

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES

Volumen 2: Ensayos mecánicos. Ensayos no destructivos

Carlos Núñez
Antoni Roca
Jordi Jorba

Departament d'Enginyeria Química i Metal·lúrgia
Facultat de Química



TEXTOS DOCENTS

281

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES

Volumen 2: Ensayos mecánicos. Ensayos no destructivos

Carlos Núñez

*Universidad de A Coruña
Campus Ferrol*

Antoni Roca

Universitat de Barcelona

Jordi Jorba

Universitat Politècnica de Catalunya

Departament d'Enginyeria Química i Metal·lúrgia
Facultat de Química

Publicacions i Edicions



UNIVERSITAT DE BARCELONA



Núñez Álvarez, Carlos

Comportamiento mecánico de los materiales / Carlos Núñez, Antoni Roca, Jordi Jorba. – (Textos docents ; 281)

Referències bibliogràfiques. Annexos

Conté: 2. Ensayos mecánicos, ensayos no destructivos

A la portada: Departament d'Enginyeria Química i Metal·lúrgia. Facultat de Química

En 4 vol.

ISBN: 978-84-475-3514-9 (vol. 2)

I. Roca, Antoni (Roca Vallmajor) II. Jorba i Peiró, Jordi III. Universitat de Barcelona. Departament d'Enginyeria Química i Metal·lúrgia IV. Títol V. Col·lecció: Textos docents (Universitat de Barcelona) ; 281

1. Ciència de materials 2. Resistència de materials 3. Mecànica de fractures

© PUBLICACIONES I EDICIONS DE LA UNIVERSITAT DE BARCELONA, 2011

Adolf Florensa, s/n, 08028 Barcelona, tel.: 934 035 442, fax: 934 035 446,
comercial.edicions@ub.edu, www.publicacions.ub.edu

1ª edición (Edicions de la Universitat de Barcelona): 2004

1ª edición (Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona): 2011

Depósito legal: B-16.160-2011

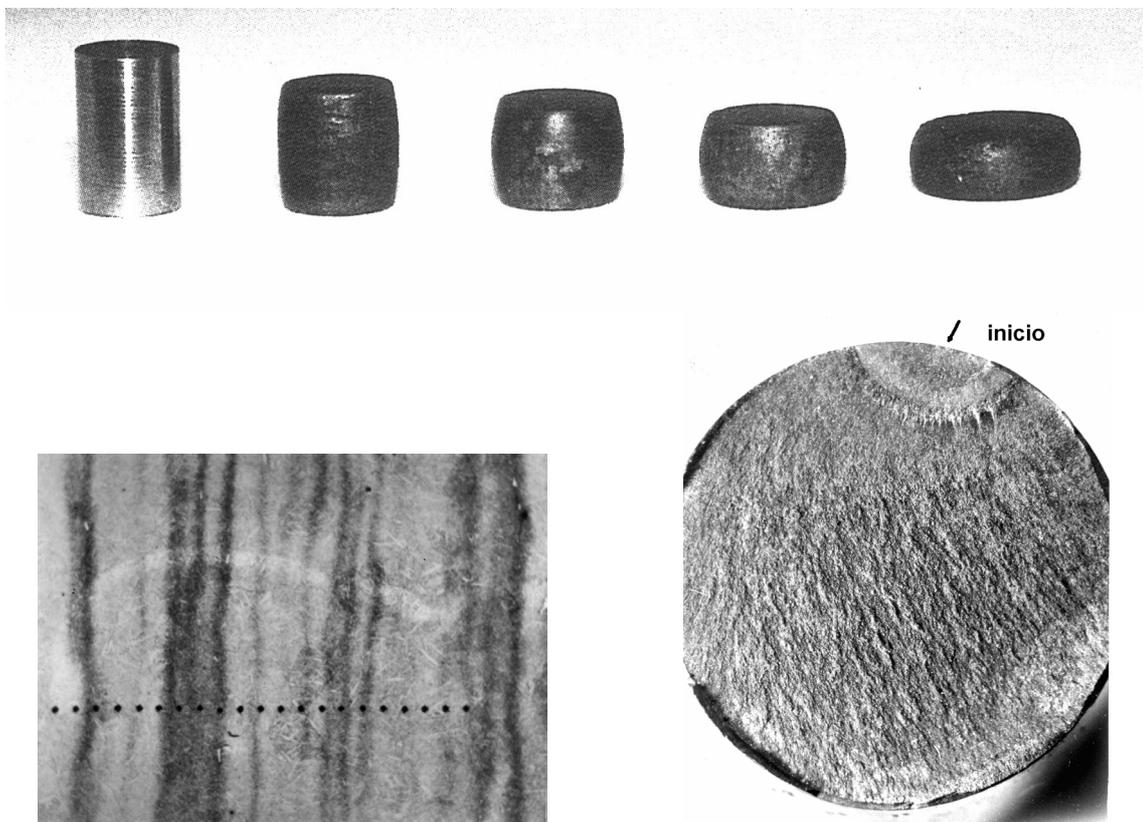
ISBN: 978-84-475-3514-9

Impresión: Gráficas Rey, S.L.

Impreso en España / Printed in Spain

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES

VOLUMEN 2:
ENSAYOS MECÁNICOS.
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS



En la primera imagen se muestra la deformación de un acero microaleado ensayado a compresión. En la segunda imagen se presenta la microestructura de un acero de herramientas con tratamiento térmico inadecuado (incluye huellas de dureza Vickers). En la tercera imagen se presenta la superficie de un pasador de acero que ha roto después de experimentar fatiga.

PRÓLOGO

La obra “Comportamiento Mecánico de los Materiales” está basada en los más de treinta cursos de Metalurgia Mecánica impartidos por el Prof. Dr. Carlos Núñez Álvarez (e.p.d.) desde 1968 en la Universidad Complutense de Madrid, Universidad de Extremadura y Universitat de Barcelona. Asimismo, se basa en los cursos de Metalurgia Mecánica, Ciencia de Materiales y Mecánica de Materiales impartidos desde Enero de 1993 por el Dr. Antoni Roca Vallmajor en la Universitat de Barcelona. Esta obra se basa también en la experiencia acumulada por el Dr. Jordi Jorba Peiró primero en la Universitat de Barcelona (1983-1990) y a partir de esta fecha en la Escola Universitària d’Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona a través de asignaturas impartidas en la especialidad de Mecánica.

La obra se ha estructurado en cuatro volúmenes, cada uno de ellos con entidad propia:

- Volumen 1: Conceptos fundamentales
- Volumen 2: Ensayos mecánicos. Ensayos no destructivos
- Volumen 3: Elastomecánica. Mecánica de la fractura
- Volumen 4: Comportamiento plástico de los materiales. Propiedades y selección de materiales

El volumen 2 consta de 6 partes. En la Parte 1 y hasta la Parte 5 se incluye una breve introducción en la que se detallan las propiedades mecánicas que pueden ser caracterizadas mediante cada uno de los ensayos descritos, así como los parámetros que las permitirán cuantificar. A continuación se hace una descripción secuencial del ensayo, tanto de tipo conceptual como descriptivo, y finaliza con las referencias bibliográficas consultadas durante su redacción.

La Parte 6 se inicia con el concepto de ensayo destructivo y ensayo no destructivo, así como su aplicabilidad en el control de calidad durante el procesado y el comportamiento en servicio. A continuación se clasifican los distintos ensayos no destructivos en base a la posibilidad de caracterización de defectos superficiales o defectos internos, y se lleva a cabo una detallada descripción de los ensayos no destructivos más utilizados a nivel industrial. Esta parte finaliza con las referencias bibliográficas consultadas en este apartado.

En cada una de las partes se presentan ejercicios de tipo conceptual resueltos y se proponen algunos ejercicios para su resolución por parte del alumno para completar su formación. El texto se completa con 71 figuras y 36 tablas para introducir valores reales de las magnitudes consideradas y facilitar la comprensión de los conceptos presentados.

La obra “Comportamiento mecánico de los materiales” va dirigida a los alumnos de las Titulaciones en Química e Ingeniería Química que amplían los conocimientos adquiridos

en la asignatura de Ciencia de Materiales, obligatoria en ambas enseñanzas; a los alumnos de las Ingenierías Técnicas, sobre todo los que se especializan en Mecánica y como curso introductorio a los alumnos de las titulaciones de Ingeniería Industrial e Ingeniería de Materiales. Finalmente, esta obra puede ser utilizada para complementar la información que sobre propiedades mecánicas presentan los libros básicos recomendados a los alumnos que cursan la asignatura de Ciencia de Materiales.

Los autores desean agradecer al Dr. José Antonio Benito Páramo y al Dr. Ignacio Mejía Granados su colaboración en alguno de los apartados de este volumen; parte de esta colaboración se cita en cada caso mediante notas al final de página. El agradecimiento se extiende a la Dra. Montserrat Cruells Cadevall por sus comentarios, opiniones y sugerencias durante la realización de esta obra y a la Sra. Esther Vilalta Martí por su colaboración en todos los aspectos relacionados con las micrografías que aparecen en la obra.

Los Dres. Antoni Roca y Jordi Jorba quieren aprovechar la publicación de esta obra para rendir homenaje al Prof. Dr. Carlos Núñez Álvarez del que fueron discípulos y colaboradores, reconociéndole la tarea profesional y humana desarrollada a lo largo de su vida académica en las distintas universidades en las que sirvió y, sobre todo, por el impulso de la enseñanza y la investigación en el campo de la Metalurgia y la Ciencia de Materiales en Barcelona, durante los años comprendidos entre 1978 y 1993.

Barcelona, Octubre de 2003

ÍNDICE GENERAL

PARTE 1. EL ENSAYO DE TRACCIÓN	3
1.1. Introducción	3
1.2. Descripción secuencial del ensayo de tracción técnico	4
1.3. Resistencia mecánica obtenida a través del ensayo de tracción	9
1.4. La rigidez intrínseca de los materiales: el módulo de Young	12
1.5. La ductilidad de los materiales: el alargamiento porcentual a fractura	16
1.6. La tenacidad de los materiales: módulo de resiliencia, módulo de tenacidad..	21
1.7. Diagrama de tracción real.....	24
1.8. Bibliografía consultada.....	31
PARTE 2. ENSAYO DE COMPRESIÓN. ENSAYO DE FLEXIÓN.	
ENSAYO DE DUREZA.	33
2.1. Ensayo de compresión	33
2.1.1. Descripción secuencial del ensayo de compresión.....	34
2.1.2. La resistencia mecánica a través del ensayo de compresión.....	37
2.1.3. La rigidez intrínseca de los materiales: el módulo de Young.....	37
2.1.4. Grado de deformación plástica a compresión.....	37
2.1.5. Ensayo Ford: compresión en estado de deformación plana	38
2.2. Ensayo de flexión	39
2.2.1. Determinación de la rigidez y la resistencia mecánica a flexión	40
2.2.2. Determinación de la ductilidad de los materiales	41
2.3. Ensayo de dureza	43
2.3.1. Dureza Brinell.....	44
2.3.2. Dureza Vickers.....	49
2.3.3. Dureza Meyer.....	52
2.3.4. Dureza Rockwell	52
2.3.5. Microdureza	57
2.3.6. Ultramicrodureza.....	58
2.3.7. Dureza Shore	59
2.3.8. Relación entre las medidas de dureza obtenidas en escalas diferentes.....	60
2.3.9. Ejemplos de aplicabilidad de la dureza.....	62
2.3.9.1. Efecto del contenido en carbono y del estado de tratamiento en aceros al carbono	62
2.3.9.2. Efecto del trabajo en frío	62
2.3.9.3. Procesado de materiales por tratamiento térmico.....	63
2.3.9.4. Medida de tenacidad a la fractura en cerámicas utilizando la escala de dureza Vickers	64
2.4. Bibliografía consultada.....	65
PARTE 3. ENSAYO DE TERMOFLUENCIA	67
3.1. Introducción	67
3.2. Descripción secuencial del ensayo de termofluencia	69
3.2.1. Ensayos de termofluencia	69
3.2.2. Aspectos macroscópicos del comportamiento del material a termofluencia.....	70
3.2.3. Aspectos microscópicos del comportamiento del material a termofluencia.....	71

3.3. Modelización del comportamiento a termofluencia	72
3.4. Tipos de ensayo de termofluencia	75
3.5. La termofluencia como fenómeno energéticamente activado	77
3.6. Extrapolación de los resultados de termofluencia	81
3.7. El fenómeno de la termofluencia en los polímeros	82
3.8. Desarrollo de materiales resistentes a la termofluencia.....	86
3.9. Bibliografía consultada	89
PARTE 4. ENSAYO DE IMPACTO.....	91
4.1. Introducción.....	91
4.2. Descripción secuencial del ensayo de impacto	92
4.2.1. <i>El ensayo Charpy</i>	92
4.2.2. <i>El ensayo Izod</i>	93
4.3. Fundamentos energéticos del ensayo de impacto	94
4.4. Factores fragilizantes	96
4.5. Utilización de los valores de resiliencia	96
4.6. Temperatura de transición dúctil-frágil en aleaciones metálicas	98
4.7. Información facilitada por los péndulos instrumentados	103
4.8. Criterio de fractura según la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal.....	105
4.9. Bibliografía consultada	110
PARTE 5. ENSAYO DE FATIGA.....	111
5.1. Introducción.....	111
5.2. Descripción secuencial del ensayo de fatiga	112
5.2.1. <i>Ciclos de tensión</i>	113
5.2.2. <i>Ensayo clásico de fatiga: curvas de Wöhler o curvas S-N</i>	114
5.3. Ciclo de histéresis de cargas cíclicas	118
5.4. Factores que afectan a la vida a fatiga de los materiales	121
5.5. La fatiga en la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal	122
5.6. Bibliografía consultada	125
PARTE 6. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	127
6.1. Introducción.....	127
6.2. Clasificación de los ensayos no destructivos	128
6.3. Técnicas para la detección de defectos superficiales	128
6.3.1. <i>Apreciación o inspección visual</i>	128
6.3.2. <i>Inspección por láser</i>	129
6.3.3. <i>Líquidos penetrantes</i>	129
6.3.4. <i>Partículas magnéticas</i>	130
6.4. Técnicas para la detección de defectos internos	132
6.4.1. <i>Radiología industrial</i>	132
6.4.2. <i>Ultrasonidos</i>	135
6.4.3. <i>Corrientes inducidas, parásitas o de Foucault</i>	137
6.4.4. <i>Emisión Acústica</i>	139
6.5. Tamaño de fisura mínimo detectable mediante ensayos no destructivos.....	139
6.6. Fiabilidad en la detección de fisuras mediante los ensayos no destructivos ..	140
6.7. Bibliografía consultada	141
ANEXO 1. Tabla de equivalencia entre distintas escalas de dureza.....	143
ANEXO 2. Propiedades mecánicas de diversos tipos de aceros en función de la temperatura de revenido.....	145

PARTE 1. EL ENSAYO DE TRACCIÓN

1.1. Introducción

El ensayo de tracción es, con mucho, el ensayo mecánico más importante y proporciona la información más completa de la conducta mecánica que cabe esperar de un material sometido a un estado de tensión uniaxial; estado sencillo que se elige ante las dificultades de aplicar otros estados de tensión aunque éstos reproduzcan mejor las situaciones reales de servicio de los materiales ensayados. A través de este ensayo es posible caracterizar las siguientes propiedades tecnológicas:

- **resistencia mecánica** del material, que se evalúa mediante el límite de cedencia para metales y polímeros; mediante la resistencia a tracción para cerámicas sometidas a tracción; y mediante la tensión de fallo para materiales compuestos. Todos estos parámetros se utilizan para la selección de materiales y para el diseño y dimensionado de componentes y estructuras.
- **rigidez** intrínseca del material, expresada por la medida del módulo de Young - **E** -. Este parámetro es, igualmente, parámetro de selección y de diseño.
- **ductilidad** del material, evaluada como alargamiento porcentual a fractura - **A%** - o como estricción - **Z%** -. Ambos parámetros solamente se utilizan para la selección de materiales.
- **tenacidad** del material, que definida como la energía por unidad de volumen que absorbe el material hasta la fractura puede evaluarse mediante el módulo de tenacidad. Éste es un parámetro auxiliar en selección de materiales.
- **módulo de resiliencia**, que definida como la máxima energía elástica acumulada por el material hasta alcanzar su límite de cedencia, se utiliza para selección de materiales y en diseño para la fabricación de muelles y resortes.

En el mismo ensayo de tracción y utilizando los dispositivos adecuados para medir las deformaciones longitudinal y transversal (habitualmente mediante técnicas de extensometría eléctrica), es posible determinar el coeficiente de Poisson - **v** - y, aplicando las expresiones [1.1] y [1.2], calcular el valor del módulo de rigidez - **G** - y del módulo de compresibilidad - **K** - en materiales isótropos.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad [1.1]$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad [1.2]$$

Por tanto, el ensayo de tracción con la ayuda de los dispositivos y las técnicas experimentales adecuados puede proporcionar un volumen de información realmente importante.

1.2. Descripción secuencial del ensayo de tracción técnico

En el ensayo de tracción técnico se aplica una tensión de tracción uniaxial creciente a velocidad moderada a la vez que se registra el alargamiento que experimenta el material hasta el momento en el que se produce la fractura. Debido a la moderada velocidad de aplicación de la fuerza se considera que el ensayo de tracción técnico es cuasiestático. En estas condiciones, el tiempo necesario para realizar un ensayo de tracción completo normalmente oscila entre algunos segundos y varios minutos y, tal como se manifiesta en la Parte 3 del volumen sobre Conceptos Fundamentales⁽¹⁾, aproximadamente el 90% del trabajo mecánico efectuado sobre la probeta de material se disipa en forma de calor. Los metales disipan este calor con relativa facilidad y sin que se produzca un incremento significativo de temperatura, pero no ocurre lo mismo con los polímeros o las cerámicas, que presentan una baja conductividad térmica. En el caso de algunos polímeros, puede producirse un incremento significativo de la temperatura de estos materiales debido a la aplicación de un trabajo mecánico severo en un tiempo relativamente corto y, como consecuencia, la variación de las propiedades que se pretenden determinar con el ensayo de tracción técnico. Por ello, las normativas de distintos países establecen que el ensayo de tracción técnico se lleve a cabo con control de deformación, es decir, a velocidad de deformación constante.

Antes de realizar el ensayo de tracción, es necesario elegir la morfología y las dimensiones de la probeta de ensayo. En la Figura 1.1 se presenta un tipo de probeta de sección circular de una forma y dimensiones determinada de las que cabe destacar: longitud inicial o entre puntos - l_0 -, diámetro inicial - d_0 - y sección inicial - A_0 -. Para los diversos tipos de probetas normalizadas puede consultarse la normativa ASTM de USA o la EN europea.

Durante el ensayo, la máquina aplica una fuerza creciente y la probeta se va alargando hasta que se produce la fractura. El diagrama fuerza-alargamiento obtenido durante el ensayo se denomina **registro de la máquina o diagrama de la máquina**. En la Figura 1.2.a se presenta el diagrama de máquina correspondiente a un acero con 0.18%C laminado en caliente. La descripción de este diagrama pasa por comentar que la probeta de ensayo con una longitud inicial entre puntos de - l_0 - original pasa a una longitud instantánea - l - por efecto de la fuerza aplicada en aquel instante. Tal y como está descrito en la Parte 2 del volumen sobre Conceptos Fundamentales, el volumen de material no varía apreciablemente cuando se deforma y, por lo tanto, si la probeta se alarga, su diámetro y su sección disminuyen y la sección instantánea (A) varía durante el ensayo. En el caso considerado, durante la primera etapa del ensayo existe una proporcionalidad entre la fuerza aplicada y el alargamiento producido, y no se observan alteraciones macroscópicas en la

1. C.Núñez, A.Roca, J.Jorba. Comportamiento mecánico de los materiales. Volumen 1: Conceptos fundamentales. Edicions Universitat de Barcelona. Barcelona. 2002.

forma de la probeta puesto que la deformación es muy pequeña⁽¹⁾. Si en este punto se retira la carga, la probeta cede la energía elástica acumulada y el material se recupera; el cursor del diagrama desciende hasta el origen, quedando la probeta sin carga y prácticamente con las mismas dimensiones originales (comportamiento elástico). En el punto P finaliza el tramo de proporcionalidad directa (comportamiento hookiano del material).

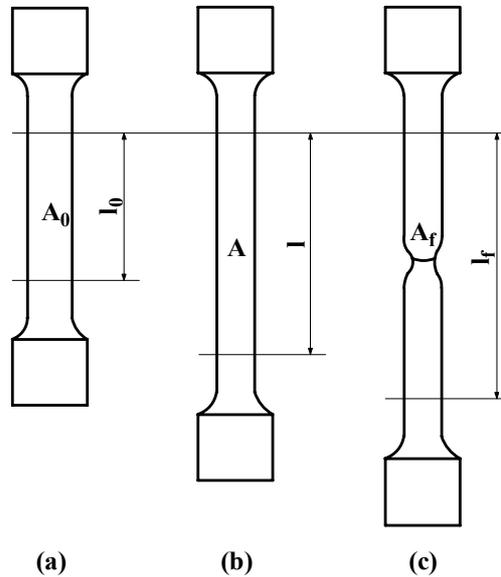


Figura 1.1. Morfología de probeta para el ensayo de tracción: a) dimensiones originales; b) dimensiones durante el ensayo (etapa de deformación uniforme); c) dimensiones finales (morfología para aleaciones metálicas).

Al seguir aplicando la carga, cuando ésta alcanza el valor de F_S , la probeta cede bruscamente y la fuerza que ejerce la máquina cae al valor del punto I, siendo ahora necesaria una fuerza menor - F_I - para seguir deformando.

Si desde el punto I se aumenta la fuerza aplicada, la probeta experimenta una deformación plástica uniforme, pero cualquier aumento posterior en la deformación del material necesita de un aumento de la fuerza aplicada. Este tipo de comportamiento se conoce como **endurecimiento por deformación**. Después de alcanzar el punto M, el registro toma la forma que aparece en el tramo M-R del diagrama de la Figura 1.2.a. A partir de este punto aparece una disminución localizada de la sección de la probeta, denominada **estricción**, apreciable a simple vista y que evoluciona hasta que se produce la fractura del material (punto R del diagrama). En este momento, el material relaja bruscamente la energía elástica acumulada durante el ensayo.

A partir de los pares de valores $F - \Delta l$ obtenidos durante el ensayo de tracción y que constituyen el diagrama de máquina, puede determinarse el **diagrama convencional** mediante las expresiones:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \tag{1.3}$$

1. En esta etapa, los mayores alargamientos se obtienen para los polímeros que presenta los menores valores del módulo de Young, es decir, son los materiales menos rígidos.

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad [1.4]$$

donde - σ - corresponde a la tensión convencional o ingenieril y - e - corresponde a la deformación lineal media o convencional. En la Figura 1.2.b se presenta el diagrama convencional obtenido a partir del diagrama de máquina del mismo acero anterior. Es fácil apreciar la similitud entre ambos diagramas que es más evidente si se selecciona la escala gráfica adecuada. En este caso, los puntos singulares del diagrama de máquina correspondientes a las ordenadas F_P , F_S , F_I , F_M , y F_R se corresponden con los valores de las tensiones convencionales características:

σ_P	Límite de proporcionalidad
σ_S	Límite de cedencia superior
σ_I	Límite de cedencia inferior
σ_M	Resistencia máxima (Resistencia a la tracción)
σ_R	Tensión de fractura convencional

La existencia de un límite de cedencia superior e inferior se presenta por ejemplo en un acero con bajo porcentaje de carbono, pero en la mayoría de los materiales estos dos puntos se confunden en uno sólo y la tensión correspondiente a ese valor común se define como límite de cedencia y se representa por - σ_0 -.

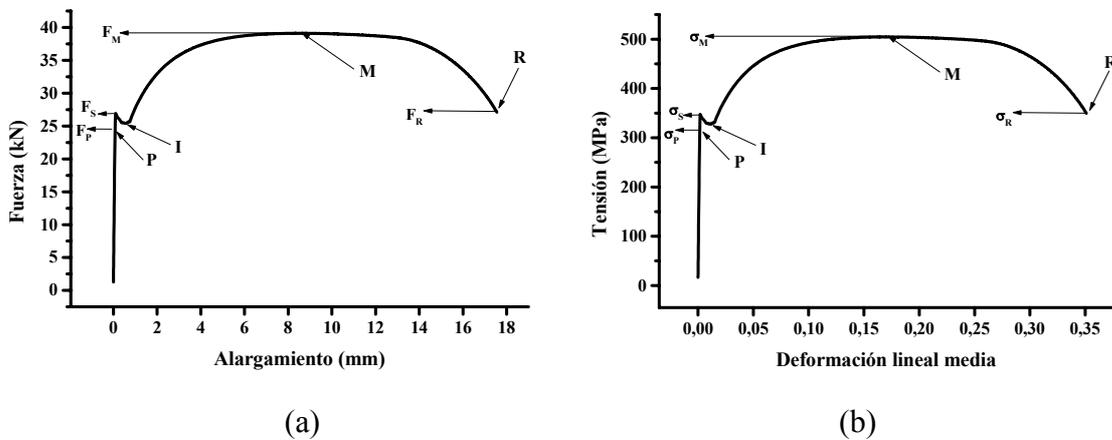


Figura 1.2. a) Diagrama de máquina de un acero de bajo carbono⁽¹⁾ (0.18% C); b) Diagrama convencional del mismo acero⁽¹⁾.

La Figura 1.3.a⁽²⁾ y la Figura 1.3.b⁽¹⁾ muestran los diagramas convencionales del acero EN C45E después del tratamiento térmico de temple y de una laminación en caliente, respectivamente. La práctica totalidad de los materiales metálicos presentan un comportamiento mecánico intermedio entre ambos casos extremos.

1. I.Mejía. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona. 2002.

2. I.Fonseca, J.A.Benito, I.Mejía, J.Jorba, A.Roca. Rev. Metal. Madrid, **38** (2002), 249-255.

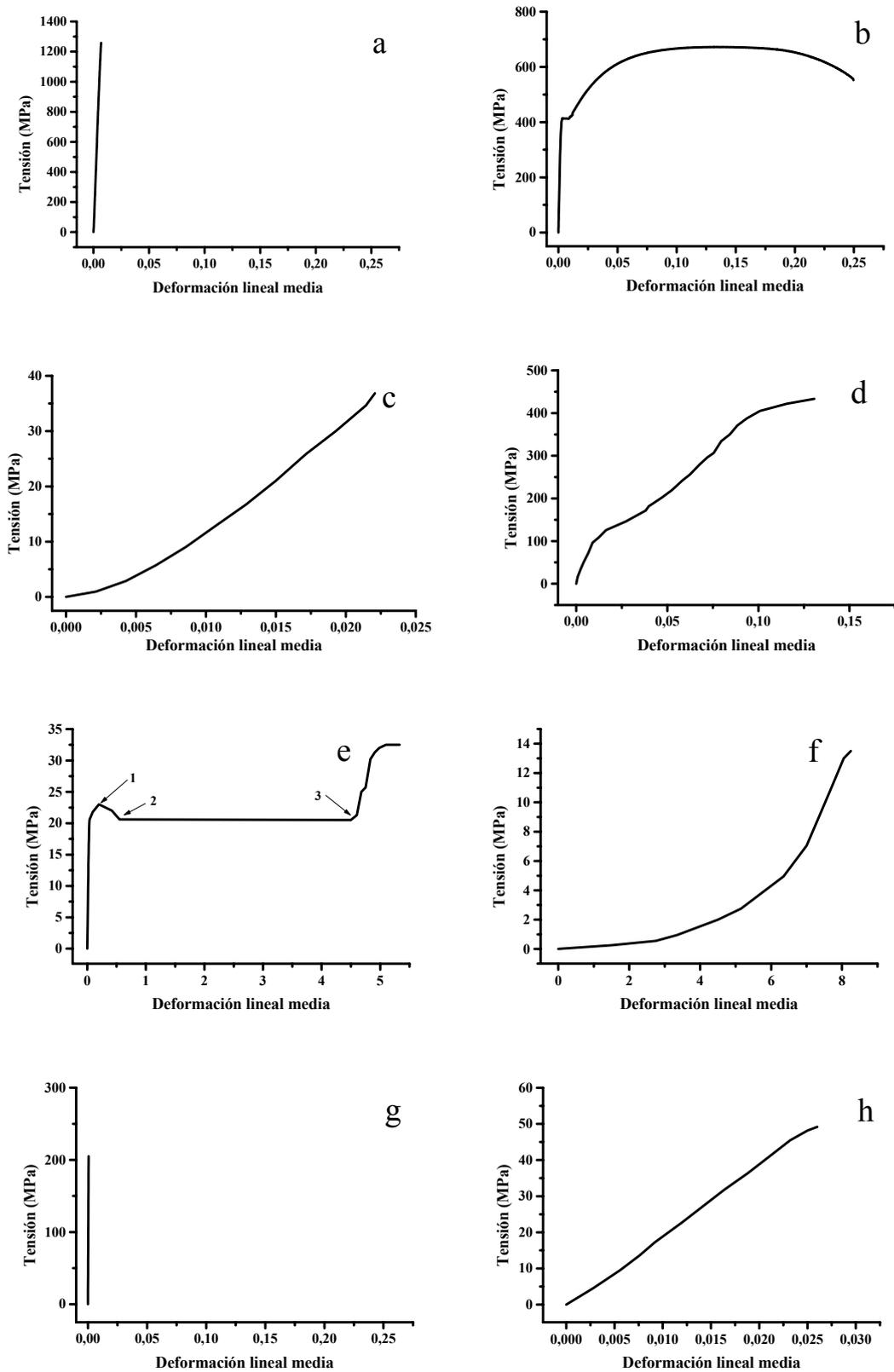


Figura 1.3. Diagrama convencional para distintos materiales: a) acero EN C45E en estado de temple; b) acero EN C45E laminado en caliente; c) poliestireno; d) poliéster pre-orientado; e) polipropileno; f) caucho natural; g) alúmina 99%; h) resina epoxi reforzada por fibra de vidrio.

La Figura 1.3.c⁽¹⁾ muestra el diagrama convencional de tracción del poliestireno en el que se observa el comportamiento elástico y proporcional del polímero hasta que se produce la fractura sin deformación plástica apreciable. Este diagrama es representativo del comportamiento de los polímeros termoplásticos ensayados por debajo de su temperatura de transición vítrea - T_g -. La ausencia de deformación plástica se debe a la gran dificultad para que las macromoléculas se desplacen unas respecto de las otras en estas condiciones de temperatura donde la energía asociada al conjunto de enlaces de Van der Waals entre macromoléculas es comparativamente importante.

Los polímeros termoestables presentan un comportamiento mecánico del mismo tipo al del poliestireno aunque en este caso durante la polimerización se han establecido enlaces covalentes entre las moléculas precursoras del polímero. Como consecuencia se ha formado una red tridimensional de enlaces covalentes que no permite el desplazamiento de una parte del material respecto de la otra. Es decir, el conjunto se comporta como un sólido rígido sin deformación plástica posible.

En la Figura 1.3.d⁽²⁾ se presenta el diagrama convencional del poliéster preorientado. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que en la dirección de orientación de las cadenas del polímero, la resistencia mecánica de este material, expresada como σ_M , puede alcanzar valores cercanos a 500 MPa; es decir, del mismo nivel a la resistencia mecánica de los aceros de baja resistencia y permite su utilización como sustitutivo de este tipo de aceros en flejes para embalajes.

La Figura 1.3.e⁽¹⁾ muestra el diagrama de tracción del polipropileno donde se observa una primera disminución de tensión una vez alcanzado el límite de cedencia del material (1). Este hecho se debe al inicio en la orientación de las macromoléculas en la dirección de aplicación del esfuerzo con la consiguiente disminución localizada de sección (estricción) en el material (2). Este proceso de estricción se propaga a lo largo de la probeta, hecho que coincide con la estabilización de la tensión convencional, aunque con un incremento de la tensión real dada la disminución significativa de la sección del material (3). Finalmente el material rompe después de un cierto incremento de la fuerza y después de un alargamiento total próximo al 600%. Este comportamiento es representativo de los polímeros termoplásticos cuando se encuentran por encima de su temperatura de transición vítrea en la que las restricciones del movimiento entre macromoléculas disminuyen tanto más cuanto más elevada sea la temperatura. Este hecho pone de manifiesto que los materiales termoplásticos endurecen por trabajo mecánico pero por un mecanismo distinto al de los metales.

La Figura 1.3.f incluye el diagrama convencional de un caucho. La morfología de la curva pone de manifiesto la falta de proporcionalidad directa entre tensión aplicada y deformación producida en el campo elástico, la baja rigidez del material evaluada a partir del valor de su módulo de Young y el gran alargamiento elástico experimentado por el material antes de que se produzca la fractura. Esta gran deformación elástica se explica porque existen algunos anclajes entre las macromoléculas del polímero que impiden su desplazamiento pero las zonas no ancladas se encuentran más o menos enrolladas sobre sí mismas. Esta distribución permite importantes alargamientos elásticos cuando se aplican

1. A.Roca. Informe privado. 2002.

2. J.A.Benito, J.Jorba, A.Roca. Informe privado. 2001.

esfuerzos moderados, pero cuando la mayoría de las macromoléculas están desenrolladas y prácticamente alineadas en la dirección del esfuerzo aplicado se produce la fractura del material sin deformación plástica apreciable porque las moléculas no pueden desplazarse unas respecto de otras.

La Figura 1.3.g muestra el diagrama convencional de la alúmina, material cerámico de ingeniería. Se observa el claro comportamiento frágil de este tipo de materiales, con elevada rigidez y sin deformación plástica apreciable hasta el momento de producirse la fractura.

La Figura 1.3.h⁽¹⁾ presenta el diagrama convencional de un material compuesto de resina epoxi que actúa como matriz y fibra de vidrio que actúa como reforzante. El comportamiento mecánico corresponde a un material frágil con elevada resistencia mecánica. La presencia de la fibra de vidrio incrementa la rigidez y la resistencia mecánica del material de la matriz, y este efecto es más acusado cuanto mayor sea el porcentaje volumétrico de fibra en el conjunto del material.

1.3. Resistencia mecánica obtenida a través del ensayo de tracción

Como ya se ha indicado, el límite de cedencia es un parámetro que permite evaluar la resistencia mecánica de los materiales ensayados a tracción. Es importante el conocimiento de un parámetro de este tipo para dimensionar correctamente las estructuras y los componentes de máquinas de tal manera que soporten los esfuerzos inherentes a sus aplicaciones, es decir, no fallen por deformación plástica. Pero también es cierto lo contrario, es decir, el correcto conocimiento de este parámetro permite diseñar y dimensionar componentes para que se deformen plásticamente cuando ocurre algún accidente o malfuncionamiento de los equipos evitando, así, males mayores.

- De lo anterior se deduce la importancia asociada al conocimiento del valor del límite de cedencia de los materiales, pero la correcta determinación experimental de este parámetro no es evidente porque la propia definición de límite de cedencia genera imprecisión en su medida.
- Si se define el **límite de cedencia** como el máximo valor de tensión hasta la que se mantiene el comportamiento elástico del material se asume una conducta rigurosamente elástica del material hasta alcanzar el límite de cedencia y una pérdida de este comportamiento una vez superado este valor. Pero una conducta rigurosamente elástica supondría que una vez retirada la carga aplicada, el material recuperase exactamente su forma original y el proceso de carga y descarga tuviese lugar sin ninguna absorción de energía; es decir, se mantuviese el comportamiento termodinámicamente reversible del proceso, pero este aspecto es muy difícil de asegurar en sólidos reales.
- Debido a esta limitación experimental, puede definirse el **límite de cedencia** como la máxima tensión que una vez aplicada y retirada no produce deformaciones permanentes apreciables, o dicho de otro modo, aquel valor de tensión al cual el material comienza a ceder plásticamente. Tanto en esta definición como en la anterior

1. J.A.Benito, J.Jorba, A.Roca. Informe privado. 2001.

parece que el material debiera tener una tensión crítica que separase su conducta elástica de la conducta plástica, pero este punto de cambio brusco en el comportamiento realmente no existe y es más un intento de simplificación que una cualidad esencial de los materiales.

- En realidad el tránsito entre la conducta elástica macroscópica y la conducta plástica no es puntual sino que es un tránsito gradual en la mayoría de los metales y aleaciones y en aquellos polímeros que tengan habilitados los mecanismos de la deformación plástica. En el caso de materiales metálicos sometidos a un esfuerzo creciente, se propagan las dislocaciones existentes y se generan nuevos defectos casi desde los primeros valores de esfuerzo aplicado. En este contexto puede definirse un **límite de cedencia verdadero** como la tensión a la cual comienzan a moverse las dislocaciones y el retículo cristalino se deforma, pero este límite de cedencia que corresponde a una tensión muy baja no tiene interés desde el punto de vista práctico en diseños macroscópicos.
- Por otra parte, los términos “deformaciones (...) apreciables”, “comenzar a ceder” u otros similares no son términos cuantificables. Esta situación se agrava porque el tránsito entre el comportamiento elástico y plástico no es brusco. Por tanto, es difícil precisar cuando el material comienza a deformarse irreversiblemente y el valor del límite de cedencia obtenido depende claramente de la sensibilidad de los equipos de medida utilizados durante la determinación. En este sentido, se ha comprobado que el valor del límite de cedencia así definido disminuye cuando la sensibilidad del equipo utilizado es mayor. Lo mismo puede decirse del límite de proporcionalidad.
- En definitiva, la respuesta de los materiales a los esfuerzos aplicados es una realidad mucho más compleja que la que puede abordarse desde definiciones simples y el resultado final depende en gran medida de la sensibilidad del equipo de ensayo utilizado. Debido a esta complejidad existen distintas aproximaciones al fenómeno que abocan a distintas formas de determinar el límite de cedencia macroscópico de un material. En algunas de estas aproximaciones se define un **límite de cedencia macroscópico** como la tensión que una vez aplicada y retirada deja una deformación plástica de una cuantía determinada, en otras se expresa como la tensión que produce un determinado valor de deformación. Es usual que los procedimientos experimentales utilizados para la determinación de estos valores de tensión estén descritos en normas y que éstas también incluyan las definiciones y la terminología específica que debe utilizarse. Esta terminología puede depender del país de origen de la norma, por lo que en la bibliografía pueden aparecer distintos términos para referirse a la misma propiedad del material y a un mismo modo de determinación.

Así, la norma española UNE 7-474-92, que corresponde a la versión oficial de la norma europea EN 10 002-1, utiliza el término **límite de alargamiento remanente - R_r** para definir aquella tensión que una vez aplicada y retirada completamente produce una deformación permanente equivalente a un determinado porcentaje de la longitud inicial ensayada. Usualmente este porcentaje es el 0.2% y el límite de alargamiento remanente del 0.2% se representa por **$R_{r0.2}$** . En la Figura 1.4.a se expone el procedimiento para la determinación gráfica de este valor.

La misma norma española define el término **límite elástico convencional - Rp** - como el valor de tensión al que corresponde un alargamiento no proporcional igual a un porcentaje preestablecido de la longitud inicial de la probeta utilizada. Normalmente este valor del porcentaje es el 0.2%. La misma norma describe que la determinación se realiza sobre el diagrama de máquina trazando una línea paralela al tramo recto del diagrama cuya intersección con el eje de abscisas sea el 0.2% de la longitud de ensayo. El valor del límite elástico convencional buscado corresponde a la ordenada del punto de intersección entre la paralela y la curva del diagrama dividido por el valor de la sección inicial de la probeta utilizada. Aunque la norma no lo describe explícitamente, también puede determinarse el valor del límite elástico convencional del 0.2% como el valor de la ordenada del punto de intersección entre la curva del diagrama convencional y una paralela cuya intersección con el eje de abscisas sea $e = 0.002$. En la Figura 1.4.b se representa el procedimiento para la determinación gráfica del límite elástico convencional del 0.2% ($R_{p0.2}$) para un acero. Los términos **proof stress of non-proportional elongation** (Reino Unido) y el **offset yield strength** (USA), que se representan por $\sigma_{0.2}$, describen conceptos y metodologías de determinación equivalentes al límite elástico convencional descrito en la norma UNE.

La misma norma UNE define **límite de extensión - Rt** - como la tensión que produce una extensión total igual a un determinado porcentaje de la longitud inicial. Normalmente este porcentaje es del 0.5%. Esta definición es útil en aquellos casos donde es difícil precisar la pendiente del tramo elástico porque el material ensayado no presenta una zona de comportamiento elástico lineal, sino un comportamiento no proporcional desde cargas muy bajas. La norma describe que el valor del límite de extensión corresponde al valor de la ordenada del punto de intersección entre la curva del diagrama convencional y una recta paralela al eje de ordenadas que corta al eje de abscisas en el valor de deformación que corresponde al alargamiento preestablecido (Figura 1.4.c). Esta definición es de aplicación habitual en cobre y sus aleaciones.

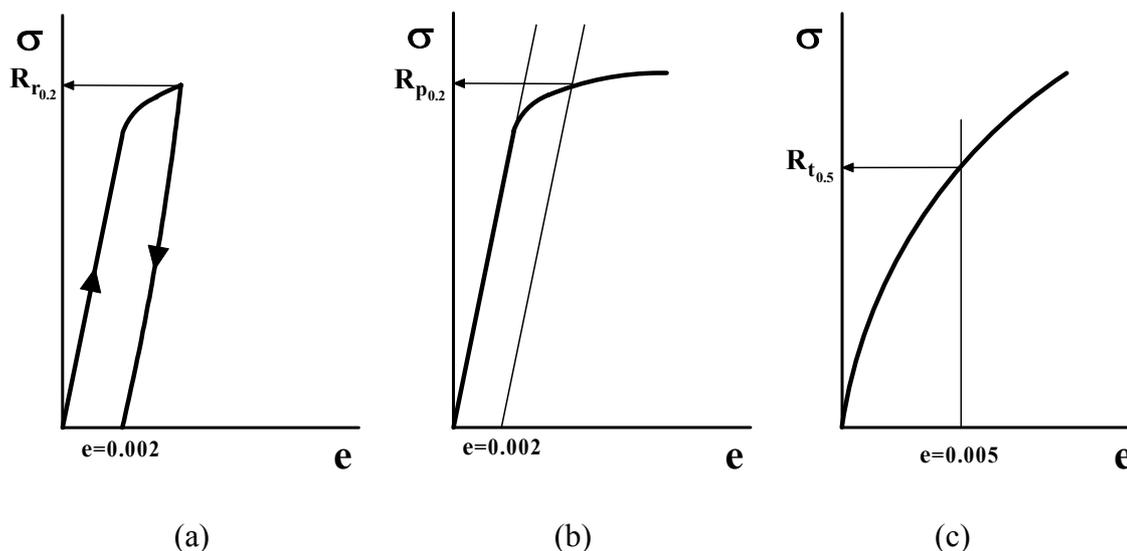


Figura 1.4. a) Límite de alargamiento remanente del 0.2%; b) Límite elástico convencional del 0.2%; c) Límite de extensión del 0.5%.

El límite de cedencia en polímeros se determina de forma similar a la utilizada para metales. En las normas ASTM y EN se define como el primer esfuerzo o tensión para el

cual tiene lugar un aumento de la deformación sin necesidad de aumentar el esfuerzo aplicado. A efectos de diseño, Ashby⁽¹⁾ propone que la resistencia mecánica se mida a través del denominado límite de cedencia del 1%, medido de la misma forma que la utilizada para la determinación del límite de extensión del 0.5%. En los materiales cerámicos, la resistencia mecánica a tracción se cuantifica mediante el valor de resistencia a la tracción obtenida en el citado ensayo. Finalmente, el parámetro de resistencia mecánica en materiales compuestos también suele estimarse mediante la resistencia a la tracción, también denominada tensión de fallo.

Sea cual sea la definición utilizada para evaluar el **límite de cedencia macroscópico**, en todos ellos se somete el material a una carga creciente midiendo simultáneamente las deformaciones experimentadas. Para ello se requieren sistemas de medida del alargamiento o de la deformación producida y de la fuerza aplicada con precisión suficiente. En el primer caso es habitual utilizar extensómetros mecánicos o eléctricos (aunque los eléctricos están más extendidos porque permiten la captación automática de los valores) fijados directamente a la probeta de ensayo. La fuerza aplicada se determina mediante la célula de carga de la misma máquina de ensayo. Una vez obtenidos los pares de valores que permiten conocer el diagrama de máquina, se determina el diagrama convencional y de forma gráfica el valor del límite según alguno de los procedimientos antes descritos.

En la Tabla 1.1 se agrupan los valores del límite de cedencia para distintos materiales expresado según el procedimiento habitual de determinación. El límite de cedencia en materiales metálicos y en polímeros es parámetro de selección de materiales y de diseño, como también lo es la resistencia a la tracción para cerámicas y compuestos que van a trabajar en servicio a tracción.

1.4. La rigidez intrínseca de los materiales: el módulo de Young

El concepto y significado físico del módulo de Young se ha introducido en la Parte 2 del primer volumen. Allí se ha indicado que este parámetro es una medida de la rigidez intrínseca de los materiales. Debido a que el módulo de Young corresponde a la pendiente de la zona de proporcionalidad directa entre la tensión y la deformación, su determinación utiliza parte de los valores experimentales obtenidos durante el ensayo de tracción. El valor numérico puede determinarse directamente de la pendiente del tramo recto del diagrama convencional o por regresión lineal que permita obtener la recta que mejor se ajuste a los pares de valores tensión-deformación obtenidos experimentalmente. Si durante el citado ensayo también se miden las deformaciones transversales es posible determinar el valor del coeficiente de Poisson, puesto que para un material isótropo:

$$e_y = e_z = -\nu \cdot e_x \quad [1.5]$$

Además del procedimiento citado, es posible determinar la cuantía del módulo de Young mediante técnicas de ultrasonidos y aprovechando la relación entre la velocidad de propagación de ondas sónicas y la rigidez de un material. También puede determinarse mediante ensayos a flexión, etc. En la Tabla 2.9 del volumen 1 se presentan valores de módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo de rigidez para distintos materiales. El

1. M.F.Ashby. Materials Selection in Mechanical Design. Pergamon Press. Oxford. UK.1992.

Tabla 1.1. Valores de límite de cedencia y resistencia a la tracción para distintos materiales

Metales y aleaciones			
Material	Límite de cedencia (MPa)	Material	Límite de cedencia (MPa)
acero 0.15% C laminado caliente	315	aluminio 99.5% recocido	28
acero 0.15% C recocido	285	aluminio-cinc (7075) recocido	105
acero 0.40% C laminado caliente	415	aluminio-cinc (7075) madurado artificialmente	500
acero 0.40% C recocido	350	titanio 99% recocido	170
acero 0.40% C templado/revenido 200°C	590	Ti-6Al-4V recocido	830
acero 0.40% C templado/revenido 650°C	430	acero 51CrV4 templado/revenido	>900
Polímeros			
Material	Límite de cedencia (MPa)	Material	Límite de cedencia (MPa)
poliamida (nylon 6.6)	50-90	polipropileno PP	20-40
poliéster	55-60	poliestireno PS	30-80
polietileno baja densidad LDPE	4-16	resina epoxi	20-80
polietileno alta densidad HDPE	20-40	resina fenólica	48-55
		poliéster insaturado	40-90
Cerámicas			
Material	Resistencia a la tracción (MPa)	Material	Resistencia a la tracción (MPa)
alúmina 99% Al ₂ O ₃	205	mullita 3Al ₂ O ₃ .2SiO ₂	110
circonia estabilizada ZrO ₂	350	esteatita MgO.SiO ₂	64
carburo de silicio sinterizado SiC	170	carburo de titanio TiC	240-275

módulo de elasticidad o de Young es un parámetro de selección de materiales y de diseño de componentes.

Ejercicio 1.1. En la Tabla 1.2 se presentan los valores de fuerza F y deformación axial e_x obtenidos por extensometría eléctrica⁽¹⁾ durante un ensayo a tracción de un hierro puro (hierro Armco, 0.002%C) en estado de recocido. La sección original de la probeta ensa-

1. J.A.Benito. Tesis de Licenciatura. Universitat de Barcelona. 1996.

yada fue de 81.0 mm^2 . Representétese gráficamente los valores de tensión frente a deformación y determínese el límite de cedencia del 0.2% y el módulo de Young del hierro Armco. (Nota: sólo se adjuntan los valores del ensayo de tracción necesarios para determinar estos dos parámetros)

Tabla 1.2. Valores de fuerza y deformación axial obtenidos mediante ensayo de tracción

F(kN)	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00
$e_x \cdot 10^6$	59.0	118	178	238	300	361	422	484
F(kN)	9.00	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	14.5	15.0
$e_x \cdot 10^6$	546	625	715	800	905	1050	1400	3000

Cálculo de la tensión correspondiente al primer punto experimental:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{1000 \text{ N}}{81.0 \text{ mm}^2} = 12.3 \text{ MPa}$$

En la Tabla 1.3 se agrupan los valores de tensión obtenidos por un cálculo similar y los correspondientes valores de las deformaciones.

Tabla 1.3. Valores de tensión y deformación axial obtenidos en un ensayo de tracción

σ(MPa)	12.3	24.7	37.0	49.4	61.7	74.0	86.4	98.7
$e_x \cdot 10^6$	59.0	118	178	238	300	361	422	484
σ(MPa)	111	123	136	148	160	173	179	185
$e_x \cdot 10^6$	546	625	715	800	905	1050	1400	3000

En la Figura 1.5 se representan gráficamente los valores de la Tabla 1.3. En esta gráfica se ha trazado una paralela a la recta que corta el eje de abscisas en el punto en el que $e = 0.002$. El punto de corte de esta paralela con el tramo recto del diagrama convencional permite determinar el límite de cedencia macroscópico del material expresado como límite elástico convencional del 0.2%. El valor obtenido es de 185 MPa.

Para determinar el valor del módulo de Young se efectúa una regresión lineal de los pares de valores tensión-deformación que se encuentran justo hasta el límite de proporcionalidad (se lleva a cabo la regresión lineal introduciendo los puntos experimentales, hasta que el coeficiente de regresión empieza a disminuir). El valor de la pendiente corresponde al valor del módulo de Young o de elasticidad del hierro Armco en estado de recocido. El valor obtenido es de 202.4 GPa.

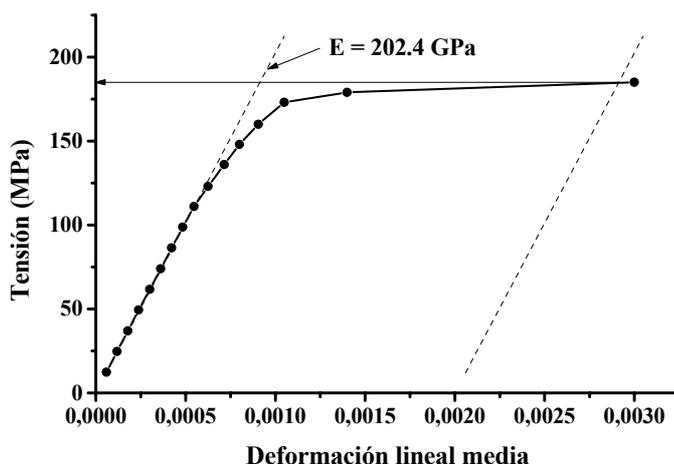


Figura 1.5. Determinación del límite de cedencia y del módulo de Young de un hierro Armco en estado de recocido.

Ejercicio 1.2. En la Tabla 1.4 se dan los valores de fuerza F y alargamiento Δl obtenidos al ensayar a tracción un poliéster pre-deformado. La sección original de la probeta ensayada fue de 13.7 mm^2 . Calcúlense los valores de las correspondientes tensiones, represéntese gráficamente los valores de tensión frente a deformación y determínese el límite de cedencia del 1% y el módulo de Young del citado poliéster. (Nota: sólo se adjuntan los valores del ensayo de tracción necesarios para determinar estos dos parámetros).

Tabla 1.4. Valores de fuerza y alargamiento axial obtenidos mediante ensayo de tracción

$F(N)$	220	490	700	980	1320	1480
$\Delta l (mm)$	0.034	0.129	0.204	0.326	0.449	0.612
$F(N)$	1720	2000	2350	2490	2770	3000
$\Delta l (mm)$	0.816	1.36	1.90	1.99	2.35	2.62

En la Tabla 1.5 se dan los valores de tensión obtenidos por un cálculo similar al del ejercicio 1.1 y los correspondientes valores de las deformaciones.

En la Figura 1.6 se representan gráficamente los valores de la Tabla 1.5. En esta gráfica se ha trazado una perpendicular al eje de abscisas y que corte el mismo para $e = 0.01$. El punto de corte de esta paralela con la recta de tracción da el límite de cedencia del 1%. El valor obtenido es de 100 MPa.

Por otra parte se efectúa una regresión lineal de los pares de valores tensión-deformación que se encuentran justo hasta el límite de proporcionalidad (se lleva a cabo la regresión lineal introduciendo los puntos experimentales, hasta que el coeficiente de regresión empieza a disminuir). El valor de la pendiente es justamente el valor del módulo de Young o de elasticidad del poliéster pre-orientado. El valor obtenido es de 9.5 GPa.