

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES

Volumen I. Conceptos fundamentales

Carlos Núñez
Antoni Roca
Jordi Jorba

Departamento de Ciencia de los Materiales
e Ingeniería Metalúrgica

Segunda edición

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES

Volumen 1. Conceptos fundamentales

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	
CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES. CONCEPTOS, HISTORIA Y EVOLUCIÓN	13
1.1 Introducción	13
1.1.1 Enlace y estructura de los materiales	14
1.1.2 Propiedades y aplicaciones de los materiales	18
1.1.2.1 <i>Materiales metálicos</i>	19
1.1.2.2 <i>Materiales cerámicos</i>	20
1.1.2.3 <i>Materiales poliméricos</i>	22
1.1.2.4 <i>Materiales compuestos</i>	24
1.1.3 Procesos de obtención de materiales	25
1.1.3.1 <i>Proceso de fabricación del acero</i>	26
1.1.3.2 <i>Proceso de fabricación del aluminio</i>	28
1.1.3.3 <i>Proceso de fabricación del cemento portland</i>	28
1.1.4 Procesos de conformado de los materiales	29
1.2 Origen y evolución de la mecánica de materiales	30
1.3 Planteamientos actuales y futuros en ciencia e ingeniería de materiales	33
1.4 Bibliografía consultada	36
Parte 2	
COMPORTAMIENTO ELÁSTICO DE LOS MATERIALES	37
2.1 Introducción	37
2.2 Concepto de tensión	39
2.3 Concepto de deformación	42
2.4 Comportamiento de los materiales bajo tensión	44
2.5 Relación entre la tensión y la deformación	47
2.6 La rigidez de los materiales	52
2.7 Magnitudes reales y magnitudes convencionales	56
2.8 Relación entre las constantes elastomecánicas	58
2.9 Tensiones y deformaciones en materiales dúctiles y frágiles	60
2.10 La resistencia mecánica de los materiales	61
2.11 Bibliografía consultada	62
Parte 3	
ELASTOMECAÁNICA	63
3.1 Introducción	63
3.2 Estados de tensión planos. Diagramas de Mohr	63
3.2.1 Estados de tensión que actúan en un elemento infinitesimal de un sólido	63

3.2.2	Obtención de las ecuaciones para la transformación de ejes en estado de tensión plano	65
3.2.3	Obtención de las ecuaciones para la determinación de las tensiones principales	67
3.2.4	Obtención de las ecuaciones para la determinación de las tensiones de cizalladura máxima y mínima	68
3.2.5	El círculo de Mohr para estados de tensión planos	72
3.2.5.1	<i>Construcción y propiedades del diagrama de Mohr a partir de las tensiones σ_{xx}, σ_{yy} y τ_{xy} que definen un estado de tensión plano</i>	72
3.2.5.2	<i>Construcción y propiedades del diagrama de Mohr a partir de las tensiones principales σ_{11} y σ_{22} de un estado de tensión plano</i>	74
3.3	Estados de tensión tridimensionales	76
3.3.1	Obtención de las ecuaciones para la determinación de las tensiones principales	79
3.4	Estados de deformación. Diagramas de Mohr	81
3.5	Ley de Hooke generalizada	86
3.6	Análisis experimental de tensiones mediante extensometría eléctrica	87
3.7	Bibliografía consultada	91

Parte 4

	COMPORTAMIENTO PLÁSTICO DE LOS MATERIALES	93
4.1	Introducción	93
4.2	Defectos en las estructuras cristalinas	95
4.2.1	Defectos puntuales	95
4.2.2	Defectos lineales: dislocaciones	99
4.2.3	Defectos planares	103
4.2.4	Defectos tridimensionales	106
4.3	La deformación plástica en monocristales	106
4.4	Endurecimiento por deformación plástica	111
4.5	Recuperación, recristalización, crecimiento de grano	114
4.6	Efecto del temple y revenido en aceros	117
4.7	Deformación plástica de vidrios cerámicos y polímeros termoplásticos	119
4.8	La deformación plástica en estados de tensión tridimensionales	122
4.8.1	Criterio de Tresca	122
4.8.2	Criterio de Von Mises-Hencky	123
4.9	Bibliografía consultada	124

Parte 5

	CAUSAS DE FALLO EN LOS MATERIALES. PROPIEDADES Y SELECCIÓN DE MATERIALES	125
5.1	Introducción	125
5.2	Causas de fallo en los materiales	125
5.2.1	Causas de origen mecánico	125
5.2.2	Causas de origen químico o mixtas	129
5.3	Propiedades tecnológicas de los materiales	133
5.4	Selección de materiales según sus propiedades	135
5.5	Caracterización de propiedades mecánicas de los materiales: ensayos mecánicos	139
5.5.1	Ensayo de tracción	140
5.5.2	Ensayo de compresión	140

5.5.3	Ensayo de flexión	141
5.5.4	Ensayo de dureza	141
5.5.5	Ensayo de fatiga	142
5.5.6	Ensayo de termofluencia	142
5.5.7	Ensayo de choque o impacto	142
5.5.8	Ensayo para determinar la tenacidad a la fractura	143
5.6	Bibliografía consultada	144

ANEXOS

1	Prontuario de términos mecánicos en diversos idiomas	145
2	Prefijos para algunas potencias de diez	147
3	Transformación de unidades	149

Prólogo a la primera edición

La obra *Comportamiento mecánico de los materiales* se basa en los más de treinta cursos de metalurgia mecánica impartidos por el profesor 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 centra en los cursos de metalurgia mecánica, ciencia de materiales y mecánica de materiales impartidos desde enero de 1993 por el doctor Antoni Roca Vallmajor en la Universitat de Barcelona, así como en la experiencia acumulada por el doctor Jordi Jorba Peiró, primero en la Universitat de Barcelona (1983-1990) y, a partir de este último año en la Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona a través de las 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 rotura
- Volumen 4: Comportamiento plástico de los materiales. Propiedades y selección de materiales

El volumen 1 consta de cuatro partes. En la parte 1 se incluye una introducción a la ciencia e ingeniería de materiales con los aspectos más significativos de estructura, propiedades, procesado y aplicaciones; se analiza la evolución histórica en el uso de los materiales por parte de la sociedad y se presentan las perspectivas actuales y de futuro en la utilización de los materiales.

En la parte 2 se presenta el comportamiento elástico de los materiales, y se revisan los conceptos de tensión o esfuerzo, deformación, ley de Hooke, introducción de las constantes elásticas y profundización en las propiedades tecnológicas, rigidez y resistencia mecánica a través de los parámetros que las cuantifican.

En la parte 3 se muestra el comportamiento plástico de los materiales. Se inicia con la revisión de los tipos de defectos que presentan las estructuras cristalinas, una profundización en la teoría de las dislocaciones y en el maclado como fenómenos responsables de la deformación plástica en materiales cristalinos. Asimismo, se revisan los conceptos de endurecimiento por deformación y recristalización, para finalizar con el estudio del comportamiento plástico de materiales amorfos o semicristalinos tanto de naturaleza cerámica como polimérica.

Por último, la parte 4 se inicia con la revisión de las principales causas de fallo de los materiales en servicio, se introducen sus propiedades tecnológicas, los parámetros que las cuantifican y su importancia en selección de materiales y en diseño. Al final de la parte 4 se esquematizan los ensayos mecánicos más utilizados, indicando en cada caso los parámetros determinables a través de los mismos.

En cada una de las partes se presentan ejercicios de tipo conceptual con su solución, y se proponen otros para que los resuelva el alumno con el fin de que le resulten útiles para completar su formación. Asimismo, al final del volumen se ha incluido un primer anexo

en el que aparecen los términos más utilizados en este volumen en distintos idiomas, un segundo anexo con los prefijos para algunas potencias de diez, y un tercero con factores de conversión de las magnitudes más utilizadas. El texto se completa con 61 figuras y 23 tablas para facilitar la comprensión al introducir valores reales de las magnitudes consideradas.

La obra *Comportamiento mecánico de los materiales* va dirigida a los alumnos de las licenciaturas en química e ingeniería química que desean ampliar los conocimientos adquiridos en la asignatura de ciencia de materiales, obligatoria en ambas enseñanzas, así como a los alumnos de las ingenierías técnicas, sobre todo los que se especializan en mecánica, y como curso introductorio para 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 doctor José Antonio Benito Páramo y al señor Ignacio Mejía Granados su ayuda en alguno de los apartados de este volumen; parte de esta colaboración se cita en cada caso en las notas al final de página. Asimismo, el agradecimiento se extiende a la doctora Montserrat Cruells Cadevall por sus comentarios y opiniones constructivas sobre la obra que se presenta, y a la señora Esther Vilalta Martí por su colaboración en todos los aspectos relacionados con las micrografías que aparecen en la obra.

Los doctores Antoni Roca y Jordi Jorba quieren aprovechar la publicación de esta obra para rendir homenaje al profesor doctor 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 impartió clases y, sobre todo, por el impulso de la enseñanza y la investigación en el campo de la metalurgia y de la ciencia de materiales en Barcelona, durante los años comprendidos entre 1978 y 1993.

Barcelona, octubre de 2001

Prólogo a la segunda edición

La obra *Comportamiento mecánico de los materiales* en un principio se estructuró en torno a 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 aparecieron 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 ambos de nuevos capítulos con temas que se habían previsto introducir en los volúmenes 3 y 4. Con estas nuevas premisas, se presenta la segunda edición del volumen 1, que consta de cinco partes; en la parte 1 se incluye una introducción a la ciencia e ingeniería de materiales, donde se tratan los aspectos fundamentales de la estructura, las propiedades, el procesado y las aplicaciones. Asimismo, se analiza la evolución histórica en el uso de los materiales por parte de la sociedad, y se presentan las perspectivas actuales y de futuro en la utilización de los mismos. Se corresponde con la parte 1 de la primera edición con la modificación de algunas figuras.

En la parte 2 se presentan los conceptos básicos sobre el comportamiento elástico de los materiales, y se revisan los conceptos de tensión o esfuerzo, la deformación, la ley de Hooke y las constantes elásticas, al mismo tiempo que se profundiza en las propiedades tecnológicas de rigidez y resistencia mecánica a través de los parámetros que las cuantifican. Se corresponde, asimismo, con la parte 2 de la primera edición, aunque se han modificado algunas de las figuras, y se ha adaptando la nomenclatura frente a la utilizada en la parte 3 de esta obra.

La parte 3 incluye los aspectos más importantes de la elastomecánica; se trata de un tema nuevo sin correspondencia con los contenidos de la primera edición. Se presentan los estados de tensión planos y tridimensionales, los estados de deformación, los diagramas de Mohr para los estados de tensión y de deformación y la ley de Hooke generalizada. Finaliza con la revisión de los aspectos más significativos del análisis experimental de tensiones mediante extensometría eléctrica.

En la parte 4 se presenta el comportamiento plástico de los materiales. Se inicia con la revisión de los tipos de defectos que presentan las estructuras cristalinas, una profundización en la teoría de las dislocaciones y el maclado como fenómenos responsables de la deformación plástica en materiales cristalinos. Asimismo, se revisan los conceptos de endurecimiento por deformación y recristalización, y se concluye con el estudio del comportamiento plástico de materiales amorfos o semicristalinos tanto de naturaleza cerámica como polimérica.

Finalmente, la parte 5 se inicia con la revisión de las principales causas de fallo de los materiales en servicio. Se introducen sus propiedades tecnológicas, los parámetros que las cuantifican y su importancia en selección de materiales y en diseño. Al final de la parte 5 se esquematiza los ensayos mecánicos más utilizados, y en cada caso se indican los parámetros determinables a través de los mismos. En esta segunda edición, se ha resumido la parte de ensayos mecánicos, ya que la descripción pormenorizada de cada uno de ellos ya se ha desarrollado en el volumen 2 de esta obra.

Comportamiento mecánico de los materiales está dirigida a los alumnos de grado de las titulaciones de química e ingeniería química que amplían los conocimientos adquiridos en la asignatura 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, 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 2012

CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES. CONCEPTOS, HISTORIA Y EVOLUCIÓN

1.1. Introducción

Generalmente se entiende por materiales «el conjunto de las distintas sustancias que intervienen en la construcción de un objeto». Por otra parte, la ciencia se define como «el conjunto de conocimientos, y la actividad destinada a alcanzarlos». Mientras que la ingeniería es «el arte de aplicar los conocimientos científicos a la invención, al perfeccionamiento o a la utilización de las técnicas [...] en el campo industrial».¹

De la unión de estas tres definiciones puede decirse que la ciencia y la ingeniería de los materiales engloban los conocimientos específicos recogidos sobre todas las sustancias útiles en construcción, entendida esta en su sentido más amplio, su aplicación en el campo industrial y las actividades relacionadas con su perfeccionamiento. Así, en una primera aproximación, puede afirmarse que la ciencia y la ingeniería de los materiales abarcan el conocimiento de todas las propiedades de la práctica totalidad de los sólidos y de algunos líquidos de elevada rigidez. Pero también se incluyen los procesos de obtención y purificación de los materiales hasta que sean utilizables, los procesos para modificar sus propiedades, la relación entre estas y la forma de organización que presentan los átomos y las moléculas que constituyen estas sustancias, los procesos que permiten fabricar piezas con distinta forma, los métodos para minimizar la degradación de los materiales en contacto con su entorno, y, finalmente, el reciclado y/o la inertización de los materiales en desuso.

Esta sistematización de los aspectos incluidos en estas disciplinas ha ido variando con el tiempo, influida por el nivel de conocimiento en las distintas ciencias y técnicas afines, así como por los intereses y necesidades de la sociedad en cada momento a lo largo del tiempo. Así, algunos de estos aspectos han ido desprendiéndose del cuerpo común cuando el nivel de conocimientos y su complejidad así lo aconsejaban, pero en realidad deben considerarse como distintos enfoques interdependientes de una misma ciencia.

En la actualidad, se cree que la ciencia y la ingeniería de los materiales están a caballo y son el nexo de unión entre las ciencias fundamentales (física, química, matemáticas) que generan los conocimientos básicos sobre los átomos que componen la materia y la forma de relacionarse entre sí para formar los distintos materiales y las diversas especialidades ingenieriles (mecánica, eléctrica, electrónica, química, civil, aeroespacial, nuclear, etcétera) que utilizarán los materiales disponibles para construir componentes y estructuras en función de sus propiedades específicas, o que requerirán nuevos materiales con diferentes prestaciones. Además, se admite una clara interrelación entre todos y cada uno de los términos siguientes: estructura, propiedades, procesado y aplicaciones de los materiales. A estos se les puede también añadir la caracterización, puesto que el gran progreso producido en los dos últimos siglos se debe al establecimiento de las técnicas de caracterización de estructu-

¹ Gran enciclopèdia catalana. Barcelona: Enciclopèdia Catalana, 1994.

ras, de propiedades y a la aplicación de estas u otras técnicas a la mejora del procesado de los materiales o de su comportamiento cuando están en servicio.

Así, teniendo en cuenta el enlace y la estructura, los materiales podrían clasificarse en metálicos, cerámicos, poliméricos y compuestos, pero atendiendo a las propiedades, la clasificación podría tener como base sus propiedades mecánicas, eléctricas, magnéticas, térmicas, ópticas o químicas, y si la clasificación se hiciera a partir de sus aplicaciones, podría ser la siguiente: materiales estructurales, funcionales, etcétera. No obstante, estos tipos de clasificación no son excluyentes. A modo de ejemplo, los materiales estructurales se seleccionan a partir de su comportamiento mecánico y podrían ser de tipo metálico o cerámico; los funcionales destinados a componentes electrónicos lo serán a partir de sus propiedades eléctricas, magnéticas y/o ópticas; y los centrados en la decoración lo serán a partir de sus propiedades mecánicas, ópticas o químicas.

En este contexto, la mecánica de materiales es aquella parte de la ciencia e ingeniería de los materiales que analiza y describe el comportamiento mecánico y la respuesta de los materiales a los esfuerzos a los que están sometidos.

En los próximos apartados se analizarán y describirán los aspectos más relevantes de los materiales, primero atendiendo a su estructura y propiedades, y después a sus aplicaciones. También se introducirán comentarios sobre los procesos de obtención y de conformado.

1.1.1. Enlace y estructura de los materiales

Los átomos que constituyen los metales y las aleaciones se unen mediante el enlace metálico. Debido a este tipo de enlace, los electrones de la capa de valencia pueden ser fácilmente promocionados a la banda de conducción y el material actúa como un buen conductor tanto eléctrico como térmico. Del mismo modo, este tipo de enlace permite una disposición espacial donde los átomos ocupan las posiciones equivalentes de la red cristalina sin ninguna restricción debida a ángulos de enlace o compensaciones de las cargas eléctricas. Así, la mayoría de los metales y sus aleaciones cristalizan en las estructuras de alta simetría: cúbica centrada en el cuerpo, cúbica centrada en las caras y hexagonal compacta.

La estructura cúbica centrada en el cuerpo se caracteriza por la presencia de un átomo en el centro de la celda unitaria y un átomo en cada uno de los vértices del cubo que representa la celda unidad. El número equivalente de átomos por celda es 2 y el factor de empaquetamiento² es 0,68. En este tipo de celda, la dirección de máxima compacidad es la línea diagonal del cubo, porque los átomos situados en esta dirección están idealmente en contacto entre sí. Hierro (α), cromo, molibdeno, vanadio, tantalio, wolframio, niobio, metales alcalinos, bario y europio son metales que presentan esta ordenación.

La estructura cúbica centrada en las caras se define por la presencia de un átomo en el centro de cada cara del cubo que representa la celda unidad y un átomo en cada uno de sus vértices. El número equivalente de átomos por celda es 4 y el factor de empaquetamiento es 0,74. En este caso, la dirección de máxima compacidad corresponde a la línea diagonal de las caras del cubo que constituye la celda unidad. Cobre, plata, oro, iridio, paladio, rodio, platino, plomo, aluminio, hierro (γ), níquel, calcio, estroncio, cerio, escandio e iterbio cristalizan en este tipo de estructura.

² El factor de empaquetamiento se define como la relación que existe entre el volumen de los átomos que ocupan una celda unidad y el volumen de esta.

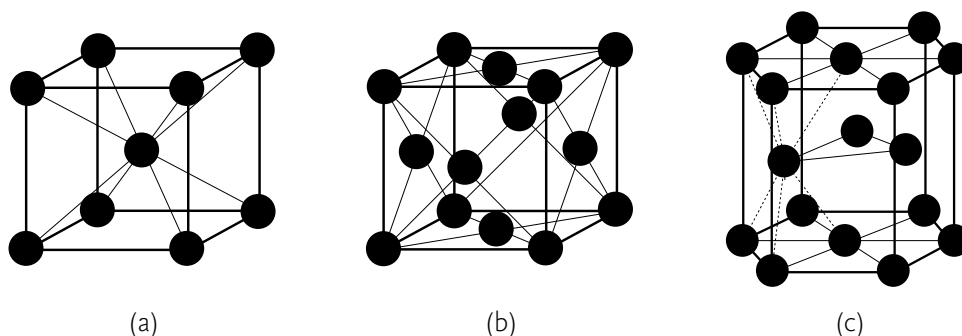


Figura 1.1. Celdas unitarias correspondientes a las estructuras cúbica centrada en el cuerpo (a), cúbica centrada en las caras (b) y hexagonal compacta (c).

La estructura hexagonal compacta se representa con un prisma de base hexagonal regular³ donde los átomos ocupan el centro y las seis esquinas de los hexágonos basales (inferior y superior) y otros tres átomos que forman un triángulo en la zona intermedia situada entre los dos planos basales. Cada uno de los átomos de este plano intermedio constituye un tetraedro con tres átomos del plano basal inferior y otro tetraedro con tres átomos del plano basal superior. El número equivalente de átomos por celda es 6 y el factor de empaquetamiento es 0,74. Aquí, las direcciones de máxima compacidad corresponden a las diagonales principales del hexágono equilátero basal del prisma hexagonal. Los elementos berilio, magnesio, zinc, cadmio, titanio, cobalto, circonio, itrio, rutenio, osmio, talio, tecnecio, lutecio, hafnio, renio y los lantánidos gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio y tulio cristalizan en esta estructura. En la figura 1.1 se muestra la organización atómica de las celdas unitarias cúbica centrada en el cuerpo, cúbica centrada en las caras y hexagonal compacta.

El enlace que presentan las partículas constituyentes de los materiales cerámicos es iónico y/o covalente. En este caso, la direccionalidad del enlace covalente fuerza determinada distribución espacial de los átomos para conservar los ángulos de enlace característicos. Un buen ejemplo del efecto de esta direccionalidad podría ser la configuración SiO_4^{4-} , donde el silicio se encuentra en el centro de un tetraedro rodeado de cuatro átomos de oxígeno, uno en cada vértice del tetraedro. La unión Si-O es de tipo covalente, aunque con un elevado carácter iónico ($\approx 50\%$). Este conjunto básico de átomos es el núcleo que constituye muchos de los denominados cerámicos tradicionales (ladrillos, porcelanas y cemento), así como muchos vidrios. Estos tetraedros de SiO_4^{4-} se disponen de forma aislada, constituyendo anillos aislados, láminas o cadenas. En otras ocasiones, cada átomo de oxígeno pertenece al mismo tiempo a dos tetraedros, de tal modo que se permite la formación de redes tridimensionales como en el caso de la sílice o los feldespatos. En muchos materiales cerámicos tradicionales, la organización de largo alcance resultante crea una estructura cristalina o parcialmente cristalina, mientras que en los vidrios no existe esta organización de largo alcance y el resultado es un material amorfo o vítreo. En todos los casos, la carga negativa del grupo SiO_4^{4-} se compensa con iones positivos.

Los materiales cerámicos ingenieriles por lo general están constituidos por compuestos puros o casi puros, y el tipo de enlace es covalente con un mayor o un menor grado de carácter iónico según la electronegatividad relativa de los elementos constituyentes de di-

³ Siguiendo el planteamiento establecido en muchos textos básicos de ciencia e ingeniería de los materiales, aquí se considerará la celda hexagonal compacta como la representación del sistema cristalino hexagonal porque lo representa de forma más intuitiva aunque no sea la celda unidad del citado sistema cristalino.

chos materiales. Las estructuras resultantes en todos los casos son de naturaleza cristalina. Algunos materiales con estas características son: alúmina, sílice, grafito, diamante, silicio, germanio, ferritas, circonas, carburo de silicio, carburos, nitruros, boruros de alto punto de fusión, etcétera. En la figura 1.2 a se muestra la celda fundamental del diamante, que presenta una estructura cúbica centrada en las caras, pero que tiene una ordenación tetraédrica de los átomos de carbono forzada por la orientación de los enlaces formados entre los átomos de carbono. Esta distribución espacial mantiene los ángulos del enlace covalente y el número de coordinación (cada átomo de carbono está rodeado por otros cuatro átomos) y confiere al material una altísima rigidez y dureza. En este sentido, el diamante es el material más rígido y más duro de los que se conocen hasta la actualidad. En la figura 1.2 b se presenta la celda fundamental del titanato de bario, con una estructura cúbica simple, aunque con el parámetro c ligeramente superior a los parámetros a y b cuando el material está por debajo de su temperatura de Curie ($120\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Los polímeros, según su enlace y estructura, se clasifican en termoplásticos, termoelestables y elastómeros. Los primeros se caracterizan por estar formados por largas cadenas lineales o ramificadas en las que los átomos constituyentes, por lo general carbono, y en menor medida oxígeno, nitrógeno y azufre, se unen mediante enlaces covalentes, direccionales y fuertes. Además, existen enlaces entre estos átomos y átomos de hidrógeno, carbono, cloro o flúor que no constituyen el armazón de la molécula. Cuando estos enlaces covalentes son simples, permiten la rotación de la parte de la molécula anterior al enlace respecto a la parte de la molécula posterior al mismo. Esta libertad de rotación se repite en cada enlace covalente simple, de modo que la distribución espacial de los átomos que constituyen cada molécula de polímero tiene muchos grados de libertad. Por otra parte, la interacción entre las cadenas se debe a enlaces secundarios más débiles de Van der Waals o de puente de hidrógeno, que en algunos casos favorecen plegamientos ordenados de una misma cadena sobre sí misma⁴ o distribuciones espaciales ordenadas de varias cadenas. Estas ordenaciones locales de largo alcance generan zonas con una estructura cristalina de baja simetría (sistema monoclinico, etcétera) que coexisten con partes del material sin ordenación a largo alcance. El porcentaje de material ordenado y, por tanto, el grado de cristalinidad del polímero depende básicamente del nivel de ramificación de las cadenas y del tipo, posición y número de átomos o grupos de átomos que ocupan las posiciones que no constituyen el armazón de la cadena del mismo.

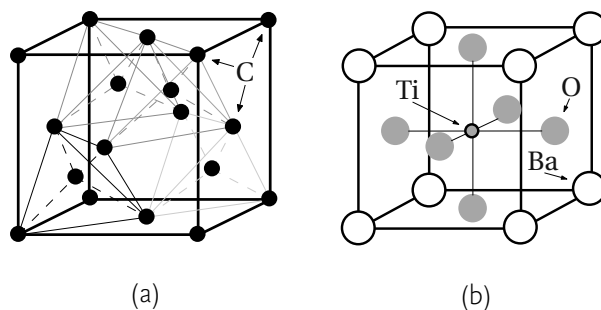


Figura 1.2. (a) Celda fundamental del diamante; (b) celda fundamental del titanato de bario.

⁴ La formación de zonas ordenadas por plegamiento de cadenas lineales sobre sí mismas genera láminas de pocos nanómetros de espesor que se distribuyen de forma radial generando una esfera (esferulita) de material localmente ordenado. Para más información, consultar Mills, N. J. «Plastics, Microstructure, Properties and Applications». Edward Arnold, 1986.

La mayoría de los termoplásticos más comunes, como el policloruro de vinilo (PVC), el poliestireno (PS) o el polimetilmetacrilato (PMMA), no presentan una estructura cristalina y, en consecuencia, son de naturaleza amorfa. Sin embargo, otros termoplásticos como el polietileno de alta densidad (HDPE) o las poliamidas (PA) pueden ordenar su estructura, hasta superar en algunos casos el 90% de cristalinidad. En la figura 1.3 se muestra una micrografía de esferulitas obtenida con luz polarizada⁵ y los esquemas de la distribución de las laminillas que forman las esferulitas⁶ y los pliegues de las cadenas de polímero hasta formar una laminilla.⁷ También se representa la celda fundamental ortorrómbica del polietileno. Los valores de los parámetros de red de esta estructura son: $a = 0,741 \text{ nm}$; $b = 0,494 \text{ nm}$; $c = 0,255 \text{ nm}$.

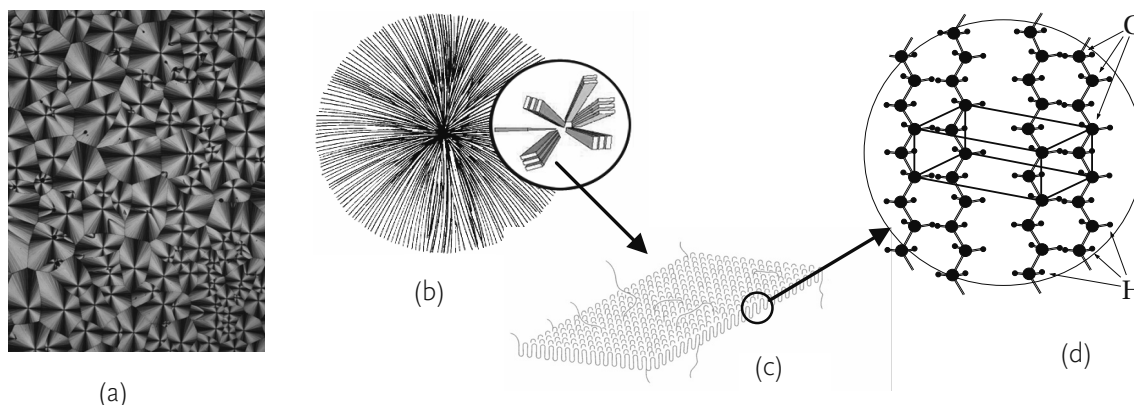


Figura 1.3. (a) Micrografía óptica de esferulitas de polietileno. (b) Esquema de una esferulita y de algunas laminillas. (c) Esquema de los pliegues de las cadenas de polietileno que forman una laminilla. (d) Estructura de la celda unidad del polietileno.

Los polímeros termoestables están constituidos por redes tridimensionales derivadas de las uniones covalentes entre los elementos constituyentes; este entrecruzamiento no da lugar a estructuras de largo alcance y, en consecuencia, este tipo de materiales es de naturaleza amorfa. Las resinas epoxi, las epoxi-fenólicas y los poliésteres insaturados son materiales que forman parte de esta categoría.

Los elastómeros son polímeros constituidos por largas cadenas en las que los átomos participantes están unidos por enlaces covalentes. Las cadenas se encuentran enroscadas sobre sí mismas y presentan un bajo número de entrecruzamientos. Esta configuración permite grandes deformaciones elásticas por desenroscamiento de las cadenas cuando el material se somete a tracción, y, en menor medida, cuando actúa la compresión. Para evitar el deslizamiento entre cadenas y conferir a estos materiales mayor rigidez, se añaden átomos de azufre o selenio que, mediante las reacciones químicas que tienen lugar durante el **proceso de vulcanizado**, forman puentes entre cadenas orgánicas restringiendo el movimiento entre moléculas porque los enlaces formados son fuertes. Ejemplos de elastómeros son el caucho natural, el poliisopreno, el policloropreno y las siliconas.

⁵ www.tufts.edu/~pcebe/polymer_spherulites_2006.jpg.

⁶ www.doitpoms.ac.uk/tlplib/polymers/images/img015.gif y Science & Technology Issue 6 winter 1998.

⁷ Encyclopedia of Chemical Technology, Vol. 6, 1981, pág. 405.