

Unidad 3

ENSAYO DE TRACCIÓN Y PROPIEDADES MECÁNICAS

El papel del ingeniero de estructuras es determinar las tensiones (también denominados esfuerzos) y las distribuciones de tensiones en los componentes que están sujetos a cargas bien definidas

Los ingenieros de materiales y los metalúrgicos, por otro lado, **dirigen sus esfuerzos a producir y conformar materiales que puedan soportar las condiciones de servicio predichas por el análisis de tensiones.** Esto necesariamente implica un **conocimiento** de la relación entre la microestructura (es decir, los detalles internos) de los materiales y **sus propiedades mecánicas.**

CONCEPTO DE ESFUERZO, TENSIÓN, RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN

Esfuerzo

Al actuar fuerzas exteriores, se rompe el equilibrio interno y se modifican la atracción y repulsión, átomos, generándose por lo tanto una fuerza interna que tenderá a restaurar la cohesión; cuando ello no ocurre, el material se rompe.

La variación o diferencia en el equilibrio interno es **la fuerza interior que tiende a oponerse al efecto aplicado y se denomina esfuerzo.**

La condición de equilibrio queda entonces expresada por:

Fuerza exterior o carga = Fuerza interior o esfuerzo (kgf - N)

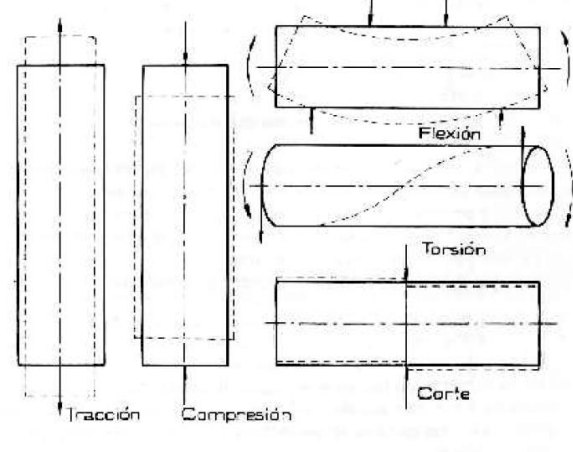
Si suponemos que las cargas aplicadas son perpendiculares a la sección transversal y se reparten uniformemente el esfuerzo total sobre una sección podrá ser considerado igual a la resultante de las fuerzas interiores que actúan sobre la misma. Si esta sección es transversal, el esfuerzo total será normal.

El esfuerzo normal tiende a alcanzar un valor crítico para el cual se produce la decohesión de la estructura o fractura

El esfuerzo tangencial tenderá a generar deslizamientos de los elementos componentes, que pondrán de manifiesto la mayor o menor capacidad del material a ser deformado.

Clasificación de los Esfuerzos

Podemos así distinguir cinco esfuerzos simples: tracción, compresión, flexión, torsión y corte



Tensión – Resistencia

Los valores en kilogramo fuerza o newton de los esfuerzos producidos en el material no dan una medida de su resistencia porque la resistencia de una estructura también depende de sus dimensiones.

La valoración de resistencia se evalúa mediante el esfuerzo por unidad de sección, obteniéndose el **esfuerzo unitario o tensión:**

Tensión Normal = $\frac{\text{Esfuerzo normal}}{\text{Sección}} = \sigma = \frac{P_N}{S}$

Tensión Tangencial = $\frac{\text{Esfuerzo tangencial}}{\text{Sección}} = \tau = \frac{P_T}{S}$

Deformaciones: Como **resultado** inmediato a la aplicación de una carga o generación de un esfuerzo en un material, surge una **deformación** que puede resultar **elástica o plástica**

Es Elástica si el cuerpo recupera sus dimensiones originales al cesar la carga que la provoca
Es Plástica si el cuerpo NO recupera sus dimensiones originales al cesar la carga que la provoca

ENSAYO DE TRACCIÓN:

Un cuerpo se encuentra sometido a un esfuerzo de tracción simple, cuando sobre sus secciones transversales se le aplican cargas normales uniformemente repartidas y de modo de tender a producir su alargamiento.

Es el ensayo que mejor determina las propiedades de resistencia y deformabilidad de los metales.

Permite obtener, bajo un estado simple de tensión, **el límite de elasticidad, la carga máxima y la resistencia estática.**

Tensión Nominal

$\sigma_{en} = \frac{P}{S_0}$

Tensión a la tracción o Resistencia estática

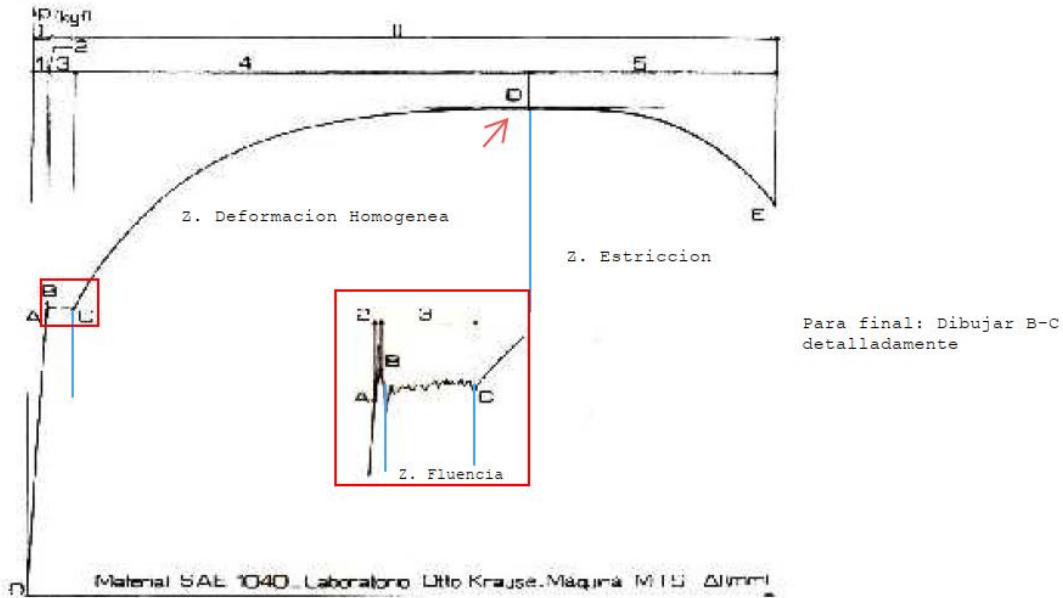
$\sigma_{ET} = \frac{P_{max}}{S_0}$

Gracias a estos valoremos podemos obtener valores admisibles

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{ET}}{coef.seguridad(N)} \quad (\text{Material frágil})$$

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_p}{coef.seguridad(N)} \text{ (Material dúctil)}$$

Se puede estudiar gráficamente la relación entre la carga aplicada con las deformaciones que produce.



En aceros, a mayor contenido de carbono, menor zona de fluencia, menor zona de def. homogénea pero mayor resistencia a la tracción.

A = Límite de proporcionalidad (recta de Hooke)

C = Límite final de fluencia.

B = Límite inicial de fluencia o elástico aparente.

D = Carga máxima.

E = Rotura de la probeta.

I) PERIODO PROPORCIONAL

1 - Zona elástica

II) PERIODO PLASTICO

2 - Zona de alargamientos pseudoelásticos

3 - Zona de fluencia o escurrimiento.

4 - Zona de alargamiento homogéneo en toda la probeta.

5 - Zona de estricción.

Entre los puntos AB tiene lugar una muy pequeña deformación elástica diferida en el tiempo (anelasticidad) como si fuera un viscoplastico, al ser una deformación tan pequeña se justifica que se tome directamente al punto B como referencia de la propiedad elástica del material, al que se lo denomina **límite elástico aparente** que coincide con el superior de fluencia ("límite de fluencia").

El fenómeno de fluencia se produce sin aumento de carga y no se produce simultáneamente en todo el material, por lo que las cargas se incrementan en forma alternada. Este fenómeno se repite hasta que el escurrimiento es total y que nos permite distinguir los límites superiores e inferiores de fluencia.

En la fluencia, la superficie pulida de la probeta (rectificada) se torna granulada, con la aparición, en algunos casos, de líneas formando ángulos de aproximadamente 45° , a las que se las reconoce como de deslizamiento, escurrimiento, de Luders o Hartmann

Luego, comienza un periodo de alargamiento homogéneo el cual queda determinado por la carga máxima.

A partir de la carga máxima soportada comienza un nuevo fenómeno de **estricción**. Durante este periodo la deformación se localiza o **enfoca en una determinada zona de la probeta**, provocando un estrechamiento de las secciones que la llevan a la rotura.

Las deformaciones plásticas provocan un aumento de la tensión tangencial crítica necesaria para desplazar los planos cristalinos. Esto provoca un efecto de endurecimiento en el material y por lo tanto aumenta su capacidad de carga pero también le otorga fragilidad. En conclusión, una vez finalizada la fluencia se necesita más carga para lograr una deformación. Este fenómeno que se conoce con el nombre de **acritud**.

En el período de **estricción** la acritud subsiste pero no puede compensar la rápida disminución de algunas secciones transversales, produciéndose un descenso de la carga hasta la fractura.

Fenómeno de Fluencia

El fenómeno d es un período de deformaciones no homogéneas o localizadas que se propagan por la acción de la tensión aplicada. Este proceso está íntimamente relacionado con la presencia en la estructura de pequeñas cantidades de átomos de impurezas.

DIAGRAMAS CONVENCIONALES Y REALES

En el diagrama real estoy considerando la verdadera sección instantánea de la probeta (Que disminuye), por ende el valor tensión aumenta. Por eso en un diagrama real sube. Se puede deducir claramente ya que la tensión es inversamente proporcional a la sección. Por lo tanto si la sección tiende a 0 (Periodo de estricción) La tensión tiende a infinito.

Diagrama Real de Tensiones

El diagrama convencional induce a creer que la probeta rompe para un valor de la tensión que no es la máxima, lo que contradice a todo concepto lógico. Esto se debe a que las tensiones en él representadas se calculan en base a su sección inicial.

Para obtener el diagrama de tensiones reales hasta la carga máxima emplearemos un procedimiento gráfico-analítico, que se basa en el hecho comprobado experimentalmente de que **la deformación plástica hasta la carga máxima se produce a volumen constante**

Es decir:

S0 · l0 = S · l ∴ S = S0 · l0 / l

Asi obtenemos que :

σr = (P / S0) · (l / l0)

Luego, analizamos:

ε = (l - l0) / l0 = l / l0 - 1

l / l0 = 1 + ε

Asi obtenemos el de las tensiones reales en función de las convencionales para cualquier punto comprendido **entre el límite de fluencia y la carga máxima, debido a que consideramos deformaciones homogéneas:**

σr = σ (1 + ε)

El procedimiento expuesto podría considerarse como definitivo en metales frágiles en los que una vez alcanzada la carga máxima sobreviene la rotura, en cambio en los dúctiles el proceso que tiene lugar en la estricción impone tener en cuenta otras consideraciones.

En la **estricción** o deformación localizada se produce un efecto similar al de una entalla que modifica el estado de tensión en la sección afectada, por lo que la tensión que surge de considerar a la carga de fractura y la sección transversal debe corregirse considerando el estado triaxial.

El diagrama real sólo se construye a partir del límite inicial de fluencia, puesto que hasta ella reducción de sección es prácticamente nula

La diferencia entre sus respectivos diagramas reales y convencionales será menor a medida que aumenta la fragilidad de los metales.

Diagrama Real de Deformaciones

La fórmula que permite determinar las deformaciones reales en función de las convencionales es sólo aplicable al período comprendido entre la fluencia y la carga máxima.

Real:

εr = ln(l / l0)

En donde:

εr = ln(ε + 1)

Diagrama Obtenido Para Distintos Metales

Se consideran materiales muy dúctiles a los que presentan mucha estricción, y muy frágiles en los que la rotura se produce inmediatamente después de pasado el límite de elasticidad.

Tambien, a medida que aumenta la resistencia del material ensayado, va desapareciendo el período de fluencia.

Por ejemplos, en los aceros, al aumentar el porcentaje de carbono aumenta la resistencia del material, pero al mismo tiempo disminuye el alargamiento y, por consiguiente, la ductilidad el mismo.

Para que la comparación de los diagramas sea posible deben realizarse a temperatura ambiente y las probetas deben ser sometidas a iguales incrementos de cargas en el tiempo, lo que tiene gran importancia debido a que **el aumento de la velocidad en el incremento de carga del ensayo produce una elevación del límite elástico y una disminución en la deformación del metal**

PROBETAS PARA TRACCIÓN

Las probetas calibradas se emplean en experiencias más rigurosas y adoptan formas perfectamente cilíndricas o prismáticas, con extremos ensanchados para asegurar la rotura dentro del largo calibrado. (ESTO NO ASEGURA QUE PARTAN EN EL TERCIO MEDIO)

La estricción será más notorio para menores valores de longitud inicial, mientras que los efectos de deformación serán mayores para longitudes más largas. Por esta razón se suelen usar probetas grandes para determinar el módulo de Young con más precisión.

SEMEJANZA ENTRE PROBETAS

Dos o más ensayos pueden compararse en sus alargamientos, si las probetas son geométricamente semejantes, lo que se logra cuando l0 es proporcional al diámetro o raíz cuadrada de la sección.

Ley de semejanza: l0 / √S0 = l'0 / √S'0 = = K

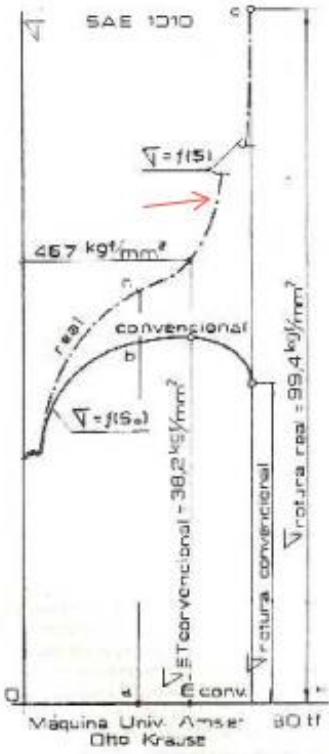


Fig. 6. Diagrama convencional y real

Si se toma la inversa de esta igualdad se obtiene la ley de Borda, conocida como ley de similitud.

Ademas:

Las cargas deben aplicarse de tal manera que resulten uniformemente distribuidas sobre la sección transversal del material.

Tratándose de ensayos estáticos el incremento de las cargas se efectúa en forma muy lenta para evitar los efectos de las fuerzas de inercia.

El incremento de la velocidad de la aplicación de las cargas de ensayo produce un retraso en aparición de las deformaciones plásticas y un aumento en la resistencia del material.

DETERMINACIONES A EFECTUAR EN UN ENSAYO DE TRACCIÓN ESTÁTICO

El ensayo de tracción es el que mejor define las propiedades mecánicas de los metales sometidos a cargas estáticas, pero se debe tener cuidado, recalcamos que esto es solo valido con los metales porque, por ejemplo, un ensayo a tracción en un cerámico otorga resultados distintos a un ensayo de compresión

1° Propiedades Mecánicas de Resistencia

Fluencia y límite elástico

El límite proporcional se define como aquel punto en el cual se produce la desviación inicial de la linealidad de la curva tensión-deformación

Para materiales frágiles se ha establecido una convención por la cual se traza una línea recta paralela a la línea elástica del diagrama de la tensión-deformación desplazada por una determinada deformación, usualmente 0,002. La tensión correspondiente a la intersección de esta línea con el diagrama tensión-deformación cuando éste se curva se denomina límite elástico, σ_y .

Tensión al límite convencional 0,2: $\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{S_0}$

Aunque no es posible aplicarlo para aquellos materiales que tienen una región elástica no lineal.

En el límite de fluencia superior, la deformación plástica se inicia con una disminución de la tensión.

Resistencia Estática a la Tracción

La resistencia a la tracción es la tensión en el máximo del diagrama tensión-deformación nominales.

Resistencia estática a la tracción: $\sigma_{ET} = \frac{P_{max}}{S_0}$

2° - Propiedades Mecánicas de Deformabilidad

Alargamiento total

$\Delta l = l - l_0$

Alargamiento de rotura

$$\delta \% = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100$$

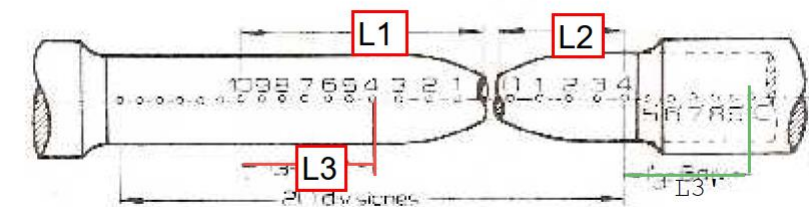
DUDAS: Algo que nunca paso en el laboratorio es que se haya partido a la mitad, en ese caso debería medir desde la división 0 hasta la 20?

Cabe destacar que:

Si la fractura se produce dentro del tercio medio se unen los trozos y se mide directamente l entre marcas extremas, es decir, 20 divisiones (Teniendo en cuenta una primera división denominada división 0)

Si ellos no ocurre entonces se enumeran las marcas llamándo 0 al más próximo a la rotura en el trozo corto.

Si el material es isótropo (Que las propiedades son iguales sin importar la dirección en la que se estudia el material), los puntos equidistantes de la rotura experimentarán iguales deformaciones, por lo que la longitud l'3 resulta igual a la l3.



La longitud final será entonces igual a:

$$l = l_1 + l_2 + l'_3 = (l_1 + l_2) + l_3$$

Lo importante esta en llegar a medir la misma cantidad de marcas que teníamos al inicio.

Estricción

Una vez alcanzada la carga máxima se produce un estrangulamiento en la sección denominado ESTRICCION. Esta disminución de sección hace que se llegue a la rotura cuando la carga es inferior a la máxima aplicada, a pesar de la acritud.

La estricción será:

$$\phi \% = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100$$

(S: Sección final)

3° - Otras Propiedades Mecánicas

Ductilidad:

La ductilidad es **una medida del grado de deformación plástica que puede ser soportada hasta la fractura**. Un material que experimenta poca o ninguna deformación plástica se denomina frágil.

La ductilidad puede expresarse cuantitativamente como alargamiento relativo porcentual (% ϵ)

O por porcentaje de reducción de área o estricción ($\psi\%$).

La ductilidad es una propiedad importante ya que indica al diseñador el grado en que una estructura podrá deformarse antes de producirse la rotura.

Como materiales frágiles pueden considerarse aquellos que tienen una deformación a la fractura menor que aproximadamente 5%.

El módulo de elasticidad, el límite elástico y la resistencia a la tracción **disminuyen al aumentar la temperatura**.

En el caso de la **ductilidad**, la cual usualmente **aumenta con la temperatura**.

Resiliencia

La resiliencia es la capacidad de un material de absorber energía elástica cuando es deformando y de ceder esta energía cuando se deja de aplicar.

A partir de esto se denomina el **módulo de resiliencia, U_r** , que **es la energía de deformación por unidad de volumen** que se requiere para deformar un material **hasta el límite elástico**.

Matemáticamente, el módulo de resiliencia de una probeta sometida a una carga uniaxial es justamente el área debajo de la curva tensión-deformación hasta la fluencia (Figura 16), o bien

$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma \cdot d\epsilon$$

Suponiendo que la región es elástica lineal:

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y$$

Tenacidad

Es una medida de la capacidad de un material de absorber **energía antes de la fractura**.

Matemáticamente es el **área bajo la curva σ - ϵ hasta la carga máxima**.

Es una propiedad que nos otorga un índice de la resistencia a la fractura de un material cuando existe una grieta.

Para que un material sea tenaz, debe poseer tanto resistencia como ductilidad

FRACTURAS POR TRACCIÓN

Cuando un metal es sometido a tracción existen tensiones normales y tangenciales las que tienden a separar o deslizar a los átomos de sus cristales o granos.

Estas tensiones tangenciales pueden provocar deslizamientos permanentes en los planos cristalográficos dando lugar a las deformaciones plásticas. Estas máximas tensiones cortantes tienen lugar a 45 y 135 grados con el eje longitudinal de la probeta.

Así se puede deducir que por ejemplo: La rotura de una probeta cilíndrica de acero dulce (dúctil) podemos atribuirle a su poca aptitud para resistir los efectos de los esfuerzos tangenciales. Esto se debe a que los efectos máximos de las tensiones transversales tienen lugar en el eje de la probeta de tal forma que las tensiones tangenciales se concentran en una determinada zona mientras que a medida que nos alejamos de esta zona podemos comprobar que solo afectan tensiones de tracción.

El estado de tensión triple aparece al comenzar la estricción.

En un acero dúctil la máxima deformación se produce en planos a 45 y 135 grados hasta el instante de alcanzarse la carga máxima o comienzo de la estricción.

La estricción genera un estado triaxial cuya tensión normal máxima resulta la crítica, produciéndose la fractura

La forma de la fractura en estos casos es la denominada de cráter o copa y cono

En los aceros, a medida que aumenta su resistencia, va disminuyendo la estricción, y la copa o cráter tiende a desaparecer.

Un acero un poco más resistente y menos dúctil tendrá una fractura con **grano medio y color mate en el centro**, con **contorno de grano más fino y brillante**.

Los aceros resistentes rompen en secciones transversales con estructura sedosa y pequeñas rebabas periféricas, cuando **son resistentes y tenaces la superficie de rotura indica nervaduras radiales y pequeñas rebabas**.

Las fundiciones de hierro (Frágiles) se fracturan **según planos normales, con grano grueso y de color gris con tendencia a blanco brillante según su naturaleza**.

ELASTICIDAD Y PLASTICIDAD

Recordamos que una **deformación es elástica** cuando **desaparece completamente al anular la causa** que la produjo.

Mientras que una **deformación plástica** es aquella que **no desaparece con la anulación de la causa**.

Los cuerpos sólidos presentan deformaciones que se componen de una parte elástica y de una plástica, cuya proporción relativa varía con el material.

Para definir elásticamente un cuerpo se lo debe hacer en función de una tensión y del tiempo.

Se define que

Una deformación es elástica, en general, cuando desaparece completamente una vez que cesa la causa que la produjo, **independientemente del tiempo**.

Ejemplo de probeta de goma: La probeta recupera su forma luego de un tiempo mucho mayor que el tiempo de aplicación de carga.

Por lo tanto se puede diferenciar dos tipos de elasticidad:

Deformación elástica instantánea o ideal es la que desaparece simultáneamente con la supresión del esfuerzo.

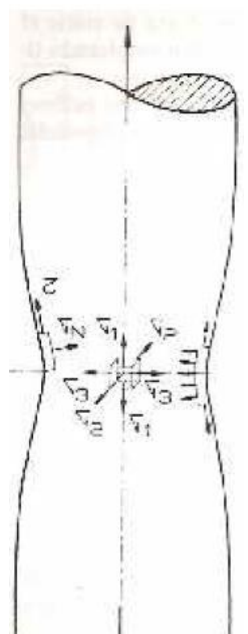


Fig. 16. Tensiones en tracción

Deformación elástica retardada es la que se anula en función del tiempo una vez suprimido el esfuerzo.

En los materiales que emplea la ingeniería se manifiestan los dos tipos de deformación elástica superpuestos, ya que muy raras veces se presenta de forma aislada la deformación elástica instantánea o ideal.

Posefecto elástico

El posefecto elástico es una manifestación de la elasticidad retardada con signo contrario. Generalmente se da por la aplicación de cargas dinámicas

La recuperación es función del tiempo y, además, de la tensión máxima a que ha sido sometido el material.

Elasticidad

En un ensayo de tracción se verifica que en el tramo recto OA se cumplirá que para cualquier punto intermedio la elongación ϵ es directamente proporcional a la tensión σ

$$\frac{\sigma_a}{\epsilon_a} = \frac{\sigma_b}{\epsilon_b} = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \text{constante} = \frac{\sigma_A}{\epsilon_A} = E$$

La constancia de esa relación entre tensiones y deformaciones específicas se designa con la letra E y se denomina módulo de Young.

La relación $E = \sigma/\epsilon$ constituye la expresión analítica de la ley de Hooke, cuyo enunciado dice que las tensiones son proporcionales a las elongaciones.

Se comprueba que al suprimir la carga exterior en cualquiera de los puntos de esta recta el material recupera su longitud inicial.

Plasticidad

Una vez que el material ha sido estirado más allá del límite de la recta, el material ensayado no recupera su longitud primitiva sino que sobreviene una deformación remanente específica denominada deformación plástica o deformación permanente.

Esto se debe a que, a diferencia de la elasticidad, ya no se trata de un alejamiento temporal de átomos (elasticidad) sino de un cambio de posiciones relativas.

Como consecuencia de esa deformación plástica, durante el proceso de descarga de la barra a partir de un punto tal como el D, se verifica que el camino recorrido en el diagrama DD', es paralelo a la recta OA, también llamada recta de Hooke.

Los corrimientos relativos entre átomos, que se efectúan a lo largo de planos cristalográficos, provocan una oposición al deslizamiento de los cristales, produciendo el endurecimiento mecánico del material.

Por lo tanto el punto D se convierte en el nuevo límite de elasticidad

La recuperación elástica total es $\epsilon_e = \epsilon_i + \epsilon_r$, subsistiendo una deformación permanente o plástica ϵ_p .

Mientras ϵ_e constituye una deformación reversible, ϵ_p , por el contrario, es irreversible.

Todo esto nos lleva a un dilema:

La existencia de una elasticidad instantánea y otra retardada en el periodo de descarga plantea también una situación de duda.

Debido a esto se definen tres módulos de elasticidad, cuya aplicación práctica se discierne en cada caso particular:

- 1. **módulo de elasticidad inicial E_o** es la pendiente de la recta tangente en el origen de la curva $\sigma - \epsilon$;
- 2. **módulo de elasticidad secante. E_s** , es la pendiente de la recta que une el origen con un punto A de la curva al que se refiere la sollicitación σ_a ;
- 3. **módulo de elasticidad tangente, E_A** , es la tangente a la curva en un punto A considerado, en que la tensión es σ_a , o sea

$$\frac{d\sigma_a}{d\epsilon_a} = E_A$$

Se verifica que $E_o > E_s > E_A$, lo que en muchos casos puede significar un estado de indefinición.

Histéresis elástica

Este fenómeno se manifiesta en los materiales sólidos en los que la curva de tensiones-deformaciones para el proceso de carga es diferente de la que corresponde al proceso de descarga.

Hay histéresis cuando el efecto de la deformación ϵ depende no sólo de la causa σ que obra en un instante dado sino también de los valores anteriores de ϵ .

Cuando ambas las curvas de carga y descarga forman un lazo cerrado, que se reproduce con la repetición del ciclo carga-descarga, se dice que el material presenta histéresis elástica.

La histéresis elástica tiene su origen en varias causas, entre ellas:

- La estructura del material. La histéresis elástica es más notoria en los materiales de estructura granular poco compacta.
- Las imperfecciones en el enrejado cristalino. Los que produce corrimientos relativos
- El tamaño relativo de los granos cristalinos y su distribución
- El tiempo de carga.

Básicamente dependen de la imperfección del material.

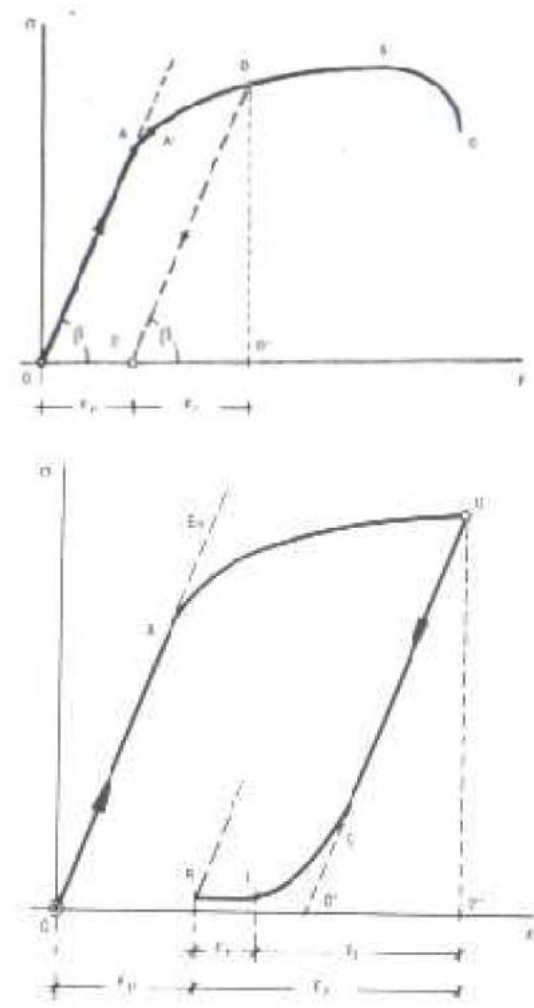
Para evitar el efecto de la histéresis es necesario que el proceso de carga y descarga se realice rápidamente

Módulo de Elasticidad

En la mayoría de los materiales se verifica la existencia de los tres módulos E_o , E_s y E_A .

Se comprueba que si después de haber cargado un material compacto hasta una tensión σ_a se lo descarga para volverlo a cargar, y así sucesivamente, se obtiene un diagrama de carga-descarga que forma un lazo cerrado después de algunas repeticiones de la operación

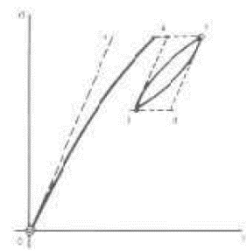
Dichos lazos, cuyo ancho se va reduciendo a medida que se repite el ciclo un cierto número de veces, se puede confundir con una recta cuya pendiente es la misma que la de la recta E_o .



Por lo tanto puede decirse que **después de la estabilización del ciclo, en cuyo caso el ancho del lazo adquiere su valor mínimo, el módulo de elasticidad tiene el valor del módulo inicial.**

La manera como se ha obtenido dicho módulo de elasticidad coincide en la práctica con la determinación del módulo dinámico E_d , la que se realiza precisamente en un ensayo dinámico.

En la mayoría de los materiales sólidos se comprueba que, efectivamente, $E_d = E_o$.



Anelasticidad

E una componente de la deformación elástica que depende del tiempo, es decir, la deformación elástica **continúa aumentando** después de aplicar la carga, y al retirar la carga se requiere que transcurra algún tiempo para que el material se recupere completamente. Este comportamiento elástico dependiente del tiempo se denomina anelasticidad.

En los metales, la componente anelástica es normalmente pequeña y, a menudo, despreciable.

Pero en algunos materiales polímeros su magnitud es importante.

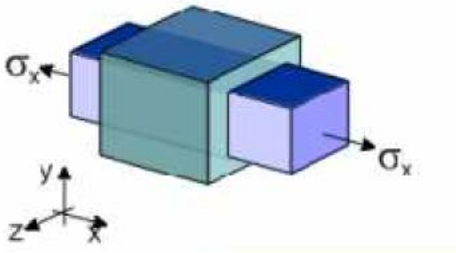
Propiedades Elásticas de los Materiales - Coeficiente de Poisson

Cuando sobre un metal se aplica una tracción, se produce un alargamiento elástico y una deformación ϵ_x en la dirección de la carga aplicada.

Como resultado de este alargamiento, se producirán **contracciones** en las **direcciones** laterales (**“y” “z”**) **perpendiculares a la dirección de la aplicación**

Se define un parámetro denominado coeficiente de Poisson como el **cociente entre las deformaciones laterales y axiales**:

$$\nu = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = \frac{\epsilon_z}{\epsilon_x}$$



Por lo general se incluye un signo negativo en la expresión para que ν sea siempre positivo, puesto que ϵ_y y ϵ_z siempre son de signo opuesto. Teóricamente el coeficiente de Poisson para sólidos isotrópicos debería ser 0.25 pero suele haber materiales con valores de 0.35

El **módulo de cizalladura** y el **módulo elástico** están relacionados entre sí y con el **módulo de Poisson** mediante la relación:

$$E = 2.G.(1 + \nu)$$

Para los metales $G=0.4E$

Definiciones:

Material **anisotropicos**: Sus propiedades depende de la dirección en la cual se estudian sus estructuras cristalográficas.

Material Isotropicos: Sus estructuras cristalinas se ubican en direcciones al azar, por lo que se puede considera que las propiedades no dependen de cómo se estudie el material.

En materiales anisotrópicos las propiedades elásticas están completamente caracterizadas sólo mediante la especificación de varias constantes elásticas.

Para materiales isotrópicos las propiedades elásticas se pueden caracterizar conociendo **al menos 2 contantes (Cuales son???Tension y deformación?)**.

Todas las demás propiedades presumen isotropía en los metales.

ENSAYO DE COMPRESIÓN.

Es un ensayo que consiste en **aplicar una fuerza estática sobre el eje longitudinal con la intención de acortar** o presionar la probeta.

Es una prueba de poco uso en metales, **mucho más usado para el hormigón**.

El diagrama obtenido **para metales** es similar al del ensayo de tracción, consiguiendo una zona elástica al principio, y una zona plástica hacia el final.

Generalizando los dos casos más comunes, para metales dúctiles obtenemos una zona elástica característica, dada por la ley de Hooke, y una zona plástica amplia sin aparición de fractura o rotura final.

Mientras que en el caso de los metales más frágiles, obtenemos una zona elástica de poca deformación, con una zona plástica prácticamente nula con la aparición de una carga de ruptura.

Al igual que en ensayos de tracción el diagrama obtenido de la máquina de ensayo es convencional, es decir, se refiere a la sección inicial.

PROBETAS PARA EL ENSAYO DE COMPRESIÓN.

Los **dos principales inconvenientes** de este ensayo se producen por:

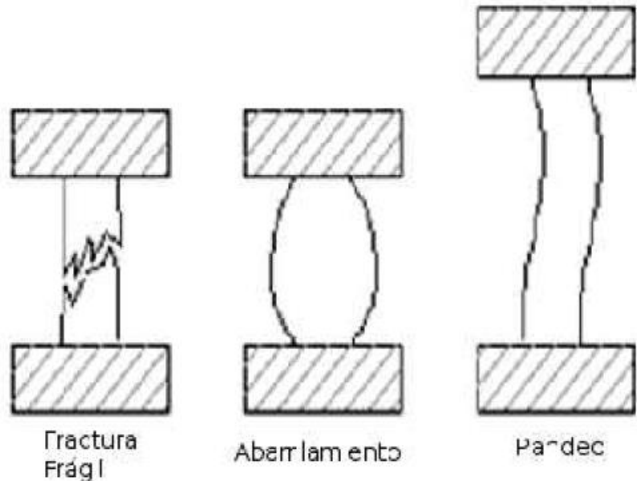
- **El rozamiento sobre las bases:** se produce porque la fricción en las caras genera un estado de tensión compuesto que produce un aumento en la resistencia de la probeta. Se hace evidente en probetas cortas.
- **Pandeo:** Es el efecto de flexionamiento lateral. Se hace más evidente en probetas largas. Este fenómeno se reduce hacia la sección transversal del centro de la probeta.

Para evitar el pandeo es importante tener en cuenta la planitud y paralelismo de las caras a ser comprimidas para que el esfuerzo transmitido sea longitudinal y no produzca flexionamiento lateral o pandeo.

Un tercer inconveniente de este ensayo es la forma de las bases, para evitar efectos de forma, se utilizan probetas de sección circular, las cuales no poseen aristas ni puntos angulosos.

Según la norma ASTM E9 las probetas se pueden clasificar es tres grupos:

- Probetas cortas: utilizadas para ensayos sobre metales que trabajaran bajo condiciones normales y a espesores reducidos. $h=0,8$ a $2 d$
- Probetas medianas: se seleccionan para ensayos de carácter general. $h=3 d$
- Probetas largas: se usan especialmente para la determinación del módulo de elasticidad a la compresión. $h=8$ a $10 d$



FRACTURA POR COMPRESIÓN

Las fracturas no se dan en materiales de mucha maleabilidad, por lo que el análisis de fractura queda para los materiales con cierta fragilidad.

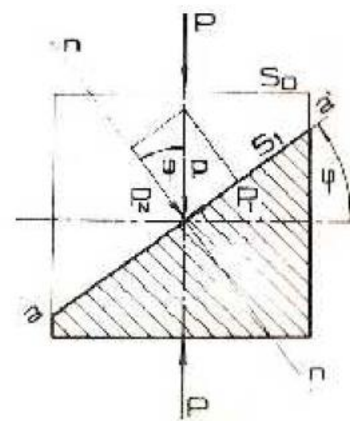
Las fracturas sobre planos inclinados son productos de las **tensiones tangenciales internas** que se producen dentro de la probeta, que para el caso alcanzan máximo valor en los planos a 45° respecto a la sección transversal.

Demostración:

$$\tau_{\varphi} = \frac{P_T}{S_1} = \frac{P \cdot \sin \varphi}{S_0 / \cos \varphi} = \frac{P}{S_0} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi = \frac{\sigma}{2} \cdot \sin 2\varphi \rightarrow$$

$$|\tau_{\varphi \text{ Max}}| = \frac{\sigma}{2}, \quad \text{para } 2\varphi = 1 \rightarrow \varphi = 45^\circ$$

Cabe destacar que las fracturas en la realidad son entre 50° y 60° respecto a la sección transversal, debido al efecto de rozamiento sobre las bases de la probeta.



DETERMINACIONES A EFECTUAR EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN

1. Resistencia estática a la compresión

$\sigma_{EC} = \frac{P_{Max}}{S_0}$ Se puede obtener sólo para metales con cierto nivel de fragilidad que produzcan ruptura durante el ensayo

2. Tensión al límite de proporcionalidad.

$\sigma_P = \frac{P_P}{S_0}$ Es el valor más representativo.

3. Tensión al límite del aplastamiento.

$\sigma_f = \frac{P_f}{S_0}$ Equivalente al límite de fluencia. No es muy utilizado

4. Acortamiento por rotura

Equivalente a alargamiento por tracción.

$$\delta_{\%} = \frac{h_0 - h}{h_0} \cdot 100$$

5. Ensanchamiento transversal

Equivalente a estricción

$$\rho_{\%} = \frac{S - S_0}{S_0} \cdot 100$$

6. Módulo de elasticidad.

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

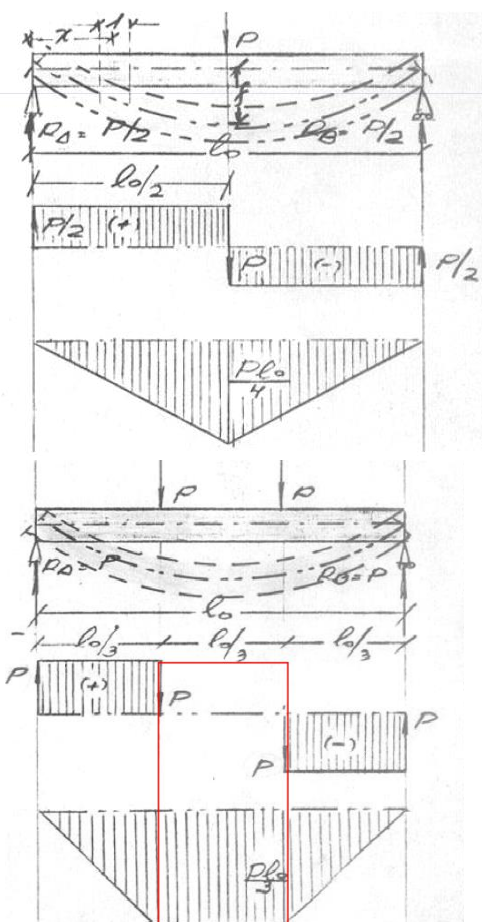
ENSAYO DE FLEXIÓN

Se dice que dicha pieza está sometida a flexión si sobre una pieza de material actúan **fuerzas** de manera tal que tiendan a **producir esfuerzos de compresión sobre una parte de la sección transversal y de tracción sobre la parte restante**.

Los valores de resistencia deducidos de los ensayos de tracción pueden ser aplicados en los cálculos de estructuras que trabajan a flexión: sin embargo, en casos especiales es conveniente obtener los coeficientes directamente de los obtenidos directamente del ensayo de compresión.

El efecto flexionante en cualquier sección se expresa como el momento flector “M”

Para el primer esquema de cargas se tiene la “flexión práctica”:



Esfuerzos combinados, también denominada flexión práctica: Suele ser utilizada en la práctica ya que se puede realizar con la máquina de ensayos universal pero no es lo ideal. El resultado no es muy preciso pero sí lo suficientemente aproximado para poder utilizarse

Para el segundo la “flexión pura” ya que en el tercio medio los esfuerzos de corte son nulos.

Zona de Flexión pura, zona ideal para ensayar.

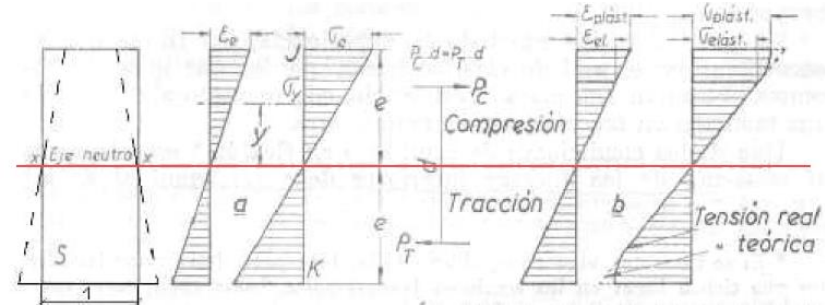
DISTRIBUCIÓN DE LOS ESFUERZOS EN LAS SECCIONES TRANSVERSALES

Debido a la flexión las fibras inferiores sufren un alargamiento y las superiores sufren un acortamiento.

Se denomina **eje neutro** a la recta formada por los puntos de la sección transversal en donde las tensiones serán nulas (que generalmente se supone coincidente con el eje medio de la sección).

En la generalidad de los casos en que no se cumple esta condición, el eje se desplaza hacia la zona más resistente para mantener la igualdad de las resultantes de los esfuerzos internos y la de sus momentos

La teoría de flexión supone que una **sección plana sometida a la acción de un momento flector permanece plana; pero sufre una rotación alrededor de su eje neutro**



CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Se efectúa determinando el momento que producen las fibras interiores respecto al eje neutro en una sección, que se oponen al momento flector originado por las cargas exteriores aplicadas al material.

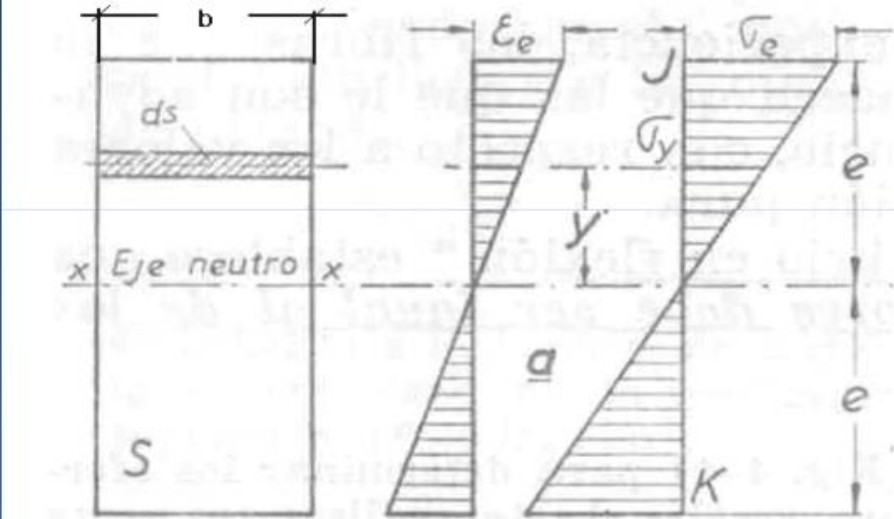
- S (área sección transversal rectangular)
- ds
- y (distancia al eje neutro)
- sigma_y (producida por dp carga)

Desarrollo:

dM = dp y -> Sabiendo que dp = sigma_y ds obtenemos:

dM = (sigma_y ds) y

Tambien sabemos que para otro punto e se va a cumplir que



- Z=1: Aceros al Carbono (corriente u ordinario);
 - Z=2: Aceros al Níquel;
 - Z=3: Aceros al Níquel-Cromo;
 - Z=4: Aceros al Molibdeno, Cr-Mo, Ni-Mo, Ni-Cr-Mo;
 - Z=5: Aceros al Cromo;
- (Las caras

Debido que la tension por flexion solo produce deformaciones elasticas y se cumple la hipotesis de permanecen planas a pesar de las deformaciones)

sigma_y / sigma_e = (y / e) ∴ sigma_y = (y / e) * sigma_e

dM = (sigma_e / e) y^2 * ds

Integrando:

$$M_{int} = \int_{-e}^e \frac{\sigma_e}{e} y^2 ds$$

donde:
$$J_x = \int_{-e}^e y^2 ds$$

$$M_{int} = \frac{\sigma_e}{e} J_x$$

Y para que este en equilibrio los M internos deben ser iguales:

M_INT = M_f = (sigma_e / e) * J_x y A “J_x / e” se lo conoce como módulo resistente “W_x”

Y finalmente se llega a la **Formula de Navier**

- $$\sigma_e = e * M_f / J_x$$
 - Puede aplicarse en flexión pura y cuando deformaciones y tensiones varíen en forma lineal.
 - No es válida para flexiones donde el radio de flexión es un muy grande, por ejemplo: Una regla de plastico, por la influencia de las capas con el eje neutro.
- Ademas no tiene en cuenta el rozamiento entre capa y capa.
 - Se puede calcular en cualquier sección el valor de la tensión en distintos puntos de ella, en **función de sus distancias al eje neutro**.

Cálculo del momento de inercia en sección rectangular:

Jx = momento de inercia con respecto al eje X

Jx = $\frac{bh^3}{12}$

Jy = momento de inercia con respecto al eje Y

Jy = $\frac{b^3h}{12}$

Jp = momento de inercia polar con respecto a un polo o eje de giro

Jp = Jx + Jy = $\frac{bh}{12} (h^2 + b^2)$

Calculo del momento de inercia en sección circular:

Jp = $\frac{\pi D^4}{32}$

Cálculo del módulo de elasticidad:

Por estar sometido el material a una carga de intensidad creciente el eje neutro se va flexionando, llamándose “**flecha**” a la **distancia vertical entre la posición inicial de dicho eje**, o sea descargado, **y las posiciones instantáneas**. Recordamos que el eje se desplaza hacia la zona más resistente para mantener la igualdad de las resultantes de los esfuerzos internos y la de sus momentos.

Es posible calcular el modulo de elasticidad mediante la medida de flechas (medir 5 o mas):

Para una viga simplemente apoyada se cumple que:

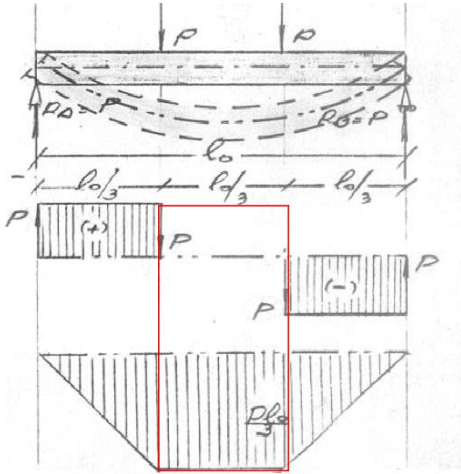
Para una **carga concentrada en su seccion media**

$$f = \frac{1 P l_0^3}{48 E Jx} \therefore E = \frac{1 P_{PROM} l_0^3}{48 f_{PROM} Jx}$$

Donde f es el promedio de todas las flechas.

Para una carga concentrada en los tercios de la luz. (Luz: Distancia entre los apoyos)

$$f = \frac{23 P l_0^3}{648 E Jx}$$



PROBETAS:

Las probetas para ensayo de flexión son de sección circular o rectangular, según el material a ensayar. La luz entre apoyos no debe ser reducida para que los esfuerzos de corte no adquieran valores importantes.

Se recomienda tomar como lo L0>12 d0.

Las probetas pueden ser fundidas o mecanizadas pero **no deben poseer sopladuras ni rebabas que perturben el ensayo**.

Tipos de probetas:

TIPO	d0(mm)	l0(mm)	lt(mm)
A	22 ± 1,5	300	375
B	30 ± 2,5	450	525
C	50 ± 2,5	600	675

5 DETERMINACIONES A REALIZAR EN EL ENSAYO

Conviene especificar:

- 1) Antes del ensayo:
 - a) Norma a consultar
 - b) Accesorios de la máquina de ensayo y escala de cargas
 - c) Material
 - d) Dimensiones d0, l0, lt, y croquis de la misma

- 2) Durante el ensayo:
 - a) En periodo elástico Pi -fi (5 valores), PMAX, fMAX
 - b) Tipo de fractura con croquis.

- 3) Después del ensayo:
 $E = \frac{1 * P_{PROM} * l_0^3}{48 * f_{PROM} * Jx}$ donde Pprom y fprom son los valores promediados de las determinaciones

$$\sigma_{EF} = \frac{M_{MAX}}{Wx} = \frac{\frac{P_{MAX} * l_0}{4}}{\frac{\pi * d_0^3}{32}} = 2,5465 \frac{P_{MAX} * l_0}{d_0^3}$$

Como datos complementarios la norma DIN 50110 define: Factor de flexión = σEF/σET (1,8 - 2,2)
Rigidez de flexión = σEF/ fMAX(6 - 9)

ANÁLISIS DE LOS VALORES DEDUCIDOS DEL ENSAYO DE FLEXIÓN

Si el ensayo se efectúa según el esquema de viga simplemente apoyada con una carga concentrada, el modulo "E" deducido en (4) no coincide con el calculado en ensayo de tracción; ello se debe a que en la deducción teórica de la ecuación no se ha tenido en cuenta el efecto del esfuerzo de corte.

La deducción de la expresión de “σy” supone sea **que cada fibra trabaja independientemente con una tensión proporcional a su distancia al eje neutro, sin influencia de las deformaciones de las fibras adyacentes**.

En realidad: cada fibra sufre una tensión proporcional a su distancia al eje neutro pero se produce una deformación que trae aparejada una contracción transversal, y como consecuencia **la fibra situada inmediatamente debajo de la considerada sufre una tensión menor** (porque lo es su distancia al eje neutro) su contracción transversal también será menor, y como está íntimamente ligada a la fibra superior considerada, impedirá la libre deformación de ésta. Como deformaciones y tensiones están relacionadas, la tensión de la fibra también será alterada.

En ensayos de flexión para conocer la tensión máxima de rotura, debe distinguirse entre materiales plásticos y frágiles. En el caso de los plásticos (ejemplo: aceros suaves) en el momento de la rotura las fibras que sufren mayores tensiones, o sea, las más alejadas del eje neutro, habrán pasado el límite de proporcionalidad. **Por esta razón no se verifican las hipótesis planteadas.**

Con materiales frágiles la rotura se produce sin grandes deformaciones y por lo tanto sí valen las hipótesis planteadas.

Otro fenómeno que puede influir sobre el resultado es el rozamiento de la probeta sobre sus apoyos; al deformarse la pieza debe poder deslizarse libremente sobre los apoyos, ya que si existe rozamiento se introducen fuerzas suplementarias no previstas en el cálculo

ENSAYO DE CHOQUE

A veces es necesario determinar la resistencia de los materiales frente a sollicitaciones de tipo instantáneo, como es el choque, debido a que los ensayos estáticos y los de fatiga no abarcan todas las situaciones que se presentan en la práctica.

El objeto del ensayo de choque o impacto es **determinar la capacidad del material para absorber y disipar la energía generada por el choque**, buscando conocer qué valor es necesario para romper el material en condiciones definidas.

También es útil para la Aceptación o rechazo de materiales; por ejemplo aceros cuando se sospecha la presencia de elementos fragilizantes

El **ensayo de choque no reproduce las condiciones de las cargas de impacto en servicio**, sino que constituye de por sí un ensayo que da la resistencia de una probeta.

Se puede decir que este ensayo da un índice de fragilidad de los materiales ante impactos.

El problema de choque **es importante en el diseño y dimensionamiento de partes móviles pesadas bajo velocidades notables.**

Estos ensayos se realizan bajo normalizaciones, donde se mide la energía de choque hasta la rotura del material y no se hacen determinaciones de deformaciones. Para esto es necesario que el material se vuelva más frágil de manera artificial con el fin de lograr la fractura de la probeta. Una forma de lograr esto es realizar una entalladura en la probeta.

Son necesarias tres condiciones para una fractura frágil:

1) Estado triaxial de tensiones.

2) Temperaturas bajas.

3) Velocidades elevadas de carga o de deformación.

Las dos primeras condiciones son las responsables de la mayoría de las **fracturas frágiles en servicio**

La tercera intensifica los efectos de las primeras, por esta razón se utiliza el ensayo de resiliencia para tener en cuenta la energía que es capaz de absorber un material previo a la fractura por impacto.

MÁQUINAS DE ENSAYO

Se usan máquinas llamadas “martillos pendulares” o simplemente péndulo.

El principio de funcionamiento responde al esquema donde un peso “G” asegurado a una barra que puede girar libremente sobre un eje

“O”, puede ser elevado a una altura “h1” desde su posición vertical de reposo, que también puede indicarse con un ángulo “a1”.

Si en esas condiciones se la deja caer, pasará en la primera oscilación a la posición opuesta, alcanzando una “h’1” o un “a’1”; la energía de la primera posición será igual a la del final de su carrera.

$$E_1 = E'_1 = G \cdot h_1 = G \cdot h'_1$$

Generalmente h1 no es igual a h’1 debido a las pérdidas, por lo tanto se pueden obtener valores de las pérdidas internas del péndulo.

Ahora si en el punto “P” situado sobre la vertical del desplazamiento del péndulo se coloca una barra de un material, la masa al chocar producirá su rotura y si la energía que posee el péndulo es mayor que la necesaria para lograrla, proseguirá su trayecto elevándose hasta una altura “h2” indicada por el ángulo “a2”.

El trabajo gastado en romper la barra será la diferencia entre la energía inicial y la que posee al final de la carrera:

$$E_0 = (E_1 - E_2) = G \cdot (h_1 - h_2) = G \cdot (r \cos a_2 - r \cos a_1)$$

MÉTODO DE CHARPY

Es un método para determinar la resistencia a la flexión por choque en probetas entalladas de materiales metálicos, que **reciben el impacto en la cara opuesta de la entalladura.**

La norma IRAM 106, establece que:

1) La temperatura de la probeta deberá permanecer en **(20±1)°C.**

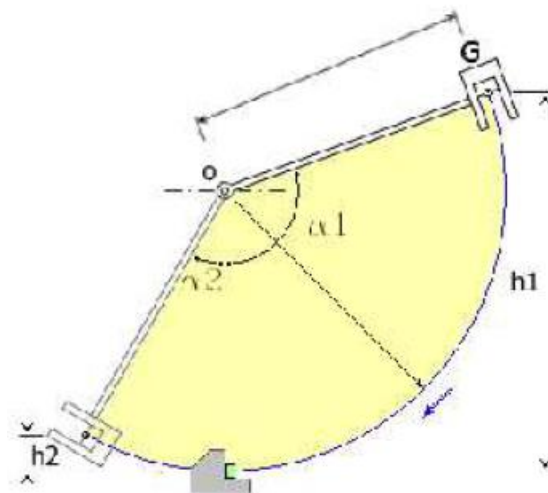
2) Las probetas se extraerán del material a ensayar, **evitando modificaciones** en su estructura, ya sea por **calentamiento o por endurecimiento** en frío.

Sus dimensiones serán:

Longitud: (55±1) mm; ancho = altura = (10±0,1) mm.

Según las formas y dimensiones de las entalladuras se tienen

Probetas francesas, alemanas (para materiales más frágiles, ya que las entalladuras son de menor dimensión)



La máquina a emplear tiene un **martillo pendular de 20 kgf** de peso, que se deja caer desde una **altura de 1,50 m**. Dicho martillo está terminado en una cuchilla cuyo espesor es de 16mm y sus caras forman un ángulo de 30º con un filo redondeado de r = 2 mm.

Se vio que **la distancia entre apoyos es de 40 mm**, los bordes de éstos son redondeados con r = 1mm y las paredes tienen una inclinación de 1:5.

El procedimiento prevee colocar la probeta sobre los apoyos, de modo que el centro de la entalladura esté en el mismo plano vertical que recorre el centro del golpeará la probeta en la cara opuesta de la entalladura.

La resistencia a la flexión por choque o resiliencia dinámica está dada por:

$$K = \frac{E_0}{S}$$

MÉTODO DE IZOD

Temperatura de la probeta (20±1)°C
La probeta deberá tener las siguientes medidas:

Longitud: 130mm sección 10mm²
Con 3 entalladuras separadas 25mm entre sí.

También pueden ensayarse probetas cilíndricas.

En todos los casos a las probetas se las sujeta verticalmente hasta el plano de la entalladura, comportándose como una viga en voladizo que **es golpeada a 22mm** de dicho empotramiento, en el mismo lado donde se encuentra la entalladura.

La máquina tiene un péndulo con una masa de **25,250 Kgf. (60 libras)** con una altura de caída de **0,610 m (2 pies)**

En este caso la resiliencia dinámica es igual al trabajo o energía de impacto para rotura de la probeta de un solo golpe:

$$K = E_0$$

5-a Valores normales para ciertos materiales

Con péndulo Charpy y probeta “Mesnager” (“U” de 2 mm profundidad), se tiene:

a) En aceros dulces	K= 30 Kgfm/cm ²
b) Para aceros de elevado % C	K= 5 Kgfm/cm ²
c) En aceros con σ _{ET} =100 Kg/mm ²	K=15 Kgfm/cm ²

Se puede dar una tabla de equivalencias aproximadas entra método Izod y Charpy sólo a título ilustrativo:

INFLUENCIA DE LAS VARIABLES IMPORTANTES

- **Temperatura**
- El ensayo de choque sobre probetas entalladas es más informativo cuando se realiza sobre un intervalo de temperaturas, para poder determinar la transición de fractura dúctil a frágil.
- En las curvas del gráfico se aprecia que **la energía absorbida aumentar al aumentar la temperatura.**
- **Velocidad de ensayo:** La energía absorbida aumenta al bajar la velocidad
 - **Tamaño de la probeta:** La energía absorbida aumenta al aumentar el tamaño de la probeta
 - **De la entalladura:** Influye más en aceros dúctiles donde la resiliencia varía en forma lineal o menor a partir de los 2 mm; en los aceros más frágiles no tiene influencia.
 - **El ángulo:** Cuando éste aumenta, lo hace también la resiliencia.

FRACTURA

La fractura es la separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes por efecto de tensiones actuantes en él.

En un material metálico o cristalino pueden ocurrir **dos formas de fractura:**

- 1) Por separación, despegue o **decohesión**;
- 2) Por **corte**, cizallamiento o deslizamiento.

Cuando hay poca o ninguna deformación plástica, caracterizada por una rápida propagación de grietas, se dice que “la falla es frágil” y la energía absorbida es relativamente menor en comparación con un material dúctil. Una falla frágil va acompañada de una fractura por separación y esa superficie presenta apariencia granular o cristalina

ENSAYO DE DUREZA

La dureza de un material es un concepto relativo, ya que es posible afirmar que un material es más duro que otro pero no existe una medida o patrón único para definir la dureza cuantitativamente.

La dureza es relativa ya que solo podemos magnificar el concepto de dureza mediante la observación de la deformación plástica que se produce entre dos materiales.

La dureza de un material es la propiedad que éste posee para rayar otro material, sin ser rayado por aquél.

Es decir, la capacidad para oponerse a la deformación plástica localizada provocada por otro material, cabe destacar que la deformación plástica localizada puede ser una ralladura o una penetración.

Con este criterio se ha realizado una escala de dureza, la **escala de Mohs**, la cual en su inicio estaba contenida por 10 materiales pero en la actualidad posee más de 10 debido al desarrollo de materiales.

Ensayo de dureza simple

Dentro de los procedimientos actualmente en uso se emplea el diamante, al que se da una forma cónica o piramidal en el extremo. Sobre esa punta se hace incidir una carga, por lo general de 20g bajo la cual se hace deslizar la punta de diamante normalmente a la superficie. Después de haber producido unos 10 trazos, se mide el ancho de los mismos para luego calcular el ancho promedio. De igual manera puede haber variables ya que puedo interpretarlo como la comparación entra cargas necesarias para producir un ancho promedio de los 10 trazos. La mayor parte de esos métodos se basan en la resistencia que opone un cuerpo para dejarse deformar por otro más duro.

DUREZA BRINELL

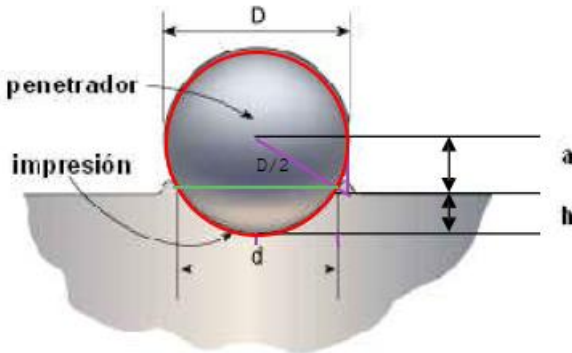
El método Brinell para determinar la dureza de los **materiales metálicos** se basa en la resistencia que opone el cuerpo examinado para dejarse penetrar por otro más duro llamado penetrador, impelido por una carga determinada. **En todos los casos la forma del penetrador es esférica.**

El procedimiento consiste, esencialmente, en apretar gradualmente sobre los materiales metálicos una bolilla dura, de diámetro D, con la fuerza F, y en medir, después de suprimida ésta, el diámetro d de la impresión.

- La dureza en este ensayo es determinada por la relación de la carga con la impresión que deja el penetrador sobre el material.

La principal diferencia con **Rockwell** y **Brinell**, al igual que en **Vicker** y con **Knoop**, es que se produce una **IMPRESION**. Mientras que en **Rockwell** la dureza está dada por la distancia de penetración ante una carga específica.

El número de Brinell (H), que expresa la dureza, es la relación de la carga P, en kilogramos, a la superficie del casquete esférico de la impresión, en milímetros cuadrados.



El área de la impronta está dada por $\pi \cdot d \cdot h$. Y la dureza está dada por:

Donde:

- P: carga** aplicada a la bolilla en kilogramos
- D:** diámetro de la **bolilla** en milímetros
- d:** diámetro de la **impresión** en milímetros
- HB:** número de **dureza Brinell** en kilogramos por milímetro cuadrado

$$H = \frac{\text{Carga}}{\text{Superficie del Casquete Esférico}} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\pi D h}$$

Para evitar errores por lecturas rápidas es más conveniente calcular la dureza Brinell a partir del diámetro d de la impronta:

$$h = \frac{D}{2} - a \quad ; \quad a = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{4}} = \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - d^2}$$

$$h = \frac{D}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - d^2} = \frac{1}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

Y se obtiene:

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

En general **HB está dado en la daN/mm2**, por esto la dureza suele indicarse tan sólo mediante el valor numérico.

Ley de semejanza para el ensayo Brinell

Para poder comparar diversos ensayos Brinell entre sí cuando los mismos se efectúan con bolillas de distinto diámetro se debe cumplir que todas las impresiones Brinell se efectúen manteniendo constante el ángulo α en todas ellas.

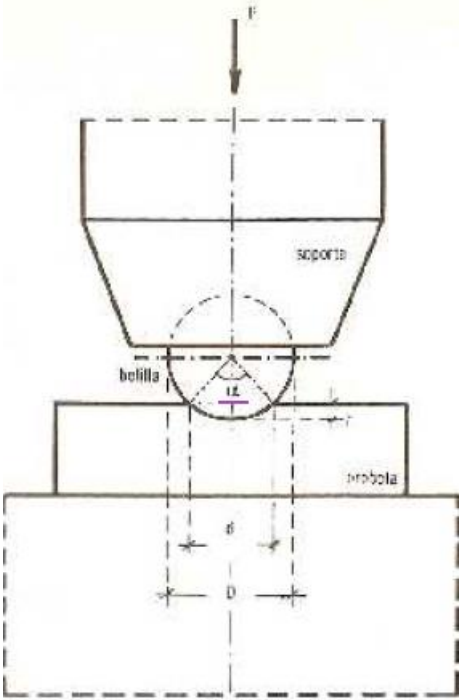
$$HB = \frac{P}{\pi D \left(\frac{D}{2} - \frac{D}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right)} = \frac{P}{\pi D^2 \sin^2 \frac{\alpha}{4}}$$

La constancia de α impone para la igualdad de las durezas HB

$$\frac{P}{D^2} = cte = k$$

Por lo tanto, si HB= cte y además a=cte

Se observa que $P / (D^2)$



Penetradores

Los penetradores más empleados en el ensayo de dureza Brinell son los de **10, 5 y 2,5 mm**.

A medida que los **metales son más duros**, es necesario recurrir a **penetradores de menor diámetro**

Determinación de la dureza Brinell

Para determinar la cifra de dureza Brinell se debe disponer de

- Una máquina para aplicar la carga
- Del penetrador esférico correspondiente
- De un cronómetro para medir el tiempo de duración del ensayo

Indicación de la dureza Brinell:

Para identificar de un modo completo el ensayo efectuado se utiliza el símbolo “HB”, al que siguen tres números que indican sucesivamente el diámetro de la bolilla del penetrador en mm, la carga en daN y el tiempo de duración del ensayo en segundos.

Por ejemplo, si un ensayo de dureza **Brinell con D = 10 mm, P = 3 000 daN y t = 30 s** arrojó la cifra **185** El resultado se expresa con:

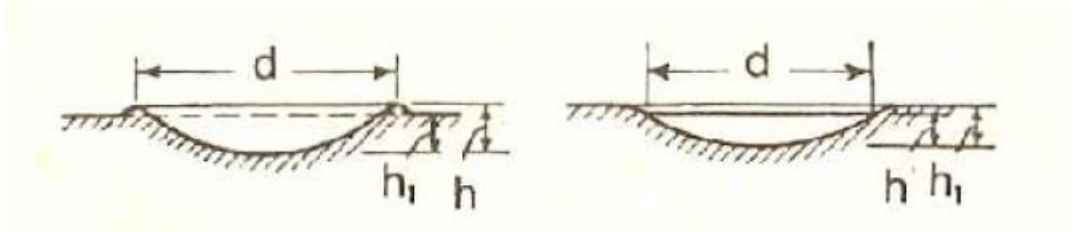
185 HB10 /3000/30

Determinación de la dureza Brinell sobre la base de la profundidad de la penetración

Si bien **desde el punto de vista teórico** la cifra de dureza Brinell **es la misma tanto si se la determina sobre la base del diámetro d de la impresión o de la profundidad h de la misma.**

En la práctica se comprueba una disparidad bastante notable entre ambas.

Ello se debe al hecho de que durante la penetración de la bolilla en el metal examinado se produce un reborde o resalte que incide sobre el valor del diámetro d, y que el medidor de profundidad no toma en cuenta porque la profundidad observada h1 es determinada generalmente como movimiento relativo entre el soporte del penetrador y la probeta, y la profundidad real h corresponde a la altura real de la impresión y por lo tanto no coinciden.



Notamos que el diámetro no se ve afectado significativamente por ese fenómeno, el diámetro de la impresión no depende tanto de ese fenómeno, por lo que da una cifra Brinell más uniforme.

DUREZA ROCKWELL

El ensayo de dureza Rockwell se basa **en la determinación de la profundidad de la penetración de un cuerpo de dureza prefijada** dentro del material en estudio.

Se utilizan dos tipos de penetradores:

- Una esfera de acero para **metales blandos.**
- Un cono de diamante para **metales duros.**

La penetración se realiza bajo cargas determinadas que varían según el tipo de penetrador.

Los dos ensayos Rockwell más corrientes son:

- HRB, dureza Rockwell B:** se emplea como penetrador una **bolilla** esférica de 1/16” de diámetro y una carga de **100 daN**.
- HRC, dureza Rockwell C:** el penetrador es un **cono** de diamante de 120°, con punta redondeada, al que se aplica una carga de **150 daN**.

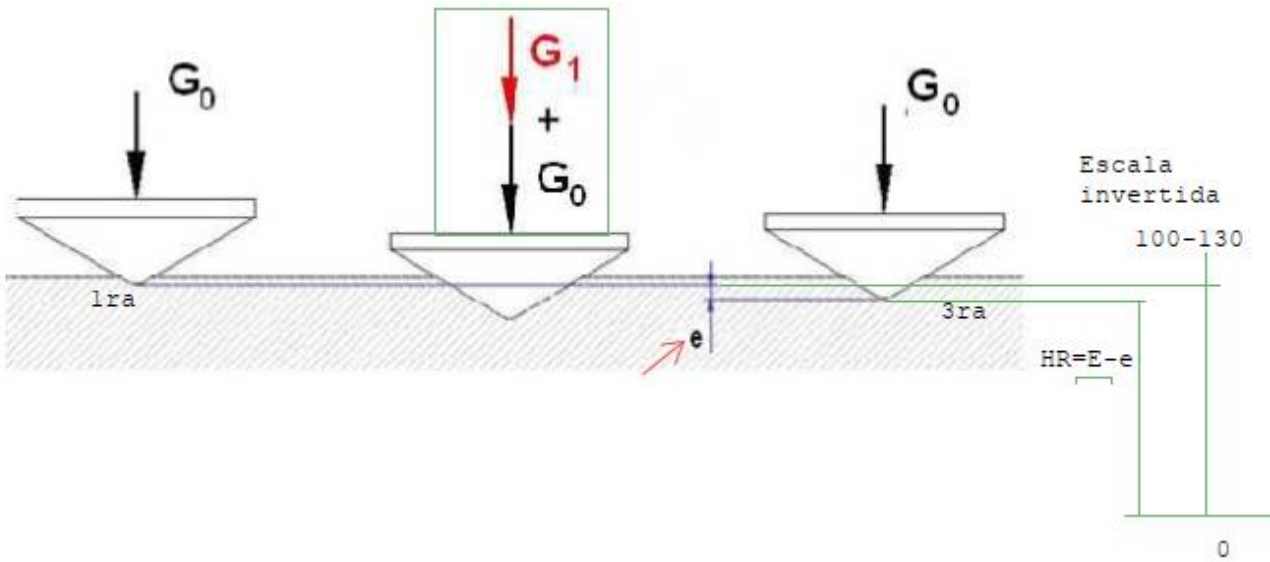
Tipo	Penetrador	Carga (daN)			Material
		G ₀	G	G ₁	
A	cónico	10	50	60	aceros duros de poco espesor y extremadamente duros
B	Esférico (1/16")	10	90	100	aceros de bajo carbono, bronce en general para HR _B < 100
C	cónico	10	140	150	acero duro, acero templado, acero de aleación, en general HR _C > 20

En la practica se suele comenzar con Rockwell C. En caso de marcar pocas divisiones debemos cambiar a ensayos de materiales mas blancos como Rockwell B o Brinell. La norma indica que si la dureza Brinell supera los 400 entonces voy a Rockwell. Por lo tanto empezar con Rockwell C es una buena forma de prevenir inconvenientes y deformaciones en el penetrador.

Método de ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos

El ensayo de dureza Rockwell es un método que permite determinar la dureza de materiales metálicos.

En ensayo consiste en aplicar una carga inicial G0 mediante un cuerpo esférico o cónico llamado penetrador, luego la carga total con una carga G1 mayor que G0 y luego medir después de suprimida G1.



El ensayo de dureza Rockwell normal es el realizado con alguna de las siguientes escalas: A, B, C, D, E, F, G, H; El incremento de penetración “e” se mide en una escala cuya unidad fijada arbitrariamente es **0,002 mm**.

-Calculo e a partir de la primera y la tercera posicion.

La segunda posicion no es valida para realizaar mediciones porque pueden existir deformaciones elásticas que luego desaparecen por la misma razón, por ser elastica.

La profundidad la mide el equipo de forma automatica

La carga inicial es la carga que tiene por objeto asegurar, una perfecta sujeción de la pieza que se ensaya y un buen contacto del penetrador.

La carga adicional es la carga que permite obtener el incremento de penetración y, por lo tanto, la dureza de la pieza que se ensaya una vez que se ha suprimido aquella. Finalmente, la carga total es la suma de la carga inicial y adicional.

El número de dureza Rockwell (HR) se expresa como:

HR = C - e

La letra del ensayo se indica como un subíndice de HR. Ejemplo: $HR_B = 130 - e$
 $HR_C = 100 - e$

Donde:

- **C:** El número cien o ciento treinta, según el tipo de penetrador usado, sea cónico o esférico respectivamente.
- **e:** El incremento de la penetración inicial, medido en una escala cuya unidad fijada arbitrariamente es 0,002 mm para la dureza Rockwell normal y 0,001 mm para la dureza Rockwell superficial.

Debo tener en cuenta la escala invertida porque a mayor dureza, menor penetración, por ende un valor de dureza mucho más rápido.

El penetrador es la pieza que ejerce la presión sobre los materiales metálicos. Puede ser de dos tipos:

- *Penetrador cónico normal:* Es un cono con punta de diamante, de ángulo de cono del diamante de $120^\circ \pm 0,1^\circ$; y radio del casquete esférico, en la punta del diamante de 0,2 mm \pm 0,005 mm.
- *Penetrador esférico:* Es una bolilla dura de acero de 1,5875 mm (1/16") de diámetro. Para la determinación de la dureza Rockwell y dureza Rockwell superficial de metales blandos, se pueden usar bolillas de diámetro (1/8"), 6,350 mm (1/4") y 12,700 mm (1/2").

Procedimiento a seguir para realizar el ensayo

Se elige el penetrador a emplear en el ensayo, el que se coloca en el aparato para determinar la dureza Rockwell.

Se continúa luego girando suavemente, hasta poner en coincidencia la aguja chica del dial con el punto rojo de la izquierda u otro índice. En esa forma queda aplicada sobre la probeta una carga inicial: $G_0 = 10 \text{ daN}$.

Luego; Se gira la manivela hacia atrás, con lo que queda liberada y aplicada la carga suplementaria:

- $G_1 = 90 \text{ daN}$ si se utiliza el penetrador de acero de 1/16" (Rockwell "B")
- $G_1 = 140 \text{ daN}$ si se emplea el penetrador cónico de diamante (Rockwell "C")

Máquina para el ensayo Rockwell

Las máquinas para el ensayo de dureza Rockwell se fabrican generalmente para ese tipo de ensayo, pues exigen cargas muy distintas de las que se emplean para los ensayos Brinell y Vickers. Además, el procedimiento de ensayo es diferente de los otros, por cuanto exige la aplicación de una carga inicial $G_0 = 10 \text{ daN}$ en el caso de la dureza Rockwell normal y de 3 daN en el de la dureza superficial.

DUREZA VICKERS

La determinación de la dureza por el método Vickers se efectúa con un penetrador cuya forma es la de una pirámide cuadrangular, con un ángulo en el vértice $136^\circ \pm 30'$ (Norma IRAM 106).

Los valores de la dureza Vickers coinciden prácticamente con los de la dureza Brinell hasta la cifra 350, considerando un diámetro de la penetración $d = 0,375 \text{ D}$

Para valores mayores de 350 HB, las cifras Vickers son inferiores a las Brinell.

La cifra de dureza Vickers, HV, se obtiene como cociente entre la carga aplicada P y la superficie S de la impresión que deja el penetrador.

$$HV = \frac{P}{S} = \frac{2P}{4la}$$
$$a = \frac{l}{2 \operatorname{sen} 68^\circ}$$
$$HV = \frac{1,854 P}{d^2}$$

$$HV = 1,8544 \text{ P} / d^2$$

La carga P se mide en daN (kgf) y la diagonal d en mm.
Si la diagonal se da en μm , el coeficiente multiplicativo de P debe tomarse igual a 1 854,4.

$$HV = 0,038 \frac{P}{h^2}$$

Si en lugar de medir la diagonal de la impresión se determina la profundidad h de la misma, la dureza se calcula con la expresión:

Como en el caso de la dureza Brinell, cuanto mayor es la carga aplicada tanto más exacta residía la cifra de dureza determinada sobre la base de la diagonal d.

Al igual que en Brinell, al indicar la dureza Vickers de un material **debe especificarse el valor de la carga y el tiempo de aplicación**.

Por ejemplo: Si se aplica una carga de 30 DaN durante 20 segundos la indicación es **HV 30/20**.

KNOOP Y GRODZINSKY

La determinación de la dureza Vickers en metales muy duros queda afectada de un error cada vez mayor a medida que la carga empleada es menor que 5 daN.

Ello se debe a que la dimensión de la diagonal se hace tan pequeña que el error con que resulta afectada su determinación tiene cada vez mayor preponderancia.

Ese defecto se ha eliminado en gran parte mediante el penetrador Knoop el cual produce una forma **romboédrica**, en que las diagonales l y a guardan entre sí una relación $l/a = 7,1$.

El número de dureza Knoop se obtiene dividiendo la carga aplicada P sobre la superficie del romboide de la impresión, sin que se haya producido todavía la recuperación elástica del material.

Ello se consigue expresando dicha superficie en función de la diagonal mayor de la impresión, la que resulta muy poco afectada por dicha recuperación.

$$F = \frac{al}{2} = 0,07028 l^2$$

se obtiene finalmente

$$HK = \frac{14230 P}{l^2}$$

donde P se mide en daN y l en μm .

La dureza Knoop se determina con la fórmula $HK = 14230 \text{ P} / l^2$.

MICRODUREZA

La microdureza se aplica básicamente en aquellos casos en que se quiere determinar la dureza en capas metálicas muy delgadas, por ejemplo para analizar tratamientos térmicos o recubrimientos.

Con ese objeto se recurre a los penetradores Vickers y, sobre todo, a los de Knoop cargas que oscilan entre 0,10 N y 30 N

Para una carga dada, el penetrador **Knoop** produce una impresión cuya **diagonal mayor es alrededor de tres veces la de la pirámide Vickers. La profundidad de la impresión es un tercio menor.**

Lectura en estos ensayos:

Una vez orientada la impresión en el campo del retículo, se hace coincidir uno de los vértices de la impresión con una de las divisiones micrométricas y se anota la lectura 0,0 μm.

Se gira el tornillo micrométrico hasta hacer coincidir el otro extremo de la misma diagonal con una división de la escala. La escala micrométrica indica ahora la cifra 12,5 μm (figura de la derecha). La longitud de la diagonal está dada por la diferencia entre ambas lecturas más la cantidad de divisiones abarcadas por la impresión durante el transcurso de las lecturas efectuadas, o sea

$12,5\ \mu\text{m} - 0,0\ \mu\text{m} + 75\ \mu\text{m} = 87\ \mu\text{m}$

DUREZA DE LOS MATERIALES PLÁSTICOS

Para los elastómeros (goma, látex o similares) se recurre a la dureza según Shore, para lo cual se utilizan los siguientes penetradores: 1. durezas Shore B y C: penetrador en forma de tronco de cono.

El ensayo Shore se realiza para medir la dureza elástica de los materiales a partir de la reacción del material al dejarle caer sobre el un penetrador, generalmente conico, para luego medir la altura a la que reboto el penetrador.

Nos da una noción de la cantidad de energía que es capaz de absorber el material ante un impacto.

DUREZA DE LAS MADERAS

Si bien la dureza de la madera se puede determinar mediante el ensayo de Brinell, empleando la bolilla de 10 mm y una carga entre 100 y 500 daN (según sea la dureza de la madera), la que se aplica en 15 segundos y se mantiene durante 30 segundos, **el ensayo frecuentemente empleado en maderas es el de Janka.**

La cifra de dureza **Janka** es igual a la de la **carga para producir una penetración de 5,64mm, es decir, el radio.**

En general, se practican dos penetraciones sobre una superficie tangencial, dos sobre la superficie radial y una en cada extremo, cuidando de hacerlo lejos de los bordes.

Se obtienen de ese modo tres cifras de dureza que varían entre sí de acuerdo con la especie de la madera. La diferencia entre las medidas es menor cuanto mayor es el peso específico de la madera.

Se debe indicar el número y el valor medio de las probetas ensayadas, así como también el menor y el mayor valor hallado.

ENSAYO DE FATIGA

Un metal sometido a este tipo de tensiones variables o dinámicas durante cierto tiempo, fallará a un valor de tensión mucho más bajo que el necesario para producir la fractura en una sola aplicación de la carga, incluso más bajo que su límite elástico. Estas roturas se producen repentinamente, sin que previamente aparezcan deformaciones.

Son necesarias tres condiciones básicas para que se produzca una rotura por fatiga:

- a) Una tensión máxima
- b) Una variación bastante amplia de la tensión aplicada.
- c) Un número suficiente de ciclos.

Además, la fatiga depende de muchas otras variables por lo que además también es conveniente analizar los efectos de otros factores tal como la corrosión, forma, temperatura, etc.

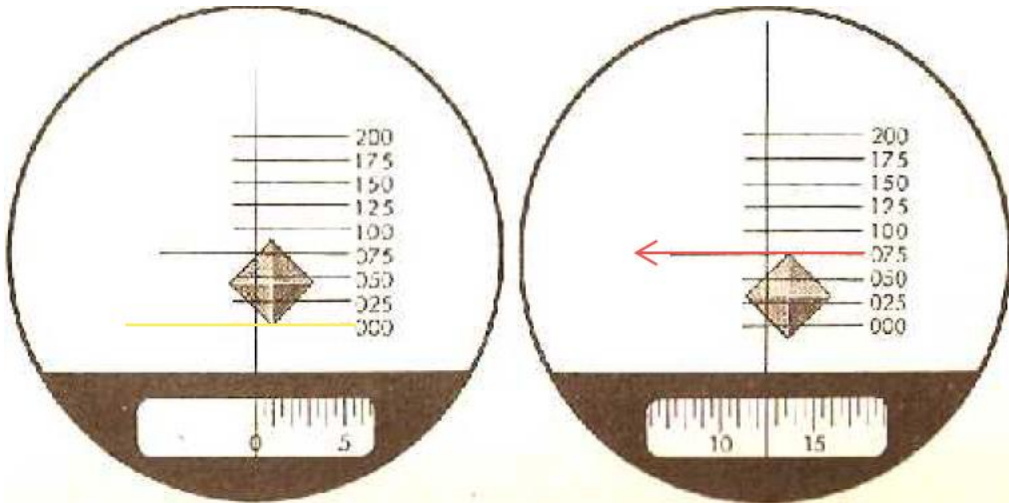
MECANISMO DE LA FATIGA

La explicación está dada porque la rotura del material se produce por variación de los esfuerzos de tracción y compresión, lo cuales someten a los cristales del metal a continuos deslizamientos que teóricamente no influirán mientras no sobrepasen los valores de proporcionalidad, pero que al aumentar los esfuerzos o el número de esfuerzos provoca deslizamientos típicos del periodo plástico en las fibras extremas que generan mayores deformaciones y van destruyendo progresivamente las redes cristalinas del metal.

En un material sometido a una variación de tensiones, la distribución del esfuerzo difiere de un cristal a otro permitiendo suponer que las partículas constituyentes tienden a moverse lentamente, unas con respecto a otras, hasta que un cristal se debilita tanto que llega al punto de falla.

El desplazamiento de los cristales se debe a que los metales ó aleaciones están constituidos por una agregación de los mismos orientados al azar dentro de sus masas y al ser tensionados hace que algunos de ellos lleguen al límite elástico más pronto, debido a orientaciones desfavorables y produciendo una fractura por fatiga.

ASPECTO DE LA FRACTURA POR FATIGA



La superficie de fractura suele ser normal al eje de la tensión de tracción principal y **presenta dos regiones características:**

- **Una zona de superficie lisa, mate, de grano fino**, debido al frotamiento que ocurre cuando se propaga la grieta a través de la sección, que equivale a un ligero pulimento del material.
- **Una zona rugosa, de grano grueso, brillante** cuando la pieza ha roto frágilmente.

La falla muchas veces se inicia en un punto de concentración de tensiones en la superficie y se propaga desde dicho punto como una serie de marcas anulares, similar a un frente de olas.

La zona de grano grueso se generó debido a que la sección disminuye tanto que no soporta la tensión. Además, el punto inicial se considera concentrador de tensiones.

CLASIFICACIÓN DE LOS ESFUERZOS DE FATIGA

La sollicitación de fatiga puede ocurrir con **esfuerzos normales - tracción, compresión, de flexión o de torsión.**

La tensión de tracción se considera positiva y a la de compresión negativa.

Definimos:

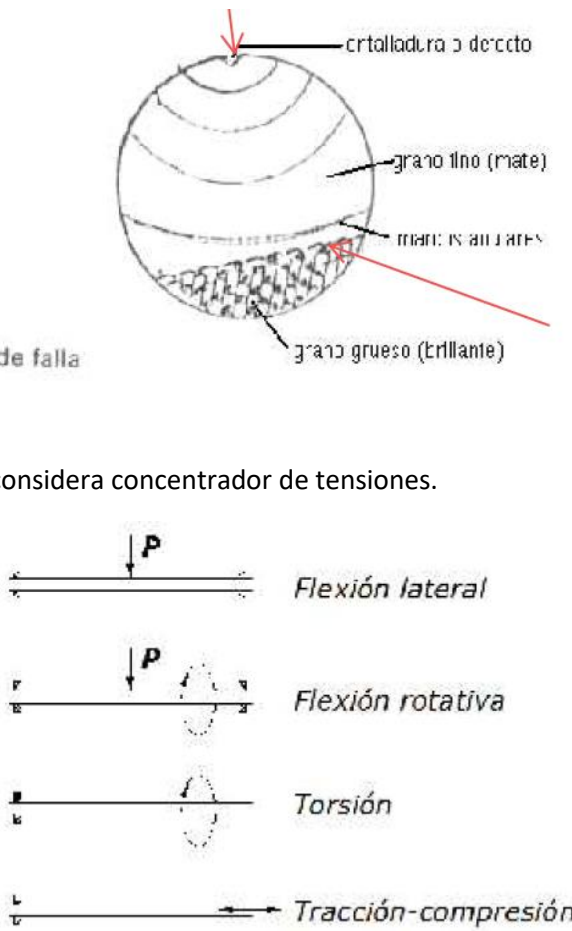
- a) La **“tensión media”**: como la semisuma de los valores límites
- $$\sigma_m = (\sigma_{\text{máx.}} + \sigma_{\text{mín.}}) / 2 = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$$

- b) La **“amplitud”**: como la diferencia entre dichos valores
- $$\sigma_A = (\sigma_{\text{máx.}} - \sigma_{\text{mín.}}) = (\sigma_1 - \sigma_2)$$

- c) La **“semiamplitud”**: como la semidiferencia de dichos valores
- $$\sigma_a = (\sigma_{\text{máx.}} - \sigma_{\text{mín.}}) / 2 = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2$$

- d) La **“relación de tensiones”**: como el cociente entre ambos valores; es otra forma de representar los datos de fatiga

$$R = \sigma_{\text{máx.}} / \sigma_{\text{mín.}} = \sigma_1 / \sigma_2$$



Según la variación de dichos esfuerzos ($\sigma_1; \sigma_2$) pueden clasificarse en diversos grupos, cuya representación en el tiempo se hace mediante diagramas de apariencia sinusoidal.

La tensión máxima se limita al límite elástico o de fluencia ya que no tienen sentido utilizar valores de fatiga que superen ese límite

Solicitaciones	Diagrama	Tensión media	Amplitud	Semiamplitud
Pulsatorio entre σ_1 y σ_2		$(\sigma_1 + \sigma_2) / 2$	$(\sigma_1 - \sigma_2)$	$(\sigma_1 - \sigma_2) / 2$
Pulsatorio entre 0 y σ_1 (intermitente)		$\sigma_1 / 2$	σ_1	$\sigma_1 / 2$
Alternativo Asimétrico entre σ_1 y $-\sigma_2$ $ \sigma_1 > \sigma_2 $		$(\sigma_1 - \sigma_2) / 2$	$(\sigma_1 + \sigma_2)$	$(\sigma_1 + \sigma_2) / 2$
Alternativo simétrico $ \sigma_1 = \sigma_2 $		0	$2 \cdot \sigma_1$	σ_1

De los diagramas vistos cualquiera sea el ciclo representativo del esfuerzo explicado, este puede ser considerado como la suma algebraica de uno constante “ σ_m ” considerado la tensión media y otro alternado puro simétrico “ σ_a ”, que llamamos “Tensión Dinámica” o semiamplitud:

$$\sigma_d = \sigma_m \pm \sigma_a$$

CURVA DE WÖHLER

Wohler empleó probetas de sección circular con un extremo ensanchado, por el cual se la sujetaba en las mordazas de la máquina de ensayo que le imprimía un movimiento de rotación; un determinado peso colocado en el otro extremo del material (carga en voladizo) hacía que se generara un esfuerzo de flexión que se invertía cada 180º por el giro de la probeta. Se obtenían así **esfuerzos alternados simétricos** de tracción-compresión con una variación cíclica senoidal σ_m simétrica (= 0).

Esta probeta solicitada en voladizo, presenta varios inconvenientes que influyen en forma considerable en los resultados, siendo uno de ellos el del esfuerzo de corte.

Además entre la zona del ancho ensanchado y el cuerpo de la probeta se presentan zonas de concentración de máximas tensiones aunque la resistencia puede aumentar si aumentamos el radio de unión.

La Curva de Wholer representa la duración de la probeta, en número de ciclos N, hasta su rotura, para la tensión aplicada (O semiamplitud).

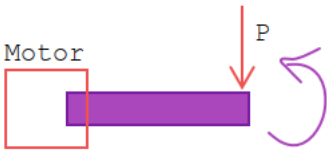
Se define como LIMITE DE FATIGA a la tensión máxima a la que se consigue que una probeta no rompa después de un número infinito de ciclos s.

Con una tensión por debajo del límite de fatiga se presume que un material sería capaz de soportar un número infinito de ciclos.

La mayor parte de los metales o aleaciones no ferrosas tienen una curva continuamente descendente, al aumentar el “N”, aproximándose a una horizontal pero sin llegar a serlo nunca; es decir, **no tienen un verdadero límite de fatiga**

Para determinar la curva de Wöhler se necesitan de 8 a 12 probetas como mínimo, del mismo material, de iguales dimensiones y maquinado, ensayando la primera a una tensión elevada.

MÁQUINA DE ENSAYO. PROBETAS



Las máquinas se clasifican según el tipo de esfuerzo a que quede sometida la probeta.

Algunas producen esfuerzos alternados y otras pueden variar el esfuerzo de tracción en forma pulsatoria o intermitente. Entre estas máquinas la más común y la más convenientemente utilizada es la deflexiones rotativas donde $\sigma_m = 0$

En este tipo de máquinas, la probeta de forma cilíndrica es amarrada por un extremo a la mordaza de la máquina mientras que en el extremo opuesto se la somete a un esfuerzo “P”, ya sea por medio de un resorte o a la carga de platillos de peso conocido (pesas).

La probeta trabaja como una viga en voladizo, y la mordaza por medio de un motor eléctrico, adquiere una rotación que transmite a la probeta, mientras la carga actúa siempre en la misma dirección y sentido. Cada vez que la probeta gira 180º las tensiones cambian de signo, es decir, produciendo una tensión alternativa simétrica.

Las probetas utilizadas por los distintos experimentadores son diversas desde el punto de vista de las formas lo que hace que los resultado obtenidos sean difícilmente comparables.

Las más comunes son las de Moore y las de Schenck

DIAGRAMAS Y VALORES DE FATIGA PARA DISTINTOS MATERIALES

Conocer **las curvas de Wöhler no muestra con exactitud las propiedades mecánicas** del material ya que los resultados dependen principalmente del valor de la carga y del tipo de probeta utilizada.

Este ensayo solo **nos indica una noción de las horas de vida que tendrá el material al cargarlo con esfuerzos mayores que la resistencia a la fatiga** (tensión límite de fatiga).

Por lo tanto este ensayo nos puede ayudar a conocer características sobre la calidad del material ya que deja expuestos los defectos o impurezas que puede tener un material y que no son detectables en ensayos estáticos.

La resistencia a la fatiga no guarda relación directa con la resistencia estática a la tracción pero si tiene una ligera relación, tal que **si aumenta la resistencia a la tracción también aumenta la resistencia a la fatiga. [Generalmente]**

Una forma de evaluar la calidad de un material es relacionar la resistencia a la fatiga con la resistencia a la tracción:

VARIACIÓN DEL Nº DE CICLOS Y RESISTENCIA A LA FATIGA EN FUNCIÓN DE LA AMPLITUD

La rotura por fatiga queda determinada por la amplitud de tensiones σ_A , a la que llamo “resistencia de servicio” No está dada por la tensión máxima.

Para unas “1” y “2” dadas el número de ciclos aumenta al disminuir σ_A hasta un valor de ésta en que al material no rompe, llamada amplitud límite.

Recordamos que: La “amplitud”: como la diferencia entre dichos valores

$$\sigma_A = (\sigma_{\text{máx.}} - \sigma_{\text{mín.}}) = (\sigma_1 - \sigma_2)$$

Ejemplo: Para acero dulce ($\sigma_{ET} = 37 \text{ Kg f/mm}^2$) en probetas de similares condiciones, se tiene:

$\sigma_1 \text{ (Kg f/mm}^2\text{)}$	$\sigma_2 \text{ (Kg f/mm}^2\text{)}$	$\sigma_A \text{ (Kg f/mm}^2\text{)}$	Nº x 10 ⁶
+22, 5	-22, 5	45	1(rompió)
+22, 5	-19, 5	42	3, 8(rompió)
+19, 5	-19, 5	39	7, 2(no rompió)

- σ_d / σ_{ET} :
- Mayor parte de los aceros es 0,50.
 - Aceros dulces o suaves es 0,60.
 - Aceros alto contenido de C (1%) es 0,35
 - Aceros aleados $\sigma_{ET} > 120 \text{ kgf/mm}^2$ es 0.40

En los dos primeros casos aun manteniendo la tensión máxima se ve que Nº depende de σ_A y por comparación con el tercer ensayo, se aprecia que Nº puede alcanzar varios millones, inclusive a la amplitud límite, para valores poco inferiores de las tensiones.

Es decir que a pesar de como sea la aplicación de las cargas, pulsantes o alternas, los factores de amplitud son los mas influyentes.

EFFECTOS QUE VARÍAN LA RESISTENCIA DE FATIGA

Del tratamiento térmico

Se ha comprobado que aceros aleados y con alto % de carbono mejoran su resistencia a tensiones repetidas hasta en un 200%, al ser tratados térmicamente.

Se recomienda un endurecimiento superficial para materiales que trabajen a flexión o torsión rotativa.

Se recomienda un endurecimiento que afecte a toda la sección para materiales que trabajen bajo cargas axiales.

Del acabado superficial:

Rugosidad: Las superficies pulidas tienen mayor resistencia a la fatiga que una superficie en bruto. Esto se debe a que las rayaduras o imperfecciones provocan una concentración de tensiones: **Las rayaduras transversales (directrices) son más perjudiciales** que las longitudinales (generatrices), ya que éstas están orientadas según la dirección de la tensión principal de tracción, lo cual aumentan el tamaño de la microgrieta con mucha velocidad. Ademas, sabemos que las concentraciones de tensiones se producen en la superficie por lo que **las marcas en frío (letras y cifras) y las huellas de dureza**, particularmente Rockwell “C” y Vickers, **suelen constituir los orígenes de las roturas por fatiga.**

Cambios en las propiedades superficiales:

Se pueden mejorar las propiedades de fatiga por cementación, nitruración, temple superficial a la llama o por inducción. Los tratamientos que provocan un endurecimiento de la superficie suelen mejorar las propiedades de fatiga. Hay que tener cuidado con tratamientos como el arenado o similares que usen proyectiles ya que, si bien por las deformaciones provocan un endurecimiento de la superficie, también dichas deformaciones puntuales pueden actuar como concentradores de tensión de tal modo que desfavorezcan a las propiedades de fatiga. Es recomendable utilizar endurecimiento por láser o por inducción.

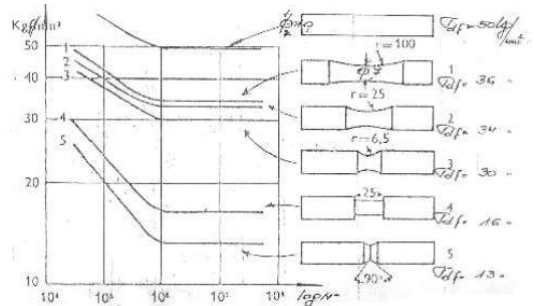
De las entalladuras:

Las entallas de las piezas reducen notablemente la resistencia a la fatiga de los aceros entre 50% y 75% de su valor original. Los más sensibles son los aceros templados de alta resistencia. Observamos que toda entalladura provoca un efecto desfavorecedor pero las entalladura en punta son las que provocan una mayor perdida en la resistencia a la fatiga.

De la corrosión:

Las consecuencias de la corrosión es comparable al efecto de las secuelas se ensayos de dureza ya que toda pequeña perforación o entalladura actúa como concentrador de tensiones y disminuye su resistencia a la fatiga. También es comparable con la influencia de las entalladuras.

Corrosión previa:



De todas formas, se deben distinguir 3 tipos de corrosión:

- Corrosión uniforme: Actúa uniformemente en toda la superficie y genera una película protectora. Su efecto en la fatiga es pequeño
- Corrosión localizada: Se manifiesta como un ataque profundo solo en ciertos puntos del material. Su influencia sobre la fatiga es sensible, similar a una rayadura o picadura, además las picaduras aceleran la velocidad de corrosión (Velocidad de corrosión es proporcional al área del catodo/área del anodo, generalmente las picaduras actúan como anodos).
- Corrosión intercrystalina: En este caso es muy sensible y muy importante provenirla ya que en ciertos metales puede generar una fractura intercrystalina, especialmente en aceros inoxidables.

Fatiga y corrosión simultaneas:

Cuando el ataque corrosivo y las tensiones de fatiga actúan simultáneamente se acelera la propagación por el ataque químico ya que las tensiones cíclicas rompen **la película superficial dde oxido previo y facilita el ataque y la penetración del óxido**. Por esta razón es muy importante cuidar de la corrosión a los materiales que están sometidos a tensiones cíclicas.

El agrietamiento de la pieza ocurrirá cuando las picaduras producidas por el óxido puedan originar una elevada concentración de tensiones.

Por lo tanto la disminución de la resistencia a la fatiga es significativo.

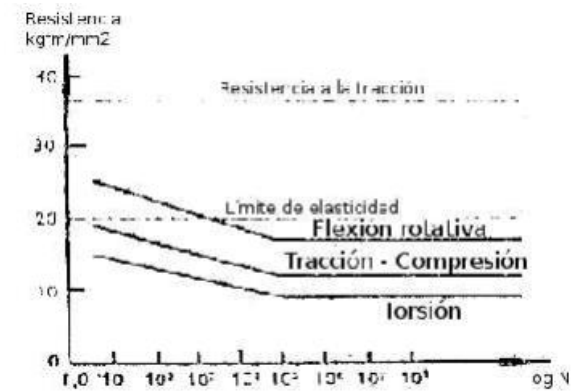
Del método de ensayo:

Los resultados de fatiga para un mismo material varían según el tipo de ensayo. Ya que **la resistencia de un material ante esfuerzos normales cíclicos** se ve más afectada por el **endurecimiento de la sección** mientras que la resistencia de un material ante **esfuerzos cíclicos de flexión o torsión** se ven más afectados por el **endurecimiento de la superficie**.

Por lo general, **La resistencia a la fatiga por torsión es menor que a la flexión rotativa** en:

- 50%-65% menor para aceros al carbono
- 45% - 70% menor para aceros aleados y alto carbono
- 50% menor para no ferrosos.

Y además, **la resistencia a la fatiga por tracción-compresión suele ser menor que la flexión rotativa**.



De la temperatura:

Por lo general en la mayoría de ensayos de fatiga se desprecia la influencia de la temperatura pero en los aceros el efecto de la misma suele ser apreciable, por esta razón es recomendable tener en cuenta los efectos de la misma.

Si la temperatura es SUPERIOR a la temperatura ambiente: Depende del material, por lo tanto es totalmente relativo ya que para ciertos aceros aleados se produce un aumento de la resistencia a la flexión, mientras que para otros se produce una disminución.

Por lo general para los aceros disminuye la resistencia a la fatiga y a 120° C puede tener un valor del 20% de la resistencia a 20°C. Esto es importante ya que piezas en los motores trabajan a esta temperatura.

Si la temperatura excede los 400° por lo general no existe límite de fatiga, lo cual indica que los aceros no son aptos para trabajar bajo cargas cíclicas a temperaturas tan elevadas.

Si la temperatura es MENOR a la temperatura ambiente: Se ha encontrado que **al disminuir la temperatura se produce un aumento de la resistencia de fatiga**.

De hecho, al disminuir la temperatura también se produce un aumento de la resistencia de rotura por tracción y compresión.

Los efectos de la temperatura suelen ser más significativos en aceros dulces.

De las variaciones momentáneas de los esfuerzos:

La fatiga de un material no es constante.

Si un material ha soportado previamente esfuerzos cíclicos **ligeramente superiores al límite de fatiga** entonces su nuevo límite de fatiga será inferior al mismo. Este efecto se conoce como **Sobre-fatiga**.

Si un material ha soportado previamente esfuerzos cíclicos **inferiores al límite de fatiga** entonces su nuevo límite de fatiga será superior al mismo. Este efecto se conoce como **Sub-fatiga**.

Estos fenómenos son más comunes en materiales dúctiles y pueden explicarse admitiendo que el límite de elasticidad ha variado por la aplicación de esos esfuerzos primitivos y el fenómeno de acritud del material, ya que las deformaciones previas pueden provocar el endurecimiento del material. Las deformaciones son limitadas porque puede afectar en las estructuras cristalinas.

De la frecuencia:

La frecuencia actúa en los ensayos de fatiga en la siguiente forma: **si el esfuerzo aplicado es grande y se manifiesta desprendimiento de calor** (por histéresis mecánica), **la rotura puede sobrevenir más rápido cuando la frecuencia es elevada**, ya que el calor que desarrolla la histéresis es cada vez mayor, no pudiendo ser evacuado por convección o radiación al medio ambiente, y como analizamos previamente, por lo general el calor genera una disminución del límite de fatiga en los aceros.

Del tamaño:

La experiencia demuestra que existe un “efecto de tamaño”, es decir que **la resistencia a la fatiga de los piezas de gran tamaño es menor que la de probetas pequeñas**.

Existen dos factores fundamentales por lo que ocurren esto:

- Al aumentar el volumen también aumenta el área superficial, y ésta es importante porque **las fisuras de fatiga se inician en la superficie**.
- Además, para probetas sometidas a flexión o torsión, **el gradiente de tensiones varía a través del diámetro**.

Entender esto es muy importante porque ayuda a entender porque la relación entre ensayos de laboratorio y piezas en servicio no es ideal, ya que se ven muy afectados por la concentración de tensiones.

De la forma de la sección:

Los límites de fatiga generalmente disminuyen cuando se pasa de una sección circular hacia una sección cuadrada.

DIAGRAMA DE GOODMAN

Cada curva de Wöhler representa distintos ensayos de fatiga realizados con una misma tensión media y diferentes amplitudes. Por lo tanto Wöhler es una buena representación parcial de los ensayos pero no nos brinda detalles entre la relación de tensión máxima y la mínima. Por esta razón resulta de interés trazar un diagrama que brinde la relación entre las tensiones medias, las amplitudes, las tensiones máximas y mínimas.

El diagrama de GOODMAN se construyó a partir de realizar ensayos con una tensión mínima variable según una recta a 45°.

La tensión máxima se limita al límite elástico o de fluencia ya que no tienen sentido utilizar valores de fatiga que superen ese límite debido a las deformaciones plásticas.

Los valores de tensiones máximos para mantener el valor del límite de fatiga vienen dado por la recta que une el punto A ubicado en la tensión de rotura elástica y el punto B con un valor del 50% de la tensión de rotura donde se producen esfuerzos intermitentes.

El principal problema con este diagrama es que los valores de las tensiones máximas dadas por Goodman y las obtenidas en laboratorio varían mucho, especialmente para aceros dulces, por lo tanto no es preciso.

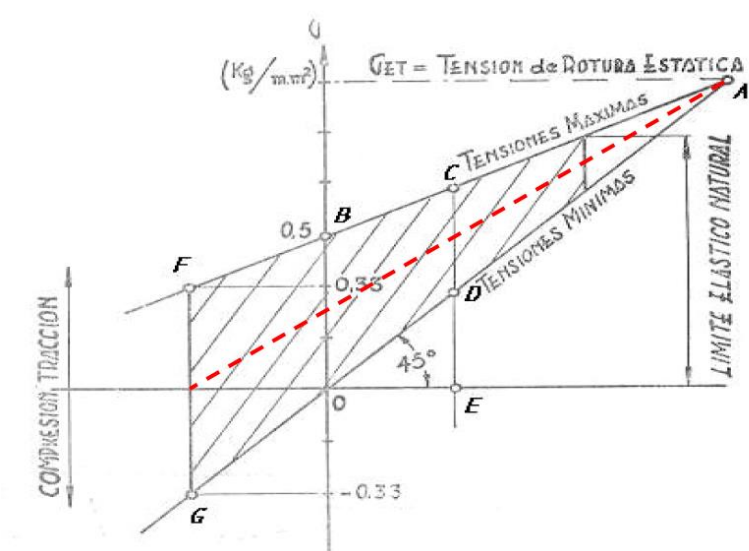


Diagrama de Smith:

Estas diferencias mencionadas llevaron a Smith a modificar la representación gráfica y así poder disponer de un medio que permita conocer rápidamente tensiones límites y amplitudes a aplicar.

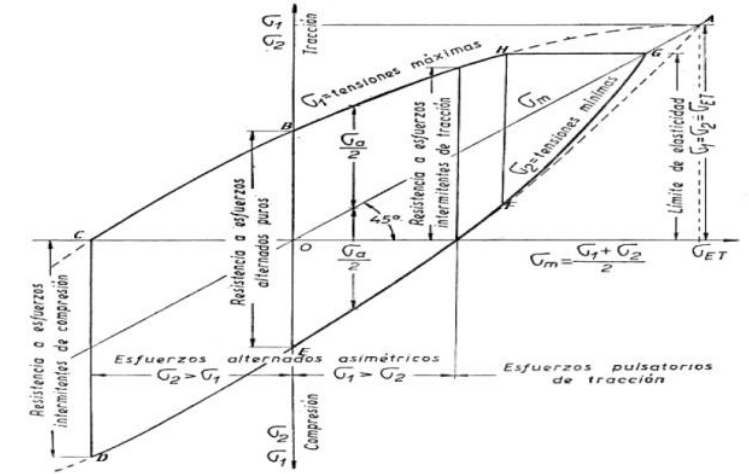
Así en un sistema de coordenadas ortogonales con igual escala, se toman en abscisas σ_m y en ordenadas σ_1 y σ_2 , medidas a partir de la bisectriz cuyos puntos corresponden a σ_m .

Recordamos:

La “tensión media”: como la semisuma de los valores limites

$$\sigma_m = (\sigma_{m\acute{a}x.} + \sigma_{m\acute{i}n.}) / 2 = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$$

Las curvas límites del diagrama de Smith se conforma por las ordenadas de los valores de las tensiones superiores σ_1 e inferiores σ_2 , que dan como resultado las resistencias de fatiga para las distintas tensiones medias.



Los puntos ubicados dentro de la zona demarcada por dichas curvas responden a ensayos de fatiga donde las probetas no rompen

El diagrama se cierra en el límite elástico.

La construcción práctica del diagrama de Smith sobre la base de curvas de Wöhler se hace del siguiente modo: En un punto de la línea σ_m a 45°, que es constante para cada curva, se ubican hacia arriba y abajo los valores de d ($\sigma_d = \sigma_m \pm \sigma_a$).

La “tensión media”: como la semisuma de los valores limites

b) La “amplitud”: como la diferencia entre dichos valores

$$\sigma_m = (\sigma_{m\acute{a}x.} + \sigma_{m\acute{i}n.}) / 2 = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$$

$$\sigma_A = (\sigma_{m\acute{a}x.} - \sigma_{m\acute{i}n.}) = (\sigma_1 - \sigma_2)$$

Cualquier punto del gráfico que esté por fuera de la curva límite de tensión corresponde a una probeta que rompió en el ensayo.

ENSAYO DE FLUENCIA LENTA O CREEP

Muchas partes de máquinas trabajan a presiones elevadas de temperatura. Este trabajo a altas temperaturas produce efectos perjudiciales en los aceros y aleaciones que los llevan a deformarse y en los peores casos a la fractura.

El ensayo Creep tiene como objetivo determinar la temperatura límite hasta la cual no se produce rotura en un determinado material bajo una carga constante.

Cada probeta se ensaya bajo una carga constante a una temperatura constante y se observa las deformaciones generadas en el tiempo. El continuo aumento de la deformación con el tiempo se denomina fluencia lenta o “creep”.

- Si las tensiones son demasiado bajas no se produce fluencia lenta, esto se mantiene incluso a altas temperaturas.
- Si la temperatura es menor a 400°C tampoco se produce una fluencia lenta considerable.

En cambio si partimos de una temperatura determinada y la llevamos a temperatura ambiente, midiendo la variación de carga que experimenta una longitud conocida, podemos obtener la pérdida de carga que sufre una estructura, como cables prensados. Esta prueba se denomina RELAJAMIENTO

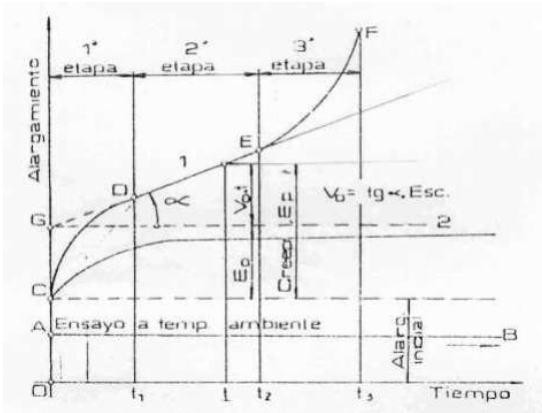
REPRESENTACIÓN DEL ENSAYO

Un material bajo una aplicación de carga constante a determinada temperatura experimenta fluencia lenta, Se puede graficar el alargamiento a partir de realizar ensayos en condiciones análogas a sus empleos prácticos, pudiendo durar desde dos o más meses hasta varios años.

Ensayos de menos de 1000 horas (42 días aproximadamente) no son considerados aceptables

Si a un metal o aleación le aplicamos a temperatura ambiente una tensión inferior al límite de proporcionalidad no se producirá fluencia lenta. Curva AB

Si bajo la misma tensión se eleva la temperatura se produce una deformación instantánea $OC > OA$, debido principalmente al hecho de que **el módulo de elasticidad disminuye con el aumento de temperatura**, por lo tanto para mantener una tensión constante se debe producir de aumento de deformación.



El estudio de la curva 1 de fluencia lenta se puede estudiar en 3 etapas:

- Etapa 1: **El alargamiento inicial es rápido y pero a medida que el tiempo aumenta la velocidad de creep disminuye hasta volverse constante.**
- Etapa 2: Se representa por una variación lineal que nos indica que las deformaciones se producen a velocidad constante por un periodo de tiempo. Durante la etapa 2 la sección NO SE VE AFECTADA, es decir no hay estricción.
- Etapa 3: Durante esta etapa se produce la estricción, produciendo la disminución de la sección en la probeta. Esto provoca un aumento en la velocidad de deformación que provoca la rotura de la misma debido a que la σ_T capaz de soportar el esfuerzo, a pesar del endurecimiento por acritud.

Si disminuimos la carga o la temperatura podemos lograr una curva similar a la curva 2, tal que la deformación en función del tiempo se puede considerar constante. Lograr estas condiciones de trabajo es lo óptimo ya que gracias a esto podemos estimar un rango en la vida útil del material.

NATURALEZA DEL CREEP

Para interpretar el fenómeno de deformaciones lentas se considera que la rotura de los metales a bajas temperaturas se produce a través de los cristales del material y las deformaciones se comportan como si fueran elásticas

La acritud predomina por encima del efecto creep hasta los 450°C, Esto se debe al endurecimiento del material por deformación, por lo tanto para lograr fluencia lenta por debajo de 450°C se debe aplicar una carga lo suficientemente grande para contrarrestar la acritud.

Para temperaturas mayores a 450°C la fractura tiene lugar en los bordes de los cristales y la fractura se torna similar a un líquido viscoso.

Esto se debe a que el metal adquiere una determinada viscosidad y el endurecimiento por deformaciones ofrece menor resistencia a las deformaciones plásticas ya que los granos del metal pueden sufrir deslizamientos en el tiempo incluso para pequeños valores de carga.

MÁQUINAS PARA ENSAYOS CREEP

Las máquinas para este ensayo necesitan de los siguientes aparatos.

- 1) Elementos de amarre de las probetas, de aplicación de carga y de su medición.
- 2) Horno eléctrico con equipos para controlar, medir y registrar la temperatura.
- 3) Equipo para medir y registrar la deformación y el accesorio de carga constante.

Es importante que el horno este completamente aislado y equipado para poder mantener la temperatura del ensayo constante.

Además, tiene que evitar la circulación de aire ya que puede variar la temperatura y oxidar la probeta.

Las normas aconsejan que las variaciones de temperaturas podrán ser:

- $\pm 2^\circ \text{C}$ hasta 600°C
- $\pm 3^\circ \text{C}$ para (600° a 900°C)
- $\pm 6^\circ \text{C}$ para temperaturas mayores.

Pequeñas variaciones de temperatura provocan grandes variaciones en la velocidad de deformación.

Las máquinas modernas tienen capacidad de carga de hasta 3000 kg con sensibilidad de 1 kg; las temperaturas son variables hasta 1200°C y las indicaciones se realizan con dispositivos ópticos.

Probetas

Se utilizan probetas **cortas** (2”) para medir **resistencia creep**

Se utilizan probetas **largas** (de 5” a 20”) para medir **pequeñas velocidades de deformación**.

EJECUCIÓN DEL ENSAYO

Primero se calienta la probeta hasta el valor de temperatura determinado y se mide en ese instante la longitud de calibración. Luego se aplica la carga de manera casi instantánea, evitando los impactos ya que cualquier defecto superficial puede actuar como concentrador de tensiones, y se mide el alargamiento inicial o creep elemental

Ahora solo queda registrar los datos del ensayo. Se deben realizar 50 mediciones como mínimo, por día. Y el ensayo debe prolongarse por lo menos 1000 horas para que sean válidos.

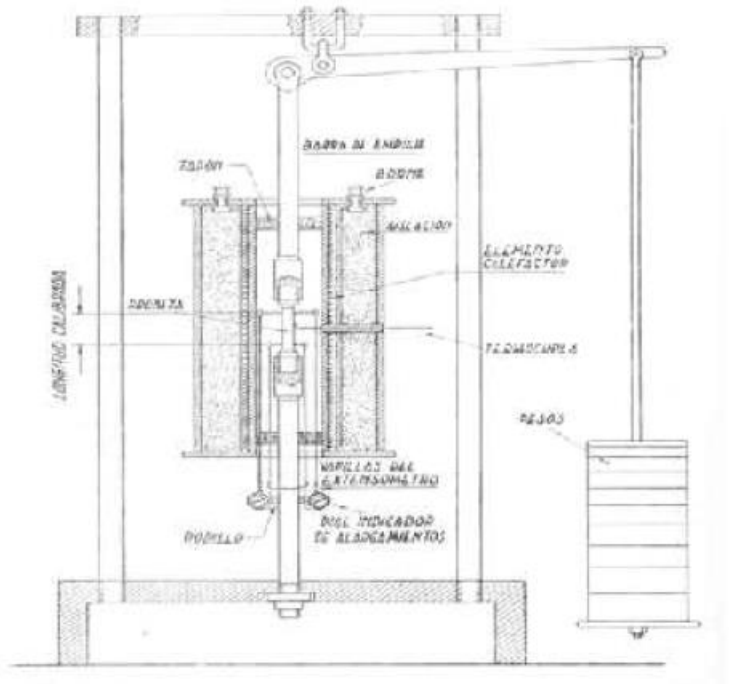
Si se observa que la fluencia tiene un comportamiento lineal luego de las 1000 horas, si conocemos la tangente de la etapa 2, es decir la velocidad de deformación. Podemos definir un parámetro denominado creep elemental “ ϵ_0 ”, El cual se encuentra como la intersección entre la recta de la etapa dos y el eje de alargamientos. (Punto G en el gráfico). Luego, con la velocidad de deformación se puede construir una recta que exprese la deformación en función del tiempo para la etapa II

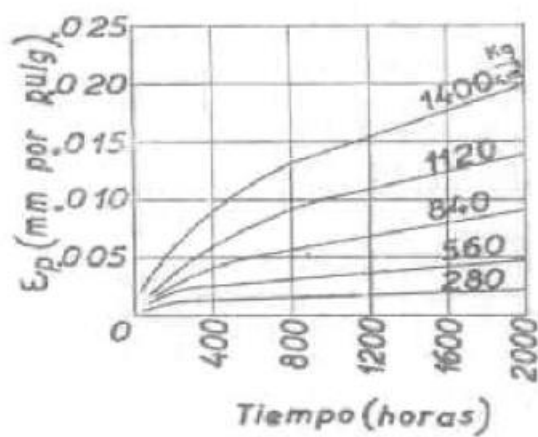
$\epsilon_p = \epsilon_0 + V_0 . t$

El dimensionamiento y la elección de materiales se efectúa en base a la velocidad de deformación de la etapa II para evitar inconvenientes mecánicos.

EMPLEO DE LAS CURVAS DE ENSAYO

En ensayos de creep se fija una temperatura y se grafica el comportamiento de los materiales bajo diferentes tensiones que permanecen constantes.



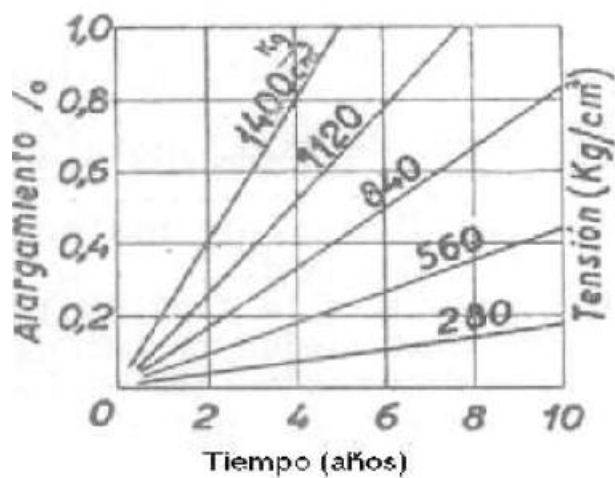
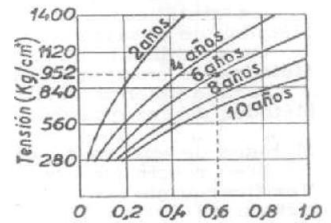


Observamos que en general el comportamiento lineal de la etapa II se produce a partir de las 1000 horas. Por esta razón los ensayos deben producirse más de 1000hs

Por extrapolación se puede conocer un aproximado de cómo se comportaría el material luego de las 1000hs pero solo hasta una deformación de 1% de pulgada.

También se puede hacer gráficos de la tensión en función de la deformación(%), para una cantidad de tiempo predefinida generalmente en años.

Otra forma de representarlos es en base de la fluencia de creep en función del tiempo.



Es decir, representar las distintas rectas de la etapa II para distintas tensiones de carga.

$$\epsilon_p = \epsilon_0 + V_0 \cdot t$$

Ensayo de plegado

Generalidades:

Es un método estático que sirve para determinar la **TENACIDAD** del material en su estado de entrega comercial o luego de un tratamiento térmico. Básicamente sirve para determinar la **calidad**.

El ensayo básicamente consiste en doblar una barra a un ángulo grande y ver si ocurre agrietamiento en la superficie exterior de la pieza doblada.

En caso de producirse agrietamiento es de útil importancia indicar a qué ángulo se produce el agrietamiento para poder comparar dos barras distintas.

Método de ensayo

Como el objetivo es comprobar la calidad, se suelen ensayar probetas en su estado comercial siempre y cuando no superen su diámetro no sobrepase los 30mm. En caso de trabajar con probetas cuadradas, sus aristas deben redondear con un radio del 10% del espesor.

La longitud de la probeta debe ser mayor de 250mm

El ensayo consiste en plegar la probeta hasta que una de las ramas forme con la prolongación de la otra el ángulo “ α ” especificado en cada caso según el objetivo del ensayo.

Se considera un **ensayo de plegado a fondo** si el ángulo de plegado es de **180°**. Cuando esto ocurre las dos chapas se ponen en contacto.

Si esto no ocurre se considera un **ensayo de plegado sobre calza o cuña**.

Destacamos que la importancia de este ensayo es verificar la calidad de la probeta en relación a las grietas que se formen de la superficie debido a la tracción. Por lo tanto la superficie estirada de la probeta debe ser visible durante todo el ensayo.

Durante el ensayo, la probeta se apoya sobre dos rodillos que pueden girar libremente, otorgándole libertad de movimiento a la barra que se pliega.

La aplicación de la carga se aplica de forma lenta y gradual mediante un mandril de diámetro d , hasta alcanzar un ángulo α .

También se puede realizar de forma “Casera” en una morsa, este forma de ensayo no es muy confiable ya que podemos producir contracción de tensiones al darle una deformación inicial.

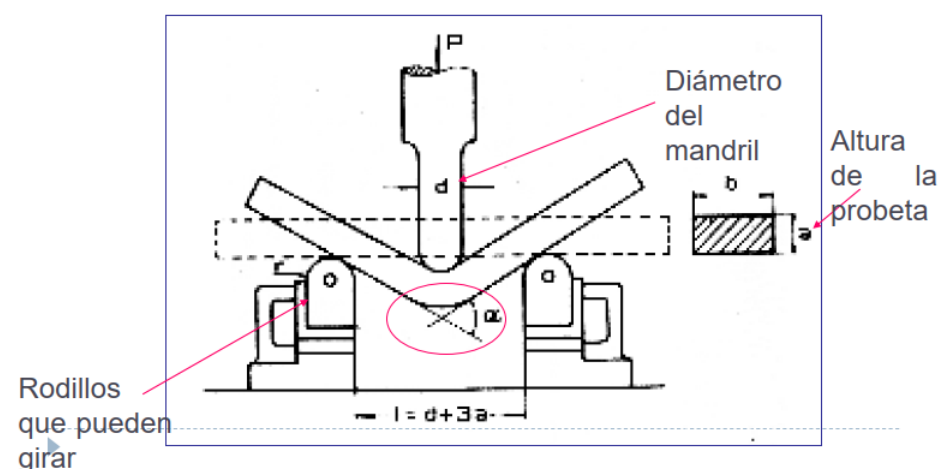
De todas formas:

El ensayo se considera positivo si plegada la probeta hasta el ángulo especificado no presenta grietas perceptibles a simple vista en la parte estirada.

En caso de que aparezca una grieta antes del ángulo especificado el ensayo se considera negativo y se debe especificar el ángulo de agrietamiento.

Maquinas:

Para doblado en frío se utiliza la máquina de Olsen para doblado en frío



INTRODUCCIÓN A LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

DEFINICIÓN Y ALCANCES:

“Ensayos no Destructivos” (END) son métodos de ensayo que permiten detectar y evaluar discontinuidades, estructuras o propiedades de materiales sin modificar sus condiciones de uso o aptitud de servicio.

Como disciplina tecnológica los END tienen por objetivo:

- Asegurar **calidad y confiabilidad**
- Prevenir accidentes (Detectar defectos)
- Producir beneficios económicos
- Contribuir al desarrollo de la ciencia de los materiales (Por ejemplo, mediante la aplicación del ensayo ultrasónico se puede estudiar el progreso de una fisura durante un ensayo de fatiga, sin interrumpir la experiencia.)

Su mayor aplicación se encuentra en los procesos primarios de producción se los aplica para asegurar que los productos se mantienen dentro de los patrones de calidad.

CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS

Los métodos de END son de aplicación específica, ya que pueden variar mucho según el tipo de información que se desea obtener y el tipo de material que se desea estudiar. Cada método de END tiene un campo en específico y pueden brindar información sobre cierto tipo de falla exclusiva.

Muchas de las propiedades primarias responsables o que influyen la posibilidad de fallas no pueden ser verificadas directamente por los END.

MÉTODOS:

INSPECCIÓN VISUAL

Es el método menos entendido y usualmente no suele ser bien utilizado, ya que existe una diferencia enorme entre simplemente mirar un objeto y realmente observarlo con ojos entrenados.

La inspección visual puede ser definida como: la examinación de un objeto utilizando solamente la vista o en conjunto con instrumentos de visualización, sin cambiar o destruir el objeto.

Un método de inspección realizado de forma incorrecta o por gente no capacitada puede provocar la omisión de imperfectos

Por la propia geometría de las máquinas suele ser muy difícil realizar una inspección visual, además de que con este método es difícil predecir imperfecciones internas.

Por lo tanto es necesario realizar una **INSPECCIÓN VISUAL REMOTA**

INSPECCIÓN VISUAL REMOTA

El equipo más empleado en inspección visual remota es el “endoscopio”. Es un equipo cuyo funcionamiento se basa en poseer una cámara en un soporte o en una estructura con la capacidad de doblarse, como la fibra óptica, con el fin de poder observar en zonas de difícil acceso.

Puede ser:

Endoscopios Rígidos: Pueden utilizar lentes o fibra óptica para transmitir una imagen a lo largo de un tubo rígido. Aunque su mayor desventaja se encuentra en la imposibilidad de observar esquinas de difícil acceso debido a su rigidez y fragilidad.

Son razonablemente económicos y dependen de una gran variedad de diámetros y dimensiones.

Endoscopios de fibra óptica flexible o Fibroscopios: Está compuesto por un conjunto de fibras de cuarzo las cuales se ensamblan en grupos permitiendo la flexibilidad.

Las fibras son recubiertas con el fin de lograr una diferencia entre el índice refractivo entre la fibra y la superficie con el fin de obtener una imagen nítida y brillante.

Cada fibra debe estar en la misma localización con respecto de todas las otras fibras al final de cada grupo.

El endoscopio industrial de fibra óptica es flexible y utiliza dos grupos de fibras ópticas.

Uno sirve de guía o medio **transportador de la imagen** y el otro ayuda a **iluminar el objeto** bajo prueba.

Guías portadoras de imagen: Es el grupo de fibras utilizado como portador de imagen, transporta la imagen formada por los lentes a través de toda la longitud del endoscopio y hasta la posición para ser observada por el ojo.

Guías portadoras de iluminación: Es el grupo de fibras transporta la iluminación desde la fuente externa de alta intensidad hasta la superficie del objeto sometido a prueba.



-LÍQUIDOS PENETRANTES

Este método está basado en el principio de capilaridad de los líquidos, que permite su penetración y retención en aberturas estrechas. Tienen un amplio campo de aplicación en la detección de defectos abiertos a la superficie (grietas, fisuras y poros) en metales (ferrosos y no ferrosos), materiales cerámicos, plásticos y vidrios que **no sean porosos, ni presenten rugosidad excesiva o escamado**.

Este método se distingue porque **es prácticamente independiente de la forma o geometría de la pieza** a examinar, requiere un equipamiento mínimo y **permite obtener una gran sensibilidad en la detección de fisuras**.

Este ensayo puede llegar a ser superior al de radiografía o de ultrasonido debido a que en la actualidad existen procesos de gran sensibilidad capaces de detectar, en condiciones especiales, fisuras cuyo espesor es del orden de tan solo décimos de micrones, sin recurrir a elementos auxiliares de la visión.

FUNDAMENTOS DEL MÉTODO

El fundamento del método reside en **la capacidad de ciertos líquidos para penetrar y ser retenidos** en fisuras, grietas y poros abiertos a la superficie de un material, cuando son aplicados sobre la misma.

Esta capacidad depende principalmente de tres propiedades:

-**Mojabilidad** o ángulo de contacto entre líquido y sólido:

-**Tensión superficial**:

-**Viscosidad**:

La relación entre éstas, puede ser establecida mediante la observación del fenómeno de **“capilaridad”**

La capilaridad es una propiedad de los fluidos que depende de su tensión superficial, la cual, a su vez, depende de la cohesión del fluido, y que le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar.

El líquido debe tener buenas propiedades penetrantes, pero también debe ser removido fácilmente.

El ensayo con líquidos penetrantes comprende las siguientes operaciones:

1 Limpieza efectiva de la pieza a examinar: El penetrante debe penetrar en el defecto a fin de poder dar forma a una indicación. Es esencial que el defecto esté limpio y libre de materias contaminantes a fin de que el penetrante pueda entrar libremente. Además la presencia de contaminantes en los defectos reduce la sensibilidad de detección en una o varias formas:

2 Aplicación del líquido

3 Dejar transcurrir tiempo para la penetración del líquido: Cuanto menor sea la abertura del defecto, mayor debe ser el tiempo requerido para la penetración.

4 Remover el líquido: Puede ser removida con un paño o con pulverización de agua. Durante la remoción del penetrante de la superficie es posible que el penetrante pueda ser extraído, tanto de la superficie como del interior del defecto. Si esto ocurre, no se formarán indicaciones. Cuando se usa un líquido lavable con agua, la misma no lavará al penetrante de las fisuras y grietas finas, ya que el agua no tiene las propiedades de penetración del líquido

5 Dejar que la superficie seque y aplicar revelador.

El revelador tiene como objetivo extraer el líquido penetrante de las fracturas.

No deben mezclarse productos que correspondan a distintos fabricantes salvo que se puedan demostrar sus perfectas compatibilidades.

CLASIFICACIÓN DE LOS LÍQUIDOS PENETRANTES

PIGMENTO	CARACTERIZACIÓN	
Fluorescente	{	Lavables con agua
		Post-emulsificables*
		Removibles con solvente
Coloreados	{	Lavables con agua
		Post-emulsificables*
		Removibles con solvente

Post-emulsificables: El lavado de este tipo de penetrantes, sean o no fluorescentes, debe ser precedido por una operación previa de emulsificación dado que estos líquidos no son lavables con agua. Esto complica la realización del ensayo, pero mejora sustancialmente la sensibilidad del método especialmente para la detección de defectos poco profundos y abiertos.

CONSIDERACIONES FUNDAMENTALES PARA EL EXAMEN CON LÍQUIDOS PENETRANTES

El éxito y la confiabilidad de un examen realizado con líquidos penetrantes dependen del cuidado y exactitud con que el operador ejecuta las diferentes etapas, desde la limpieza de las partes hasta completar todas las operaciones que permiten la observación y evaluación final de las indicaciones.

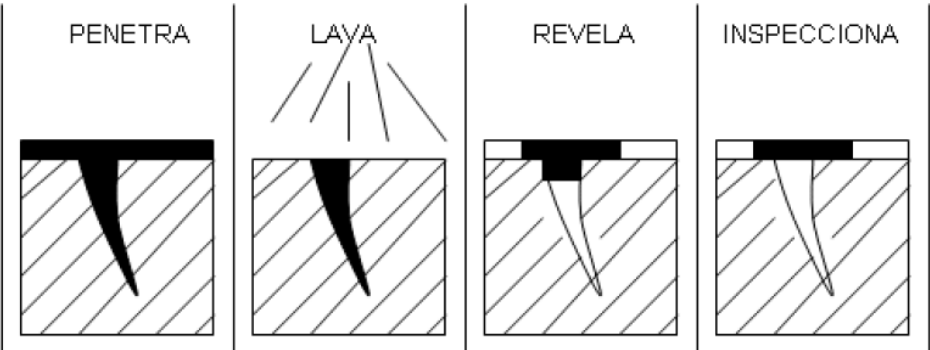
OBSERVACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS VALUACIÓN DE LAS INDICACIONES

La observación de los resultados debe producirse inmediatamente después de aplicar el relevador y reproducirse al menos una vez pasado al menos 20 minutos.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL ENSAYO DE LÍQUIDOS PENETRANTES

Ventajas:

- El método tiene **alta sensibilidad** a la detección de pequeños defectos superficiales
- El método tiene **pocas limitaciones respecto al material**. (Materiales cerámicos vitrificados retendrán muy poco penetrante y no aplica a materiales porosos)
- **Grandes áreas** pueden ser **inspeccionadas** rápidamente y a bajo costo.
- Las indicaciones son producidas directamente sobre la superficie de la parte y constituyen una representación visual de la discontinuidad.



- Los vaporizadores en aerosol pueden hacer a los materiales penetrantes **muy portátiles**.
- Son relativamente **baratos**.

Desventajas:

- Solamente pueden ser **detectadas discontinuidades superficiales**.
- Sólo materiales con **superficies no porosas pueden ser inspeccionados**.
- La **limpieza inicial es crítica**, dado que los contaminantes pueden enmascarar las discontinuidades.
- Es **aplicable solo a partes accesibles**
- Se requiere una **limpieza final** de las partes
- Comprobar **compatibilidad química** entre las sustancias a utilizar.

PARTÍCULAS MAGNETIZABLES

Fundamentos Teóricos

Se denomina imán a todo aquel cuerpo que tenga la propiedad de atraer otras sustancias llamadas “ferromagnéticas”. Esa característica de atracción se llama “magnetismo”, y se debe a un efecto “inducción magnética” ejercido por el imán sobre el otro cuerpo, al que transforma momentáneamente en un imán.

Ferromagnéticos: son fuertemente atraídos por un imán (hierro, níquel, cobalto, casi todos aceros, etc.).

Paramagnéticos: son levemente atraídos por un imán (platino, aluminio, cromo, potasio, etc.).

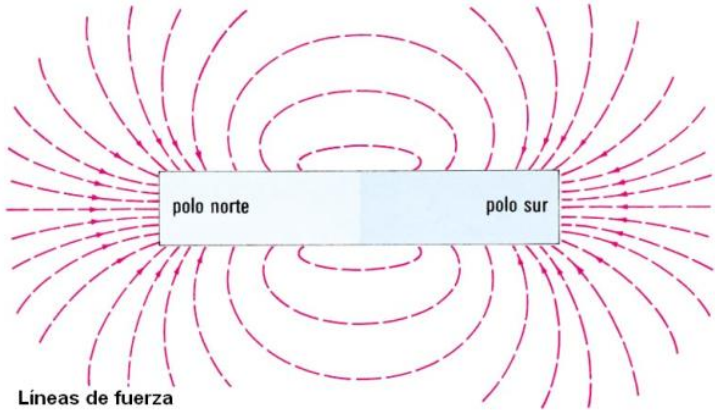
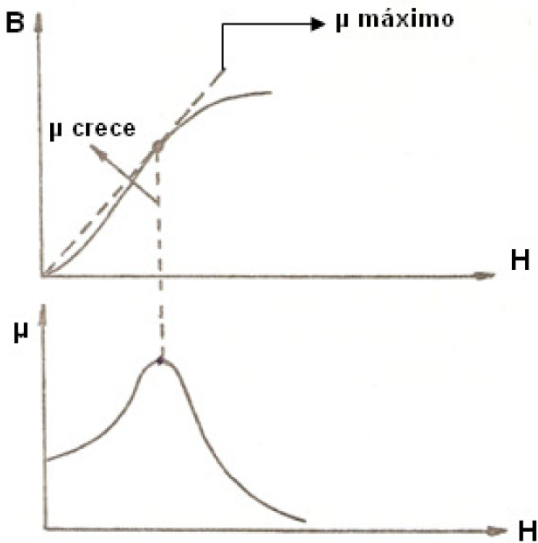
Diamagnéticos: son levemente repelidos por un imán (plata, plomo, cobre, mercurio, etc.).

Se llama “campo magnético” al espacio exterior al imán dentro del cual se ejerce el efecto de inducción.

Podemos clasificar nuevamente a los cuerpos magnéticos en función de su permeabilidad:

- Ferromagnéticos $\mu \ggg 1$
- Paramagnéticos $\mu > 1$
- Diamagnéticos $\mu < 1$

A continuación se muestran las curvas B – H y μ - H:

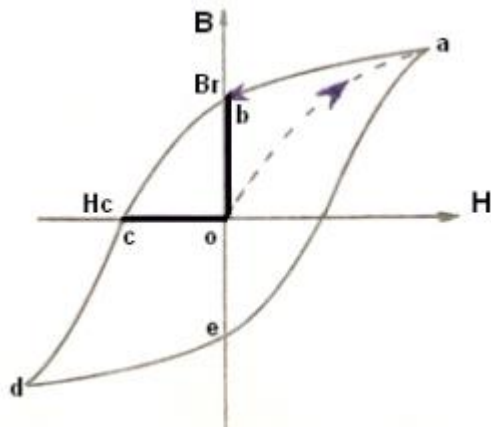


La permeabilidad “μ” crece con el valor de H, hasta un cierto límite para luego decrecer. Vemos que μ no es cte. y depende de:

- del valor de H o de B.
- de la composición química del material
- de la temperatura
- del tratamiento térmico anterior
- del procesamiento mecánico anterior

Por lo tanto B no es linealmente proporcional a H

Las curvas B-H Se denominan curvas de Histéresis



Br: Magnetismo remanente
Hc: Fuerza correctiva

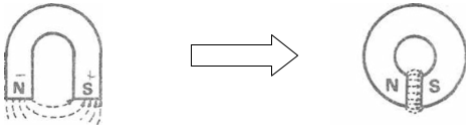
CAMPOS MAGNÉTICOS INDUCIDOS ELÉTRICAMENTE

Cuando una corriente eléctrica circula a través de un conductor crea un campo magnético alrededor del conductor, concéntrico con el mismo. Siendo la intensidad del campo "H", directamente proporcional a la intensidad de corriente que circula.

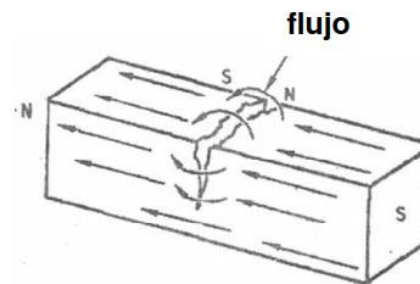
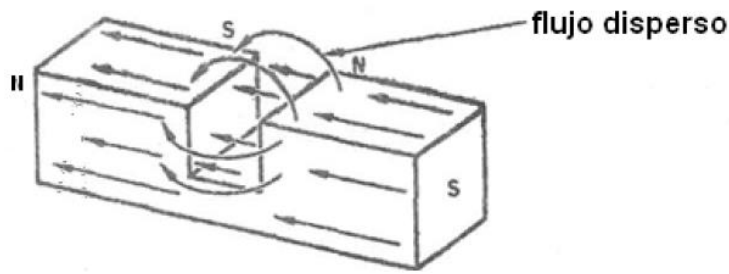
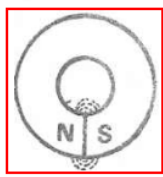


FUNDAMENTOS DEL METODO DE PARTICULAS MAGNETIZABLES

Si tenemos un imán herradura y lo cerramos del todo hasta aproximar sus extremos, nos queda:



Si lo cerramos del todo, vemos que prácticamente desaparecen los polos, pero existe una pequeña cantidad de líneas de fuerza que se cierran a través del aire, a las que denominaremos **FLUJO DISPERSO, el cual nos determina el CAMPO DE FUGA**. Lo mismo ocurriría en una fractura:



El método de partículas magnéticas consiste en la detección de campos de fuga, o sea flujos dispersos provocados por la formación de polos magnéticos a ambos lados de aquellas discontinuidades que interrumpen el camino de las líneas de fuerza.

Este método solo puede detectar discontinuidades en materiales ferromagnéticos.

CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ENSAYO

Técnica del campo residual o remanente: Se utiliza el campo magnético que retiene el material luego que se interrumpe la fuerza magnetizante.

Técnica del campo continuo: Consiste en efectuar la aplicación de las partículas magnéticas mientras se mantiene la fuerza magnetizante.

MODOS DE MAGNETIZACION

•MAGNETIZACION CIRCULAR:

Si tomamos una barra con discontinuidades orientadas en distintos sentidos, y hacemos circular corriente a través de ella.

Observamos que en las discontinuidades paralelas a la líneas de fuerzas no se producirán polos, por lo tanto no habrá flujo disperso y dichas discontinuidades no podrán identificarse. Así, **Las imperfecciones paralelas no se podrán identificar.**

Por lo tanto una desventaja de este ensayo es que debemos tener una idea de la orientación posible de los defectos en la pieza a ensayar (basándonos en su proceso de fabricación)

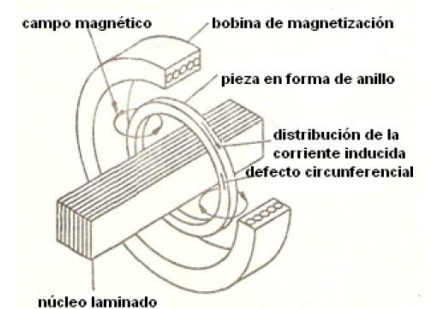
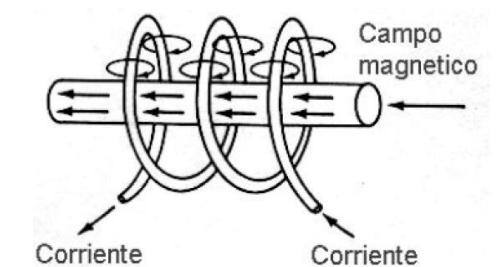
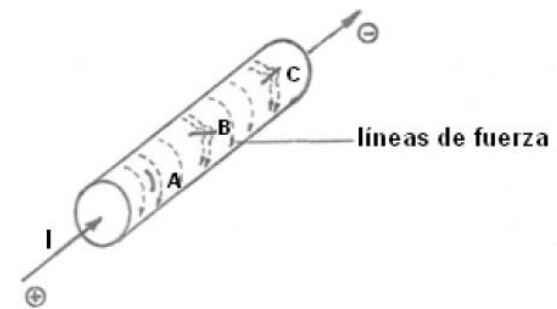
•MAGNETIZACION LONGITUDINAL:

En este método utilizamos bobinas con uno o múltiples arrollamientos del conductor se utilizan para inspeccionar piezas longitudinalmente. El campo dentro de la bobina tiene una dirección definida, que corresponde a las direcciones de las líneas de fuerza producidas por cada porción del conductor.

De esta forma se pueden detectar fisuras o discontinuidades, tanto interiores como exteriores, aunque al igual que en el caso anterior: **Las imperfecciones paralelas a las líneas de fuerza no se podrán identificar.**

•MAGNETIZACION POR CORRIENTES INDUCIDAS:

Se aplica este modo de magnetización cuando se desean detectar **defectos en dirección circunferencial en piezas con forma de anillo.**



•MAGNETIZACION COMBINADA CIRCULAR Y LONGITUDINAL:

Como ya vimos, **Las imperfecciones paralelas a las líneas de fuerza no se podrán identificar.** Por lo tanto, para inspeccionar completamente defectos con diferentes orientaciones en la pieza son necesarios dos o más magnetizaciones e inspecciones. Una de ellas con magnetización circular y otra con magnetización longitudinal con el fin de detectar defectos orientados en todas las direcciones mediante un solo ensayo.

TIPOS DE CORRIENTES PARA MAGNETIZAR:

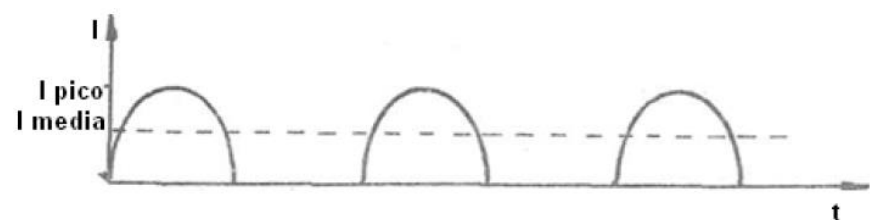
Alterna monofásica:

Tiene poca penetración, por lo tanto **las líneas de fuerza se concentran en la superficie**, siendo muy sensibles a discontinuidades superficiales. Este tipo de excitación da gran movilidad a las partículas magnéticas.

Alterna rectificada de 1/2 onda o continua pulsante:

Tiene las mejores cualidades de penetración para defectos sub-superficiales.

Por ser pulsante otorga gran movilidad a las partículas magnéticas, con lo cual responden mejor a los flujos dispersos.



PARTÍCULAS MAGNÉTICAS: CARACTERÍSTICAS Y TÉCNICAS DE APLICACIÓN

Las principales características que deben poseer son: **muy baja retentividad (magnetización remanente) y elevada permeabilidad [Ciclo de Histéresis delgado]**

Comercialmente se presentan en dos variedades:

- Para observar con luz blanca
- Para observar con luz ultravioleta

Las técnicas de aplicación son dos:

- Técnica SECA:** Es más sensible para la detección de **discontinuidades subsuperficiales.**

Las partículas magnéticas a utilizar en esta técnica pueden ser para observar con luz blanca o con luz "negra"o ultravioleta.

Pueden ser:

- **Con campo continuo:** Normalmente se utiliza cuando la fuente de magnetización es un yugo o bobinas. Los pasos son:

Aplicamos la corriente de magnetización.
Espolvoreamos las partículas magnéticas.
Quitamos soplando suavemente el exceso de partículas, mientras se aplica la corriente para no borrar accidentalmente alguna indicación.
Suspendemos la circulación de corriente.

-Con campo remanente: Sólo se pueden ensayar por esta técnica **piezas cuyo magnetismo remanente sea elevado**. Este requisito lo cumplen aquellas piezas cuyo contenido de carbono sea superior al 0,2%.

Esta técnica de ensayo debe aplicarse en aquellas **piezas de geometría complicada** y cambios de sección relativamente notorios, para evitar que indicaciones no relevantes (defectos aparentes). Los pasos son:

Aplicamos la corriente de magnetización.
Suspendemos la circulación de corriente.
Espolvoreamos las partículas magnéticas.
Quitamos el exceso de partículas soplando suavemente.

b) Técnica HUMEDA:

Las partículas se aplican en suspensión en aceite liviano, kerosene, agua u otro vehículo con punto de ignición no inferior a 60°C para evitar incendios ante una posible chispa producida por diferencia de potencial.

Las partículas magnéticas para preparar el baño suelen venir en forma de polvo, pasta o concentrados líquidos. Estos concentrados a su vez poseen un emulsionante que impide la coagulación de las partículas.

También se comercializa el baño preparado en forma de aerosol, en dos variantes:

- partículas coloreadas
- partículas fluorescentes

Esta técnica es **más sensible para la detección de discontinuidades superficiales**; es más utilizada para ensayar **piezas pequeñas o ser aplicada en procesos de automatización**.

Normalmente se utiliza en magnetización circular.

Se procede de la siguiente manera:

- 1) Se baña toda la superficie de la pieza con las partículas magnéticas en suspensión.
- 2) **Se aplica la corriente en el instante en que suspendemos el baño**, para evitar que la fuerza del chorro del baño lave alguna indicación.
- 3) Se suspende la circulación de corriente.
- 4) Se analizan las indicaciones.

Para esta técnica de ensayo es fundamental la limpieza de los componentes del equipo, y la concentración del baño.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Ventajas

- **Es más rápido.**
- **No son necesarias limpiezas sofisticadas**, ni preparaciones especiales de la superficie.
- **Puede detectar discontinuidades superficiales aún bajo delgadas capas plásticas o esmaltes.**
- **Puede detectar ciertas discontinuidades sub-superficiales.**

Desventajas

- **Los materiales no magnéticos no pueden ser testeados** con este método
- **El campo magnético debe interceptar las discontinuidades en una dirección dada**, por lo tanto, el operador debe conocer su posible ubicación o efectuar más de un ensayo por pieza.
- **Las excesivas corrientes que son necesarias para magnetizar** piezas grandes.
- **La desmagnetización que puede ser necesaria con posterioridad al ensayo.**
- **El calentamiento localizado y quemado de la superficie de la pieza cuando se utilizan puntas o pinzas con elevada circulación de corriente.**

PRECAUCIONES A TENER EN CUENTA

- Los arcos eléctricos.
- Los aceites y pastas utilizados afectan la piel.
- **debe evitarse la inhalación de las partículas magnética usando mascarar.**
- En caso de emplear luz negra, poner los filtros adecuados

DESMAGNETIZACIÓN

Suele ser necesario desmagnetizar las piezas una vez inspeccionadas, debido a que **el campo magnético residual atrae partículas metálicas ferromagnéticas**, por lo tanto si la pieza está sometida a movimiento rotativo o alternativo, esta circunstancia **aumentaría el rozamiento y el desgaste**.

Para desmagnetizar se somete la pieza a un campo magnético alternativo decreciente, en forma continua o por pasos. Este campo puede ser obtenido con la misma bobina que utilizamos para magnetización longitudinal.

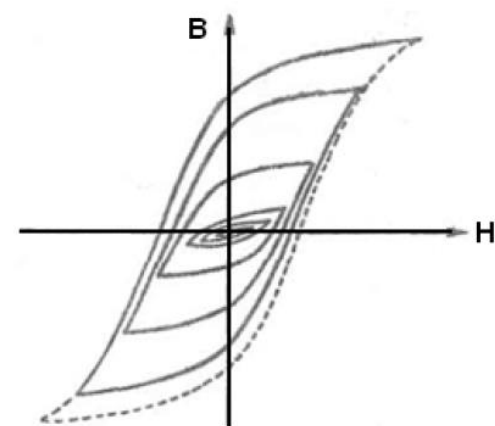
Excitamos dicha bobina con corriente alterna y pasamos la pieza a través de la misma hasta alejarnos de ella (esto sin interrumpir el paso de corriente). Obtenemos así, ciclos de histéresis de valor decreciente como se muestra a continuación:

Otra forma de desmagnetizar es **eleva la temperatura de la pieza hasta llegar a su “punto de Curie”**, a partir del cual un material ferromagnético pierde totalmente su magnetismo remanente.

RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL

Una radiografía es el registro en un film fotográfico de la imagen radiante

El objeto de este ensayo es obtener información sobre la **macroestructura interna** de una pieza o componente.



El principio aplicado es el de la transparencia de los materiales para ondas electromagnéticas de energía apropiada (rayos X o gamma) y el uso de un transductor (película radiográfica) que permita el registro de la imagen obtenida por transparencia.

Esta imagen fotográfica o radiografía es el registro de la estructura interna del objeto en una proyección plana.
Por razones de practicidad trataremos la radiografía industrial en forma generalizada involucrando, en el mismo método, el ensayo efectuado con **rayos X** o con **rayos gamma**. Las diferencias entre ambas técnicas están dadas principalmente por el origen de la radiación empleada

NATURALEZA DE LA RADIACIÓN EMPLEADA

Los rayos X y los rayos gamma utilizados en radiografía industrial son ondas electromagnéticas.
Los **rayos X** se originan por **excitación de la envoltura electrónica del átomo mediante bombardeo con electrones acelerados**, o por desaceleración de dichos electrones en el campo de atracción nuclear.

Los **rayos gamma** tienen su origen en el seno del núcleo atómico de los radioisótopos produciéndose en forma espontánea según las leyes del decaimiento radioactivo.
Generalmente los rayos gamma cubren rangos de energía más estrechos.

Entre las propiedades de interés se debe recordar que las radiaciones X o gamma:

- Se propagan en línea recta no siendo desviadas por campos eléctricos ni por campos magnéticos
- Sensibilizan las emulsiones fotográficas
- **Dañan los tejidos vivos y no se detectan con sentidos.**
- **Atraviesan todos los materiales** incluso los opacos a la radiación luminosa, **sufriendo una absorción o pérdida de energía** en relación con los espesores o densidad de material atravesado

INTERACCIÓN CON LA MATERIA

La radiación X o gamma puede interaccionar con la materia, de acuerdo con distintos procesos, de los cuales los más importantes son tres:

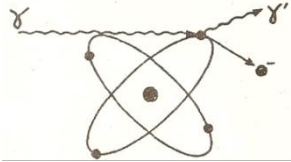
- **Efecto fotoeléctrico:** Un fotón puede interaccionar con un electrón de algún átomo de tal forma que le puede transferir toda su energía mediante un choque elástico.



Si la energía del fotón es superior a la de la ligadura del electrón entonces el electrón será desplazado de su orbita resultando como un electrón libre con una energía cinética igual a la diferencia entre la energía del fotón y la energía de ligadura.

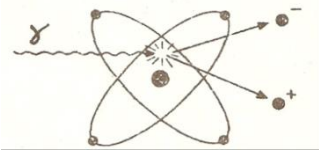
El **efecto fotoeléctrico** resulta en la absorción virtualmente completa del fotón del haz de radiación primaria **apareciendo en cambio electrones en movimiento y rayos X secundarios** que por su baja energía son rápidamente absorbidos en el material.

- **Efecto Compton:** Un fotón correspondiente a un haz de radiación X o gamma también puede interaccionar con un electrón que se puede suponer en reposo, sufriendo un choque elástico y transfiriéndole **solo una parte de su energía**.



De esta interacción resulta entonces un electrón en movimiento, con una cierta energía cinética y **un fotón secundario de menor energía que el incidente**, que se desplaza con una dirección distinta, que depende de la energía cedida y de los momentos resultantes.

- Producción de Pares:** Cuando la radiación electromagnética X o gamma atraviesa el campo eléctrico del núcleo puede sufrir una interacción con el mismo transformándose en materia, más precisamente en **dos electrones de signo contrario (un electrón y un positrón)**.



ATENUACIÓN DE LAS RADIACIONES

Considerando un haz de radiación X o gamma podemos ver que en cada interacción con la materia por cualquiera de los efectos considerados.

La disminución de intensidad **ΔI** correspondiente a un espesor de absorbente **ΔX** es proporcional a la intensidad I del haz incidente, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta I / \Delta X = - \mu \cdot I$$

Donde **μ** es el coeficiente de atenuación lineal que expresa la probabilidad de interacción de la radiación con la materia.

Luego podemos integrar entre los límites:

$$\int_{I_0}^{I_x} \frac{dI}{I} = - \mu \int_0^x dX \Rightarrow \ln \frac{I_x}{I_0} = - \mu \cdot X$$

Dando como resultado

$$I_x = I_0 e^{-\mu \cdot X}$$

El coeficiente **μ** corresponde **a la suma de los coeficientes de atenuación lineal de cada uno de los diferentes procesos de interacción** antes descriptos, por lo tanto podemos poner:

$$\mu = \zeta + \sigma + K$$

- ζ= coeficiente de atenuación lineal para efecto fotoeléctrico
- σ = coeficiente de atenuación lineal para efecto Compton
- K = coeficiente de atenuación lineal para producción de pares

Cada uno de estos coeficientes mide la probabilidad de ocurrencia del evento indicado

Teniendo en cuenta que para la interacción de la radiación con la materia lo que interesa es la masa de material atravesado y no el camino recorrido, suele ser conveniente utilizar para los cálculos el **“coeficiente de atenuación másico”**

$$\text{Coeficiente de atenuación másico} = \mu / \rho \text{ (cm}^2\text{/g)}$$

Dentro de un cierto rango de energía su valor es el mismo para materiales de número atómico medio y bajo

Si el absorbente presenta diferentes espesores en cada uno de ellos, la intensidad de radiación emergente será diferente; **mayor en las áreas de menor espesor y menor en las áreas que corresponden a espesores mayores.**

El valor de μ depende del tipo de material atravesado. Por lo tanto, **si la pieza es de espesor constante pero tiene variaciones de material, también variará la intensidad de radiación emergente de acuerdo al valor de μ que corresponda a cada material.**

No tener en cuenta la **radiación dispersa** constituye una de las **causas de error más frecuente** en la práctica radiográfica.

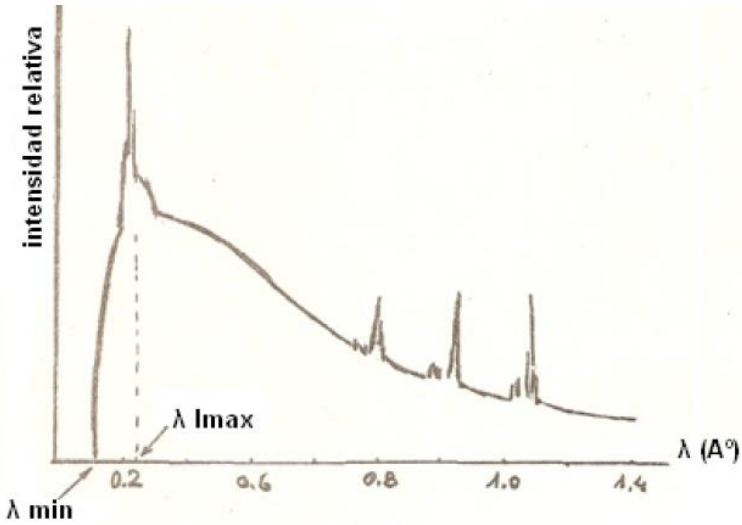
PRODUCCIÓN DE RAYOS X

La radiación X se obtiene por bombardeo electrónico de un blanco metálico. Los electrones emitidos por el cátodo son acelerados y dirigidos sobre el ánodo mediante un campo eléctrico.

La emisión de rayos X en el ánodo o blanco se produce según **dos fenómenos distintos:**

- Emisión de un espectro **continuo** de rayos X por enfrenamiento de los electrones en el blanco.
- Emisión de un espectro de rayas (**discontinuo**) producido por recaptura de electrones orbitales desplazados previamente por choque de los electrones incidentes.

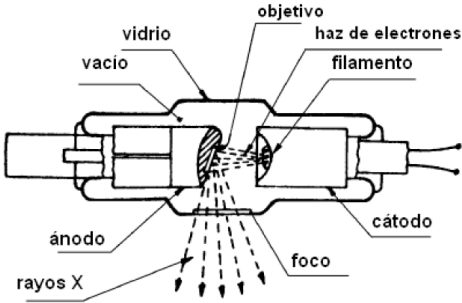
En la figura se muestra un espectro característico de un blanco de tungsteno bombardeado con electrones acelerados por una diferencial de potencial de 200 KV. Se observa que la mayor parte de la energía emitida como rayos X corresponde al espectro continuo.



GENERACIÓN DE RAYOS X

Los tubos de rayos X consisten esencialmente en una ampolla de vidrio cerrada al vacío en la cual se encuentran sellados dos electrodos: el ánodo (positivo) y el cátodo (negativo). El cátodo termina en un filamento calentado por la circulación de corriente que suministra un transformador de baja tensión.

El filamento es el elemento emisor de electrones. El calentamiento del filamento (cátodo) produce la emisión de electrones que será mayor cuanto mayor sea la temperatura. El cátodo enfrenta al ánodo que es usualmente un bloque de cobre con su extremo cortado en bisel a 70° respecto del eje del tubo. Sobre el ánodo se encuentra una lámina delgada de tungsteno que constituye el blanco.



La velocidad de los electrones, es decir su energía, es controlada variando el voltaje aplicado entre el cátodo y el ánodo.

Cuando los electrones acelerados chocan con el blanco son detenidos abruptamente y ceden la mayor parte de su energía en forma de calor mientras que una pequeña proporción, alrededor del 1%, es utilizada en la emisión de rayos X.

Las principales limitaciones de potencia que tienen los tubos de rayos X están dadas por el tamaño del foco y la disipación del calor. Esto se debe a que un foco muy grande implica mayor energía la cual puede influir en la fusión del blanco mientras que la disipación de calor se complicaría mucho más.

EQUIPOS DE RAYOS X

En su aspecto físico un equipo de rayos X de uso corriente en la industria, consta de una valija o consola de comando y de un cabezal de irradiación.

ESPECTRO DE RAYOS X Y CONTROL DE LA EMISIÓN

Los equipos de rayos X de uso industrial están diseñados de manera que la mayor parte de la energía sea emitida bajo la forma de espectro continuo.

Las variaciones en la tensión de aceleración aplicada al tubo determinan una modificación en la "calidad" o características de la radiación emitida.

Esto se debe a que al aumentar la tensión se produce además, un aumento de intensidad en todas las longitudes de onda, lo que produce que las longitudes de onda menores tendrán mucho más energía.

El aumento de corriente anódica no varía la calidad del espectro

RAYOS GAMMA

ISÓTOPOS Y RADIOISÓTOPOS

Los átomos de un mismo elemento se caracterizan por tener igual numero atómico e idénticas propiedades químicas pero puede ocurrir que no todos ellos tengan el mismo peso atómico. La diferencia estará dada por el diferente número de neutrones que contengan en su núcleo. Estos átomos de un mismo elemento que se diferencian por su peso atómico son llamados isótopos.

Así el iridio de la naturaleza es una mezcla de dos isótopos uno de ellos de peso atómico 191 y el otro de peso atómico 193.

Los isótopos radioactivos o radioisótopos son aquellos isótopos cuyos núcleos contienen más o menos neutrones que los que están presentes en los núcleos de los isótopos estables que existen en la naturaleza para el elemento considerado. Tales núcleos son inestables y pierden energía, según distintos procesos, emitiendo radiaciones de distinto tipo, incluida radiación gamma. Este proceso es conocido como "decaimiento radioactivo".

La mayoría de los radioisótopos usados en radiografía tienen un neutrón en exceso en el núcleo. Este neutrón adicional ha sido forzado a incorporarse en el núcleo bombardeando un isótopo estable.

ESPECTRO DE RADIACIÓN

La emisión de radiación gamma es una consecuencia de transformaciones bien definidas dentro del núcleo y por lo tanto ocurre en rangos de energía lo que da como resultado un espectro de rayas.

DECAIMIENTO RADIOACTIVO

Si se observa la relación entre protones (Z) y neutrones (N) en los núcleos atómicos de los distintos elementos se puede concluir que mientras la relación Z/N se mantiene próxima a la unidad el isótopo tiende a ser estable.

En caso de ser inestable se produce una redistribución de los nucleones en un isótopo inestable (radioisótopo), que se produce con emisión de partículas y/o radiaciones

Y se conoce con el nombre de decaimiento o desintegración radioactiva. El decaimiento de los radioisótopos puede producirse de diversas maneras.

PERIODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN

La velocidad a la cual una masa de átomos radioactivos sufre el proceso de decaimiento radioactivo descrito depende únicamente de la estructura nuclear y no puede ser modificada por medios químicos ni físicos.

Si hay N átomos presentes de un radioisótopo, la variación ΔN en dicho número debida al decaimiento radioactivo en un intervalo de tiempo Δt depende únicamente de N y de la constante λ característica para cada radioisótopo.

Esta constante λ es llamada “constante de decaimiento” y caracteriza a cada radioisótopo. Estos factores se pueden entonces relacionar por la ecuación:

ΔN / Δt = - λ.N

El signo negativo es debido a que se trata de una disminución de N en el tiempo.

Esta ecuación puede expresarse en la forma exponencial de uso más frecuente:

N = N₀ . e^{-λ.t}

Se define el período de semidesintegracion (T1/2) que es el tiempo necesario para que una cantidad inicial de radioisótopo se reduzca a la mitad. Es decir:

ln (N/N₀) = ln 0,5 = - λ.T_{1/2} ----> λ = 0,693 / T_{1/2}

De acuerdo a esto con esto la ecuación puede escribirse como sigue:

N = N₀ . e^{-0693.t / Tmed}

RADIOACTIVIDAD DE LOS RADIOISÓTOPOS

La radioactividad A de un radioisótopo se mide por la cantidad de átomos del mismo que se desintegran o decaen por unidad de tiempo. Como hemos visto que el número que decae ΔN es directamente proporcional al número N de átomos presentes, por lo tanto:

A_t = A₀ . e^{-λ.t} => A_t = A₀ . e^{-0,69.t / Tmed}

La unidad empleada para medir la actividad es el curie (Ci). Un curie corresponde a una velocidad de desintegración o decaimiento de 3,7 x 10^10 desintegraciones por s^-1

FUENTES DE RADIACIÓN GAMMA

Si bien en principio todo radioisótopo emisor de radiación gamma puede ser usado para radiografía en la práctica sólo cinco de ellos reúnen características que permiten su aplicación en radiografía industrial. Éstos son: Co 60, Cs 134, Cs 137, Ir 192 y Thulium(Tm) 170.

La pastilla radioactiva es usualmente una esfera.

EQUIPOS PARA RADIOGRAFÍA GAMMA

Dado que la emisión de radiación por un radioisótopo no puede ser detenida ni modificada, la fuente radioactiva debe ser guardada dentro de un blindaje que absorba la radiación y que este provisto de dispositivos que ermitan realizar la exposición cuando sea requerido. Estos blindajes son llamados equipos de gammagrafía o cámaras de gammagrafía.

LA PRÁCTICA RADIOGRÁFICA

Una radiográfica es el registro en un film fotográfico de la imagen radiante

El film consiste en un soporte transparente cubierto en ambos lados con una capa de gelatina que contiene en suspensión granos extremadamente finos de haluro de plata. Cuando el film es expuesto a radiación X, gamma, ultravioleta o luz visible se produce una excitación fisicoquímica de los granos de haluro de plata. Así excitados pueden ser reducidos a partículas negras de plata metálica mediante un proceso químico controlado que se conoce como "revelado del film”.

La radiación es parcialmente absorbida, según vimos antes, en función del espesor y densidad del material atravesado, emergiendo diferenciada en su intensidad, constituyendo la "imagen radiante" del objeto.

Al observar una radiografía se deben tener en cuenta tres características fundamentales:

- 1) **Densidad:** Es el término que describe el grado de ennegrecimiento alcanzado en la película.
- 2) **Contraste:** Al observar una radiografía la imagen se ve como variaciones en la luz transmitida que llega al observador a través de distintas densidades. La diferencia entre la intensidad luminosa de dos áreas adyacentes es un índice del contraste. Es un valor subjetivo que no puede medirse y depende del mismo y de las condiciones de observación.
- 3) **Definición:** La nitidez de bordes o límites entre dos áreas de diferente densidad se conoce como definición radiográfica.

SELECCIÓN DE LA RADIACIÓN

El mayor contraste en una imagen radiante se obtendrá con radiación de menor energía y espectro continuo.

El contraste de la radiación influye de forma directa en la calidad de la imagen.

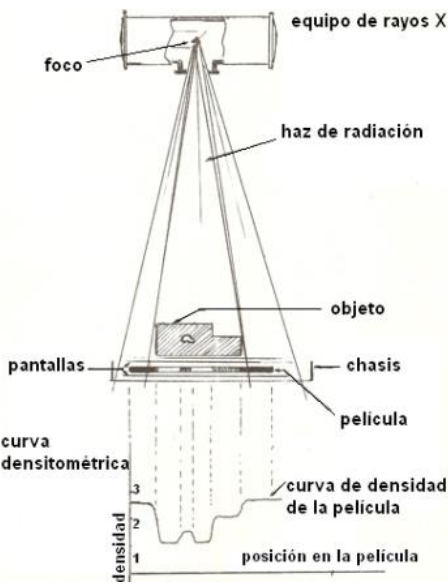
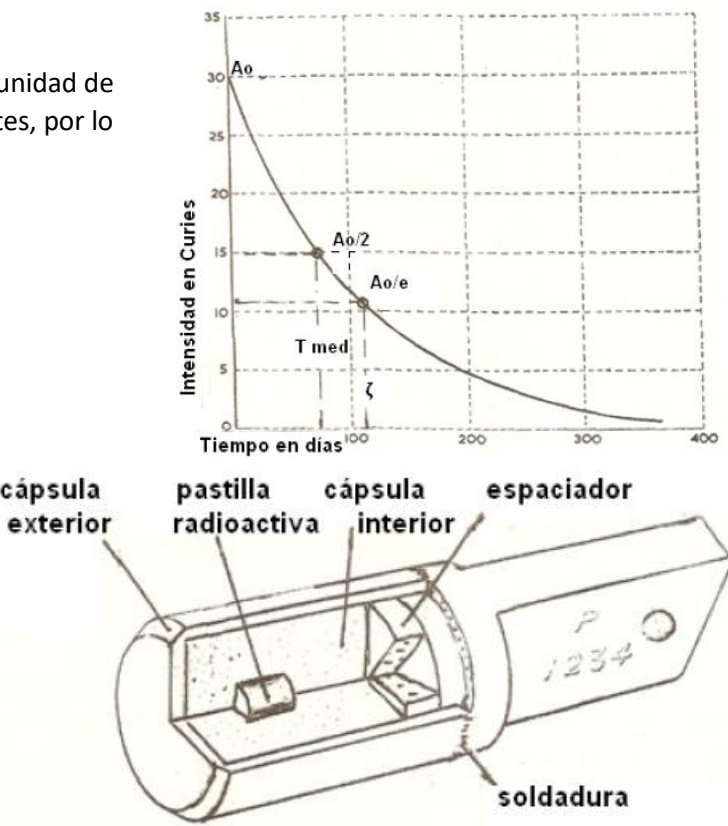
Esto es apropiado para cuerpos con pocas variaciones de espesor o densidades

Como vimos previamente la densidad del objeto se relacionaba con la energía de radiación por lo que necesitaremos mayor energía si buscamos radiografiar cuerpos con grandes variaciones de espesor o densidad, lo cual nos provoca una pérdida de contraste.

SENSIBILIDAD RADIOGRÁFICA

La detección defectos en un material depende de la diferencia de absorción de la radiación entre la parte sana y la parte defectuosa.

Que el defecto aparezca o no en la radiografía depende de que la técnica empleada sea capaz de detectar la diferencia de absorción que existirá entre la radiación que pasa



por la zona sana y por la zona defectuosa.
Por ejemplo: Si la técnica permite detectar la diferencia de intensidad de radiación debida a una diferencia del 2% en el espesor del material, entonces idealmente una cavidad cuyo diámetro fuera mayor que el 2% del espesor sería detectada, mientras que una menor pasaría inadvertida.

Además, no solo depende del tamaño de la cavidad, si no también de la calidad de la radiación y de la dirección de orientación del haz con respecto al defecto.

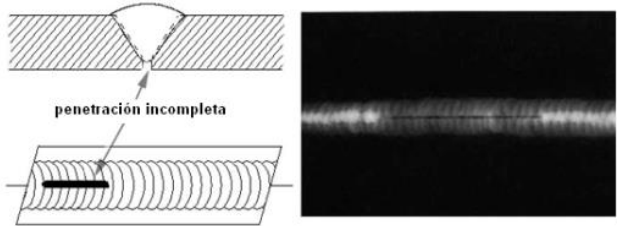
Por lo tanto **no hay manera cierta para especificar las características de absorción para todo tipo y orientación de defecto.**

INTERPRETACIÓN RADIOGRÁFICA

Además de producir radiografías de alta calidad, el radiólogo también debe ser experto en la interpretación radiográfica. La interpretación de las radiografías se realiza en tres pasos básicos:

(1) detección, (2) interpretación, y (3) evaluación.

Generalmente se aplica a soldaduras. Un fenómeno muy común es el de penetración incompleta. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MÉTODO DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL



Ventajas

- Pueda usarse en materiales metálicos y no metálicos, ferrosos y no ferrosos. Se debe tener cuidado con los materiales que se ensaya, ya que en algunos casos la energía de radiacion puede romper los enlaces, como en el caso de los polimeros
- Proporciona un registro permanente de la condición interna de un material.
- Es más fácil poder identificar el tipo de discontinuidad que se detecta.
- Revela discontinuidades estructurales y errores de ensamble.

Desventajas

- Difícil de aplicar en piezas de geometría compleja o zonas poco accesibles.
- La calidad de la radiografía disminuye al tener materiales muy grandes y densos.
- La pieza o zona debe tener acceso en dos lados opuestos.
- No detecta discontinuidades de tipo laminar.
- Se requiere tomar medidas de seguridad para la protección contra la radiación.

ULTRASONIDOS

Los ultrasonidos se emplean en los ensayos no destructivos para detectar discontinuidades tanto en la superficie como en el interior sin producir deterioros en el mismo.

Se consideran sonidos al rango de frecuencia que el oído humano es capaz de percibir de 10hz a 20 000hz. **A partir de 20 000hz se consideran ULTRASONIDOS**

Los más empleados son desde 0.25 MHz hasta 25 MHz.

APLICACIONES GENERALES

Los ultrasonidos además de utilizarse en los ensayos de materiales, tienen múltiples aplicaciones. Se utilizan para detectar objetos metálicos, para la-limpieza de materiales, en medicina, etc.

CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS

Los parámetros que definen una onda ultrasónica son los siguientes:

- Frecuencia (**f**): es el número de oscilaciones de una partícula por unidad de tiempo. Se mide en ciclos/segundo, igual a Hz.
- Longitud de onda (**λ**): es la distancia existente entre dos estados energéticos iguales y consecutivos en la onda. Se mide en mm.
- Velocidad de propagación (**c**): es la velocidad con que las partículas pasan de un estado de compresión a un estado de expansión. Se mide en m/s.
- Amplitud (**A**): es el desplazamiento de las partículas de su posición de reposo. Se mide en mm. La máxima amplitud se denomina elongación.
- Ciclo: un ciclo lo constituye una secuencia completa del movimiento de la partícula desde su posición de reposo, cuando pasa a un estado de movimiento y vuelve a su posición original de reposo.
- Periodo (**T**): es la inversa de la frecuencia, $T = 1/f$. La ecuación que relaciona la velocidad de propagación con la longitud de onda y la frecuencia es **$c = \lambda \cdot f$**

PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS}

Si se empuja una partícula, ésta comienza a vibrar y transmite su energía a las partículas vecinas. La energía se propaga a través de las partículas individuales por la materia.

TIPOS Y FORMAS DE ONDAS

Onda longitudinal: la dirección de propagación del sonido es paralela a la del movimiento de las partículas.

Onda transversal: la dirección de propagación del sonido es perpendicular a la del movimiento de las partículas.

Onda superficial: se puede considerar como una combinación de las dos anteriores. Un claro ejemplo son las olas del mar.

Las ondas superficiales pueden ser de **Rayleigh** o de **Lamb**.
Las ondas de Rayleigh se propagan por la superficie del material siguiendo una órbita elíptica.
Cuando la vibración es transmitida en un material delgado que puede ser una chapa, entonces se produce la onda de Lamb.
Esta onda puede ser simétrica o asimétrica. **Se diferencia de la onda de Rayleigh** en que su velocidad de propagación no sólo depende del material, si no también de su **frecuencia** y del espesor de la chapa.

TRANSMISIÓN DEL ULTRASONIDO A LA PIEZA A VERIFICAR

La energía transmitida a una pieza puede ser pulsante o continua.

Cuando la energía se introduce en la pieza a examinar a intervalos muy pequeños, del orden de microsegundos, se dice que la transmisión es pulsante.

VELOCIDAD DE LAS ONDAS EN LOS MATERIALES

Si recordamos la fórmula que nos relacionaba la velocidad de propagación (c), la longitud de onda (λ) y la frecuencia (f)
 $c = \lambda \cdot f$

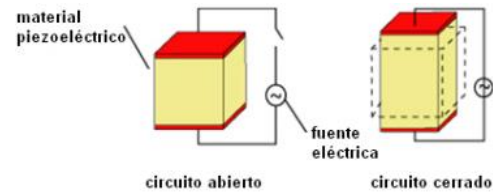
Observamos que al ser la velocidad de propagación constante, la longitud de onda dependerá de la frecuencia; $\lambda = c/f$.
Conforme aumentamos la frecuencia, disminuye la longitud de onda.

GENERACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS

Antiguamente las ondas ultrasónicas se generaban por el denominado efecto magnetoestrictivo. **En la actualidad las ondas se generan por el efecto piezoeléctrico.**

Si aplicamos una tensión continua a una plaquita de material piezoeléctrico, ésta se contraerá o dilatará, dependiendo de que la polaridad de la tensión sea positiva o negativa.

Si en cambio aplicamos una corriente alterna, la plaquita se contraerá y dilatará con la frecuencia de la tensión que apliquemos. **Esto produce una vibración en el cristal, que genera ondas ultrasónicas. A la plaquita piezoeléctrica se le denomina “transductor”,** entre los más comunes se encuentra el **cuarzo**.



ATENUACIÓN

Se define como la **pérdida de energía** que sufre el haz ultrasónico cuando **atraviesa un material**.

IMPEDANCIA ACÚSTICA

La impedancia acústica (Z) se define como la **resistencia que opone un material al ser atravesado por un haz ultrasonoro**.

REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN

Si el haz ultrasónico atraviesa dos materiales de diferente impedancia acústica, al llegar a la superficie de separación de ambos materiales (interfase), parte de él se refleja y parte pasa.

Si las **impedancias** acústicas son muy **parecidas**, la **mayor parte del haz pasará de un material al otro**, mientras que una pequeña parte es reflejada.

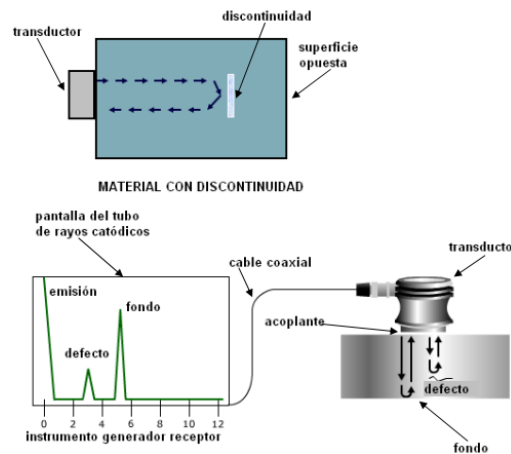
Si las **impedancias** acústicas son muy **distintas**, una pequeña parte del haz pasa de un material al otro, mientras que la **mayor parte es reflejada**.

PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO

Existen **tres procedimientos fundamentales** para el ensayo de materiales por ultrasonidos:

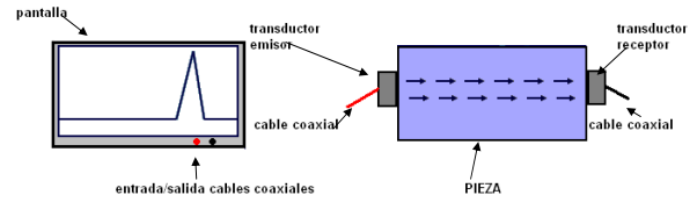
a) Procedimiento de **impulsos y sus ecos**

Generalmente se utiliza cuando se tiene que realizar el ensayo de manera manual.
Este procedimiento se basa en la introducción de impulsos cortos de ondas ultrasonoras uniformemente distribuidas en el tiempo. Estos impulsos son reflejados en las discontinuidades de los materiales cuya **orientación sea normal a la dirección de propagación de los impulsos**.
En este procedimiento se utilizan uno o dos transductores. Cuando se utiliza un solo transductor, éste funciona alternativamente como emisor y como receptor. Cuando se utilizan dos transductores, uno funciona como emisor y el otro como receptor, pero los dos constituyen un bloque único.
Mediante los impulsos que son reflejados, podemos conocer la dimensión relativa de las discontinuidades y su situación.



b) Procedimiento de **transmisión**

A diferencia del método de impulsos y eco, este ensayo se realiza en instalaciones automáticas.
En este procedimiento la pieza se sitúa entre dos transductores, uno emisor y otro receptor. El transductor emisor recibe una señal eléctrica y la transforma en ultrasónica y el receptor recibe una señal ultrasónica y la transforma en eléctrica (piezoefecto).
Si la pieza que estamos verificando está compuesta de un material homogéneo, el instrumento de medición receptor señalará, al menos teóricamente, el 100% de la energía emitida.
Si existe una deficiencia en la pieza, ésta tendrá una composición diferente de la del material que estamos verificando y por lo tanto, diferente impedancia acústica lo que provocara que parte de la energía que llegue a la superficie de la deficiencia (interfase) se refleje y se produzca un decaimiento de energía. Así el instrumento de medición receptor señalará menor energía.



c) Procedimiento de **resonancia: SIN INFORMACION EN EL APUNTE.**

MÉTODOS DE ENSAYO

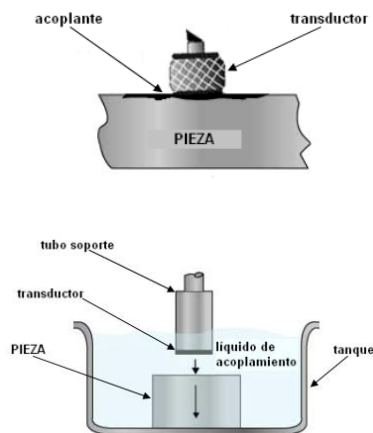
Los métodos de ensayo más comúnmente utilizados son:

a) Método de contacto

En el método de contacto, **el transductor se acopla directamente con el material base por medio de una ligera capa de acoplante**, que suele ser de naturaleza líquida o pastosa. Este método se usa sobre todo cuando se inspeccionan piezas de grandes dimensiones.

b) Método de inmersión

En el método de inmersión la pieza a verificar y el transductor, **se sumergen en un líquido de acoplamiento**. La vibración ultrasonora se transmite a la pieza a través del líquido. **El transductor no toca en absoluto a la pieza**.
En el caso de grandes piezas se suele utilizar un método, que aunque no es el método de inmersión propiamente dicho, se considera una variable del mismo, ya que consiste en la utilización de una columna de agua como acoplamiento.



REPRESENTACIÓN DE LOS ENSAYOS (A.S.T.M.)

Existen tres tipos de representación para poner en evidencia las características internas de las piezas examinadas. Estos tipos son:

a) Representación tipo A

b) Representación tipo B

c) Representación tipo C

En el siguiente apartado se detalla la Representación tipo A que es la más empleada en los ensayos no destructivos.

REPRESENTACIÓN TIPO A:

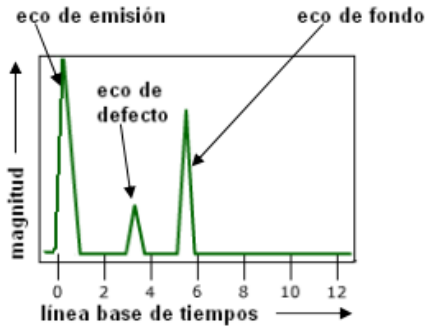
La representación tipo A consiste en un sistema de coordenadas.

En la ordenada la magnitud de dicho impulso.

En la abscisa está representado el tiempo que tarda el impulso ultrasónico en llegar a un determinado reflector

INTERPRETACIÓN DE LA REPRESENTACIÓN TIPO A

En la siguiente figura se muestra lo que sucede cuando la onda ultrasónica atraviesa un material que contiene una discontinuidad, con la correspondiente representación en la pantalla.



La distancia entre el impulso de emisión y el eco de la discontinuidad y la distancia entre el impulso inicial y la reflexión correspondiente a la pared posterior (eco de fondo), son proporcionales al tiempo empleado por la onda ultrasonora para atravesar el material y volver desde la discontinuidad, si existe, o desde la pared posterior.

Como la velocidad de propagación de la onda ultrasonora a través de un material es una magnitud conocida y constante, de la fórmula

e = c.t

donde:

e = distancia entre el impulso de emisión y el reflector

c = velocidad de propagación de la onda ultrasonora en el material

t = tiempo empleado por la onda para recorrer e

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MÉTODO DE ULTRASONIDOS

Ventajas

- Elevada sensibilidad ($\lambda/2$).
- Poca dependencia de la geometría, bastando el acceso a una sola cara.
- Posibilidad de inspeccionar grandes espesores (metros de metal).
- Rapidez y resultado inmediato.
- Aparatos manuales y de poco peso.
- Ausencia de riesgos para el operador y personal alrededor.

Desventajas

- Naturaleza del material (impedancia acústica)
- Tipo de estructura interna (tamaño de grano, fases).
- Condición de la superficie.
- Mayor conocimiento y entrenamiento del personal.
- Falta de un documento objetivo de su ejecución.
- Interpretación relativa.

