcional a la carga aplicada. Entre estos límites la pieza recuperará su tamaño y forma original cuando se retire la carga, por esto la zona se llama elástica.

#### SECCION "EF"

Muestra un alargamiento grande en comparación a la carga aplicada la zona se le denomina dúctil.

En el punto F llamado de fluencia o cedencia nos indica que cargas adicionales causarán deformaciones mayores hasta que llegue al punto máximo de carga que es el G.

#### SECCION "FG"

Representa la zona plástica. Al rebasar el punto G que representa la carga máxima o esfuerzo máximo se presentará la estricción (cuello de botella). La probeta sufre mayor deformación aunque la carga decrece automáticamente debido a que no encuentra resistencia, la deformación es heterogénea hasta llegar a la ruptura H.

### 2.2.2.- DEFORMACIÓN ELÁSTICA Y PLÁSTICA

Cuando se aplica una fuerza a una probeta los enlaces entre los átomos se estiran, el material se alarga. Cuando se retira la fuerza, los enlaces regresan a su longitud y la probeta recupera su tamaño normal, esta deformación se denomina elástica.

Si incrementamos la fuerza, el material se comporta de manera plástica, esto es, se producen dislocaciones y ocurre un deslizamiento por lo tanto al retirar la fuerza, el material ya no recupera sus dimensiones, y forma original; esto es deformación plástica (permanente).

## MODULO DE ELASTICIDAD O MODULO DE YOUNG

Es la primera parte del ensayo de tensión, el material se deformara elásticamente, para metales la máxima deformación elástica es menor a 0.2%.

Por medio de la Ley de Hooke se puede calcular

- E = modulo de Elasticidad (PSI, kg/cm<sup>2</sup>, Pa, Mpa)
- $\sigma$  = Esfuerzo.
- $\epsilon$  = Deformación.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{PSI (lb/pulg}^2\text{), kg/cm}^2\text{, Pa, Mpa}$$

Nota: el nombre de estas letras griegas se llaman:

$\sigma$  = SIGMA

$\epsilon$  = EPSILÓN

Este modulo esta relacionado con la fuerza de enlace entre los átomos que forman el metal, por ejemplo, el acero tiene un modulo de elasticidad de  $30 \times 10^6$  PSI y el aluminio es de 10 a  $11 \times 10^6$  PSI.

## ESFUERZO DE CEDENCIA (FLUENCIA)

Es aquel en el que el deslizamiento se hace notorio, este esfuerzo, provoca deformación plástica. En los cálculos se considera en área original.

## ESFUERZO DE CEDENCIA CONVENCIONAL

En algunos materiales el esfuerzo en el cual cambia de comportamiento elástico a plástico no se detecta con facilidad, en estos casos se determina un esfuerzo de fluencia convencional el cual es de 0.2% es 0.002 mm/mm.

Esto se determina a partir del diagrama carga-deformación ó esfuerzo-deformación de la siguiente manera:

- Se traza una línea paralela a la zona elástica (recta) de la grafica, iniciándose en 0.002mm del eje que nos indica las deformaciones, el trazo se continua hasta que se intercepte la curva en el punto donde se localiza el cruce, trazamos una línea recta hasta el eje de las cargas o esfuerzos de la gráfica, obteniéndose el valor del esfuerzo convencional de cedencia.

Nota: en el Reino Unido utilizan comúnmente el 0.1% de la deformación.

## ESFUERZO A LA TENSION

Es la resistencia máxima al material observada en la curva carga deformación como el punto más alto. La resistencia máxima a la tensión no es tan utilizada en el diseño de ingeniería para aleaciones dúctiles, puesto que tiene lugar demasiada deformación plástica antes de que se alcance.

Sin embargo la resistencia máxima a la tensión puede dar alguna indicación a la presencia de defectos. Si el material contiene porosidades o inclusiones, estos defectos pueden causar un decremento mayor al normal de la resistencia máxima del material.

$$\sigma_t = \frac{P}{A_1}$$

DONDE:

$\sigma$  = Es la letra griega llamada sigma = esfuerzo a la tensión

P = Carga máxima

$A_1$  = Área inicial

## ESFUERZO REAL O DEFORMACIÓN REAL

La reducción del esfuerzo mas allá del punto de resistencia a la tensión ocurre debido a la disminución de Resistencia que opone el material, en este caso se utiliza el área final, en los cálculos definiendo el esfuerzo real y la deformación real como sigue:

$$\text{Esfuerzo Real } \sigma = \frac{F}{A_f}$$

$$\text{Deformación Real } \delta = \ln \left( \frac{A_1}{A_f} \right)$$

DONDE:

$\delta$  = Es la letra griega delta minúscula

ln = Logaritmo natural

$A_1$  ó  $A_f$  = Área Instantánea donde se aplica la fuerza

La expresión  $\ln \left( \frac{A_1}{A_f} \right)$  debe de ser expresada después de indicada la extricción o cuello de

botella, esto sucede poco antes de la ruptura (para medir el diámetro final se toma, la probeta quebrada y se efectúa la medición).



### 2.2.3.- DUCTILIDAD

Mide el grado de deformación que un material puede soportar sin romperse existen 2 procedimientos para determinar la ductilidad:

1- Se miden las distancias entre las marcas hechas a las probetas antes y después del ensayo. El porcentaje de alargamiento ó de elongación es la distancia que se estira la probeta antes de la ruptura

$$\% \epsilon = \left( \frac{L_f - L_i}{L_i} \right) (100)$$

2 - Consiste en medir el área de la sección transversal en el punto de fractura obteniendo el porcentaje de reducción o disminución del área de la sección transversal que sufrió deformación durante el ensayo llegando generalmente a la ruptura.

$$\% \theta = \left( \frac{A - A_f}{A} \right) (100)$$

DONDE:

$\theta$  = A la letra griega theta

$A_f$  = Área final transversal de la probeta

### 2.2.4.- DETERMINACION DE PROPIEDADES, ESFUERZOS UNITARIOS, INDICES DE DUCTILIDAD Y MODULOS.

Las propiedades mecánicas de los metales y aleaciones son de importancia en ingeniería las cuales se obtienen en un ensayo de tensión (tracción) y son las siguientes:

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| a) Esfuerzo en el límite Elástico | i) Deformación total                   |
| b) Modulo elástico                | j) deformación unitaria longitudinal   |
| c) Resilencia                     | k) % de alargamiento o elongación      |
| d) Modulo de resilencia           | l) Deformación unitaria transversal    |
| e) Esfuerzo de fluencia           | m) % de estricción o reducción de área |
| f) Esfuerzo máximo a la tensión   | n) % de carbono                        |
| g) Esfuerzo a la ruptura          | o) Tenacidad                           |
| h) Esfuerzo real                  | p) Modulo de tenacidad                 |

A continuación se indican todas las formulas que se usan en un ensayo de tensión:

#### a) ESFUERZO EN EL LIMITE ELASTICO

$$\sigma = \frac{P_E}{A_1} \quad \text{Kg. /cm}^2, \text{ lbplg}^2$$

$P_{L.E.}$  = Carga en el Limite Elástico.

$A_1$  = Área original o inicial de la probeta.

b) MODULO DE ELASTICIDAD

$$E = \frac{PL_i}{\delta A_1} \quad \text{Kg. /cm}^2, \text{ lb / plg}^2$$

DONDE:

P y  $\delta$  = Se toman los valores de la zona elástica.

$L_i$  y  $A_1$  = Son las medidas iniciales.

c) **RESILENCIA: CAPACIDAD DEL MATERIAL DE ABSORBER ENERGIA HASTA EL LIMITE ELÁSTICO**

$$R = \frac{1}{2} P \delta \quad \text{Kg-mm, lb-pulg.}$$

$\delta$  = Deformación correspondiente a la última carga P dentro del Limite Elástico

d) MODULO DE RESILENCIA

$$M = \frac{R}{V_1 A_1 L_1} = \frac{R}{V_1 A_1 L_1} \quad \text{Kg - cm/cm}^3, \text{ lb - plg/plg}^3$$

DONDE:

$L_1$  y  $A_1$  = Son las medidas iniciales.

e) ESFUERZO DE CEDENCIA (FLUENCIA)

$$\sigma_{CED} = \frac{P_{CED}}{A_1}$$

En general el esfuerzo de cedencia siempre esta abajo del 60% del esfuerzo máximo.

f) ESFUERZO MÁXIMO

$$\sigma_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{A_1}$$

g) ESFUERZO DE RUPTURA

$$\sigma_{RUP} = \frac{P_{RUP}}{A_1}$$

h) ESFUERZO REAL

$$\sigma_R = \frac{P_{RUP}}{A_f} \quad \text{kg /cm}^2, \text{ lb./plg}^2$$





$A_f$  = Área reducida, área en la ruptura

i) DEFORMACION TOTAL

$$\delta = L_f - L_1 \quad \text{mm, cm, plg}$$

DONDE:

$L_1$  = Longitud original

$L_f$  = Después de la ruptura, para obtener  $L_f$  es necesario juntar los dos tramos y medir entre las marcas.

j) DEFORMACION UNITARIA LONGITUDINAL

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_1}$$

DONDE:

$\delta$  = es la deformación total

k) % DE ALARGAMIENTO O ELONGACION

$$\% \epsilon = \left( \frac{\delta}{L_1} \right) (100)$$

l) DEFORMACION UNITARIA TRANSVERSAL

$$\theta = \frac{A_1 - A_f}{A_1} \quad (\text{es adimensional})$$

m) % DE ESTRICCIÓN O REDUCCIÓN DEL AREA

$$\% \theta = \left( \frac{A_1 - A_2}{A_1} \right) (100)$$

n) % DE CARBONO

$$\% C = \frac{\sigma_t - 40000}{100000}$$

DONDE:

$\sigma_t$  = Esfuerzo a la tensión calculado con la Ley de Dohmer en lb. / pulg<sup>2</sup>

40000 = esfuerzo del hierro puro lb / pulg<sup>2</sup>

o) **TENACIDAD: CAPACIDAD DEL MATERIAL DE ABSORBER ENERGIA  
HASTA LA RUPTURA (AREA BAJO LA CURVA CARGA-DEFORMACION)**

La capacidad de un material para resistir cargas de impacto, a menudo se le conoce como tenacidad del material (Para el calculo se requiere trazar la grafica)

$$T = P\delta = R + A_A + A_B + A_C + \dots + A_N \quad \text{Kg.*mm, Kg.*cm., lb.*plg}$$

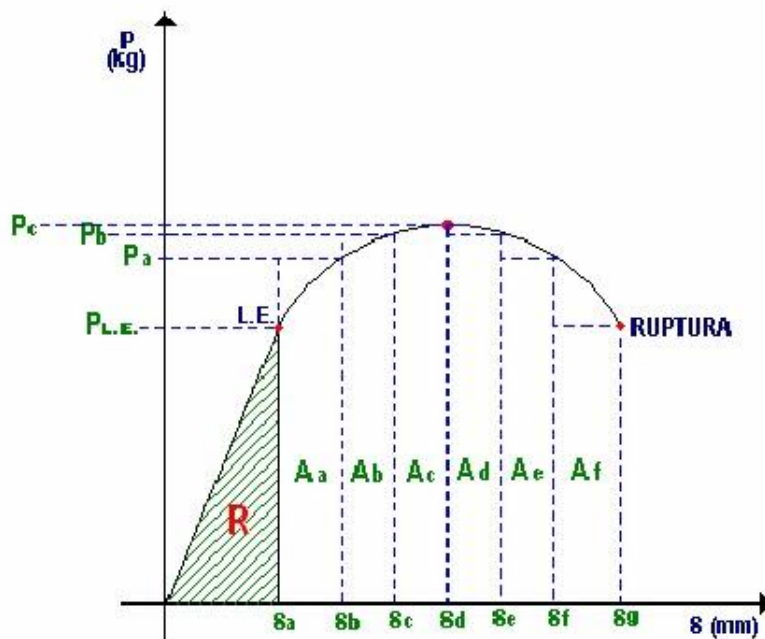
DONDE:

R = Resiliencia

$A_A = P_a (\delta_b - \delta_a)$

$A_B = P_b (\delta_c - \delta_b)$

$A_C = P_c (\delta_d - \delta_c)$



p) **MODULO DE TENACIDAD**

$$M_T = \frac{T}{V_1 A_1 L_1} = \frac{T}{V_1 A_1 L_1} \quad \text{Kg.-mm/mm}^3, \text{ lb.-plg/plg}^3$$

DONDE:

A = Área inicial en mm<sup>2</sup>; L = longitud inicial en mm

## 2.2.5.- ENSAYO ESTATICO DE TENSION

Las normas que rigen este ensayo son: NMX-B-172-1988-SCFI (Método de prueba mecánicos para productos de acero doblado, dureza Brinell, Rockwell, de impacto Charpy) y la NMX –B-310-1981-SCFI (Método de prueba a la Tensión para productos de acero).

El término de ensayo de tensión, se refiere a ensayos en los cuales previamente una probeta preparada es sometida a una carga monoaxial gradualmente creciente (es decir estático), hasta que ocurre la falla.

En un ensayo de tensión simple la operación se realiza sujetando los extremos de la probeta, los cuales se irán separando conforme se incrementa la carga.

La probeta se alarga en direcciones paralelas a la carga. Este tipo de ensaye, se aplica a metales, aleaciones no ferrosas, fundidas, laminas, forjadas, polímeros, etc.

## REQUERIMIENTOS PARA PROBETAS DE TENSION

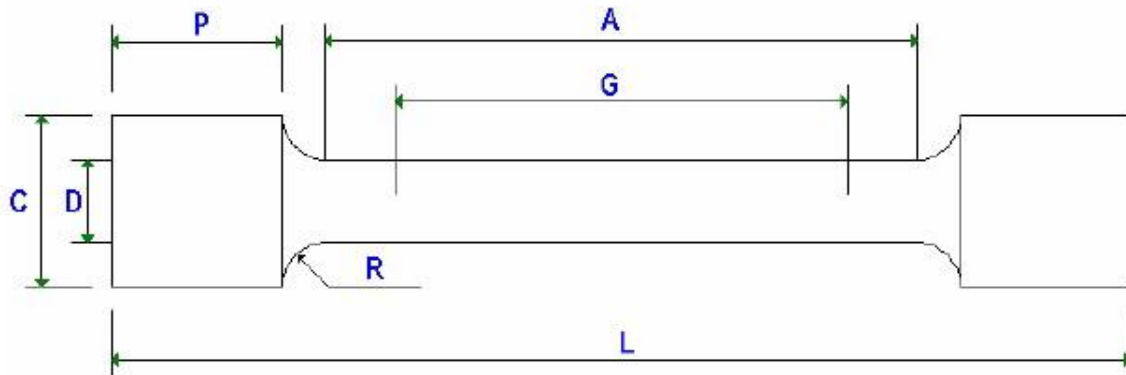
Se acostumbra usar para tipos particulares de ensayos, probetas que tengan sección transversal redonda, cuadrada o rectangular.

Una probeta debe ser simétrica con respecto a su eje longitudinal, para evitar flexión durante la aplicación de la carga.

Las probetas circulares según la norma, deben cubrir los siguientes parámetros:

### DIMENSIONES GENERALES:

	NORMAL	MAS PEQUEÑAS PROPORCIONALES A LA NORMA
G = Longitud Calibrada	50 ± 0.10mm	35 ± 0.10    25 ± 0.10mm 16 ± 0.10mm 10 ± 0.10mm
D = Diámetro Seccion Calibrada	13 ± 0.25mm 8.8 ± 0.18mm	6.0 ± 0.10mm 4.0 ± 0.8mm 2.5 ± 0.05mm
R = Radio zona de Transicion	10mm	6mm    5mm    4mm    2mm
A = Longitud de la Seccion Reducida	60mm	45mm    32mm    19mm    16mm
L = Longitud total Aproximada	125mm	DEBE PENETRAR 2/3 O MAS EN LA MORDAZA
P = Longitud zona de Sujecion	35mm APROX.	
C = Diámetro zona de Sujecion	20mm	



## FRACTURAS

Las fracturas por tensión se clasifican en cuanto a su forma, textura y color. Con respecto a su forma pueden ser simétricas, de cono o cráter, planas o rectangulares, por su textura pueden ser sedosas, grano fino, grano grueso, granular, fibrosas, o astilladas. Por su color pueden ser cristalinas, vidriosas, o mate.

Como ejemplo tenemos que una probeta de acero suave cilíndrico presenta un tipo de fractura de cono y cráter, de textura SEDOSO. El Hierro forjado presenta una fractura DENTADA y FIBROSO mientras que la fractura típica del hierro fundido es GRIS, PLANO Y GRANULADA.

### 2.2.6.- PROCEDIMIENTO PARA EFECTUAR EL ENSAYO DE TENSION EN UNA MAQUINA UNIVERSAL.

La probeta para ser ensayada se le debe de aplicar una prueba de dureza, conociendo su dureza se calcula el esfuerzo máximo. Conociendo el esfuerzo máximo y el área de la sección transversal se conocerá la carga máxima "P", se multiplica por el factor 1.25 para así determinar la maquina idónea para el ensaye.

En segundo lugar, se pinta la sección calibrada con azul de Prusia, ya que la tinta seco, se marca el centro de la probeta, a partir de este centro se tiene que marcar dos rayas á toda la sección a 25 mm; la distancia entre las rayas es de 50 mm.

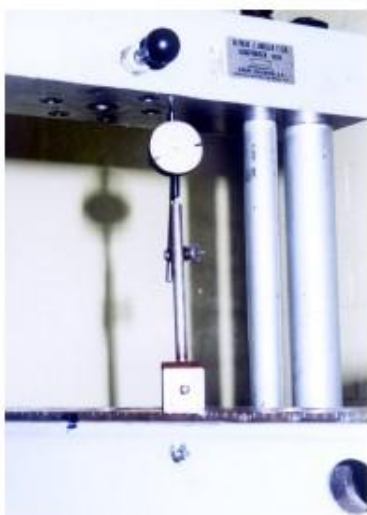
PARA EFECTUAR EL ENSAYO EN LA MAQUINA DE 10 TONELADAS, SE SIGUE EL PROCEDIMIENTO SIGUIENTE:

1. Seleccionar cualquiera de las tres escalas circulares de 0 a 2000 Kg, de 0 a 5000 Kg. o de 0 a 10000 Kg., colocar la escala seleccionada en la carátula principal.

2. Colocar contrapeso (únicamente para 5 y 10 toneladas)
3. Seleccione el pistón de 5 o 10 toneladas
4. Colocar dispositivo para el ensayo (porta mordazas libremente, sin tener obstrucción). Para nuestro ensayo se puede montar el dispositivo de montaje rápido en el cual las mordazas superiores tienen una protuberancia (chipotito). Con las porta mordazas que de acuerdo al diámetro del cabezal de las probetas seleccionar las indicadas.
5. Montar probeta (se monta primero la parte superior de la probeta), y con la ayuda de la manivela localizar en la parte inferior de la maquina, se aproximan las mordazas en la parte inferior de la probeta, la probeta no debe tener juego (movimiento).
6. Colocar selector de carga lateral (10 ton).
7. Cerrar válvula de descarga (válvula izquierda).
8. Conectar equipo, abrimos lentamente válvula 29 (válvula derecha), lentamente aplicamos carga para obtener un colchón de aceite, esto se consigue hasta que aparece la marca roja en el pistón superior.
9. Ajustamos a cero la carátula, verificar que la probeta este totalmente sujeta.
10. Montamos papel milimétrico en el tambor graficador.
11. Con la manivela inferior verificamos si hay precarga aplicada (listo para iniciar ensaye).
12. Verificar el cero en la carátula principal, lentamente abrimos válvula 29 para ir aplicando las cargas seleccionadas, cada vez que lleguemos a una de las cargas, se debe mantener la carga el tiempo suficiente para que su compañero de equipo indique que elongación se tiene con esa fuerza aplicada, estas operaciones se deben de repetir hasta que la probeta se rompa, es importante que el equipo se de cuenta en que momento trono la probeta. La maquina únicamente indicara la carga máxima en la aguja de arrastre.
13. Desmontamos la probeta para medir la distancia entre las marcas, esto se hace uniendo los dos pedazos de la probeta; así mismo, se debe de medir el diámetro en la fractura.
14. Verifique que la válvula 29 de carga este cerrada y la válvula 30 de descarga quede abierta, proceda a desmontar los dispositivos.



MAQUINA DE TENSION




INDICADOR DE DEFORMACION







INDICADOR DE CARGA

#### PROBLEMA

Se efectuó un ensayo de tensión en un material ferroso cuyo diámetro inicial de la sección calibrada es 13 mm con una longitud calibrada de 50 mm. Después de llegar a la ruptura se midió el diámetro final que fue de 8 mm y la longitud final de la sección calibrada fue de 57.4 mm durante el ensayo se obtuvieron los siguientes datos:

ACERO			Rb= 68
$\phi$ inicial = 13mm			L inicial = 50mm
$\phi$ final = 8mm			L final = 57.4 mm
ORDEN	P (KG)	$\delta$ (0.01mm)	
1	100	10	10
2	200	30	20
3	300	55	25
4	400	77	22
5	500	95	18
6	600	113	18
7	700	130	17
8	800	145	15
9	900	160	15
10	1000	175	15
11	1100	190	15
12	1200	200	10
13	1300	212	12
14	1400	225	13
15	1500	235	10
16	1600	249	14
17	1700	258	9
18	1800	268	10
19	1900	280	12
20	2000	290	10
21	2100	300	10
22	2200	312	12
23	2300	325	13
24	2400	335	10
25	2500	348	13
26	2600	385	37
27	2700	400	15
28	2800	405	5
29	2900	415	10
30	3000	---	---
31	3100	---	---
32	3200	---	---
33	3300	---	---
34	3400	610	---
35	3500	650	40
36	3600	670	20
37	3700	700	30
38	3800	750	50
39	3900	790	40

 Limite Elástico
  Cedencia
  Carga Máxima
  Ruptura



40	4000	855	65
41	4100	900	45
42	4200	970	70
43	3500		RUPTURA

Determinar el Limite Elástico, Punto de Cedencia, Carga Máxima y Carga de Ruptura.

Calcular:

- Esfuerzo en el Limite Elástico
- Modulo de Elasticidad
- Resilencia
- Modulo de Resilencia
- Esfuerzo de Cedencia
- Esfuerzo Máximo
- Esfuerzo de Ruptura
- Esfuerzo Real
- Deformación total
- Deformación Unitaria Longitudinal
- Porcentaje de Alargamiento o Elongación
- Deformación Unitaria Transversal
- Porcentaje de estricción o Reducción del Área
- Porcentaje de Carbono
- Tenacidad (Para calcularla se requiere trazar la grafica)
- Modulo de Tenacidad

Calculando área inicial y final de la probeta:

$$A_1 = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{(3.1416)(1.3)^2}{4} = 1.327 \text{ cm}^2$$

$$A_2 = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{(3.1416)(0.8)^2}{4} = 0.5026 \text{ cm}^2$$

$$a) \quad \sigma = \frac{P_{LE}}{A_1} = \frac{2500 \text{ kg}}{1.327 \text{ cm}^2} = 1883.94 \text{ kg / cm}^2$$

$$b) \quad E = \frac{P_{L1}}{\delta a A_1} = \frac{2500 \text{ kg} (5 \text{ cm})}{(0.348 \text{ cm}) 1.327 \text{ cm}^2} = 27684.63 \text{ kg / cm}^2$$

$$c) \quad R = \frac{P}{2} \delta = (0.5)(2500)(0.348) = 435 \text{ Kg - cm}$$



$$d) \quad M = \frac{R}{A_1 L_1} = \frac{435}{(1.327)^5} = 65.56 \text{ kg} \cdot \text{cm} / \text{cm}^3$$

$$e) \quad \sigma_{ced} = \frac{P_{ced}}{A_1} = \frac{2600 \text{ kg}}{1.327 \text{ cm}^2} = 1959.69 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

$$f) \quad \sigma_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{A_1} = \frac{4200 \text{ kg}}{1.327 \text{ cm}^2} = 3165.03 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

$$g) \quad \sigma_{RUP} = \frac{P_{RUP}}{A_1} = \frac{3500 \text{ kg}}{1.327 \text{ cm}^2} = 2637.52 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

$$h) \quad \sigma_R = \frac{P_{RUP}}{A_2} = \frac{3500 \text{ kg}}{0.5026 \text{ cm}^2} = 6963.78 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

$$i) \quad \delta = L_2 - L_1 = 57.4 - 50 = 7.4 \text{ mm} = 0.74 \text{ mm}$$

$$j) \quad \epsilon = \frac{\delta}{L_1} = \frac{0.74}{5} = 0.148 \text{ cm}$$

$$k) \quad \% \epsilon = \frac{\delta}{L_1} (100) = \frac{0.74}{5} (100) = 0.148 (100) \% = 14.8 \%$$

$$l) \quad \theta = \frac{A_1 - A_2}{A_1} = \frac{1.327 - 0.5026}{1.327} = 0.62$$

$$m) \quad \% \theta = \frac{A_1 - A_2}{A_1} (100) = \frac{1.327 - 0.5026}{1.327} (100) = 0.62 (100) = 62 \%$$

$$n) \quad \% C = \frac{\sigma_{max} - 40000}{100000} = \frac{60637.09 - 40000}{100000} = 0.20$$

Para calcular la tenacidad y el modulo de tenacidad se requiere trazar la grafica

$$o) \quad T = P \delta = R + Aa + Ab + \dots \dots \dots An = \dots \text{kg} - \text{mm}; \text{kg} - \text{cm}; \text{Lb} - \text{pu lg}$$

p) 
$$M_{ten} = \frac{T}{A_1 L_1} = \text{kg} - \text{mm} / \text{mm}; \dots \text{Lb} - \text{p lg} / \text{p lg}$$



PROBETA SOMETIDA A TENSION



PROBETA FRACTURADA



## 2.2.7.- DISCUSION DE RESULTADOS

---

---

---

---

---

---

---

---

## 2.3.- COMPRESION

Este termino se define como el trabajo que se debe desarrollar para aproximar las partículas del material sometido a la prueba o ensaye en la cual una probeta es sometida a una carga monoaxial gradualmente creciente (casi estática) hasta que ocurre la falla o se llega a la condición deseada por lo que respecta a el sentido y dirección de la fuerza de compresión es meramente contraria a la tensión.

Existen varios factores que se toman en cuenta para seleccionar el ensaye de compresión, las más importantes son:

- A) La conveniencia del material para comprobarse bajo un tipo de carga dado,
- B) La diferencia de las propiedades del material bajo las cargas de tensión o compresión.
- C) La dificultad y complicaciones para la sujeción o apoyos de los extremos de la pieza a ensayar.

Nota: En compresión: estamos uniendo o acercando las partículas de la probeta  
Cold Roll (rolado en frío, es un proceso de fabricación)

Generalmente los materiales frágiles son los que se ensayan a compresión.

Los materiales ferrosos y no ferrosos sus propiedades mecánicas son simplemente las mismas que las de la compresión y la tensión.

Las limitaciones especiales para iniciar el ensayo de compresión son:

- 1) La dificultad de aplicar la carga verdaderamente concéntrica y axial
- 2) El carácter relativamente inestable de este tipo de carga en contraste con la carga de tensión
- 3) La fricción entre los puentes de las maquinas de ensaye o las placas de apoyo y la superficie de los extremos de la probeta debido a la expansión lateral de esto.

- 4) Las áreas seccionadas relativamente mayores de la probeta para obtener un grado apropiado de la estabilidad de la pieza.

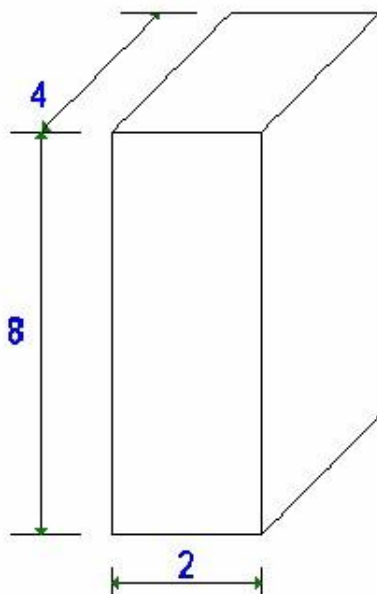
### 2.3.1.- PROBETAS PARA ENSAYO

Las probetas para ensayo de compresión son piezas pequeñas de madera deben estar limpias, libres de nudos y la fibra debe de ser en un caso paralela a la carga y en otro caso perpendicular a esta normalmente se usa 2 x 2 x 8cm con la fibra paralela con la carga. Para ensayos con fibras perpendiculares a la carga las probetas son 2 x 2 x 6cm. La carga se aplica a través de una placa metálica de 2 de ancho colocadas sobre el canto superior de la carga o a distancias iguales de los extremos colocándola con el Angulo recto respecto a la probeta, la resistencia a la compresión de ladrillo para construcción, se determina utilizando medio ladrillo con la superficie plana (la mayor) paralela a la placa (ensaye acostado) (ASTM – C - 67).

Normalmente las probetas de compresión reciben el nombre de columnas las cuales dependen del grado de esbeltez (GE) de dichas probetas y se calcula con la sig. Formula:

$$G.E = \frac{\text{dim ension _ vertical _ de _ la _ probeta}}{\text{dim ension _ mas _ pequeña _ de _ la _ sec cion _ transversal}}$$

EJEMPLO:



$$G.E. = \frac{8}{2} = 4$$

Se considera columna corta cuando el grado de esbeltez es igual o menor a 2. Se considera columna mediana cuando el grado de esbeltez es mayor de 2 y menor que 4. Se considera columna esbelta cuando el grado de esbeltez es mayor a 8.

### 2.3.2.- COMPRESION EN MATERIALES DÚCTILES

Los materiales dúctiles generalmente no se someten a compresión debido a que el efecto de la prueba se reduce a: Disminución de la probeta en lo que respecta a su altura e incremento simultaneo de la sección transversal una sin llegar a producir la ruptura. En consecuencia algunos de los resultados de tensión se aplican a compresión. Las propiedades que se pueden determinar en un material dúctil son:

- a) Esfuerzo en el límite elástico
- b) Coeficiente de elasticidad o modulo de Young (E)
- c) Esfuerzo a la Cedencia
- d) Resiliencia (R)
- e) Modulo de resiliencia (MR)
- f) Deformación total ( $\delta$ )
- g) Deformación unitaria o longitudinal ( $\epsilon$ )
- h) Por ciento de acortamiento o % de deformación ( $\%\epsilon$ )
- i) Esfuerzo máximo a la compresión ( $\sigma_{max}$ )
- j) Relación de Poisson ( $\eta$ )
- k) Deformación transversal ( $\theta$ )
- l) Porcentaje de deformación transversal ( $\%\theta$ )

#### A) ESFUERZO EN EL LIMITE ELASTICO (LEY DE HOOKE)

Todos los materiales se deforman cuando son sometidos a una carga dentro de los limites correspondientes los materiales tienden a recuperar su forma y dimensión original. A este efecto de recuperación de material se le reconoce como elasticidad.

Hooke encontró una relación entre la deformación elástica y la carga aplicada determinando que: "Las deformaciones son directamente proporcional a las cargas que las producen".

Posteriormente Young introdujo una constante de proporcionalidad que es el modulo o coeficiente de elasticidad (modulo de Young).

Por lo que tenemos que el esfuerzo en el Limite Elástico es igual a:

$$\sigma = \frac{P_{L.E.}}{A_0} \quad \text{kg /cm}^2, \text{ lb/plg}^2$$



PLE = Carga en el Limite Elástico.

$A_0$  = Área original o inicial de la probeta.

#### B) COEFICIENTE DE ELASTICIDAD (MODULO DE YOUNG) kg/cm<sup>2</sup>

$$E = \frac{PH_0}{\delta A_0} \quad \text{kg /cm}^2, \text{ lb/plg}^2$$

P y  $\delta$  = Se toman los valores del limite Elástico como máximo, puede seleccionarse  
Cualquier carga y su deformación correspondiente.

$H_0$  y  $A_0$  = Son las medidas iniciales.

P = tiene el valor de la carga en cualquier punto de limite elástico o zona elástica

$H_0$  = dimensión obtenida con la carga seleccionada

$A_0$  = es el área de la sección transversal original

$\delta$  = deformación obtenida con la carga seleccionada

#### C) ESFUERZO DE CEDENCIA

$$\sigma_{CED} = \frac{P_{CED}}{A_1}$$

NOTA: En forma muy general el esfuerzo de cedencia siempre esta abajo del 60% del  
esfuerzo máximo.

Los esfuerzos para materiales dúctiles hasta el punto de cadencia se basan en la carga  
aplicada entre la sección transversal original. (Igual que en tensión así como en los  
materiales frágiles)

#### D) RESILENCIA

Es la propiedad que tienen los materiales para absorber energía dentro del límite elástico,  
se calcula igual que en tensión.

$$R = \frac{1}{2} P \delta \quad \text{Kg-mm, lb.-pulg.}$$

$\delta$  = Deformación correspondiente a la última carga P dentro del Limite Elástico

En donde:

P = La carga aplicada en el limite elástico o limite de proporcionalidad

$\delta$  = La deformación correspondiente en el límite elástico.

#### E) MODULO DE RESILENCIA

El modulo de resiliencia representa el trabajo o energía absorbido por el material, por unidad de volumen y se calcula con la siguiente formula:

$$M_R = \frac{R}{\text{VolumenUtil}} \quad M_R = \frac{R}{V_1 A_1 L_1} \quad \text{Kg -cm/cm}^3, \text{lb-plg/plg}^3$$

#### F) DEFORMACIÓN TOTAL:

El material sometido a una carga presenta un cambio en su forma; este cambio es en sentido longitudinal y se representa por la disminución de longitud o de altura, la cual se denomina Deformación total y se representa por la letra griega ( $\delta$ ) delta minúscula.

$$\delta = H_1 - H_f \quad (\text{mm, cm, pulg})$$

$H_1$  = Longitud inicial

$H_f$  = Longitud final

#### G) DEFORMACIÓN UNITARIA LONGITUDINAL ( $\epsilon$ )

Representa la deformación experimentada por la probeta por unidad de longitud, es una razón adimensional y se representa por la letra griega epsilon ( $\epsilon$ ) y se calcula de la forma siguiente:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_1 H_1} = \frac{\delta}{H_1}$$

#### H) % DE DEFORMACION

La deformación unitaria se multiplica por 100 y se representa como porcentaje de deformación.

$$\% \epsilon = \left( \frac{\delta}{L_1} \right) (100)$$

#### I) ESFUERZO MÁXIMO DE COMPRESIÓN

Debido a que los materiales dúctiles no presentan carga de ruptura, el esfuerzo máximo se determina en base a las necesidades del diseño (esto es determinando la carga necesaria para comprimir la probeta un determinado porcentaje).

$$\sigma_{\text{MAX},C} = \frac{P_{\text{MAX},C} H_f}{A_1 H_1} \dots\dots\dots \text{Ec. 2}$$

$$\sigma_{\text{MAX},C} = \frac{P}{A_m} \dots\dots\dots \text{Ec. 1}$$

$A_1, A_0$  = área de la sección transversal antes de aplicar la carga

$H_1, H_0$  = altura de la probeta antes de aplicar la carga

Hf, H2 = altura de la probeta después de aplicar la carga y retirarla.

A<sub>m</sub> = Área Media

Nota: Debido a que la medición del área promedio A<sub>m</sub> es difícil de medir directamente por la irregularidad a través de la longitud de la probeta, el calculo se efectúa con la Ec. 2

#### J) RELACION DE POISSON

Se representa por la letra griega eta (η).

$$\eta = \frac{\theta}{\epsilon} = \frac{\frac{(A_2 - A_1)}{A_1}}{\frac{\delta}{H_1}} ; \quad A_f = \frac{(A_1)(H_1)}{H_f}$$

θ = deformación Transversal.

#### K) DEFORMACIÓN TRANSVERSAL

Se representa por la letra θ

$$\theta = \frac{A_f - A_1}{A_1}$$

#### L) PORCENTAJE DE DEFORMACIÓN TRANSVERSAL

$$\% \theta = \left( \frac{A_f - A_1}{A_1} \right) (100)$$

### 2.3.3.- COMPRESION DE MATERIALES FRÁGILES

Los materiales frágiles normalmente se someten a compresión, para este caso se utilizan materiales como el concreto, cerámicos, ladrillos, etc. los cuales presentan generalmente con su carga máxima el punto de ruptura; este tipo de material tiene muy poca deformación; las propiedades que generalmente se calculan son las siguientes:

- a) Coeficiente de elasticidad o Modulo de Young (ε).
- b) Esfuerzo en el límite elástico (σ).
- c) Esfuerzo de cedencia (σ<sub>ced</sub>).



d) Resistencia o esfuerzo máximo a la compresión ( $\sigma_c$ ).

Los materiales frágiles casi no tienen zona elástica y puede ocurrir que coincida el esfuerzo máximo con el punto de ruptura. Las fórmulas son similares a las utilizadas en el ensayo de tensión o la de compresión en materiales dúctiles.

a) Coeficiente de elasticidad

$$E = \frac{PH_1}{\delta A_1}$$

Para calcular el coeficiente, se considera la deformación ( $\delta$  delta minúscula) correspondiente a la carga  $P$ , seleccionada en el límite elástico. Recuerde que dentro de la zona elástica se puede seleccionar la carga y deformación. Así mismo se considera el área transversal original de la probeta.

La determinación  $\delta_1$  corresponde a la alcanzada con la carga  $P$  seleccionada dentro de la zona elástica.

b) Esfuerzo en el límite elástico

$$\sigma = \frac{P_{LE}}{A_1}$$

El esfuerzo en el límite elástico, se obtiene con la misma fórmula que se ha utilizado en tensión. Recuerde que la carga y la deformación son las correspondientes al límite elástico ó límite de proporcionalidad.

c) Esfuerzo de cedencia

$$\sigma_{CED} = \frac{P_{CED}}{A_1}$$

d) Resistencia o esfuerzo máximo a la compresión

$$\sigma_c = \frac{P_{MAX}}{A_1}$$

El esfuerzo máximo ó última resistencia de compresión en un material frágil es cuando la carga máxima con la carga de ruptura coinciden.

#### 2.3.4.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



## 2.4.- FLEXION Y DOBLES

### 2.4.1.- HIPOTESIS DE FLEXION

Primera hipótesis: es un elemento sometido a flexión dentro del límite elástico, en el cual se mantiene en un plano antes y después de la flexión.

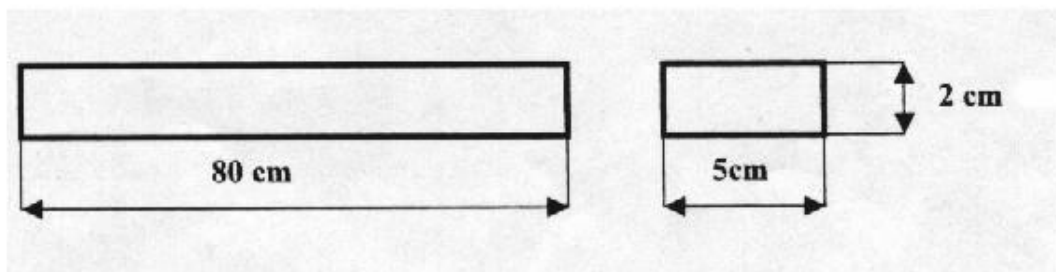
Segunda hipótesis: todos los materiales son perfectamente homogéneos e isotrópicos, (isotropía: es la característica de los materiales de tener las mismas propiedades en todas direcciones con un módulo elástico igual en tensión y en compresión).

### 2.4.2.-OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

El alumno obtendrá los conocimientos básicos del comportamiento de los materiales sometidos a flexión y los aplicará a los problemas prácticos.

Se analizarán los comportamientos de los materiales homogéneos aplicando fuerzas sobre la viga en el centro y aplicándolas también sobre dos de sus tercios. Cuando a un cuerpo se le aplica una carga y aparecen esfuerzos de compresión y tensión, se dice que está sometido a flexión.

Las dimensiones de la probeta son:



Se recomienda tener dos muestras con las fibras en distintas direcciones

### 2.4.3.- CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Si tenemos un elemento sobre el cual actúan unas fuerzas de tal manera que tiendan a inducir esfuerzos compresivos sobre la parte superior y sobre la parte inferior esfuerzos tensivos o de tensión de dicho elemento se comprenderá que está sometido a flexión. Se deben analizar los esfuerzos máximos dentro del límite elástico.

## FALLAS EN FLEXION

Para el hierro fundido y para el concreto simple las fallas que se presentan son siempre de manera súbita.

Las fallas de vigas de concreto armado pueden ser :

1. Falla del acero, debido a los esfuerzos sobre el punto de cedencia resultante en las grietas verticales sobre el lado tensado de la viga.
2. La falla del concreto en compresión que se presentan en las fibras mas alejadas del eje neutro.
3. Las fallas del concreto por tensión diagonal debido a los esfuerzos cortantes excesivos que resultan en la formación de grietas que descienden diagonalmente hacia las reacciones tornándose frecuentemente horizontales justamente arriba del armado principal en las vigas de claro simple.

Las fallas en vigas de de madera son:

1. Pueden fallar en compresión directa a la superficie cóncava.
2. Pueden romperse a tensión sobre la superficie convexa.
3. Pueden fallar por la flexión lateral de las fibras, actuando como columpio.
4. Pueden fallar por esfuerzo cortantes horizontales a lo largo de la fibra, cerca del eje neutro. Este tipo de fallas es súbito, es muy común en la madera de tamaños estructurales (madera desecada).
5. Puede fallar en compresión perpendicular a la fibra en los puntos de carga concentrada.

### PROBLEMA:

Se efectuó un ensayo de flexión en una viga de madera de pino con una longitud de 37.5 cm., de peralte de 2.07 cm. y la huella de 4.86 cm. La distancia entre los apoyos es de 33 cm. y el modulo de elasticidad es de 1800 ksi obteniendo los siguientes resultados:

Datos:

b = 4.86 cm.

d = 2.7 cm.

L = 33 cm.

E = 1800 ksi

NUMERO	CARGA (kg)	$\delta = 0.01 \text{ mm}$
1	50	0
2	100	0
3	150	8
4	200	21
5	250	82



6	300	125
7	350	170
8	400	205
9	450	250
10	500	330 max.
		RUPTURA

Calcular:

- a) Momento de inercia a tensión
- b) Momento flexionante para una carga concentrada
- c) Esfuerzo máximo
- d) Esfuerzo máximo en flexión
- e) Deflexión máxima (flecha)

$$a) \quad I = \frac{bd^3}{12} = \frac{(4.86)(2.07)^3}{12} = 3.592 \text{ cm}^4$$

$$b) \quad M = \frac{PL}{4} = \frac{(450)(33)}{4} = 3712.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

$$c) \quad \sigma_{\max} = \frac{M_{\max} C}{I} = \frac{(3712.5)(\frac{2.07}{2})}{3.592} = 1069.72 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

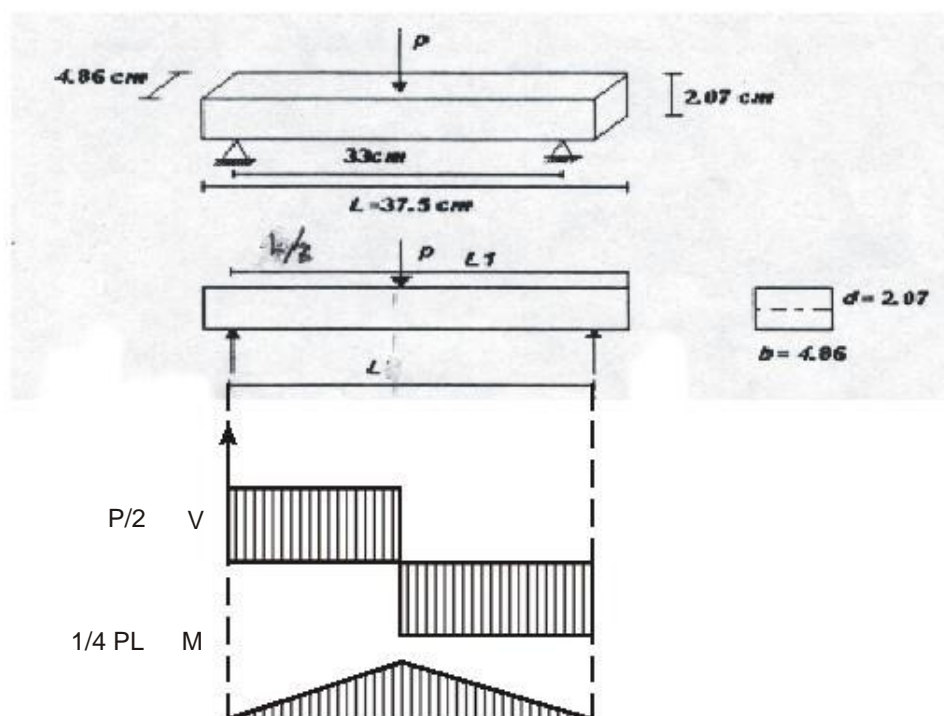
$$d) \quad \sigma_{\max f} = \frac{6M}{bd^2} = \frac{(6)(3712.5)}{20.82} = 1069.64 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

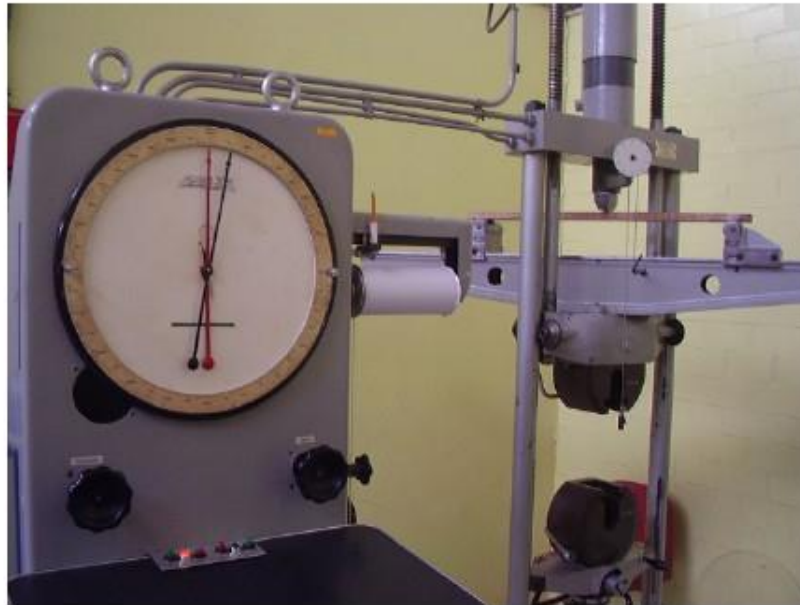
$$e) \quad E = (1800 \text{ ksi})(1000)(0.0703)$$

$$E = 126540 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

$$F = \frac{PL^3}{48EI} = \frac{(450)(33)^3}{48(126540)(3.592)} = 0.7412 \text{ cm}$$

$$c = \frac{1}{2} h \text{ (eje neutro)} = \frac{1}{2} (2.07) = 1.035 \text{ cm}$$









## 2.4.4.- DOBLEZ

Dentro de los procesos de formado, tenemos el doblado que es la operación más sencilla después del corte, otros procesos son estampado, rechazado, curvado con rodillos y formado con rodillos.

La norma es: NMX-B-113-1981-SCFI ACERO Método de prueba, doblado

### 2.4.4.1.-definición, características

El doblado o doblado básicamente es cambiar y darle forma a un material.

#### CARACTERÍSTICAS

Durante la operación es necesario evitar que la lámina experimente un alargamiento a fin de no afectar su espesor; lo anterior se logra, mediante la regulación exacta del mandril.





Para operaciones de doblado en general es necesario considerar los factores siguientes:

- a) Espesor del material
- b) Radios de curvatura interior
- c) Elasticidad del material

De ser posible evitar los cantos vivos; para dicho propósito se aconseja eliminar los cantos vivos y fijar los radios de curvatura inferiores iguales o mayores que el espesor de la lamina o doblar con el fin de no estirar excesivamente la fibra exterior y para garantizar un doblado sin ruptura.

Los radios de curvatura se consideran:

Para materiales dulces de 1 a 2 veces el espesor

Para materiales más duros de 3 a 4 veces el espesor

Durante el doblado se aplican fuerzas que causan la deformación permanente y los esfuerzos aplicados están por debajo del último esfuerzo a la tensión.

Los materiales sometidos a este tipo de esfuerzos tienden a tratar de recuperar su forma original, este fenómeno se conoce como resorteo (spring back) para prever lo anterior, el ángulo de doblado del dado macho se hace de 2 a 6 grados menores al ángulo necesario para que la pieza, dependiendo de su elasticidad se sujete al formado del macho.

#### TIPOS

La norma mexicana (NMX) indica que la prueba consiste en someter una probeta recta, sólida rectangular, circular o poligonal, a una deformación plástica por doblado sin invertir el sentido de la flexión durante la prueba. El doblado debe realizarse hasta que uno de los extremos de la probeta forme con el otro extremo, un ángulo X determinado.

Los ejes de los extremos de la probeta deben de permanecer en un plano perpendicular al eje de doblado.

La maquina de prueba más común consiste básicamente en dos apoyos, giratorios, de separación regulable y un mandril central intercambiable que ejercerá una presión sobre la probeta, mediante su desplazamiento. Los apoyos deben de ser más largos y el mandril más ancho que el diámetro o el ancho de la probeta y deben de ser indicados en la norma del producto.

Otro tipo de maquinas usadas en pruebas tiene una matriz en forma de “u”, de “v” y el mandril en su desplazamiento deformara la probeta. Las aristas de los apoyos deben redondearse y no deben presentar resistencia al desplazamiento de la probeta.

Se aplican 3 diferentes ensayos:

- a) prueba sobre dos apoyos
- b) prueba sobre bloque
- c) prueba de doblado a 3.1416 radianes

Básicamente en los procesos de fabricación, hay dos sistemas de doblado, ocupando para este fin el doblado macho y el doblado hembra al aire.

Doble al aire: este sistema consiste en usar dados de menor ángulo que el doblez que se requiere por lo tanto el material que se va a doblar solo toca 3 puntos, los bordes de la abertura del dado hembra y el filo del dado macho, por lo tanto si se desea un ángulo de 90 se acostumbra usar uno de 86 o uno de 30; el doblez se consigue regulando la profundidad, el avance de dado macho ajustado a la carrera de la prensa.

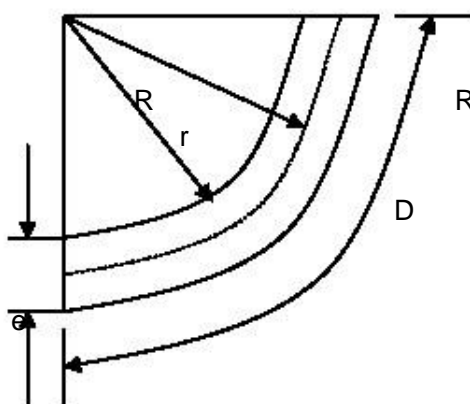
En la práctica se acostumbra una abertura del dado hembra igual a 8 veces el espesor de material, lo cual produce un radio interior del doblez aproximadamente del espesor del material.

A mayor abertura del dado hembra, mayor radio interior, pero menor tonelaje aplicado.

Doble de asiento. En este sistema de doblado, se usan dados con el ángulo y el radio exacto del doblez; el dado macho con el radio deseado, ya que el dado macho al llegar hasta el fondo acuña el radio interior con el radio hembra.

El sistema de doblez de asiento, tiene la ventaja de que los dobleces son precisos, tienen ángulo y radios, pero tienen el inconveniente de requerir más tonelaje que el doblez al aire, aproximadamente de 2 a 3 veces.

Calcular un desarrollo de doblez



$R$  = radio al eje neutro

$$R = r + \frac{1}{2}e$$

$r$  = radio de la pieza

$\alpha$  = ángulo

$e$  = espesor

$D$  = desarrollo

$$D = 0.01745330 R \alpha$$

$$L = (0.71 \times e) + (1.57 \times R) \text{ Para curvas de } 90 \text{ gra}$$



Recuerde: En acero rolado en frío, cuando no se conoce la dimensión “R” se considera dos veces el espesor del material.

## PROBLEMAS

1. Doblar una pieza de acero rolado en frío con una sección de (0.794cm) 0, 1.5cm el esfuerzo de fluencia es de 3515 k/cm<sup>2</sup>

$$F = \sigma \times A = 3515 \text{ kg/cm}^2 (0.794 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}) = 4186.365 \text{ kg}$$

2. obtener el desarrollo de una lamina calibre 14 (0.19cm) con un dobléz de 90° con un radio de 2 veces su espesor

$$e = 1.9 \text{ mm} \quad r = 0.38 \text{ cm.} \quad R = 0.38 + 1/2(1.9) = 0.475$$

$$D = (0.01745330) (0.475) (90^\circ) = 0.7461 \text{ cm}$$

$$L = (.71 \times .19) + (1.57 \times .475) = 0.7315 \text{ cm. (cuando no se conoce el radio)}$$

3. determinar la fuerza requerida para doblar una lamina cal. 14 (0.19cm), si la pieza tiene 10cm de longitud, la abertura del dado hembra es de 12.7mm y el esfuerzo de ultima resistencia a la tensión es 5624 Kg./cm<sup>2</sup> y la fibra neutra Y= 0.50 e

$$F = (1.307) (\sigma) (b) (e^2) / L ; F = 1.307 \times 5624 \times 10 \times (.19)^2 / 1.27 = 2089.413 \text{ kg}$$

## 2.5 IMPACTO

### 2.5.1.- PRINCIPIOS Y OBJETIVOS

Actualmente tenemos estructuras, equipos y maquinaria las cuales están sometidas a cargas dinámicas que involucran además esfuerzos de impacto.

Un tipo de carga dinámica es aquella que se aplica súbitamente, como es el caso del impacto de una masa en movimiento.

¿Qué ocurre al producirse un impacto?

Cuando un cuerpo a velocidad determinada golpea, se produce una transferencia de energía, esta produce un trabajo en las partes que recibió el golpe.

La mecánica del impacto además de abarcar los esfuerzos inducidos, toma en cuenta la transferencia, absorción y la disipación de energía.

La energía de un golpe puede absorberse de la siguiente manera:

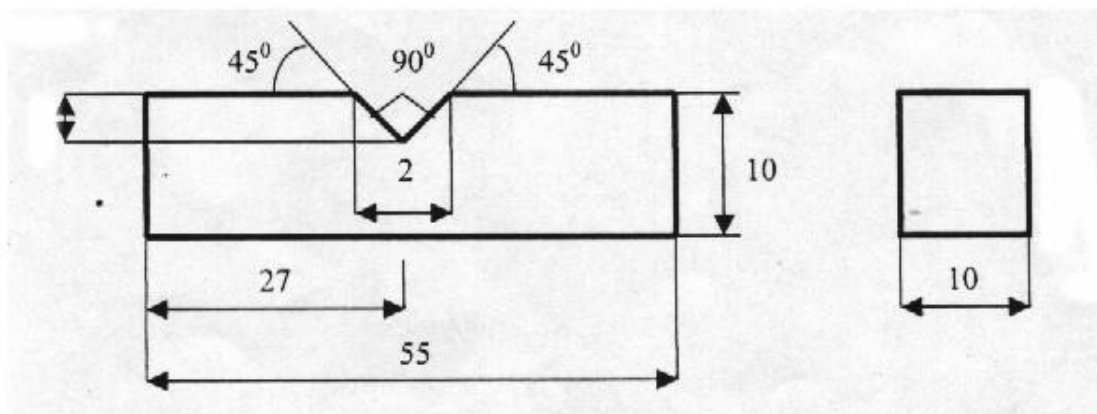
- a) A través de la acción friccional de las partes
- b) A través de la deformación plástica de los miembros o partes del sistema
- c) A través de los efectos de inercia de las partes en movimiento

### 2.5.2.- PROBETA PARA IMPACTO

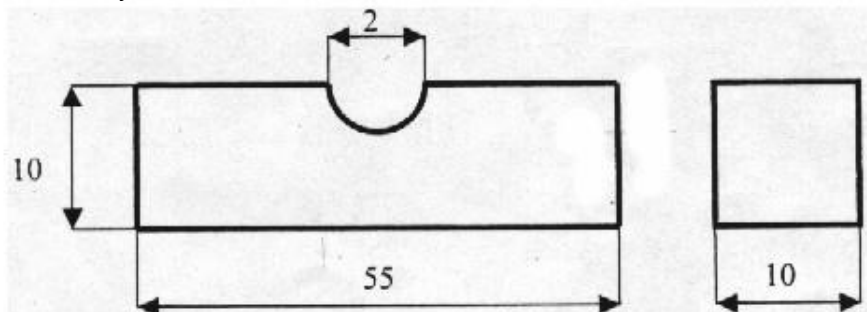
Cuando se realizan ensayos de impacto con aceros de alto y mediano contenido de carbono se pueden emplear probetas sin ranura debido a que se rompen con facilidad al recibir el golpe porque son frágiles. Para lograr que se fracturen las probetas se recomienda se ranuren en la forma siguiente:

- a) Con entalladuras (muesca) en forma de "V" que se usa en probetas de materiales fibrosos, dúctiles y algunos materiales frágiles.

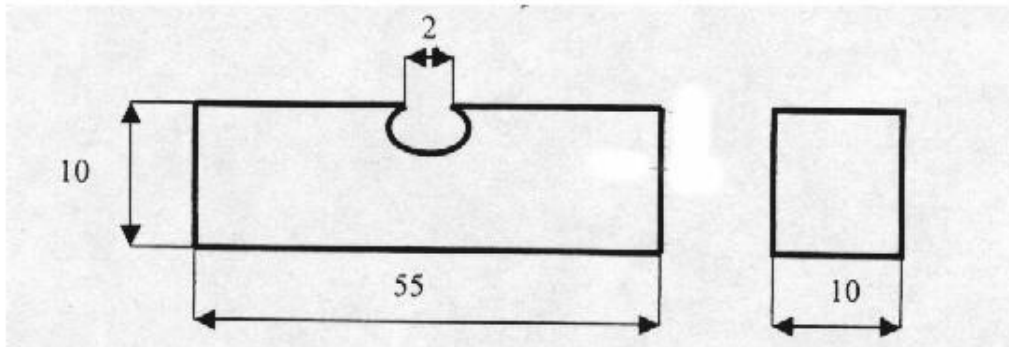
Acot: mm



- b) La entalladura en forma de "u" se efectúa en materiales considerados de dureza media o mayor.



- c) La entalladura en forma de ojo de cerradura se efectúa en materiales sintéticos como plásticos, acrílicos, (materiales poliméricos).

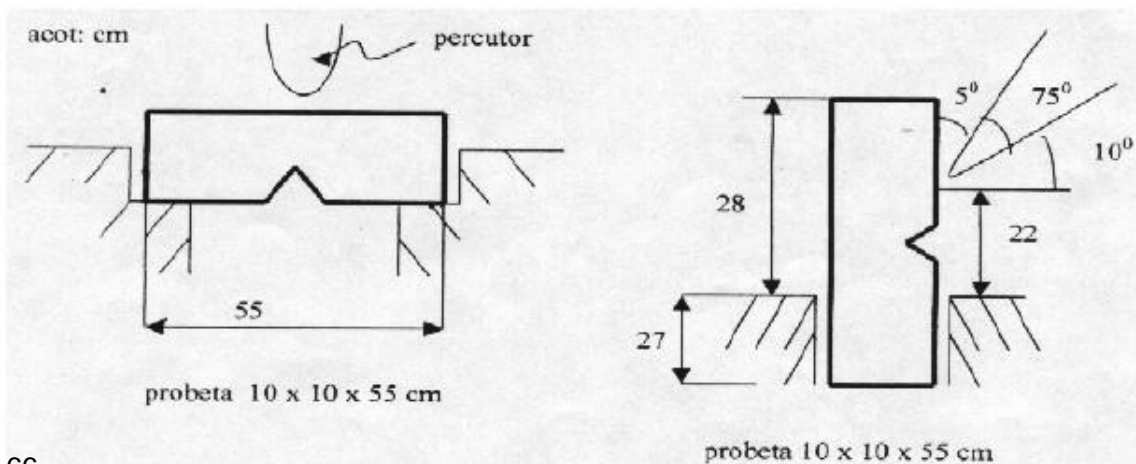


El efecto de la ranura es conectar los esfuerzos en su raíz e inducir patrones de esfuerzos axiales que limitan el flujo plástico e incrementan el límite elástico del material debido a que la mayor parte de energía de ruptura es absorbida en una sola región de la pieza originando una fractura de tipo quebradiza.

La tendencia de un material dúctil es de comportarse como un material frágil, al romperse la probeta ranurada, a esto se le denomina "sensibilidad de ranura de los materiales".

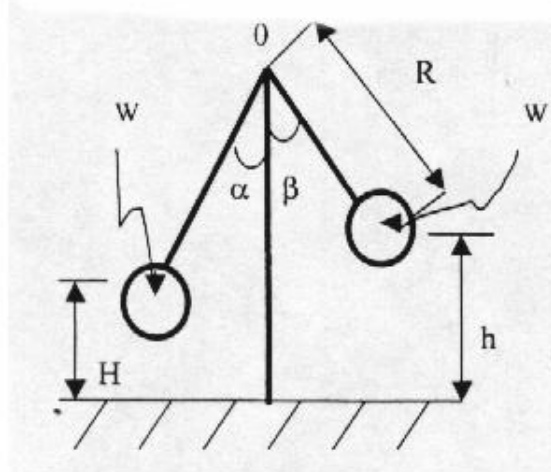
### 2.5.3.- ENSAYOS DE IMPACTO CHARPY E IZOD

Son los métodos mas comúnmente usados, en ambos se emplea el péndulo y las probetas ranuradas. La diferencia es que Charpy, la probeta la apoya en un yunque, como una viga simplemente apoyada y en el método Izod, la probeta se coloca como una viga en cantiliver.



Generalmente las maquinas para ensayo de impacto utilizan los siguientes elementos:

$W$  = peso del péndulo 19.31 kg.  
 $\alpha$  = ángulo inicial (Charpy =  $160.5^\circ$ )  
 (Izod =  $80.3^\circ$ )  
 $\beta$  = ángulo de elevación  
 $H$  = altura de caída del centro de gravedad del péndulo  
 $h$  = altura de elevación del centro de gravedad del péndulo  
 $R$  = distancia del centro de gravedad Del péndulo a eje de rotación  
 cero.



El ensayo de impacto es de tipo dinámico en el cual se golpea y se puede llegar a la ruptura mediante un golpe dado a una probeta seleccionada, la cual debe ser maquinada y pulida superficialmente, usualmente ranurada. Por lo tanto la prueba de impacto se define como: la energía necesaria para romper una barra prueba por una carga con impulso. Que no es otra cosa que indicio de la tenacidad de un material sometido a la carga de choque.

También se define como el choque de dos materiales dejando en el material sometido a prueba una huella.

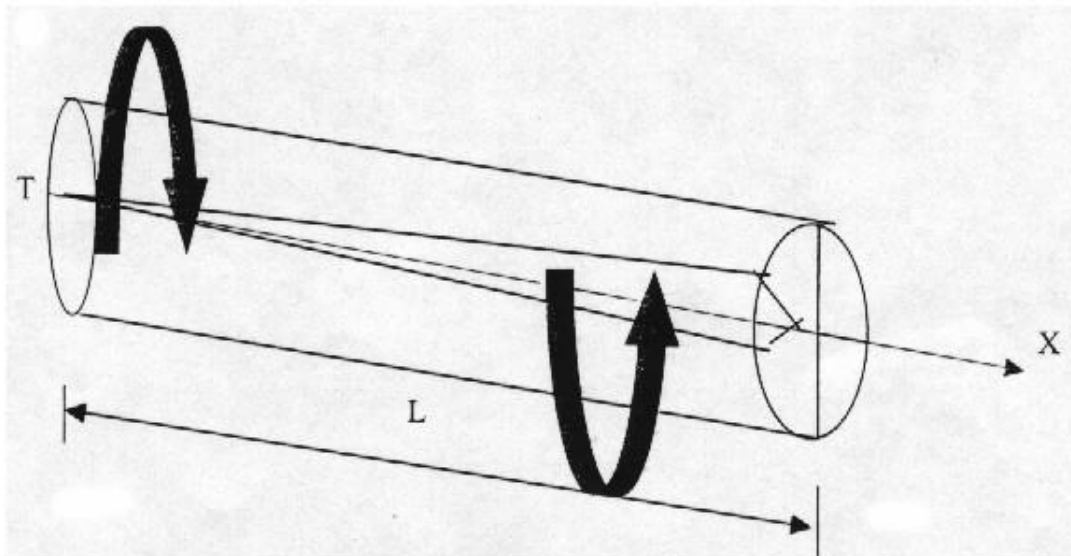
Generalmente el ensayo de impacto se efectúa mediante el uso de una pieza que cae (se conoce la masa de la pieza o de un péndulo oscilante o un volante rotatorio). En algunos ensayos se produce la fractura con un solo golpe, en otros se emplean varios golpes.

Un péndulo pesado inicia con una altura ( $H$ ), gira describiendo un arco golpeando a la probeta, la rompe y continua su giro alcanzando una elevación menor final ( $h$ ). Conociendo la posición inicial, la elevación final y el ángulo del péndulo se calcula la diferencia de energía potencial; esta diferencia es la energía absorbida por la probeta durante su ruptura.

## 2.6.- TORSION

### 2.6.1.- GENERALIDADES

Cualquier vector momento que sea colineal con un eje geométrico de un elemento mecánico se llama vector de momento torsionante debido a que la acción de tal carga hace que el elemento experimente una torcedura alrededor o con respecto a ese eje. Una barra sometida a tal momento se dice que esta en torsión.



En la figura se muestra un momento torsionante  $T$  aplicado a una barra mostrando el sentido. Los vectores Momento torsionante se representan con las flechas mostradas en el eje  $X$ . El ángulo de torsión de una barra de sección circular se calcula con la siguiente fórmula:

$$\theta = \frac{TL}{GJ}$$

En donde:  $\theta$  = ángulo de torsión (rad)

$T$  = momento torsionante (kg - cm)

$L$  = longitud de la barra (cm)

$G$  = modulo de rigidez (Kg./cm<sup>2</sup>)

$J$  = momento polar de inercia del área transversal (cm<sup>4</sup>)

El momento torsionante " $T$ " se calcula considerando el valor de la fuerza y el radio.

$$T = F \cdot R$$

El modulo de rigidez " $G$ " se calcula considerando el modulo de elasticidad " $E$ " por una constante de valor de 0.385:

$$G = 0.385 E$$

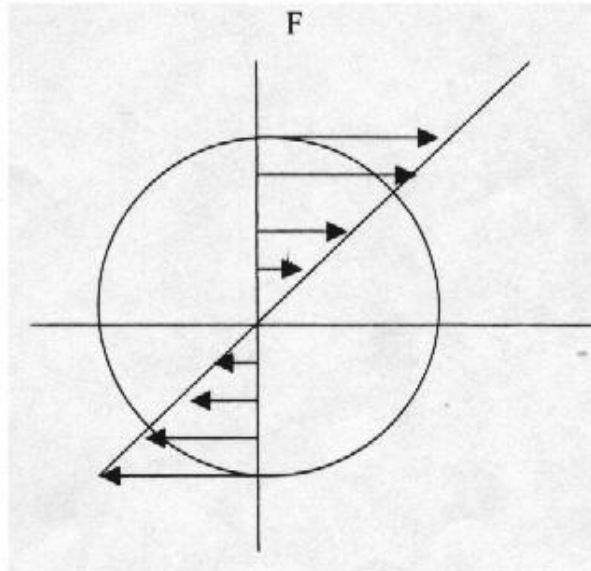
## 2.6.2.- ELEMENTOS CONCEPTUALES

Para el análisis de torsión se consideran las siguientes hipótesis:

- Sobre la barra actúa un momento de torsión puro y las secciones transversales analizadas están alejadas del punto de aplicación de la carga y de un cambio de diámetro.

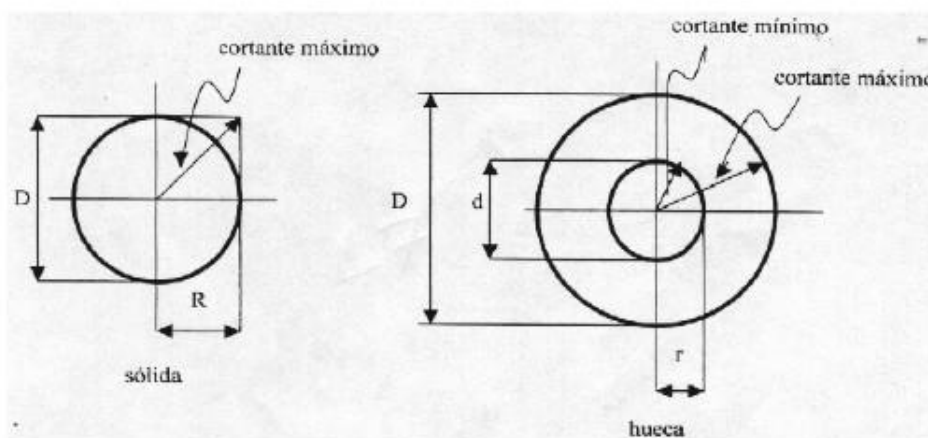


- b) Las secciones transversales adyacentes, originalmente planas y paralelas, permanecen en este estado después de la torsión; además toda la línea radial permanece recta.
- c) El material cumple con la ley de Hooke.
- d) Conociendo las deformaciones en el rango elástico al diseñar una pieza que se someterá a torsión; se tomara como máximo el esfuerzo de fluencia.



### 2.6.3.- CALCULO DEL ENSAYE DE TORSION

En esta prueba se utilizan probetas cilíndricas macizas o huecas. La deformación que resulta indica el ángulo de torsión de la probeta. El esfuerzo cortante máximo de la flecha cilíndrica maciza o hueca se calcula como sigue:





## CILINDRICA (SÓLIDA)

En el caso de una barra maciza, el esfuerzo vale cero en el centro y es máximo en la superficie. La distribución es proporcional al radio; por lo tanto, el esfuerzo cortante máximo se calcula:

$$\sigma_{\max} = \frac{2T}{\pi R^3} = \frac{16T}{\pi D^3} = 5.1 \frac{T}{D}$$

En donde:

$\sigma$  = Esfuerzo cortante (Kg. / cm<sup>2</sup>)  
T = Momento torsionante.  
D = Diámetro de la barra.

El momento polar de inercia (J), depende de la sección transversal:

$$J = \frac{\pi R^4}{2} = \frac{\pi D^4}{32} [\text{cm}^4]$$

## PROBLEMA

Se tiene una barra cilíndrica de aluminio (macizo) con una longitud entre cabezales igual a 15 cm, un diámetro de 12.8 mm y un E = 713 000 kg/cm<sup>2</sup>, el esfuerzo cortante de fluencia es de 560,642 Kg/cm<sup>2</sup>, y se le aplica una fuerza de 100 kg.

### CALCULAR:

- Área de la sección transversal
- Momento polar de inercia
- Momento torsionante
- Esfuerzo cortante máximo
- Modulo de rigidez
- Angulo de torsión

### DATOS

L = 15cm  
D = 12.8 mm  
E = 713 000 Kg/cm<sup>2</sup>  
 $\sigma_{cf} = 560,642 \text{ Kg/cm}^2$

F = 100 Kg.

$$a) \quad A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (1.28\text{cm})^2}{4} = 1.2867\text{cm}^2$$

$$b) \quad J = \frac{\pi D^4}{32} = \frac{\pi (1.28\text{cm})^4}{32} = 0.2635\text{cm}^4$$

c)  $T = (F) (R) = (100) \times (0.64) = 64\text{Kg-cm}$

NOTA: Si se desea calcular el torque o par de Torsión utilizaremos la fuerza por la distancia y además se aprovechara para convertirlos en N - m que utiliza la máquina.

$\tau = F \cdot d$        $\tau = 100\text{kg} = 980.932 \text{ N}$  ;  $15\text{cm} = 150\text{mm}$

TORQUE = (Fuerza)(distancia) =  $(980.392 \text{ N})(150 \text{ mm})(1 \text{ m} / 1000 \text{ mm}) = 147.0588 \text{ N-m}$

d)  $\tau_{\max} = 5.1 \frac{T}{D^3} = 5.1 \frac{64\text{kg-cm}}{(1.28\text{cm})^3} = 155.6435\text{kg} / \text{cm}^2$

e)  $G = (0.385) (E) = 0.385 \times 713,000 = 274,505 \text{ Kg/cm}^2$

f)  $\theta = \frac{TL}{GJ} = \frac{(64\text{kg-cm})(15\text{cm})}{(274505\text{kg} / \text{cm}^2)(0.2635\text{cm})^4} = 0.132721\text{kg} / \text{cm}^2$

Para convertir en grados tenemos que:

$\theta = (0.132721) \times (57.29578) = 0.760 \text{ grados.}$

### CILINDRO HUECO O CORONA

El esfuerzo cortante se calcula de la siguiente forma:

$$\tau_{\max} = 5.1 \frac{T}{D^3} \left[ \frac{1}{(1-\alpha)^4} \right]$$

TABLA DE VALORES EN CILINDROS HUECOS						
$\alpha = d/D$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95
$(1/1-\alpha^4)$	1.0667	1.1489	1.3259	1.6194	2.9136	5.3908

El esfuerzo cortante máximo también se puede calcular de la siguiente manera:

$$\tau_{\max} = \frac{2T}{(\pi)(R^4 - r^4)} = \frac{16T}{(\pi)(D^4 - d^4)}$$

El esfuerzo cortante mínimo:

$$\tau_{\min} = \frac{r}{(R)(\tau_{\max})}$$

El momento polar de inercia se calcula:

$$J = (D^4 - d^4) \frac{\pi}{32} (\text{cm}^4)$$

Cuando una barra se tuerce se desarrollan esfuerzos de tensión y compresión, estos esfuerzos siempre están acompañados del esfuerzo cortante. El esfuerzo cortante máximo se presenta a un ángulo de 45° con respecto a los esfuerzos principales y su valor es la mitad de la diferencia entre el esfuerzo principal máximo y mínimo.

$$\tau_{C \max} = \frac{(\tau - \tau)}{2}$$

PROBLEMA: Una barra de aluminio maciza redonda con una longitud entre cabezales de 15cm, un diámetro de 12.8 mm ; E= 713000 kg/cm<sup>2</sup> le aplicamos una carga de 250 kg.

Determinar:

a) Área sección transversal

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (1.28\text{cm})^2}{4} = 1.2867\text{cm}^2$$

b) Momento polar de Inercia

$$J = \frac{\pi D^4}{32} = \frac{\pi (1.28\text{cm})^4}{32} = \frac{8.44331}{32} = 0.2635\text{cm}^4$$

c)  $\tau = (F/R) = (250\text{kg})(0.64) = 160\text{kg} - \text{cm}$

d)  $\tau_{\max} = 5.1 \frac{160\text{kg} - \text{cm}}{(1.28\text{cm})^3} = 389.09 \text{ kg/cm}^2$

e)  $G = 0.385E = 0.385(713000 \text{ kg/cm}^2) = 274,505 \text{ kg/cm}^2$

f)  $\theta = \frac{TL}{GJ} = \frac{(160\text{kg} - \text{cm})(15\text{cm})}{(274,505 \text{ kg/cm}^2)(0.2635\text{cm}^4)} = \frac{2400}{72,332.06} = 0.03318 \text{ kg/cm}^2$

Convirtiendo:

$$0.03318 \times 57.29578 = 1.90 \text{ grados}$$

## 2.7.- TERMOFLUENCIA

La deformación plástica a altas temperaturas se le conoce como termofluencia.

En ciertas aplicaciones, como turbinas de vapor en plantas termoeléctricas, motores de aviones a reacción y cohetes, hornos de fundición y reactores nucleares, por ejemplo, los materiales que están expuestos a temperaturas extremadamente altas. En el caso de los metales, la influencia de la temperatura se basa en la  $T_f$  la temperatura absoluta de fusión. Cuando la temperatura es del orden de 0.3 a 0.6  $T_f$  o mayor, los movimientos de los

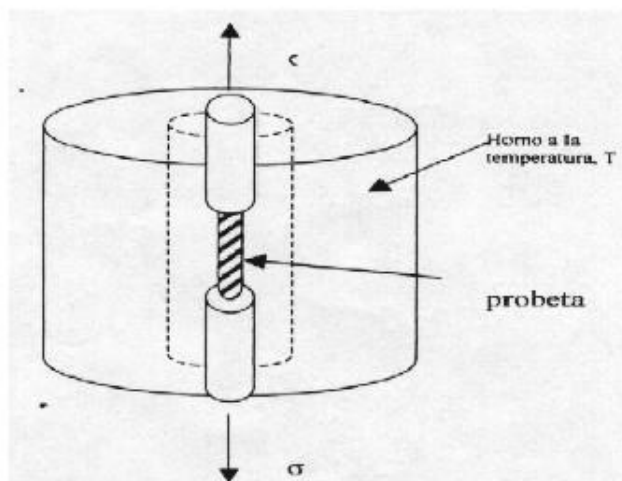
átomos inducen una deformación muy lenta, llamada termo fluencia, si el material esta sometido a esfuerzos. Esta deformación termina por causar problemas dimensionales en la estructura o componente, los cuales provocan mal funcionamiento falla. Si permanece sometidos a esfuerzos a temperaturas altas, el material se romperá o fracturara finalmente.

La  $T_f$  también se utiliza en las cerámicas cristalinas puras. Sin embargo, en la práctica la mayoría de las cerámicas son de múltiples componentes y no tienen una temperatura de fusión definida. La medida de la capacidad refractaria es el cono pirométrico equivalente o el punto de reblandecimiento: la temperatura a la que un cono de cerámica estándar de la cerámica estudiada se reblandece o dobla. En el caso de los vidrios, el punto de reblandecimiento es la temperatura a la que el vidrio se deforma por efecto de su propio peso. Cuando se trata de polímeros se utiliza la  $T_v$ , (temperatura de transición vítrea) o la temperatura de desviación con carga TDCC. Esta segunda temperatura es relativamente baja, de tal manera que, a temperatura ambiente, los polímeros y plásticos presentan una importante termofluencia,

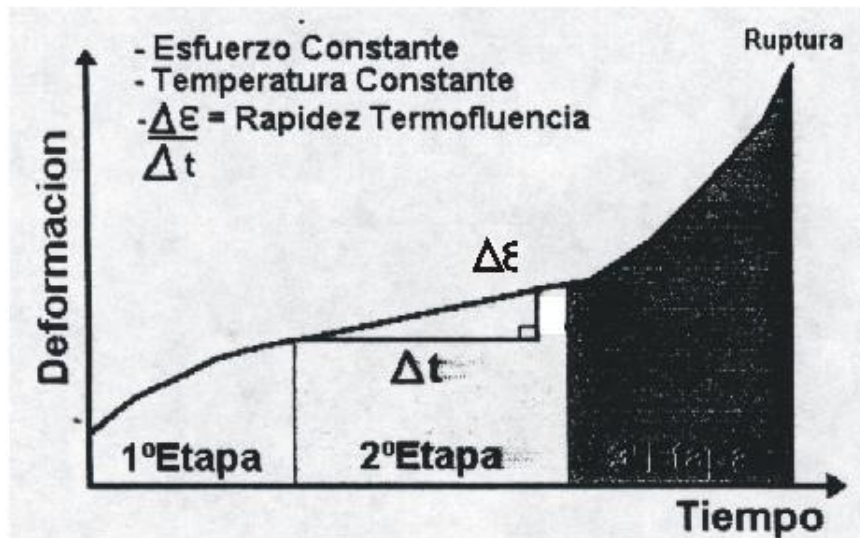
#### ENSAYO DE TERMOFLUENCIA.

Se aplica un esfuerzo constante a una probeta calentada a alta temperatura. En cuanto se le aplica el esfuerzo, la probeta se deforma elásticamente una pequeña cantidad, inicio de la primera etapa.

Para determinar el comportamiento de un material se hace aplicando una carga axial constante, normalmente en forma de tensión, a una barra o muestra cilíndrica del material.



Representación de las etapas de un ensayo de termofluencia.



Se mide la deformación por termofluencia con respecto al tiempo y se registra en que tiempo se presenta la ruptura o fractura; si esta ocurre durante el ensayo. Habitualmente, los ensayos sobre un material dado se llevan a cabo a diversas temperaturas y esfuerzos, y la duración de los ensayos puede ir desde menos de un minuto hasta un año o varios.

Curva típica de termofluencia muestra la deformación producida como una función del tiempo para un esfuerzo y temperatura constante.

Las altas temperaturas permiten que las dislocaciones de borde del metal asciendan en una dirección perpendicular a los planos de deslizamiento, lo que provoca deformación aun con esfuerzos reducidos

Rapidez de la Termofluencia: es la pendiente de la porción estable de la curva de termofluencia. (2ª Etapa).

$$R..T. = \frac{\Delta \text{Deformación } \Delta \epsilon}{\Delta \text{tiempo}} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t}$$

Parámetro de Larson-Miller: es usado para condensar la relación esfuerzo-temperatura-tiempo de ruptura en una sola curva.

$$L.M. = \frac{T}{1000} [A + B * \ln(t)]$$

T = temperatura en grados Kelvin.

t = tiempo en horas

A y B = constantes del material

### 2.7.1.- MECANISMOS DE TERMOFLUENCIA

Es necesario establecer la diferencia entre el comportamiento de termo fluencia de los sólidos amorfos y sólidos cristalinos.

En respuesta al esfuerzo aplicado a un sólido amorfo las moléculas o grupos de moléculas se deslizan unas respecto a otras de manera que dependen del tiempo, lo que da por resultado la deformación por termo fluencia. Este mecanismo se conoce como termo fluencia viscosa. Debido a que los materiales también tienen deformación ya sea elástica o plástica, la termo fluencia se designa habitualmente como deformación visco elástica o visco plástica.

En mecánica de fluidos, el esfuerzo cortante y la razón de cambio de deformación están relacionados con la viscosidad del líquido, es decir:

$$\eta_T = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Donde  $\eta_T$  es la viscosidad de corte,  $\tau$  es el esfuerzo cortante y  $\dot{\gamma}$  es la razón de cambio de la deformación cortante. En la deformación por termo fluencia debida a tensión también podemos definir una viscosidad a tensión también podemos definir una viscosidad de tensión, como:

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}}$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo de tensión y  $\dot{\epsilon}$  es la razón de cambio de deformación por tensión. Para una sustancia viscosa ideal incompresible,  $\eta = 3\eta_T$ .

El movimiento de las moléculas en los sólidos amorfos (termo fluencia viscosa) constituye un proceso de difusión favorecido por los incrementos de temperatura. Por consiguiente se le conoce como un proceso activado térmicamente y, como tal, se espera que siga una ecuación de tipo Arrhenius de la forma:

$$\dot{\epsilon} = A e^{\frac{-Q}{RT}}$$

Donde  $Q$  es la energía de activación en calorías/mol,  $R$  es la constante de gases  $\approx 2\text{cal/mol/K}$  y  $T$  es la temperatura absoluta en K idealmente, en esta ecuación de tipo Arrhenius, tanto  $Q$  como  $A$  son constantes. Sin embargo, en la termo fluencia puede ser que ambas dependan del esfuerzo.

En los materiales cristalinos por ejemplo: los metales y sus aleaciones y las cerámicas cristalinas) la termo fluencia se produce ya sea como por difusión o como termo fluencia por dislocaciones. La termo fluencia por difusión implica el movimiento de varianzas y

esto puede ocurrir principalmente a través de los granos o a lo largo de los límites de grano. El movimiento de vacancias a través de los granos se denomina mecanismos de Navarro-Hering en tanto que el que se produce a lo largo de los límites de grano se conocen como mecanismo de Coble.

En estos casos las razones de deformaciones están dadas por:

$$\dot{\epsilon} = \frac{A_2 \sigma}{d^2} e^{-\frac{Q_v}{RT}}$$

y

$$\dot{\epsilon} = \frac{A_2' \sigma}{d^3} e^{-\frac{Q_b}{RT}}$$

Donde  $A_2$  y  $A_2'$  son constantes del material,  $d$  es el diámetro de grano,  $Q$  es la energía de activación para la auto difusión o difusión volumétrica, y  $Q_b$  es la energía de activación para la difusión en los límites de grano. Es necesario advertir que las dos ecuaciones anteriores la razón de cambio de deformación es directamente proporcional a  $d^{-2}$  o a  $d^{-3}$ .

Por lo siguiente cuanto más pequeño es diámetro del grano, tanto mas rápido es la razón de cambio de deformación. Por tanto, los tamaños de grano grandes favorecen la disminución de la razón de cambio de deformación.

Lo último en este campo es la eliminación de los límites de grano y el uso de materiales monocristalinos a altas temperaturas para conseguir la mínima razón de termo fluencia (deformación). Se utilizan superaleaciones de níquel monocristalinas para fabricar alabes de turbina.

La termo fluencia por dislocaciones implica el movimiento de dislocaciones. No se conoce bien el mecanismo exacto pero se piensa que el escalamiento de dislocaciones es un factor importante. El escalamiento de dislocaciones significa que el borde del plano adicional hasta otro plano paralelo al plano anterior en el que estaba previamente. Este también implica la difusión de vacancias, por lo que la razón de cambio de deformación también se activa térmicamente y tiene la forma

$$\dot{\epsilon} = A_3 \frac{\sigma_m}{T} e^{-\frac{Q}{RT}}$$

Donde el exponente  $m$  varía de un material a otro, pero típicamente es del orden de cinco.

### 2.7.2.- DISEÑO CON TERMOFLUENCIA: PARAMETROS DE TIEMPO TEMPERATURA

En el diseño en ingeniería en el que interviene la termo fluencia, no debe haber deformación excesiva ni ruptura dentro de la duración deseada del componente o estructura la duración podría ser de 20 años o más. Sin embargo se obtienen datos de

ensayo para un tiempo mucho más corto que esta duración esperada. A fin de estimar el esfuerzo para razones de deformación muy pequeñas a la temperatura de servicio, podemos extrapolar las curvas de  $\sigma$  en función de  $\epsilon$  hasta razones de deformación muy reducidas como alternativa, podemos explorar las curvas de  $\sigma$  en función de  $T$  a tiempos muy largos. Sin embargo, estas extrapolaciones no son aconsejables porque los mecanismos de termo fluencia pueden cambiar.

Una estrategia más satisfactoria consiste en utilizar parámetros de tiempo-Temperatura que se basan en ensayos de corto tiempo a temperaturas más altas que la temperatura de servicio esperado. Estos parámetros se usan después de estimar el comportamiento en tiempos más largos a temperaturas de servicio que es mas baja. Dos de estos parámetros, el de Sherby - Dorn y el de Larson - Miller se basan en la razón de cambio por termo fluencia viscosa y no en las teorías aceptadas mas recientes de termo fluencia por difusión a saber: la termo fluencia de Nabarro, Henry o de Coble. No obstante, ambos proporcionan estimaciones razonables, pero ninguno de ellos ofrece una clara superioridad. Lo primero que debemos hacer es describir la ecuación como:

$$d\epsilon = A(\sigma) e^{-\frac{Q}{RT}} dt$$

Integrando ambos miembros de la ecuación y desechando la constante de integración se encuentra que la deformación por termo fluencia estacionaria es:

$$\epsilon_N = A(\sigma) \left[ t \exp \left( \frac{Q}{RT} \right) \right]$$

En la ecuación  $A(\sigma)$  es una constante para un esfuerzo específico, por lo tanto, la deformación por termo fluencia estacionaria es una función de la cantidad encerrada entre corchetes, este término se designa como  $\theta$ , es decir:

$$\theta = t \exp \left( \frac{Q}{RT} \right)$$

Y se le llama como parámetro de tiempo compensado por temperatura (TCT). Los datos experimentales indican que la deformación por termo fluencia o la ruptura o fractura es razonablemente constante para un valor dado de  $\theta$  por consiguiente, se puede emplear  $\theta$  como parámetro de diseño.

Tomando el logaritmo natural (de base e) de ambos lados de la ecuación convirtiendo después los logaritmos naturales a logaritmos comunes (de base 10) y utilizando  $\theta_r$  y  $t_r$  obtenemos lo siguiente:

$$\log \theta_r = \log t_r - 0.217 \left( \frac{1}{T} \right)$$



### 2.7.3.- PARAMETRO DE SHERBY - DORN

Este planteamiento supone que  $\theta$ , es función solo del esfuerzo y que la energía de activación  $Q$ , es constante. El parámetro S-D es

$$P_{S\_D} = \log \theta_r$$

Si el esfuerzo es constante, PS-D es constante, recordando la ecuación:

$$\log t_r = P_{S\_D} + 0.217Q \left( \frac{1}{T} \right)$$

la ecuación anterior sugiere que si graficamos  $1/T$  en función del logaritmo  $T$ , para un esfuerzo constante, la grafica debe ser lineal y de ella obtenemos  $Q$  a partir de la pendiente y el parámetro PS-D cuando  $1/T$  es igual a cero como se muestra para un esfuerzo específico puesto que  $Q$  se supone constante las graficas lineales de diferentes esfuerzos presenta la misma pendiente pero el PS-D varían para diversos aceros estructurales y aleaciones de níquel de alta temperatura,  $Q \approx 90000$  cal/mol.

Una vez conocida  $Q$ , se utilizan los datos de esfuerzo-tiempo para ruptura (duración) para construir una grafica de PS-D función del esfuerzo. Los datos de los esfuerzos y su temperatura caen sobre una sola curva.

El grado de ajuste o el coeficiente de correlación de la única curva con todos los datos determinen el grado de éxito del parámetro en la predicción del tiempo para la ruptura. Con base a una grafica y a una ecuación se puede predecir el tiempo para ruptura (duración) para valores concretos de esfuerzo y temperatura. Para el esfuerzo específico que se espera el material soporte a la temperatura de aplicación se obtiene el parámetro PS-D y después aplicando la ecuación se obtiene  $T_r$ , por otro lado se puede elegir el tiempo para ruptura deseado para la estructura a la temperatura de aplicación.

En este caso, se obtiene el parámetro PS-D y después se obtiene el nivel de esfuerzo predicho que el material puede soportar. También se puede determinar la duración en servicio en términos de termo fluencia para niveles específicos de termo fluencia especificada (por ejemplo: 1 o 2%) se considera el criterio de falla y a la duración en servicio, ahora se llama  $T_f$ , tiempo para falla en vez de  $T_r$  el parámetro PS-D y la ecuación también se pueden emplear en esta situación si se sustituye  $t$  por  $t_f$  y se determina el parámetro PS-D a partir de datos  $t_f$  en vez de  $t$ .

### 2.7.4.- PARAMETRO DE LARSON- MILLER

En este planteamiento se supone que  $\theta$  es constante y no varia con el esfuerzo pero se considera a la energía de activación como una función del esfuerzo. Recordando la ecuación

$$\log \theta_r = \log t - 0.217 \left[ \frac{1}{T} \right]$$

Y definiendo el parámetro PM-L como 0.217Q.

$$P_{L-M} = 0.217Q = T ( \text{Log} t_r + C )$$

Donde  $C = -\log \theta_r$ . La unidad T en la ecuación anterior es K y  $t_r$  esta en horas. Sin embargo, la unidad de T uso generalizado en las publicaciones para el PL-M es el grado Fahrenheit, en cuyo caso se emplea la notación  $T_f$ . el parámetro calculado con esta ultima es  $P'_{L-M}$  y esta dado por

$$P'_{L-M} = (T + 460) = T ( \text{Log} t_r + C )$$

$$P_{L-M} = 1.8 P'_{L-M}$$

Para un esfuerzo dado, la energía de activación se mantiene constante y, por lo tanto,

$$\log t_r = P_{L-M} \left[ \frac{1}{T} \right] + C$$

Y una grafica de  $1/T$  en función de lo que da el PL-M como la pendiente de la grafica lineal (que es igual a  $0.217Q$ ) con diferentes esfuerzos se obtienen diferentes PL-M, pero la ordenada al orden en  $1/T = 0$  es una constante en  $-C$ , el valor de la constante C para diversos aceros y otros metales estructurales en ingeniería es del orden de 20. Si se conoce  $C'$  se grafican los parámetros PL-M. como abcisas en la figura.

En función del esfuerzo para el mismo material utilizado en el parámetro PS-D. En la figura se utiliza el procedimiento de diseño de la misma manera que el anterior a este en

conjunto con la ecuación  $\log t_r = P_{L-M} \left[ \frac{1}{T} \right] + C$ . En ausencia de la información mas

especifica, se puede usar un valor  $C = 20$  para estimar la duración en servicio en términos de termo fluencia. De la misma manera como se utiliza el PSD, el PL-M sirve para estimar la duración en servicio,  $t_f$ , hasta una deformación por termo fluencia previa a la ruptura, siempre y cuando, desde luego, los datos de  $t_f$  estén disponibles.

## 2.8.- FATIGA Y ANALISIS DE FALLA

### 2.8.1.- PRINCIPIOS

El término fatiga describe la falla de un material bajo la acción de esfuerzos repetidos durante un periodo de tiempo. Muchos esfuerzos pequeños pueden causar a falla de las piezas en comparación con el esfuerzo requerido para causar la falla por alargamiento de golpe.

Se considera que el 90 % de fallas de servicio en partes mecánicas se debe a la fatiga de los materiales.

### 2.8.2.- ESFUERZOS CICLICOS


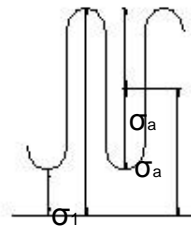
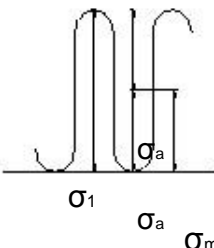
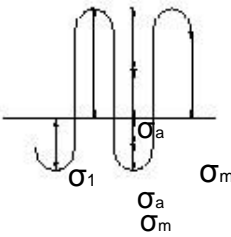
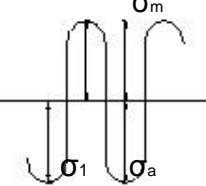
La mayoría de los esfuerzos estructurales quedan sometidos a la variación de cargas aplicadas causando fluctuaciones de los esfuerzos en las diferentes partes del montaje.

Si los esfuerzos fluctuantes son de magnitud suficiente, aún cuando el máximo esfuerzo aplicado sea considerablemente menor que la resistencia estática del material, la falla ocurre cuando el esfuerzo se repite en un número suficiente de veces.

Los esfuerzos pueden ser causados por cargas axiales, de corte, de torsión, flexión o por una combinación de ellos.

La clasificación de los esfuerzos cíclicos son;

- a) Esfuerzo sostenido,  $\sigma_1$
- b) Esfuerzo pulsante, entre  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$
- c) Esfuerza pulsante, entre  $\sigma_1$  y 0
- d) Esfuerzo parcialmente invertido, entre  $\sigma_1$  y  $-\sigma_2$  cuando  $\sigma_2 < \sigma_1$
- e) Esfuerzo completamente invertido, entre  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  cuando  $\sigma_1 = \sigma_2$

TIPOS DE VARIACION DE ESFUERZOS		NOMENCLATURA PARA EL RANGO-RELACION		NOMENCLATURA PARA EL ESFUERZO MEDIO	
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL					
ESIME AZCAPOTZALCO					
CIENCIA DE MATERIALES					
DESCRIPCION	DIAGRAMA	ESF. MAXIMO	RANGO/RELACION	ESF. MEDIO	ESF. ALTERNANTE
ESFUERZO SOSTENIDO		$\sigma_1$	$\sigma_1$	$\sigma_1$	0
Esfuerzo pulsante entre $\sigma_1$ .Y . $\sigma_2$		$\sigma_1$	$\sigma_1$	$\sigma_m$	$\pm \sigma_a$
Esfuerzo pulsante entre $\sigma_1$ . y.0		$\sigma_1$	$\sigma_1$	$\sigma_m$	$\pm \sigma_a$
Esfuerzo parcialmente invertido, entre. $\sigma_1$ y. $-\sigma_2$ cuando $\sigma_2 < \sigma_1$		$\sigma_1$	$\sigma_1$	$\sigma_m$	$\pm \sigma_a$
Esfuerzo completamente invertido, entre $\sigma_1$ y. $-\sigma_2$ cuando $\sigma_2 = \sigma_1$		$\sigma_1$	$\sigma_1$	0	$\pm \sigma_2 = \sigma_1$

Nota

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \text{ y } \sigma_a = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2}$$

Respetando los signos

El ensayo comúnmente usado es el esfuerzo completamente invertido.

### 2.8.3.- VIDA DE FATIGA

La resistencia a la fatiga de los metales varía de acuerdo a su composición, su estructura granular, tratamiento térmico ó el maquinado. Los metales comerciales se componen de pequeños cristales con orientaciones irregulares. Los cristales no son isotropicos (homogéneos) y por esto, cuando se someten a esfuerzos los materiales alcanzan su límite de acción elástica antes que otros: indudablemente debido a su orientación no favorable, lo cual permite que ocurra deslizamiento. Así mismo, la distancia de cristal a cristal dentro de una pieza de metal no es uniforme y cuando la pieza es sometida a una variación cíclica de esfuerzos sus partículas constitutivas tienden a moverse ligeramente una con respecto a otra.

Este movimiento finalmente debilita algún minúsculo elemento a tal grado que se rompe, en la zona de falla se desarrolla una concentración de esfuerzo, la fractura se extiende desde este núcleo a toda la sección. Por esta razón, las fallas por fatiga frecuentemente son denominadas fracturas progresivas.

El tratamiento térmico apropiado es benéfico tanto para la resistencia estática como para la resistencia a la fatiga del acero; especialmente para los aceros de alto contenido de carbono. En general, el tratamiento térmico y la composición química están íntimamente ligados.

Si una parte de la maquina esta cargada a flexión o torsión, el tratamiento para endurecimiento superficial mejora la resistencia a la fatiga: pero si se usa una carga axial, entonces la uniformidad de las propiedades en toda la sección transversal es importante, y una aleación de acero tratada térmicamente que posea buenas propiedades de endurecimiento profundo, es satisfactorio.

En maquinas de movimiento rápido y en partes sometidas a vibraciones severas, ocurren fluctuaciones de esfuerzos apreciables llegando a miles de millones de repeticiones durante la vida útil de un componente de la maquina o de su estructura.

RELACION DE DURACIÓN DE ALGUNOS METALES

Metal	Relación a la tensión Estática (lb/pulg)	Limite de duración En flexión lb/pul <sup>2</sup>	Relación de Duración
Acero 1.02% C templado	200400	105000	0.523
Cobre recocido	32400	10000	0.308
Cobre laminado en frío	52000	16000	0.307
Latón 70-30 laminado en frío	73200	17500	0.239
Aleación 20-24 aluminio	72000	1800	0.25

El trabajo en frío de acero dúctil aumenta la resistencia a la fatiga aproximadamente hasta el mismo grado que la resistencia estática. Para los metales no ferrosos el % de aumento de la resistencia a la fatiga debido al trabajo en frío es ocasionalmente menor que el % del aumento de la resistencia a la tensión.

#### 2.8.4.- COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL Y CURVA ESFUERZO VIDA

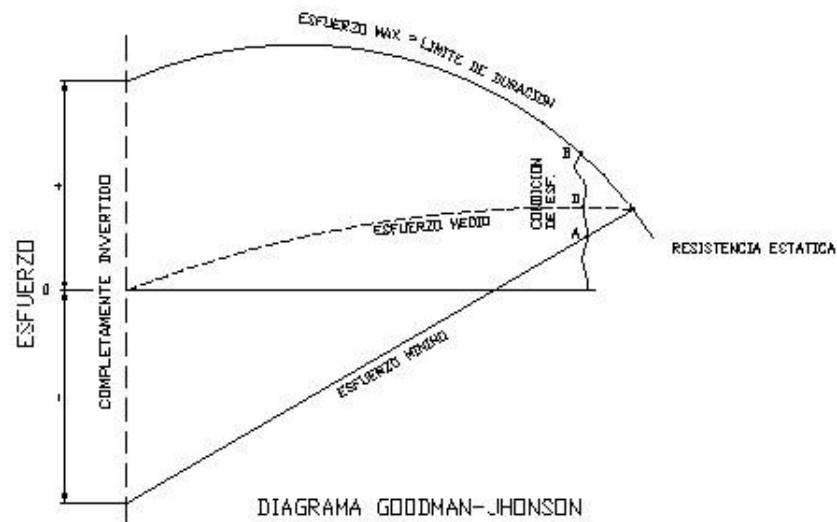
En general, se ha determinado que el límite de duración para ciclos de tensión y compresión directa es prácticamente al mismo que el límite de duración para los ciclos de esfuerzos flexionantes invertidos.

Para probetas de metal sometidas a esfuerzos repetidos que involucren un rango de esfuerzo menor que la inversión completa, mientras menor sea el rango de esfuerzo, más alto será el límite de duración.

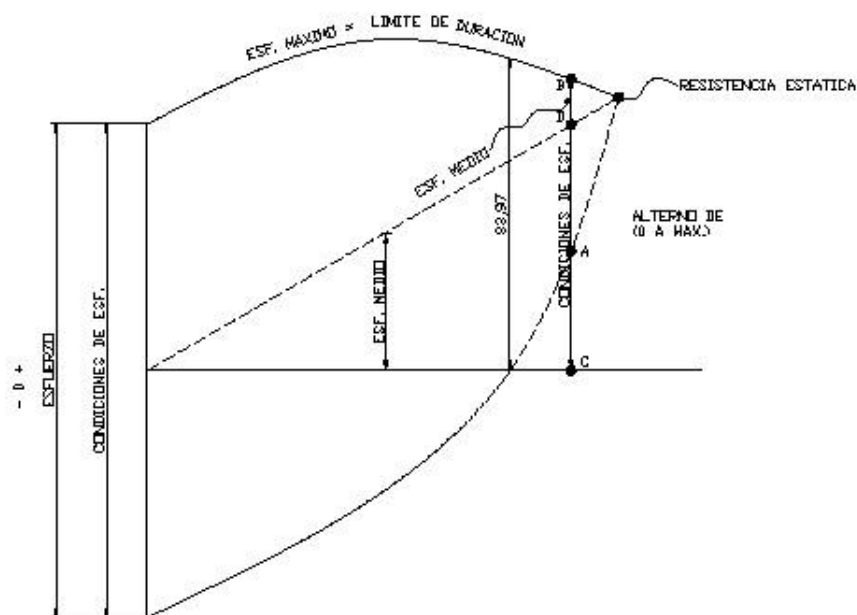
“El valor limitativo de la resistencia estática”

Existen tres métodos para representar los datos de la fatiga que involucran la variable del rango en términos de esfuerzos que son los siguientes:

- a) Diagrama tipo Goondman-Jhonson
- b) Diagrama tipo Schenck-Peterson
- c) Diagrama tipo Haigh-Soderberg



La figura anterior es el diagrama Goodman-Jhonson en el cual el esfuerzo mínimo se traza en línea recta y el límite de duración corresponde a cualquier esfuerzo mínimo y se traza verticalmente hasta llegar a la curva. El rango de esfuerzos se represente por medio de la coordenada vertical entre la línea continua superior y la inferior punteada; mientras que el esfuerzo medio se representa en la curva punteada, así para cualquier esfuerzo mínimo AC, el límite de duración esta dentro de los puntos BC. el esfuerzo medio es DC y el rango del esfuerzo es AB.



La figura anterior muestra el diagrama Schenck- Peterson en la cual la línea que representa los esfuerzos medios se traza como recta con un ángulo de  $45^\circ$  con respecto al eje horizontal, esto convierte en curva la línea del esfuerzo mínimo y permite que el eje horizontal represente a los esfuerzos medios de la misma escala que sobre el eje vertical.

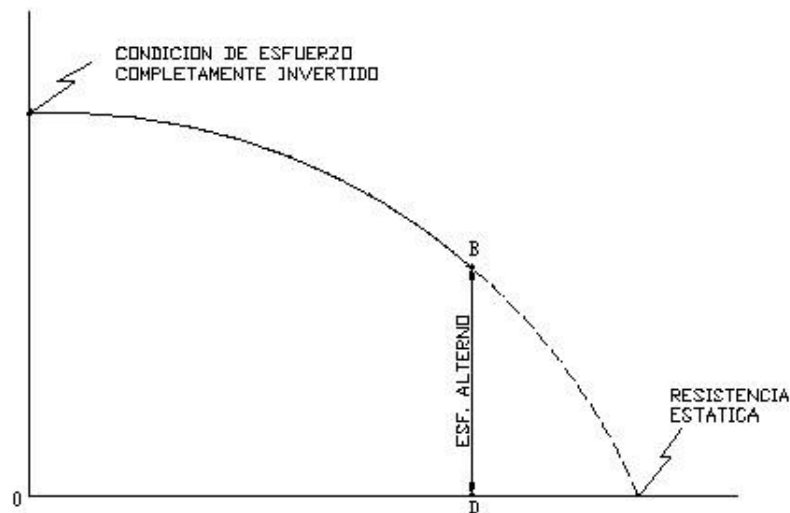


DIAGRAMA HAIGH-SODERBERG

Es esta figura la línea horizontal representa los esfuerzos medios. Las coordenadas de la curva representan el máximo valor del esfuerzo alterno BD, el cual puede aplicarse simultáneamente con el esfuerzo medio OD sin causar la falla por fatiga. Las líneas punteadas representan condiciones mas allá de la resistencia a la cedencia.

### 2.8.5.- FACTORES QUE AFECTAN LA VIDA DE FATIGA

Las fallas por fatiga pueden ser causados por :

- a) Mal diseño
- b) Mal maquinado
- c) Mal ensamblado
- d) Inclusiones nocivas en el material
- e) Mal tratamiento térmico





#### Diseño :

Esquinas con radios inadecuados, una esquina afilada tiende a reducir la resistencia a la fatiga en un 25% aproximadamente. Un cuñero sin aristas dificulta el ensamble de la cuña. Falta de venas de lubricación; tolerancias inadecuadas, causan forzamientos y en algunos casos no se puede llevar a cabo el ensamble. La parte primordial en el diseño es no seleccionar el material adecuado.

#### Maquinado :

Dejar aristas sin radios (filos vivos): marcas en las piezas provocados por el mal maquinado o desprendimientos de rebabas.

#### Ensamble :

Malos aprietes por falta de torque dejando piezas flojas que causan vibraciones o esfuerzos torsionales.

#### Inclusiones:

Generalmente considerado como un defecto oculto, debido a que en muchas ocasiones no se detecta al formar una pieza (doblez) o a la maquinaria. La falla generalmente se observa al paso de algún tiempo, por la que se considera un riesgo calculado en la adquisición de materiales de fundición. Cuando esto sucede se recomienda incrementar el nivel de inspección, evitando problemas de campo.

#### Tratamientos:

Las fracturas por fatiga se inician por fisuras superficiales por lo que los tratamientos térmicos y acabados superficiales son de gran importancia. El límite de fatiga se reduce con la limpieza de las superficies tal como en el descarbonizado de acero. El imite superficie rugosa puede dar mejor resultada que una pulida. El nitrurado y el carbonizado en el acero tienen un efecto benéfico.

El límite de fatiga se incrementa trabajando en frío la superficie con procesos tales como el rolado o el martillado.



## 2.8.6.- INICIO Y PROPAGACION DE GRIETAS DE FATIGA

Las fallas por fatiga ocurren súbitamente, sin ninguna deformación apreciable y la fractura es burdamente cristalina como en el caso de la falla estática del hierro fundido.

La falla por fatiga se forman mientras el deterioro progresa por un plano de cortadura continúa que se extiende a través de dos o más cristales adyacentes, la cuál se va extendiendo por los esfuerzos cíclicos hasta la ruptura.

## 2.8.7.- CARACTERISTICAS MACROSCOPICAS Y MICROSCOPICAS DE LA APARIENCIA DE FATIGA

El esfuerzo localizado se desarrolla en los cambios bruscos de la sección transversal, en la base de ralladura superficiales, en la raíz de la cuerda de un tornillo, en el borde de pequeñas inclusiones.

Microscópicamente Edwing y RasenHain en 1899 observaron el movimiento relativo de los elementos de los diminutos cristales de acero, cuando están sometidos a un esfuerzo.

El movimiento se evidencia como líneas paralelas, llamadas “líneas de deslizamiento”. Las líneas, desarrollan con los esfuerzos cíclicos grietas microscópicas que a su vez se extienden y causan la falla en la piezas.

## 2.8.8.- ENSAYO DE FATIGA

Las maquinas para realizar ensayos a la fatiga en ciclos de esfuerzos repetidos o invertidos se clasifican de acuerdo con el tipo de esfuerzo producido:

- 1., Maquinas para ciclos de esfuerzo axial (tensión y compresión)
- 2., Maquinas para ciclos de esfuerzos flexionantes
- 3., Maquinas para ciclos de esfuerzos
- 4., Maquinas universales para esfuerzo axial, deflexión, de corte torcionante o combinación entres ellos.

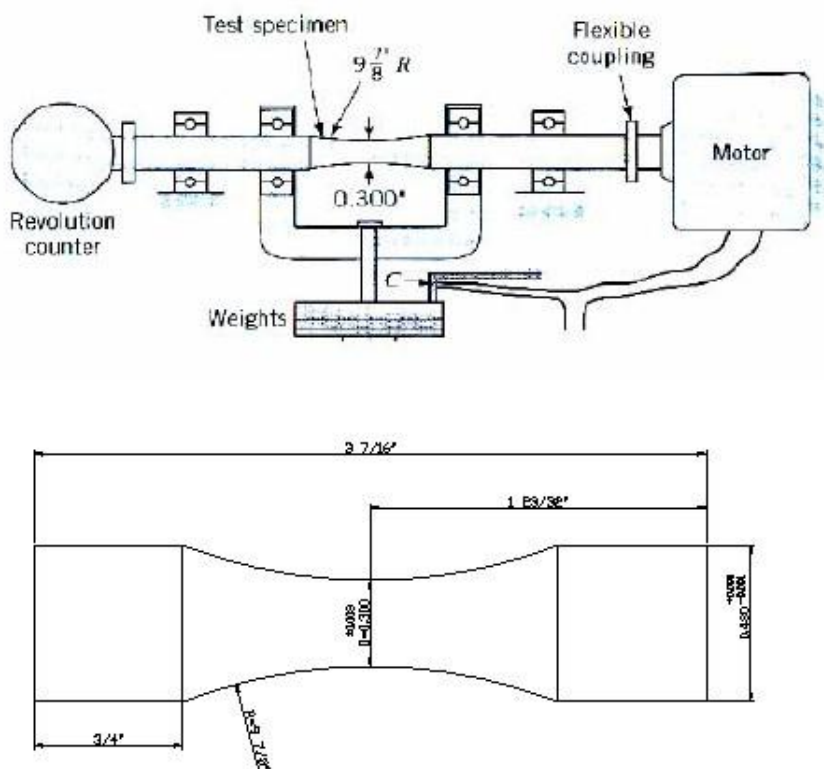
Todas las maquinas de ensaye de esfuerzos repetidos deben estar provistas de un medio para aplicar la carga a la probeta y medirla.

Además debe proveerse con un contador para registrar el número aplicado de ciclos y algún dispositivo que, cuando la probeta se rompa automáticamente desembrague el contador.

Las maquinas de ensaye flexionante son generalmente de tipo de viga giratoria (esfuerzo invertido con la viga rotatoria)

La probeta se sujeta por sus elementos en sujetadores especiales y se aplica la carga a través de dos rodamientos equidistantes del centro del claro, produciendo un momento flexionante uniforme en la probeta.

Para aplicar ciclos de esfuerzos se hace girar la probeta por medio del motor; como las fibras superiores de la viga girada están siempre en compresión y las inferiores están a tensión, resulta aparente que en una ciclo completo de esfuerzos invertido en todas las fibras se produce en cada revolución.





A menudo un componente esta sometido a la aplicación cíclica de un esfuerzo inferior, al esfuerzo de cedencia .

Este esfuerzo cíclico puede ocurrir como resultado de rotación, flexión o vibración. Aun cuando es esfuerzo esté por debajo del limite elástico el material puede fallar después de numerosas aplicaciones de dicho esfuerzo.

Las fallas por fatiga usualmente ocurren en tres etapas:

- 1., se inicia una grieta minúscula sobre la superficie, generalmente un tiempo después de haberse aplicado la carga.
- 2., la grieta se propaga gradualmente con forme la carga sigue en su alternancia.
- 3., cuando la sección transversal restante del material resulta demasiado pequeña para soportar la carga aplicada, ocurre la fractura súbita del material.

Se ha demostrado que algunos materiales incluyendo los aceros, el esfuerzo limite para la fatiga es aproximadamente la mitad de su resistencia a la tensión la cual se conoce como relación de fatiga.

## 2.9.- DESGASTE

Principio.- Para que exista un desgaste se debe tener una interacción de superficies.

Para obtener un desgaste es indispensable que los componentes estén en contacto directo y para contrarrestarlo agregamos un lubricante separando las superficies.

La finalidad, es saber determinar el desgaste que pueden sufrir las partes de una maquina o elementos sometidos a un trabajo. Así como la elección de un material que reduzca el desgaste, Así determinar las propiedades de los abrasivos y lubricantes.

### TEORIA

El desgaste es un fenómeno superficial que consiste en el deterioro o desprendimiento de partículas que sufren las superficies en contacto a causa de la fricción a las que se encuentran sometidas o el medio ambiente.

El desgaste es un efecto destructivo al que están expuestos los metales o los no metales.

La diferencia en el desgaste de diversos materiales se debe a sus propiedades físicas, químicas y a las condiciones de trabajo.

Factores que influyen en el desgaste

- a) Tipo de material.
- b) Velocidad de trabajo.
- c) Carga aplicada.

### 2.9.1.- TIPOS DE DESGASTE

Siempre que hay movimiento relativo entre dos sólidos que soporten una carga, existe la situación potencial de desgaste. Se sabe que el movimiento puede ser unidireccional o de vaivén ya sea deslizante o de rodamiento. Puede existir una combinación de estos movimientos. o el desgaste se puede deber a un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud.

Un metal puede interactuar con otro metal o con líquidos, como aceite lubricante o en su defecto con agua. Los tipos de desgaste se clasifican dependiendo de la naturaleza del movimiento o los medios que intervienen en la interacción de los materiales en contacto y son : desgaste por adherencia, desgaste por abrasión, desgaste por ludimiento, desgaste por fatiga, desgaste por cavitación.

### 2.9.2.- EXPERIMENTOS, FRICCION-DESGASTE

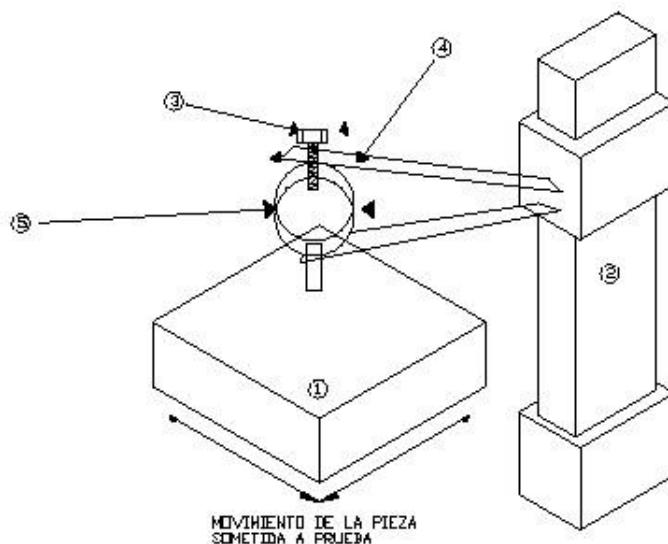
Existen muchas maquinas para evaluar la fricción y el desgaste. Para esto se requiere obtener primero un par de piezas en contacto que proporcione una

interfase para el experimento. El aparato para medir la fricción con carga ligera, se compone de (1) Superficie plana que puede moverse en las direcciones indicadas por las flechas.

(2) Espiga fija a un anillo (5) La carga normal se aplica a través del anillo por medio de un tornillo (3) y la carga se evalúa por la deflexión del anillo. El brazo

(4) esta fijo a una suspensión el cual va unido al anillo (5): Al mover la base (1) el arrastre fraccional provoca una deflexión mayor en el anillo la cual se mide.

### Maquina de espiga y disco.



Es un equipo usado generalmente para pruebas de desgaste, en la cual la espiga, (material por probar) se monta haciendo contacto directo contra el disco. Las variables son: la carga, la velocidad de deslizamiento y el medio ambiente. El desgaste obtenido se determina pesando la espiga en una micro balanza antes y después de los intervalos de la prueba. En esta prueba se debe ir registrando la perdida de peso en relación con los intervalos de deslizamiento.



### 2.9.3.- CALCULOS PARA EL ENSAYO DE DESGASTE

Expresiones para determinar el desgaste en por ciento (S)

a) Por peso

$$S = \frac{W_1 - W_2}{W_1} (100) = \%$$

$W_1$  = Peso antes del ensaye

$W_2$  = Peso después del ensaye

b) Por medición de diámetros

$$S = \frac{D_1 - D_2}{D_1} (100) = \%$$

$D_1$  = Diámetro antes del ensaye

$D_2$  = Diámetro después del ensaye

c) Por medición del desgaste con el integrador

$$S = \frac{D_1 - D_2}{D_1} (100) = \%$$

$$D_2 = \frac{D_1}{nf} (Z_2 - Z_0) \text{ Antes}$$

$$D_2 = \frac{D_1}{nf} (Z_2 - Z_1) \text{ Después de 100 rev.}$$

$D_1$  = Diámetro del integrador 41.3 mm

$nf$  = Cantidad da revoluciones (Ejemplo 100 rev.)

$Z_2$  = Lectura del integrador después de girar 100 rev.

$Z_1$  = Lectura del integrador antes de girar 100 rev.

$D_1$  = Diámetro de la probeta inicial

$D_2$  = Diámetro de la probeta después del ensaye.

#### 2.9.4.-ANALISIS METALURGICO

La topografía de las superficies y el uso de un perfilómetro para registrar colinas y valles de la misma, nos da suficiente información para evaluar las deformaciones y el desgaste. Esto es, se puede observar por medio de un microscopio electrónico o de barrido. (Análisis metalográfico)

Las técnicas de microdureza o difracción de electrones nos proporciona esta valiosa información (microscopio electrónico o de barrido da mas de un millón de X). Los diferentes metales que están en contacto bajo frotamiento pueden formar compuestos inter metálicos produciéndose un cambio en la composición química que se puede ver modificada por la oxidación: es útil efectuar un microanálisis de las secciones cónicas de las espigas (esto es, se efectúa en un ensayo). Los residuos del desgaste con frecuencia se someten a un análisis para determinar su composición esto es, determinar la cantidad de elementos y así determinar la interacción metalúrgica entre los miembros de un par metálico.

#### 2.9.5.- APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS

Cada vez que se investiga un nuevo material la primera fase del trabajo consiste en una evaluación de la cantidad del desgaste al incrementarse la distancia del deslizamiento. Al determinar la pendiente del desgaste estacionario (constante) el siguiente paso es graficar la razón: desgaste-carga Cuando la carga es baja la región del desgaste es moderada seguida por una razón de transición, cuando la razón del desgaste aumenta es porque se variaron algunas de las magnitudes del ensayo.

La selección de un material y procedimientos de prueba requiere de un análisis de las condiciones reales de servicio que obligan al ingeniero a obtener el material que resiste ese desgaste.

#### 2.9.6.- TÉCNICAS PARA EVITAR EL DESGASTE

Además de la lubricación, existen técnicas para proteger superficialmente los metales contra el desgaste los cuales son:

- a) Recubrimiento electrolítico
- b) Oxidación anódica
- c) Difusión metálica
- d) Metalizado
- e) Recargas con metal duro
- f) Tratamientos térmicos



## 2.9.7.- TOPOGRAFIA DE SUPERFICIES SÓLIDAS

Es necesario conocer la naturaleza original de las superficies para comprender la interacción interfacial de las partes móviles de una maquina o equipo, así como su estado, si se encuentran libres de óxidos o contaminantes ó si las superficies son mecánicamente suaves y comprender que no existe una superficie completamente plana a escala microscópica.

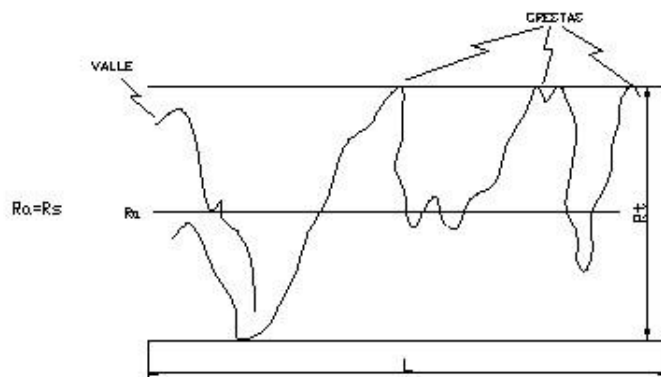
Una superficie completamente lisa no se obtiene mediante los métodos convencionales de preparación de superficies como son: maquinado, cepillado, rectificado, pulido. etc.

Normalmente en la superficie se presentan asperezas como son ondulaciones en forma de colinas y valles; las cuales se pueden detectar con rugosímetro. Detectando las protuberancias de longitud de onda corta, las alturas de las crestas, las cuales dependiendo del método de producción pueden ser desde 0.05 micrómetros a 50 micrómetros, mientras que el espaciamento de estas (crestas) es de 0.5 micrómetros a 5 milímetros.

## 2.9.8.- MEDIDAS DE RUGOSIDAD

La rugosidad de las superficies se he descrito de la siguiente forma:

1. Altura máxima de un a cresta a un valle,  $R_t$
2. La línea media  $R_a$  y la raíz media cuadrática  $R_s$ .



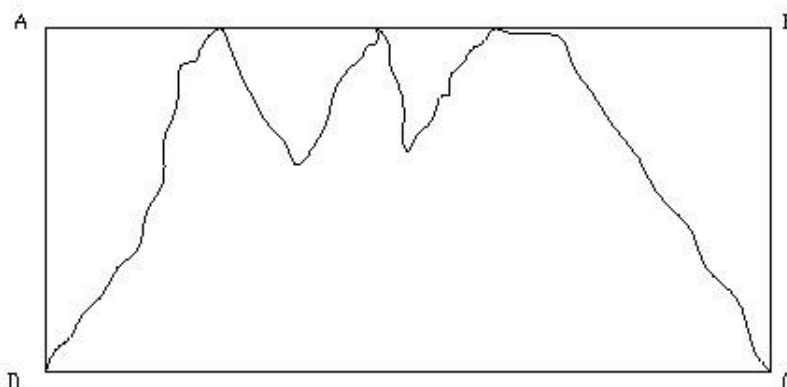
3. La curva de apoyo.

En la figura se muestra una superficie con diversos grados de rugosidad, los cuales pueden tener el mismo valor  $R_t$ , así que la medición de la altura entre la cresta y valle nos muestra totalmente su superficie.

### 2.9.9.- LLENADO DE LA SUPERFICIE DE MATERIAL Y VACIO ENTRE CRESTAS

Supongamos una superficie con tres asperezas de altura igual comprendidas dentro del rectángulo ABCD

Si se coloca un objeto sobre AB, se observara que la carga solo esta soportada



por las tres crestas de las asperezas, el factor K es una estimación de área friccional que soporto la carga

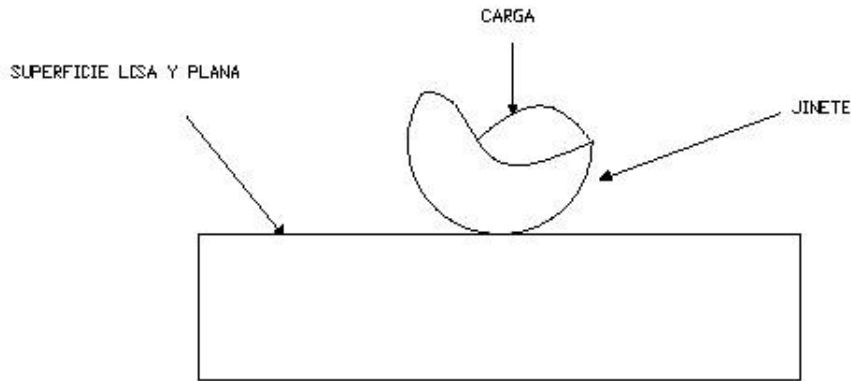
"K" se conoce como el grado de llenado de a superficie del material y el grado de vacío entre crestas  $K_P = 1 - K$

### 2.9.9.- TIPOS DE CONTACTO ENTRE SÓLIDOS

Sabemos que hay un área aparente entre la interfase de ambas superficies aunque las puntas de las asperezas son el área de contacto real: si la carga es baja y el material tiene un alto valor de fluencia, el contacto será elástico, en el caso opuesto la interfase fluirá plásticamente. En interfase cinemática de la mayoría de las condiciones tribologicas parece presentarse ambas formas del comportamiento y tanto la fricción como el desgaste en los materiales dependen de la naturaleza del área real de contacto de las superficies. (tribo- prefijo que significa frotar)

## CONTACTO UNICO

Considérese el caso de un cuerpo hemisférico duro que se desliza sobre una superficie blanda y lisa bajo la acción de una carga ( $W$ ); tanto el jinete como la superficie plano son perfectamente lisas y libre de ondulaciones.



Dependiendo de la carga el jinete indentará elásticamente un área circular de diámetro  $2a$ : en un análisis HERTZ (1896) demostró que para un contacto elástico el esfuerzo de compresión  $\sigma_c$  cualquier distancia radial " $r$ " al centro del área indentada está dado por:

$$\sigma_c = \sigma_{\max} \left[ 1 - \frac{r^2}{a^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Esto significa que: si no excede el punto de fluencia del material blando al máximo esfuerzo de compresión se localiza en el centro del círculo de contacto, decayendo hasta 0 en el borde cuando  $r=a$

La variación del esfuerzo de compresión a través del diámetro de indentación mostrado en la figura si se aplica  $W$  que es la carga aplicada tenemos:

$$\sigma_{\max} = \frac{3W}{2\pi a^2}$$

El análisis Hertziano también demostró que: el esfuerzo cortante mas alto  $\sigma_{\max}$

se aplica en el interior del material a una distancia de  $0.5 A$  por debajo de la superficie del punto de contacto.

teniendo  $\delta_{\max} = 0.31\sigma_{\max}$

## CONTACTO MÚLTIPLE

Las superficies de ingeniería, como en el caso de un jinete hemisférico que presione una superficie blanda nunca son perfectamente lisas. La esfera tendrá asperezas y estos a su vez estarán cubiertas de micro asperezas. En lugar de que el área de contacto sea en el punto central como se indicó en la figura anterior, la esfera descansara sobre unas cuantas asperezas de la superficie plana. Si bien se ha demostrado que el área de contacto elástico es proporcional a la raíz cúbica del cuadrado de la carga por lo que tenemos:

$$A_e = \pi \left[ \frac{3WR}{4E} \right]^{1/3}$$

Archard demostró que si se consideran las asperezas y se toma en cuenta la rugosidad de estas protuberancias y si este análisis se realiza en forma sucesiva: se llega a una etapa en la que el área de contacto elástico es casi proporcional a la carga aplicada.

Resumen: El contacto de los sólidos está controlado por tres parámetros topográficos: la densidad superficial de las asperezas, su radio medio y la desviación de las alturas de las crestas. Además de las propiedades mecánicas de los metales, lo que ha dado el concepto de índice de plasticidad.

## 2.9.10.- DESGASTE (TIPOS)

### DESGASTE POR ADHERENCIA

Se define como el proceso que produce pérdida del material entre las superficies que interactúan como resultado de la adherencia entre superficies.

El desgaste por este mecanismo es severo y puede presentarse en la cadena cinemática de una máquina, siempre que no exista lubricación adecuada en la interfase de dos cuerpos en contacto.

En este caso, el movimiento relativo puede ser por deslizamiento unidireccional de vaivén, o bien por la interacción que ocurre bajo carga en contacto oscilatorio

de pequeña amplitud. Se sabe que los picos superficiales que coinciden, fluyen plásticamente y forman fuertes uniones endurecidas por el trabajo. A medida que estos se rompen bajo la tracción tangencial impuesta a los sólidos estas van perdiendo material.

## DESGASTE POR ABRASION

Cuando un cuerpo duro se desliza sobre una superficie blanda al aplicar el esfuerzo normal se graba en esta una serie de surcos lo que se conoce como desgaste por abrasión de dos cuerpos.

Las partículas sueltas que entran en contacto con las superficies deslizantes actúan como esmeriles y el proceso de eliminación de metal se conoce como desgaste por abrasión de 3 cuerpos. Las partículas duras pueden ser residuos metálicos atrapados como resultado del rozamiento o bien, capas de óxido desprendidas.

## . DESGASTE POR LUDIMIENTO

En la mayoría de los equipos mecánicos o estructurales, hay muchas superficies que se deslizan con una pequeña amplitud la cual se debe a la vibración de las máquinas produciendo un movimiento oscilatorio por ejemplo una junta bridada. El resultado de esto es el ludimiento o desgaste por vibración: que se define como el proceso de desgaste que se produce entre dos superficies que tienen un movimiento oscilatorio relativo y de pequeña amplitud.

La magnitud de desgaste por vibración o ludimiento se puede evaluar por la pérdida de peso de una muestra respecto al número de oscilaciones.

## DESGASTE POR FATIGA

Probablemente el modo predominante de los tipos de desgaste son por desprendimiento de material de las superficies por fatiga, ya sea que la naturaleza del movimiento sea unidireccional o de vaivén.

La falla se presenta en contactos lubricados, en baleros de rodillo o de bolas, en engranes, levas y mecanismos impulsores de fricción. Donde la pérdida del material es por desprendimiento de capas superficiales y por picaduras.

Se considera que las grietas por fatiga aparecen debajo de la superficie de un punto en que el coeficiente cortante es máximo: obviamente puede lograrse una mejoría en la vida de estos elementos si se trabaja una carga de contacto baja. El método preferido en la industria es producir componentes con una profundidad óptima de capa endurecida junto con un buen acabado superficial.



Este acabado puede obtenerse por carburación o nitruración.

## DESGASTE POR EROSION

Se define como el proceso de eliminación de metal provocado por incidencia de partículas sólidas sobre una superficie. El desgaste por erosión puede ser deliberado como en el caso de la limpieza de piezas coladas, cascos de barco por medio de chorros de arena, pero en ocasiones se produce pérdida muy costosa de material como en el caso de las hélices de turbina, de turbina de gas o los refractarios de hornos eléctricos o en los hornos de fabricación de vidrio o fritas. El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de las partículas respecto a las superficies.

## DESGASTE PÓR CAVITACION

La cavitación ocurre en la superficie del metal donde el líquido fluye a alta velocidad y existen cambios de presión tal y como acontece en los impulsores y propulsores, siendo un caso típico las hélices de un barco. Los cálculos indican que la rápida impulsión de burbujas de vapor pueden producir presiones localizadas de hasta 60 000 psi. Con repetidas impulsiones de burbujas de vapor puede producirse un daño considerable en la superficie metálica. En los baleros lubricados también se presenta el desgaste por cavitación.

## 2.9.11.- TRANSFERENCIA DE METALES

Se ha demostrado que al estar dos cuerpos en contacto y en movimiento se produce fricción entre ambos provocando un incremento de temperatura dada la condición y la fuerza aplicada llegando al punto de fluencia, en el cual uno de los materiales cede más rápidamente; llevándose a cabo la transferencia de material: ejemplo, una leva de acero y el seguidor de giro de la leva de bronce.

Recuerde que las propiedades físicas, mecánicas de cada material en contacto influyen para que exista la transferencia.

## CONTAMINANTES Y OXIDACIÓN EN EL DESGASTE

Los metales pueden reaccionar con el oxígeno y otros gases, estas reacciones pueden alterar a composición, las propiedades y la integridad del material.

En la oxidación de los metales son interesantes tres aspectos.

1. La facilidad con la cual el metal se oxida.
2. La naturaleza de la película de oxido que se forma.
3. La velocidad a la cual ocurre la oxidación.

Las superficies se contaminan fácilmente por la presencia del ambiente circulante, facilitando que las uniones de los materiales en contacto, se oxiden.

A medida que se rompen las uniones, aparecen residuos producidos por el desgaste por lo que es conveniente evitar estas uniones: esto se logra separando la interfase con una película que inhiba la interacción de los átomos del metal en los puntos de contacto entre los dos sólidos.

Las superficies expuestas al ambiente se cubren rápidamente de una o mas capas de gases absorbidos.

La oxidación se facilita por el calentamiento friccional y los contaminantes favorecen el desgaste, más aun si el sistema no esta lubricado. Si los gases absorbidos se sobrecalientan, se vaporizan y las capas de oxido se rompen, exponiendo metal nuevo. La que aumenta la propensión desgaste.

## 2.9.12.- DISEÑO PARA CONTRARRESTAR EL DESGASTE

Tanto el desgaste por adherencia, como el desgaste por abrasión se consideran en ingeniería como la forma más común de desgaste.

Al diseñar partes a prueba del desgaste, no es recomendable seleccionar un par da metales que presenten solubilidad mutua (se ha tenido éxito al deslizar hierro colado entre si mismo; quizá por la presencia de grafito.)

En la práctica, mientras más duro sea el componente más difícil es el desgaste.

En general si no existe movimiento oscilatorio, corrosión ni temperatura elevada se puede aplicar los siguientes principios al seleccionar aceros.

### A) carga de impacto baja:

Se utilizan carburos duros en la microestructura o se nitrura o carboniza el acero, también pueden usarse hierros y aceros martensíticos.

### B) Carga de impacto alta:

Utilizar acero al manganeso; aceros inoxidables.



Si se incrementa la carga, la velocidad es necesaria utilizar superficies mas duras en los cojinetes, como los que proporcionan los bronce.

## METALES PARA COJINETES

Se componen comúnmente de aleaciones de cobre, plomo, estaño, aluminio, zinc y son conocidos como metales antifricción.

El metal blanco, latón, bronce fosforado son materiales obtenidos por aleación.

El plomo y el zinc son más baratos pero para mejorar sus características se les agrega antimonio, cobre y estaño incrementando su costo.

El antimonio agregado al plomo aumenta su dureza y la fragilidad, si agregamos estaño se obtiene una aleación muy tenaz.

Metal blanco o metal babbit: Se conoce con el nombre general de metales antifricción y hay diferentes composiciones incluyendo los siguientes materiales:

Estaño, cobre, antimonio, hierro, arsénico y bismuto: en el mercado por su composición se les conoce por su número 10, 11, 12, 13.

Cojinetes de bronce (bujes o manguitos) - Se usan en diversos tipos de maquinas dependiendo de su composición, por ejemplo SAE-64 conocido como bronce fosforado, tiene buenas condiciones antifricción, excelente para cargas pesadas y servicios intensos.

El SAE -66 - Se emplea en la industria automotriz (en articulaciones de la dirección, cojinetes de ejes de pistón, cajas de resortes y arandelas de presión.)

El SAE-67 - Es conocido como bronce semiplástico (es un bronce blando con buenas condiciones antifricción.)

El SAE-63 - Es particularmente adecuado para cojinetes sujetos a fuertes cargas o cuando hay vibración o choque.

Los polímeros también se ocupan en la construcción de baleros por sus propiedades antifricción, por ejemplo el polietraflouroetileno (PDFE) teflón.

Los baleros que se fabrican utilizando solo este material son mecánicamente débiles por lo que es necesario reforzarlos con un recubrimiento metálico.

Los baleros metálicos porosos so impregnan do PDFE (teflón) para disminuir la fricción en la interfase del deslizamiento.





## 2.10.- MECANISMOS DE FRACTURA

Se consideran cinco mecanismos comunes de fractura, los tipos de falla son dúctil y frágil comúnmente además tenemos por fatiga por termo fluencia y corrosión.

### FRACTURA DUCTIL

Ocurren normalmente en forma transgranular (a través de los granos). En los metales que tienen ductilidad y tenacidad satisfactoria

A menudo se observa una buena cantidad de deformación incluso con la estricción o estrangulamiento en los componentes que fallan. La deformación ocurre antes de la fractura final; las fracturas dúctiles normalmente se deben a sobrecargas aplicadas incrementando el esfuerzo en el material.

### FRACTURA FRÁGIL

Ocurre en metales de alta resistencia o en metales de baja ductilidad o tenacidad. La fractura frágil presenta poca o ninguna deformación plástica, la falla ocurre normalmente en pequeñas ralladuras que causan una concentración de esfuerzos. La fractura frágil se identifica observando la superficie que prácticamente es plana y perpendicular al esfuerzo aplicado a la probeta. La fractura por fatiga se da cuando se aplican esfuerzos cíclicos, esto es que son repetitivos, afectando directamente la vida del material.

En ingeniería se ocupan los ensayos de fatiga para determinar la vida útil del componente o mecanismo; unos ejemplos son los muelles usadas comúnmente en camiones, el cigüeñal, las bielas y los pistones de un motor de combustión. Así mismo se pueden aplicar a otras piezas como son el eje de transmisión, resortes, etc.

Generalmente las empresas ocupan los resultados en los ensayos de fatiga para determinar la garantía del producto.

### TENACIDAD DE FRACTURA

Es la propiedad de un material relacionada con su capacidad de absorber energía antes de fracturarse. Si un material puede absorber mucha energía comúnmente se dice que tiene gran tenacidad a la fractura.

### 2.10.1.- SECUENCIA DE EVENTOS QUE SE LLEVAN A CABO EN UNA FRACTURA FRÁGIL

- Se forma una pequeña imperfección ya sea durante la fabricación ó durante su funcionamiento, por ejemplo por soldadura, por remachado o durante el funcionamiento (fatiga, corrosión, etc.).
- La imperfección se propaga en forma estable debido a las cargas repetidas, ambientes corrosivos o ambas cosas. La rapidez inicial de crecimiento es lenta e indetectable, con el tiempo la grieta se acelera en su crecimiento.
- La fractura final se presenta cuando la grieta llega a un tamaño crítico para las condiciones prevalecientes de carga. La fractura final se lleva a cabo rápidamente en forma instantánea.

### 2.10.2.-TEORIA DE GRIFFITH U OROWAN PARA PRONOSTICAR LA FRACTURA

En 1920, A. Griffith indicó como pronosticar una fractura en base analítica hizo notar que la resistencia teórica de un material frágil como el vidrio se expresa como sigue:

$$\sigma_{th} = \sqrt{\frac{2 E \gamma}{a_0}}$$

Donde: E = modulo de elasticidad (Young).

$\gamma$  = energía superficial específica.

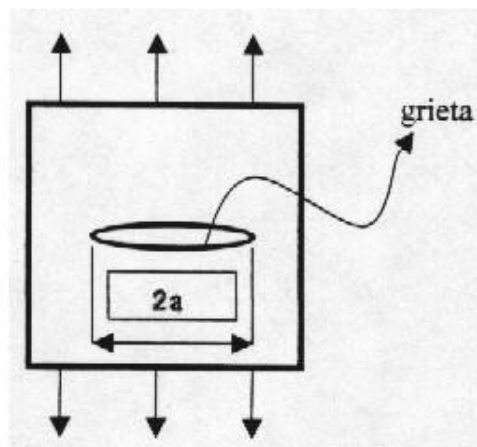
$a_0$  = parámetro de red.

$\sigma_{th}$  = Resistencia teórica del material.

Griffith dedujo el esfuerzo normal critico a la fractura para el caso en que la energía para esta la suministre totalmente una reducción de energía elástica almacenada dentro del cuerpo elástico. Estimo que la reducción de energía elástica asociada con una grieta de longitud "2a" es igual a  $\pi a^2 (\sigma^2/E)$ .

Siendo  $\sigma$  = esfuerzo aplicado y suponiendo que el espesor del cuerpo es igual a 1

La energía superficial necesaria para formar una grieta de longitud "2a" es igual a  $4a\gamma$  considerando que se crean dos superficies a medida que se propaga la grieta, en este caso " $\gamma$ " es la energía superficial por unidad de área.



Para que suceda una fractura inestable la rapidez de cambio de la liberación de energía de deformación con respecto al tamaño de la grieta debe de ser cuando menos igual a la rapidez con la que se consume energía para crear nuevas superficies, por lo anterior la condición crítica o esfuerzo de Griffith para la fractura inestable se expresa con la ecuación de Griffith como se indica:

$$\sigma_G = \sqrt{\frac{2 E \gamma_s}{\pi a}}$$

Donde:  $\sigma_G$  = esfuerzo en la placa.

$E$  = módulo de elasticidad (Young).

$\gamma_s$  = energía superficial.

$a$  = tamaño de grieta

Principalmente Orowan se dio cuenta que para grietas agudas en los metales donde la ductilidad es importante las fracturas sucede con un valor constante igual a  $\sqrt{\sigma \pi a}$ .

Para especímenes que tienen una geometría parecida a la figura anterior, supuso que una cantidad llamada energía "superficial" efectiva debía remplazar a la verdadera energía superficial en la ecuación de Griffith, ésta energía superficial efectiva " $\gamma_e$ " es la suma de la energía superficial verdadera " $\gamma_s$ " y la energía disipada durante la deformación plástica " $\gamma_p$ " en torno a la grieta a medida que se extiende. Por lo tanto se tiene:

$$\gamma_e = \gamma_s + \gamma_p$$

Las mediciones experimentales indican que para metales y polímeros " $\gamma_p$ " es mucho mayor que " $\gamma_s$ " y que si consideramos que  $\gamma_e = \gamma_p$ , la ecuación de Griffith se convierte

en:  $\sigma_f = \sqrt{\frac{2 E \gamma_e}{\pi a}}$ . En resumen, el resultado principal de la teoría de Griffith-Orowan es para que la grieta crezca.

