

eman ta zabal zazu



Universidad del
País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

OCW
OpenCourseWare

2018

INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DE LOS MATERIALES Y SUS PROPIEDADES (I)

Ane Miren García Romero
Nuria Monasterio Guisasola

TEMA 6: COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES

OBJETIVOS

- Conocer y diferenciar términos y conceptos básicos mecánicos: Fuerza, esfuerzo, alargamiento, deformación, comportamiento elástico y anelástico, esfuerzos de tracción, compresión, cizalla, flexión.
- Conocer el significado de los parámetros que se extraen de la curva Tensión/deformación: Comportamiento a tracción. Resistencia a tracción, límite elástico, módulo de Young, deformación tras rotura y recuperación elástica. Módulo de Resiliencia
- Ser capaz de trazar una curva Tensión/deformación y extraer los parámetros importantes de la misma
- Conocer el significado del coeficiente de Poisson
- Diferenciar entre tensión real y tensión ingenieril, y entre deformación real y deformación ingenieril
- Conocer el micromecanismo de la deformación plástica y del endurecimiento por deformación.
- Conocer la relevancia del tamaño de grano en el comportamiento mecánico del material
- Conocer el significado de Dureza en la metalurgia. Conocer las técnicas más habituales de medida de dureza y su empleo para control de calidad de los procesos metalúrgicos.

ÍNDICE

- 6.1.- Definiciones y terminología
- 6.2.- Determinación experimental de las propiedades mecánicas de los materiales
- 6.3.- Comportamiento tensión-deformación. La zona elástica
 - 6.3.1- La ley de Hooke
 - 6.3.2- El coeficiente de Poisson
 - 6.3.3- Sólidos elásticos no lineales
- 6.4.- Comportamiento tensión-deformación. La zona plástica
 - 6.4.1- Deformación plástica y recuperación elástica
 - 6.4.2- Ductilidad
 - 6.4.3- El límite elástico
 - 6.4.4- La resistencia a tracción
 - 6.4.5- Tensión y deformación reales
- 6.5.- Cálculo de la ductilidad y el módulo de resiliencia

(Continúa en la página siguiente)

TEMA 6: COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES

ÍNDICE

(Continúa de la página precedente)

6.6- Comportamiento tensión-deformación de diversos materiales

6.7- Los ensayos de compresión y de flexión

6.8- La deformación plástica de los metales

6.9- Endurecimiento por deformación en frío

6.10- Tratamientos térmicos de recocido

6.11.- Relación entre propiedades y tamaño de grano

6.12.- Tratamiento estadístico de los resultados

6.13- Dureza

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

RECURSOS ADICIONALES RECOMENDADOS

<https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/mechanical-testing/aims.php>

<http://core.materials.ac.uk/>

La autoría de las imágenes que contiene este documento, así como las referencias bibliográficas, se incluyen en la última página.

6.1 DEFINICIONES Y TERMINOLOGÍA

F fuerza ó carga

La Fuerza, F, se mide en N o en kg fuerza

Alargamiento, Δl

Variación neta dimensional experimentada por el material. Se mide en dimensiones de longitud

Esfuerzo ó tensión, σ

Fuerza por unidad de superficie transversal sobre la que se aplica. Se mide en MPa (1 MPa = 1N/mm²) o en kg/cm².

Deformación, ε

Variación dimensional por unidad de longitud experimentada por el material debido al esfuerzo aplicado. Es adimensional y se mide de modo unitario (mm/mm) o porcentual (%)

Resistencia, σ_r

Máximo esfuerzo que un material puede soportar en unas condiciones dadas de fuerza o de otras solicitaciones (corrosión, fatiga, otras)

TENSIONES

Las fuerzas de tracción y de compresión actúan sobre el área perpendicular a la dirección en que se aplican. Por ello, las tensiones de tracción y de compresión se calculan dividiendo la fuerza correspondiente por el área transversal a la dirección de aplicación de la misma.

Estas tensiones se identifican por la letra griega σ (sigma)

La deformación es la proporción que se alarga/comprime el material bajo la fuerza. Esta deformación se identifica por la letra latina e (minúscula) o la griega ε (épsilon).

La fuerza de cizalla o cortadura es aquella que actúa tangente a un plano. Por tanto, la tensión se calcula sobre el área paralela a la dirección en que se aplica la fuerza.

Estas tensiones se identifican por la letra griega τ (tau)

La deformación en cizalla es la tangente del ángulo de deformación. Esta deformación se identifica por la letra griega θ (theta).

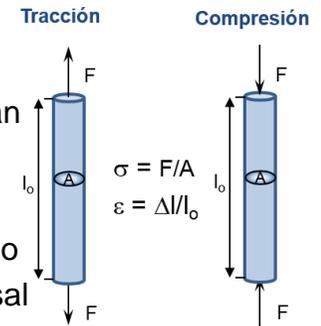
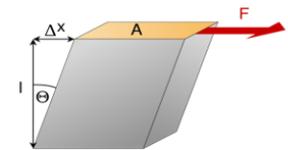


Figura 6.2: Elementos sometidos a tracción y compresión. (Autoría, ver últimas páginas)



Tensión $\tau = F / A$
Deformación θ

Figura 6.3: Elemento sometido a cizalladura. (Autoría, ver últimas páginas)

Tracción Compresión Cizalla o cortadura Flexión

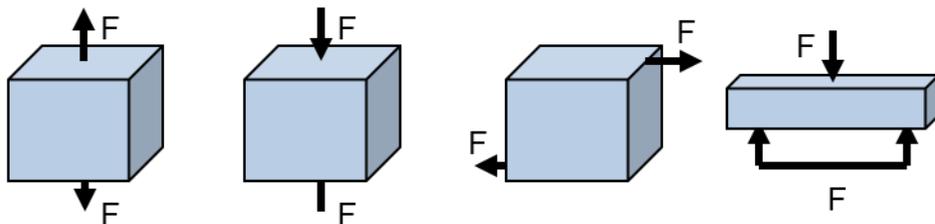


Figura 6.1: Distintos tipos de aplicación de fuerza. (Autoría, ver últimas páginas)

6.1 DEFINICIONES Y TERMINOLOGÍA

● **Deformación elástica**

La deformación que experimenta un material bajo un esfuerzo en la zona elástica: Si el esfuerzo cesa la deformación desaparece y el material vuelve al estado original.

● **Módulo de Young E**

Es una característica intrínseca de cada material. Es la relación que hay entre la deformación elástica y el nivel esfuerzo que la produce.

● **Deformación plástica**

La deformación que experimenta un material cuando el esfuerzo sobrepasa la zona elástica. Es definitiva y no se recupera cuando el esfuerzo cesa.

● **Resistencia a rotura**

Máximo esfuerzo que el material soporta sin romperse

● **Límite elástico**

Está relacionado con el máximo esfuerzo que un material puede soportar en el rango elástico. Lo veremos mas adelante.

● **Ensayo**

Las pruebas que se realizan para determinar las características

de un material: ensayo de tracción, ensayo de compresión, ensayo de fatiga, etc.

● **Probeta**

Cada uno de los elementos extraídos de un material con el cual se realiza un ensayo para determinar alguna característica: probeta de tracción, probeta de compresión, probetas de corrosión, etc.

● **Norma**

Las normas, o normativa, son acuerdos nacionales o internacionales que indican el modo de llevar a cabo medidas, identificar productos, o incluso de organizar organizaciones. Las primeras normas desarrolladas en el mundo fueron las normas para definir cómo medir las propiedades mecánicas de los materiales.

● **Material isótropo – Material anisótropo**

Los materiales cuyas características y/o propiedades son iguales en todas las direcciones se denominan isótropos. Aquellos que tienen distintas características en distintas direcciones se denominan anisótropos.

6.2 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Los ensayos se realizan en unas máquinas denominadas de ensayo de tracción, o máquinas universales de ensayos. Un esquema de las mismas, junto con la fotografía de una máquina actual, se muestran en la figura 6.4,

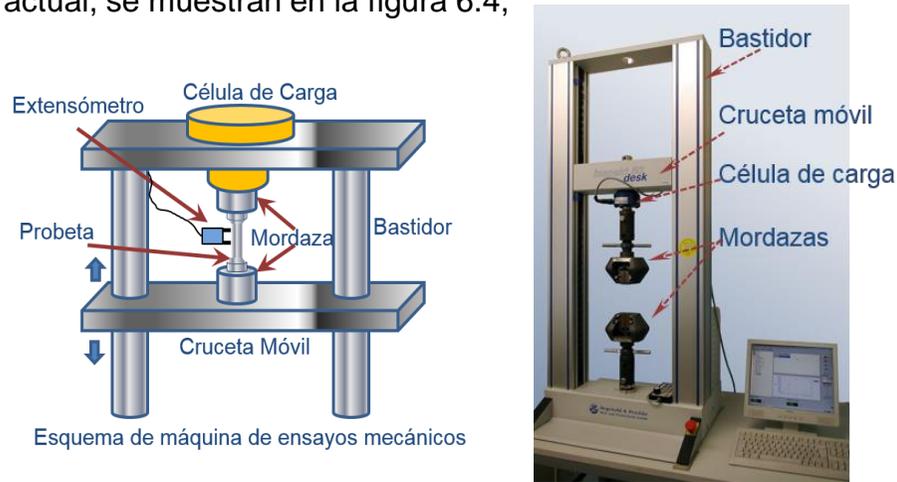


Figura 6.4: Máquina de ensayos de tracción. A la izda., esquema indicando las partes principales. A la derecha fotografía de una máquina actual. (Autoría, ver últimas páginas)

REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

La probeta se sujeta por uno de sus extremos al bastidor de la máquina, mediante una mordaza, y el otro extremo se sujeta a la cruceta móvil insertada en el bastidor mediante otra mordaza. Uno de ambos extremos está unido a una célula de carga capaz de determinar la fuerza realizada sobre la probeta.

Una vez sujeta la probeta, la cruceta móvil se mueve a una

velocidad de desplazamiento prefijada, aplicando una tensión creciente en el material, el cual finalmente se rompe. La célula de carga registra la carga ejercida en cada momento del ensayo, incluida la final en la rotura.

Para conocer la deformación del material en cada momento, se debe instalar en las probetas un “extensómetro”, o bien “galgas extensométricas”. Ambos se basan en el mismo principio, que se indica más adelante.

Previamente a realizar el ensayo, el software de la máquina solicita los datos de la probeta:

Sección transversal y longitud de ensayo.

Con estos datos, la máquina registra en cada momento:

- La Tensión a que se somete la probeta, $\sigma = F/A$
- La deformación que experimenta, $\varepsilon = \Delta l/l_0$

Con estos datos el software elabora y suministra el:

Gráfico TENSIÓN versus DEFORMACIÓN

Se puede solicitar que se elabore el gráfico **Fuerza versus Alargamiento**, pero este sólo sería válido para cada probeta concreta, mientras que el gráfico tensión versus deformación proporciona información extrapolable a probetas de dimensiones y formas geométricas diversas.

6.2 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

DISTINTOS TIPO DE PROBETAS DE TRACCIÓN PARA MATERIALES

Los ensayos para determinar propiedades mecánicas con fines ingenieriles o industriales siempre se realizan siguiendo una normativa. Para realizar un ensayo de tracción existen diferentes normas para distintos materiales (metales, cerámicas, polímeros, composites), y dentro de cada tipo de material existen diferentes tipos de probetas posibles y sus correspondientes condiciones de ensayo.

Las normas indican la forma, dimensiones y acabado superficial que pueden adoptar distintos tipos de probetas para el ensayo. Hay probetas de forma cilíndrica, probetas planas, e incluso hay probetas curvadas para ensayar tubos. Dependiendo del tipo de producto de partida se selecciona el tipo de probeta adecuada. La figura 6.5 muestra un esquema de una probeta de tracción y una fotografía de varias probetas habituales, recogidas en la normativa del ensayo de tracción de materiales metálicos.

Cada tipo de probeta requiere de unas mordazas adecuadas para asegurar su sujeción a la máquina impidiendo el deslizamiento a la vez que garantizando que no se dañan al ser amordazadas.

EXTENSÓMETROS Y GALGAS EXTENSOMÉTRICAS

Para conocer la deformación del material en cada momento, se debe instalar en las probetas un “extensómetro”, o bien “galgas



Figura 6.5: Diversas probetas de tracción metálicas (Autoría, ver últimas páginas)

extensométricas”. Los extensómetros y las galgas extensométricas consisten en una resistencia eléctrica piezoresistiva. Básicamente es un circuito cuya resistencia cambia cuando su longitud se alarga o se encoje, variando de este modo el voltaje que transmite. Esta resistencia se une a la probeta, y durante el ensayo de tracción se alarga solidariamente con ella. La figura 6.6 muestra un esquema de una galga, y una galga colocada sobre una probeta cilíndrica.

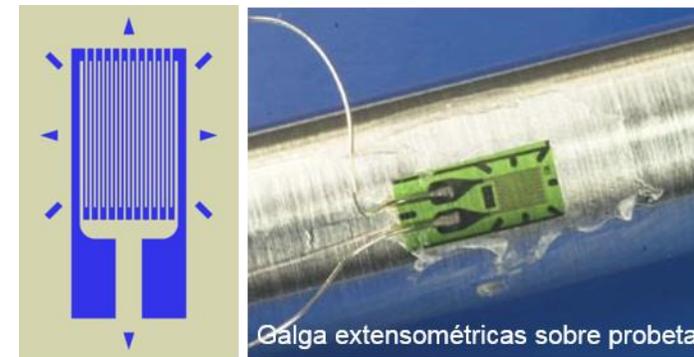


Figura 6.6: Galga extensométrica. Izda., esquema de una galga. Derecha, galga sobre probeta cilíndrica, preparada para ensayar (Autoría, ver últimas páginas)

6.3 COMPORTAMIENTO TENSIÓN-DEFORMACIÓN. LA ZONA ELÁSTICA

La figura 6.6 muestra la gráfica tensión-deformación de las medidas basadas en el desplazamiento de cruceta (color lila) y en la deformación de la probeta mediante galga extensométrica (color gris). La diferencia entre ambas medidas se debe a que la máquina, y todos los componentes de amarre de las probetas, también están sometidos a la carga y por tanto sufren deformación elástica. Por ello, las medidas de desplazamiento de la cruceta no son válidas para determinar la deformación de la probeta.

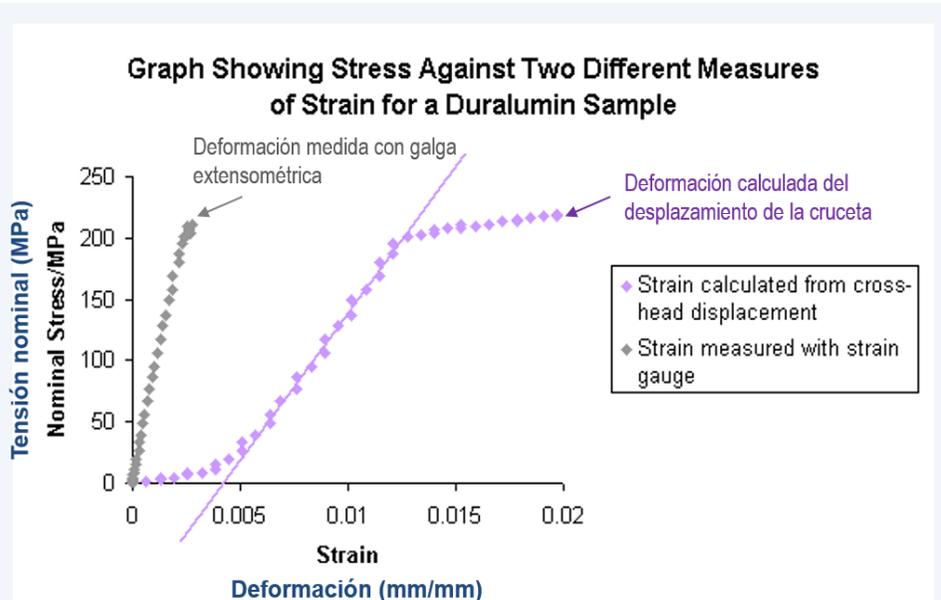


Figura 6.7: Gráfico tensión versus deformación de una probeta de Duraluminio. Los puntos grises corresponden al gráfico con medidas de deformación de galga extensométrica. Los puntos lila se determinan usando la medida de desplazamiento de cruceta en vez de la deformación real de la probeta. (Autoría, ver últimas páginas)

COMPORTAMIENTO ELÁSTICO

Cuando se somete una pieza de metal, o de otro tipo de material, a una fuerza de tracción uniaxial se produce la deformación del metal. Si el material recupera sus dimensiones originales cuando se elimina la fuerza, se considera que el metal ha sufrido una **deformación elástica**. Cuando se retira la carga el material recupera su forma original.

La mayoría de los materiales, cuando se someten a un nivel bajo de carga, se comportan de manera lineal elástica, tal como se observa en la figura 6.8. Es decir, el alargamiento del material es directamente proporcional al nivel de carga aplicado → **la gráfica tensión versus deformación es una línea recta**. Este comportamiento se conoce como la **Ley de Hooke**.

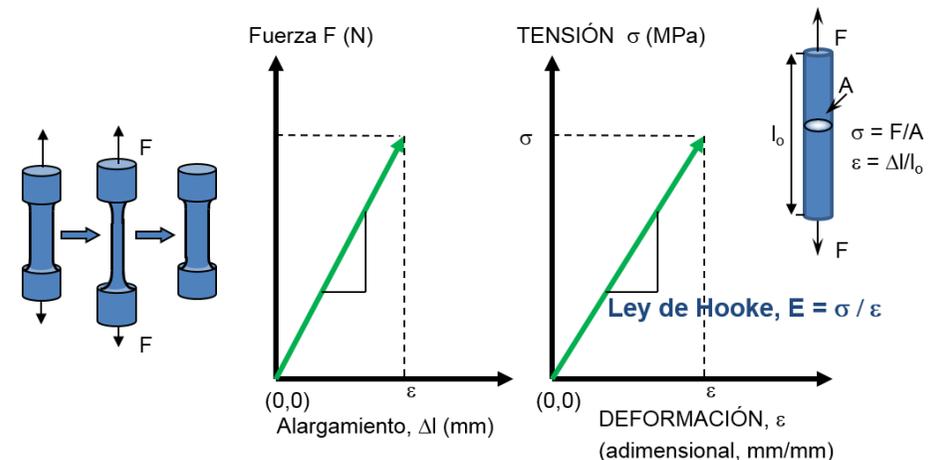


Figura 6.8: La zona elástica y la ley de Hooke. (Autoría, ver últimas páginas)

6.3 COMPORTAMIENTO TENSIÓN-DEFORMACIÓN. LA ZONA ELÁSTICA

6.3.1 LA LEY DE HOOKE

La ley de Hooke indica que la relación entre la deformación producida y la tensión que la provoca es lineal. La pendiente de la recta tensión/deformación se denomina **Módulo de Young**, o módulo de elasticidad, E.

$$E = \sigma / \varepsilon$$

- ❑ E corresponde al valor de la pendiente de la recta Tensión versus deformación.
- ❑ El módulo de elasticidad mide la rigidez del material.
- ❑ Cuanto mayor es el módulo E más rígido es el material.
- ❑ Es decir, cuanto mayor es E menor es la deformación elástica bajo un nivel de carga dado.
- ❑ Cuando al aplicar un esfuerzo la deformación aumenta de manera lineal con la carga aplicada, y al reducirse dicha carga hasta cesar la deformación sigue el mismo camino hasta desaparecer, se dice que el material es **lineal elástico**, o que tiene un comportamiento lineal elástico en el rango de carga aplicado

E es una propiedad intrínseca del material, que depende de la energía del enlace entre los átomos. Cuanto mayor es la energía de enlace, y más localizado es, más rígido es el material. Los enlaces covalentes y los iónicos son extremadamente rígidos, mientras que los enlaces metálicos son más flexibles.

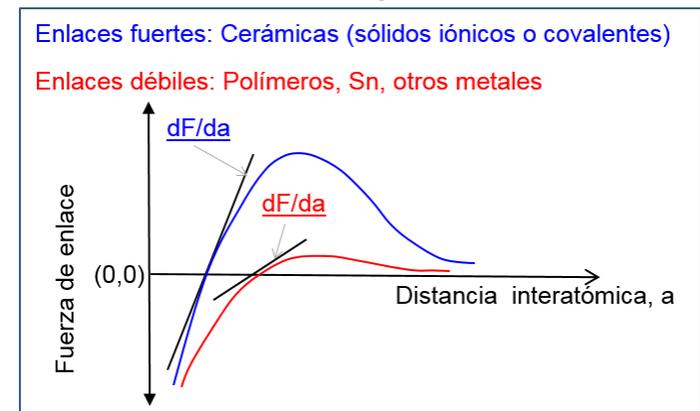
La figura 6.9 ejemplifica este punto. A nivel microestructural, la deformación elástica significa que el enlace entre los átomos se encuentra tensionado, los átomos se separan “un poco unos de otros” respecto de su estado de equilibrio, pero sin romper los enlaces. El módulo E es la pendiente de la curva Fuerza

versus Distancia interatómica en el punto en que la fuerza es cero, es decir donde se produce el enlace entre los átomos.

Muchos materiales son anisótropos, tienen distinto módulo de elasticidad en distintas direcciones. Entre ellos cabe destacar los composites de fibras.

La cantidad de deformación elástica que puede soportar un metal, una cerámica, y la mayoría de polímeros, es muy pequeña. Si el metal se deforma tanto que cuando se retira la fuerza ya no puede recuperar completamente sus dimensiones originales, se considera que ha sufrido una **deformación plástica**.

Figura 6.9: El módulo de Young y la fuerza de enlace atómico. (Autoría, ver últimas páginas)



6.3 COMPORTAMIENTO TENSIÓN-DEFORMACIÓN. LA ZONA ELÁSTICA

6.3.2 EL COEFICIENTE DE POISSON

Cuando un material (isótropo y lineal elástico) se estira elásticamente en la dirección de la fuerza, va unido a un estrechamiento en la dirección perpendicular a la misma: La relación entre lo que el material se contrae en dicha dirección y lo que se alarga en el eje de aplicación de la fuerza se denomina coeficiente de Poisson.

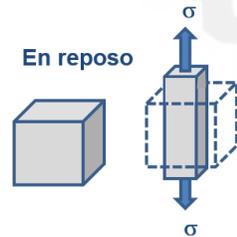


Figura 6.10: Contracción transversal bajo una tensión de tracción. (Autoría, ver últimas páginas)

Coefficiente de Poisson $\nu = -\varepsilon_x / \varepsilon_z = -\varepsilon_y / \varepsilon_z$

ν es adimensional. El coeficiente de Poisson de un sólido isótropo ideal es de 0,25.

Habitualmente los metales tienen coeficientes de Poisson entre 0,25 y 0,35

metales: $\nu \sim 0.33$

cerámicas: $\nu \sim 0.25$

polímeros: $\nu \sim 0.40$

Si $\nu > 0.50$ la densidad del sólido aumenta (está compactándose).

Si $\nu < 0.25$ la densidad del sólido se reduce (se forman huecos)

EL MÓDULO DE CORTADURA

Cuando un material lineal elástico está sometido a tensiones de cizalla la deformación que experimenta es angular. Se define un módulo de elasticidad denominado habitualmente "Módulo de cortadura" (tiene múltiples denominaciones) y designado por la letra **G**.

La figura 6.3 muestra un esquema de un elemento sólido sometido a cizalladura. De acuerdo a los símbolos indicados en dicha figura:

$$G = \frac{\tau}{\Theta} \quad \rightarrow \text{como } \Theta = \Delta x / l \rightarrow G = \tau * l / \Delta x$$

Para un material isótropo y lineal elástico, el módulo de cortadura está relacionado con el módulo de Young y el coeficiente de Poisson mediante la relación:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \rightarrow G = \tau / 2 \tan \Theta$$

¿Qué materiales se comportan de acuerdo a la ley de Hooke?

¿Un material dado, siempre se comporta igual?:

→ Muchos materiales presentan comportamiento lineal elástico cuando son sometidos a **cargas relativamente pequeñas**.

→ Muchos materiales presentan comportamiento lineal elástico cuando la **temperatura es baja, independientemente del nivel de carga**.

→ Generalizando. Se puede decir que corresponden a un comportamiento lineal elástico los siguientes casos:

- **los metales** a temperatura ambiente sometidos a cargas bajas,
- **los plásticos** a bajas temperaturas y cualquier carga,
- **las cerámicas** a cualquier temperatura y carga.

6.3 COMPORTAMIENTO TENSIÓN-DEFORMACIÓN. LA ZONA ELÁSTICA

6.3.3 MATERIALES ELÁSTICOS NO-LINEALES

Hay materiales que su rango elástico no es lineal. Incluso entre los metales y las cerámicas hay sólidos no lineales: Fundición gris, hormigón. En estos casos, en ocasiones se opta por determinar el:

Módulo secante (0,5% deformación), o el Módulo tangente

La falta de una zona lineal al inicio de la aplicación de carga no significa que el material no se deforme

elásticamente, sino que la relación entre la deformación elástica y la tensión no son lineales.

Estos casos de sólidos elásticos no lineales generalmente se deben a que la deformación elástica depende de la velocidad de aplicación de la carga:

Para una misma tensión se deforman menos (son más rígidos) si la carga se aplica a gran velocidad (por ejemplo un impacto) que si la carga es aplicada lentamente. Es decir, su elasticidad **varía con la velocidad de aplicación de la fuerza**.

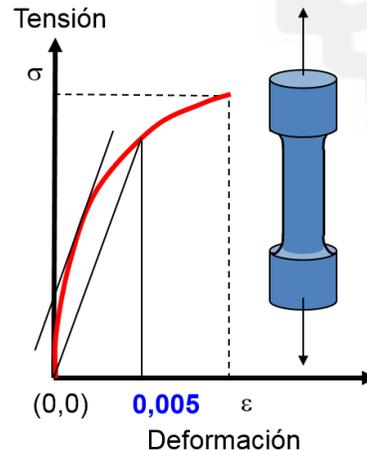


Figura 6.11: Determinación del módulo secante y el módulo tangente en sólidos elásticos no lineales. (Autoría, ver últimas páginas)

Los ensayos de tracción se realizan en máquinas que son relativamente sencillas, habitualmente a velocidad cte. desplazamiento de cruceta.

Ello implica que la velocidad de aplicación de la carga varía continuamente, por lo cual no se puede obtener una línea recta en la gráfica tensión/deformación. Si estos ensayos se realizan a velocidad de deformación constante, el resultado es una zona lineal elástica. Corresponden a este tipo de materiales las fundiciones de hierro y el hormigón.

En el caso de las fundiciones de hierro, con el fin de determinar un módulo que sea útil a nivel industrial, para propósitos de diseño, y que no requiera de maquinaria costosa, habitualmente se determina en estos casos los denominados módulo secante y módulo tangente.

El módulo secante es la pendiente de la recta secante a la curva en el punto en que la deformación $e = 0,005$. No obstante, es habitual pactar con el cliente del producto fundido el nivel de deformación en el que realizar el cálculo de la secante. Igualmente se puede calcular el módulo tangente.

MÓDULO DE ELASTICIDAD

Cerámicas	E ↑↑↑	E Metales: 45-400 GPa
Metales	E ↑↑	Aleaciones de Mg 45 GPa
Polímeros	E ↑	Aleaciones de W 400 GPa

6.4 COMPORTAMIENTO TENSIÓN-DEFORMACIÓN. LA ZONA PLÁSTICA

6.4.1 DEFORMACIÓN PLÁSTICA Y RECUPERACIÓN ELÁSTICA

Cuando se somete a la probeta a un esfuerzo creciente, una vez sobrepasada la zona elástica, si el material tiene capacidad de deformarse plásticamente (metales), la deformación plástica tendrá lugar. La figura 6.12 esquematiza este proceso. La zona de la dcha. esquematiza el estado de la red cristalina, mientras que la de la izda. muestra el gráfico que se recogería en el proceso tensión-deformación.

Cuando el sólido es sometido a un nivel de tensión en la zona elástica (color azul en ambas zonas de la figura) los enlaces entre los átomos se alargan. Si el nivel de tensión supera el máximo admisible por los enlaces, y se trata de un material dúctil, la deformación plástica tiene lugar (color rojo en la imagen). En esta zona tiene lugar el deslizamiento de las dislocaciones. Pero, ¡jojo!, la deformación elástica sigue teniendo lugar en esta zona.

Si se retira la carga antes de la rotura, el material quedará deformado de manera permanente (color verde en la imagen). A la deformación permanente se le denomina deformación plástica.

El material descargado tendrá una recuperación de la deformación elástica. Esta deformación elástica no corresponde únicamente a bajas cargas (zona azul de la imagen), sino que el material sigue experimentando deformación elástica mientras

se deforma plásticamente (zona roja de la imagen). Toda esa deformación elástica se recupera tras retirar la carga. Se denomina RECUPERACIÓN ELÁSTICA (señalada en color naranja).

La recuperación elástica que el material tendrá puede calcularse trazando una recta desde el punto último de carga hacia abajo, paralela a la zona elástica inicial de la probeta. Donde esta recta corta el eje X (Deformación) se determina el grado de deformación plástica que el material ha alcanzado, tal como se aprecia en la figura adjunta. La recuperación elástica irá desde la deformación plástica hasta la deformación que el material tenía en el último punto de carga.

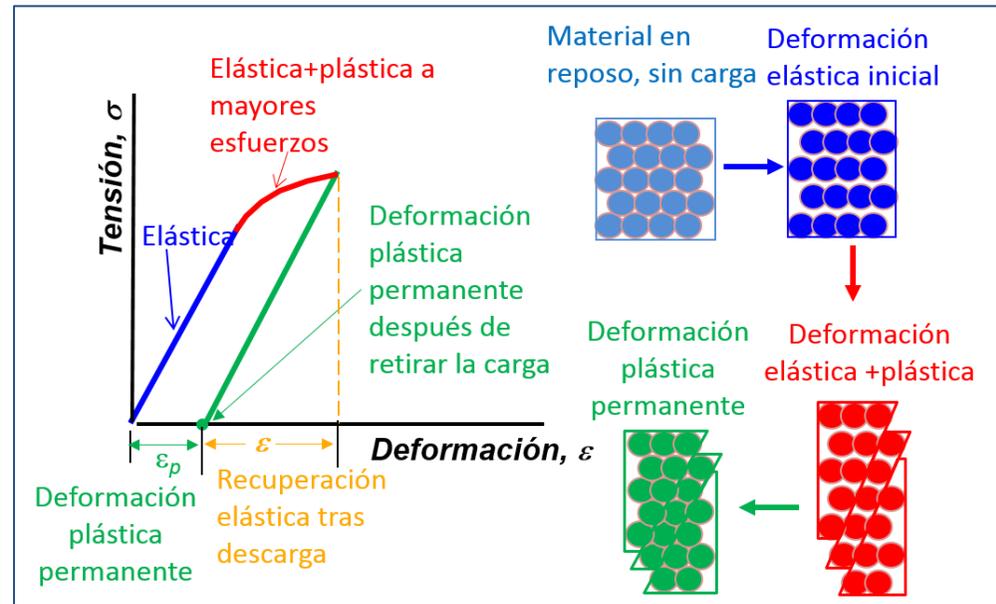


Figura 6.12: La deformación plástica. (Autoría, ver últimas páginas)

6.4 COMPORTAMIENTO TENSIÓN-DEFORMACIÓN. LA ZONA PLÁSTICA

6.4.2 DUCTILIDAD

La propiedad que tienen algunos metales de ser deformados plásticamente de modo muy extenso, sin que se fracturen, se denomina **ductilidad**. La ductilidad es una de las propiedades más útiles en ingeniería. Por ejemplo, la gran ductilidad del acero permite fabricar parachoques, capós y puertas de automóvil sin que se fracture el metal.

6.4.3 EL LÍMITE ELÁSTICO, σ_y :

La mayoría de las estructuras y componentes se diseñan para que trabajen en la zona elástica, sin llegar nunca a sufrir deformaciones plásticas..... ¿Donde empieza a ocurrir la deformación plástica?

Límite proporcional, P: Allí donde la recta acaba y comienza la curvatura (ver figura 6.13, izda). **P** es muy difícil de determinar con exactitud, por lo cual no se utiliza en ingeniería.

El Límite Elástico se define por convención (por acuerdo). Es aquel punto en el que el material ha sufrido una deformación plástica permanente del 0,2%.

El límite elástico se determina trazando una recta paralela a la zona elástica que corte el eje x en $\varepsilon = 0,002$ (= 0,2% de deformación). El punto de corte con la curva tensión-deformación es el límite elástico del material.

Si el material no es lineal elástico se determina que **el límite elástico** es aquel donde la deformación es $\varepsilon = 0,005$ (0,5%), tal como se muestra en la figura 6.13.

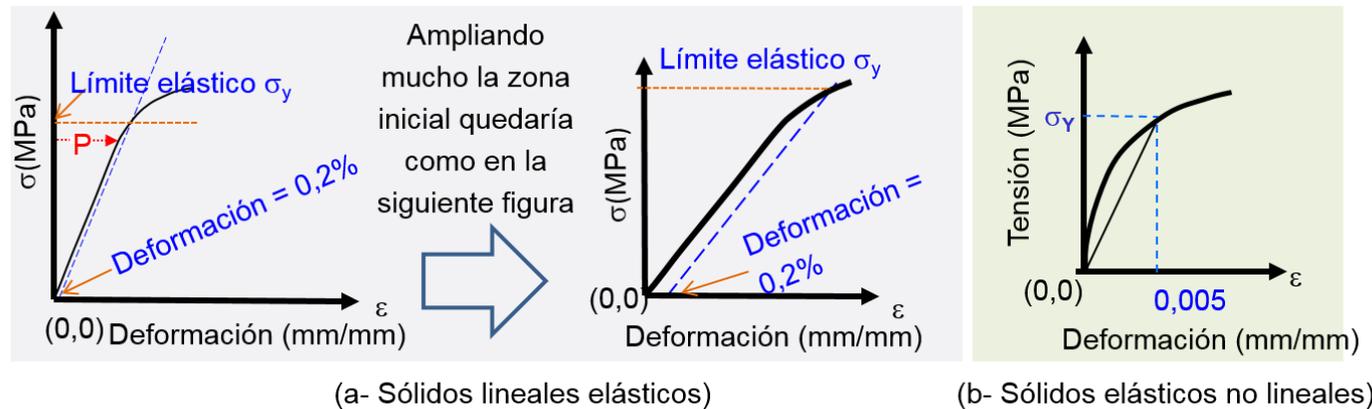


Figura 6.13: Determinación del límite elástico. (Autoría, ver últimas páginas)

6.4 COMPORTAMIENTO TENSIÓN-DEFORMACIÓN. LA ZONA PLÁSTICA

- ◆ *En la mayoría de los metales la deformación elástica no supera el 0,5% ($e = 0,005$).*
- ◆ *El final real de la zona elástica es el límite proporcional, difícil de determinar*
- ◆ *El límite elástico es un parámetro definido por convención que se acepta como final de la zona elástica a efectos de diseño de componentes y estructuras.*
- ◆ *La deformación plástica no es lineal sino gradual, es decir aumenta mas rápidamente cuando aumenta la carga.*
- ◆ *A nivel atómico la deformación plástica significa que los enlaces se rompen y se forman otros nuevos, todo **ello a través del movimiento de las dislocaciones.***
- ◆ *A nivel cristalográfico la deformación plástica significa que **las dislocaciones se deslizan sobre los planos de deslizamiento***

LA RESISTENCIA A TRACCIÓN = RESISTENCIA A ROTURA

La resistencia a tracción de un material es el punto mas alto de la curva Tensión-Deformación.

Es el máximo esfuerzo que el material es capaz de soportar.

Si se aplica y se mantiene esta tensión en un componente, éste se fracturará.

Hasta llegar a la resistencia a tracción la deformación en toda la zona de ensayo es uniforme. A partir de ese punto se inicia una disminución localizada de una sección del volumen sometido a ensayo. Se le denomina estricción.

A partir de la formación de la estricción, toda la deformación queda confinada en esa sección. La fractura ocurre en la estricción.

La probeta, una vez fracturada, se encuentra deformada plásticamente. Pero la deformación elástica que ha soportado a lo largo de todo el ensayo se recupera: recuperación elástica.

6.4 COMPORTAMIENTO TENSIÓN-DEFORMACIÓN. LA ZONA PLÁSTICA

LA RESISTENCIA A TRACCIÓN = RESISTENCIA A ROTURA

La resistencia a tracción de un material es el punto más alto de la curva Tensión-Deformación.

La figura 6.14 muestra una gráfica tensión-deformación, mostrando el aspecto físico de la probeta correspondiente a distintos puntos de la gráfica.

Se muestra la estricción tras alcanzar el punto máximo de la curva.

A partir de la formación de la estricción, toda la deformación queda confinada en esa sección → Se observa cómo la fractura ocurre en la estricción.

La tensión última, o resistencia última, es aquella en la cual acaba fracturándose el material. No se emplea en diseño.

La probeta, una vez fracturada, se encuentra deformada plásticamente, tal como se puede ver en las imágenes. La deformación elástica que ha soportado a lo largo de todo el ensayo se recupera: recuperación elástica (fig. 6.15). La deformación plástica y la recuperación elástica se calculan como se ha explicado en páginas precedentes.

La figura 6.16 (página siguiente) presenta capturas de imagen del ensayo en sucesivos momentos, desde el inicio hasta la fractura.



Figura 6.14: Curva Tensión-deformación de un material metálico, mostrando el aspecto físico de la probeta en distintas etapas el ensayo. (Autoría, ver últimas páginas)

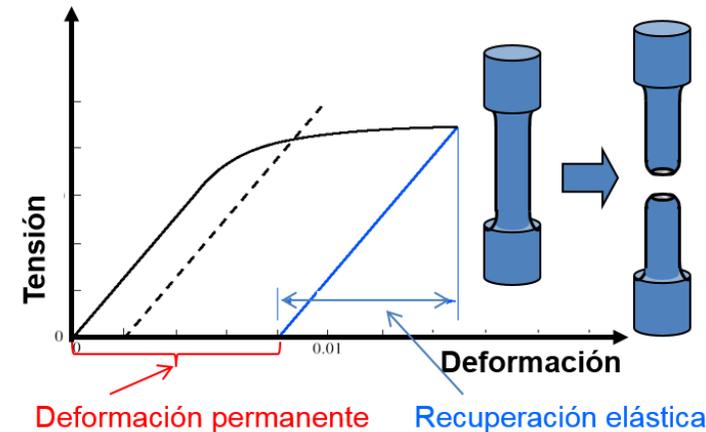


Figura 6.15: Recuperación elástica tras la fractura. (Autoría, ver últimas páginas)

6.4 COMPORTAMIENTO TENSIÓN-DEFORMACIÓN. LA ZONA PLÁSTICA

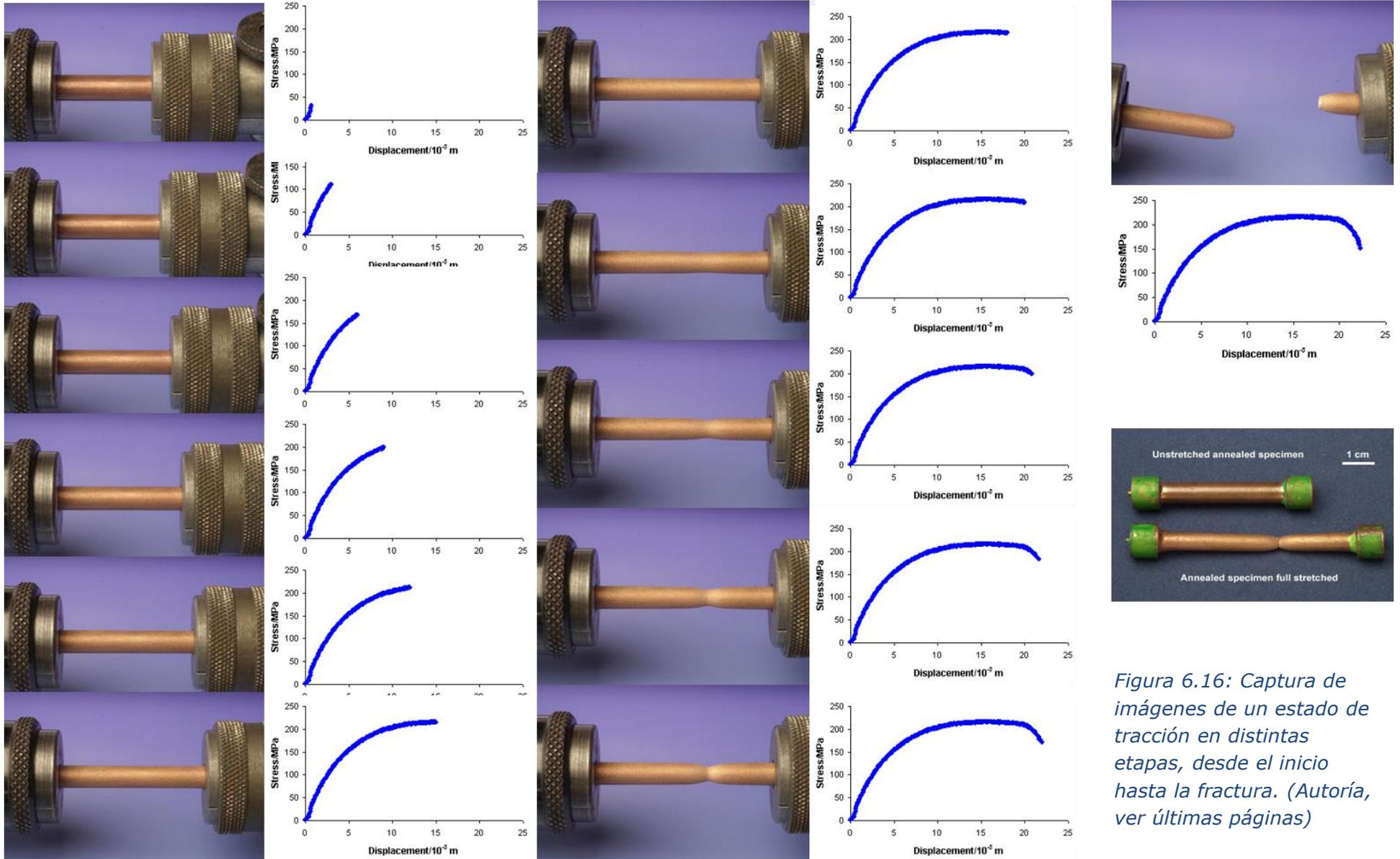


Figura 6.16: Captura de imágenes de un estado de tracción en distintas etapas, desde el inicio hasta la fractura. (Autoría, ver últimas páginas)

6.4 COMPORTAMIENTO TENSIÓN-DEFORMACIÓN. LA ZONA PLÁSTICA

6.4 TENSIÓN Y DEFORMACIÓN REALES

Los datos que da la máquina de ensayo parecen indicar que la resistencia del material disminuye tras llegar a la **RESISTENCIA A TRACCIÓN**. **NO ES ASÍ**. La resistencia a tracción y la deformación medidas en la máquina se denominan “ingenieriles”:

Resistencia a tracción ingenieril

Deformación ingenieril

La gráfica que da la máquina se llama **Ingenieril**, y no es la real. La máquina calcula el esfuerzo midiendo la carga y dividiéndola por la sección inicial de la probeta. Sin embargo, tras σ_t la sección disminuye mucho, incluso hasta un 50%, y en realidad la resistencia del material es superior en esa zona, pero la máquina no es capaz de saberlo porque no mide la sección en cada momento del ensayo. Tras el ensayo de tracción se puede calcular la gráfica que muestre tensión real versus deformación real. Para ello se puede medir la estricción en la probeta fracturada y calcular la tensión real en la fractura.

- Los datos tabulados en manuales y tablas de diseño y cálculo son ingenieriles.
- Las normas de diseño de componentes se basan en el uso de datos ingenieriles, no reales.
- Las normas de ensayo de los materiales suelen estar enfocadas a la obtención y cálculo de los parámetros ingenieriles, no de los reales.

Curva A: Tensión/Deformación Ingenieril (F / A_0)

Curva B: Tensión/Deformación reales (F / A)

Las dos curvas son idénticas hasta el límite elástico

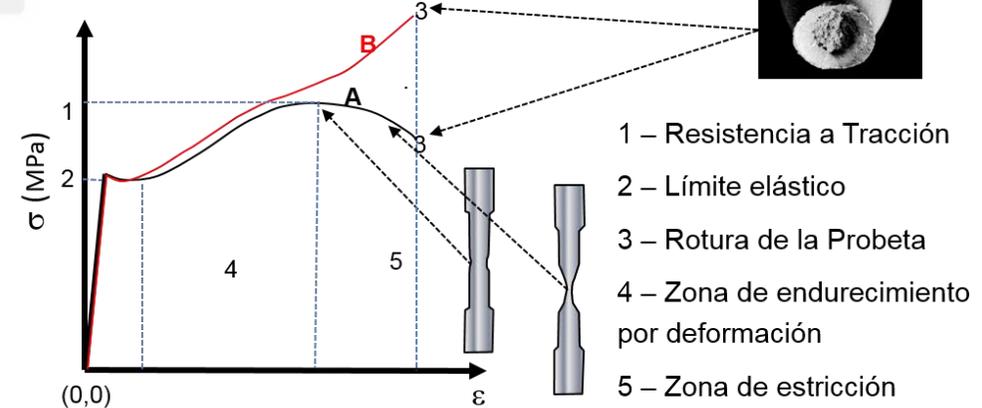
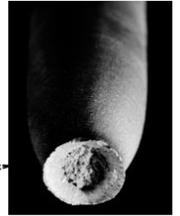


Figura 6.17: Gráfica Tensión-deformación ingenieril (curva negra) y real (curva roja) para la misma probeta metálica. (Autoría, ver últimas páginas)

IMPORTANTE:

Cuando se emplean los términos “resistencia a tracción”, “resistencia a rotura”, “resistencia última” (Ultimate tensile strength, UTS) siempre se refiere a la resistencia máxima registrada en la curva ingenieril: La resistencia a tracción de un material no es un parámetro de diseño, sino de seguridad. Los componentes se diseñan para que no se supere el límite elástico (deformación permanente). Por añadidura, la resistencia a tracción ingenieril siempre ofrecerá un valor igual o inferior al real, por lo cual su uso en ingeniería como parámetro de seguridad es útil y válido.



6.5.- CÁLCULO DE LA DUCTILIDAD Y EL MÓDULO DE RESILIENCIA

DUCTILIDAD

Es la deformación que un material es capaz de soportar hasta su fractura. La ductilidad se mide en porcentaje de reducción del área, o bien en porcentaje de alargamiento, obtenidos tras la rotura. Por tanto, hay dos modos de medir la ductilidad:

$$\begin{aligned} \% \text{ Elongación} & & \% \text{ reducción de área} \\ \% \text{ El.} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 & & \% \text{ RA} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \end{aligned}$$

De ambos modos, el primero es el más habitual. La ductilidad indica el grado máximo de deformación que un material será capaz de soportar en el conformado (forja, extrusión, laminación, etc.) sin romperse. Es decir, está relacionado con las operaciones que deberemos programar para fabricar un componente mediante procesos de deformación.

El área bajo la curva tensión-deformación es la energía que el material consume para deformarse elástica y plásticamente y para fracturarse (Energía = $\int F \cdot dx$ en todo el proceso). Los materiales dúctiles consumen gran cantidad de energía hasta la fractura mientras que los materiales frágiles consumen poca (figura 6.18).

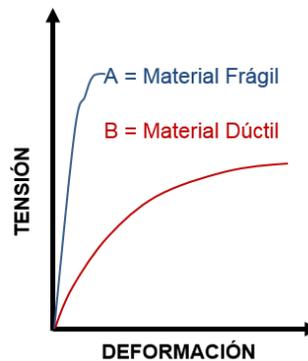
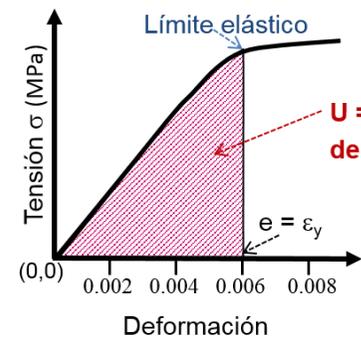


Figura 6.18: Materiales dúctiles y materiales frágiles. (Autoría, ver últimas páginas)

En industria, se denominan frágiles los materiales cuya ductilidad (deformación tras rotura) es inferior al 5%.

MÓDULO DE RESILIENCIA

Es la capacidad de un material de almacenar energía **elástica** cuando es deformado y cederla al cesar el trabajo. El **módulo de resiliencia** es la máxima energía de deformación por unidad de volumen que un material es capaz de absorber en el régimen elástico. Se calcula mediante el área bajo la curva tensión/deformación en la zona que llega hasta el límite elástico.



ENERGÍA ELÁSTICA ALMACENADA POR UNIDAD DE VOLUMEN

$$U_r = \int_0^e \sigma \cdot d\epsilon$$

Si el sólido es lineal elástico:

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

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \cdot (\sigma_y / E) = \sigma_y^2 / 2E$$

$$\text{Módulo de Resiliencia, } U_r = \sigma_y^2 / 2E$$

$$\text{Unidades de } U_r = J / m^3 = (Pa \cdot m) / m^3$$

Materiales resilientes



MUELLES

$$\sigma_y \uparrow \uparrow \uparrow \text{ y } E \downarrow \downarrow \downarrow$$

6.6 COMPORTAMIENTO TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE DIVERSOS MATERIALES

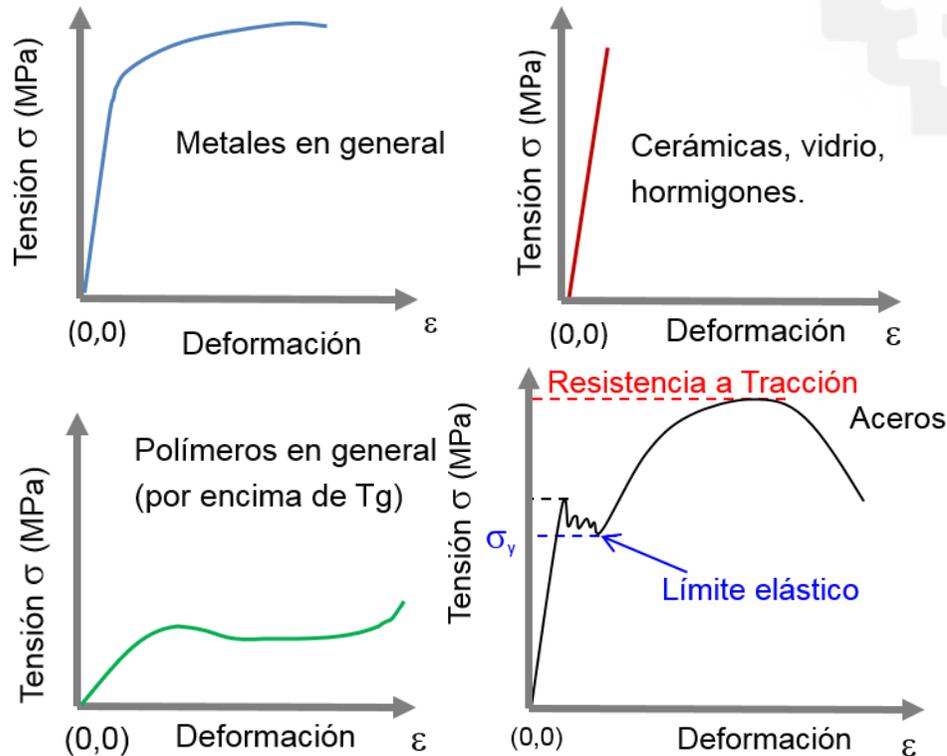


Figura 6.20: Comportamiento tensión-deformación de distintos tipos de materiales. (Autoría, ver últimas páginas)

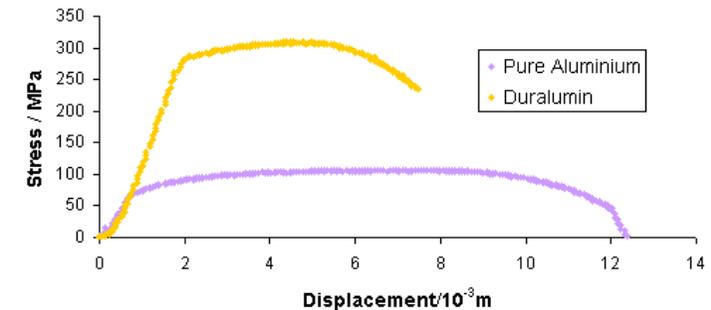
LA CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN HABITUAL EN ACEROS

Muchos aceros presentan el comportamiento de la figura 6.19. En estos casos no se calcula el límite elástico al 0,2%, sino que se acepta como parámetro de diseño el límite elástico inferior. Este límite elástico es un parámetro de seguridad, ya que es netamente inferior al punto en que se inicia la deformación plástica

Los cuatro casos genéricos mostrados en la figura 6.20 son simplemente indicativos de una generalidad de materiales. No obstante, dentro de cada familia hay grandes diferencias, como por ejemplo entre los distintos tipos de metales, de cerámicas y de polímeros. Incluso dentro de las aleaciones de un metal base existen grandes diferencias

Por ejemplo, la figura 6.21, que recoge los datos provenientes de dos ensayos de aleaciones de aluminio, un aluminio prácticamente puro, y una aleación del tipo denominado duraluminio (Al con un porcentaje controlado, inferior al 10%, de Cu, Mg, Si y Mn).

Graph showing stress against displacement for aluminium and duralumin samples in tensile tests



Aluminio puro: El Aluminio puro es muy dúctil pero de una limitada resistencia mecánica

Duraluminio: es una Aleación de Aluminio de alta resistencia mecánica y limitada ductilidad

Figura 6.21: Comportamiento tensión-deformación de dos aleaciones de aluminio junto con las imágenes de las superficies de fractura de las probetas ensayadas. (Autoría, ver últimas páginas)

6.7 LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN Y DE FLEXIÓN

EL ENSAYO DE COMPRESIÓN

Los metales muestran el mismo comportamiento a tracción y a compresión, por ello habitualmente no se miden propiedades de compresión. Los materiales frágiles, por el contrario, presentan excelentes propiedades a compresión, y muy pobres propiedades a tracción, tal como muestra la figura 6.22. Más adelante se estudiará la causa. Ese ensayo, por tanto es habitual en materiales cerámicos, especialmente en hormigones. La figura 6.23 muestra un ensayo de este tipo, donde se aprecia la forma y dimensiones de la probeta, y el uso de dos extensómetros para determinar su deformación (este último aspecto no es habitual en este tipo de ensayos). En este tipo de ensayos es crítico el alineamiento de platos y probeta y lubricar el contacto entre ambos para evitar tensiones de fricción.

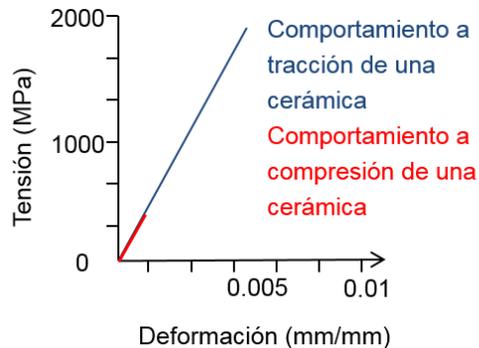


Figura 6.22: Comportamiento tensión-deformación de un material cerámico sometido a tracción y a compresión. (Autoría, ver últimas páginas)



Figura 6.23: Ensayo de compresión de hormigón (Autoría, ver últimas páginas)

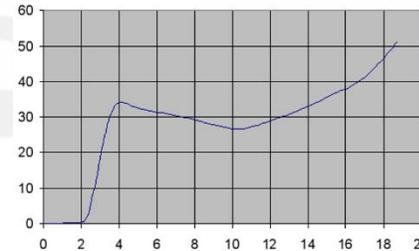


Figura 6.24: Ensayo de compresión de metales (Autoría, ver últimas páginas)

El típico abarrilamiento que se observa en probetas metálicas sometidas a compresión se debe a la fricción entre la probeta y los platos. Cuando el contacto está bien lubricado las probetas se comportan como se aprecia en la figura 6.24.

6.7 LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN Y DE FLEXIÓN

EL ENSAYO DE FLEXIÓN

El comportamiento y las propiedades a tracción de los materiales frágiles se determinan mediante el ensayo de flexión, esquematizado en la figura 6.25, izda. Hay dos opciones de realización, “flexión 3 puntos” y “flexión 4 puntos”. Mediante este ensayo se determina un parámetro denominado Resistencia a flexión ó **MoR** (Modulus of Rupture), el cual es un modo indirecto de medir la resistencia a tracción del material: La distribución de tensiones dentro de la probeta no es uniforme, como en un ensayo de tracción, sino que va cambiando de intensidad y signo gradualmente desde la superficie superior a la inferior, pasando por una línea neutra en el centro, tal como se indica en la figura 6.25, derecha. La superficie superior se encuentra sometida a compresión, mientras la superficie inferior se encuentra sometida a tracción.

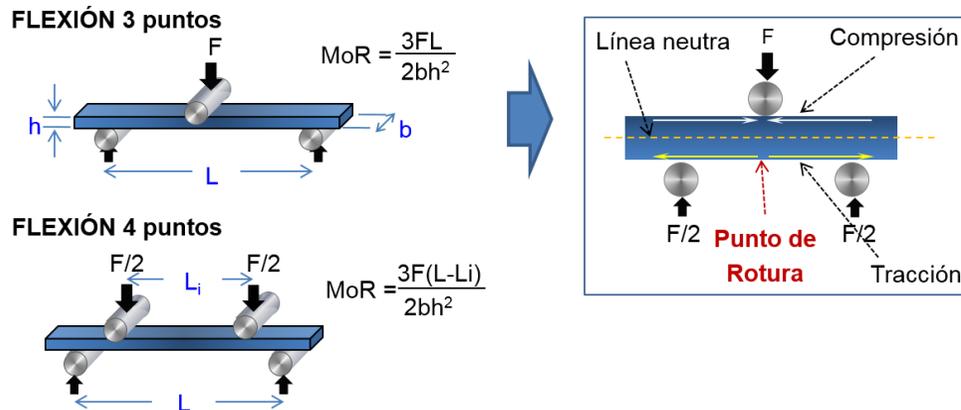


Figura 6.25: El ensayo de flexión para determinación de la resistencia a tracción en materiales frágiles. (Autoría, ver últimas páginas)

En un ensayo de flexión en tres puntos, la fuerza aplicada F , se traduce en un esfuerzo tractor en la línea central de la superficie inferior de la probeta, mientras que la misma línea en la superficie superior se encuentra sometida a compresión.

En el ensayo de flexión en 4 puntos es la superficie inferior de la probeta, situada entre los dos apoyos de carga, la que se encuentra sometida a al máximo nivel de tensión a tracción. Este ensayo es, por tanto, más representativo del material ya que se somete a una zona grande al máximo esfuerzo, mientras que en 3 puntos es una zona muy pequeña la que soporta el nivel de tensión máximo. Es más difícil de realizar correctamente que el ensayo en tres puntos.

En ambos ensayos se debe garantizar una ejecución muy cuidada respecto del apoyo de los cilindros de carga sobre la probeta, así como de su alineamiento. No son sencillos de realizar cuando se trata de probetas de pequeñas dimensiones, pero son más sencillo de llevar a cabo correctamente cuando se trata de vigas o grandes componentes (Figura 6.26).

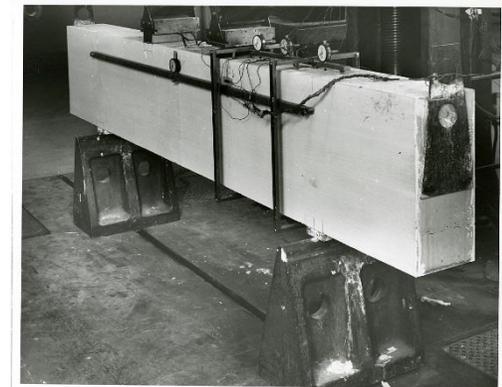


Figura 6.26: Ensayo de flexión de una viga. (Autoría, ver últimas páginas)

6.8 LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LOS METALES

La deformación plástica tiene lugar por “deslizamiento de las dislocaciones”. Los átomos en una dislocación son capaces de romper enlaces y formar nuevos enlaces con átomos vecinos situados en una dirección compacta, dentro de un plano compacto. Para que ese movimiento se produzca se debe aplicar **una tensión de cizalla** en dicho plano, denominado plano de deslizamiento, y en dicha dirección, dirección de deslizamiento. La figura 6.27 ejemplifica la situación para una dislocación de cuña.

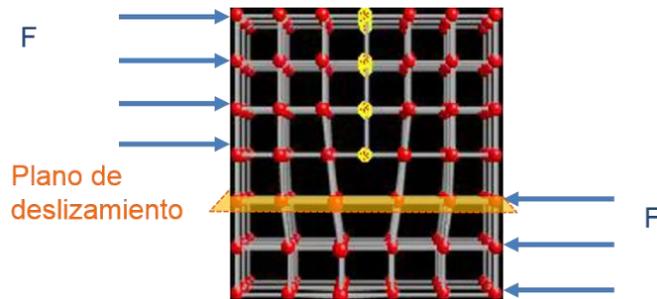


Figura 6.27: dislocación de cuña sometida a una tensión de cizalla en el plano de deslizamiento. (Autoría, ver últimas páginas)

Para estudiar el proceso se simplifica la situación definiendo un **monocristal** metálico como el de la figura 6.28. Se aplica una fuerza **F** de tracción longitudinalmente, mediante la cual el monocristal se deforma plásticamente. Ello indica que 1) está ocurriendo un deslizamiento de dislocaciones → 2) hay planos y direcciones compactas a través de los cuales los átomos pueden “deslizarse” → 3) el deslizamiento es el efecto de la componente de cizalla (**F_c**) de la fuerza aplicada, F, en una dirección compacta dentro de un plano compacto (Figura 6.27).

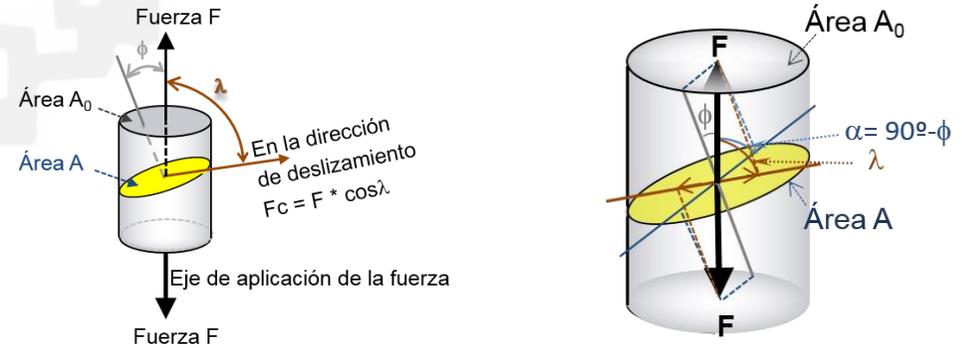


Figura 6.28: Direcciones de deslizamiento en un monocristal sometido a una fuerza de tracción F. (Autoría, ver últimas páginas)

La fuerza F, aplicada al monocristal, es de tracción. Respecto de una dirección cualquiera situada en un plano dentro del monocristal se puede calcular la componente de la fuerza en dicha dirección. Las componentes dentro del plano producen tensiones de cizalla en los enlaces de los átomos contenidos en dicho plano → **F_c = F * cos λ**, donde λ es el ángulo formado entre la dirección de la fuerza y **la dirección de deslizamiento** (flechas marrones en la imagen de la figura 6.27 izda.).

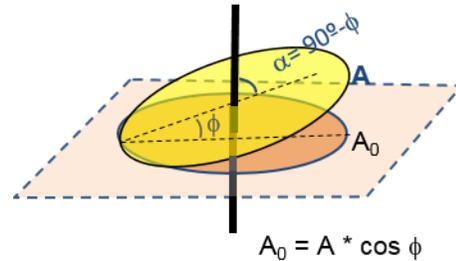
La tensión de cizalla será, por tanto, **F_c** dividida por el área de aplicación. El área de aplicación es el **plano de deslizamiento, A**, que contiene a la dirección de deslizamiento → **$\tau = F_c / A$**

Cuando esta tensión de cizalla alcanza el valor suficiente para romper los enlaces entre los átomos del plano compacto y así mover dislocaciones, se ha alcanzado la tensión crítica de cizalla, **τ_c**, y la deformación plástica comienza.

6.8 LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LOS METALES

El **plano A** (la normal al plano) formará con la fuerza aplicada, F , un ángulo ϕ , que en principio $\rightarrow \phi \neq 90 - \lambda$ tal como se puede apreciar en la figura 6.28, dcha. La superficie A de este plano se puede calcular geoméricamente tal como se muestra en la figura 6.29:

Plano de Cizalla = Área A



Por lo tanto, para una fuerza nominal de tracción F , aplicada sobre una probeta monocristalina de superficie transversal A_0 la tensión de cizalla en una dirección de deslizamiento tendrá el siguiente valor:

Figura 6.29: Superficie de proyección de una figura en un plano con el que forma un ángulo ϕ (Autoría, ver últimas páginas)

$$\tau = F * \cos \lambda / A = F * \cos \phi * \cos \lambda / A_0$$

Dado que la tensión nominal de tracción aplicada al monocristal es $\sigma = F / A_0 \rightarrow$ reordenando la ecuación anterior queda que:

$$\tau = \sigma * \cos \lambda * \cos \phi$$

A esta ecuación se le conoce como Ley de Schmid. A la relación $\cos \lambda * \cos \phi$ se le denomina Factor de Schmid. Para una tensión nominal, σ , aplicada sobre un metal, la deformación plástica comienza cuando la tensión de cizalla en una dirección de deslizamiento alcanza un valor crítico, τ_c , suficiente para que los átomos puedan deslizarse.

El producto máximo de $\cos \lambda * \cos \phi$ se da cuando $\lambda = \phi = 45^\circ$, $\cos \lambda * \cos \phi = 1/2$

Dado que $\tau_c = \sigma * (\cos \lambda * \cos \phi) \rightarrow$ para una fuerza de tracción (o de compresión) dada, la tensión de cizalla máxima siempre se da en direcciones a 45° con dicha fuerza, contenidas en planos que también forman 45° con la fuerza. En dichas direcciones la tensión de cizalla $\tau = 0,5 \sigma$. Por tanto, si en el monocristal que se ha tomado como ejemplo existiesen numerosas dislocaciones, numerosos planos compactos y numerosas direcciones compactas, unos y otras formando diversos ángulos respecto de la fuerza aplicada, el deslizamiento de las dislocaciones siempre comenzará en las direcciones compactas que forman 45° con la dirección de la fuerza aplicada y están situadas en planos que forman también 45° con dicha fuerza.

Por el contrario, si λ ó ϕ se acercan a 90° , la tensión de cizalladura se acerca a cero ($\cos 90^\circ = 0$), lo cual significa que no existirá ningún deslizamiento. Si todos los planos de deslizamiento del monocristal se encontrasen situados en el plano perpendicular o en el paralelo a la tensión, el material no se deformaría, sino que una vez que alcanzase la máxima tensión que fuese capaz de soportar se fracturaría: sus enlaces se romperían.

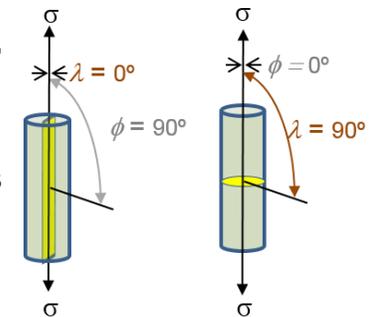


Figura 6.30: Ausencia de cizalla cuando λ ó ϕ son 90° (Autoría, ver últimas páginas)

6.9 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN

Continuando con el monocristal tomado como ejemplo en las páginas previas, en el cual habrá numerosas dislocaciones, planos y direcciones de deslizamiento, si se realizase un ensayo de tracción en el mismo no se obtendría una gráfica tensión/deformación como las incluidas en las páginas precedentes.

El comportamiento que presentaría es el que se muestra en la figura 6.31: Al aplicar la tensión el material se deforma elásticamente al inicio, hasta el límite elástico.

El esfuerzo nominal de tracción en el cual el material comienza a deformarse plásticamente es el **LÍMITE ELÁSTICO: σ_y**

σ_y corresponde a la tensión de cizalla crítica para deslizamiento que se alcanza en planos a $45^\circ \rightarrow \tau_c = \frac{1}{2} \sigma_y$.

Al alcanzar dicha tensión el deslizamiento tendrá lugar en los sistemas de deslizamiento a $45^\circ/45^\circ$ (Etapa I).

Esto significa que cuando el material alcanza el límite elástico, todas las dislocaciones con posibilidad de deslizar en sistemas de deslizamiento situados a $45^\circ/45^\circ$ con la tensión se deslizarán hasta eliminarse o hasta encontrar un obstáculo que les impida continuar.

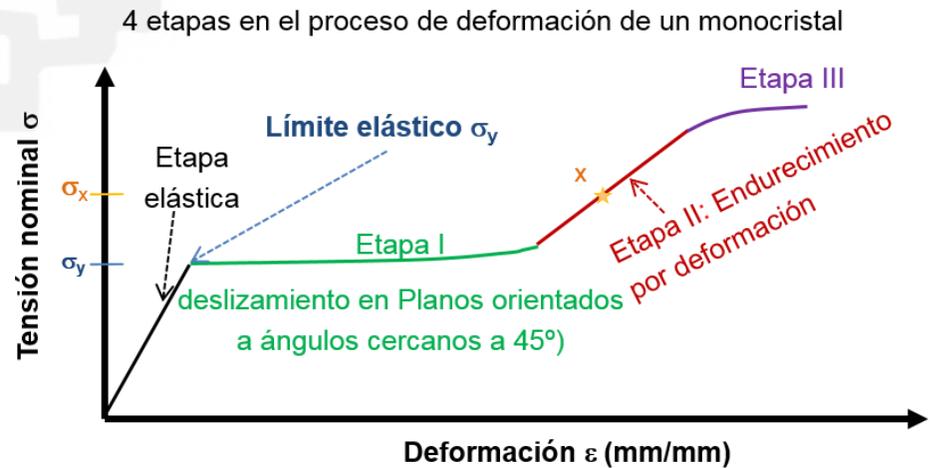


Figura 6.31: Etapas del ensayo de tracción de un monocristal (Autoría, ver últimas páginas)

Al continuar aumentando la tensión σ , se alcanza la tensión de cizalla crítica τ_c en sistemas de deslizamiento con ángulos distintos de $45^\circ/45^\circ$, por lo cual habrá gradualmente deslizamiento de las dislocaciones en ángulos distintos, cada vez más alejados de $45^\circ/45^\circ$.

Dado el gran número de dislocaciones que se movilizan en distintos planos y direcciones, acaban interfiriendo unas con otras, dificultando mutuamente su deslizamiento e impidiendo finalmente la deformación (Etapa II).

6.9 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN

Este fenómeno (“etapa II”) se conoce como **ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN**. Se debe al “apilamiento” de las dislocaciones.

Si el ensayo de tracción se parase en la mitad de esta etapa, por ejemplo en el punto marcado con una **x** en la figura 6.31, y se retirase la tensión de la probeta, al someterla a tensión nuevamente el material no recorrería la etapa I, sino que se habría endurecido en gran medida, y ahora su nuevo límite elástico sería σ_x y la deformación plástica posible quedará tremendamente reducida, ya que las dislocaciones están “apiladas” y no tienen posibilidad de moverse.

Finalmente, cuando la tensión sigue aumentando y ya no es posible producir más deformación plástica, el material se rompe.

El endurecimiento por deformación también tiene lugar en los metales y aleaciones policristalinos, aunque no se obtenga una gráfica como esta cuando se ensaya a tracción.

¿Porqué presentan distinta gráfica?



Los metales industriales son **POLICRISTALINOS**, con millones de granos por cm^3 .

Cada grano es un cristal con su orientación propia, diferente de la de los otros granos. Generalmente los granos están orientados al azar. Cada cristal tiene un ingente número de dislocaciones (los metales sin endurecer tienen entre 10^4 - 10^6 por mm^2).

Los granos que se encuentren orientados con planos de deslizamiento orientados a 45° se deformarán antes que los de otras orientaciones

Las juntas de grano bloquean el movimiento de las dislocaciones, las cuales en la mayoría de los casos no pueden continuar al siguiente grano.

La presencia de los granos adyacentes limita o incluso impide la deformación de los granos orientados con planos de deformación a 45° .



El resultado es una curva continua, como las mostradas en las páginas iniciales de este tema, en vez de la curva con claras y destacadas etapas I y II. Sin embargo, el límite elástico es el mismo en ambos casos.

6.9 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN

Cuando se aplica una tensión a un metal/aleación industrial (policristalina) sobrepasando su límite elástico de manera significativa, se produce una deformación permanente y el material se endurece. La figura 6.32 ejemplifica este proceso:

- (a) probeta metálica sometida a tensión hasta deformación permanente ε_1 .
- (b) La misma probeta, tras ser descargada, se somete a tracción nuevamente \rightarrow sigue la curva verde. Su nuevo límite elástico será la tensión a la cual se sometió en la experiencia previa. Su ductilidad ha disminuido.
- (c) Se repite el mismo proceso de descarga y carga \rightarrow sigue la curva roja.
- (d) Curva tensión-deformación hasta rotura del material original y del material endurecido por deformación, realizados experimentalmente con dos probetas de Cu puro.

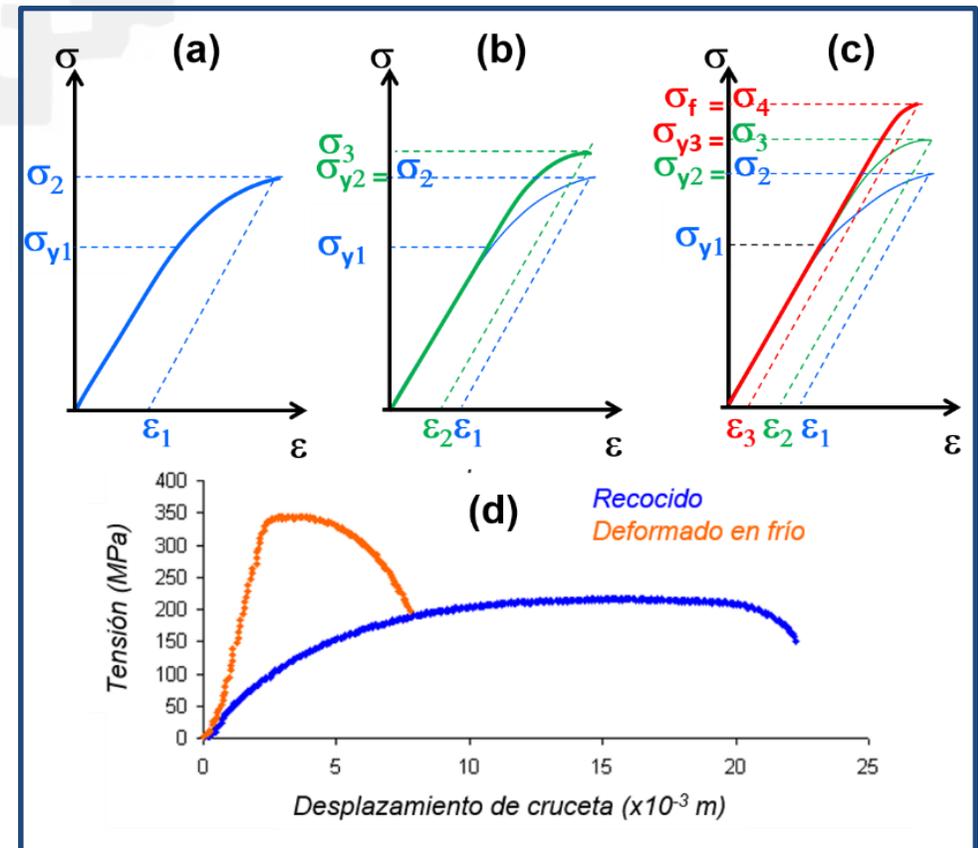


Figura 6.32: Endurecimiento por deformación de un metal (Autoría, ver últimas páginas):

6.9 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN

Resumiendo, cuando se deforma plásticamente un metal se deslizan dislocaciones. En este proceso, se producen también nuevas dislocaciones:

Se calcula que un metal muy deformado tiene 10^9 - 10^{10} dislocaciones /mm² frente a las 10^4 - 10^6 de un metal libre de tensiones.

El número de dislocaciones moviéndose es tan grande que acaban “chocando” unas con otras, y también con los límites de grano.

Al retirar la carga el material se encuentra internamente tensionado, y cuando se somete a carga nuevamente iniciará su deformación plástica en el punto en el que “se quedó” previamente.

El resultado es un material muy “endurecido”, que presenta mayor resistencia y límite elástico, pero menor ductilidad (capacidad de deformación plástica hasta rotura).

Este proceso de endurecimiento se conoce también como **TRABAJO EN FRÍO**, se mide en porcentaje de deformación y se emplea la notación **cw** para denotarlo (cw = cold work; por ejemplo, 60%cw = 60% deformación en frío)

En este proceso los granos se deforman siguiendo la dirección de la aplicación de tensión.

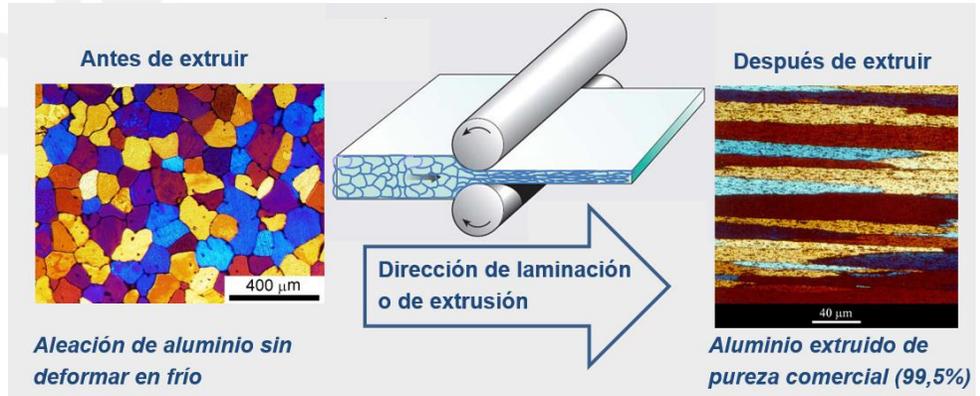


Figura 6.33: Microestructura original y microestructura producida por el proceso de extrusión en la dirección de aplicación de la tensión. (Autoría, ver últimas páginas)

Si inicialmente se partió de una microestructura con granos isométricos, estos se alargarán y achatarán. Los átomos en el interior se encontrarán tensionados, con una gran cantidad de energía acumulada como deformación plástica. Se denomina “**MICROESTRUCTURA AGRIA**”, o “**ACRITUD**”.

Son granos grandemente deformados, alargados y aplastados, como los que se ven en la figura 6.33, correspondiente a una aleación de aluminio que ha sido extruida.

- ✓ El precio a pagar por el aumento de la resistencia mediante el trabajo en frío es la disminución de la ductilidad
- ✓ La pérdida de ductilidad es debida a que, al aplicar la tensión, la densidad de las dislocaciones aumenta y por tanto interfieren entre ellas, dificultando la deformación.

6.9 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN

- ✓ El material se vuelve anisótropo, con distintas propiedades en distintas direcciones.
- ✓ La conductividad eléctrica y térmica de estas microestructuras son distintas de las del material original
- ✓ El endurecimiento por deformación que puede experimentar cada aleación es función de su estructura cristalina y su composición.

La curva tensión real-deformación real permite conocer el grado de capacidad de endurecimiento por deformación que tendrá una aleación dada manteniendo una buena ductilidad, ya que está relacionado con la pendiente de la misma en la zona plástica. En esta zona la relación tensión deformación reales es exponencial, siguiendo una ecuación del tipo: $\sigma = k * e^n$

Cuanto mayor es n mayor es la capacidad de la aleación para ser trabajada en frío sin romperse durante el proceso. Así, en la figura 6.34, la aleación (b) presentará mayor capacidad de trabajo en frío que la aleación (a).

En general, las aleaciones que cristalizan en el sistema HCP presentan bajos exponentes n , las que cristalizan BCC presentan exponentes n intermedios, y los mayores exponentes n los presentan aleaciones FCC. Las aleaciones FCC, por tanto, suelen ser tremendamente dúctiles, permitiendo su trabajo en frío sin romperse en el proceso.

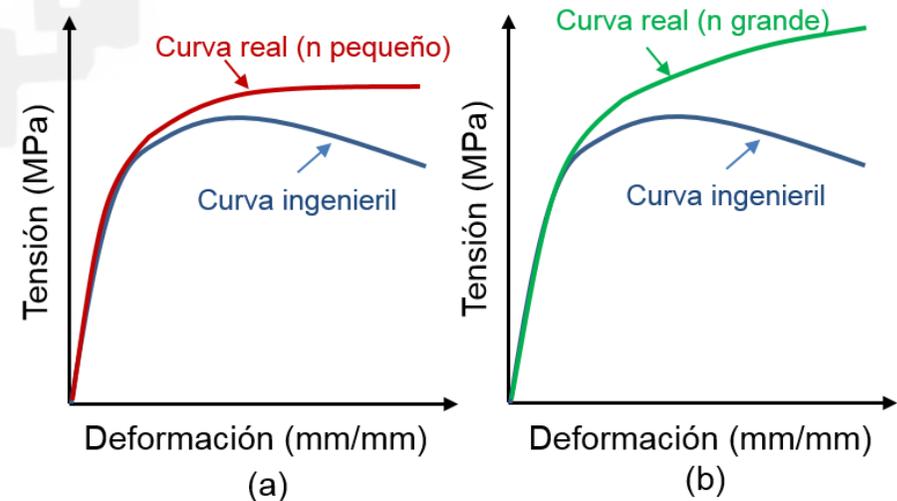


Figura 6.34: Curvas ingenieriles y reales de tensión versus deformación de dos aleaciones con distinto exponente n de endurecimiento por deformación. (Autoría, ver últimas páginas)

El grado de acritud que puede alcanzar una aleación se puede determinar experimentalmente mediante ensayos de tracción. Con ello se puede producir un gráfico que indique el endurecimiento y la pérdida de ductilidad versus el trabajo en frío, tal como muestra la figura 6.35. Se interpreta de la siguiente manera:

Como ejemplo se puede tomar una barra de la aleación de níquel correspondiente al gráfico, cuya sección original, libre de tensiones, era de 15,2 mm. Esta barra es extruida en frío hasta producir un diámetro de 12,2 mm. ¿Qué cambio de propiedades se ha producido en el material?

6.9 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN

La barra se ha deformado en frío hasta una sección de 12,2 mm.
Esto equivale a un 36% de trabajo en frío

$$CW = \frac{\pi \cdot (15,2/2)^2 - \pi \cdot (12,2/2)^2}{\pi \cdot (15,2/2)^2}$$

$$\%CW = 36\%$$

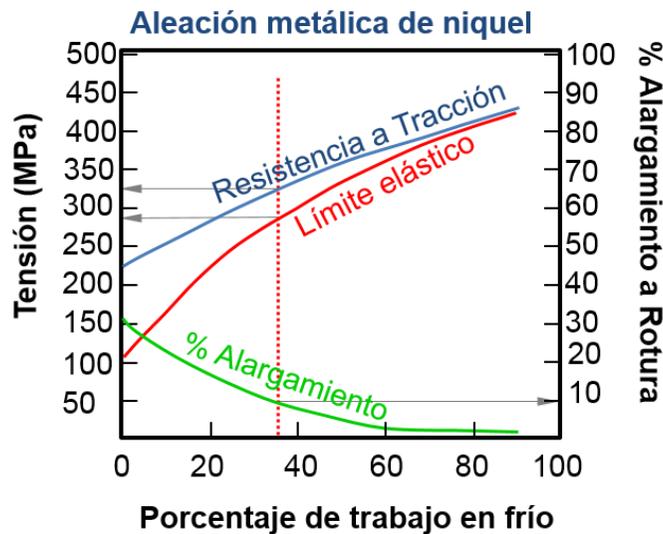


Figura 6.35: Variación de las propiedades de una aleación de níquel en función del trabajo en frío. Datos no reales. (Autoría, ver últimas páginas)

	Resistencia a tracción (MPa)	Límite elástico (MPa)	Ductilidad (%)
Aleación original	225	105	35
Aleación 36%cw	350	270	10

Hay muchos procesos industriales se realizan por deformación en frío, tales como la extrusión, el trefilado, la laminación en frío, la producción de roscas, la estampación, etc. En estos procesos se producen los efectos que se han indicado aquí.

El aumento de resistencia mecánica y de límite elástico siempre es deseable. Sin embargo, la pérdida de ductilidad en muchas aleaciones conduce a que el material se fragilice y pueda conducir a fallos mecánicos.

Por ello, dependiendo del destino de los componentes que se fabriquen mediante estos procesos, es posible que se requiera eliminar los efectos microestructurales de la deformación en frío para poder usarlos con seguridad.

Es posible conseguir recuperar las características iniciales de la aleación. Para ello se realizan los llamados **TRATAMIENTOS DE RECOCIDO DE RECRISTALIZACIÓN**.

Los tratamientos de recristalización consisten en calentar el componente en un horno a una temperatura dada de manera que en un tiempo alrededor de 1 hora, el material recupere la microestructura y propiedades originales.

6.10 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE RECOCIDO

TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE RECOCIDO

Los tratamientos de recocido son tratamientos en los que se activa la **DIFUSIÓN**. Se llevan a cabo en hornos. En estos tratamientos se distinguen tres etapas:

(a) Recuperación del estado tensional, (b) recristalización, y (c) crecimiento de grano. La figura 6.36 muestra un esquema del proceso.

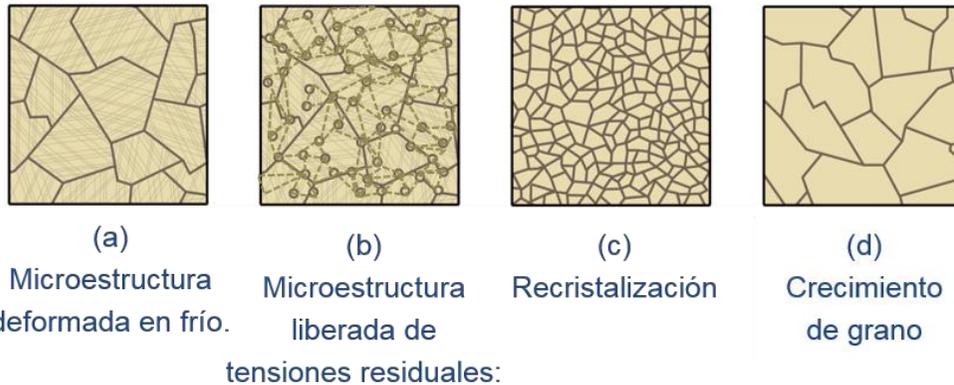


Figura 6.36: Etapas microestructurales en un tratamiento térmico de recocido de recristalización. (Autoría, ver últimas páginas)

En el tratamiento, primero se mueven ligeramente los átomos más tensionados, relajándose las tensiones residuales de la deformación plástica (etapa (a) en la figura 6.36).

A continuación, hay movimiento de las dislocaciones apiladas, y reorganización cristalina. Se nuclean pequeños granos dentro de los grandes granos agrios (etapa (b) en la figura 6.36).

Los nuevos núcleos van creciendo y se borran los límites de granos agrios (etapa (c) en la figura 6.36). A esta etapa se le conoce como **RECRISTALIZACIÓN**.

Con la recristalización el material recupera las propiedades eléctricas y térmicas originales, las que tenía antes de la deformación en frío.

Tras la recristalización, si se mantiene el metal dentro del horno, a la temperatura del tratamiento térmico, el tamaño de grano continua creciendo (etapa (d) en la figura 6.36) y se arruinan las propiedades mecánicas.

Esto se ejemplifica en la figura 6.37, página siguiente, correspondiente a una aleación Cu-Zn (latón). Superado el tiempo óptimo de tratamiento el grano crece y las propiedades mecánicas disminuyen.

6.10 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE RECOCIDO

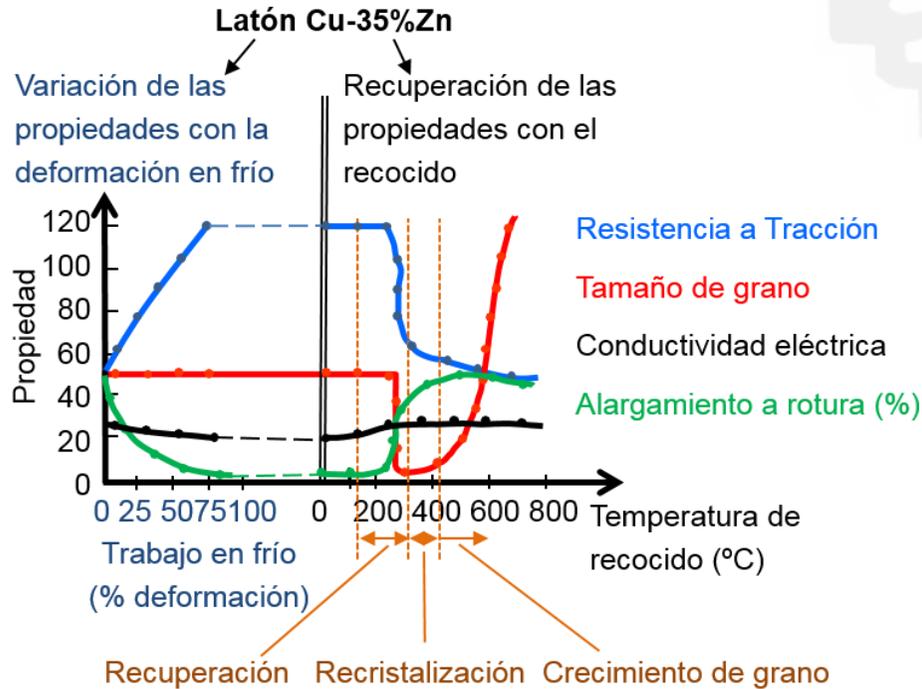


Figura 6.37: Variación de propiedades de un latón cuando se somete a trabajo en frío y a posterior tratamiento de recocido. (Autoría, ver últimas páginas)

El crecimiento del tamaño de grano con la temperatura también depende de cada aleación. Como ejemplo, en aleaciones de Cu, a partir de 400°C el crecimiento de grano es rápido y extensivo, deteriorándose las propiedades mecánicas del material. Los tratamientos a estas temperaturas deben ser muy rápidos.

La figura 6.38 muestra la microestructura de una aleación Al-Cu que ha sido deformada en frío un 60% (izda.) y sometida a un tratamiento térmico de recristalización (dcha.).

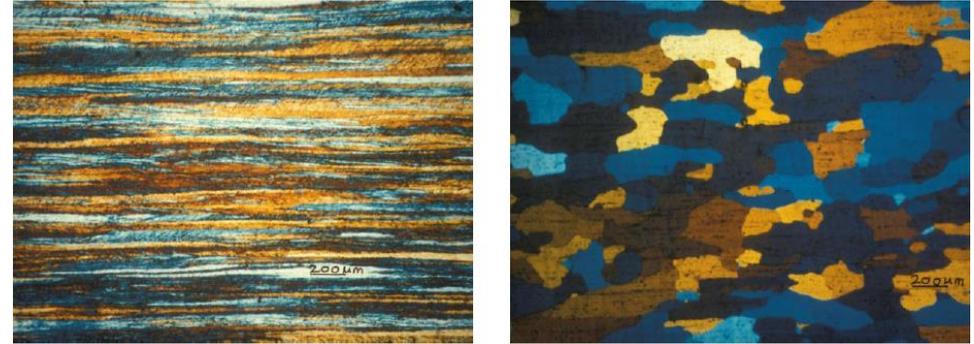


Figura 6.38: Microestructura de una aleación Al-Cu que ha sido deformada en frío un 60% (izda.) y sometida a un tratamiento térmico de recristalización (dcha.). (Autoría, ver últimas páginas)

En principio, el tratamiento de recocido para una aleación concreta y un grado de formación dado se puede realizar a distintas temperaturas:

Cuanto mayor es el grado de deformación de la aleación → el tiempo de tratamiento necesario a una temperatura dada será menor

Cuanto mayor sea la deformación en frío → menor tiempo de recristalización se necesita a una T dada.

6.10 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE RECOCIDO

- ✔ A mayor temperatura mayor velocidad de recristalización
- ✔ A mayor tiempo de tratamiento a una temperatura dada, mayor es el porcentaje de recristalización
- ✔ No hay una temperatura mínima de recristalización, pero se define como temperatura de recristalización a aquella que permite obtener la recristalización en 1 hora.
- ✔ A mayor porcentaje de deformación en frío, menor es la temperatura de recristalización.
- ✔ Si la deformación en frío es pequeña (entre 2-20% de trabajo en frío dependiendo de las aleaciones) la recristalización no ocurre →, por ejemplo, las aleaciones de cobre con deformación en frío del 20% no recristalizan mediante tratamientos térmicos.

La figura 6.39 esquematiza las condiciones indicadas en estos puntos.

Tras la recristalización si se mantiene la alta temperatura, la difusión continua y los granos crecen, perdiendo las buenas propiedades mecánicas del grano fino recristalizado. Por ello, es necesario determinar la temperatura y el tiempo de tratamiento de recocido. Se denomina **TEMPERATURA de recocido o de recristalización** aquella en que se recuperan las propiedades en 1 hora de tratamiento térmico.

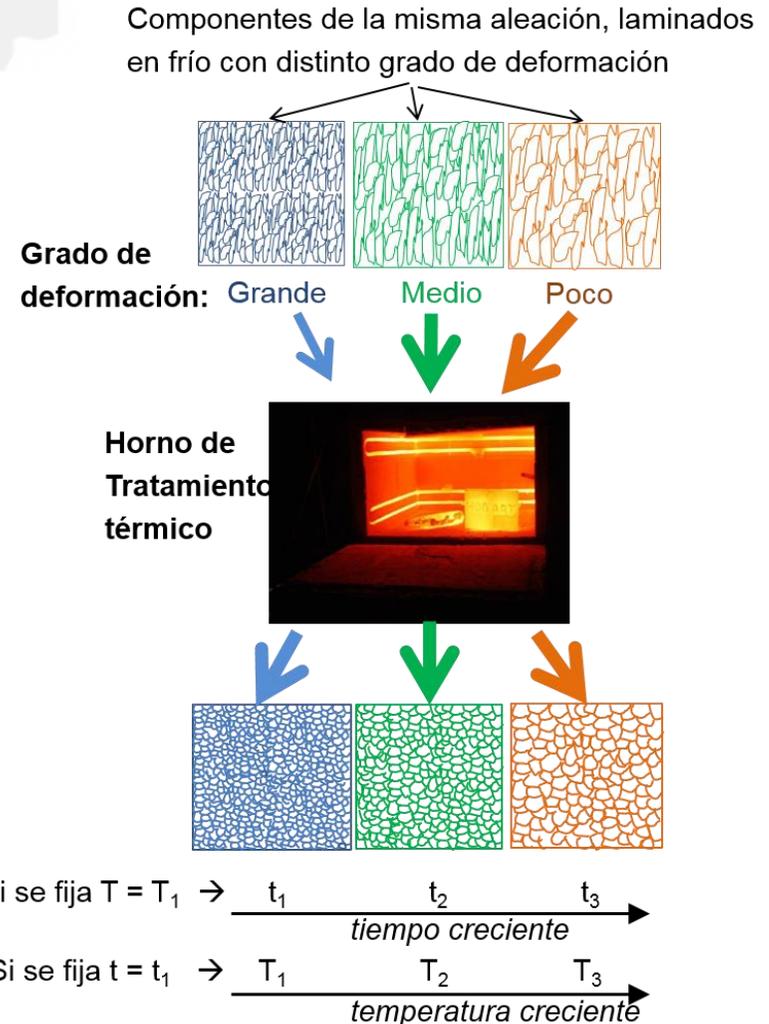


Figura 6.39: Relación entre la deformación en frío y las condiciones de recocido. (Autoría, ver últimas páginas)

6.10 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE RECOCIDO

La temperatura de recristalización (también llamada de recocido) se determina midiendo la variación de las propiedades mecánicas y/o eléctricas del material.

Lo más habitual es determinar el grado de recristalización midiendo la dureza, tal como se muestra en la figura 6.40, ya que es simple, barato y no destructivo.

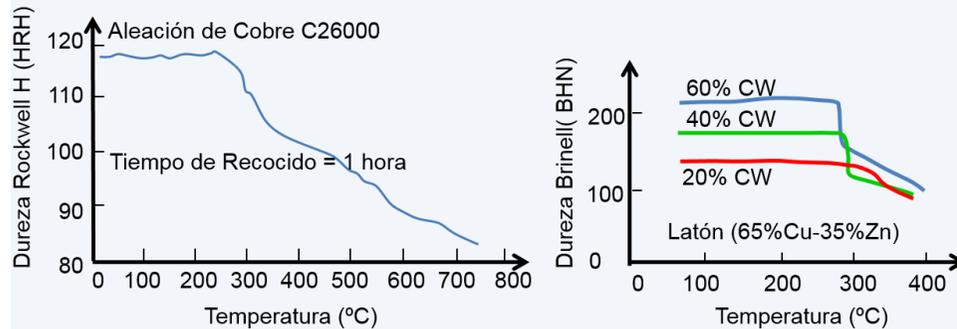


Figura 6.40: Determinación de las condiciones óptimas de tratamiento térmico de recristalización mediante la medida de la dureza. Datos no contrastados. (Autoría, ver últimas páginas)

A pesar de lo indicado en la página precedente, cada aleación tiene una Temperatura de recristalización, ya que la temperatura en la que los procesos de difusión y reorganización tienen lugar en 1 hora varía en un entorno pequeño dependiendo del grado de deformación en frío (figura 6.40, derecha). Por ello, las temperaturas de tratamiento térmico de las principales aleaciones industriales son conocidas y se encuentran tabuladas.

CRECIMIENTO DE GRANO

En todo proceso en el que se eleve la temperatura, los granos tienden a crecer porque los límites de granos están energéticamente muy activados.

Disminuir el área total de límites de grano conduce al material a estados energéticos más bajos.

El grano crece por migración de los límites de grano, que se difunden. Mientras unos granos aumentan otros disminuyen hasta, en ocasiones, llegar a desaparecer. Al resultado siempre es de disminución de la superficie total de límites de grano en el material.

El tamaño final de grano depende de la composición de la aleación, de la temperatura y el tiempo del tratamiento.

Cuanto menor es el tamaño de grano existe un mayor número de juntas de grano, lo que conduce a requerir más fuerza para deformarlo.

Los materiales de grano fino requieren mayores tensiones para deformarse: el límite elástico efectivo es muy superior.

6.11 RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES Y TAMAÑO DE GRANO

El tamaño de grano está directamente relacionado con

- **la resistencia a tracción** (el máximo esfuerzo que el material aguanta sin romperse)
- **el límite elástico** (El esfuerzo que el material aguanta sin deformarse plásticamente)
- **la refractariedad** (El máximo esfuerzo que le material aguanta sin romperse a elevada temperatura)

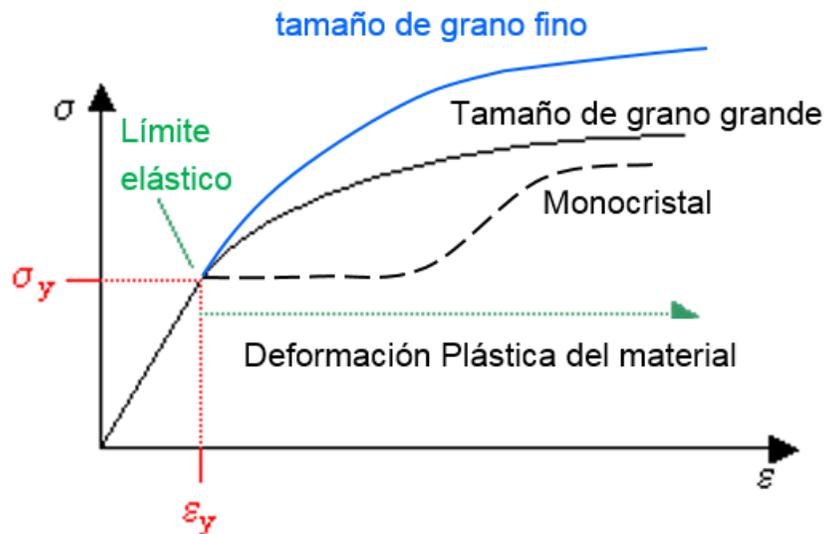


Figura 6.41: Comportamiento mecánico de una misma aleación con distintos tamaños de grano. (Autoría, ver últimas páginas)

Cuanto menor es el tamaño de grano → mayor número de juntas de grano. Éstas paran el deslizamiento de las dislocaciones. Los límites de grano actúan como puntos de anclaje que impiden que la dislocación continúe propagándose ya que, dado que los granos adyacentes tienen distinta orientación, se requiere más energía para que la dislocación cambie de dirección y se mueva hacia el grano adyacente.

El límite del grano, además, es mucho más desordenado que el interior del grano, lo que adicionalmente evita que las dislocaciones se muevan por deslizamiento, como lo hacen en los planos compactos. Esto obstaculiza el inicio de la plasticidad y, por lo tanto, aumenta la resistencia a la deformación del material, es decir, su límite elástico.

Los materiales de grano fino requieren mayores esfuerzos para deformarse, a la vez que son capaces de deformarse en igual, o superior, cantidad que los materiales de grano grueso: **Tienen mayor resistencia y no pierden ductilidad.**

El límite elástico y el tamaño de grano de las aleaciones están relacionados a través de una ecuación (Hall-Petch): El tamaño de grano es uno de los criterios fundamentales que se controlan para producir componentes que aseguren un nivel de resistencia planificado.

La ecuación Hall-Petch

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y \cdot d^{-1/2}$$

6.11 RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES Y TAMAÑO DE GRANO

En la ecuación de Hall-Petch, los parámetros que participan son:

σ_y es el límite elástico

k_y es el coeficiente de endurecimiento del material= cte. para cada material

σ_0 es una cte. que depende de cada material

d es el diámetro medio de los granos,

La tabla 6.1 incluye los valores de la constante y del coeficiente de endurecimiento por deformación en frío y de diversos materiales, para el cálculo del límite elástico mediante la ecuación de Hall-Petch [1].

Tabla 6.1: Constantes Hall-Petch de diversos materiales

Hall- Petch constants		
Material	σ_0 [MPa]	k
Cobre	25	0.11
Titanio	80	0.40
Acero bajo en carbono	70	0.74
Ni ₃ Al	300	1.70

MEDIDA DEL TAMAÑO DE GRANO

El siguiente texto está extraído de Brad Peirson [2] y traducido al castellano:

“Usando la ecuación de Hall-Petch, se puede emplear el tamaño de grano para determinar el límite elástico de un material en función del tamaño de grano que exhibe. Previamente se deberá determinar el tamaño del grano.

Hay diversas maneras de hacerlo. La más simple es calcular el área de cada grano individual y determinar sus diámetros individuales. El promedio de estos diámetros proporcionaría un diámetro de tamaño de grano medio muy preciso. La desventaja es que este método sería extremadamente lento y propenso a errores humanos en casi todas las etapas del análisis.

Un método más apropiado para determinar el tamaño de grano es el conocido como método de interceptación de línea media. El método implica tomar micrografías de la microestructura con unos aumentos concretos. En cada micrografía se dibujan múltiples líneas y se cuenta el número de granos intersectados por cada línea.

Otro método muy usado y normalizado es el índice de tamaño de grano, n , recogido en la norma ASTM E112.”

6.11 RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES Y TAMAÑO DE GRANO

MEDIDA DEL TAMAÑO DE GRANO ASTM

El tamaño del grano puede determinarse de manera indirecta mediante el número de tamaño de grano n de la norma ASTM E112, en el que el **número de tamaño de grano, n , se define por:**

$$N = 2^{n-1}$$

donde N es el número de granos por pulgada cuadrada que se aprecian en la micrografía de un material tomada en el microscopio óptico a un aumento de 100x.

De ahí se extrae n , un número entero conocido como **índice ASTM de tamaño de grano**.

La determinación del diámetro de grano una vez determinado n se realiza de acuerdo a la siguiente relación. El diámetro medio de grano se obtiene en μm .

$$d = \frac{\sqrt{\frac{25.4^2}{2^{n-1}}}}{100^2} \times 1000$$

Se recomienda realizar la actividad recogida en la siguiente dirección web (23-03-2018):

<http://core.materials.ac.uk/repository/alumatter/metallurgy/strengthening/grainsizeexperiment.swf>

RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES Y TAMAÑO DE GRANO

La figura 6.42 muestra la relación entre el comportamiento mecánico, el endurecimiento por trabajo en frío y el tamaño de grano de la aleación recocida. Cuando el tratamiento térmico aplicado excede el tiempo recomendable para la recristalización el tamaño de grano crece. La gráfica carga/alargamiento de la figura muestra cómo el material recocido a 800°C presenta la menor carga de rotura de todas las probetas ensayadas, así como la menor ductilidad. La diferencia entre este material y los recocidos a 350°C y a 500°C es el gran tamaño de sus granos. Esto es responsable del mal comportamiento mecánico determinado en el ensayo.

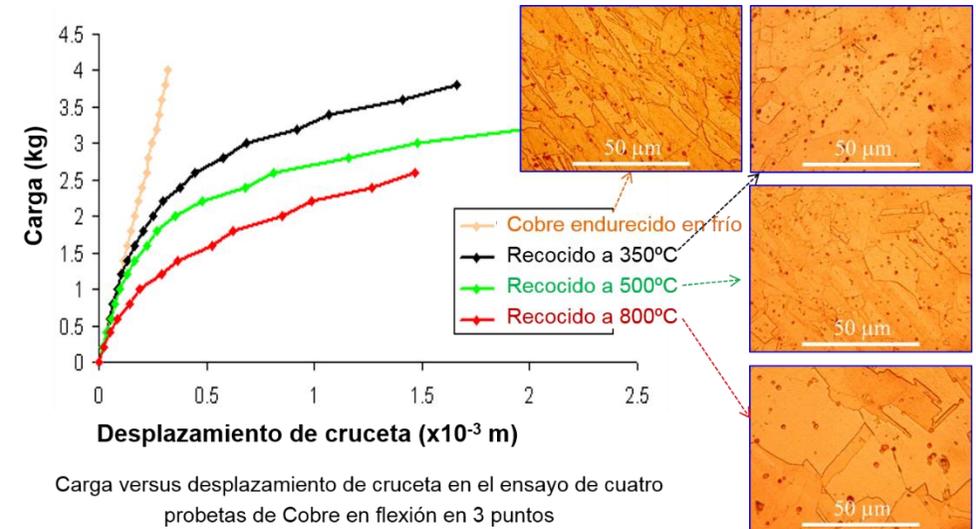


Figura 6.42: Resultados del ensayo de cuatro probetas de Cobre con distintos tamaños de grano. (Autoría, ver últimas páginas)

6.12 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

Cuando se realizan varios ensayos de probetas del mismo material, supuestamente exactamente iguales, se obtiene resultados con cierta **dispersión** de los valores obtenidos. Ello se debe a la natural **heterogenidad** de los materiales, constituidos habitualmente por varios elementos (reunidos en fases), formando granos, con impurezas en los límites de grano, y con indeseados poros, rechupes, o inclusiones.

Es necesario ensayar varias probetas para determinar un valor admisible de las propiedades mecánicas.

¿Cuántas probetas se necesita ensayar?



Dependerá de la dispersión que se obtenga en los resultados.

Las medidas realizadas en diferentes materiales muestran dispersiones de los datos muy diferentes: Mientras que en algunos materiales los valores determinados en distintas probetas son iguales o muy cercanos, en otros casos las probetas pueden romper bajo un rango amplio de tensiones, y en general presentar una amplia dispersión de los resultados medidos.

Ello indica que mientras que algunos materiales son intrínsecamente “fiables”, otros materiales presentan una gran “incertidumbre”.

Por ejemplo: si se ensayan 10 probetas de un acero laminado habitualmente la resistencia mecánica que se mide diferirá en los decimales, o incluso en las centésimas ($630 \pm 0,xx$ MPa).

Por el contrario, si se mide la resistencia mecánica en 10 probetas de una fundición de aluminio generalmente las medidas podrán diferir en las unidades, o incluso en la decenas ($250 \pm x$ MPa). Éste es un material “menos fiable” que el primero.

La dispersión en sí misma es un parámetro que se emplea en diseño:

Cuanto menor sea la dispersión más fiable será el material, y por tanto se podrán diseñar componentes con menores coeficientes de seguridad.

Por el contrario, cuanto mayor sea la dispersión, menos fiable será el material.

La dispersión se determina mediante la estadística. En concreto, siempre que se reúnan unas ciertas condiciones de homogeneidad de las causas de fallo en las probetas, la dispersión de los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos, se puede estudiar mediante la **DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA DE WEIBULL**. No se va a hondar durante el presente curso los tratamientos estadísticos de los resultados.

6.13 DUREZA

La dureza es una propiedad “un tanto especial”, es una propiedad tecnológica: Dureza es la resistencia que presenta un material a ser deformado o penetrado localmente por un objeto punzante.

- No es una propiedad intrínseca del material
- No es un parámetro de diseño

Pero la dureza está relacionada con varias importantes propiedades intrínsecas del material y con sus parámetros de diseño. La dureza se emplea industrialmente como parámetro de control de muchos procesos porque **ES MUY FÁCIL DE MEDIR**.

ENSAYOS DE DUREZA

Hay varios ensayos normalizados diferentes, que se emplean más habitualmente en unos o en otros materiales. Salvo en un par de ellos, todos los ensayos de dureza normalizados se basan en el siguiente procedimiento y concepto, esquematizado en la figura 6.43:

- 1) Un penetrador P de forma determinada se apoya contra la pieza,
- 2) Se somete a una carga F (a veces con una precarga), durante un tiempo t.
- 3) Se descarga la presión ejercida.
- 4) Se lee de alguna manera o bien la huella que ha dejado en el material (H) o bien la profundidad de penetración.

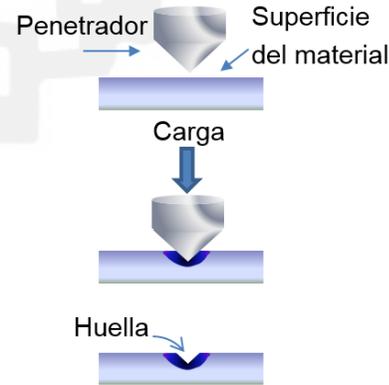


Figura 6.43: Fundamento de los ensayos de dureza más habituales. (Autoría, ver últimas páginas)

En general, para cada medida de dureza se deben realizar tres huellas y se calcula el valor medio de la tres.

Hay medidas de dureza MACRO y medidas MICRO. Las primera se realizan sobre componentes finales empleando cargas generalmente muy grandes, en todo caso siempre superiores a 1 kg.

Las microdurezas se realizan generalmente en zonas concretas de la microestructura. Se realizan con cargas pequeñas, siempre menores de 1kg, generalmente muy inferiores a este valor.

Macro durezas: (ensayos Brinell, Rockwell, Shore, Vickers 30)

- ✓ Medir la dureza del material masivo.
- ✓ Determinar estados de referencia en aceros y aleaciones metálicas

Microdurezas: (ensayos Vickers, Knoop)

- ✓ Determinar dureza de materiales extremadamente duros
- ✓ Determinar dureza de tratamientos superficiales (carbonitruraciones, recubrimientos proyección térmica, otros)
- ✓ Determinar la dureza de diferentes fases en una aleación

6.13 DUREZA

Los ensayos que fundamentalmente se emplean en materiales metálicos son los siguientes:

DUREZA BRINELL; DUREZA ROCKWELL; DUREZA VICKERS

Estos ensayos se realizan en aparatos (generalmente de sobremesa) que se denominan durómetros.

Las características fundamentales de cada uno de estos tres tipos de ensayos se reúnen en la figura 6.44

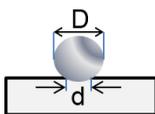
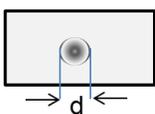
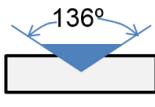
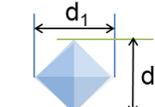
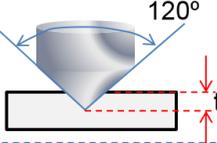
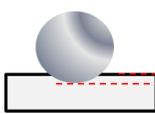
ENSAYOS DE DUREZA	Tipo de penetrador	Forma de la huella		Carga	Fórmula de cálculo
		Corte lateral	Vista Superior		
Brinell	Esfera de WC de 10 mm diámetro			F	$HB = \frac{2 F}{\pi * D_{bola} * [D_{bola} - \sqrt{D_{bola}^2 - d_{huella}^2}]}$ F (Kg); D, d (mm)
Vickers	Pirámide de diamante			F	$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$ F (Kg); D, d (mm)
Rockwell					
A C D	Cono de Diamante		No se mide la huella, sino que el aparato mide la penetración t	60 kg 150 kg 100 kg	No hay que calcular nada, la máquina da directamente la medida
B F G	Bola de acero diámetro 1/16"			100 kg 60 kg 150 kg	
E H	Bola de acero diámetro 1/8"			100 kg 60 kg	

Figura 6.44: Características básicas de los ensayos de dureza más habituales. (Autoría, ver últimas páginas)

DUREZA BRINELL

Es el ensayo de dureza más sencillo y en muchos casos es suficiente para conocer si una aleación se encuentra sana o ha sido sometida a condiciones defectuosas de proceso. Se usa para materiales metálicos, en concreto para aceros.

Se mide el diámetro de la huella que crea un indentador de bola de WC cuando es empujado sobre el material por una carga dada.

La relación entre la carga y la superficie de la huella creada es LA DUREZA BRINELL.

La dureza se mide mediante la fórmula empírica que se puede ver en la figura 6.44. El número resultante se denomina dureza Brinell, es adimensional y se representa mediante el número obtenido seguido de las siglas **HB** (por ejemplo, dureza 80HB).

En la práctica no hay que calcular nada con la fórmula porque para facilitar el cálculo la normativa de ensayo (normativa ISO-EN-UNE → norma ISO 6506 – 2:1999, y ASTM E-10 - 01) incluye tablas que indican las correspondencias entre los diámetros de las huellas, la fuerza aplicada y los números de dureza Brinell correspondiente

6.13 DUREZA

Antiguamente el ensayo Brinnell se realizaba en aleaciones férreas con bola de acero de 10 mm Ø y cargas de 3000 kg aplicada durante 30s, mientras que en aleaciones no férreas se realizaba también con bola de acero de 10 mm Ø, pero con cargas de 500 Kg aplicada durante 10s.

Actualmente, la dureza Brinell se puede medir con bolas de diferentes diámetros siempre que se mantenga la relación $F/D^2 = \text{Cte.}$ Esta constante depende del tipo de material a ensayar:

	Acero	Aleaciones de Cobre	Cobre	Metales blandos	Plomo
Cte.	30	10	5	2,5	1

Los siguientes aspectos geométricos son importantes para la realización de estos ensayos, ya que al aplicar unas cargas tan fuertes se debe garantizar que las huellas realizadas (y la zona endurecida por deformación plástica a su alrededor) no interfieren entre sí, que el espesor es suficientemente grande, etc.

Grosor probeta (mm)	Diámetro de la bola (mm)	Carga F (kg)			
		30D ²	10D ²	5D ²	2,5D ²
>6	10	3000	1	500	250
De 6 a 3	5	750	250	125	62,5
<3	2,5	187,5	62,5	31,5	15,6

Características básicas del ensayo BRINELL

- 1.- Penetradores: bolas de acero o carburos de 1; 2,5; 5 y 10 mm de diámetro
- 2.- Cargas a aplicar: entre 15,6 kg y 3000 kg.
- 3.- El tiempo de implementación de la carga de cero al máximo valor debe ser aprox. 15 segundos
- 4.- El tiempo de aplicación de la carga debe ser aprox. 30 segundos
- 4.- Una vez descargado se mide el diámetro de la huella final para lo cual generalmente se requiere de una lupa graduada

- En materiales muy duros, mayores de 500 HB , no es conveniente usar la medida de dureza Brinell.
- A veces la notación incluye un número adicional, tras las siglas HB: HB30 en acero, en otros materiales se puede ir a HB10, HB5: este número tras las siglas significa la cte.de la carga/diámetro empleada.
- El diámetro se mide con una pequeña lupa graduada, y no es necesario realizar el cálculo ya que la equivalencia entre diámetro y HB se encuentra tabulada. (**Ver norma ISO 6506 – 2:1999, y ASTM E-10 - 01**)

Se recomienda realizar la siguiente actividad:

<http://core.materials.ac.uk/repository/doitpoms/tlp/hardness/brinell.swf>

6.13 DUREZA

DUREZA ROCKWELL

Los ensayos de dureza rockwell **HR** consisten en un indentador que es empujado contra el material primero con una carga de 10 Kg y después con una carga superior, midiéndose la diferencia de penetración entre ambas cargas. Esta penetración es directamente medida por el durómetro, que indica un número adimensional, el cual es la dureza Rockwell del material.

Hay varios subtipos de ensayos Rockwell (denominados escalas) dependiendo de la dureza del material. Unas escalas emplean una bola de acero de distintos diámetros y otras escalas emplean un indentador cónico de diamante. Los diámetros de las bolas de acero (o el uso de cono de diamante) y la carga que se aplica determinan la escala de dureza Rockwell.

✓ La escala Rockwell a emplear depende de la dureza del material → **La dureza HR siempre debe estar comprendida entre 20 y 130**. Si la medida excede por arriba o por debajo se debe emplear una escala Rockwell diferente.

✓ Notación: primero se pone el número de la dureza, y después la escala en la cual se ha medido: **120 HRC, 60 HRB, etc**

✓ Las escalas Rockwell más usadas e importantes son las escalas HRC (a partir de 22) y HRB (hasta 100)

Tabla 6.2: Características de las distintas escalas Rockwell de medida de dureza.

Las características de cada escala se recogen en la Tabla 6.2, en la cual:

- 1) El número que aparece al lado de la palabra bola corresponde al diámetro de la bola en pulgadas,
- 2) Cuando el indentador es un cono, se trata de un cono de diamante con un ángulo de 120°

Escala Rockwell	HRA	HRB	HRC	HRD	HRE	HRF	HRG	HRH	HRK
Indentador	Cono	Bola	Cono	Cono	Bola	Bola	Bola	Bola	Bola
Diámetro bola		1/16			1/8	1/16	1/16	1/8	1/8
Precarga (kg)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Carga (Kg)	60	100	150	100	100	60	150	60	150

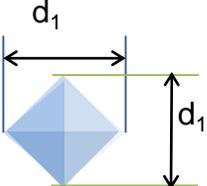
6.13 DUREZA

DUREZA VICKERS

El indentador consiste en una pirámide de diamante de base cuadrada, mediante la cual se realiza una huella cuyas diagonales se miden, se calcula el tamaño medio y se emplea el cálculo de la dureza Vickers de acuerdo a la fórmula incluida

$$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$$

F (Kg) D, d (mm)



Se usan cargas muy bajas en comparación con las durezas Brinell y Rockwell, de hasta 30 Kg. Cargas menores de 1Kg también son posibles, y en ese caso se denomina MICRODUREZA porque las huellas obtenidas son muy pequeñas.

Las microdurezas Vickers son muy útiles para evaluar diferencias microestructurales localizadas en un componente, o para ver cuál es el grado de afectación térmica por un proceso de soldadura, cementación, u otro tipo de tratamiento o proceso que implique calor localizado sobre el material: En estos casos se realiza una cadena de huellas Vickers a lo largo de la zona afectada, y se ve donde se recupera la dureza original del material sustrato.

ASPECTOS QUE SE DEBEN TENER EN CUENTA EN LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES DE MEDIDA DE DUREZA:

El espesor de las probetas y las distancias que hay que dejar entre huellas y hasta los bordes deben ser tenidos en cuenta, tanto en la dureza Brinell como en la Rockwell y Vickers.

- Entre los centros de dos huellas, distancia mínima de 2,5 d.
- Entre el extremo de una huella y un borde, distancia mínima de 1,5 d

CORRELACIÓN ENTRE DIFERENTES DUREZAS

Existen muchos métodos de medida de dureza normalizados y empleados habitualmente.

Hay una gran variedad de condiciones de ensayo posibles en un mismo tipo de medida de dureza (selección de carga, tamaño de bola, etc)



- Muchas veces es necesario conocer la correlación entre los datos que suministran diferentes empresas, medidos por métodos distintos, o con diferentes condiciones de medida.

- Algunas correlaciones están bien establecidas e incluso se encuentran incluidas en las normas.

6.13 DUREZA

No deben extrapolarse correlaciones a materiales distintos de aquellos para los que han sido establecidas. Las correlaciones son válidas para materiales concretos. Cada tipo de material tiene su correlación.

La **Norma ASTM E-140- 97** contiene tablas de correlación de medidas de durezas por diferentes métodos. Estas correlaciones **sólo son válidas para los tipos de materiales que se indican en ella (aceros ferríticos de bajo/medio contenido en carbono).**

En Internet hay páginas con cálculo de correlaciones entre diferentes durezas y entre dureza y resistencia para distintos materiales, pero debe verificarse su procedencia y fiabilidad antes de usarlas. Es importante analizar la referencias que aportan y sólo utilizarlas para los materiales en ellas indicadas.

Indicativo de ello es el trabajo realizado por el G. Holloway [3], en el cual realizó medidas de dureza Rockwell C y Vickers en aceros inoxidables austenoferríticos. Represento ambas durezas, HRC versus HV, tal como muestra la figura 6.45. El resultado es la recta denominada TWI.

A continuación calculó las correlaciones HRC que correspondería a las medidas Vickers realizadas, de acuerdo a las correlaciones recogidas en la norma ASTM E-140, válida para aceros ferríticos C-Mn (los más habituales de entre los aceros). El resultado es la línea punteada que se incluye en la misma figura.

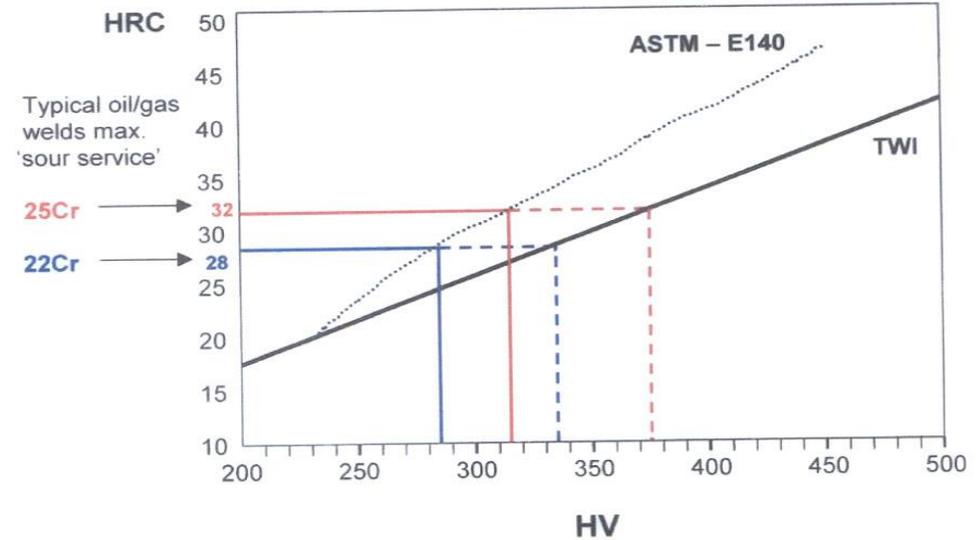


Figura 6.45: Dureza HRC versus dureza HV para aceros austenoferríticos. (Autoría, ver últimas páginas)

Como puede observarse, no es válido emplear las correlaciones determinadas para un tipo de material en un tipo diferente.

De este trabajo se desarrolló una nueva correlación válida para los aceros inoxidables austenoferríticos:

$$\mathbf{HRC = 0,091 HV - 2,4}$$

Esta correlación no está incluida en ninguna norma, pero su fiabilidad está garantizada porque su utilización es recomendada por un organismo de prestigio internacional, NACE (recomendación MR0175, de 2003), destinado a normalizar y desarrollar normativa para protección de la corrosión.

6.13 DUREZA

RELACIÓN ENTRE DUREZA Y RESISTENCIA A TRACCIÓN

La dureza es una indicación de la resistencia de un material a la deformación plástica. Por ello, generalmente la dureza y la resistencia a tracción son a grandes rasgos proporcionales. Es mucho mas barato y fácil realizar un ensayo de dureza que un ensayo de tracción. Además es NO DESTRUCTIVO.

La relación de proporcionalidad es diferente para cada aleación. Existen tablas/gráficos para las principales aleaciones férreas, de Cu, de Al,...

Para la mayoría de los aceros: $\sigma_t = 3.45 * HB$ (MPa)

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

REFERENCIAS

- [1] Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Grain_boundary_strengthening. Datos referenciados a Smith&Hashemi 2006 p. 242. [Consulta: 23-03-2018].
- [2] Peirson, Brad. *Comparison of the ASTM Comparative Chart Method and the Mean Line Intercept Method in Determining the Effect of Solidification Rate on the Yield Strength of AA5182*. Guión de pá tica de laboratorio. School of Engineering Grand Valley State University. July 12, 2005. [Consulta: 23-03-2018]. Disponible en www2.gvsu.edu/peirsonb/solidification_yield_strength.pdf.
- [3] Holloway, G. *Effective Welding of Duplex & Superduplex Stainless Steels*. Paper originally presented at the Singapore Welding Society meeting on 29th October 2003. Metrode Products Limited, UK. [Consulta: 23-03-2018]. Disponible en <http://www.nickelalloys.com.br/Metrode%20CD%202011/Technical%20Literature/Duplex%20and%20Superduplex/Effective%20Welding%20of%20Duplex.pdf>

AUTORÍA DE IMÁGENES

Figura 6.1: Distintos tipos de aplicación de fuerza.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.2: Elemento sometido a tracción.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.3: Elemento sometido a cizalla.

Imagen de De C.lingg - Trabajo propio, Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4354169>

Figura 6.4: Máquina de ensayos de tracción. A la izda., esquema indicando las partes principales. A la derecha fotografía de una máquina actual.

Imagen de la izda. de Ane Miren García Romero. Imagen de la derecha, derivada de: *By Smial - Own work (Original text: eigenes Foto)*, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7453188>

Figura 6.5: Diversas probetas de tracción metálicas

Imagen de la izda. derivada de Romary at fr.wikipediaderivative work: Wizard191 (talk) - Eprouvettes_traction.jpg, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11595755>. Imagen del centro derivada de <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/mechanical-testing/method.php> © 2004-2015 University of Cambridge. [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/). Imagen de la derecha de Ane Miren García Romero.

Figura 6.6: Galga extensométrica. Izda., esquema de una galga. Derecha, galga sobre probeta cilíndrica, preparada para ensayar

Imagen de la izda. de. http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Strain_gauge.svg CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=893221>.

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

Imagen de la derecha de <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/mechanical-testing/notes.php>. © 2004-2015 University of Cambridge. [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License](#).

Figura 6.7: Gráfico tensión versus deformación de una probeta de Duraluminio. Los puntos grises corresponden al gráfico con medidas de deformación de galga extensométrica. Los puntos lila se determinan usando la medida de desplazamiento de cruceta en vez de la deformación real de la probeta.

Imagen derivada de <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/mechanical-testing/notes.php>. © 2004-2015 University of Cambridge. [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License](#).

Figura 6.8: La zona elástica y la ley de Hooke.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.9: El modulo de Young y la fuerza de enlace atómico.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.10: Contracción transversal bajo una tensión de tracción.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.11: Determinación del modulo secante y el modulo tangente en sólidos elásticos no lineales.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.12: La deformación plástica

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.13: Determinación del límite elástico.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.14: Curva Tensión-deformación de un material metálico, mostrando el aspecto físico de la probeta en distintas etapas el ensayo.

Imagen de Ane Miren García Romero. Fotografías extraídas de los vídeos de la página <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/mechanical-testing/results2.php>. © 2004-2015 University of Cambridge. [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License](#)

Figura 6.15: Recuperación elástica tras la fractura.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.16: Captura de imágenes de un estado de tracción en distintas etapas, desde el inicio hasta la fractura.

Todas las imágenes tomadas de <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/mechanical-testing/results2.php> © 2004-2015 University of Cambridge. [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License](#)

Figura 6.17: Gráfica Tensión-deformación ingenieril (curva negra) y real (curva roja) para la misma probeta metálica.

Imagen derivada del original en inglés, de [User:Slashme] (David Richfield) - Trabajo propio, CC BY-SA 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6039110>

La fotografía proviene de HB TUW - Own work, CC BY-SA 4.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=45327672>

Figura 6.18: Materiales dúctiles y materiales frágiles. (Autoría, ver últimas páginas)

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.19: Módulo de resiliencia

Imagen de Ane Miren García Romero

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

Figura 6.20: Comportamiento tension-deformación de distintos tipos de materiales.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.21: Comportamiento tension-deformación de dos aleaciones de aluminio junto con las imágenes de las superficie de fractura de las probetas ensayadas.

Imagen de Ane Miren García Romero con gráfico y fotografías de <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/mechanical-testing/results1.php>. © 2004-2015 University of Cambridge. Content is licensed under a [Creative Commons 2.0 UK: England & Wales License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/). [Attribution-NonCommercial-ShareAlike](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Figura 6.22: Comportamiento tension-deformación de un material cerámico sometido a tracción y a compresión

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.23: Ensayo de compresión de hormigón

Imagen de By Xb-70 at English Wikipedia (Transferred from en.wikipedia to Commons.) [Public domain], via Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AConcrete_Compression_Testing.jpg

Figura 6.24: Ensayo de compresión de metales

Fotografías de Cjp24 - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15067523>
Gráfico de Cjp24 (Own work) [CC BY-SA 3.0] https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ACompression_testing_Curve.png

Figura 6.25: El ensayo de flexión para determinación de la resistencia a tracción en materiales frágiles.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.26: Ensayo de flexión de una viga

Imagen de dominio público de National Institute of Standards and Technology (National Institute of Standards and Technology), via Wikimedia Commons https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AStructuralTesting_005.jpg

Figura 6.27: dislocación de cuña sometida a una tensión de cizalla en el plano de deslizamiento.

Imagen derivada de la imagen extraída de https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dislocations/dislocations_in_3D.php © 2004-2015 University of Cambridge. Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License

Figura 6.28: Direcciones de deslizamiento en un monocristal sometido a una fuerza de tracción F.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.29: Superficie de proyección de una figura en un plano con el que forma un ángulo ϕ

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.30: Ausencia de cizalla cuando λ ó ϕ son 90°

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.31: Etapas del ensayo de tracción de un monocristal

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.32: Endurecimiento por deformación de un metal:

Imagen de Ane Miren García Romero. La figura (d) es de <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/mechanical-testing/results2.php>. © 2004-2015 University of Cambridge. Content is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

Figura 6.33: Microestructura original y microestructura producida por el proceso de extrusión en la dirección de aplicación de la tensión.

Imagen producida con las siguientes imágenes: Izda, imagen de T. Quesed, Micrograph nº 712, released under CC BY-NC-SA 2.0 license, https://www.doitpoms.ac.uk/miclib/full_record.php?id=712. Centro, imagen de Ane Miren García Romero. Dcha., imagen de Prof. T. W. Clyne, Micrograph nº 604, released under CC BY-NC-SA 2.0 license, https://www.doitpoms.ac.uk/miclib/full_record.php?id=604

Figura 6.34: Curvas ingenieriles y reales de tensión versus deformación de dos aleaciones con distinto exponente n de endurecimiento por deformación.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 6.35: Variación de las propiedades de una aleación de níquel en función del trabajo en frío.

Imagen de Ane Miren García Romero, inspirada en la figura 8.7 (página 300) de Askeland, D. R. "The science and engineering of materials. 6th Edition. Cengage Learning Inc., 2010. ISBN-13: 978-0-495-29602-7.

Figura 6.36: Etapas microestructurales en un tratamiento térmico de recocido de recristalización.

Imagen derivada de la imagen de Daniele Pugliesi - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11772446>

Figura 6.37: Variación de propiedades de un latón cuando se somete a trabajo en frío y a posterior tratamiento de recocido.

Imagen de Ane Miren García Romero basada en la figura 8.15 (página 309) de Askeland, D. R. "The science and engineering of materials. 6th Edition. Cengage Learning Inc., 2010. ISBN-13: 978-0-495-29602-7.

Figura 6.38: Microestructura de una aleación Al-Cu que ha sido deformada en frío un 60% (izda.) y sometida a un tratamiento térmico de recristalización (dcha.).

Imagen de Dasarathy, C. *Examples of microstructures in metallic materials*, página 42 [en línea]. [consulta: 23-03-2018]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Examples_of_microstructures_in_metallic_materials.pdf

Figura 6.39: Relación entre la deformación en frío y las condiciones de recocido.

Imagen de Ane Miren García Romero. La fotografía incluida en la imagen es de Ichudov (Own work), CC-BY-SA-3.0. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AHeat-Treating-Furnace.jpg>

Figura 6.40: Determinación de las condiciones óptimas de tratamiento térmico de recristalización mediante la medida de la dureza.

Imagen de Ane Miren García Romero. Basada en datos recogidos de diversas fuentes, sin contrastar.

Figura 6.41: Comportamiento mecánico de una misma aleación con distintos tamaños de grano. (Autoría, ver últimas páginas)

Imagen de Ane Miren García Romero.

Figura 6.42: Resultados del ensayo de cuatro probetas de Cobre con distintos tamaños de grano.

Imagen de Ane Miren García Romero derivada de las imágenes disponibles en <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/mechanical-testing/results3.php>. © 2004-2015 University of Cambridge. Content is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/).

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

Figura 6.43: Fundamento de los ensayos de dureza más habituales.
Imagen de Ane Miren García Romero.

Figura 6.44: Características básicas de los ensayos de dureza más habituales.

Imagen de Ane Miren García Romero.

Figura 6.45: Dureza HRC versus dureza HV para aceros austenoferríticos.

Imagen de [3].

ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO

BILBOKO INGENIERITZA ESKOLA



Esta obra está bajo una licencia Reconocimiento No comercial Compartir bajo la misma licencia 4.0 Internacional de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es_ES.

Imagen de la Portada y contraportada. Detalle de una fachada de composite de fibra de vidrio con resina poliédrica degradada por exposición a la interperie cercano al mar (Hondarribia, España, 2014). Propiedad de Ane Miren García Romero.