

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES**

**SOBRE LA NECESIDAD
DE LAS IMPERFECCIONES**

**DISCURSO
LEIDO EN EL ACTO DE SU RECEPCION
POR EL**

EXCMO. SR. D. MANUEL ELICES CALAFAT

**Y
CONTESTACION
DEL**

EXCMO. SR. D. CARLOS SANCHEZ DEL RIO Y SIERRA

EL DIA 23 DE NOVIEMBRE DE 1994



**MADRID
DOMICILIO DE LA ACADEMIA
VALVERDE, 22
1994**

I.S.B.N.: 84-87125-27-1.
Depósito legal: M. 35.473-1994

Impreso por
Realigraf, S. A.
Burgos, 12
28039 Madrid

DISCURSO
del
EXCMO. SR. D. MANUEL ELICES CALAFAT

Dedicado a
Ana, Jobina y Luisa
Marga
Ana María, Margarita e Isabel

Deseo hacer constar mi agradecimiento a los profesores Robert W. Cahn FRS, Michael F. Ashby FRS y Rosendo Calderón por sus valiosas sugerencias, a Rosa M^a Morera por la impecable edición del manuscrito y a José M. Martínez por la ayuda prestada en la edición de las figuras.

SOBRE LA NECESIDAD DE LAS IMPERFECCIONES

Palabras de Recuerdo y Agradecimiento.	1
1. INTRODUCCION Y PROGRAMA IMPERFECTOS	9
1.1. Las Imperfecciones contienen Información.	11
1.2. Las Imperfecciones nos protegen de otras Imperfecciones.	15
2. LA CIENCIA DE LOS MATERIALES	17
2.1. Diseño de Moléculas.	19
2.2. Diseño de Monocristales.	21
2.3. Diseño de Imperfecciones.	23
3. LAS IMPERFECCIONES EN LA DEFORMACION DE LOS MATERIALES	27
3.1. Los Metales son Maleables Gracias a las Imperfecciones.	29
3.2. El Flogisto puede crear Imperfecciones.	35
3.3. Cuando la Envoltura es más Importante que el Contenido.	41
4. LAS IMPERFECCIONES EN LA ROTURA DE LOS MATERIALES	47
4.1. Las Imperfecciones de Griffith.	49
4.2. Las Impurezas pueden evitar Roturas.	55
4.3. Imitando a la Naturaleza.	61
5. EVOLUCION E IMPERFECCIONES	69
5.1. La Funicidad en el Arte y en la Sociología.	71
5.2. El Pulgar del Panda.	75
5.3. Las Imperfecciones después del Big-Bang.	81
6. BIBLIOGRAFIA	88
Discurso de Contestación del Excmo. Sr. D. Carlos Sánchez del Río y Sierra	93

Excmo. Sr. Presidente,
Excmos. Sres. Académicos,
Señoras y señores:

“La emoción, la responsabilidad y el agradecimiento han competido en mí desde que me hicisteis el honor de nombrarme académico”. Así empezó el discurso Don Felipe Calvo en el acto de su recepción y a mí no se me ocurren otras palabras que reflejen mejor mi estado de ánimo desde el mes de mayo del año pasado. La emoción por haber sido elegido y la responsabilidad asociada por pertenecer a la Academia, han lastrado mi entendimiento cuando he intentado escribir estas líneas y han retrasado este momento. Pero también quería solicitar este acto para manifestar públicamente el agradecimiento por el crédito que mi pasado os había merecido. Dos tendencias contrapuestas que han tensado mi actividad durante año y medio.

Quiero que las primeras palabras sean de agradecimiento y de recuerdo: De agradecimiento profundo por la confianza que habeis depositado en mí, especialmente los que fuisteis mis profesores en la Escuela de Ingenieros de Caminos —al Padre Alberto Dou, por el rigor con que me enseñó las ecuaciones diferenciales y a Don José Antonio Jiménez Salas por mostrarme la riqueza de problemas, resueltos y por resolver, en la Mecánica de Suelos— y a los profesores en la Facultad de Ciencias Físicas —a Don Carlos Sánchez del Río, que me hizo ameno y aparentemente sencillo mi primer contacto con el mundo atómico, a Don Armando Durán, que me acompañó por los intrincados caminos de la óptica y el electromagnetismo, a Don Bermudo Meléndez, que me contagió su entusiasmo por la geología y a Don Jesús Morcillo que me introdujo, a través de la espectroscopía, en el mundo de las simetrías—. A todos ellos y a todos mis amigos que hoy estais sentados aquí, gracias una vez más. Por tradición, las palabras de recuerdo están dedicadas a mi antecesor el Excmo. Sr. D. Felipe Calvo; universitario ejemplar, escritor distinguido, poeta y maestro.

No pretendo, ni puedo —por falta de vivencias— hacer una semblanza de Don Felipe. Una biografía de su obra científica, cultural y docente, hasta sus 60 años, figura en la contestación de Don Florencio Bustinza al discurso del acto de recepción de Don Felipe. Recientemente, Don Luis Gutiérrez Jodra ha escrito una nota en los Anales de esta Academia y Don José María Guilemany, discípulo y ferviente admirador, ha publicado una biografía entrañable titulada *Retrospectiva de un Maestro*. Todos están de acuerdo en que Don Felipe fue un buen científico, un apasionado de la Universidad y un enamorado del magisterio.

Coincidió con Don Felipe en sus últimos años, en quehaceres universitarios, concretamente a finales de los años 80, en varios cursos de metalurgia dentro de un programa de Ciencia de Materiales para graduados en Física, Química e Ingeniería. Pronto descubrimos aficiones comunes y actividades muy distintas que también nos unían. Recuerdo que le llamaba mucho la atención mi afición al submarinismo, —era natural, Don Felipe era de Palencia y yo soy de Menorca— hasta tal punto que en la dedicatoria del primer libro que me regaló, *La Historia de la Química*, el 23 de junio de 1983, escribió: “*A Manolo Elices, buceador del mar y de la Ciencia, con profundo afecto*”. Estaba escrito con la caligrafía que le enseñaron sus padres-maestros, tan limpia y tan clara que revelaba el orden, la pulcritud y la armonía mental con que lo realizaba todo. Le correspondí con una foto submarina del penacho branquial de un anélido en forma de flor, que tuvo colgada en su despacho en la Universidad, con una dedicatoria similar porque él también buceaba en la Ciencia.

Del perfil profesional de Don Felipe destaca su amor por el trabajo bien hecho, su pasión por la Universidad y por España y su gran ideal, el de maestro. De su *trabajo*, de sus *pasiones* y de su *ideal* me gustaría que quedara constancia en este recuerdo. Al hacerlo me apoyaré en las referencias antes citadas y en ideas que ya expuso Don Felipe al glosar el perfil de su predecesor Don Emilio Jimeno. Al referirse a él dejó escrita —primorosamente escrita— la imagen de un compañero de oficio y, sin darse cuenta, un reflejo de la suya. Cuando escribía sobre Don Emilio,

resonaba, porque los dos tenían la misma frecuencia propia, aunque diferían en algunos armónicos, y por ello utilizaré para Don Felipe muchos comentarios que él hizo para Don Emilio. Seguramente estaría de acuerdo, me miraría sonriendo y luego haría algún comentario ingenioso.

SU TRABAJO. Don Angel Vian Ortuño dice de Don Felipe: "... en su alma viven armónicamente el científico, el juglar y el místico. Calvo los lleva dentro; de lo primero se vale para la exactitud y la minuciosidad, de lo segundo, para gozarse de la belleza expresiva y de lo tercero para bucear en profundidad.". Su trayectoria profesional pasa por las coordenadas de todo buen científico: estancias en el extranjero, publicación de artículos y monografías y profundizar y dejar huella en algunos campos.

Durante unos tres años trabajó en la Universidad de Cambridge, donde obtuvo su Ph.D. Su tesis, sobre microestructura y propiedades mecánicas de aceros, recibió una excelente acogida en los medios metalúrgicos internacionales. Sus campos de trabajo preferidos fueron la *soldadura* y el *mercurio*. La soldadura estuvo presente durante toda su vida; una vez le oí decir, *mi primer título profesional —documento que conservo como oro en paño— fue de "aprendiz de soldador adelantado"*. Publicó numerosos trabajos, registró patentes, fue nombrado Fellow del *Welding Institute*, buscó raíces en la Historia —me habló en otra ocasión de una técnica de soldadura descubierta por los orífiles etruscos— y también estaba al corriente de los avances más recientes —sus últimos trabajos fueron sobre soldadura por difusión—. El *mercurio* fue el gran protagonista de su labor investigadora en la etapa que estuvo en Barcelona. Como comenta el profesor Guilemany, las líneas de trabajo se orientaron en tres direcciones; profundizar en el conocimiento de las materias primas minerales, buscar nuevos procedimientos hidrometalúrgicos alternativos al pirometalúrgico para la extracción del metal y estudiar nuevas aplicaciones del mismo. Estas líneas de trabajo generaron multitud de artículos, patentes y reconocimientos. Don Felipe nos ha dejado, también, excelentes monografías; *La España de los Metales*, fue una de las primeras y es una verdadera

joya, tanto por el texto como por sus ilustraciones. En el prólogo se refleja de nuevo la identificación que existía entre Don Felipe y Don Emilio, dice así "... *Es justo, pues, que este fruto que el maestro cultivó vuelva a él, en mi versión, como rendida ofrenda de gratitud por su ininterrumpido magisterio.*". Una de sus últimas monografías fue *Alvaro Alonso Barba, un Metalurgo del Siglo de Oro*. En ella consigue una magnífica recreación del ambiente de las Indias, donde el licenciado Barba ejerció el arte de los metales. Nos guía cómo leer su libro y nos cuenta las vicisitudes en la corte, a su vuelta a España. La vida de Don Alvaro fue larga y fecunda y Don Felipe aprovecha para resaltar un aspecto que tuvo especial incidencia en sus últimos años, dice de Don Alvaro: "...*cuando murió, al fin y al cabo sólo tenía noventa y tres años y aún no estaba jubilado ...*" y termina con su característica prosa "... *Cuando vayas a Sevilla busca conmigo por Triana el último suspiro del primer sacerdote minero; no sé dónde se ordenó, pero sí que lo canonizó el azogue. ¡Nos hace tanta falta resucitar su estilo!*".

SUS PASIONES: Sus grandes pasiones —aparte de la familia y de sus convicciones religiosas— fueron la *Universidad, España y Palencia*. Decía Don Felipe, con motivo de la inauguración del nuevo local del Colegio de Médicos de Palencia en 1975, "*Mi sí rotundo es, naturalmente, para la Universidad comprometida, creadora y enseñante, que cultiva la razón, el método, la crítica...*". En todos sus escritos se refleja su gran pasión por la enseñanza y por la Universidad. En la Universidad de Madrid desempeñó el cargo de Vicerrector y con motivo de la creación de la Universidad de Alcalá de Henares fue Presidente de la Comisión Gestora y su primer Rector. En prueba de su excelente gestión, la Corporación Municipal de Alcalá le nombró Hijo Adoptivo de la Ciudad y, varios años después, la Universidad le otorgaba su medalla de oro. Don Felipe rechazó públicamente —estoy usando sus palabras— a la Universidad demagógica, a la Universidad cerrada al sacrificio y al trabajo, a la que no distingue un aprendiz de un buen maestro, a la Universidad de voraz apetito de alumnos que regurgita sin haberlos digerido, a la Universidad manipulada, y fue por el contrario un apasionado de la Universi-

dad alegre, transparente y vigilante, a la que hace de discípulos maestros, y a la que nos llena de esperanza en el hombre que ella forma.

Don Felipe amó a la España entera y diferente. Creo que no me hubiera perdonado que en su recuerdo faltara hoy esta afirmación de amor a su entrañable Patria. Además, la amaba vehementemente y lo proclamaba con valentía. Como ejemplo bastan las últimas palabras de su conferencia *La Metalurgia Española en América*, con ocasión de un seminario conmemorativo del Quinto Centenario. Termina proponiendo que, además de celebrar el encuentro entre los pueblos de España y América, se celebre otro descubrimiento, el de los españoles con ellos mismos “... volvamos a descubrir España en este tragicómico caos que estamos viviendo, Babel de lenguas, laberinto de ideas, infierno para la convivencia. Si os decidieseis a ello, hacedme sitio en vuestra carabela.”

Palencia fue su otra pasión, su otra Patria. Cuando podía se escapaba a su tierra palentina, a su Palentinos, un remanso de paz donde leía, meditaba, escribía y cultivaba rosas. Fue un gran amante de su tierra y de sus gentes. Penetró en su historia estudiando restos arqueológicos y analizó el presente en multitud de conferencias y presentaciones recogidas en el libro *Palencia Pregonada*. Don Felipe usaba su Palencia continuamente como referencia y la monografía que escribió sobre Cambridge es una buena prueba de ello. Al comienzo dice que la ha escrito, entre otras razones, por motivos sentimentales, porque por las mismas fechas 1212 “... nacía la Universidad de mi Palencia a la vera de otro río, con otro puente de testigo (Puentecillas); pero murió de frío social, de falta de calor en el ambiente, de la misma helada que amenaza a las de hoy día, que sobreviven gracias al calor de la entropía.” y al terminar, se pregunta por qué nuestras Universidades no son como la de Cambridge cuando se dan las mismas condiciones y cuando hay clima y tierra buena para que de sus raíces salgan las mismas flores. *Los daffodils que nosotros, paletos de Campos, descubrieramos en Cambridge, los hemos encontrado en nuestra patria, allá en Pernía, con el popular nombre de lirones, llenando inmensos y jugosos prados.”*

SU IDEAL asoma en todas sus manifestaciones. Don Felipe era un apasionado de *la única empresa que merece soñarse en todas las edades y desde todas las cunas: la educación*. Estaba orgulloso de ser maestro en todas las dimensiones de esta noble vocación, como dijo en la toma de posesión de su cátedra de metalurgia en la Universidad de Barcelona, en mayo de 1966, “... *tuve el privilegio de nacer en un hogar de padres Maestros, en el más elemental grado de la educación, y que el Maestro que en la Universidad, por fortuna, encuentre ...*” —se refiere a Don Emilio— “... *fue precisamente el hombre que en esta misma Universidad sembraba una inquietud metalúrgica ... A los alumnos les digo que he venido aquí por y para ellos que van a ser, a partir de hoy, la razón de mi vida profesional ...*”. Don Felipe en Barcelona cumplió los objetivos que se había propuesto en su magisterio; creó escuela docente, de investigación y dejó una brillante estela de profesor ejemplar, hecho que repitió, después, en Madrid. Nadie mejor que él para expresar su ideal de maestro. Estas frases, entresacadas de sus muchos discursos, nos dan una idea —aunque parcial y fuera de contexto— de lo que él sentía, “... *el maestro sabe que su función no es sólo salvar del naufragio social a sus alumnos, sino llevarlos a la otra orilla. Y ello no sólo en aspectos propios de la ética, de la moral, del derecho, sino en los de conocimiento. ... Si el maestro no se mejora en sus discípulos, ..., si no se multiplicara el juego de enseñar y aprender y de aprender enseñando, si no se sucedieran los maestros, es inútil que se invierta en los llamados medios, porque se está malogrando el medio universal: El del ejemplo.*”. También tiene frases lapidarias, por ejemplo, cuando dice: “*El maestro es un centinela permanente que sólo admite el relevo de la muerte*”. Su agradecimiento y humildad están siempre presentes en sus escritos, en uno de ellos termina diciendo “*Tuve el privilegio de que mi vida transcurriera sin interrupción de magisterio, de la escuela de mis padres pasé a la de Don Emilio, y ahora a la de los que espero que algún día se consideren mis discípulos*”.

Durante una de mis últimas visitas a Don Felipe, en su casa, me regaló un ejemplar del discurso inaugural del año académico 1988-89. Esta vez la dedicatoria fue temblorosa y no se

refería al buceo, aunque la excusa para la visita sí tenía que ver con el submarinismo. Yo había encontrado en un pecio un lingote de plomo con una inscripción romana y quería que él me ayudara a identificarlo. Muy pronto me habló de Palencia y yo de Menorca. El me mostró unos clavos romanos que había encontrado y yo le enseñé unas fotos del lingote. No recuerdo bien cómo fue pero pronto nos fuimos a otros mares y a otras playas y acabamos hablando de las estrellas que brillan en las noches de Palencia y de las noches estrelladas que vemos en la isla, de los luceros y de ahí a los ideales. El decía *"Los ideales, son como los luceros: es imposible alcanzarlos con las manos, pero, como el marino en el desierto de las aguas, tenlos como guía ... ellos te llevarán a tu destino"*.

Termino como empecé, usando palabras de Don Felipe, porque las siento como más en este momento; *"ocuparé su sitio porque así está dispuesto, pero —vosotros los sabeis— su sitio seguirá vacío"*.

1. INTRODUCCION Y PROGRAMA IMPERFECTOS

Perfection, in science as in everything else, is sterile.
(Denys Wilkinson)

En un reciente ciclo de conferencias sobre la Física en el siglo XXI, el Profesor Carlos Sánchez del Río hacía notar que durante el siglo XX se había explorado lo infinitamente pequeño —el mundo de las partículas— y lo infinitamente grande —el universo— y que para el siglo XXI se intentaría explorar lo infinitamente complejo.

Con toda seguridad también se explorará lo cotidiano, es decir *lo imperfecto*, que muchas veces es tan difícil de tratar como lo infinitamente complejo. No es de extrañar que la descripción de los sistemas perfectos haya alcanzado límites de precisión inimaginables: La teoría de la electrodinámica cuántica —capaz de predecir la interacción entre fotones y electrones con una precisión de una parte en 10^8 — es la descripción más precisa que tenemos de uno de los aspectos del mundo físico y es el paradigma para las otras teorías físicas. La electrodinámica cuántica trata con sistemas perfectos, basados en electrones y fotones que son perfectos.

No sucede lo mismo cuando tratamos de entender las propiedades mecánicas de los materiales. La resistencia y la ductilidad de los materiales no dependen de la inmensa mayoría de los átomos que ocupan el sitio que les corresponde en la red cristalina —los perfectos— sino de las *imperfecciones* en la estructura, o dicho con más precisión, de aquellos átomos que ocupan los lugares extraños donde la estructura es imperfecta; los núcleos de las dislocaciones, el frente de las fisuras, las fronteras de grano ... de todo ello se hablará más adelante. La clave para optimizar las propiedades mecánicas de los materiales se basa en el conocimiento y en el control de estas *imperfecciones*. En la actualidad, si queremos predecir cuantitativamente determinadas propiedades mecánicas nos hemos de contentar con conocer solamente el orden de magnitud porque estamos tratando con sistemas *imperfectos y complejos*.

En esta introducción —además de esbozar el programa de este ensayo y mostrar el marco dentro del que se va a desarrollar— se comenta, a través de un ejemplo, que las *imperfecciones* contienen información. Volveremos en el último capítulo sobre esta clase de información al considerar la relación entre las imperfecciones y la evolución de los sistemas complejos.

1.1. LAS IMPERFECCIONES CONTIENEN INFORMACION

Las migraciones de los animales es un tema apasionante. Es bien conocida la asombrosa capacidad de los salmones para regresar a su lugar de nacimiento después de haberse alejado muchos miles de kilómetros de él. Los salmones jóvenes, después de permanecer algún tiempo (días o años según la especie) en las aguas dulces donde nacieron, emprenden un largo viaje río abajo hacia el mar. Durante los años que el salmón vive en el océano crece, engorda y cuando está maduro sexualmente regresa al sitio donde nació para desovar. Varios estudios indican que el porcentaje de éxitos en volver al lugar de nacimiento varía entre el 84 y el 98 por ciento (T.H. Waterman 1989). El salmón rosado, por ejemplo, recorre 3000 o 4000 km río arriba del Yukon y en cada bifurcación que encuentra elige el afluente adecuado hasta que llega al lugar del desove. La justificación de esta proeza parece estar en algunas sustancias químicas que el salmón es capaz de reconocer, pero todavía quedan aspectos por aclarar.

No es fácil el estudio de las costumbres migratorias de los peces o de la tasa de supervivencia de los alevines que se han liberado en una piscifactoría, porque a los alevines no se les puede atar una anilla en la nariz. No obstante, parece ser que en la cabeza de los peces se guarda una información valiosa para este propósito en forma de *imperfecciones* que van creciendo en los otolitos.

En los oídos de los peces hay unas piedrecitas, llamadas otolitos, cuya misión es contribuir al equilibrio del pez. Si se observa un corte transversal de un otolito se pueden apreciar una serie de anillos semejantes a los anillos de crecimiento de un árbol. Estos anillos reflejan el ritmo circadiano del pez. Cada 24 horas los ciclos hormonales regulan el crecimiento de los anillos de carbonato cálcico, proteínas y trazas de elementos que están en el agua, formando capas concéntricas de espesor inferior al de un cabello humano. Las *imperfecciones* —impurezas— de estas capas proporcionan datos sobre las características del agua del mar donde ha nadado el pez. Como la composición del agua del

mar varía de unos lugares a otros, el estudio de las impurezas en los anillos equivale a leer el cuaderno de bitácora de un barco y puede ayudar a conocer el derrotero del pez.

La información encerrada en los otolitos se utiliza desde los años 80 en las piscifactorias: Los otolitos de los alevines se pueden marcar —modificar las *imperfecciones*— variando la temperatura del agua o incorporando en el medio sustancias químicas, como la tetraciclina. Mediante esta técnica se puede seguir la pista de los peces y conocer, por ejemplo, que cuando los alevines se sueltan muy al principio de la estación de migración no crecen tanto como los que se liberaron al final de la estación, indicando que es mejor soltarlos tarde que pronto.

Actualmente el interés se centra no en las marcas hechas por los biólogos sino en las marcas —*imperfecciones*— que deja el medio ambiente. Este interés se ha acrecentado al disponer de equipos que permiten detectar concentraciones de elementos del orden de una parte por mil millones (0.001 ppm). Hasta hace poco la técnica utilizada era el microanálisis por rayos X que permitía detectar por encima de 100 ppm, con lo cual se limitaba la investigación a unos pocos elementos, como el estroncio. Las técnicas recientes de espectroscopía de masas, que permiten detectar menos de 1 ppm, han abierto las puertas a otros elementos como el cobre, cadmio o zinc que suelen estar presentes en concentraciones muy bajas y permitirán saber, en algunos casos, por dónde ha nadado un pez y de dónde proviene. Esta información podrá ser de gran interés cuando surjan disputas entre los pescadores en relación al origen y la pertenencia de algunos peces.

Los dientes también cuentan la historia de los animales a través de sus *imperfecciones*. La edad y la estación del año en que han fallecido algunos mamíferos, junto con otros aspectos de su vida, se pueden estimar a partir de variaciones en la microestructura del cemento dental. El número de capas es un índice de la edad y la estructura de la última capa está relacionada con la estación del año, como ha probado Lieberman en sus experimentos con cabras (D.E. Lieberman 1993). Las variaciones en la orien-

tación de las fibras de colágeno y en su mineralización se han correlacionado con el tipo de dieta y la velocidad de crecimiento del animal. Es más, algunas imperfecciones en la microestructura del cemento dental pueden reconocerse en los fósiles porque la orientación de las fibras (las fibras de Sharpey) se puede detectar, y ello proporcionará nueva información sobre los hábitos de mamíferos ya extinguidos.

Pero no es precisamente sobre las *imperfecciones biológicas* de lo que va a tratar este discurso —aunque se volverá sobre los otolitos y los dientes a propósito de la biomineralización y de los biomateriales—, sino de las *imperfecciones en la Ciencia de Materiales*. Estos ejemplos han servido para mostrar el aspecto positivo de algunas imperfecciones —la información encerrada en las estructuras imperfectas está relacionada con la historia del animal—. El objetivo de esta comunicación es mostrar, también, el aspecto positivo de las imperfecciones en los materiales: Algunas veces las imperfecciones pueden ser beneficiosas y cuando no lo son, sus efectos no deseables se pueden compensar con otras imperfecciones. De ahí la *necesidad de las imperfecciones para compensar otras imperfecciones* en un mundo material —entiéndase de materiales— que siempre es imperfecto.

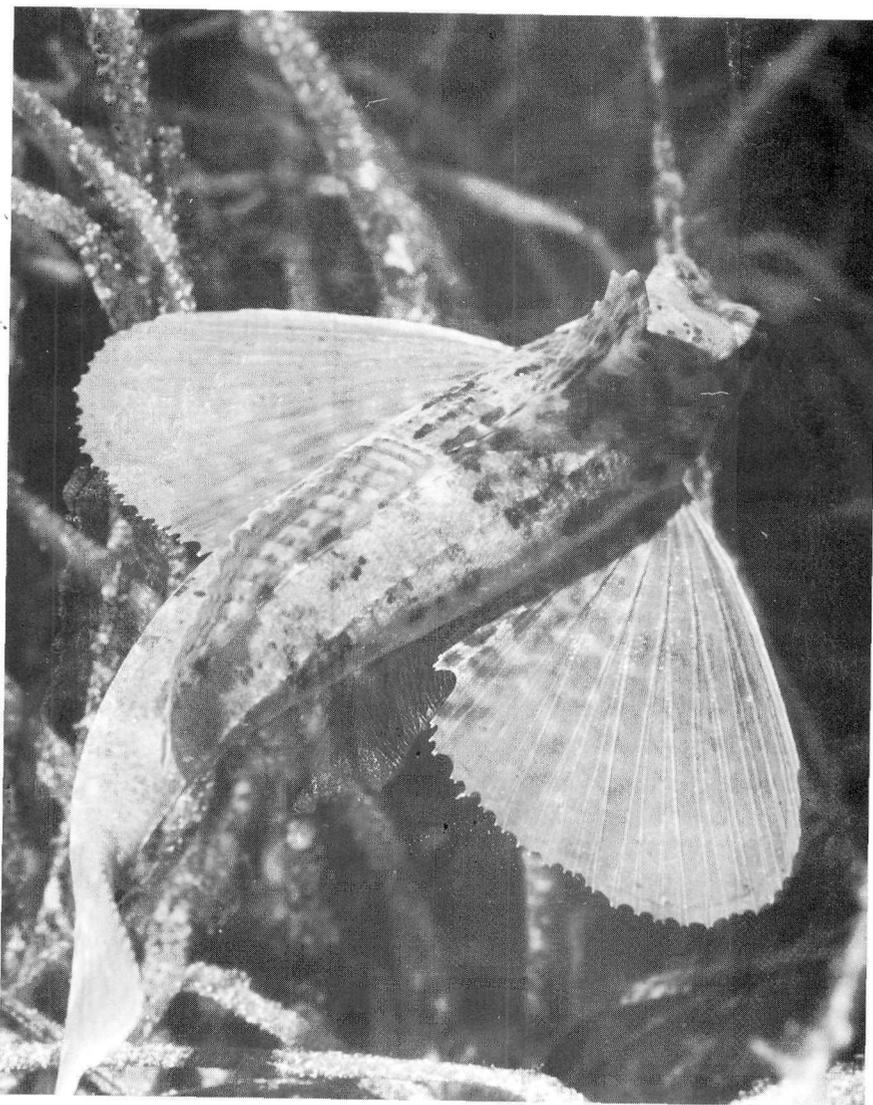


Figura 1. Los otolitos de los peces son como el cuaderno de bitácora (*Trigla Lastovitzka*, foto del autor).

1.2. LAS IMPERFECCIONES NOS PROTEGEN DE OTRAS IMPERFECCIONES

No siempre está claro lo que se entiende por imperfección a menos que se tenga una referencia, o definición, de lo que se considera perfecto. Es posible que no se consideren imperfecciones las diferencias observadas en las capas concéntricas que conforman los otolitos de los peces, pero las diferencias en la temperatura o en la concentración de las impurezas del agua dejan su huella en cada capa. Si se imagina un medio en el que la temperatura y la concentración de sus componentes permanezca constante y que esté libre de impurezas todas las capas del otolito serían iguales —otolito que podríamos llamar *perfecto*—. Solamente cuando el medio en el que nada el pez se perturba, por la contaminación por ejemplo, aparecen las perturbaciones reflejadas en el otolito en forma de *imperfecciones*.

Las imperfecciones que se van a considerar aquí, las relacionadas con los materiales, están menos propensas al equívoco porque la Ciencia de los Materiales nos proporciona las referencias necesarias. Estas referencias, por ejemplo el modelo idealizado —o *perfecto*— de sólido cristalino, han nacido para disponer de modelos tratables y esto se ha conseguido a través de una gran simplificación de la realidad. Aunque estos modelos poseen una belleza austera, la realidad que observa el metalúrgico o el geólogo basada en materiales reales —con *imperfecciones*— tiene con frecuencia un contenido estético más rico.

Tampoco está clara la necesidad de las imperfecciones. Las imperfecciones están ahí, en los materiales, y pueden ser beneficiosas, perniciosas o indiferentes según la propiedad que se considere. Las dislocaciones, por ejemplo, son necesarias para conformar un material y pueden ser un obstáculo si lo que se pretende es mejorar su conductividad eléctrica. Cuando las imperfecciones contenidas en un material son las reponsables de un comportamiento no deseado, es posible, a veces, contrarrestarlo mediante otras imperfecciones; en este sentido debe entenderse el título. *Necesitamos las imperfecciones para protegernos de otras imperfecciones.*

El programa de este ensayo se ha dividido en cuatro partes:

La primera parte es el marco de referencia y sirve para introducir la idea central de la Ciencia de los Materiales que, en esencia, se puede resumir así: El conocimiento de las relaciones entre la estructura de los materiales y sus propiedades permite *diseñar* materiales para unos fines determinados en vez de contentarse con *seleccionar* el material más idóneo entre los disponibles. Este planteamiento ya es posible gracias al desarrollo alcanzado por la Ciencia de los Materiales y ofrece muchas posibilidades al químico, al físico del estado sólido o al ingeniero de materiales.

La segunda y la tercera parte contienen el objetivo de esta comunicación. En ellas se destaca el papel de las *imperfecciones* en una parcela de la Ciencia de los Materiales; la de las propiedades mecánicas. En la segunda parte se comentan las ventajas de algunas imperfecciones —en una, dos y tres dimensiones— en la *deformación de los materiales*. La tercera parte tiene la misma estructura que la segunda pero es más específica ya que, aún dentro de las propiedades mecánicas, está centrada en la *fractura de los materiales*, campo por el que el autor siente especial predilección.

Y para terminar, se comentan algunos aspectos de las imperfecciones en áreas muy alejadas de la Ciencia de Materiales, ya que ha sido difícil resistirse a un escarceo en campos ajenos. Yendo de lo más cercano a nosotros a lo más alejado, se mencionan ejemplos relacionados con la evolución social, biológica o cósmica. En todos los casos se detecta que las *imperfecciones han sido la espoleta que ha activado el cambio*.

2. LA CIENCIA DE LOS MATERIALES

Materials Science technology relies on deliberately and meticulously controlled introduction of imperfections into nearly perfect crystals.

(Hans Joachim Queisser)

Se espera de la Ciencia de los Materiales que sea capaz de guiarnos en la fabricación de materiales capaces de trabajar en condiciones extremas, en ambientes nuevos y que se comporten satisfactoriamente —y aún inteligentemente— durante el período de vida previsto: Metales capaces de soportar la irradiación de los reactores nucleares, cerámicas que resistan las altas temperaturas en la reentrada a la atmósfera de los vehículos espaciales, polímeros para implantes que sean compatibles con los tejidos humanos, materiales que sean superconductores a temperatura ambiente, fibras ópticas de altísimo rendimiento y materiales para fabricar máquinas liliputienses destinadas a la nanotecnología. A la vista de estas demandas, ya no queda sitio para el procedimiento tradicional de “ensayo y error” o de “selección” que se ha utilizado hasta ahora. El científico que trabaja en el campo de la Ciencia de los Materiales debe conocer por qué los materiales se comportan de la forma en que lo hacen y, todavía más, debe ser capaz de *diseñar* materiales para que se comporten de la forma que él quiere. Debe conocer la estructura de los materiales y sus *imperfecciones*, porque ellas son las que determinan su microestructura y, a través de ella, sus propiedades macroscópicas.

En este capítulo los tres apartados tienen una idea central en común: La posibilidad de *diseñar* el material y no limitarse a seleccionarlo entre los disponibles. Se presentan tres ejemplos en los que se muestra que ya es posible *diseñar* moléculas, cristales y materiales complejos para fines determinados. La posibilidad de *diseñar* los materiales abre nuevos horizontes y nos permitirá adentrarnos en espacios insospechados.

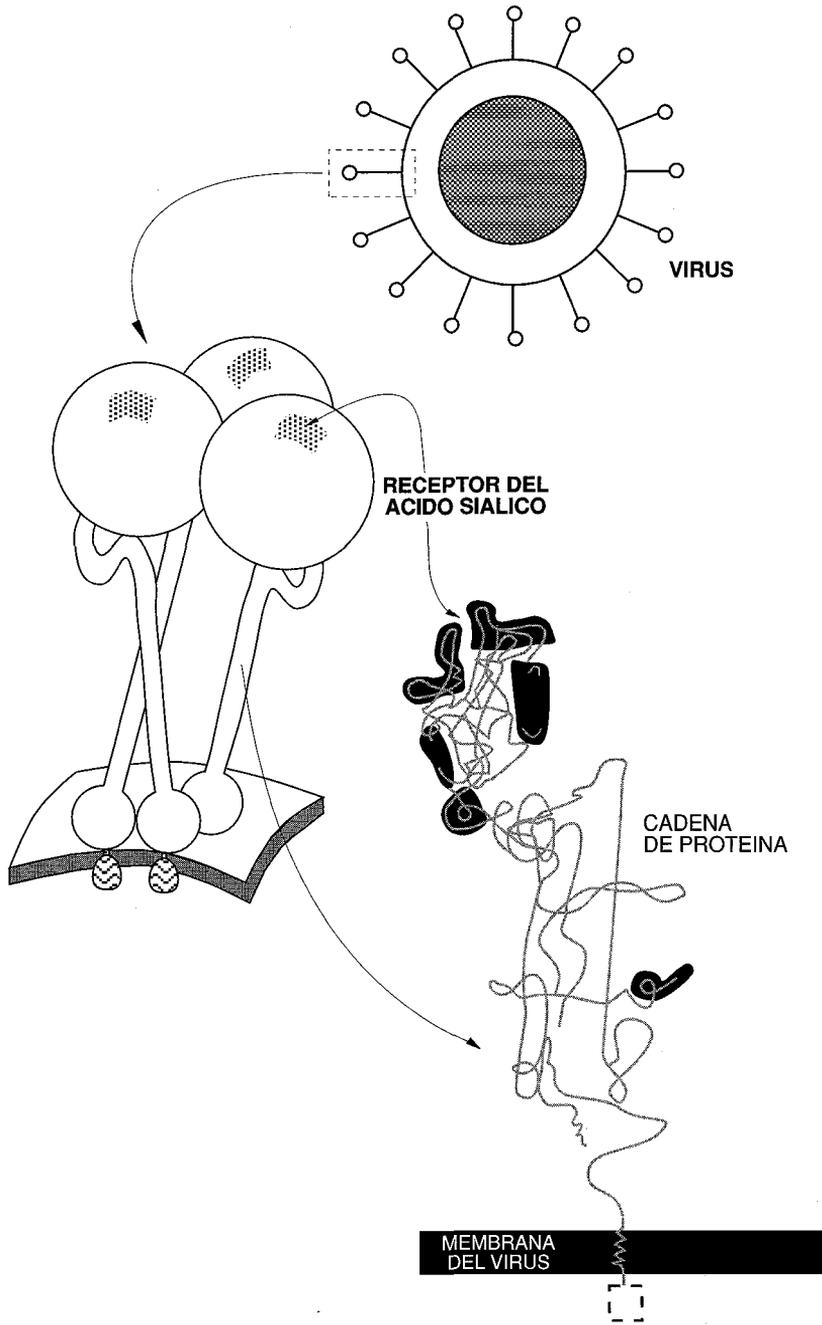


Figura 2. Esquema del virus de la gripe, detalle del antígeno HA y estructura del receptor que se une a los ácidos siálicos.

2.1. DISEÑO DE MOLECULAS

Todos los años, cuando se acerca el invierno, millones de personas se vacunan contra el virus de la gripe, especialmente aquéllas que son más sensibles; personas mayores, asmáticos y diabéticos. La vacuna es un coctel fabricado a partir de cepas recientes de virus de la gripe del tipo A y B y, aunque proporciona una cierta protección frente a estos virus, los resultados no son del todo satisfactorios.

Se sabe que la humanidad ha padecido epidemias de gripe desde hace mucho tiempo, hay indicios de que entre los años 430 y 427 a. de C. una epidemia de gripe asoló Atenas (A.D. Langmuir et al., 1985). Una de las causas de la poca eficacia de las vacunas se debe a que el virus tiene una gran capacidad para modificar los antígenos que están en su superficie —la sialidasa (NA) y la hemoaglutinina (HA)— y de esta forma evitar que la memoria del sistema inmunitario humano los reconozca.

Actualmente se está en condiciones de diseñar una molécula que inhiba el virus de la gripe, veamos cómo: Desde hace unos diez años se conoce la estructura de los dos antígenos, las dos proteínas HA y NA que recubren el virus, y se ha identificado en la HA la estructura del receptor que se une a los ácidos siálicos. Esta unión favorece la entrada del virus en la célula. El receptor es una pequeña cavidad cuya estructura y situación en la proteína se ha determinado usando técnicas de cristalografía.

El sistema inmunitario reacciona creando anticuerpos que se unen a la HA y bloquean el receptor, impidiendo que el virus se una al ácido siálico. Los anticuerpos reconocen regiones específicas en la superficie del antígeno, llamadas epítopes, a las que se unen. La forma del epítope está determinada por la secuencia de los aminoácidos en la proteína (que a su vez están determinados por el RNA del virus). El aspecto más interesante de esta situación es que los anticuerpos que neutralizan el virus de la gripe no lo hacen uniéndose al receptor del ácido siálico porque esta cavidad es muy pequeña para el tamaño del anticuerpo. Los anticuerpos se unen a varios epítopes que rodean al receptor impidiendo la adsorción del ácido siálico.

Las mutaciones del virus modifican los epítopes y hacen ineficaces los anticuerpos fabricados para los epítopes anteriores, (lo que explica la ineficacia de las vacunas y la vulnerabilidad a los nuevos virus de la gripe), pero parece ser que la estructura de la cavidad —del receptor del ácido siálico— permanece inalterada en las mutaciones. Este hallazgo permite albergar esperanzas para combatir la enfermedad, ya que se podrían diseñar y sintetizar moléculas más pequeñas que bloquearan el receptor y, en consecuencia, evitaran que el virus penetrara en la célula.

En Junio de 1993 un equipo de 18 científicos, siguiendo estas ideas, comunicaba que había sintetizado dos moléculas que inhibían no solamente la sialidasa sino también el virus de la gripe, tanto en cultivos celulares como en animales (M. Itzstein et al., 1993).

Estos resultados proporcionan un ejemplo de *diseño* —no de selección— de moléculas cuando se conoce la estructura de la proteína responsable de la enfermedad y muestran una nueva actitud frente a los problemas que se plantean en farmacología. Hasta hace pocos años la búsqueda de un medicamento se limitaba a seleccionar y purificar aquellos fármacos que ofrecían una respuesta positiva frente a una enfermedad. El camino que se acaba de iniciar permite *diseñar* el fármaco cuando se conoce la causa de la enfermedad.

Incidentalmente, la gripe o influenza —como se la llamaba antiguamente— deriva del italiano *influenza*, palabra que se acuñó parece ser en el siglo XIV en Florencia, porque se creía que cuando se producía una conjunción poco frecuente de planetas, éstos *inflúan* en las epidemias de resfriado, tos y fiebre. Aunque en la actualidad no se tienen medios para predecir una epidemia de gripe con mucha más precisión de la que proporciona la astrología, no cabe duda de que se ha dado un gran paso en la forma de abordar el problema: *diseñar a medida* una molécula que bloquee el centro activo.

2.2. DISEÑO DE MONOCRISTALES

Para aumentar el rendimiento de los motores de aviación se aumenta la temperatura de trabajo. La temperatura que deben soportar los álabes de estos reactores ha ido creciendo desde que volaron los primeros aviones a reacción en los años 40. Hoy, los turborreactores alcanzan los 1000°C y están en proyecto motores que puedan trabajar cerca de los 2000°C.

Los monocristales de las superaleaciones están entre los materiales que ofrecen las mejores prestaciones a altas temperaturas; poseen una temperatura de fusión alta, carecen de fronteras de grano —regiones donde se puede iniciar la rotura— y son muy resistentes a la fatiga térmica. Actualmente, los turborreactores más avanzados llevan álabes que son monocristales producidos por solidificación direccional.

Durante la década de los años 80, la compañía Pratt and Whitney fabricó el primer álabes de turbina monocristalino a partir del monocristal PWA 1480. Desde entonces, estos álabes han acumulado satisfactoriamente más de 5 millones de horas de vuelo en aviones comerciales y militares. Para conseguir los requerimientos de la década de los 90, en los nuevos turborreactores y modernos motores para la aviación militar, ha sido preciso diseñar una segunda generación de monocristales de superaleaciones. Pratt and Whitney ha desarrollado el PWA 1484 y la compañía Rolls Royce junto con la Cannon-Muskegon, el CMSX 4/4G.

Estos monocristales se han obtenido *seleccionando* los mejores entre los disponibles, después de un penoso proceso de "ensayo y error" que ha consumido mucho tiempo y dinero. En la década de los 60 se hizo un intento de *diseño* de superaleaciones basado en técnicas de la física del estado sólido. El procedimiento llamado Nv-PHACOMP —donde Nv significa el número de vacantes (huecos) por encima del nivel de Fermi en el metal de transición y el resto es un acrónimo de fase (phase) computación— no proporcionó los resultados esperados debido a la escasa capacidad de predicción de la estabilidad microestructural de las aleaciones complejas (C.T. Sims 1987).

Recientemente, se han *diseñado* —no seleccionado— monocristales apoyándose en un mejor conocimiento de las aleaciones de metales de transición, obtenido a partir de cálculos con orbitales moleculares. Parece ser que algunas propiedades se pueden predecir cuando se conocen dos parámetros; Md y Bo (K. Matsugui y otros, 1993). El cálculo de la estructura electrónica de la aleación se ha basado en el modelo $[M Ni_{12} A_6]$, donde M representa el metal aleante. Md es el nivel energético del orbital d del metal M y Bo es el orden del enlace (bond order) entre los átomos M y Ni .

Los monocristales de superaleaciones destinados a los álabes de las turbinas y a otras aplicaciones a altas temperaturas deben poseer una excelente combinación de las siguientes propiedades; vida en ensayos de rotura por fluencia, alargamiento en rotura en ensayos de fluencia y resistencia a la corrosión a temperaturas altas. La primera y la tercera de las propiedades están íntimamente ligadas a la homogeneidad microestructural y a la estabilidad de las fases en las aleaciones. Dicho de otra manera, la composición de las aleaciones debe hacerse de tal manera que se suprima la fase eutéctica $\gamma + \gamma'$, las fases TCP (topologically close-packed) y la fase α -W.

Estas ideas se han aplicado a una superaleación del tipo Ni-10Cr-12Al-xTa-yW y se han utilizado como parámetros Md y Bo para optimizar las propiedades mencionadas anteriormente. El resultado ha sido el diseño de 6 nuevas aleaciones con propiedades superiores a las de los monocristales de la segunda generación (K. Matsugui y otros, 1993). Por ejemplo; se ha duplicado la vida en los ensayos de fluencia, la resistencia a la corrosión a altas temperaturas ha mejorado 25 veces, la resistencia específica es dos o tres veces mayor y el costo podrá reducirse a la mitad.

La Ciencia de los Materiales ha permitido *diseñar* monocristales para un fin concreto en vez de tener que *seleccionar* el mejor entre los disponibles. De nuevo se ha producido un cambio de actitud ante un problema. La posibilidad de diseñar el material aumenta considerablemente los recursos del proyectista.

2.3. DISEÑO DE IMPERFECCIONES

La tecnología de la microelectrónica se basa en una deliberada y meticulosa *introducción controlada de imperfecciones en cristales casi perfectos*. En la actualidad es posible depositar una capa de silicio —con impurezas predeterminadas— sobre un sustrato de silicio. Es más, es posible depositar con precisión capas extraordinariamente delgadas. Por ejemplo; se puede crecer una capa cuyo espesor sea el de cinco planos atómicos, no cuatro ni seis. También se sabe crecer una capa de un material sobre un sustrato distinto, por ejemplo GaAs sobre AgAlAs. En estos casos, la *intercara* —o heterounión— entre los dos materiales se puede considerar como una *imperfección* bidimensional (ya que hay un cambio en la estructura, al pasar de una a otra). Este tipo de imperfecciones, entre distintos semiconductores, ha conseguido acaparar la atención de los investigadores en física del estado sólido y en electrónica. Un ejemplo notable del uso de tales imperfecciones es el laser de inyección entre heterouniones que, debido a su habilidad para operar de forma continua a temperatura ambiente, ha tenido un gran impacto en la tecnología en áreas que van desde las comunicaciones ópticas hasta los equipos de compac-disc.

Cuando se hace un sandwich con una fina capa de GaAs entre dos capas de GaAlAs, los electrones del GaAs quedan atrapados —como si estuvieran dentro de una caja— porque tienen dificultades para salir por arriba o por abajo aunque se pueden mover en el plano del GaAs. En este sentido se dice que han sido confinados en una dirección —en la dirección perpendicular al plano del GaAs— dentro de una pequeña región del tamaño del espesor de la capa de GaAs. A este dispositivo también se le suele llamar un “pozo cuántico”. Este confinamiento de los electrones tiene una gran influencia en su energía —que está cuantificada y se reestructura en nuevas sub-bandas— y en la densidad de estados —que se modifica significativamente—. En cierto modo los hemos confinado —aunque sólo en una dimensión— en un espacio que es un poco mayor que el espacio que ocupa un electrón cuando está asociado a un átomo aislado.

Ya se han desarrollado técnicas para confinar los electrones en dos dimensiones — “cuerdas cuánticas” — y hasta en tres — “puntos cuánticos” —. De esta forma, al confinarlos —*mediante imperfecciones*— dentro de un espacio predeterminado podemos diseñar estructuras con los niveles energéticos deseados. Es como diseñar nuevos átomos o un nuevo material semiconductor. Gracias a estas técnicas se construyen transistores más rápidos y láseres más eficientes: A partir de estructuras AlAs-GaAs, con capas de 1 nm, se han construido diodos resonantes basados en el efecto tunel capaces de oscilar más de cien mil millones de veces por segundo, (a 420 GHz, E.R. Brown y colaboradores 1989).

El interés de los investigadores se ha centrado en dos tipos de *imperfecciones* que están presentes en casi todos los dispositivos electrónicos; las *heterouniones* y las *impurezas*. En 1951, W. Shockley en la patente del transistor ya utilizó las *heterouniones* entre semiconductores y actualmente son los componentes básicos para la fabricación de pozos y otros artilugios “cuánticos”. La introducción controlada de *impurezas* en los semiconductores también se inició a mediados de este siglo. Al variar la estequiometría del semiconductor se pueden introducir cambios en las bandas de energía de los electrones y modificar su comportamiento.

Las heterouniones entre semiconductores —con o sin impurezas— se usan en tres configuraciones básicas; la heterounión simple, el pozo cuántico simple (formado por dos heterouniones, como en el ejemplo anterior) y el pozo cuántico múltiple o *super-red*, que es un sandwich múltiple donde se alternan periódicamente pozos y barreras de potencial. Estas estructuras se han podido fabricar gracias al desarrollo de las técnicas de crecimiento epitáxico basado en haces moleculares (MBE).

El aspecto fundamental de todas estas estructuras —llamadas colectivamente heteroestructuras cuánticas— es la cuantificación de la energía electrónica. Además, se modifica la densidad de estados y se restringe el movimiento de los electro-

nes dando lugar a sistemas electrónicos de dimensionalidad menor de tres. En otras palabras, utilizando estas estructuras se puede modificar la estructura electrónica. Si también se actúa sobre las impurezas se pueden conseguir nuevas propiedades. En esencia, se pueden *diseñar* y fabricar nuevos materiales semiconductores. Por todas estas razones, estas *imperfecciones* —las heteroestructuras cuánticas— han dado lugar a una nueva generación de materiales, conocidos como materiales estructurados artificialmente, y a la técnica utilizada para su diseño se la llama ingeniería de estructuras electrónicas.

Las super-redes son estructuras periódicas formadas por muchos pozos cuánticos en serie. Las capas que forman las barreras deben ser suficientemente delgadas para permitir que una apreciable cantidad de electrones las pueda atravesar por el efecto túnel. En estas estructuras la energía de los electrones se distribuye en bandas, separadas por regiones prohibidas tal como cabría esperar en una estructura periódica, de forma análoga a las bandas que aparecen en los sólidos cristalinos como consecuencia de su estructura periódica. No obstante, hay diferencias importantes entre los cristales y las super-redes fabricadas por el hombre: En primer lugar, el período de las super-redes es del orden de los 10 nm mientras que el de las redes cristalinas es de orden de 0.1 nm. Por consiguiente, las bandas de las super-redes son mucho más estrechas, del orden de 10 meV, y por este motivo se suelen llamar minibandas. En segundo lugar, la super-red es unidimensional mientras que la red cristalina es tridimensional, lo que tiene importantes consecuencias en la densidad de los estados electrónicos y en la velocidad de los electrones.

El efecto túnel en las super-redes tiene muchas aplicaciones. En sabido que la probabilidad de atravesar las barreras por efecto túnel aumenta exponencialmente a medida que disminuye la masa efectiva de la partícula y por ello los electrones pueden atravesar la super-red más fácilmente que los huecos (cuya masa efectiva suele ser un orden de magnitud mayor). En este sentido las super-redes actúan como filtros másicos. Esta propiedad se utiliza en los nuevos fotoconductores basados en las super-redes

y en el efecto túnel. Por ejemplo: se han fabricado fotoconductores construyendo, por MBE, super-redes de AlInAs-GaInAs, con capas de 3,5 nm, que responden a longitudes de onda entre 1.6 y 1.0 μm y exhiben una ganancia hasta 2×10^4 a bajo voltaje ($< 1\text{V}$) con unos tiempos de respuesta del orden de los 10^{-4} segundos (F. Capasso y otros, 1985). Cuando las barreras son más anchas, más de 10 nm, se puede observar un efecto túnel resonante secuencial. Los electrones pasan —por efecto túnel— desde el nivel inferior de un pozo a un nivel excitado del pozo adyacente. Después, dentro del mismo pozo, caen al nivel inferior. Este proceso se repite muchas veces produciéndose en la super-red un efecto en cascada que tiene interesantes aplicaciones; una de ellas es un laser de estado sólido que trabaja en la región del infrarrojo (emite radiación en el intervalo de 5 a 250 μm , dependiendo de la anchura del pozo) (F. Capasso y otros, 1986).

Con estos ejemplos se ha querido concretar la idea central de este apartado; *ya es posible diseñar materiales en el campo de la electrónica*. Variando la anchura de los pozos cuánticos o la altura de las barreras, o el número de pozos, o graduando la cantidad de impurezas, se pueden conseguir dispositivos que respondan con más rapidez, modificar la masa efectiva de los portadores de carga, o que emitan radiación de una determinada longitud de onda. En una palabra, se pueden fabricar semiconductores “a la medida”.

3. LAS IMPERFECCIONES EN LA DEFORMACION DE LOS MATERIALES

Metals are strong because they are weak (due to imperfections).

(Alan Cottrell)

En la década de 1930, con la llegada de la mecánica cuántica, quedó pavimentada la carretera que nos tenía que conducir hacia el conocimiento de los materiales basado en su estructura atómica y electrónica. Se había iniciado el gran programa de la física del estado sólido.

En algunos aspectos de este programa —por ejemplo en el estudio de la conductividad en los metales— fue posible desarrollar una teoría cuántica de los sólidos planteando y resolviendo, de forma aproximada, la ecuación de Schrödinger. En otros aspectos —la deformación y la fractura de los materiales, por ejemplo— la complejidad de la situación física se resistió a este planteamiento. La fractura y las propiedades plásticas de los sólidos, no son consecuencia del valor medio del comportamiento de los átomos sino del comportamiento excepcional de unos pocos átomos situados en *imperfecciones* de la red cristalina. Para resolver estos problemas ha sido preciso introducir conceptos intermedios —como el de los enlaces atómicos— y modelizar con ellos las *imperfecciones* para soslayar las enormes dificultades matemáticas que se presentan al tratar de resolver la ecuación de Schrödinger.

A continuación se comentan ejemplos de *imperfecciones puntuales, lineales y superficiales* que han sido decisivos para entender la deformación de los materiales.

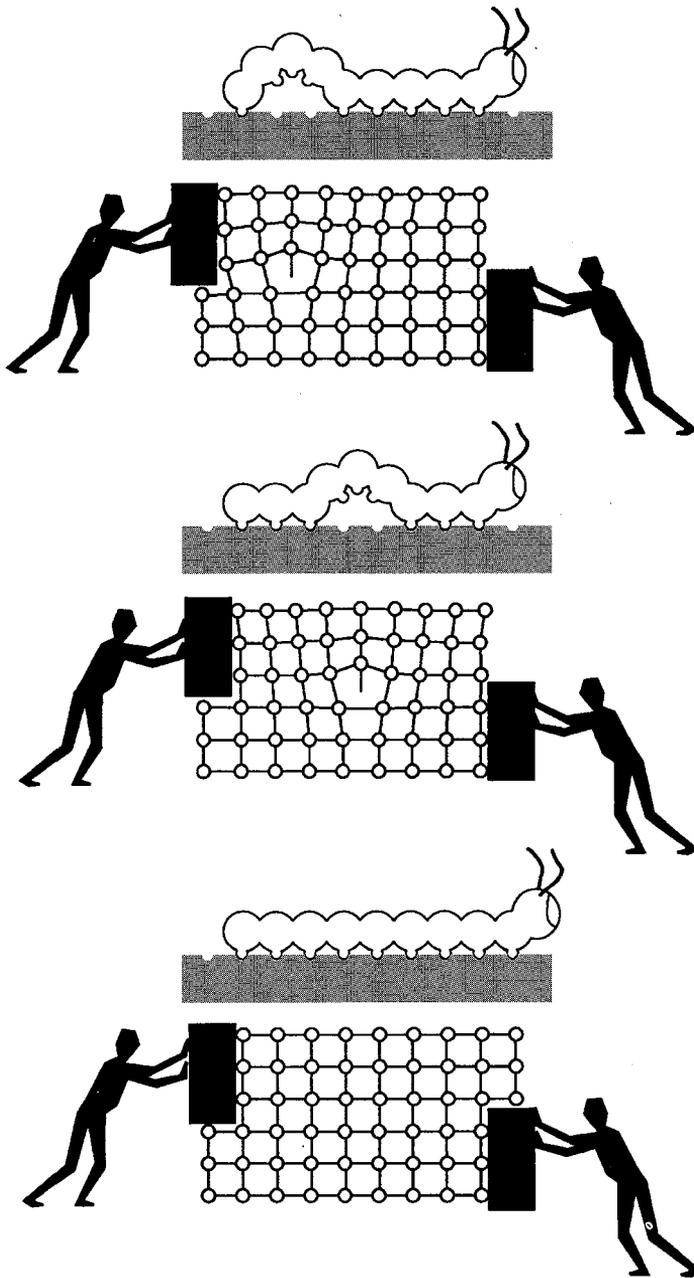


Figura 3. Movimiento de una dislocación y analogía con el movimiento de una oruga.

3.1. LOS METALES SON MALEABLES GRACIAS A LAS IMPERFECCIONES

No es una exageración decir que de entre todos los materiales de uso común, los metales son los que han tenido una mayor influencia en nuestro desarrollo tecnológico. La exclusiva combinación de una gran ductilidad y de una gran conductividad eléctrica y térmica, junto con la facilidad de aleación, han situado a los metales en una posición sin competidores. Curiosamente, la ductilidad de los metales se debe a las *imperfecciones*; un metal perfecto —si existiera— probablemente sería tan poco maleable como una piedra.

La naturaleza cristalina de los metales y los mecanismos que controlan su deformación se han desvelado en este siglo, aunque se han estado utilizando desde hace miles de años. El primer documento sobre el carácter cristalino de la deformación se publicó en 1900, cuando W. Rosenhain y J. Ewing presentaron un informe a la Royal Society de Londres en el que se indicaba que al deformar una probeta metálica aparecían en su superficie bandas de finas líneas paralelas. La naturaleza policristalina de los metales se había constatado hacía poco, en 1864 por H.C. Sorby, al observarlos en el microscopio usando luz reflejada y un polarizador. Las líneas producidas durante la deformación eran rectas y dentro de cada grano formaban familias de líneas paralelas con direcciones bien definidas. Un estudio meticuloso mostró que estas líneas se correspondían con las trazas —o mejor, con los escalones— que se forman cuando una familia de planos cristalinos se asoma a la superficie, igual que lo hacen las cartas en un mazo. Investigaciones posteriores, en particular estudios con monocristales metálicos grandes, mostraron que el deslizamiento se producía sólo en ciertos planos cristalinos y en determinadas direcciones dentro del plano. Se acababa de descubrir una nueva forma de flujo material totalmente distinta a la de los líquidos y gases.

Este mecanismo de deformación plástica en los metales es debido a la naturaleza del enlace metálico que no es direccional; el empaquetamiento de los átomos en un cristal es parecido a cómo se colocan las naranjas en un mostrador de una frutería. Por ello no sorprende que los metales sean muy densos y que se puedan alear fácilmente; la aleación equivaldría a sustituir una naranja por una manzana y en este caso es muy probable que no se desmoronara el resto de las naranjas del mostrador.

Los escalones que se observan al deformar plásticamente un metal equivalen a los que se obtendrían al desplazar una capa de naranjas sobre otra. Al principio de la década de los años 30 se hicieron cálculos para estimar la fuerza necesaria para mover una capa de naranjas y el resultado fue que el metal debería deformarse elásticamente entre el 3 y el 10 por ciento antes de plastificar. En la práctica, sin embargo, un cristal de un metal puro, cede —plastifica— con una deformación de tan sólo el 0.01 por ciento. Esta discrepancia en más de tres órdenes de magnitud entre la resistencia ideal y la real tiene un gran interés, tanto práctico como teórico, y es debida a la existencia de *imperfecciones*.

Sir Nevill Mott comenta esta situación en sus memorias (Mott, 1986) y se extraña de que por estas fechas —habiendo descubierto el neutrón, dice— este fenómeno no se hubiera explicado. Fue en 1934 cuando E. Orowan, M. Polanyi y G. Taylor postularon la existencia de una imperfección en el cristal —la *dislocación*— que justificaba los resultados experimentales. Mott introdujo una analogía que se hizo famosa. Decía que nos imagináramos que desplazar un plano de átomos sobre otro en un cristal perfecto era equivalente a arrastrar una pesada alfombra tirando de uno de sus lados. Pero, si la alfombra tuviera una arruga —una *imperfección*— a lo ancho podríamos desplazarla, una distancia equivalente a la arruga, sin más que darle una suave sacudida. La arruga es la dislocación y habríamos conseguido una deformación plástica —un desplazamiento permanente— con menos esfuerzo que cuando no estaba este defecto.

La presencia de dislocaciones en los metales explicaba la facilidad con que se pueden deformar y conformar. A las dislocaciones se les había atribuido propiedades, se hacían modelos con ellas y las predicciones concordaban bastante bien con los experimentos, pero pasaban los años y no se lograba verlas. Mott, en sus memorias, cuenta que C. Frank, trabajando con él, hizo un modelo de cómo se generaban y una teoría de cómo podían influir en el crecimiento de los cristales. Comenta que un día, en un seminario, Frank dijo que al crecer un cristal deberían observarse en su superficie unas marcas en forma de espiral, en aquel momento se produjo una gran excitación cuando alguien del auditorio dijo que justamente esto era lo que él había observado y enseñó unas fotografías que lo probaban.

Aunque esto era otra prueba indirecta, todavía nadie había conseguido ver estas imperfecciones y, menos aún, moverse por el cristal. Esta prueba llegó, finalmente, gracias al trabajo de P. Hirsch —hoy, también Sir— y de sus colegas en la época en que N. Mott estaba en Cambridge. Un buen día en 1956, Hirsch y sus colaboradores estaban observando muestras metálicas muy delgadas en un microscopio electrónico de transmisión cuando vieron unas líneas muy finas que se movían. A veces vibraban, ancladas entre dos impurezas, y otras se deslizaban por la muestra y desaparecían. Mott recuerda este instante porque uno de los colaboradores de Hirsch entró corriendo en su despacho y le dijo “Profesor, venga y vea una dislocación moviéndose”.

A Sir Nevil Mott le gustaba comentar esta anécdota y añadía que a bastantes estudiantes europeos, alemanes probablemente, les impresionaba la familiaridad con que el estudiante había irrumpido en su despacho. Y es que es difícil olvidarse de la primera vez que uno ve a las dislocaciones moviéndose. A principios de los años 70 tuve la suerte de observarlas, por primera vez, en Cambridge en el laboratorio de Sir Peter Hirsch en un video que él mismo me mostró.

El concepto de dislocación, como *imperfección lineal* en un medio continuo, nació a principios de siglo (Volterra 1907, Somigliana 1914) para interpretar campos singulares de despla-

zamientos en sólidos elásticos. Posteriormente estas ideas se adaptaron a los cristales (Taylor 1934) y resultaron muy provechosas para modelizar la deformación plástica en los materiales metálicos. Desde entonces el concepto de imperfección lineal se ha ido generalizando, impulsado por motivos estéticos o prácticos, y así nacieron las *disclinaciones*, palabra acuñada por F.C. Frank en 1948 aunque él prefería llamarlas disinclinaciones pero un profesor de inglés, cercano a él, le hizo desistir —o como dice él, le disinclinó—. Las disclinaciones surgieron por analogía con las dislocaciones; éstas tienen que ver con las imperfecciones en la simetría de traslación y aquéllas con la simetría de rotación. Las disclinaciones no se observan en los cristales normales pero se observan frecuentemente en los cristales líquidos, en el cuero cabelludo (están clasificadas por los dermatólogos) y en las cápsulas de los virus.

Para completar esta lista de imperfecciones lineales merecen citarse las que en inglés se llaman *dispiration* y *distemperation*. La primera, propuesta por W. Harris en 1970, difiere de la dislocación y de la disclinación en que no puede existir en un medio continuo, necesita la estructura discreta del cristal. Es una imperfección en la simetría helicoidal de los cristales y se cree que pueden desempeñar un papel importante en la deformación de los polímeros cristalinos. La “*distemperation*” es una dislocación en el tiempo en vez de en el espacio. El ejemplo más sencillo es la línea internacional de cambio de fecha, en donde hay una discontinuidad temporal exactamente de un día. Estas imperfecciones pueden aparecer en el mundo de los cristales en los fenómenos que dependan del tiempo, por ejemplo en las ondas de espín.

Hasta aquí, las dislocaciones han servido para entender la maleabilidad de los metales. Estas imperfecciones también son necesarias para entender el aumento de la resistencia de los metales cuando se trabajan —es decir, se deforman— en frío. Con frecuencia, el problema que deben resolver los metalúrgicos no es conseguir que un metal sea más dúctil sino todo lo contra-

rio; que sea más resistente. Desde la Antigüedad hasta hace pocos años lo que hacían para conseguirlo —sin darse cuenta— era poner obstáculos al movimiento de las dislocaciones. Cuando el endurecimiento se producía por deformación plástica, por forja o laminado, los obstáculos eran —paradójicamente— las propias dislocaciones. Durante la deformación plástica no sólo se movilizan las dislocaciones, también se crean en grandes cantidades. En la estructura de un metal muy deformado se puede observar una maraña tridimensional de dislocaciones formada por familias de dislocaciones que deslizaban en distintos planos y que en la intersección han quedado ancladas. Un efecto similar al atasco de tráfico que se produce en un cruce cuando nadie respeta los semáforos. Las mismas imperfecciones responsables de la ductilidad en los metales pueden hacerlos muy resistentes cuando se multiplican. Por todo ello —como dice Sir Alan Cottrell— “los metales son fuertes debido a sus debilidades”, en forma de *imperfecciones* que llamamos dislocaciones.



A—HEARTH. B—HEAP. C—SLAG-VENT. D—IRON MASS. E—WOODEN MALLETS.
F—HAMMER G—ANVIL.

Figura 4. Herreros medievales en *De re metallica*, por Georgius Agricola
(por cortesía de Dover Publications, Inc. N.Y.).

3.2. EL FLOGISTO PUEDE CREAR IMPERFECCIONES

Es curioso que los metales, en general, sean blandos y maleables cuando son muy puros y que endurezcan cuando se alean con otros. Esto lo sabían bien nuestros antepasados de la edad del bronce —el bronce es una aleación de cobre y estaño— y si los héroes de Homero hubieran luchado con espadas de cobre, en vez de bronce, las aventuras hubieran tenido un final muy distinto. Ahora sabemos que el átomo de estaño es mucho mayor que el del cobre y el endurecimiento que se produce, al añadir un pequeño porcentaje de estaño al cobre, es debido a esta diferencia de tamaños o, dicho de otra forma, a la *imperfección* que se crea en el cristal por las dificultades de acomodación del estaño. Esta imperfección crea un campo tensional que dificulta el movimiento de las dislocaciones con el consiguiente endurecimiento de la aleación.

Una situación parecida ocurre cuando el carbono introduce *imperfecciones* en el hierro. Ningún material metálico ha tenido más influencia en la historia de la humanidad que el hierro y la simple aleación con el carbono; el acero. Cuanto más se excava y se descubre en los yacimientos arqueológicos del medio oriente, en Irak o en Irán, más lejos se sitúa la fecha de la utilización del hierro, que actualmente se cifra en unos 3000 años antes de nuestra era. El hierro empezó a ser un material importante cuando se desarrollaron procedimientos de producción a relativa gran escala, técnica que se atribuye a los Hititas, y no empezó a competir con el bronce hasta que los herreros encontraron la forma de transformar el hierro blando en este magnífico material que es el acero, el cual fácilmente se puede conformar y metamorfizar, mediante un tratamiento térmico, en un material de resistencia y dureza casi insuperables.

La diferencia entre el acero y el hierro está en la presencia de una pequeña cantidad de impurezas —entre el 0.2 y el 1.5 por ciento en peso de carbono— que pueden inducir *imperfecciones* en

la red cristalina del hierro. Se tardó mucho en reconocer que el acero era una aleación del hierro. A diferencia del bronce, que se fabricaba mezclando concienzudamente varios componentes, la aleación del hierro con el carbono ocurría de forma invisible al ser absorbido incidentalmente durante la fabricación del metal. El papel fundamental del carbono en el acero y en la fundición no se descubrió hasta 1774. Antes de esta fecha, tanto los filósofos como los herreros creían que el acero era una forma más pura que el hierro porque era el hierro el que se transformaba en acero después de un prolongado calentamiento en el fuego y no en vano el fuego purificaba casi todas las cosas.

Hasta bien entrado el siglo XVIII, el herrero filósofo creía que el tratamiento térmico *quitaba* al hierro algún principio nocivo, lo purificaba como se ha comentado antes. El herrero más pragmático sostenía que con el tratamiento térmico algo beneficioso se *añadía* al hierro. El mejor candidato en aquellas épocas era el *flogisto*. Veremos a continuación —a la luz de la Ciencia de los Materiales— que el flogisto no es otra cosa que el carbono y que el esoterismo que rodeaba al temple del acero no es más que la introducción de *imperfecciones* para contrarrestar otras *imperfecciones*:

El hierro puro puede adoptar distintas estructuras cristalinas dependiendo de la temperatura que se considere; por debajo de 910°C adopta una estructura cúbica centrada, conocida como hierro α o ferrita. Si se calienta por encima de esta temperatura (sin llegar a 1390°C) la estructura que adopta es la cúbica centrada en las caras, también llamada hierro γ o austenita. Estas estructuras pueden acomodar átomos de carbono porque algunos *huecos* que dejan los átomos de hierro son mayores que el *tamaño* convencional del átomo de carbono, pero si medimos la cantidad de carbono que se puede disolver en las dos estructuras obtenemos un resultado insospechado y que tiene mucho que ver con el extraordinario comportamiento del acero.

La máxima cantidad de carbono que puede disolverse en la ferrita es del 0.25% en peso, cuando la temperatura es de

723°C. A esta misma temperatura la austenita puede disolver hasta un 0.8%. Curiosamente la austenita es una estructura con un mayor grado de empaquetamiento —con menos huecos— que la ferrita y, sin embargo, almacena más carbono. La explicación de esta aparente paradoja está en que el tamaño de los huecos es distinto en las dos estructuras; la austenita tiene menos huecos pero son más grandes y la ferrita tiene más huecos, pero son más pequeños. Cuando el hierro se calienta con carbón, los átomos de carbono —no el flogisto— penetran dentro de su estructura.

Todos los que hemos observado a un herrero templando hemos visto que cuando el hierro está al rojo vivo lo sumerge en agua. Con este proceso se engaña a los átomos de carbono disueltos en la austenita y se crean imperfecciones capaces de mejorar las propiedades mecánicas del acero. Veámoslo un poco más despacio:

Consideremos, primero, lo que sucedería si el acero se enfriara lentamente —en el aire, por ejemplo—. Supongamos que partimos de una austenita a 1000°C con un 0.5% de carbono. Cuando estamos por debajo de los 723°C la aleación se descompone en ferrita y cementita. Este último componente está formado por el exceso de carbono que no puede retener la ferrita y que se combina químicamente con el hierro para dar el carburo de hierro, Fe_3C , llamado cementita. La separación de la austenita con carbono disuelto en estos dos componentes se debe a la difusión de los átomos de carbono. La redistribución se produce entre una situación en la que estaban uniformemente distribuidos a otra en la que la distribución es heterogénea; en una región hay átomos de carbono disueltos, pero menos que antes, y en otra región uno de cada cuatro átomos es un átomo de carbono.

Si en vez de enfriar lentamente lo hacemos muy rápido, —al sumergir el acero al rojo vivo en agua fría, por ejemplo—, puede que no le demos suficiente tiempo a los átomos de carbono para que se redistribuyan y pueden quedar atrapados donde estaban. Inicialmente, a alta temperatura, los átomos de carbono estaban cómodamente instalados en los huecos de la austenita, pero estos huecos se encojen al enfriar y pasar el hierro a una

estructura cúbica centrada que, para poder acomodar los átomos de carbono, tiene que distorsionarse. A esta estructura deformada se le llama martensita. En esencia es una ferrita *imperfecta*, deformada. Esta distorsión crea un campo de tensiones que dificulta el movimiento de las dislocaciones y produce un endurecimiento del acero. La martensita es el componente más duro del acero templado. La transformación de austenita en martensita al no ser por difusión puede producirse a grandes velocidades, los pequeños cristales de martensita se pueden formar en menos de una millonésima de segundo. Las transformaciones martensíticas no se limitan solamente a los metales: Algunas cerámicas, como la circonia, también las exhiben y hasta cristales proteicos de algunas bacterias pueden realizar una transformación martensítica y el cambio de forma que resulta ayuda a la bacteria a penetrar en la piel de los animales.

Así hemos llegado al final de esta historia. El herrero de nuestros días sabe cómo distribuir el carbono dentro del hierro y combinar la dureza de la martensita con la ductilidad de la ferrita. La martensita es muy dura y también muy frágil, pero al *recocerla* (recalentándola entre 300 y 600°C) se puede recuperar cierta ductilidad a costa de ceder un poco de dureza. El recocido proporciona a los átomos de carbono suficiente energía térmica para que se difundan fuera de la solución supersaturada y reaccionen con el hierro para formar pequeños precipitados de cementita. La red cristalina se relaja —las imperfecciones desaparecen— y se recobra en algunos sitios la estructura de la ferrita, recuperándose en parte la ductilidad. Las partículas de cementita siguen oponiéndose al movimiento de las dislocaciones confiriendo al acero más resistencia. La sabia combinación de resistencia y ductilidad, mediante los adecuados tratamientos térmicos —que no son otra cosa más que la modificación de las *imperfecciones*—, es la que puede conferir al acero sus espectaculares propiedades.

Las impurezas de estaño en el cobre o las de carbono en el hierro son las responsables —a través de las *imperfecciones* que

originan en la red cristalina— del endurecimiento de estas aleaciones. La presencia de átomos extraños en un cristal puede originar imperfecciones —o defectos— de tipo *puntual*, a diferencia de los lineales considerados en el apartado anterior. Los átomos extraños pueden situarse en el lugar que ocupan los átomos del huésped, dando lugar a defectos *substitucionales*, o situarse entre ellos, en este caso los defectos se llaman *intersticiales*. También pueden producirse defectos puntuales en cristales puros, si lo que sucede es que está sin ocupar una posición del átomo. A esta imperfección puntual se la llama una *vacante*. El estudio y la caracterización de los defectos puntuales despertó mucho interés a mediados de este siglo en relación con el comportamiento electrónico de los semiconductores pero este tema nos alejaría del propósito del capítulo que es el de las relaciones entre las imperfecciones y la deformación de los materiales. Las *vacantes* juegan un papel importante en la deformación de los materiales a temperaturas altas y pueden servir para ilustrar un segundo ejemplo sobre la necesidad de las imperfecciones.

Hemos visto que las dislocaciones —*imperfecciones lineales*— favorecen la deformación de los metales. También, que los aleantes en forma de solución sólida —*imperfecciones puntuales*— impiden la deformación bloqueando las dislocaciones. Tampoco falta el caso contrario; las vacantes —las otras *imperfecciones puntuales* que son el contrapunto de las anteriores— favorecen la deformación desbloqueando las dislocaciones y ayudándolas a sobrepasar los obstáculos. Este mecanismo es operativo cuando la movilidad de las vacantes es alta y esto sucede a temperaturas altas (del orden de $0.5 T_F$, donde T_F es la temperatura absoluta de fusión).

El tema se repite, nos encontramos de nuevo con un tipo de imperfección que es ambivalente. En algunas circunstancias puede ser deseable que se facilite la deformación plástica, pero en general no lo es. Si queremos endurecer el material podemos compensar el efecto pernicioso de estas imperfecciones —las vacantes— introduciendo otras imperfecciones. Si utilizamos de

nuevo la analogía de la alfombra, una manera de dificultar su deslizamiento sería depositar sobre la alfombra algunas piedras del tamaño adecuado. Esto es lo que se hace con los aceros inoxidables austeníticos, aumentar la resistencia al movimiento de las dislocaciones mediante la formación de precipitados —en forma de carburos y compuestos intermetálicos— que son las piedras sobre la alfombra. Por este procedimiento se consiguen resistencias aceptables hasta los 600°C.

Necesitamos las imperfecciones para defendernos de otras imperfecciones y esto lo hemos destacado en este apartado destinado a las imperfecciones puntuales y a los tratamientos térmicos, que ahora empezamos a dominar pero que hasta hace poco tiempo eran más arte que técnica. No se sabe bien cuándo se empezaron a utilizar los tratamientos térmicos, pero se han encontrado obras maestras, datadas entre los siglos nueve y ocho antes de nuestra era, procedentes de los herreros del Luristan. La estructura metalográfica de las espadas que forjaron muestra que el acero, muy alto en carbono, fue trabajado en caliente indiscriminadamente a temperaturas por encima y por debajo de la temperatura de transición y no fue templado. Las armas que usaron los griegos y los romanos algunas veces se endurecieron por temple, pero no era una práctica frecuente y el control no era bueno. Y es que el temple era una operación crítica y difícil, por el riesgo a romper la pieza si el contenido en carbono no era el adecuado o la velocidad de enfriamiento no era la correcta; hasta hace muy poco ambas cosas eran difícilmente medibles. Además, la técnica más reciente del temple seguida del recocido ha facilitado mucho más el control de producto final. No es de extrañar que las pocas espadas que fueron correctamente templadas llegaran a ser legendarias y que los buenos herreros estuvieran muy cotizados en la antigüedad; se dice que Nabucodonosor, en el año 604 a. de C., tenía en cautividad más de mil herreros procedentes de Damasco.

3.3. CUANDO LA ENVOLTURA ES MAS IMPORTANTE QUE EL CONTENIDO

A comienzos de los años sesenta se descubrió una técnica para moldear piezas metálicas capaz de abaratar bastante los costos de fabricación. Esta técnica se llama *conformado superplástico* y se basa en el siguiente fenómeno: En algunos metales y aleaciones es posible conseguir, mediante tratamientos térmicos, una estructura de granos muy finos —de milésimas de milímetro— y en estas condiciones cuando la temperatura es suficientemente alta los metales fluyen como el vidrio caliente, aunque siguen conservando su estructura cristalina.

Todos hemos observado con curiosidad a los sopladores de vidrio. En un extremo del tubo tienen un pegote de vidrio caliente al rojo vivo y soplando por el otro extremo y girando el tubo consiguen, aparentemente con poco esfuerzo y mucha habilidad, dar forma a una botella o a un jarrón. Hasta hace muy pocos años parecía imposible realizar esta proeza con los metales y por este motivo el conformado metálico era mucho más caro que el de los vidrios.

El vidrio caliente fluye como un líquido viscoso, donde la velocidad de la deformación es proporcional a la tensión aplicada. Los metales se comportan, en general, de distinta manera pero si el tamaño de sus cristales es suficientemente pequeño también fluyen como los líquidos viscosos. Este comportamiento es debido al papel preponderante que ahora juegan las fronteras del grano cristalino; otro tipo de *imperfección*. Cuando los granos son grandes las dislocaciones son las protagonistas de la deformación plástica pero al disminuir el tamaño de los cristales el papel de las fronteras de grano es más importante. La película, relativamente amorfa, que envuelve los pequeños granos cristalinos facilita su deslizamiento y es la responsable del comportamiento superplástico de los metales.

Además, una vez que se ha conformado una pieza compleja por este procedimiento, es posible restituir la estructura

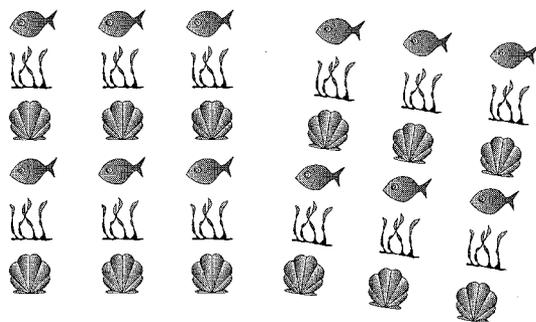
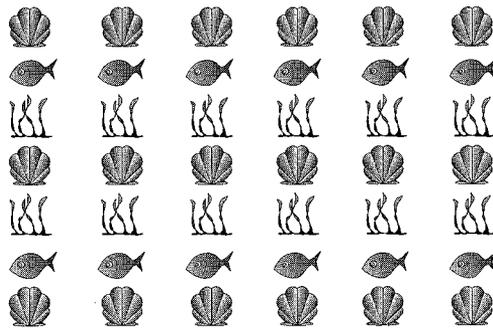
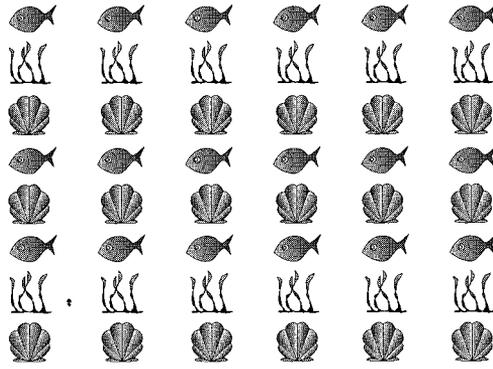


Figura 5. Ejemplos de imperfecciones: defecto de apilamiento, plano de macla y frontera de grano.

normal del metal —la estructura de grano más grueso y la imposibilidad de fluir al calentarlo— mediante un adecuado tratamiento térmico. Debido a la gran capacidad de deformación, los materiales superplásticos se pueden forjar en formas complejas, eliminando muchas etapas de mecanización y acabado.

Las fronteras de grano son otro tipo de *imperfecciones* que se suman a nuestra colección: Las *imperfecciones puntuales*, como las que puede inducir el carbono en el hierro, crean una perturbación localizada alrededor de un átomo. Las dislocaciones, ejemplo de *imperfección lineal*, crean una perturbación mucho más extensa y notan su influencia átomos muy alejados de ellas. Hay otra familia de imperfecciones, las *imperfecciones superficiales*, a las que pertenecen las fronteras de grano, los defectos de apilamiento, las fronteras de las maclas y las superficies libres. Todas se originan al interrumpir bruscamente una estructura y están muy localizadas.

Las imperfecciones superficiales se pueden imaginar fácilmente si establecemos una analogía entre un cristal bidimensional y una pared empapelada. Las dimensiones de los rollos de papel no suelen coincidir con las de la habitación, lo que da lugar a que se cometan varios tipos de *imperfecciones* al empapelar. Supongamos que se dispone de rollos de papel en los que aparecen en vertical una secuencia de peces (P), algas (A) y conchas (C), y que se empapela una habitación de forma que la primera fila todo sean peces. Al llevar media pared empapelada se observarán las siguientes filas: PACPACPAC. Si en este momento se han terminado los rollos y hay que empezar otros y, por descuido, se empieza con el dibujo de las algas, cuando se termine la pared se observarán las siguientes filas: PACPACPACACPACPAC. Esto es un ejemplo de defecto de apilamiento. Si en un cristal los átomos se pueden apilar de tres formas distintas y se salta una secuencia se obtiene un *defecto de apilamiento*. La presencia de defectos de apilamiento en los cristales tiene importantes repercusiones en la deformación plástica.

Con dibujos de peces y algas es difícil que el decorador pegue una tira de papel cabeza abajo, es decir con las figuras

invertidas, pero si la decoración se basa en dibujos geométricos ya no es tan difícil equivocarse y podría suceder que la secuencia de las filas fueran PACPACAPCAP. Con este defecto se produce una imagen especular de las secuencias y a la imperfección se la conoce como frontera o *plano de macla*. Los planos de macla se conocen desde hace mucho tiempo porque los cristalógrafos han podido observar las maclas a simple vista, pero para ver los defectos de apilamiento ha hecho falta poder resolver las distancias entre los planos cristalinos y sólo recientemente, con ayuda del microscopio electrónico de transmisión, ha sido posible observarlos. Tanto los defectos de apilamiento como los planos de macla son obstáculos al movimiento de las dislocaciones y por lo tanto la presencia de estas *imperfecciones* endurecen y dificultan la deformación del cristal.

Los defectos de apilamiento y los planos de macla pueden reflejar un descuido del decorador pero las *fronteras de grano* —si continuamos con la analogía— reflejan una grave negligencia. Esta imperfección ocurre en el encuentro entre dos regiones cristalinas con distinta orientación. Al empapelar, este defecto se puede producir cuando una tira de papel no es paralela a la otra o está desplazada, error que se nota por la falta de acuerdo entre los bordes.

La mayoría de los materiales cristalinos son policristales —los monocristales son muy raros y valiosos— y cada cristal, sobre todo si es muy pequeño, se le suele llamar grano, de ahí el nombre de frontera de grano. La razón por la que se tardó bastante en descubrir la naturaleza cristalina de los metales es porque son policristales de grano muy pequeño y no exhibían un aspecto exterior tan geométrico como el cuarzo o la calcita.

El enlace entre los átomos de las fronteras de grano no es tan fuerte como el de los situados en el interior del cristal y por este motivo las fronteras de grano deben considerarse regiones inherentemente débiles. Esta imperfección es la que explotó, inconscientemente, Henry Sorby cuando a mediados del siglo pasado, al resaltar las fronteras de grano después de un ataque químico, descubrió que los metales eran agregados policristali-

nos. La técnica que utilizó —y que todavía se usa— consiste en pulir la superficie del metal mediante abrasivos, cada vez más finos, y después atacarla químicamente con un reactivo adecuado. Como las fronteras de grano son más débiles, el reactivo las ataca más fácilmente que al resto del grano. Este ataque forma surcos que delinear el contorno de los granos que se pueden observar con la ayuda del microscopio óptico y, a veces, a simple vista.

La debilidad de las fronteras de grano frente a la agresividad de los agentes externos se manifiesta en un fenómeno conocido como corrosión intergranular. Las repercusiones económicas de este fenómeno en la industria, en particular en la petroquímica y la nuclear, son enormes y el comentarlas requeriría un capítulo entero. No obstante, ya que se ha mencionado el fenómeno, se puede dar una pista para los arqueólogos que, algunas veces, tienen que descubrir falsificaciones entre objetos antiguos. La presencia de corrosión intergranular bien arraigada puede ser un buen certificado de antigüedad, porque las estructuras que se han formado lentamente con el tiempo son distintas —se parecen a los depósitos minerales— de las que se obtienen mediante un proceso acelerado en un laboratorio.

Cada cristal crece alrededor de una *imperfección*. Las microestructuras reveladas por las fronteras de grano son complejas, pero observándolas cuidadosamente se puede descubrir un cierto orden, un cierto equilibrio entre el orden de corto alcance y el orden de largo alcance. Además, cada microestructura es el resultado —y hasta un cierto punto un registro— de su pasado. Aunque la estructura de un cristal ideal, si está en equilibrio, sólo depende de la temperatura y de la composición, todos los otros aspectos de la microestructura de un policristal dependen de su historia y especialmente del tipo y distribución de las *imperfecciones* preexistentes en la matriz. Las estructuras biológicas y las estructuras sociales, aunque mucho más complejas, también se rigen por los mismos principios. En el último capítulo tendremos ocasión de comentarlas.

Las *imperfecciones* en forma de fronteras de grano son necesarias: Las necesitamos para ablandar o endurecer los cristales, según nos convenga. Necesitamos las fronteras de grano cuando los granos son muy pequeños —del orden del micrómetro— para conseguir la superplasticidad y también necesitamos las fronteras de grano cuando los granos son grandes para bloquear a las dislocaciones y reducir la plasticidad. Las fronteras de grano, al interrumpir la continuidad de la red cristalina, se comportan como barreras al movimiento de las dislocaciones. En consecuencia, hemos de añadir las fronteras de grano a la lista de imperfecciones que, al bloquear el movimiento de las dislocaciones, proporcionan una mayor resistencia a los cristales.

De nuevo, igual que en los capítulos anteriores, detectamos la *ambivalencia de las imperfecciones*; necesitamos las fronteras de grano para facilitar la deformación de los metales y por otra parte recurrimos a las fronteras de grano para impedir su deformación. Utilizamos las imperfecciones para conseguir un efecto o su contrario, en función de los objetivos propuestos. En estos ejemplos, se le ha dado la vuelta —intelectualmente— a la estructura granular de la materia y se ha puesto de manifiesto que los granos tienen menos interés que su envoltura, *las fronteras de grano*. Resulta interesante observar que algunas veces ocurre lo mismo en los discursos políticos o en las estructuras sociales.

4. LAS IMPERFECCIONES EN LA ROTURA DE LOS MATERIALES

Everything that God has made has got a CRACK in it.
(Ralph Waldo Emerson)

Hay tantos aspectos en la fractura de los materiales cuya manifestación se debe a la falta de perfección que resulta sorprendente que las teorías de la rotura basadas en la presencia de *imperfecciones* sean tan recientes. La primera persona que buceó, con éxito, en el oscuro mar de las imperfecciones fue el ingeniero inglés Alan Griffith. Como consecuencia del estudio de las roturas de varillas y fibras de vidrio, en 1920, Griffith sugirió que los sólidos eran inherentemente frágiles porque contenían *imperfecciones*. Imperfecciones que no vió pero que supuso que existían en forma de minúsculas *fisuras*. Diez años más tarde también se postulaba otra imperfección para explicar la plasticidad en los cristales; la dislocación. En ambos casos se tardó más de 20 años en observar tales defectos y durante tan largo período sólo el éxito de la concordancia entre la teoría y los resultados experimentales mantuvo viva la fe en las *imperfecciones*.

Necesitamos las *imperfecciones* —en forma de fisuras— para explicar la rotura de los materiales. También necesitamos otras *imperfecciones* para defendernos de las fisuras, si queremos que éstas no progresen y el material no se rompa. Varios ejemplos ilustran estas ideas en los siguientes apartados: En algunos casos se trata de *imperfecciones puntuales*, en otros son las dislocaciones —*imperfecciones lineales*— las que evitan la propagación de las fisuras y, finalmente, la presencia de intercaras débiles —*imperfecciones superficiales*— nos proporcionan otro ejemplo de cómo la Naturaleza se las arregla para defenderse de las roturas.



Figura 6. A.A. Griffith CDE FRS (1893-1963) (por cortesía del Institute of Materials).

4.1. LAS IMPERFECCIONES DE GRIFFITH

La resistencia a tracción es una propiedad importante de los materiales. Una gran parte de los accidentes estructurales se deben a roturas de componentes que trabajaban a tracción. Este tipo de accidentes no se limita a la ingeniería, desgraciadamente también es frecuente en biología y en medicina. En los países desarrollados, alrededor del uno por ciento de los fallecimientos se debe a la rotura de arterias en el cerebro. Aunque las arterias están tan bien diseñadas como para soportar 100.000 latidos por día, se puede formar una protuberancia —un aneurisma— en sus paredes que acabe rompiéndose.

Hasta hace pocos años, la resistencia, la cohesión y la fractura de los materiales eran temas que los científicos más académicos ignoraban o eludían. Los ingenieros, por el contrario, no tenían más remedio que tenerlos en cuenta si querían mantener en pie sus estructuras. Para ello se hacían numerosos ensayos de tracción con los materiales que iban a utilizar, trataban estadísticamente los resultados —porque casi siempre tenían mucha dispersión— y acababan sacando una *tensión admisible* que utilizaban para proyectar junto con los *coeficientes de ignorancia*. Era una forma de abordar el problema totalmente pragmática porque hasta mediados de este siglo no surgió una teoría coherente de la fractura de los materiales.

Fue en la década de los cincuenta cuando la comunidad científica se dio cuenta de que la resistencia a tracción de un material no bastaba, en muchos casos, para predecir la carga de rotura de una estructura y que hacía falta introducir una nueva propiedad —la tenacidad de fractura— que midiera la capacidad que tiene un material agrietado para soportar cargas. Desde estas fechas la Mecánica de la Fractura se ha utilizado con provecho; primero por los ingenieros navales, después por los aeronáuticos, más tarde por los industriales —en particular en relación con las centrales nucleares— y últimamente por los ingenieros civiles.

La Mecánica de la Fractura tiene sus raíces en un trabajo seminal de A.A. Griffith, publicado en 1920 y que no tuvo resonancia. Este trabajo estaba basado en la existencia de *imperfecciones* en los materiales —imperfecciones que Griffith postuló, pero que tardó treinta años en observarlas—. Veamos con un poco más de detalle estas ideas de la mano de J.E. Gordon (J.E. Gordon, 1988).

J.E. Gordon, ingeniero naval, coincidió con Griffith en los laboratorios de la Royal Aircraft en Farnborough, Inglaterra, durante la Segunda Guerra Mundial. No llegaron a conocerse pero Gordon se hizo amigo de su íntimo colaborador, Lockspeiser —más tarde Sir Benjamin— que le comentó las incidencias de su trabajo. El artículo seminal de Griffith su publicó en la revista *Philosophical Transactions* de la Royal Society en 1920, cuando él tenía 27 años. El trabajo no fue rechazado ni se pusieron objeciones por parte de los editores, fue publicado y simplemente ignorado, por lo menos durante una generación. Gordon comenta que durante la Segunda Guerra Mundial trabajó en el mismo edificio donde Griffith realizó su investigación y, probablemente, utilizó las mismas máquinas de ensayo. Aunque estaba interesado —muy interesado, subraya— en las roturas que se producían en los aviones, casi nunca oyó hablar de Griffith y no utilizó sus ideas para resolver los problemas de fractura. Sabía, muy vagamente, que un hombre llamado Griffith (que por aquellas épocas estaba en el departamento de motores) había realizado algunos experimentos sobre la resistencia del vidrio, pero ignoraba el mensaje innovador de sus ideas que eran aplicables no sólo a la rotura de pequeñas varillas de vidrio sino a grandes estructuras como aviones, barcos o puentes. El reconocimiento de la importancia de la Mecánica de la Fractura empezó a comienzos de los años cincuenta cuando se utilizaron las ideas de Griffith para investigar la rotura de los fuselajes presurizados de tres aviones Comet que explotaron en vuelo.

Griffith eligió el vidrio para realizar sus clásicos experimentos porque es frágil y rompe en régimen elástico, de esta forma se evitaba las complicaciones de las roturas elastoplásticas de muchos metales. Con la ayuda de Lockspeiser midió la energía

superficial y el módulo de elasticidad del vidrio y dedujo que la tensión de rotura debería valer alrededor de 13.000 MPa. No obstante, cuando ensayó varillas de vidrio de 1 mm de diámetro midió valores de la carga de rotura alrededor de 170 MPa, cien veces menores de lo que había predicho. (Nótese la semejanza de esta situación con la deformación plástica, considerada en el capítulo anterior, donde se encontró una discrepancia en más de tres órdenes de magnitud entre la resistencia ideal de un cristal y la real). Para explicar este fenómeno tendremos que recurrir —igual que antes— a las *imperfecciones*, pero sigamos con los experimentos: No satisfecho con los resultados que había obtenido, Griffith ensayó varillas cada vez más finas y observó que a medida que disminuía el diámetro aumentaba la carga de rotura. Llegó a ensayar fibras de vidrio de centésimas de milímetro de diámetro y obtuvo valores de la carga de rotura de 3.400 MPa. No era el valor teórico pero se estaba acercando, había multiplicado por 20 los primitivos valores. Extrapolando estos resultados para fibras más finas obtuvo valores del orden de 10.000 MPa. Cuarenta años más tarde se consiguieron ensayar fibras monocristalinas, casi perfectas, de unas pocas micras de diámetro de varios metales, de alúmina y de vidrio y se registraron los altísimos valores predichos por Griffith muchos años antes (A. Kelly y N.H. Macmillan, 1986).

Las teorías de Griffith, siempre basadas en la presencia de *imperfecciones*, se apoyaban en razonamientos tensionales y energéticos. Los razonamientos basados en los conceptos de tensión fueron comprendidos y aceptados relativamente pronto por los ingenieros pero los basados en argumentos energéticos —más fundamentales y de aplicación más general— chocaron, como comenta Gordon, con una resistencia emocional y fueron ignorados o mal interpretados durante mucho tiempo.

El razonamiento tensional, a grandes rasgos, es más o menos así: Para justificar la disminución de la tensión de rotura con el aumento del tamaño de las probetas de vidrio, Griffith postuló la presencia de *imperfecciones* en forma de grietas. Se sabía que en el extremo de una grieta sometida a tensión se producía una gran concentración de tensiones. Precisamente, en

1913, C.E. Inglis —un ingeniero naval preocupado por la concentración de tensiones en las escotillas— había deducido una expresión para calcular la concentración de tensiones en el extremo de una fisura elíptica y demostró que la tensión aumentaba con el tamaño de la fisura y con la disminución del radio de curvatura en dicho extremo. Griffith supuso que las fisuras en el vidrio se podían asimilar a elipses muy aplanadas y que en las probetas de mayor tamaño existían fisuras más largas. De este modo la concentración de tensiones sería mayor en las probetas de mayor diámetro y, por consiguiente, la carga de rotura sería menor. Quedaba por comprobar experimentalmente la presencia de estas fisuras.

De nuevo, la situación era análoga a la de las dislocaciones y la deformación plástica. Como ya se ha comentado, se tardó más de veinte años en “ver” las dislocaciones postuladas por Orowan, Polanyi y Taylor. El camino recorrido en busca de las fisuras también fue largo, pero después de las contribuciones de C. Andrade (1937) y de M. Parratt, D. Marsh y J.E. Gordon (1956), apenas quedaban dudas de que la interpretación de Griffith para explicar la fractura, basada en las *imperfecciones*, era correcta.

La contribución de Griffith, desde el punto de vista energético, fue la de darse cuenta de que la disminución de la carga de rotura en una probeta debida a la presencia de una fisura podía plantearse como un balance energético. La reducción de la energía potencial de un material agrietado sometido a tensión —cuando la grieta crece— se compensa con el aumento de energía superficial debido al crecimiento de la grieta. En cierto modo, fue una extensión formal del teorema de Castigliano (1875) a sólidos elásticos con fisuras que puedan crecer.

Uno de los resultados interesantes de este planteamiento energético es la explicación del aumento de la fragilidad de una estructura a medida que aumenta su tamaño. Es sabido que las estructuras grandes pueden comportarse frágilmente aún cuando el material, ensayado en pequeñas probetas en un laboratorio, exhiba un comportamiento dúctil. Ello es debido a que la energía potencial disponible para la propagación de las grietas aumenta con el volumen de la estructura, mientras que la energía gastada

en la rotura aumenta con el área de la superficie fisurada. Para un cierto tamaño una grieta podrá ser estable (o subcrítica como también se la llama) porque no se disponga de suficiente energía para propagarla, pero a medida que la estructura crezca de forma homotética la grieta acabará siendo inestable (o crítica) y, para muchos tipos de sollicitación, la estructura romperá frágilmente.

Un buen número de accidentes recientes en puentes, barcos o en aviones se ha debido, en parte, por haber ignorado estas ideas. Durante mucho tiempo los ingenieros han diseñado a partir del concepto de fuerza y no de energía. La idea de que para cada material hay una *tensión admisible*, (que se puede encontrar en los manuales), por debajo de la cual no rompe ha estado, y todavía está, muy arraigada; en esencia, consiste en suponer que si esta tensión admisible no se supera, la estructura puede considerarse segura. La idea de Griffith de que una estructura es un sistema energético potencialmente inestable no ha penetrado fácilmente entre los proyectistas.

Aunque el trabajo de Griffith en Farnborough sobre la resistencia del vidrio se hacía con el consentimiento oficial, la verdad es que pocos de sus colegas o superiores entendieron o apreciaron sus resultados. No obstante, tanto él como Lockspeiser —así lo comentó este último a Gordon— estuvieron trabajando varios años con mucho entusiasmo. Por desgracia, una tarde Lockspeiser olvidó cerrar un mechero de gas, de los que usaban para fundir el vidrio, y se declaró un incendio en el laboratorio. Después de una investigación, se les dijo a los dos que no perdieran más tiempo jugando con el vidrio y fueron transferidos al departamento de motores.

En octubre de 1950, en Pocono Manor, Pennsylvania, se celebró un simposio internacional sobre "Imperfecciones en cristales casi perfectos" (W. Shockley y otros, 1952). En esta ocasión, F. Seitz hizo una síntesis sobre las imperfecciones en los sólidos que tuvo una gran resonancia y que ha permanecido como un clásico sobre el tema. No sólo destacó las propiedades físicas de las imperfecciones puntuales, lineales y superficiales sino que formuló las interacciones e interrelaciones entre ellos de

una forma unificada. No obstante, al contemplarlo desde la posición actual, resulta extraño que se olvidara de las fisuras cuando tuvo en cuenta las dislocaciones y se extendió bastante en las propiedades mecánicas. Sin menoscabo de la importancia de las fisuras para entender la fractura de los sólidos, la fisura es una imperfección que tiene interés por sí misma y merece la misma consideración que otros defectos. Más tarde, R.M. Thomson hizo justicia y le dedicó un extensivo estudio, al estilo de F. Seitz, a este tipo de imperfección (R.M. Thomson, 1986).

Las imperfecciones —en este caso las *fisuras*— son necesarias para entender la rotura de los materiales. ¿Podemos protegernos de estas imperfecciones con otras imperfecciones? La experiencia demuestra que sí. Las dislocaciones pueden bloquear las fisuras, impidiendo que se produzca una rotura frágil o retardándola, transformando una rotura frágil en una rotura dúctil. El balance energético propuesto por Griffith es una condición necesaria pero no suficiente para que una fisura crezca. Debe existir, además, un mecanismo en la punta de la fisura que provoque la fractura. Una grieta muy afilada —cuyo radio de curvatura sea muy pequeño para que la tensión, según Inglis, sea muy grande— es el mecanismo adecuado para disparar la rotura. Una grieta roma, con un radio de curvatura apreciable, probablemente no produzca el incremento de tensión necesaria para propagar la fisura y esto, precisamente, es lo que pueden hacer las dislocaciones si la punta de la fisura es capaz de emitir las. La emisión de dislocaciones en el fondo de una fisura puede embotarla, aumentar su radio de curvatura y detener su propagación. Algunos materiales son capaces de emitir estas dislocaciones a una determinada temperatura —la temperatura de la transición dúctil-frágil—. Por encima de esta temperatura las roturas son dúctiles, requieren más energía y, por lo tanto, son más seguras (J. Rice y G.E. Beltz, 1994). Ya es posible diseñar materiales cuya temperatura de transición esté por debajo de la temperatura de trabajo, de modo que cualquier rotura, si llega a producirse, se produzca dúctilmente y, por lo tanto de forma más segura.

4.2. LAS IMPUREZAS PUEDEN EVITAR ROTURAS

El Orient Express es el nombre coloquial que se ha dado al avión suborbital, de Mach 8, que volará de Nueva York a Tokyo en tres horas. Durante la reentrada en la atmósfera su piel puede alcanzar la temperatura de 1000°C y para resistir tan altas temperaturas es probable que se use un material intermetálico en el que se han introducido deliberadamente una pequeña cantidad de *imperfecciones* —impurezas— para evitar que sea tan frágil como el vidrio. Se trata del material Ni_3Al .1.5% Hf con 200 ppm de B. Esta aleación tiene propiedades sorprendentes ya que su resistencia aumenta con la temperatura, llegando a alcanzar 900 MPa a 950°C .

El problema de muchos materiales intermetálicos es su gran fragilidad, causada por la debilidad de sus fronteras de grano. Un ejemplo clásico es el Ni_3Al ; los monocristales de Ni_3Al son bastante dúctiles mientras que los policristales son muy frágiles, a pesar de tener 12 sistemas de deslizamiento independientes. En muchos metales y aleaciones la fragilidad intergranular se asocia a la presencia de impurezas segregadas en las fronteras de grano —por ejemplo, el S o el P en los aceros—. Curiosamente, los estudios realizados con policristales de Ni_3Al y de Ni_3Si de gran pureza, utilizando espectroscopia con electrones Auger, han puesto de manifiesto que las fronteras de grano están muy limpias. Estos resultados indican que la debilidad de estos policristales es debida a la estructura de las fronteras de grano y no a las posibles impurezas que se pudieran segregar en ellas.

Para entender el origen de la debilidad de las fronteras de grano se ha hecho un estudio sistemático de la influencia de las variables metalúrgicas y químicas en la cohesión de los granos de las aleaciones del tipo Ni_3X . Uno de los hallazgos más interesantes es que la presencia de impurezas de boro (algunas partes por millón) mejora muchísimo la ductilidad y prácticamente eliminan las roturas de tipo intergranular en las aleaciones de Ni.24% Al y Ni.20% Al.10% Fe. Estos materiales, sin impurezas

de boro, tienen una ductilidad a temperatura ambiente alrededor del 1% y cuando se les añade 200 ppm de boro alcanzan ductilidades del 40% (J.A. Horton, C.T. Liu y M.L. Santella, 1987).

Los estudios realizados con espectroscopía Auger demuestran que el boro tiende a segregarse en las fronteras de los granos cristalinos y los cálculos de densidad de estados electrónicos, en aglomerados de Ni_3Al con átomos de boro, indican que el boro mejora la cohesión entre los granos cristalinos (M.E. Eberhart y D.D. Vvedinsky, 1987). A otro nivel, se supone que los efectos benéficos del boro en las fronteras de grano del Ni_3Al consisten en introducir *imperfecciones* que faciliten el movimiento de las dislocaciones y permitan la acomodación del deslizamiento en vez de la propagación de las grietas (A.H. King y M.H. Yoo, 1987).

La introducción de *imperfecciones* —en forma de átomos de boro— en los policristales de Ni_3Al , ha vuelto dúctil un material frágil y ha permitido la utilización industrial de un material con unas propiedades muy interesantes a altas temperaturas; su resistencia aumenta con la temperatura, hasta los 900°C , tiene buena resistencia a la oxidación, incluso hasta 1000°C , es soldable y la fluencia es aceptable.

En el capítulo anterior, al considerar el papel de las imperfecciones en la deformación de los materiales, se destacaron por su importancia las *dislocaciones*. En este capítulo, las *fisuras* son las imperfecciones protagonistas de la fractura. Al tratar de mostrar la necesidad de otras imperfecciones para bloquear su efecto pernicioso podemos establecer un paralelismo entre fisuras y dislocaciones; en el ejemplo del Ni_3Al se ha puesto en evidencia como la presencia de *imperfecciones puntuales* —en forma de átomos intersticiales— bloqueaba las *fisuras* en las fronteras de grano. Al final de la sección anterior se ha comentado cómo las dislocaciones —*imperfecciones lineales*— podían bloquear una *fisura* impidiendo una rotura frágil. En la próxima sección se describe cómo la Naturaleza, haciendo uso de *imperfecciones superficiales*, también consigue detener las *fisuras*.

El carácter ambivalente, detectado varias veces al comentar la influencia de las imperfecciones en la deformación, también aparece aquí. Las imperfecciones son necesarias en algunos casos y perniciosas en otros, cuando no conseguimos eliminarlas nos defendemos de ellas con otras imperfecciones. El hierro nos ofrece ejemplos de *imperfecciones* —en forma de impurezas— que pueden actuar en los dos sentidos.

En el hierro policristalino las fronteras de grano son más débiles que los propios granos. No obstante, raramente se observan roturas intercristalinas a bajas temperaturas, exceptuando cuando se han segregado en las fronteras de grano impurezas que los debilitan, como sucede con el fósforo y el azufre. La razón es porque pequeñas cantidades de solutos intersticiales se segregan en las fronteras de grano y las refuerzan. Es un proceso análogo al del boro con el nitruro de aluminio. Hay resultados experimentales que indican que los elementos que pueden situarse en posiciones intersticiales dentro de la malla del hierro, como el carbono, el nitrógeno o el boro, podrían reforzar las fronteras de grano. Por el contrario, el hidrógeno —el elemento intersticial por excelencia— es bien conocido que es un elemento que induce la fragilización.

A.H. Cottrell, en un reciente artículo (A.H. Cottrell, 1990), justifica el carácter ambivalente de las *imperfecciones* producidas por el carbono y el hidrógeno en el hierro. Supone que las diferencias entre los dos —en reforzar o debilitar las fronteras de grano— es debida a las posiciones que adoptan cuando están en las fronteras de grano y cuando están quimisorbidos en una superficie. El hidrógeno se quimisorbe en lugares muy próximos a donde se coloca en las fronteras de grano y la transición de un lugar a otro —debida al paso del frente de la fisura— ocurre casi inmediatamente y con poco gasto energético. El carbono, por el contrario, se sitúa en lugares diferentes y la transición del estado intersticial al quimisorbido tarda más. Hace falta una energía suplementaria para que los átomos de carbono salten la barrera de potencial entre los dos estados. Este incremento energético es

la razón del endurecimiento de las fronteras de grano, según Cottrell, cuando el carbono intersticial se segrega en ellas.

El carácter pernicioso del azufre y del fósforo en las fronteras de grano ha creado muchos problemas a los fabricantes y usuarios del acero. Uno de los primeros usos de la fundición fue para las bolas de cañones. Muy pronto se declaró un conflicto de intereses entre los principales usuarios —la armada— y los fabricantes. La madera que se utilizaba para fabricar el carbón, necesario para fundir el hierro, también hacía falta para construir los barcos. Cuando se intentó sustituir el carbón vegetal por el carbón mineral empezaron los problemas porque el carbón mineral contiene demasiado azufre y fósforo y las bolas resultaron muy frágiles. A principios de 1700, con la utilización del coque —menos rico en azufre— el problema mejoró. Resulta interesante notar que la fragilidad de las fundiciones propició un cambio en el modo de vida de los mineros; al sustituir la madera por el coque se produjo un desplazamiento de la industria minera desde los grandes bosques a las regiones ricas en carbón mineral.

También los primitivos cañones de fundición tuvieron problemas por la presencia de fósforo y azufre en las fronteras de grano y muchos reventaron durante su utilización. A pesar de estos fracasos siguieron utilizándose durante años porque los cañones de bronce resultaban bastante más caros. Incidentalmente, es curioso resaltar que en el siglo dieciocho los cañones que fabricaban los ingleses eran de mejor calidad que los españoles y franceses, aunque los barcos españoles y franceses eran superiores. Parece ser que las roturas de bastantes cañones a bordo de la flota aliada durante la batalla de Trafalgar, en 1805, tuvo bastante que ver con el resultado de la contienda.

Para terminar este apartado se cita otro ejemplo donde la presencia de *imperfecciones* (impurezas) resulta beneficiosa. No se trata, en este caso, de reforzar las fronteras de grano pero sí de evitar la rotura. En 1910 el capitán Robert Falcon Scott emprendía la conquista del Polo Sur. Después de una cuidadosa preparación y tras haber dejado bases de aprovisionamiento y petróleo, el 17 de enero de 1912 Scott y cuatro miembros de su equipo



Figura 7. El equipo de Scott (de izquierda a derecha; *Wilson, Evans, Scott, Oates* y *Bowers*), exhausto y desilusionado, al alcanzar el Polo Sur (por cortesía del Scott Polar Research Institute).

llegaban al Polo Sur. Allí encontraron una bandera dejada por Roald Amundsen que había llegado un mes antes. Decepcionados y cansados emprendieron el regreso hacia el campamento base, con temperaturas inferiores a 40°C bajo cero. Para colmo de males, al llegar a la primera base descubrieron que las latas de petróleo estaban vacías. Cansados, helados y hambrientos no pudieron calentarse ni preparar la comida. Lo mismo sucedió en el siguiente depósito. Scott y dos supervivientes fallecían el 31 de marzo, sólo a 18 kilómetros de un campamento bien pertrechado.

La causa de que las latas de petróleo estuvieran vacías parece ser que fue debido a las soldaduras, hechas con un estaño que no era el adecuado. El estaño experimenta una transformación alotrópica —pasa de una estructura tetragonal centrada (de color blanco y densidad 7.3) a una estructura cúbica diamantina (de color gris y de densidad 5.7)— a partir de 13°C y la velocidad de esta transformación es máxima a -40°C . Al disminuir la densidad aumenta de volumen y se pulveriza. Las soldaduras no pudieron resistir las bajas temperaturas y se desintegraron. Este fenómeno era conocido en aquéllas épocas pero no se tuvo en cuenta. Hubiera bastado con añadir una pequeña cantidad de bismuto al estaño para evitar la transformación y, quizás, Scott y su equipo hubieran regresado al campamento base.

La presencia de *imperfecciones* —debidas a las impurezas— ha permitido evitar la propagación de otras *imperfecciones* —en forma de fisuras—. En estos casos se puede decir que las impurezas han evitado las roturas.

4.3. IMITANDO A LA NATURALEZA

En los dos apartados anteriores se ha comentado cómo se puede impedir la propagación de una fisura —la *imperfección* característica de la fractura— mediante imperfecciones *puntuales* y *lineales*. La Naturaleza nos brinda muchos ejemplos del bloqueo de fisuras mediante imperfecciones *superficiales*. A este tipo de imperfecciones, necesarias para detener las fisuras, vamos a dedicar este último apartado.

La mica puede servir muy bien para ilustrar estas ideas. Es un mineral formado por muchas capas y fácilmente exfoliable en los planos paralelos a las capas. Si una fisura trata de propagarse perpendicularmente a los planos de exfoliación, una vez atravesada la primera capa, lo más probable es que se pare o que progrese un poco en dirección perpendicular; en cualquier caso no avanza. Si el material fuera homogéneo —sin los planos de debilidad (o de exfoliación)— la fisura anterior progresaría mucho más fácilmente. Introduciendo *imperfecciones* en forma de planos de debilidad se ha conseguido aumentar la tenacidad —la resistencia a la fractura— del material.

Es bien sabido que la madera y otros tejidos vegetales pueden exfoliarse con relativa facilidad en una dirección. Esta aparente debilidad es una gran ventaja cuando tratamos de propagar una grieta perpendicularmente al tronco de un árbol doblándolo, por ejemplo. Casi nunca se obtiene un corte limpio; la grieta es zigzagueante, prueba de que la fisura se ha parado y ha cambiado de dirección repetidas veces y este proceso consume más energía que si la fisura se hubiese propagado en un solo plano.

El carácter beneficioso de estas *imperfecciones superficiales* —llamado también efecto Cook-Gordon, en memoria de sus descubridores J. Cook y J.E. Gordon (el mismo del apartado anterior)— también está presente en los huesos, aunque de una forma menos llamativa. Se ha observado que en los huesos de los humanos y de otros animales hay fisuras incipientes que han

quedado bloqueadas por fisuras secundarias mediante un mecanismo análogo al descrito. En general, estas fisuras cicatrizan de forma natural sin que nos demos cuenta; casi siempre la fisura inicial cicatriza primero y después lo hacen las secundarias. En personas mayores, la cicatrización de las fisuras secundarias puede retrasarse bastante o no llegar a realizarse, sin que ello tenga mayores consecuencias.

Hay un grupo de personas que pueden tener problemas con las fisuras secundarias, son los buzos que trabajan a grandes profundidades. Se sabe que para evitar una posible embolia debida a las burbujas de nitrógeno durante la descompresión, cuando se bucea a grandes profundidades, se respira una mezcla de oxígeno y de helio en vez de nitrógeno. El helio no se absorbe en los tejidos humanos. No obstante, si en los huesos del buzo hay fisuras secundarias el helio puede almacenarse y permanecer allí. Si el proceso se repite, el helio no sólo inhibe la cicatrización de las fisuras secundarias sino que, además, puede provocar infecciones en los huesos que pueden tener serias consecuencias.

Las conchas de los moluscos también aprovechan el efecto Cook-Gordon. Se trata de un biomaterial relativamente simple; se parece a una pared de ladrillos, donde los ladrillos son pequeñas placas de aragonito y el mortero de cemento es una proteína con polisacáridos. En la madreperla, por ejemplo, las placas tienen una anchura media de $0.3 \mu\text{m}$ y el espesor de las uniones es de 10 a 20 nm. Este biomaterial compuesto contiene el 95% en peso de carbonato cálcico y el 5% de proteína. Su estructura contiene planos débiles —las uniones pueden considerarse *imperfecciones superficiales*— que le confiere una gran resistencia a la propagación de fisuras en dirección perpendicular al plano de las placas. La energía de fractura que se ha medido (S. Mann y otros, 1989) es de 1500 Jm^{-2} , bastante mayor que la del polimetilmetacrilato —que es del orden de 1000 Jm^{-2} — y mucho mayor que el hormigón — 80 Jm^{-2} — o los materiales cerámicos convencionales —de 20 a 40 Jm^{-2} —. Otra propiedad adicional es que el cemento que une las placas mantiene sus propiedades en un ambiente acuoso que, en general, degrada a los materiales compuestos arti-

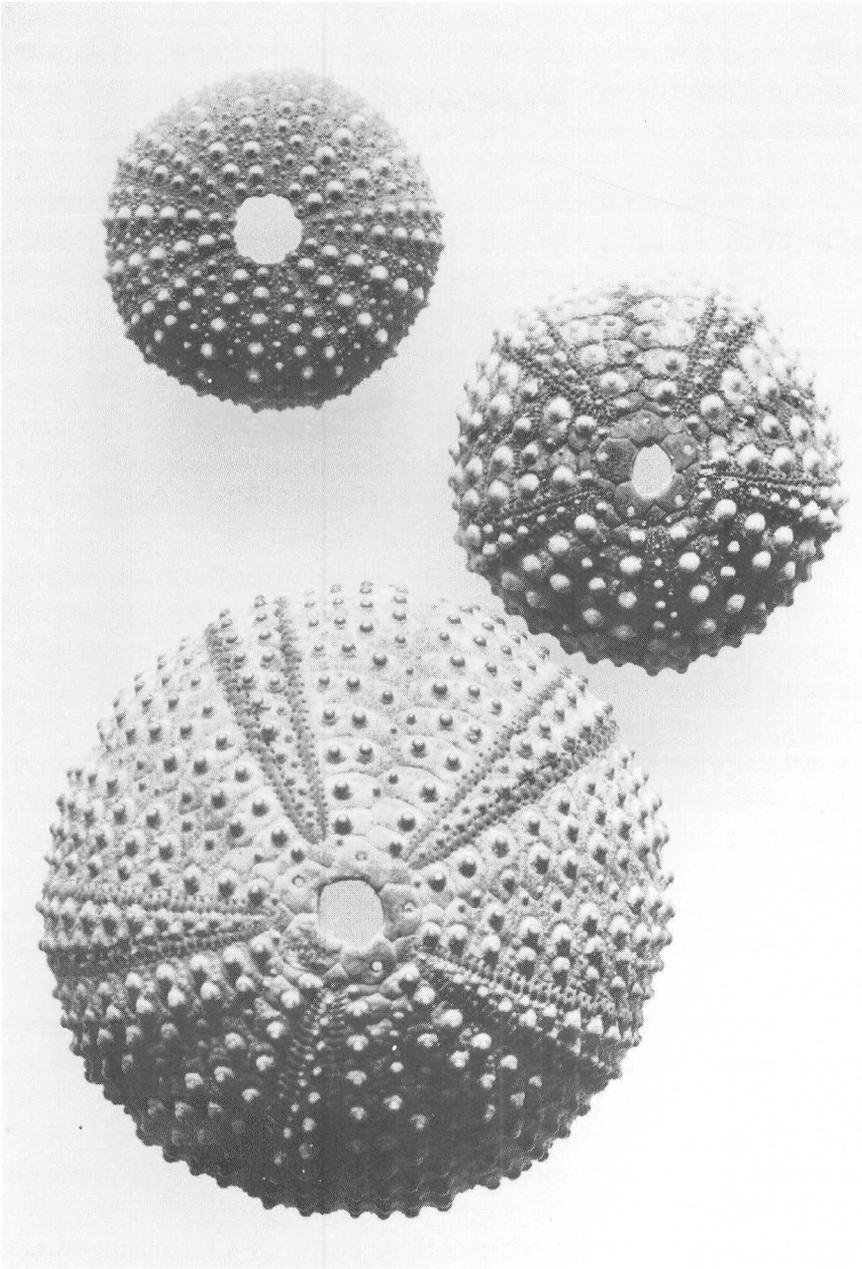


Figura 8. Las conchas de muchos seres vivos aprovechan el efecto Cook Gordon (conchas de equinodermos).

ficiales. Es más, este cemento proteico controla la nucleación, crecimiento y morfología de las placas de aragonito, creando un material compuesto de una perfección no alcanzada por el hombre.

La comunidad científica empezó a darse cuenta, alrededor de los años 60, del potencial de los biomateriales compuestos y todavía tardó más en convencerse de que para aumentar la tenacidad de un material compuesto no siempre era mejor aumentar la adherencia entre sus componentes. La obtención de una adhesión —relativamente *imperfecta*— entre las fibras y la matriz resultaba mucho mejor, en general. Los primeros materiales compuestos que se fabricaron alcanzaron pronto la mala fama de que eran demasiado frágiles; ello se debía a que la adherencia entre los componentes era demasiado buena.

La aplicación de estas ideas le ha proporcionado bastante flexibilidad al ingeniero de materiales a la hora de diseñar; puede elegir un material cerámico frágil —pero de gran resistencia a tracción, ligero y resistente a altas temperaturas— y fabricar fibras con él y arroparlas con una matriz apropiada. Por este procedimiento transforma un material frágil en otro tenaz. Las cargas se transmiten de una fibra a la otra a través de la matriz y de las intercaras —más débiles—. Si una fibra se rompe no se rompe toda la pieza, la carga se reparte por la matriz y los esfuerzos los absorben las fibras adyacentes. Además, la matriz protege a las fibras de los posibles ataques químicos y de las inclemencias externas.

Los materiales compuestos basados en fibras de carbono proporcionan un buen ejemplo de estas tecnologías (véase, por ejemplo G. Savage, 1993). La resistencia, ligereza y gran rigidez de las fibras de carbono permiten que los materiales compuestos fabricados con ellas puedan sustituir a muchos otros ventajosamente, como ha sucedido con los palos de golf, las cañas de pescar o las raquetas de tenis. Ahora compite con el aluminio en la fabricación de aviones, gracias a los superpegamentos que hacen por la fibra de carbono lo mismo que hicieron los pegamentos tradicionales por la madera en la fabricación de los

bombarderos ligeros tipo Mosquito, durante la Segunda Guerra Mundial. Gran parte de la estructura del avión Voyager, que en 1987 dio la vuelta al mundo sin escalas, estaba hecha con un material compuesto a base de fibras de carbono y en buena medida el éxito se debió a este novedoso material. Para superar la debilidad transversal, cuando se preve que el material pueda trabajar en cualquier dirección, se recurre al refuerzo tridimensional. Para ello hace falta una tecnología inspirada en el arte de tejer en tres dimensiones; ya se han desarrollado algunos procedimientos, pero se trata de un arte nuevo poco familiar para los ingenieros acostumbrados a diseñar con materiales metálicos y no con tejidos.

La naturaleza nos ofrece ejemplos de *imperfecciones superficiales* beneficiosas; hemos comentado las ventajas de las *intercaras débiles* para detener las grietas mediante el mecanismo de Cook-Gordon y, para terminar, comentaremos brevemente la importancia de las *fronteras de grano*.

En algunos biomateriales, como las conchas de los moluscos, la importancia de las fronteras de grano es grande porque los granos son muy pequeños. Cuando estas imperfecciones —las fronteras de grano— adquieren un protagonismo importante aparecen propiedades sorprendentes. En los materiales compuestos artificiales se ha intentado “copiar” las intercaras débiles y también se está intentando fabricar materiales, de grano muy pequeño, con un porcentaje alto de fronteras de grano. Para esta nueva generación de materiales todavía no ha cuajado un nombre único y se les conoce por materiales con nanofases, materiales nanoestructurados, materiales nanocompuestos o, simplemente, nanomateriales.

Los *nanomateriales* son materiales artificiales con un tamaño de grano, de fase o de otra característica estructural, por debajo de 100 nm. El interés por estos materiales ha aumentado en los últimos años al darnos cuenta de que sus propiedades son diferentes y, con frecuencia, superiores a las de los mismos materiales con tamaños de grano, o de fase, convencionales. Veamos algunos ejemplos (R.W. Siegel, 1993).

La resistencia de los nanometales aumenta de forma espectacular: Tanto el cobre como el paladio aumentan su microdureza en un 500%, con respecto a los valores convencionales, cuando están en forma de nanomateriales de 6 nm de tamaño de grano. Estos resultados se han confirmado con otros materiales y parece ser que se trata de una propiedad de los nanometales o, por lo menos, de los metales con estructura cúbica centrada en las caras. Este aumento de resistencia se puede ajustar a una ley del tipo Hall-Petch, pero el mecanismo responsable debe ser totalmente distinto. Los tamaños de grano en los nanometales son más pequeños que las distancias críticas para que los mecanismos de Frank-Read sean operativos y también más pequeños que el espaciado normal entre dislocaciones en un apilamiento. En consecuencia, los mecanismos que requieren menos energía, (como la generación de dislocaciones en el de Frank-Read) quedarán congelados por debajo de un cierto tamaño de grano y para poder deformar el material será preciso movilizar mecanismos que consuman más energía. Todo parece indicar que la disminución del tamaño de los granos —con el consiguiente aumento de las *imperfecciones* en forma de fronteras de grano— es la causa del aumento de la resistencia en los nanometales.

También se han observado efectos interesantes en las nanocerámicas: Mediante técnicas de microdureza se ha detectado un aumento importante de la sensibilidad a la velocidad de deformación a medida que disminuye el tamaño del grano en nanomateriales de TiO_2 y ZnO . Parece ser que esta tendencia hacia una mayor ductilidad, a medida que disminuye el tamaño del grano, es una propiedad de las cerámicas ultrafinas. Este comportamiento podría deberse a la presencia de numerosas intercaras —*imperfecciones*— y a que las distancias de difusión son muy pequeñas y permiten que se cicatricen rápidamente las incipientes fisuras que se forman al deslizar entre sí las fronteras de grano. En el TiO_2 nanocristalino se ha observado que la tenacidad de fractura se multiplica por dos. Posiblemente estas propiedades se puedan generalizar a las nanocerámicas y suponer que los mecanismos de deformación por deslizamiento entre las fronteras de grano, acompañados por la rápida cicatrización

de las posibles fisuras, facilitarán el conformado, incluso el conformado superplástico. De ser así, se ha abierto una vía de enorme interés industrial para el conformado de materiales muy frágiles y poco tenaces como los cerámicos, compuestos intermetálicos y materiales semiconductores.

La utilización de las ideas y estrategias procedentes de las investigaciones en biomineralización para la síntesis de materiales inorgánicos con propiedades controladas es un área de investigación muy prometedora. En particular, los procesos que utilizan agregados supramoleculares y el control de la química de las intercaras por el reconocimiento entre moléculas pueden proporcionar nuevas rutas para fabricar materiales compuestos que tengan un tamaño de partículas uniforme (del orden de nanómetros), una forma preestablecida, una nucleación orientada, u otras propiedades. El conocimiento actual sobre estos sistemas biológicos no es suficiente para iniciar este tipo de trabajos, pero es previsible que en un futuro próximo se utilicen técnicas de biología molecular para producir en serie las matrices orgánicas que controlan la nucleación y el crecimiento de estos cristales.

Con todos estos ejemplos es posible intuir que imitando las *imperfecciones* que nos muestra la naturaleza será posible fabricar materiales con mejores propiedades o con propiedades nuevas. Las vías que se han esbozado permitirán fabricar materiales controlando sus propiedades mecánicas, electrónicas y químicas para utilizarlos en futuras aplicaciones tecnológicas. La prestigiosa revista *Science* ha dedicado un número monográfico a la importancia de estas *imperfecciones* —las intercaras— en el diseño de materiales (Marzo 1994).

5. EVOLUCION E IMPERFECCIONES

La prueba de la evolución radica en las imperfecciones reveladoras de una historia.

(Stephen Jay Gould)

Las estructuras sociales, biológicas o cósmicas, que podemos detectar en cierto momento, dependen de su historia —son estructuras *fúneas*, como se explica a continuación—. Estas estructuras son la consecuencia de asociaciones e interacciones entre *imperfecciones* previas y, también, el marco dentro del que se generarán las imperfecciones que darán lugar a las estructuras del futuro.

En este último capítulo se hace una reflexión sobre la contribución de las *imperfecciones* en la formación y evolución de distintas estructuras: Desde las más próximas a nosotros, las *estructuras sociales*, hasta las más distantes, la *estructura del universo*, pasando por las *estructuras de los seres vivos*.

Veremos que dentro de las estructuras sociales, los ideólogos equivalen a *imperfecciones* en contra del orden establecido, que los procesos evolutivos que transformaron los primitivos antropoides en el "homo sapiens" se debieron a las *imperfecciones* de su cerebro y que si el lector, en estos instantes, está leyendo este prólogo es debido a ciertas *imperfecciones* que estuvieron presentes antes de que el universo tuviera una vida de una billonésima de billonésima de segundo.

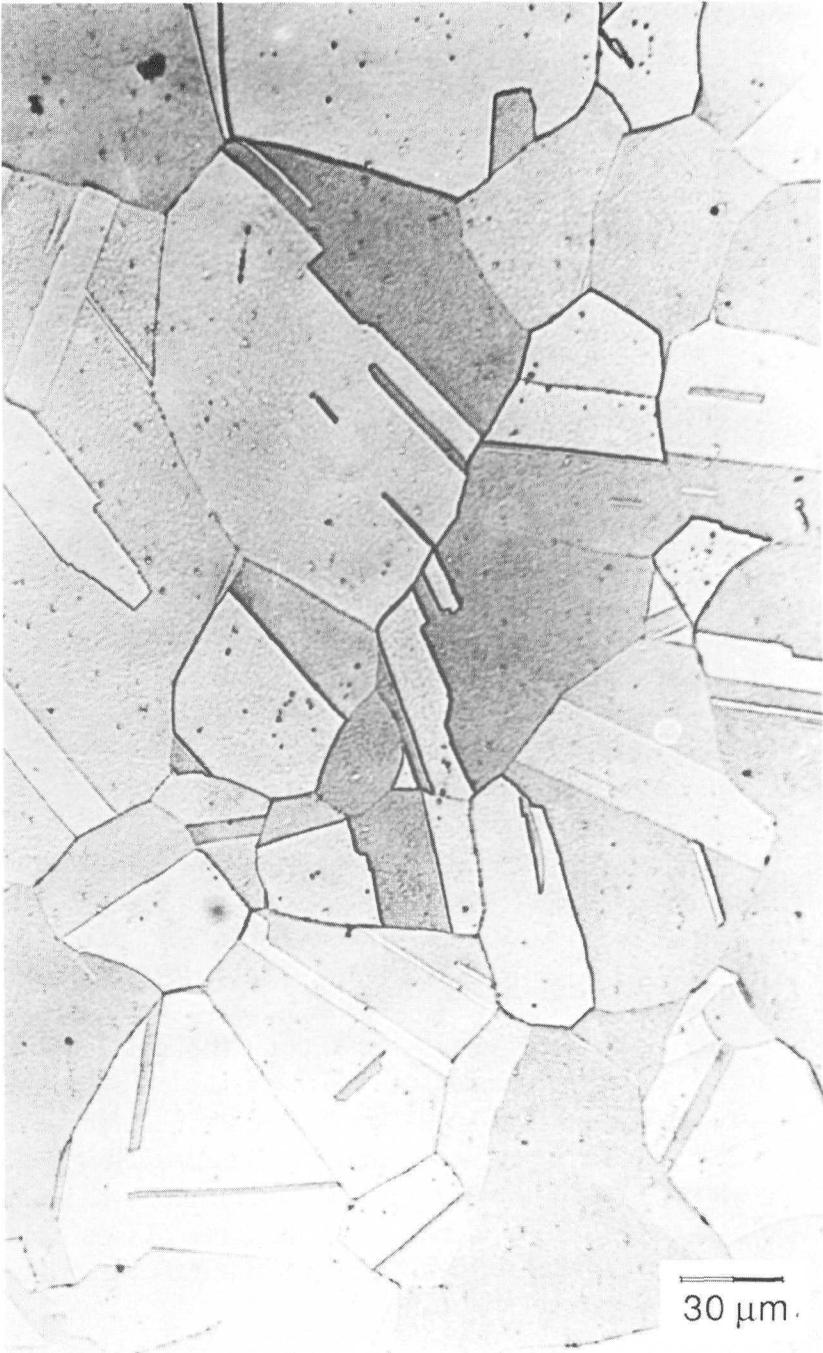


Figura 9. El tamaño y la distribución de los distintos cristales depende de la cantidad y distribución de las imperfecciones existentes en el momento de la cristalización. Policristal de cobre (por cortesía de José María Guilemany).

5.1. LA FUNICIDAD EN EL ARTE Y EN LA SOCIOLOGIA

Se puede encontrar un paralelismo fascinante entre las complejidades de los materiales reales —formados por agregados imperfectos— y el conjunto de ideas y gente —también un trabazón de imperfecciones— que son la esencia de la sociedad. Esta analogía la ha desarrollado Cyril Stanley Smith, que conocía y amaba profundamente las estructuras de los materiales, en varios artículos recopilados en *A Search for Structure*. Según él, los principios que rigen la formación, unión y transformación de las estructuras, sea en los materiales o en la mente humana, son los mismos y la misma metáfora puede servir para visualizar un fenómeno físico, biológico o sociológico, incluyendo el arte.

La deformación plástica en los cristales puede servir como ejemplo para introducir la idea de que *las "imperfecciones" atrapadas en la historia de la estructura pueden ser las responsables del nuevo cambio*. Si deformamos elásticamente un *cristal perfecto* y después retiramos la sollicitación, el cristal recuperará su forma primitiva. La deformación que se ha producido no ha alterado la topología de las conexiones entre los átomos y sus vecinos y el cristal al final del proceso está como estaba al comienzo, no guarda recuerdo alguno porque ningún cambio se ha producido. Por el contrario, si deformamos convenientemente un *cristal real*, al retirar la sollicitación quedará una deformación irreversible. En este caso la deformación ha ido acompañada de un cambio en la topología debido al movimiento de alguna imperfección local en la simetría de la red cristalina, probablemente dislocaciones. También en un medio continuo se podría utilizar este ejemplo, cuando la deformación plástica se concentra en una deformación inhomogénea iniciada en una imperfección. En ambos casos, *la imperfección* —generada en algún momento de la historia del sólido— *es la responsable del cambio* que en este ejemplo es la deformación plástica.

Para caracterizar la historia de una estructura y las imperfecciones producidas durante su vida, Cyril Stanley Smith ha acuñado el término "funicidad". Recuerda que lo hizo el Memorial Day de 1970 basándose en Funes, el personaje de la novela de Jorge Luis Borges que lo recordaba todo. Así, diferentes estructuras pueden tener distintos grados de "funicidad". La Física clásica, por ejemplo, es con frecuencia afúnea y cuando se detecta un problema que depende de su historia, casi siempre es de difícil solución. La Elasticidad es afúnea, mientras que la Plasticidad es fúnea, sobre todo si tiene en cuenta el endurecimiento por deformación.

Las estructuras simples ofrecen pocas oportunidades a la incorporación de alternativas o imperfecciones durante su crecimiento y su historia tiene escaso interés. Por el contrario, las estructuras complejas suelen presentar un mayor grado de "funicidad" que revela imperfecciones pasadas y que proporcionan un marco idóneo dentro del que se pueden generar cambios. La plasticidad de los metales, o la posibilidad de un cambio social, dependen de la generación y del movimiento de *imperfecciones* dentro de un ambiente bastante ordenado. En una obra de arte puede encontrarse una jerarquía continua de interacciones, donde las estructuras y propiedades de los materiales interactúan visiblemente con las ideas y realizaciones del artista. La funicidad de la obra de arte conserva el registro de ambas interacciones; en la forma externa y en la textura y colores.

La evolución de un sistema fúneo o complejo, tanto si es una aleación como si se trata de un sistema social, pasa por tres etapas; un período de nucleación —*donde las imperfecciones son imprescindibles*—, otro de crecimiento y, finalmente, uno de madurez. La representación gráfica de estas tres etapas es una curva que recuerda la letra S bastante inclinada.

El cambio empieza lentamente, casi de forma balbuceante, en lugares que dependen mucho de las circunstancias locales porque los núcleos son necesariamente *imperfecciones* en la estructura existente, o en la ortodoxia vigente. La evolución de los núcleos es impredecible porque depende de las fluctuaciones

del sistema. Solamente lo podría saber la hechicera de Macbeth a quien Banquo le decía: "*si tú puedes mirar dentro de las semillas del tiempo y decirme qué granos crecerán y cuáles no, entonces háblame*". Los núcleos, que actuarán como semillas para un cambio de fase, se forman en aquellas regiones en que la estructura está menos afirmada, donde es más imperfecta. Un cambio de fase es análogo a una revolución política; en ella no se destruye a todos los individuos sino que se reestructura a la mayoría de forma que interaccionen de otra manera. Aquí, la semilla es el trabajo innovador —una *imperfección*, en contra del orden establecido— de un ideólogo. Las ideas nuevas suelen ser difíciles de aceptar, al igual que el inicio de una nueva fase dentro de otra preexistente. Al principio cuesta distinguir las de otras sugerencias imaginativas o disparatadas que rápidamente se abandonan, incluso en las mentes de los ideólogos. No es infrecuente que una idea que fue rechazada al proponerla por primera vez, resulte aceptada y viable si han cambiado las condiciones ambientales. Esto mismo sucede con las estructuras de los materiales. Este panorama de cambios estructurales sugiere que la lógica de la ciencia puede ser poco lógica en las etapas iniciales.

La etapa de crecimiento, ya sea de un cristal, de una idea o de una estructura social, es la más fácil de seguir. El cambio sólo progresa en una dirección y la gente que se encuentra en la frontera no suele tener dudas al elegir entre lo antiguo y lo nuevo. La decisión es ahora más fácil que al comienzo, donde la estructura o semilla inicial era metastable y cuando no estaba claro que lo que se ganaba en volumen compensaba las pérdidas en aumentar las fronteras. Ahora, una vez aclarado que compensa, el cambio prosigue hasta el agotamiento.

En la etapa final de la curva de crecimiento, cuando la nueva estructura ha reemplazado prácticamente a la antigua, llega el período de madurez, de ajuste fino como respuesta a pequeños cambios energéticos. Las preferencias personales empiezan a modificar la ideología dominante y, quizás, demasiado simplista. Aparecen escuelas de artistas de segunda fila que tratan de refinar la obra del creador. Se forman localmente fases secundarias estables por segregación de átomos "impuros" y por

la disgregación de pequeños grupos procedentes de la antigua y dominante matriz. También, grandes regiones de las fases estables absorben otras más pequeñas para disminuir el tamaño de las fronteras. El sistema se mueve lentamente hacia una madurez estable que se convulsionará de nuevo solamente si alguien desde el exterior cambia las condiciones de contorno y las *imperfecciones* están presentes.

5.2. EL PULGAR DEL PANDA

Rita Levi-Montalcini, premio Nobel de Medicina en 1986, cuenta en su autobiografía *Elogio de la Imperfección* (1988) que el hecho de que su actividad, que ha desarrollado de un modo tan imperfecto, haya sido y siga siendo para ella una fuente inagotable de placer la induce a pensar que la imperfección en el cumplimiento de la tarea que se ha fijado es más acorde con la naturaleza humana, que es imperfecta, que con la perfección y cita un ejemplo de la importancia de las *imperfecciones* en el desarrollo de ser humano: Los procesos evolutivos que transformaron a los descendientes de *Lucy* —un homínido antepasado nuestro, de sexo femenino, de un metro cincuenta de altura y con el cráneo del tamaño de un coco— en el *homo sapiens* se debieron a las imperfecciones de su cerebro.

El aumento progresivo del volumen del cerebro y el incremento, más espectacular, de sus capacidades intelectuales fueron el resultado de un proceso evolutivo activado por las *imperfecciones*. De este proceso se salvaron otros compañeros de viaje, infinitamente más numerosos, que nos precedieron hace centenares de millones de años y que probablemente nos sobrevivirán; los insectos. Los que pueblan hoy día la superficie del planeta no se distinguen —en los aspectos básicos— de sus remotos antepasados que vivieron hace 600 millones de años. Su cerebro, del tamaño de la cabeza de un alfiler, ha demostrado ser tan idóneo para resolver los problemas ambientales y para evadir las acechanzas de los depredadores, que no se prestó al caprichoso juego de las mutaciones; debe su estancamiento evolutivo a la perfección del modelo primordial.

La *necesidad de las imperfecciones* para evolucionar se manifiesta continuamente. Levi-Montalcini cita otro ejemplo basado en la creatividad humana: cuando se produce un ingenio

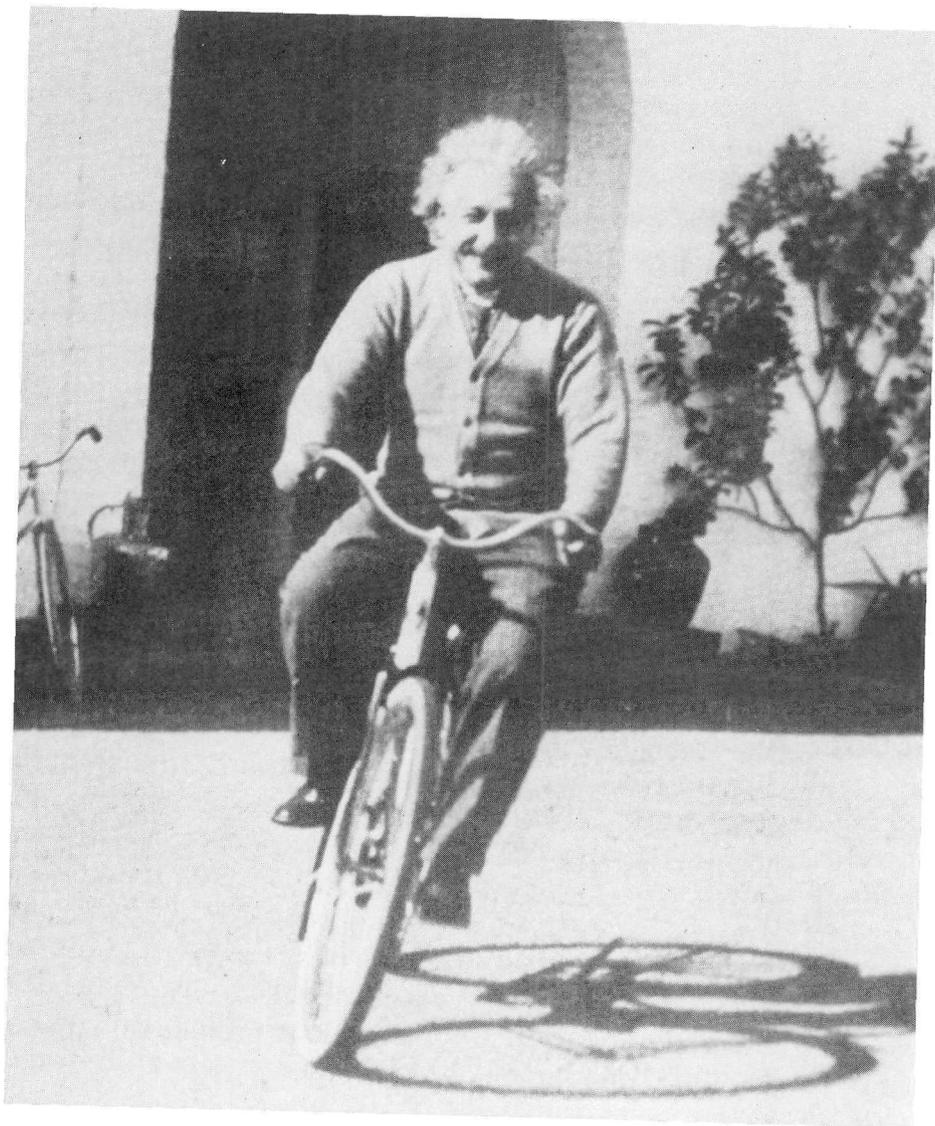


Figura 10. Einstein montando en bicicleta en Los Angeles. Febrero de 1933.
(*The force of knowledge*, J. Ziman. Por cortesía de Cambridge U. P.).

mecánico simple y casi perfecto, que responde a la exigencia de no requerir modificaciones, apenas evoluciona. Si el ingenio es más tosco e imperfecto, se presta a ser reestructurado y a evolucionar.

La bicicleta es un medio de locomoción simple y eficaz, formado por dos ruedas conectadas por un sistema de transmisión y accionado por energía muscular. Ideado hacia la mitad del siglo pasado, ha resultado tan adecuado para la función que debía cumplir que apenas ha necesitado modificaciones durante el siglo y medio que ha transcurrido desde su invención.

Muy diferente ha sido la evolución del ingenio mecánico inventado hace más de dos siglos por Nicolas Cugnot, en 1769. Se trataba de un primitivo coche de tres ruedas accionado por un motor. Este ingenio, lleno de imperfecciones, experimentó con el paso del tiempo modificaciones sustanciales hasta llegar al vehículo de hoy al que, sin duda, también le espera una intensa evolución si se pretende conseguir un medio de transporte rápido y más seguro.

La analogía entre las etapas evolutivas de bicicleta y coche, y de cerebro de los insectos y de vertebrados, se basa en un rasgo común a las formas vivientes y a los aparatos mecánicos; tanto las máquinas imperfectas como el cerebro del primer vertebrado se han prestado al juego de la selección. Las cavidades de aquel cerebro ancestral —aparecido hace 300 o 400 millones de años— se prestaron a la presión selectiva de la evolución que se ejercía sobre ellas creando numerosas especies, extinguidas o vivientes, de los vertebrados. La más reciente es la del maravilloso, y sin embargo aún imperfecto, cerebro del *homo sapiens*. No se prestó a la presión selectiva el perfeccionado cerebro de los invertebrados y de ningún modo el modelo que puede considerarse el más logrado, el de los insectos.

Las *imperfecciones* no son solamente el motor de la evolución, además son las señas de identidad de la historia evolutiva. El biólogo Stephen Jay Gould tiene una columna mensual en la revista *Natural History* y periódicamente agrupa en forma de libros colecciones de estos ensayos. En el libro titulado *El Pulgar*

del Panda (1983) ha reunido una serie de amenos artículos, todos ellos relacionados con la evolución y, en particular, los tres primeros dedicados a resaltar este segundo aspecto de las imperfecciones. Gould sostiene que la prueba de la evolución se encuentra en las imperfecciones que revelan su historia. Veamos dos ejemplos de la mano de Gould; el primero, sobre las orquídeas, debido a Charles Darwin y el segundo, sobre el oso panda, debido al propio Gould.

La autofertilización continuada de las orquídeas es una mala estrategia para la supervivencia a largo plazo, ya que la descendencia lleva los genes de un solo pariente y las poblaciones no tiene la suficiente variedad para disponer de una flexibilidad evolutiva frente al cambio ambiental. Por esta razón, las plantas con flores que tienen tanto órganos sexuales femeninos como masculinos desarrollan habitualmente una asombrosa variedad de artilugios para atraer a los insectos, asegurarse de que el adherente polen se pegue a sus visitantes y que entre en contacto con los órganos sexuales femeninos de la siguiente orquídea cuando sea visitada por el insecto.

La *Epipactus* de las marismas, por ejemplo, utiliza su labelo —un pétalo agrandado— a modo de trampa para el insecto. Parte de este pétalo lo usa el insecto como pista de aterrizaje. Al posarse, el pétalo se deforma y el insecto tiene acceso a la copa de néctar. Al penetrar hasta la copa, el pétalo recupera su posición inicial debido a su elasticidad y el insecto se encuentra atrapado dentro de la copa del néctar. El insecto se encuentra incómodo y trata de retroceder a lo largo de la única salida posible —un sendero que le obliga a rozarse contra la masa del polen—. Un artilugio notable, pero desarrollado en su totalidad a partir de un pétalo convencional que, en cierto modo, puede considerarse ahora como una *imperfección* de una parte ya existente en el antecesor de la orquídea.

Las orquídeas no nacieron como estas plantas tan sofisticadas que conocemos, han evolucionado a partir de flores ordinarias y esto se puede detectar por las imperfecciones de los componentes comunes de las flores vulgares, partes habitualmente utilizadas para funciones muy distintas.

Los osos panda tampoco han nacido como esos osos de peluche que se sientan erguidos y manipulan los tallos de bambú con sus patas delanteras, arrancando con destreza hojas y comiendo, casi como los humanos, sólo los brotes. Han evolucionado a partir de los osos convencionales y esto se puede detectar por las *imperfecciones*, entre ellas su pulgar.

Si contamos los dedos de la mano de un panda, seguramente nos llevaremos una sorpresa porque contaremos seis. El "pulgar" del panda no es, anatómicamente, un dedo. Está constituido por un hueso llamado sesamoideo radial que suele ser un pequeño componente de la muñeca. En los pandas el sesamoideo radial está enormemente agrandado y alargado hasta ser casi igual de largo que los huesos metacarpianos de los verdaderos dedos. El pulgar del panda está dotado, además, de músculos para darle agilidad. Estos músculos, al igual que el hueso sesamoideo, no surgieron *de novo*. Del mismo modo que en las orquídeas, son partes anatómicamente familiares remodeladas para una nueva función.

El pulgar del panda nos proporciona una elegante contrapartida zoológica a las orquídeas de Darwin. Las soluciones perfectas quedan descartadas por la historia, no evolucionan como el cerebro de los insectos. El pulgar verdadero del panda está demasiado especializado —como el de todos los carnívoros— para convertirse en un dedo oponible y manipulador. De modo que el panda se ve constreñido a utilizar partes disponibles y a conformarse con el agrandamiento de un hueso de la muñeca que supone una solución *imperfecta*. El hueso sesamoideo no ganaría medallas en ningún concurso de manualidades.



Figura 11. (Por cortesía de Sidney Harris).

5.3. LAS IMPERFECCIONES DESPUES DEL BIG-BANG

Los cosmólogos han recurrido a las *imperfecciones* para explicar el universo visible. Hace diez mil, o veinte mil millones de años, se inició nuestro universo con una titánica explosión; el *Big Bang*.

Del modelo clásico del Big-Bang se desprenden tres predicciones importantes que se pueden verificar experimentalmente: la primera es que, a medida que el universo se expande, las galaxias se separan entre sí con una velocidad proporcional a la distancia entre ellas. Este resultado, conocido como la "ley de Hubble", fue inferido por Edwin P. Hubble en los años 20 a partir del análisis del desplazamiento hacia el rojo de los espectros de las galaxias lejanas. La segunda predicción es la existencia de una radiación electromagnética, en la región de las microondas, extendida por todo el universo. Son los restos del intenso calor generado en sus orígenes. Esta predicción fue confirmada en 1964 cuando Arno A. Penzias y Robert W. Wilson detectaron una radiación de fondo, en la región de microondas y procedente por igual de todas las direcciones del espacio, con una temperatura equivalente de 3 K. La tercera predicción del modelo clásico del big-bang es la síntesis de núcleos ligeros a partir de protones y neutrones durante los primeros minutos después de la gran explosión. El modelo predice, con gran precisión, la cantidad de ^4He , ^2H , ^3H y ^7Li . Los núcleos más pesados —entre ellos los que forman nuestro cuerpo— se cree que se generaron mucho más tarde, en el interior de las estrellas. Resulta poético pensar que, en el fondo, somos polvo de estrellas. La abundancia relativa de los núcleos ligeros abarca casi diez órdenes de magnitud. La confirmación experimental dentro de este enorme intervalo es uno de los argumentos de más peso en favor del Big-Bang. La abundancia relativa del ^2H , por ejemplo, se confirmó experimentalmente durante el alunizaje del Apolo 11, en Julio de 1969.

Muy pronto se le plantearon dos problemas al modelo del big-bang: El primero es la desproporción detectada entre el número de fotones y el de nucleones, alrededor de mil millones de fotones por cada nucleón. No parece que haya ninguna razón para que una partícula sea especialmente favorecida porque existe una especie de democracia cósmica entre ellas, en particular a muy altas energías. Podrían esperarse pequeñas variaciones, entre uno o dos órdenes de magnitud, pero un factor de 10^9 está pidiendo una explicación. El segundo problema proviene de que el universo conocido parece que está formado exclusivamente por materia ordinaria, nucleones y electrones, y no por antimateria en forma de antinucleones y positrones. El fallo de la democracia cósmica está mucho más acusado aquí que en el problema anterior. La física, tal como la entendemos, requiere una igualdad entre partículas y antipartículas en el momento de crearlas. ¿Dónde han ido a parar las antipartículas? Estos dos problemas se pueden explicar teniendo en cuenta la arbitrariedad —o la presencia de *imperfecciones*— en los primeros instantes del universo.

Nos cuesta mucho imaginar lo que sucedió antes de 10^{-43} segundos, pero suponemos que entre este instante y 10^{-36} segundos —un suspiro— el universo estaba gobernado sólo por dos tipos de interacciones; la gravitatoria y la GUT (siglas de la Teoría de la Gran Unificación) —actualmente creemos que son cuatro las interacciones que lo rigen: la gravitatoria, la electromagnética, la nuclear fuerte y la débil. En aquellos instantes las tres últimas estarían unificadas en la GUT—. A las partículas responsables de esta última interacción se las llama partículas X y se supone que en aquellos instantes las poblaciones de partículas y antipartículas estaban equilibradas.

El enfriamiento del universo acaecido entre 10^{-43} s y 10^{-36} s (de 10^{32} K a 10^{28} K) fue suficiente para —en el argot de los físicos teóricos— provocar la *rotura espontánea de la simetría* y en consecuencia de la desaparición de la interacción GUT y la aparición en su lugar de otras dos; la interacción fuerte y la electrodébil (más adelante la electrodébil se descompondría, por otra rotura de simetrías, en la electromagnética y en la débil, dejando el

mundo con cuatro interacciones, tal como lo conocemos). La rotura de las simetrías admite una analogía con los cambios de fase y la estructura que se forma en los policristales al solidificar —un tema recurrente que se ha utilizado a lo largo de este ensayo— y también está relacionada con las imperfecciones. Por todo ello merece que le dediquemos un poco de atención.

Las leyes de la física que describen a los líquidos tienen simetría de rotación porque el líquido la tiene; la distribución de las moléculas es la misma aunque giremos el líquido. Pero si el líquido solidifica en un cristal, los átomos se reorganizan según las direcciones cristalográficas correspondientes y desaparece la simetría rotacional, decimos que se ha roto la simetría. A la fase de alta temperatura (el líquido) se la llama fase simétrica y a la correspondiente a la baja temperatura (el cristal) la fase con simetría rota. Las teorías de la gran unificación (GUT) predicen esta transición a una temperatura del orden de los 10^{28} K.

La combinación del modelo estándar del Big-Bang con las teorías de la gran unificación permitió una mejor comprensión de los dos problemas anteriormente planteados: A partir de 10^{-36} s la simetría GUT empieza su rotura instantánea y las partículas X empiezan a desintegrarse. A medida que pasa el tiempo y la temperatura desciende las partículas se desintegran más rápidamente y la posibilidad de su regeneración disminuye al disminuir la fuente de calor del Big-Bang. Al cabo de 10^{-34} s las partículas X han desaparecido. La física, tal como la entendemos, predice que las desintegraciones de las partículas X y de las antipartículas deben proceder con la misma velocidad. Pero si cada una de ellas puede desintegrarse de varios modos, no existe ningún requisito fundamental para que la velocidad de desintegración de la partícula X según un modo particular sea precisamente igual a la velocidad de desintegración de la antipartícula X en otro modo alternativo. El único requisito es que la suma de las velocidades de todos los posibles modos de desintegración de la partícula X sea igual a la suma de las correspondientes velocidades de desintegración de la antipartícula. Así, la desintegración de una partícula X produciendo quarks (los quarks son los componentes básicos de los hadrones, partículas sensibles a la

interacción fuerte) puede suceder a una velocidad distinta de la desintegración de otra antipartícula que produzca antiquarks, esta diferencia se compensa a través de otros aspectos en los modos de desintegración. El resultado que nos interesa es que a los 10^{-34} s de vida del universo, la desintegración de las partículas y antipartículas X —inicialmente en cantidades iguales— pudo haber producido un exceso de quarks en comparación con los antiquarks.

En estos procesos no se ha violado ninguna ley de la física y como las partículas y antipartículas no pueden convivir mucho tiempo, ambas tienden a aniquilarse produciendo radiación —en forma de fotones y neutrinos— y materia —en forma de nucleones— (no antimateria, porque se ha supuesto que había más quarks que antiquarks). De esta forma se pueden explicar los dos problemas planteados; la ausencia de antimateria y la desproporción entre fotones y nucleones, procesos íntimamente ligados a la presencia de *imperfecciones* en las distintas formas de desintegración de las partículas X.

La arbitrariedad en la rotura espontánea de la simetría puede resolverse si se tiene en cuenta la presencia de *imperfecciones*. Al romperse la simetría de revolución durante la cristalización de un líquido se pueden formar muchísimas estructuras policristalinas. El tamaño y la distribución de los distintos cristales depende de la cantidad y distribución de las *imperfecciones* existentes en el momento de la cristalización y esta analogía se puede extender a la rotura de las simetrías que contemplan los físicos teóricos.

En todas estas situaciones subyace una anécdota a la que es difícil sustraerse, es la historia del asno de Buridan utilizada como parábola de la rotura espontánea de las simetrías. Jean Buridan fue rector de la Universidad de París, en los comienzos del siglo XIV. A este profesor se le ha atribuido una vida azarosa —amante de dos reinas francesas, Doña Juana de Navarra y Margarita de Borgoña— bastante alejada de la que puedan llevar nuestros actuales rectores. La historia de su asno, que estaba muy hambriento, es que se encontró justamente entre dos succulentos

montones de heno y, como era un asno, se murió de hambre porque su situación —al ser totalmente simétrica— no le permitió decidirse por un montón o por el otro. Podemos estar seguros que un asno real, en vez de este asno filósofo, habría sucumbido a pequeñas *imperfecciones*, en un montón o en otro, que le habrían motivado a romper la simetría. Esta es la arbitrariedad que siempre se encuentra en la rotura espontánea de la simetría pero que puede resolverse si se conocen las *imperfecciones* existentes. Si no somos capaces de detectarlas en los montones de heno siempre nos quedará la duda de cuál de los dos elegirá el asno analfabeto. Por cierto, parece ser que esta historia no se encuentra entre los textos de Buridan y se cree que fue inventada por sus enemigos para desacreditarle. (Un excelente ensayo sobre este tema puede leerse en N. Rescher 1960).

Vamos a terminar este apartado con otro ejemplo donde, de nuevo, se destaca *la necesidad de las imperfecciones* en la evolución del universo. Para mayor coherencia, seguiremos con nuevos problemas planteados al modelo clásico del Big-Bang y con la rotura espontánea de las simetrías.

A pesar del soporte experimental, comentado al principio, y de haber justificado los dos problemas planteados, el modelo clásico del Big-Bang se ha enfrentado con otros problemas que no ha podido resolver. Entre ellos merecen citarse ¿por qué el universo es tan uniforme? ¿por qué es tan plano? y ¿por qué no se detectan más monopolos? Una solución a estos problemas se ha obtenido modificando el modelo clásico con las teorías de la gran expansión o teorías de la inflación (ver, por ejemplo, A. Guth y P. Steinhardt 1989).

La escasez de monopolos tiene que ver con todo lo que llevamos diciendo. Las teorías de la gran unificación demandan la existencia de un gran número de monopolos, pero es obvio que hay muy pocos monopolos alrededor nuestro, por el escaso —o nulo— éxito de su detección. Los monopolos se debieron producir como consecuencia de la rotura espontánea de la simetría de las teorías de la gran unificación. Volviendo a la analogía del líquido que al enfriarse se transforma en un policristal, en

distintas regiones del espacio se fue rompiendo la simetría y al crecer y entrar en contacto las distintas regiones se formaron *imperfecciones*; cuando se encuentran dos regiones se forma una intercara, o pared entre dos dominios, cuya masa es enorme. Cuando coinciden tres regiones se obtiene lo que se llama una cuerda y cuando coinciden cuatro se obtiene otra imperfección, en este caso puntual, que es el monopolo —en el lenguaje de los físicos teóricos, es un nudo topológicamente estable del campo de Higgs correspondiente a la GUT— con una masa alrededor de 10^{16} GeV.

Si el modelo clásico del Big-Bang se complementa con la hipótesis de la inflación, la producción inicial de monopolos es diferente de acuerdo con los distintos modelos de inflación. Además, y esto es lo importante, la inflación diluye muchísimo la densidad de monopolos hasta tal punto que no se crean problemas entre las predicciones teóricas y la escasa abundancia que se supone que hay en nuestros días.

En estos últimos años, los cosmólogos han introducido la idea de que pueden existir muchos universos. De ser así, el universo donde vivimos —que parece hecho a nuestra medida, como proclaman los defensores del principio antrópico— dejaría de ser un concepto central, al igual que lo era la Tierra en la cosmología de Tolomeo, para convertirnos en habitantes de uno de los muchísimos universos. Pero, curiosamente, su naturaleza única es una consecuencia de cómo se han roto las simetrías o, dicho de otra forma, de las *imperfecciones* presentes en aquellos momentos. Estamos aquí y de esta forma, gracias a unas determinadas *imperfecciones*.

La naturaleza de los distintos mundos que se han generado, —a medida que se han ido rompiendo las simetrías después del Big-Bang—, ha dependido de las *imperfecciones* que se han encontrado. Si hubiera un gran número de universos, posiblemente alguno sería parecido al nuestro —aunque no exactamente igual— con leyes físicas parecidas, pero otros serían radicalmen-

te distintos con unas leyes y con un comportamiento difícil de imaginar. Si el número de universos fuera infinito, habría universos idénticos al nuestro —si es que tiene sentido hablar de cosas iguales cuando los universos están causalmente desconectados— con una Academia de Ciencias igual a ésta y con un discurso igual a este y también con las mismas imperfecciones, algunas necesarias para compensar otras imperfecciones.

REFERENCIAS

Brown, E.R., Sollner, T.C.L.G., Parker, C.D., Goodhue, W.D. y Chen, C.L. (1989)

Oscillations up to 420 GHz in GaAs/AlAs resonant tunneling diodes
Appl. Phys. Lett., Vol. 55, pp. 1777-1779.

Capasso, F., Mohammed, K. y Cho, A.V. (1986)

Sequential resonant tunneling through a multi-quantum well superlattice

Appl. Phys. Lett., Vol. 48, pp. 478-480.

Capasso, F., Mohammed, K., Cho, A.Y., Hull, R. y Hutchinson, A.L. (1985)

Effective mass filtering: Giant quantum amplification of the photocurrent in a semiconductor superlattice

Appl. Phys. Lett., Vol. 47, pp. 420-422.

Chang, L.L. y Esaki, L. (1992)

Semiconductor quantum heterostructures

Physics Today, October, pp. 36-43.

Cottrell, A.H. (1990)

Strengthening of grain boundaries by segregated interstitials in iron
Materials Science and Technology, Vol. 6, pp. 121-123.

Eberhart, M.E. y Vvedinsky, D.D. (1987)

Localized grain-boundary electronic states and intergranular fracture
Phys. Rev. Lett., Vol. 58, pp. 61-64.

Frank, F.C. (1949)

The influence of dislocations on crystal growth. General discussion
Disc. Faraday Soc., Vol. 5, pp. 48-54, 67-68.

Gordon, J.E. (1988)

The science of structures and materials

Scientific American Library, No. 23, W.H. Freeman and Co.

Gould, S.J. (1983)

El pulgar del panda. Ensayos sobre evolución

Hermann Blume

Guth, A. y Steinhardt, P. (1989)

The inflationary universe

En *The New Physics*, (P. Davies, Ed.), pp. 34-60.

Hirsch, P.B., Horne, R.W. y Whelan, M.J. (1956)

Direct observations of the arrangement and motion of dislocations in aluminium

Phil. Mag., Vol. 1, pp. 677-684.

Horton, J.A., Liu, C.T. y Santella, M.L. (1987)

Microstructures and mechanical properties of Ni₃Al alloyed with iron additions

Metall. Trans. A, Vol. 18, pp. 1265-1277.

Itzstein, M. von et al. (1993)

Rational design of potent sialidase-based inhibitors of influenza virus replication

Nature, Vol. 363, pp. 418-423.

Kelly, A. y Macmillan, N.H. (1986)

Strong solids

Clarendon Press, Oxford.

King, A.H. y Yoo, M.H. (1987)

High temperature ordered intermetallic alloys II

Materials Research Soc., Pittsburgh, Pa.

Kingsmill, S. (1993)

Ear stones speak volumes to fish researchers

Science, Vol. 260, 28 May, pp. 1233-1234.

- Langmuir, A.D. (1985)
The Thucydides syndrome
New Engl. J. Med., Vol. 313, pp. 1027-1030.
- Levi-Montalcini, R. (1990)
Elogio de la imperfección
Ediciones B, S.A. Barcelona
- Levine, A.J. (1992)
Viruses
Scientific American Library. Freeman and Comp.
- Lieberman, D.E. (1993)
Life history variables preserved in dental cementum microstructure
Science, Vol. 261, 27 August, pp. 1162-1164.
- Mann, S., Webb, J. y Williams, R.J.P. (Eds.) (1989)
Biom mineralization: Chemical and biochemical perspectives
VCH Publishers
- Matsugui, K., Murata, Y., Morinaga, M. y Yukawa, N. (1993)
An electronic approach to alloy design and its application to Ni-based single-crystal superalloys
Materials Science and Engineering, Vol. A172, pp. 101-110.
- Mott, N. (1986)
A life in science
Taylor and Francis
- Rescher, N. (1960)
Choice without preference
Kant-student, Vol. 51, pp. 142-175.
- Rice, J. y Beltz, G.E. (1994)
The activation energy for dislocation nucleation at a crack
J. Mech. Phys. Solids, Vol. 42, pp. 333-360.

Savage, G. (1993)

Carbon-carbon composites

Chapman and Hall

Shockley, W., Hollomon, J.H., Maurer, R. y Seitz, F. (1952)

Imperfections in nearly perfect crystals

John Wiley and Sons.

Siegel, R.W. (1993)

Nanostructured materials: Mind over matter

J. Nanostructured Materials, Vol. 3, pp. 1-18.

Sims, C.T. (1987)

Prediction of phase composition

En *Superalloys II* (Sims et al. Eds.), John Wiley & Sons.

Smith, C.S. (1981)

A search for structure

The MIT Press. Cambridge, Mass.

Somigliana, C. (1914)

Sulla teoria delle distorsioni elastiche

Atti Reale Accad. Lincei, Vol. 23, pp. 463-472.

Taylor, G.I. (1934)

The mechanism of plastic deformation of crystals. Part I.- Theoretical

Proc. Roy. Soc. (London), Vol. A145, pp. 362-387.

Thomson, R.M. (1986)

Physics of fracture

En *Solid State Physics*, Vol. 39, Academic Press.

Volterra, V. (1907)

Sur l'équilibre des corps élastiques multiplément connexes

Ann. Ec. Norm., Vol. 24, pp. 401-517.

Watermann, T.H. (1989)
Animal navigation
Scientific American Library. Freeman and Comp.

DISCURSO DE CONTESTACION
del
EXCMO. SR. D. CARLOS SANCHEZ DEL RIO Y SIERRA

Excmo. Sr. Presidente,
Excmos. Sres. Académicos,
Señoras y Señores:

Sean mis primeras palabras de agradecimiento al Presidente de esta Corporación por haberme designado para contestar, en representación de la misma, el discurso de ingreso en esta Real Academia del Profesor Manuel Elices Calafat. Tarea particularmente honrosa por cuanto el beneficiario es antiguo y querido amigo cuya trayectoria científica acumula sobrados merecimientos para incorporarse a esta casa que desde hoy es la suya.

Hace treinta años apareció en el curso de Física Atómica y Nuclear que yo impartía en la Facultad de Ciencias un estudiante singular. Era Manuel Elices, que acababa de completar su carrera de Ingeniero de Caminos con el número uno de su promoción. El caso era muy extraño por cuanto lo normal era que quienes, después de una selección severa, ingresaban en la prestigiosa Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos pensasen que nada importante podrían aprender en otra parte. Pero Elices era diferente. Quería saber más física y cursó en nuestra Facultad todas las asignaturas de la Licenciatura en Ciencias Físicas excepto aquéllas que pudo convalidarle nuestro compañero Armando Durán a la razón Decano de nuestra Facultad. Naturalmente tanto Durán como yo percibimos inmediatamente que Elices era un joven excepcional llamado a contribuir de modo importante a la ingeniería y la ciencia españolas. Y no nos equivocamos porque la carrera de nuestro nuevo académico ha sido excepcional gracias a la inteligencia, el tesón y la honradez de este menorquín que hoy recibimos aquí con alborozo. Por cierto que Elices no es el primer menorquín que ingresa en esta Corporación. En 1882 fue elegido don Francisco Prieto y Caules que también era menorquín e Ingeniero de Caminos.

Concluidos sus estudios de ingeniería y ciencias inicia Elices una primera etapa de actividad intensísima y mal comprendida. Por las mañanas trabajaba en el laboratorio Central del Ministerio de Obras Públicas, enfrentándose con problemas prácticos de interés inmediato. Por las tardes acudía sin remuneración

alguna al Consejo Superior de Investigaciones Científicas para perfeccionar sus conocimientos de Física Teórica del Estado Sólido. También en esa época se introduce en la docencia dando cursos de física y de ciencia de materiales en la Universidad Politécnica. Fue este un período muy duro en la vida de nuestro nuevo académico que podría haberse dedicado a ganar dinero como brillante ingeniero o a la investigación teórica como sosegado científico. Pero Elices optó por un camino más difícil. Se dedicaría a la ciencia de materiales que es disciplina aplicada pero basada en los conocimientos fundamentales que proporciona la investigación sobre la estructura de la materia. Es la opción moderna que se inició hace veinte años en el mundo y que Elices promovió entre nosotros en su debido momento.

La ciencia de materiales es disciplina muy amplia y pocos tienen la formación suficiente para abarcarla en su totalidad. Pero Elices es un buen físico y un buen ingeniero y por eso ha sido capaz de investigar con éxito y conseguir logros originales en temas muy variados. Ha estudiado estados electrónicos en cristales debidos a superficies libres con aplicación a problemas de adsorción, catálisis y uniones metal-semiconductor. También ha contribuido al conocimiento de las propiedades mecánicas de distintos materiales en condiciones diferentes. Algunos de sus resultados frecuentemente citados se refieren a la tenacidad de fractura en metales filiformes y compuestos de matriz cerámica a bajas temperaturas, o a las propiedades mecánicas de materiales cerámicos y compuestos de matriz de aluminio y magnesio a altas temperaturas. Otro dominio que también ha cultivado con éxito es el de la respuesta de los materiales a ambientes agresivos. Finalmente se deben a Elices varios métodos originales de análisis de materiales para la medida de carbonatación en silicatos o de deformaciones o de tenacidad de fractura en alambres. Muchas de estas investigaciones son fruto de colaboraciones internacionales.

Una contribución relevante de Elices ha sido la introducción en España de la Mecánica de la Fractura para estudiar la fisuración y la rotura de los materiales (hormigón, roca, cerámicos, ...). El tema es de importancia capital en todas las tecnologías

avanzadas y su estudio plantea arduos problemas no lineales de difícil solución.

Junto a esta intensa labor investigadora de Elices (ha publicado 300 artículos, 10 libros y contribuido en otros 8) conviene destacar la tarea de promoción. El Departamento de Ciencia de Materiales de la Universidad Politécnica que dirige constituye un grupo de gran prestigio que ya se ha proyectado a otras universidades (Madrid, Santander, Santiago, etc.) y que participa en congresos internacionales al máximo nivel (presidencias de coloquios, conferencias invitadas, ...). El propio Elices creó hace once años el Grupo Español de Fractura, es miembro del grupo europeo de fractura y uno de los fundadores de la asociación internacional de la mecánica de la fractura en estructuras de hormigón. Ha colaborado con universidades de Europa, Estados Unidos, Iberoamérica, Japón, China y Australia.

El prestigio alcanzado por Elices le ha obligado a aceptar otras labores de carácter científico-administrativo. En su propia universidad ha sido vicerrector y subdirector de la Escuela de Caminos. También ha sido miembro de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, del Centro de Desarrollo Técnico e Industrial y de la Comisión Asesora de la Dirección General de Armamento y Material. Es editor asociado de *Acta Metallurgica et Materialia*, *Scripta Metallurgica et Materialia*, *Advanced Cement-Based Materials*, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* y *Journal of Fatigue and Fracture of Engineering Materials*, censor de varias revistas, presidente de diversas comisiones internacionales y asesor del American Concrete Institute.

Nuestro nuevo académico ha sido galardonado con numerosas distinciones: Medalla de Oro y Premio de Investigación de la Universidad Politécnica de Madrid, Medalla Bengough de la Metals Society, Medalla de la Asociación Española del Hormigón Pretensado, Premio de la Fundación Universidad Empresa, Cruz del Mérito Naval de Primera Clase, Premio de esta Real Academia, Premio Du Pont, Doctor Honoris Causa por la Universidad de Navarra, etc.

Pero esto no es todo. Elices es además un entusiasta submarinista y consumado fotógrafo de especies y objetos

submarinos que aparecen publicados en la Enciclopedia de Menorca y en Arqueología Submarina. Nada parece suficiente para colmar las inquietudes y la capacidad de trabajo de un hombre tan merecidamente admirado por quienes hemos podido seguir su trayectoria vital desde hace ya muchos años.

* * *

Acabamos de escuchar un discurso riguroso, instructivo y ameno. Por primera vez en mi ya larga vida académica he conseguido imponer mi criterio a un beneficiario. Esta solemnidad tiene un doble carácter. El nuevo académico tiene que leer un discurso de contenido científico para ilustrarnos sobre las novedades de la disciplina que cultiva. Pero es también un acto social al que acuden numerosos amigos con intereses diferentes y es principal obligación de todos no aburrir a los asistentes más de lo justo. En mi opinión Elices ha cumplido muy bien con el doble objetivo que me parecía deseable. Se ha referido a la ciencia de materiales tan importante hoy, al papel de las imperfecciones en las propiedades de los materiales y ha dejado volar su imaginación sobre la necesidad de las imperfecciones en general. Ha pasado de lo particular y concreto a las reflexiones generales que son motivo de útil meditación para cuantos sienten alguna inquietud intelectual. Permitidme que añada yo ahora algunos breves comentarios sobre este brillante discurso.

Una de las diferencias entre los hombres y los demás animales es que somos capaces de construir objetos nuevos utilizando una gran variedad de materiales. Desde tiempos muy remotos nuestros antepasados aprendieron a emplear la madera, inventaron la cerámica y descubrieron la utilidad de los metales. De este modo surgió la artesanía cuyos cultivadores fueron capaces de seleccionar los mejores materiales disponibles en la naturaleza y de conseguir empíricamente nuevos materiales como el bronce y el acero con propiedades deseables. Con estos materiales se llegó a la revolución industrial y las mejoras posteriores se obtuvieron penosamente con pacientes procesos de selección o de ensayo y error. Todo cambió, a mediados de este siglo, como

consecuencia del conocimiento de los átomos y de sus combinaciones que se había conseguido en las décadas anteriores. Entonces nació la ciencia de materiales rigurosa que está permitiendo el desarrollo de nuevos materiales con las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas u ópticas deseadas. El resultado ha sido espectacular. Un ejemplo al alcance de todos pero que pocos perciben lo tenemos en los automóviles. Los actuales son esencialmente iguales a los de hace setenta años pero entonces se desgastaban los motores, se rompían las suspensiones, se pinchaban las ruedas y viajar en ellos era una aventura. Ahora cada pieza de un automóvil se fabrica con el material adecuado y sólo por esa razón nuestros coches son fiables. En cuanto a los aviones la cosa es más drástica; sin los nuevos materiales no tendríamos transporte aéreo comercial. Todavía es más llamativo el caso de la electrónica. La informática, los automatismos y las telecomunicaciones actuales se basan en materiales artificiales con propiedades eléctricas que no se encuentran en los productos que nos ofrece la naturaleza. No es exagerado decir que debajo de cada mejora técnica de un artefacto o de una nueva invención está la ciencia de materiales.

Se sabía desde los primeros años de este siglo —y se sospechaba desde mucho antes— que los sólidos estaban compuestos por átomos dispuestos ordenada y regularmente: formaban redes cristalinas que se manifestaban macroscópicamente en las caras planas que muestran los cristales de muchos minerales que se encuentran en la naturaleza. Pero sucede que tales sólidos que llamamos perfectos son la excepción y casi nunca tenemos ocasión de estudiarlos. Los sólidos que manejamos normalmente son imperfectos y curiosamente sus propiedades dependen fundamentalmente de las imperfecciones. En cuanto a sus propiedades mecánicas, la resistencia y ductilidad de los materiales —nos dice Elices— no dependen de la inmensa mayoría de los átomos que ocupan el sitio que les corresponde en la red cristalina (los perfectos) sino de las imperfecciones en la estructura, o dicho con más precisión, de aquellos átomos que ocupan los lugares extraños donde la estructura es imperfecta:

los núcleos de las dislocaciones, el frente de las fisuras, las fronteras de grano, etc.

Más concretamente sabemos que muchos materiales se deforman y conforman fácilmente gracias a las imperfecciones lineales que llamamos dislocaciones que restan rigidez a los que de otro modo serían materiales frágiles. Por el contrario las imperfecciones puntuales debidas a la presencia de átomos extraños producen la dureza del bronce (por el estaño en el cobre) y del acero (por el carbono en el hierro); el caso del acero es singular porque sus propiedades dependen de la forma en que se combinan el hierro y el carbono que se puede cambiar mediante el temple y el recocido.

Otro aspecto de los materiales, de gran interés práctico, es el hecho obvio de que muchas veces se rompen cuando son sometidos a sollicitaciones excesivas o repetidas. Esto lo sabe todo el mundo pero la causa es de conocimiento más reciente. Los materiales se rompen debido a las imperfecciones que tienen en forma de pequeñísimas grietas o fisuras que crecen en determinadas condiciones. Lo curioso es que la ciencia de materiales nos ha enseñado a contrarrestar este defecto en muchos casos. En algunos materiales intermetálicos basta introducir pequeñas cantidades de átomos extraños para facilitar el movimiento de las dislocaciones y permitir el deslizamiento en vez de la propagación de las grietas que conducen a la ruptura. Una imperfección añadida impide las consecuencias no deseadas de una imperfección inevitable.

En el dominio de las propiedades eléctricas de ciertos materiales, las imperfecciones son una necesidad. Añadiendo átomos extraños a un cristal de silicio provocamos exceso o defecto de electrones que dan lugar a semiconductores con las propiedades necesarias para fabricar los elementos en los cuales se basa toda nuestra tecnología microelectrónica actual. Los ordenadores que nos permiten cálculos complejos, proceso de textos, transferencia instantánea de dinero, reserva de billetes de transporte, redes telefónicas rápidas o juegos intrascendentes funcionan gracias a materiales debida y sabiamente imperfectos.

Veamos, por tanto, que la riquísima y provechosa variedad de los materiales que utilizamos en nuestros artefactos se debe en última instancia a las imperfecciones. Y cabe preguntarse si existe algún principio de universalidad de las imperfecciones aplicable a otros ámbitos de la realidad. A esta especulación dedica Elices la última parte de su discurso. Permitidme algunas reflexiones al respecto.

Quienes nos dedicamos al estudio de la naturaleza pretendemos estar libres de prejuicios, en el sentido de juicios o convicciones previas, pero no es verdad. Creemos en muchas cosas no probadas. Y entre ellas en un isomorfismo entre los diversos niveles de la realidad. Cuando descubrimos una regularidad o un principio muy general en algún aspecto de la realidad nos inclinamos a pensar que es un caso particular de alguna verdad metafísica de validez universal. Pero conviene proceder con cautela porque unas veces es así y otras no. Voy a poner algunos ejemplos que aclararán lo que quiero decir.

La regularidad del movimiento del sol, la luna y los planetas se conoce desde hace miles de años. Esta regularidad contrasta tanto con los movimientos que observamos normalmente que Aristóteles llamó perfecto al movimiento de los cuerpos celestes para distinguirlo de los movimientos naturales o violentos del mundo sublunar. Pasaron los siglos, Kepler descubrió las leyes aproximadas del movimiento de los planetas y Newton enunció los principios de la dinámica que dan cuenta de dichas leyes. Un siglo después —hacia 1800— Laplace demostró que las pequeñas desviaciones de las leyes de Kepler también podían calcularse a partir de la dinámica de Newton teniendo en cuenta la interacción de unos planetas con otros. El resultado era admirable. Si se conocen las condiciones presentes (posiciones y velocidades) del sistema solar se pueden calcular exactamente las condiciones en cualquier tiempo anterior o posterior. Laplace generalizó sus resultados y afirmó que si se conociesen las condiciones actuales de todas las partículas del universo podrían calcularse en principio las condiciones pasadas o futuras. Así nació el determinismo como doctrina filosófica. Según esta doctrina, y aceptado un materialismo excluyente, el estado presente de todo cuanto existe

—incluidos los seres vivos— determina rígidamente todos los estados futuros. Dentro de esta creencia desaparece la libertad individual y el futuro de la sociedad estaría determinado y podría preverse a partir de las leyes del materialismo histórico de Marx. Todo muy científico pero falso. Hoy, doscientos años después, sabemos que el caso del sistema planetario es excepcional y que, aún dentro de la dinámica de Newton, son frecuentísimos los movimientos que no se pueden calcular. Son los movimientos caóticos que superan con mucho a los ordenados. En realidad sólo podemos hacer predicciones probabilísticas incluso si prescindimos de los fenómenos cuánticos en los cuales parece que el probabilismo es algo intrínseco.

El determinismo de Laplace como norma general fue una generalización equivocada. Es cierto que las cosas no se mueven al azar de forma totalmente imprevisible. Pero la pretensión de un determinismo absoluto es insostenible. La única consecuencia general válida de la dinámica de Newton es que en algunas situaciones el presente condiciona el futuro próximo. De ahí no se puede pasar.

Veamos otro ejemplo de generalización. Muchas consecuencias de la termodinámica clásica pueden sintetizarse en el famoso principio de Le Châtelier según el cual toda influencia externa sobre un sistema en equilibrio induce procesos tendentes a disminuir los efectos de la influencia. Aunque se refiere a sistemas y equilibrios termodinámicos la formulación de este principio invita a pensar que debe ser válido para cualquier conjunto delimitado de elementos en interacción que no esté evolucionando. En particular debe ser aplicable a grupos humanos con tradiciones de comportamiento arraigadas y harían bien en conocer este principio los gobernantes cuyo proyecto político consiste en cambiar la sociedad; se ahorrarían muchas frustraciones. También parece que el principio debe ser aplicable a los sistemas económicos cuya analogía con los sistemas termodinámicos todavía no ha sido estudiada detalladamente.

Estos y otros casos que harían demasiado largo este discurso nos inducen a pensar que el principio termodinámico de Le Châtelier es un caso particular de una verdad sumamente

general. Es una confirmación de la creencia que he mencionado anteriormente. Mirado el asunto con más detenimiento, sin embargo, aparece una dificultad. Los estudiantes de termodinámica descubren, muy a su pesar, que el principio de Le Châtelier es difícil de aplicar en muchos problemas concretos porque la respuesta depende de cómo se formule la pregunta. Esta es una característica de los principios muy generales bien conocida de los moralistas y sobre la cual volveré después.

Para terminar con mis ejemplos acerquémonos al problema de la interpretación de la teoría cuántica. Esta teoría describe, y muy exactamente por cierto, el comportamiento de los electrones, protones, neutrones, fotones y demás partículas que forman los átomos, moléculas, etc. que constituyen la materia que vemos y palpamos o intervienen en los procesos que percibimos. Para relacionar la estructura matemática formal de la teoría con los resultados de los experimentos es preciso admitir que las predicciones teóricas son de carácter probabilístico. No siempre es posible predecir el resultado de un proceso único pero la teoría anticipa correctamente la distribución estadística de un conjunto de procesos idénticos. Esto es lógicamente aceptable pero difícil de entender. En el mundo de los átomos, las cosas suceden de manera distinta a los sucesos que observamos a nuestra escala. El principio de incertidumbre de Heisenberg nos ayuda a intuir la razón del singular comportamiento de los fenómenos atómicos y subatómicos: Resulta que la propia estructura matemática de la teoría cuántica implica que es imposible determinar exactamente ciertos pares de magnitudes que de algún modo son incompatibles a nivel atómico. Así la posición y la velocidad de un electrón sólo pueden determinarse simultáneamente con una imprecisión inevitable. Ello es debido al carácter ondulatorio del electrón. Sin entrar ahora en detalles resulta que el principio de Heisenberg nos ayuda a intuir de algún modo lo que sucede en los procesos atómicos y a predecir cualitativamente lo que va a ocurrir sin necesidad de proceder a cálculos de alguna complicación.

Lo que no resuelve el principio de incertidumbre es un problema filosófico fundamental. En nuestra tradición occidental analizamos la realidad basándonos en tres principios lógicos: el

principio de identidad, el principio de no contradicción y el principio del tercio excluso. Pues bien lo que debemos pensar de los entes tales como los electrones según la teoría cuántica no se adapta a nuestro esquema lógico tradicional. Un electrón no está en ningún sitio concreto hasta que un experimento nos permite localizarlo. Y no vale la interpretación ingenua de que está en algún lugar que ignoramos sino que está, por decirlo de algún modo, potencialmente en una región extensa. Muchos experimentos sutiles, algunos muy recientes, muestran que la interpretación ingenua no es válida.

La solución filosófica a estas contradicciones lógicas de la teoría cuántica es el principio de complementariedad de Bohr. Sucede que no podemos aplicar las categorías que proceden de nuestra experiencia inmediata a objetos que sólo percibimos indirectamente. Y en cuanto a estos objetos, nos dice Bohr, en diferentes experimentos nos aparecen aspectos complementarios de una realidad que no podemos describir con nuestro lenguaje que procede de los objetos de percepción inmediata. Un electrón se nos presenta a veces como un objeto cuyas propiedades podemos identificar con las de una partícula igual a las que usamos en mecánica clásica. Otras veces, sin embargo, nos vemos forzados a describir un electrón como una onda, es decir como un objeto extenso no localizado y parecido al sonido o a la luz. No hay contradicción en ello porque se trata de dos aspectos complementarios de un objeto —el electrón— que no podemos percibir inmediatamente con nuestros sentidos y que sólo conocemos indirectamente a partir de los aspectos complementarios con los cuales podemos describir nuestros experimentos.

El principio de complementariedad parece ser también uno de los principios de aplicación mucho más general que los fenómenos atómicos de donde surgió y así lo apreció su autor desde el primer momento. Bohr aplicó su principio a procesos biológicos y psicológicos y es sugestivo pensar que ha de ser de utilidad en la comprensión de muchas realidades que no son de percepción inmediata. De hecho es razonable pensar que las categorías que proceden de nuestras vivencias ordinarias sólo nos

permitan describir aspectos parciales de las realidades que conocemos indirectamente y que dichos aspectos se complementen.

Después de estas divagaciones volvamos al discruso de Elices en el que nos sugiere la necesidad de las imperfecciones como un principio de validez general aplicable a muchas realidades. Me he referido a otros tres principios generales de los cuales uno —el determinismo rígido— ha resultado ser falso. Los otros dos, los principios de Le Châtelier y de Bohr, parecen válidos. Pero he dicho antes que hay que tomar estos principios con cautela y voy a explicar porqué.

Me gusta el principio que nos propone Elices como me gustan el de Le Châtelier y el de Bohr. Resulta muy atractivo identificar principios generales que nos muestran lo que tienen en común realidades muy diversas. Pero sucede que estos principios son ambiguos. Producen una gran satisfacción estética pero es muy difícil deducir de ellos consecuencias que nos iluminen en la investigación de realidades concretas. Esto no debe sorprendernos. En el ámbito de la ética nos encontramos con la misma dificultad. Todos estamos de acuerdo con principios tales como “haz el bien” o “la justicia consiste en dar a cada uno lo suyo” pero nos quedamos perplejos cuando en casos concretos tenemos que decidir qué es el bien o qué es lo suyo. Esto lo vió muy claramente Nietzsche cuando decía que los principios más generales, los más abstractos, son el humo de la realidad que se esfuma. Pero si los científicos no nos asomásemos a esos grandes principios seríamos sólo artesanos distinguidos. Y en esta casa pretendemos ser algo más. Como lo es el nuevo académico.

Por eso la incorporación de Manuel Elices a esta corporación es un acontecimiento afortunado. El nuevo académico se ocupa de cuestiones muy prácticas y concretas. Pero enmarcadas en el contexto amplio de aproximación a la sabiduría. Y por eso me complace especialmente darle la bienvenida.