

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES

Volumen II. Ensayos mecánicos

Ensayos no destructivos

Carlos Núñez
Antoni Roca
Jordi Jorba

Departamento de Ciencia de los Materiales
e Ingeniería Metalúrgica

Segunda edición



Universitat
de Barcelona

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES

Volumen II. Ensayos mecánicos.
Ensayos no destructivos

Carlos Núñez
Antoni Roca
Jordi Jorba

Departamento de Ciencia de los Materiales
e Ingeniería Metalúrgica

Índice

PRÓLOGO A LA PRIMERA EDICIÓN	9
PRÓLOGO A LA SEGUNDA EDICIÓN	11
Parte 1	
ENSAYO DE TRACCIÓN	15
1.1 Introducción	15
1.2 Descripción secuencial del ensayo de tracción técnico	16
1.3 Resistencia mecánica obtenida a través del ensayo de tracción	21
1.4 La rigidez intrínseca de los materiales: el módulo de Young	24
1.5 La ductilidad de los materiales: el alargamiento porcentual a la fractura	27
1.6 La tenacidad de los materiales: módulo de resiliencia y módulo de tenacidad	32
1.7 Diagrama de tracción real	35
1.8 Bibliografía consultada	41
Parte 2	
ENSAYO DE COMPRESIÓN. ENSAYO DE FLEXIÓN. ENSAYO DE DUREZA	43
2.1 Ensayo de compresión	43
2.1.1 Descripción secuencial del ensayo de compresión	43
2.1.2 La resistencia mecánica a través del ensayo de compresión	47
2.1.3 La rigidez intrínseca de los materiales: el módulo de Young	47
2.1.4 Grado de deformación plástica a compresión	47
2.1.5 Ensayo Ford: compresión en estado de deformación plana	47
2.2 Ensayo de flexión	49
2.2.1 Determinación de la rigidez y la resistencia mecánica a flexión	50
2.2.2 Determinación de la ductilidad de los materiales	52
2.3 Ensayo de dureza	52
2.3.1 Dureza Brinell	53
2.3.2 Dureza Vickers	58
2.3.3 Dureza Meyer	60
2.3.4 Dureza Rockwell	61
2.3.5 Microdureza	65
2.3.6 Ultramicrodureza	66
2.3.7 Dureza Shore	67
2.3.8 Relación entre las medidas de dureza obtenidas en escalas diferentes	68
2.3.9 Ejemplos de aplicabilidad de la dureza	70
2.3.9.1 Efecto del contenido en carbono y del estado de tratamiento en aceros al carbono	70
2.3.9.2 Efecto del trabajo en frío	71
2.3.9.3 Procesado de materiales por tratamiento térmico	71
2.3.9.4 Medida de tenacidad a la fractura en cerámicas utilizando la escala de dureza Vickers ..	72
2.4 Bibliografía consultada	73

Parte 3	
ENSAYO DE TERMOFLUENCIA	75
3.1 Introducción	75
3.2 Descripción secuencial del ensayo de termofluencia	76
3.2.1 Ensayos de termofluencia	77
3.2.2 Aspectos macroscópicos del comportamiento del material a termofluencia	78
3.2.3 Aspectos microscópicos del comportamiento del material a termofluencia	79
3.3 Modelización del comportamiento a termofluencia	80
3.4 Tipos de ensayo de termofluencia	83
3.5 La termofluencia como fenómeno energéticamente activado	85
3.6 Extrapolación de los resultados de termofluencia	88
3.7 El fenómeno de la termofluencia en los polímeros	89
3.8 Desarrollo de materiales resistentes a la termofluencia	93
3.9 Bibliografía consultada	96
Parte 4	
ENSAYO DE IMPACTO. MECÁNICA DE LA FRACTURA	97
4.1 Introducción	97
4.2 Descripción secuencial del ensayo de impacto	98
4.2.1 El ensayo Charpy	98
4.2.2 El ensayo Izod	99
4.3 Fundamentos energéticos del ensayo de impacto	100
4.4 Factores fragilizantes	101
4.5 Utilización de los valores de resiliencia	102
4.6 Temperatura de transición dúctil-frágil en aleaciones metálicas	105
4.7 Información facilitada por los péndulos instrumentados	109
4.8 Criterio de fractura según la mecánica de la fractura elástica lineal	111
4.9 Bibliografía consultada	119
Parte 5	
ENSAYOS DE FATIGA	121
5.1 Introducción	121
5.2 Descripción secuencial del ensayo de fatiga	122
5.2.1 Ciclos de tensión	122
5.2.2 Ensayo clásico de fatiga: curvas de Wöhler o curvas S-N	124
5.3 Ciclo de histéresis de cargas cíclicas	127
5.4 Factores que afectan a la vida a fatiga de los materiales	130
5.5 La fatiga en la mecánica de la fractura elástica lineal	131
5.6 Bibliografía consultada	134
Parte 6	
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	135
6.1 Introducción	135
6.2 Clasificación de los ensayos no destructivos	136
6.3 Técnicas para la detección de defectos superficiales	136
6.3.1 Apreciación o inspección visual	136
6.3.2 Inspección por láser	137

6.3.3	Líquidos penetrantes	137
6.3.4	Partículas magnéticas	138
6.4	Técnicas para la detección de defectos internos	140
6.4.1	Radiología industrial	140
6.4.2	Ultrasonidos	143
6.4.3	Corrientes inducidas, parásitas o de Foucault.....	147
6.4.4	Emisión acústica	149
6.5	Tamaño de fisura mínimo detectable mediante ensayos no destructivos	150
6.6	Fiabilidad en la detección de fisuras mediante ensayos no destructivos	151
6.7	Bibliografía consultada	152

ANEXOS

1	Tabla de equivalencias entre distintas escalas de dureza	153
2	Propiedades mecánicas de diversos tipos de aceros en función de la temperatura de revenido	157
3	Preguntas tipo test multirespuesta	159

Prólogo a la primera edición

Comportamiento mecánico de los materiales está basada en los más de treinta cursos de metalurgia mecánica impartidos por el profesor Dr. Carlos Núñez Álvarez (e.p.d.) desde 1968 en la Universidad Complutense de Madrid, la Universidad de Extremadura y la 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. Al mismo tiempo, la obra también reúne la experiencia acumulada por el Dr. Jordi Jorba Peiró, primero en la Universitat de Barcelona (1983-1990), y, a partir de este año, 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 seis 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 harán posible su cuantificación. A continuación, se hace una descripción secuencial del ensayo, tanto de tipo conceptual como descriptivo, y se concluye con las referencias bibliográficas consultadas durante su redacción.

La parte 6 se inicia con los conceptos de ensayo destructivo y no destructivo, así como su aplicación en el control de calidad durante el procesado y el comportamiento en servicio. Posteriormente, se clasifican los distintos ensayos no destructivos a partir de 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 con sus soluciones y se proponen algunos ejercicios para que el alumno los resuelva y pueda completar su formación. El texto incluye 71 figuras y 36 tablas para introducir valores reales de las magnitudes consideradas y facilitar la comprensión de los conceptos presentados.

Comportamiento mecánico de los materiales está dirigida a los alumnos de las titulaciones de química e ingeniería química que amplían los conocimientos adquiridos en la asignatura de ciencia de materiales, obligatoria en ambas enseñanzas; a los que cursan 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 utilizarse 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 a pie 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 el libro.

Los Dres. Antoni Roca y Jordi Jorba quieren aprovechar la publicación de esta obra para rendir homenaje al profesor Dr. Carlos Núñez Álvarez, del quien fueron discípulos y colaboradores, y reconocerle la tarea profesional y humana desarrollada a lo largo de su vida académica en las distintas universidades en las que impartió clases y, sobre todo, por su impulso de la enseñanza y la investigación en el campo de la metalurgia y la ciencia de materiales en Barcelona durante el periodo comprendido entre 1978 y 1993.

Barcelona, octubre de 2003

Prólogo a la segunda edición

Comportamiento mecánico de los materiales en un principio se estructuró en cuatro volúmenes, de los que los dos primeros se editaron en 2002 (volumen 1: Conceptos fundamentales) y en 2004 (volumen 2: Ensayos mecánicos. Ensayos no destructivos). Los volúmenes 3 y 4 no llegaron a publicarse, debido a las profundas modificaciones que se produjeron en los nuevos estudios de grado, basados en el Espacio Europeo de Educación Superior, y a la introducción del nuevo grado en ingeniería de materiales.

Como consecuencia, se ha optado por reeditar los dos primeros volúmenes de la obra, con la inclusión en el volumen 1 de un nuevo capítulo, y en el volumen 2 de conceptos que con anterioridad se habían previsto incluir en los volúmenes 3 y 4 ya citados. Con estas nuevas premisas, en 2012 se publicó la segunda edición del primer volumen, y ahora se presenta la segunda edición del volumen 2, que consta de seis partes. En la parte 1 se lleva a cabo una descripción del ensayo de tracción y se presentan las propiedades mecánicas que se pueden determinar a través de dicho ensayo, así como los parámetros que las cuantifican. Se corresponde con la parte 1 de la primera edición. La diferencia más significativa es el cambio de la expresión «límite de cedencia» por «resistencia a la cedencia», para reflejar mejor el hecho de que no finaliza ningún comportamiento, sino que se inicia otro: la cedencia del material.

Utilizando este mismo esquema, en las partes 2 a 5 se describen las propiedades determinables a partir de otros ensayos mecánicos. La parte 2 incluye los aspectos más significativos de los ensayos de compresión, flexión y dureza. En la tercera se incluyen los ensayos de termofluencia. Las partes 2 y 3 de la segunda edición se corresponden con la segunda y la tercera de la primera edición, salvo pequeñas modificaciones.

La parte 4 consta, a su vez, de dos partes: en la primera se describe con detalle el ensayo de impacto y la información que facilita, y en la segunda se incluyen los aspectos más significativos de la mecánica de la fractura elástica lineal. Esta última parte se ha ampliado respecto a la correspondiente a la primera edición. La parte 5 se subdivide, asimismo, en dos partes. En la primera se describe el ensayo de fatiga clásico y en la segunda los aspectos más significativos de la fatiga analizada a través de la mecánica de la fractura. Se corresponde también con la parte 5 de la primera edición.

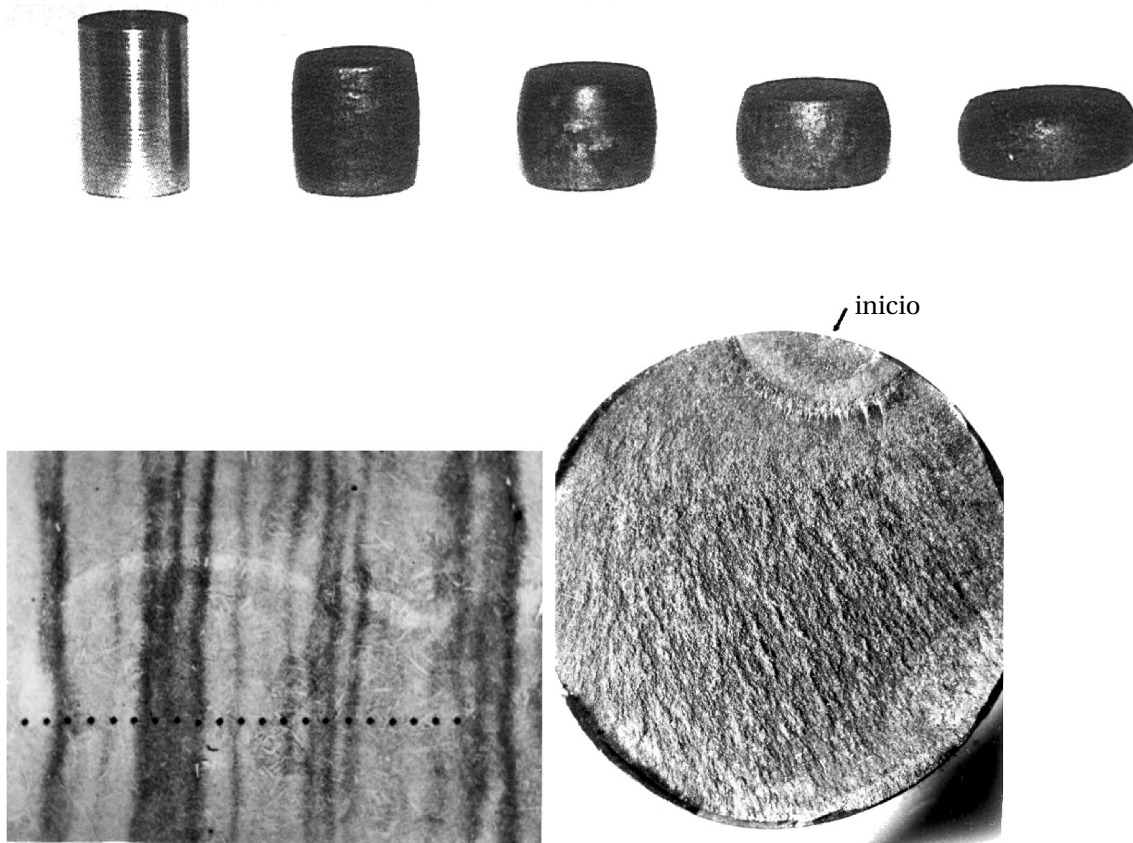
La parte 6 se inicia con el concepto de ensayo destructivo y no destructivo, así como su aplicabilidad en el control de calidad durante el procesado y el comportamiento en servicio. A continuación, se clasifican los distintos ensayos no destructivos a partir de la posibilidad de caracterización de defectos superficiales, subsuperficiales o internos, y se lleva a cabo una detallada descripción de los ensayos no destructivos más utilizados a nivel industrial. Esta parte se corresponde con la 6 de la primera edición. En esta segunda edición, la parte 6 ha sido revisada por la Sra. Ramona Bergó Soto, responsable de la sección de ensayos no destructivos de la empresa Applus. Los autores aprovechan este prólogo para agradecer encarecidamente el trabajo realizado por la Sra. Ramona Bergó.

En la segunda edición se ha mantenido el anexo 1: Tabla de equivalencia entre distintas escalas de dureza y el anexo 2: Propiedades mecánicas de diversos tipos de aceros en función de la temperatura de revenido. Como novedad se ha añadido un anexo 3, que contiene 50

preguntas tipo test multirespuesta. A través de estas preguntas, el lector podrá practicar en los conocimientos introducidos tanto en el primer volumen de la serie como en el segundo volumen.

Comportamiento mecánico de los materiales está dirigido a los alumnos de grado de las titulaciones de química e ingeniería química que amplían los conocimientos adquiridos en las asignaturas de ciencia de materiales y materiales para la ingeniería, respectivamente, obligatorias en ambas enseñanzas. Asimismo, se centra en los alumnos del grado de ingeniería de materiales, y es especialmente útil en las asignaturas de elasticidad y resistencia, y plasticidad y fractura. Por último, esta obra puede emplearse para complementar la información que sobre propiedades mecánicas presentan los libros básicos recomendados a los alumnos que cursan la asignatura de ciencia de materiales.

Barcelona, mayo de 2013



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

ENSAYO DE TRACCIÓN

1.1. Introducción

El ensayo de tracción es el ensayo mecánico más importante y el que 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 estos reproduzcan mejor las situaciones reales de servicio de los materiales ensayados. A través de este ensayo es posible determinar las siguientes propiedades tecnológicas:

- **resistencia mecánica** del material, que se evalúa mediante la resistencia a la cedencia para metales y polímeros; la resistencia a tracción para cerámicas sometidas a tracción; y 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, 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. Se trata de un parámetro auxiliar en la selección de materiales;
- **módulo de resiliencia**, que, definido como la máxima energía elástica acumulada por el material hasta alcanzar su resistencia a la cedencia, se utiliza para la 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 (por lo general mediante técnicas de extensometría eléctrica), es posible determinar el coeficiente de Poisson (ν) y, aplicando las expresiones (1.1) y (1.2), calcular el valor de los módulos de rigidez (G) y de compresibilidad (K) en los 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 adecuadas, 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 por lo general oscila entre algunos segundos y varios minutos y, tal y como se manifiesta en la parte 4 del volumen sobre Conceptos fundamentales,¹ más o menos 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 la temperatura, pero no ocurre lo mismo con los polímeros o las cerámicas, que presentan una baja conductividad térmica. En el caso de algunos polímeros, se puede producir un aumento significativo de la temperatura debido a la aplicación de un trabajo mecánico severo en un tiempo relativamente breve 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 una velocidad de deformación constante.

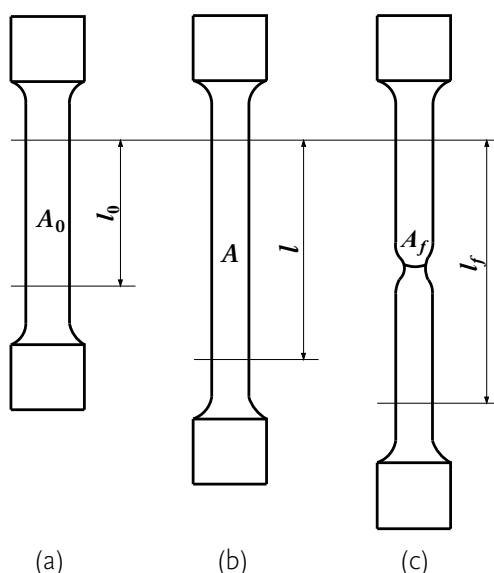


Figura 1.1. Morfología de probeta para el ensayo de tracción: a) dimensiones originales; b) dimensiones durante el ensayo (etapa de deformación uniforme); c) dimensiones finales (morfología para aleaciones metálicas).

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 determinadas entre 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 se puede consultar la normativa ASTM de Estados Unidos o la EN europea.

¹ C. Núñez; A. Roca; J. Jorba. Comportamiento mecánico de los materiales. Volumen 1: Conceptos fundamentales. 2.ª edición. Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona. Barcelona. 2012.

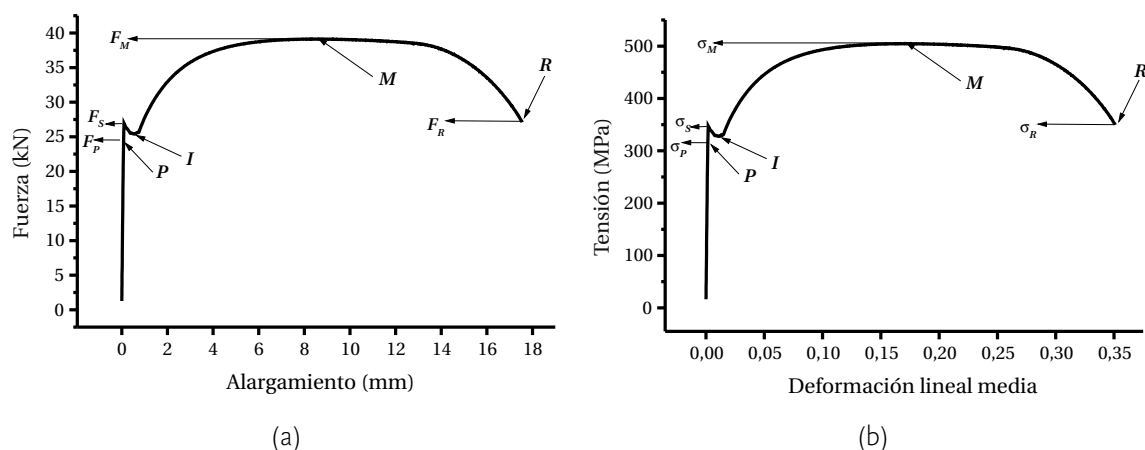


Figura 1.2. a) Diagrama de máquina de un acero de bajo carbono (0,18 % C); b) diagrama convencional del mismo acero.³

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 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 un 0,18 % C laminado en caliente. La descripción de este diagrama nos lleva a 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 se describe en la parte 2 del volumen sobre Conceptos fundamentales, el volumen de material no varía de manera apreciable 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 forma de la probeta, puesto que la deformación es muy pequeña.² 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, con lo que la probeta queda 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).

Al seguir aplicando la carga, cuando esta 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 un incremento 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 en 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.

² En esta etapa, los mayores alargamientos se obtienen en los polímeros que presentan los menores valores del módulo de Young, es decir, son los materiales menos rígidos.

³ I. Mejía. Tesis doctoral. *Op. cit.* Universitat de Barcelona. Barcelona. 2002.

A partir de los pares de valores **F-Δl** obtenidos durante el ensayo de tracción y que constituyen el diagrama de máquina, se puede determinar el **diagrama convencional** mediante las siguientes expresiones:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1.3)$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.4)$$

donde σ corresponde a la tensión convencional o ingenieril y e 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, que es más evidente si se selecciona la escala gráfica adecuada. En este caso, los puntos singulares del diagrama de máquina propios de 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	Resistencia a la cedencia superior
σ_I	Resistencia a la cedencia inferior
σ_M	Resistencia máxima (resistencia a la tracción)
σ_R	Tensión de fractura convencional

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

Las figuras 1.3.a⁴ y 1.3.b⁵ 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 presenta un comportamiento mecánico intermedio entre ambos casos extremos.

La figura 1.3.c⁶ muestra el diagrama convencional de tracción del poliestireno, en el que se observa el comportamiento elástico 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 a 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 que el 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 a la otra. Es decir, el conjunto se comporta como un sólido rígido casi sin deformación plástica.

⁴ I. Fonseca; J. A. Benito; I. Mejía; J. Jorba; A. Roca. Rev. Metal. Madrid, 38 (2002), 249-255.

⁵ I. Mejía. *Op. cit.*

⁶ A. Roca. Informe privado. 2002.