

# EL PARADIGMA ESTRUCTURA – PROPIEDADES EN EL DESARROLLO DE MATERIALES ESTRUCTURALES DE ALTA PERFORMANCE

**Palabras clave:** Material estructural, estructura, microestructura, comportamiento mecánico.  
**Key words:** Structural material, structure, microstructure, mechanical behavior.

El presente trabajo describe la manera en que las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de materiales estructurales están en gran medida determinadas por su estructura interna y hasta qué punto esta relación entre propiedades mecánicas y estructura se ha convertido en un paradigma de la ciencia de materiales sobre el que se basa el desarrollo de materiales de alta performance.

■ **Luis A. de Vedia**

Instituto Sabato (UNSAM-CNEA)  
Facultad de Ingeniería UBA  
e-mail: ldevedia@cnea.gov.ar

The present work describes the way mechanical properties of different types of structural materials are determined to a large degree by its internal structure and to what extent this relationship between mechanical properties and structure has become a paradigm in materials science upon which the development of high performance materials has in the last decades been based.

Definimos a un elemento estructural como aquel cuya función primordial es la transmisión de esfuerzos mecánicos o la retención de presión. Esta es una definición muy amplia según la cual califica como elemento estructural tanto una biela de un motor de combustión interna, el pórtico de una grúa o un recipiente de presión. Sin embargo, esta función primordial debe ser satisfecha muchas veces en ambientes hostiles como medios corrosivos o de alta temperatura.

Esto requiere que los materiales con que aquellos elementos estructurales estén construidos exhiban una combinación de propiedades complementarias a la resistencia

mecánica. Podemos entonces, en general, caracterizar un material de alta performance como aquél que posee alguna o todas de las siguientes características:

- Elevada resistencia mecánica y fractoténacidad (es decir resistencia a la deformación plástica y a la fractura frágil).
- Buena resistencia a la corrosión y oxidación.
- Estabilidad mecánica a alta temperatura (resistencia a la deformación a temperaturas elevadas).

La figura 1 (Shackelford, 2004) nos muestra algunos ejemplos de aplicación de los distintos tipos o clases de materiales con que contamos en la actualidad:

- Metales
- Polímeros
- Cerámicos
- Vidrios
- Compuestos

Por ejemplo, la estructura de los aviones modernos contiene, a diferencia de las aeronaves del pasado construidas casi enteramente en aluminio y acero, una diversidad de materiales. Entre estos se destacan los compuestos avanzados consistentes en filamentos de grafito y boro en una matriz epoxy. En el esquema de la figura 2 vemos un jet Air Force 17 mostrando las partes hechas con compuestos de matriz polimérica.

Un elemento metálico se caracteriza por constituir sólidos que poseen, en general, buena conductividad

eléctrica y térmica que a su vez deriva de la presencia de electrones libres en el seno del sólido que constituyen. Además, y esto es una

característica muy importante de los metales que tiene un correlato directo con las propiedades mecánicas que los cuerpos sólidos metálicos

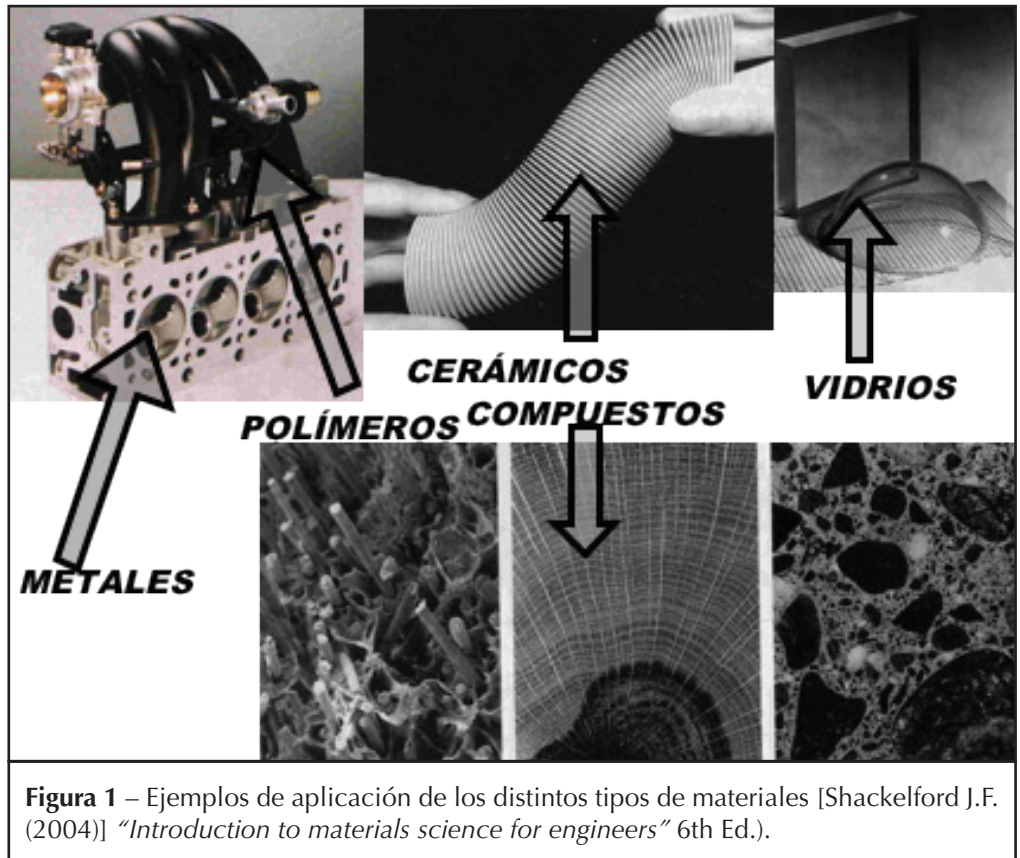
poseen, los átomos metálicos en el sólido se disponen según un arreglo periódico espacial que se conoce como arreglo o estructura cristalina.

Los polímeros comerciales, conocidos habitualmente como plásticos, son típicamente compuestos de los elementos H, C, N, O, F y Si. Los polímeros son en general aislantes

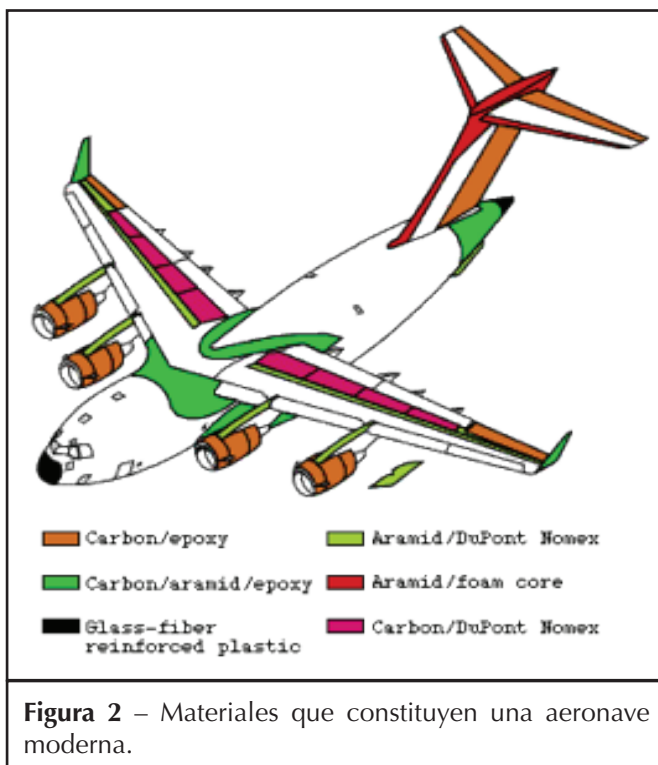
eléctricos aunque en la actualidad se han desarrollado polímeros conductores para ciertas aplicaciones especiales. A diferencia de los metales, que mantienen su resistencia mecánica a alta temperatura, los polímeros no son en general aptos para servicio a temperaturas elevadas.

Los cerámicos, en cambio, son combinaciones de uno o más elementos metálicos con uno o más de los elementos C, N, O, P y S. Los cerámicos se caracterizan por poseer una alta resistencia mecánica y por ser buenos aislantes eléctricos y térmicos. Su limitación más importante desde el punto de vista estructural es su fragilidad. Comparten frecuentemente con los metales el hecho que su estructura es también cristalina.

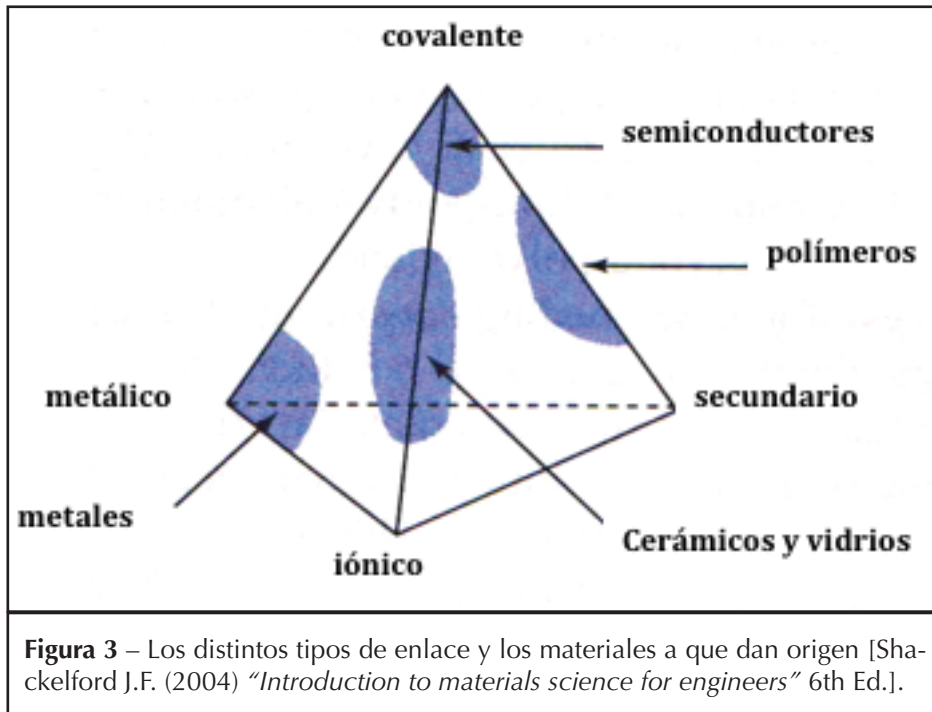
Las propiedades que caracterizan a los distintos tipos de materiales están en gran medida determinadas por la naturaleza de sus enlaces interatómicos como se muestra es-



**Figura 1** – Ejemplos de aplicación de los distintos tipos de materiales [Shackelford J.F. (2004)] "Introduction to materials science for engineers" 6th Ed.).



**Figura 2** – Materiales que constituyen una aeronave moderna.



nos metales también forman estructuras compactas. La figura 4 (Shackelford, 2004) muestra los ordenamientos compactos correspondientes a un cristal de aluminio y uno de magnesio.

Algunos compuestos, por ej. los polímeros, pueden formar cristales "moleculares". Las moléculas que constituyen los polímeros forman una estructura cristalina plegándose sobre sí mismas utilizando enlaces débiles como, por ejemplo, en el polietileno que da origen a una celda ortorrómbica (Van Vlack, 1989).

quemáticamente en la figura 3.

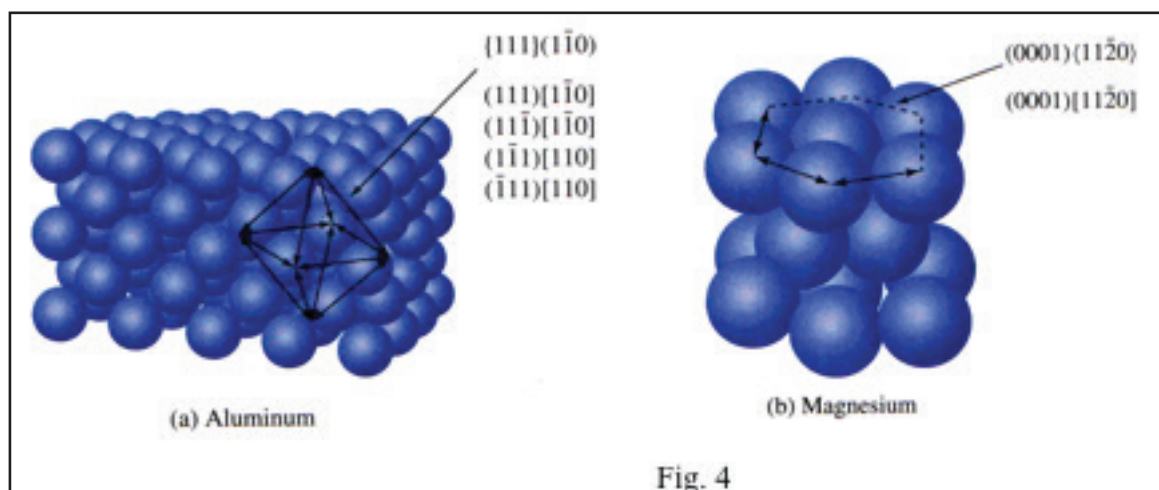
En esta figura 3 (Shackelford, 2004) se indican los tipos de enlaces químicos que caracterizan a los sólidos, es decir enlaces metálico, covalente, iónico y secundario. Obsérvese que algunos materiales como es el caso de los polímeros, los cerámicos y los vidrios exhiben en general más de un tipo de enlace. Los polímeros poseen enlaces covalentes y secundarios mientras que

los cerámicos y los vidrios poseen fundamentalmente enlaces de naturaleza iónica y covalente.

La estéreo-especificidad o direccionalidad de los enlaces determina la forma en que un dado átomo se relaciona con los átomos vecinos determinando así el tipo de estructura. En este sentido, los enlaces iónicos por tener su origen en la atracción coulombiana favorecen ordenamientos compactos. Algu-

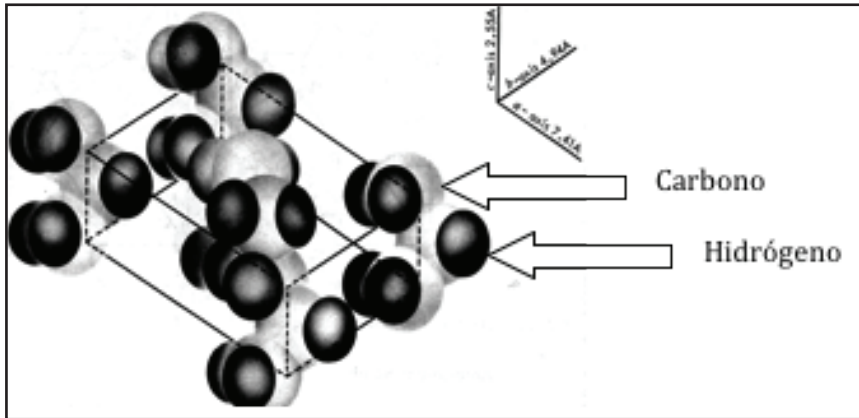
Es interesante e ilustrativo considerar la utilización hecha por el hombre de los materiales estructurales a través del tiempo desde la prehistoria hasta nuestros días teniendo en cuenta la importancia relativa que los distintos materiales tuvieron en las distintas épocas. Siguiendo a Ashby (2005) la figura 6 nos muestra esta importancia relativa en los últimos 10000 años.

No debería sorprendernos que,

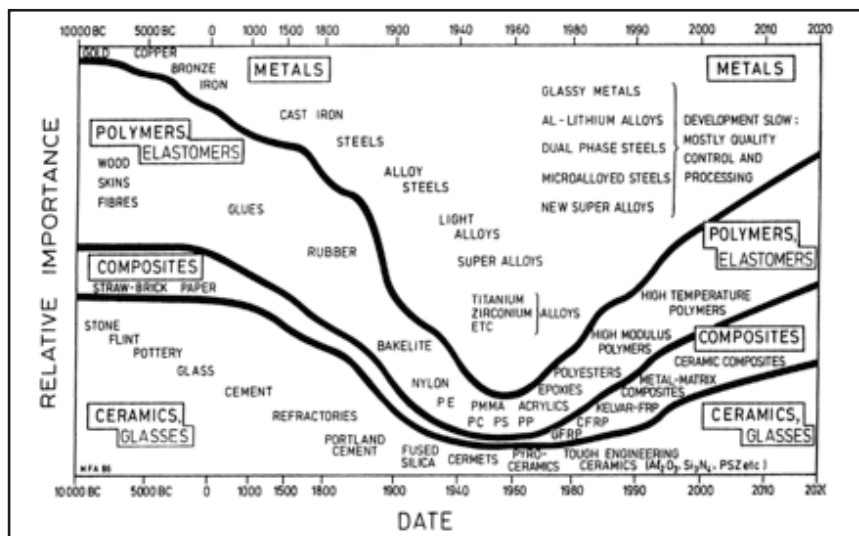


**Figura 4** – Estructuras compactas del aluminio y del magnesio [Shackelford J.F. (2004) "Introduction to materials science for engineers" 6th Ed.].





**Figura 5** – Celda unitaria del polietileno [Van Vlack L.H. (1989) “*Elements of material science and engineering*” 6th Ed.].



**Figura 6** – Utilización de los materiales a través de los tiempos [Ashby M.F. (2005) “*Materials selection in mechanical design*” 3rd Ed.].

recién hacia mediados del siglo XIX, los metales compitan en igualdad de importancia relativa con los materiales tradicionales como la madera, fibras naturales, pieles, piedra, cerámicas y vidrio y que sólo hacia mediados del siglo XX los metales alcanzan su pico de importancia relativa para volver a caer hacia nuestros días. Por esto, cuando nos referimos a la edad de los metales, debemos tener en cuenta que la importancia de los mismos era más cualitativa que cuantitativa y que, en general en términos históricos, la supervivencia del hombre debió menos a los metales que a otros materiales.

Hasta los años '50, la metalurgia se había desarrollado en forma empírica, esencialmente por prueba y error, con poca o ninguna contribución del conocimiento científico salvo quizás de la termodinámica y la físico-química a fines del siglo XIX y comienzos del XX pero básicamente utilizadas en el área extractiva y de reducción de minerales (Martínez Vidal, 1996). En particular, los conocimientos ya existentes en la época referentes a la estructura atómica no habían aún hecho impacto en la tecnología de los metales.

Fue recién a partir de los años '50 que empieza a producirse el

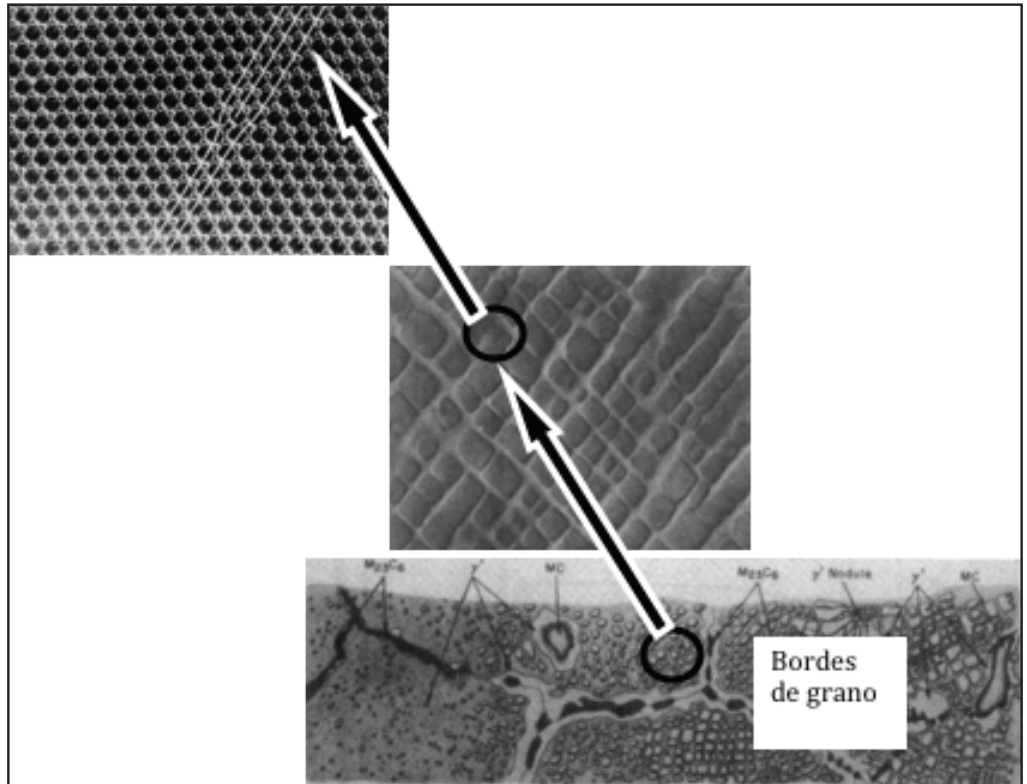
matrimonio entre la física y la metalurgia tradicional dando origen a lo que hoy conocemos como Metalurgia Física que comenzaba entonces a tomar carta de ciudadanía como una rama legítima de la física. Esta unión introdujo un nuevo paradigma que tiene vigencia hasta nuestros días. Este paradigma surge del reconocimiento que las propiedades de los materiales, tanto mecánicas como magnéticas, eléctricas y nucleares, son cualidades emergentes no sólo de la composición química sino en gran medida de la estructura de los mismos (Philips, 2001).

El término estructura, aplicado a un material, debe entenderse aquí algo así como la “arquitectura” en distintas escalas de descripción de aquél, es decir a nivel atómico, en el que quedan definidas las estructuras cristalinas y los defectos cristalinos; a nivel mesoscópico en el que se definen e identifican las fases y microfases presentes y su distribución y a un nivel que podemos llamar macroscópico en el que se caracteriza el tamaño de grano y su morfología o textura.

Un celebrado ejemplo de la relación microestructura-propiedades es la ley de Hall-Petch que dice que la resistencia al inicio de la deformación plástica de un metal o aleación, caracterizada por su tensión de fluencia, es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del diámetro de grano promedio (Philips 2001).

La ley de Hall-Petch está relacionada con uno de los logros más destacables que se produjeron como resultado de la simbiosis entre la metalurgia y la física en la década del '60: los aceros de tratamiento termomecánico controlado. Estos aceros de media y alta resistencia deben su existencia al conocimiento de la física de los defectos cristalinos que permitió el control submicroscópico

de precipitados a través de la introducción de muy pequeñas cantidades de elementos de aleación específicos seguido de un tratamiento de laminación a temperaturas controladas. El resultado fue una generación de aceros, esencialmente al carbono – manganeso (C-Mn), que poseen elevada resistencia mecánica y excelente resistencia a la fractura frágil mediante el recurso de utilizar en su producción, como un destacado metalógrafo argentino dijo, “más materia gris que elementos de aleación” (Vasallo, 1970). Actualmente, estos aceros son ampliamente utilizados en la industria



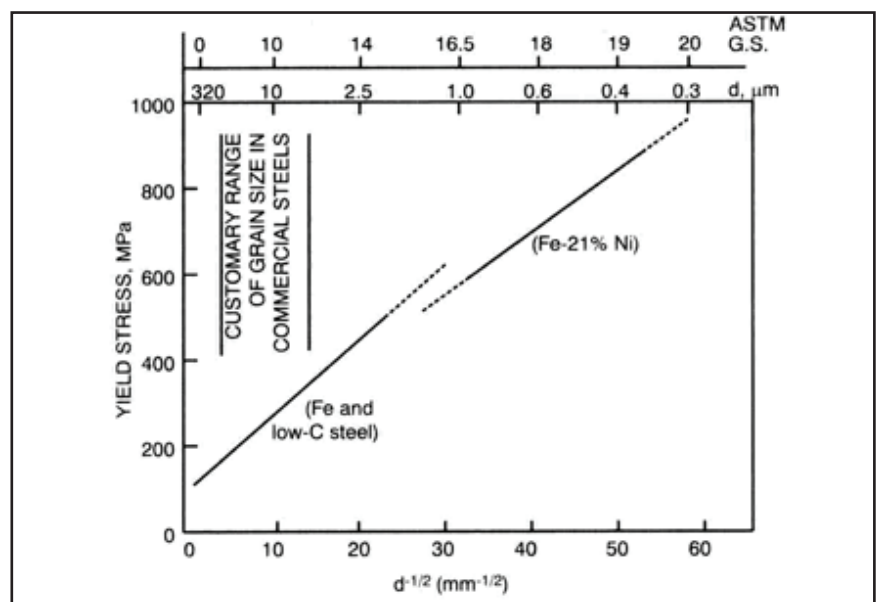
**Figura 7** – Distintas escalas de descripción de un material [Evans R.W., Wilshire B. (1993) “Introduction to creep”].

de producción y transporte de gas y petróleo y no deja de ser significativo que los eventuales sucesores de estos aceros, al menos en algunas aplicaciones, sean las nuevas generaciones de aceros super-martensíticos que también son el resultado de la comprensión lograda en fenómenos metalúrgicos fundamentales y en la teoría de aleaciones.

Hasta aquí nos hemos referido solamente a desarrollos en aceros pero la metalurgia científica, hija de este matrimonio entre la metalurgia tradicional y la física, ha sido pródiga en el diseño y producción de otras aleaciones que si bien de menor utilización en términos de tonelaje han sido determinantes en los logros tecnológicos contemporáneos como la generación de energía tanto por medios convencionales como nucleares, el transporte marítimo y terrestre, la actividad aeroespacial y la biomecánica, sólo para

nombrar algunos campos en los que estos materiales juegan un rol protagónico. Algunos de estos materiales son las aleaciones de aluminio ter-

moendurecibles, las superaleaciones de Níquel-Cobalto-Hierro (Ni-Co-Fe), las aleaciones de Titanio, Circonio, etc.

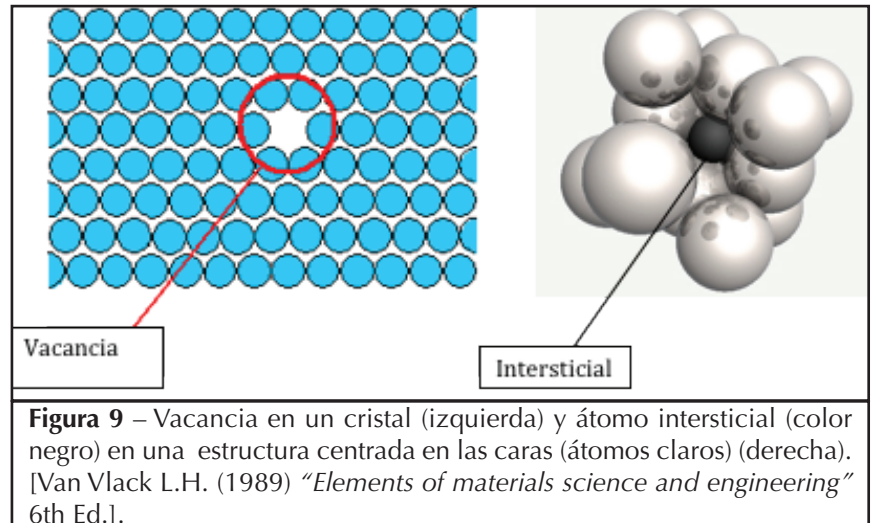


**Figura 8** – Ley de Hall-Petch [Philips R. (2001) “Crystals, Defects and Microstructures: Modeling across scales” Cambridge University Press, Cambridge].

Como se ha mencionado más arriba, las propiedades de los materiales son esencialmente resultantes de la estructura de los mismos. A su vez la estructura queda determinada por el arreglo particular que adoptan los átomos que constituyen el material. En el caso de los materiales cristalinos en general, el arreglo u ordenamiento periódico espacial que los caracteriza se ve alterado en su periodicidad por la presencia de lo que se denominan “defectos cristalinos”. Sin embargo, debe destacarse que esta denominación se refiere al hecho que la presencia de estos “defectos” interrumpen la periodicidad perfecta del cristal más que al hecho que constituyan un factor deletéreo para las propiedades del mismo. De hecho, muchas propiedades útiles de los materiales cristalinos, como por ejemplo la ductilidad de los metales o la elevada resistencia mecánica de los cerámicos, se originan en la presencia de tales defectos.

Los defectos cristalinos pueden clasificarse en puntuales, lineales y superficiales o bidimensionales. Entre los primeros, los más importantes son las vacancias y los intersticiales. Las primeras representan la ausencia de un átomo en el lugar que éste debería ocupar si el cristal fuese perfecto. Los defectos intersticiales por el contrario, están constituidos por la presencia de un átomo en una posición que no debería estar ocupada en el cristal perfecto. La figura 9 ilustra la existencia de una vacancia en un cristal y la presencia de un intersticial en una estructura cristalina cúbica centrada en las caras (Van Vlack, 1989).

Las vacancias juegan un rol muy importante en el fenómeno de difusión en fase sólida ya que, al contribuir con lugares vacantes en la estructura cristalina, facilitan el movimiento de átomos en el cristal, lo que tiene gran importancia en diver-

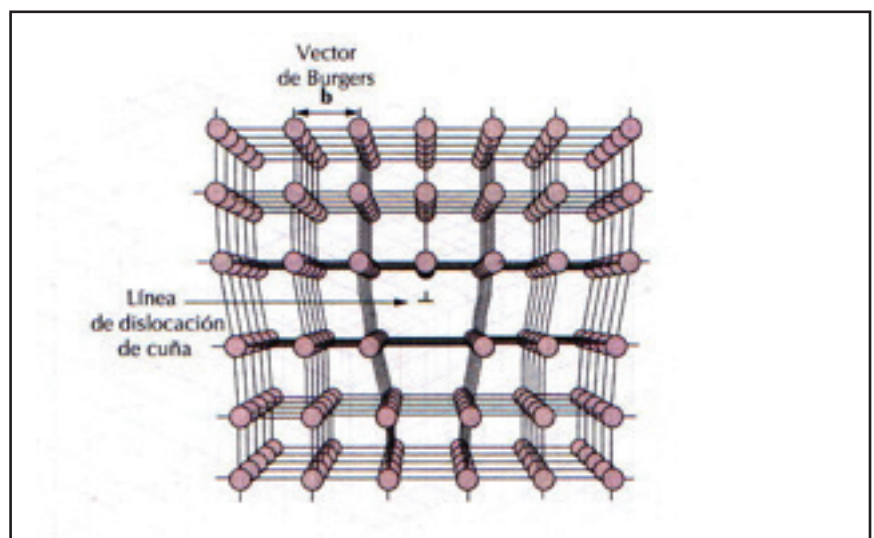


**Figura 9** – Vacancia en un cristal (izquierda) y átomo intersticial (color negro) en una estructura centrada en las caras (átomos claros) (derecha). [Van Vlack L.H. (1989) “Elements of materials science and engineering” 6th Ed.].

sos procesos que son controlados por ese fenómeno.

Otro defecto cristalino de gran importancia es la dislocación. Se denominan así a aquellos defectos donde la red se distorsiona alrededor y a lo largo de una línea de átomos. La distorsión de los átomos genera un campo de tensiones. Un tipo muy importante de dislocación, llamado de borde, está constituido por un plano incompleto de átomos en la red cristalina que termina en la línea de dislocación (Svoboda, 2000). En la figura 10 se puede ver la representación gráfica de una dislocación de borde.

La introducción del concepto de dislocación revolucionó el campo de la mecánica de materiales desde su introducción teórica a fines de la década del '20. A partir de este concepto se pudo explicar la diferencia entre la tensión teórica de deformación y la tensión de corte real para comenzar la deformación (Tensión de Corte Crítica Resuelta) donde la primera es del orden de 100 a 1000 veces mayor que la medida experimentalmente. En la tabla 1 se pueden observar los valores respectivos de Tensión de Corte Crítica Resuelta (TCCR) y de Tensión Teórica para la deformación plástica de distintos materiales.



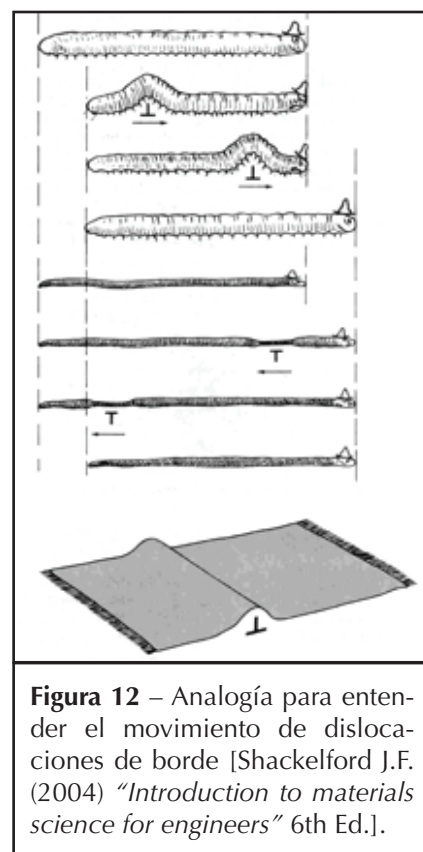
**Figura 10** – Dislocación de borde.



Tabla 1		
Material	Tensión Teórica (lb/pulg.2)	TCCR (lb/pulg.2)
Al	566000	114
Ag	577000	54
Cu	940000	71
Fe- $\alpha$	1590000	4000
Mg	381000	57

cia a los mecanismos empleados por orugas y gusanos para desplazarse, y con un posible método para lograr el desplazamiento de una alfombra pesada como se ilustra esquemáticamente en la figura 12 (Shackelford, 2004).

De esta forma, la tensión necesaria para deformar un material con dislocaciones es mucho menor que



**Figura 12** – Analogía para entender el movimiento de dislocaciones de borde [Shackelford J.F. (2004) "Introduction to materials science for engineers" 6th Ed.].

El concepto de dislocación también explica además del mecanismo de deformación plástica de los materiales, el endurecimiento por deformación, y otros tantos fenómenos asociados con la fluencia, creep y fractura de los materiales cristalinos.

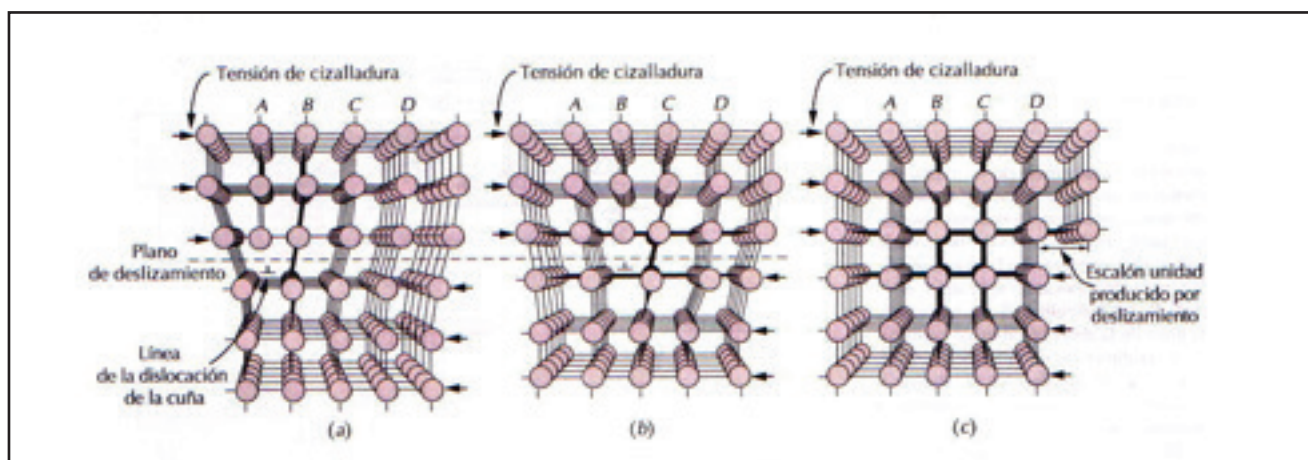
La resistencia teórica de un material se puede estimar a partir del conocimiento de su módulo de corte utilizando un modelo muy simplificado. Al aplicar un esfuerzo de corte se produce el desplazamiento de todos los átomos que están por encima del plano de deslizamiento (o debajo) hacia un nuevo conjunto de sitios reticulares. La expresión que estima el esfuerzo de corte necesario para producir dicho desplazamiento permanente surge de la aproximación que usó Frenkel en 1926 y está dada por:

$$\tau_m = G b / 2 \pi a$$

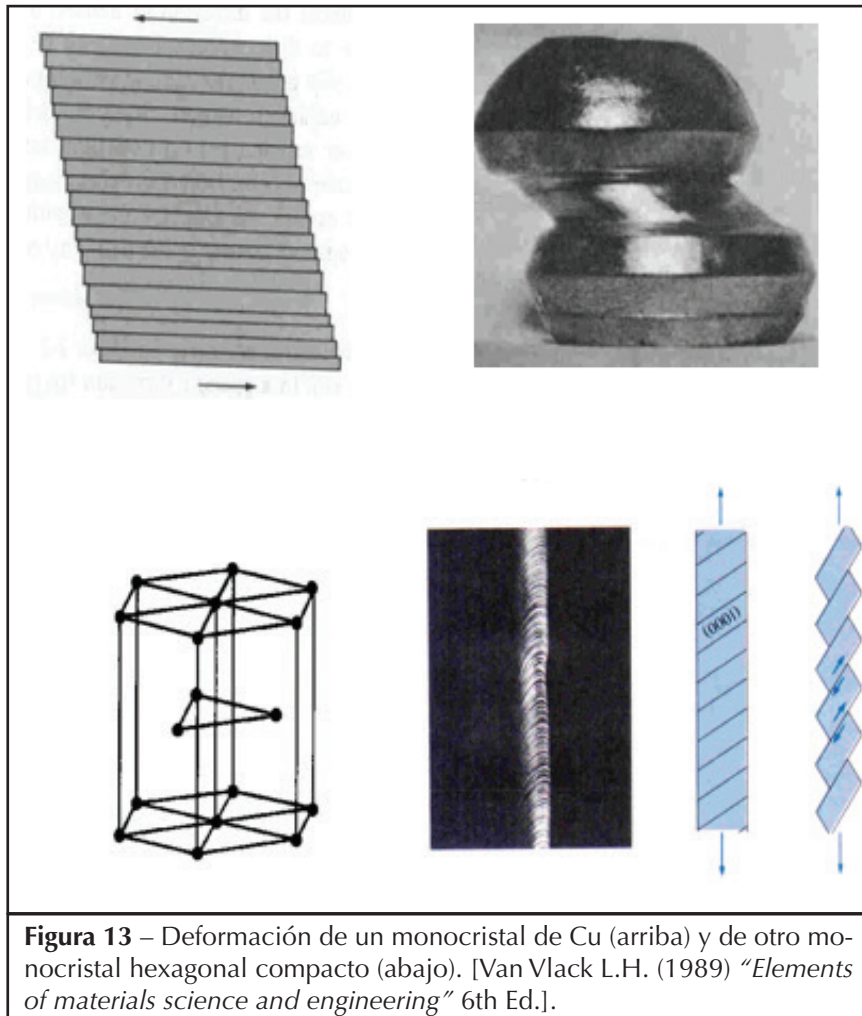
donde a y b son los parámetros de la red y G el módulo de corte.

El semiplano extra de átomos insertado como una "cuña" dentro de la red cristalina produce una distorsión de la misma llevando a los átomos que lo circundan a posiciones fuera de equilibrio. Este efecto hace que para deformar el material no sea necesario romper todos los enlaces atómicos simultáneamente sino que, por la presencia de la dislocación, éstos se rompen secuencialmente de uno a uno desplazando la dislocación un espaciado atómico. En la figura 11 se ilustra dicho mecanismo.

Una analogía frecuentemente utilizada entre el movimiento de dislocaciones de borde es la referen-



**Figura 11** – Movimiento de una dislocación de borde en un cristal.

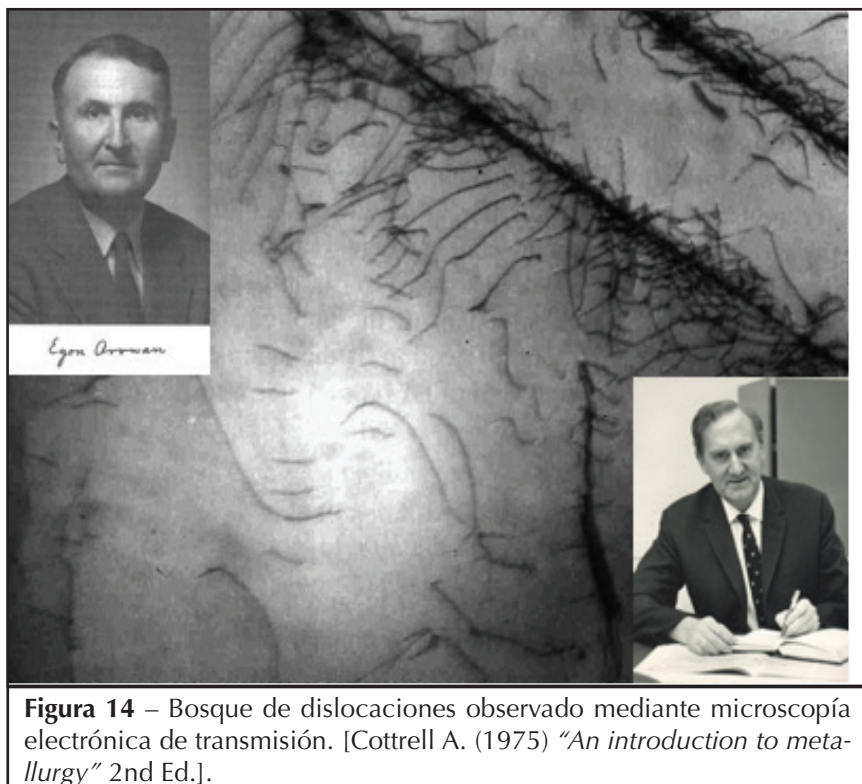


la que se necesitaría teóricamente en un cristal perfecto. En efecto, la deformación plástica de los materiales se produce principalmente por movimiento de dislocaciones según sistemas de deslizamiento. Estos sistemas están constituidos por un plano de deslizamiento en el cual se mueve la línea de dislocación y una dirección de deslizamiento.

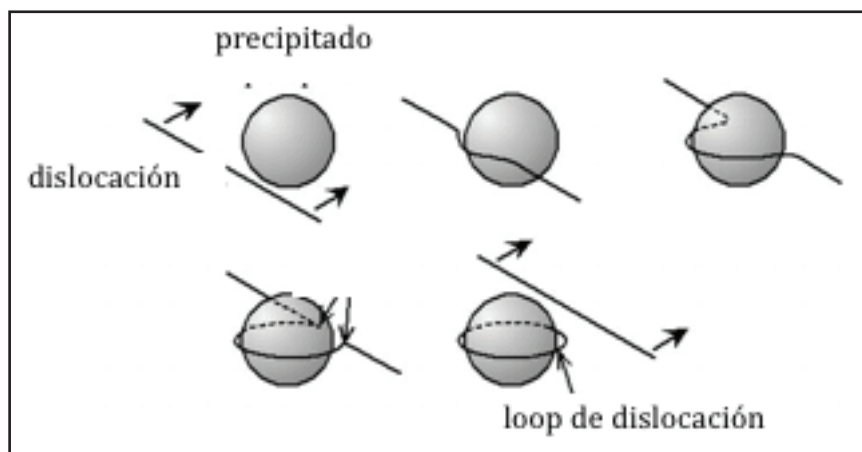
La figura 13 (Van Vlack, 1989) muestra la deformación de monocristales de cobre (Cu) (arriba) y de otro monocristal hexagonal compacto por acción de un esfuerzo de corte actuando sobre los planos basales (0001) (abajo).

Es interesante destacar que si bien las dislocaciones fueron propuestas teóricamente a fines de los años '20, su observación experimental debió esperar el desarrollo de la microscopía electrónica para que recién en la década del '60 fueran detectadas (Cottrell, 1975). La figura 14 muestra un bosque de dislocaciones observado mediante microscopía electrónica de transmisión. En la foto superior E. Orowan que introdujo con otros el concepto de dislocación, teóricamente. A la derecha, Sir A. Cottrell que contribuyó a la comprensión de la interacción entre dislocaciones y átomos (Atmósferas de Cottrell).

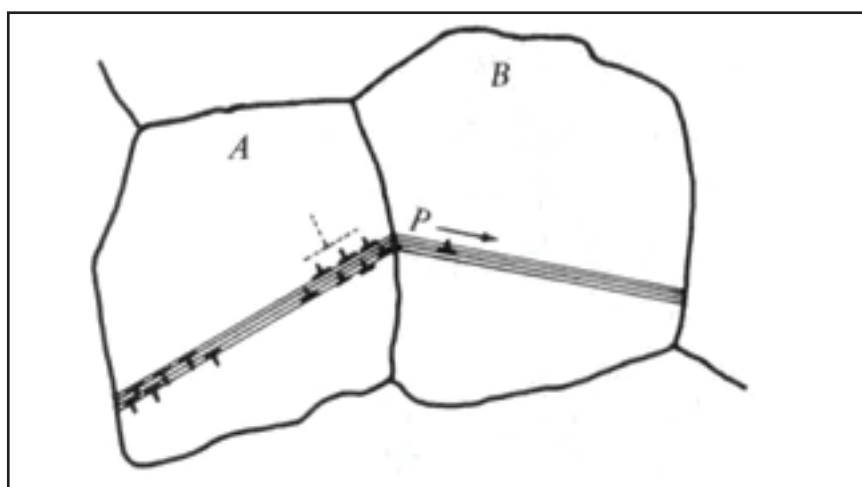
La figura 15 ilustra el mecanismo propuesto por E. Orowan de interacción entre un precipitado y una dislocación. Puede verse cómo el encuentro del precipitado con la dislocación obliga a ésta a curvarse aumentando así su longitud. Este proceso consume energía lo que se traduce en un mayor esfuerzo necesario para hacer mover la dislocación. Alternativamente, dependiendo de las características del precipitado, la línea de dislocación puede pasar a través del mismo produciendo su seccionamiento. En ambos







**Figura 15** – Interacción entre una dislocación y un precipitado.



**Figura 16** – Propagación de bandas de deslizamiento en un policristal.

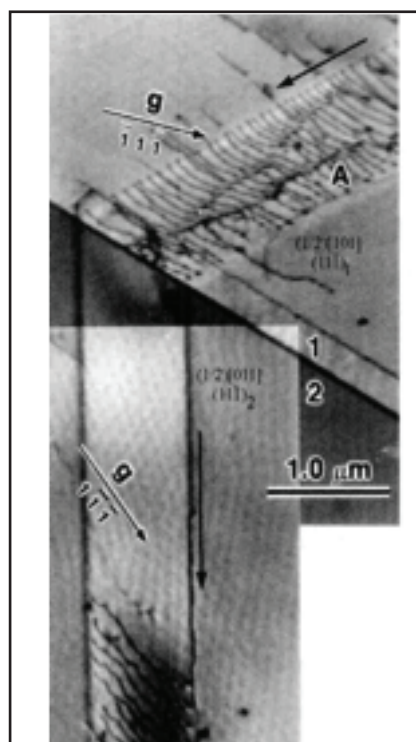
casos la presencia del precipitado o micro-fase contribuye al endurecimiento del cristal por constituir una barrera al movimiento de las dislocaciones.

La propagación de bandas de deslizamiento (agrupación de planos de deslizamiento) en las que tiene lugar la deformación plástica en un material policristalino, como son la mayoría de los materiales metálicos o cerámicos que utilizamos habitualmente y en los que cada grano individual es en sí un monocristal, requiere que el apilamiento de dislocaciones en el borde de grano produzca una concentración de tensiones suficiente para iniciar el deslizamiento en un grano adyacente en un dado sistema de deslizamiento. Una

estructura de grano más fina obliga a que haya más sitios de reiniciación lo que aumenta la resistencia a la deformación del policristal como se muestra esquemáticamente en la figura 16.

La figura 17 muestra un apilamiento de dislocaciones sobre un borde de grano (arriba) y transferencia de la banda de deslizamiento al grano adyacente (abajo).

Hemos visto entonces que dos de los recursos más eficaces para endurecer una aleación es mediante la reducción de su tamaño de grano y mediante la producción de micro-fases o precipitados que actúen como barrera al movimiento de las dislocaciones. La aleación Al - Cu es

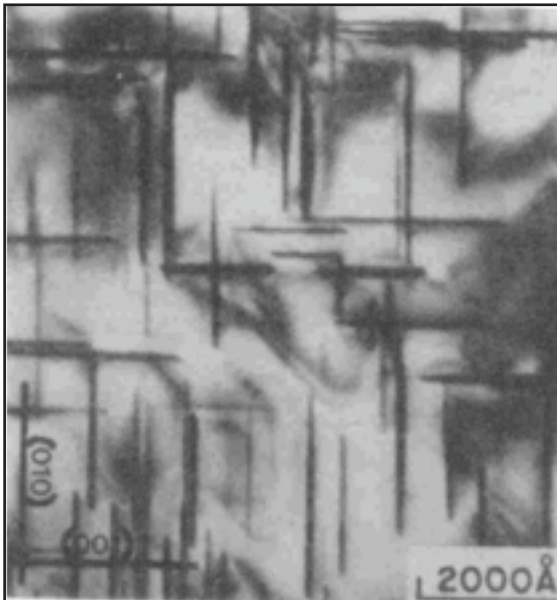


**Figura 17** – Observación mediante microscopía electrónica de un apilamiento de dislocaciones sobre un borde de grano y transferencia de la banda de deslizamiento al grano vecino. [Evans R.W., Wilshire B. (1993) "Introduction to creep" The Institute of Materials, London.].

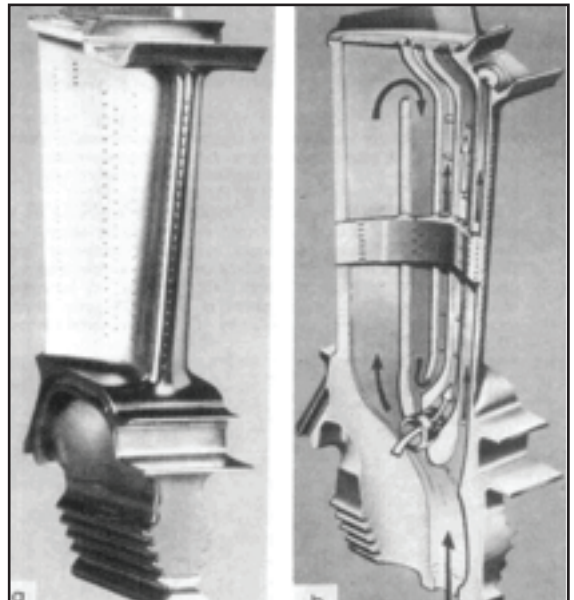
un típico ejemplo de aleación endurecible por precipitación. Mediante un tratamiento térmico apropiado es posible producir precipitados que resultan eficaces para incrementar la resistencia mecánica. En particular, las aleaciones de aluminio de uso aeronáutico deben su elevada resistencia a este mecanismo de endurecimiento.

La figura 18 muestra la micro-fase metaestable  $\theta'$  (Al<sub>2</sub>Cu) en una aleación Al-6% Cu vista en el microscopio electrónico de transmisión. Estos precipitados tienen forma de disco de 100-150 Å de espesor y entre 100 y 6000 Å de diámetro (Kou, 2002).

A temperaturas elevadas, los bordes de grano de un material policris-



**Figura 18** – Precipitados en una aleación Al – 6% Cu. [Kou S. (2002) “Welding metallurgy” 2nd Ed.].



**Figura 20** – Alabes de turbina aeronáutica de diseño avanzado. [Evans R.W., Wilshire B. (1993) “Introduction to creep” The Institute of Materials, London.].

talino pueden sufrir un deslizamiento relativo como lo muestra la figura 19. Esto puede resultar en fisuras intergranulares como se muestra en la parte derecha de la misma figura correspondiente a un acero inoxidable austenítico AISI 316 conteniendo fisuras nucleadas por creep en los bordes de grano.

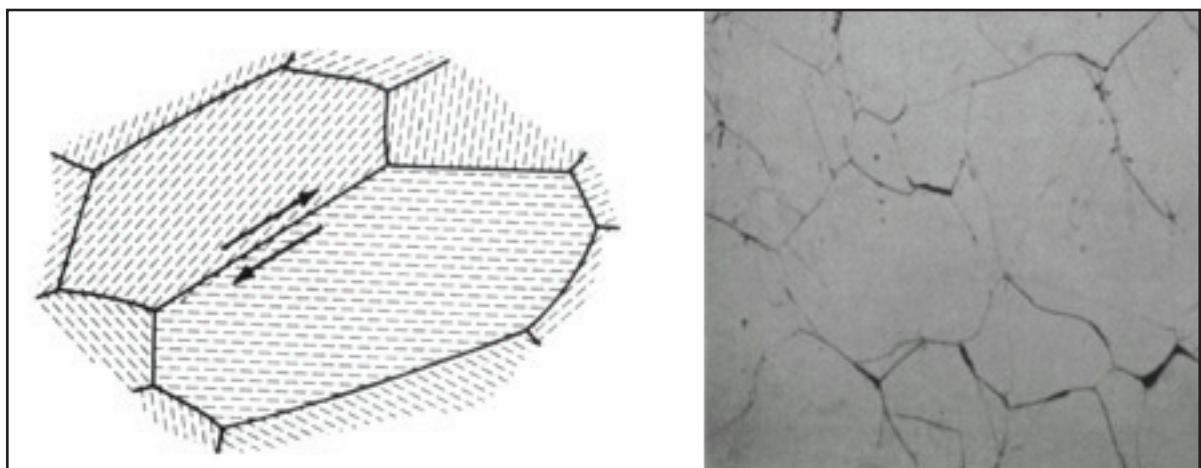
La figura 20 muestra alabes de turbina aeronáutica de superaleación de base Ni (Evans, 1993). La imagen de la derecha corresponde a

un diseño avanzado refrigerado por aire. Estos elementos deben mantener adecuada resistencia mecánica y estabilidad dimensional en ambientes agresivos a temperaturas de aproximadamente 1000 °C.

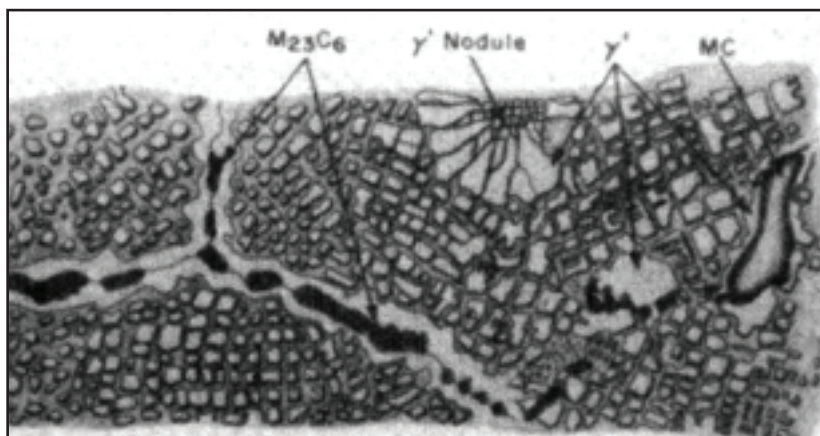
La elevada resistencia mecánica de las superaleaciones de base Ni y su resistencia al creep se deben fundamentalmente al endurecimiento por precipitación producido por la fase  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3\text{AlTi}$ ) y a la resistencia al deslizamiento de borde de grano

provisto por los carburos intergranulares (M23C6) como se ilustra en la figura 21 (Evans, 1993).

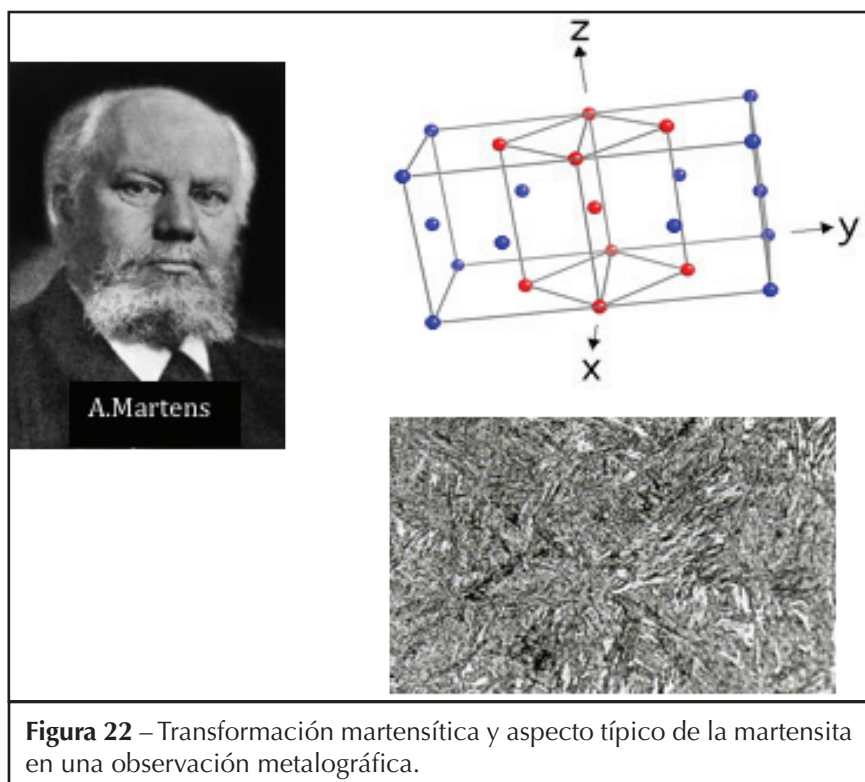
Un ejemplo elocuente de las dificultades para efectuar predicciones sobre desarrollos tecnológicos es el constituido por los materiales de uso automotriz. Cuando se pensaba que el uso del acero en el automóvil ya no dejaba lugar a mejoras, la industria siderúrgica en conjunto con la automotriz ha logrado recientemente diseñar y construir un automóvil



**Figura 19** – Fisuras en borde de grano producidas por deslizamiento a alta temperatura (Creep).



**Figura 21** – Microfases y precipitados presentes en una superaleación de base Ni. [Evans R.W., Wilshire B. (1993) "Introduction to creep" The Institute of Materials, London.].



**Figura 22** – Transformación martensítica y aspecto típico de la martensita en una observación metalográfica.

de estructura de acero que es 24% más liviano y 34% más resistente a un costo inferior al de los autos convencionales.

Este sorprendente logro pudo obtenerse mediante la explotación de los modernos conocimientos de las transformaciones de fase en aceros y del control termomecánico de su microestructura (Pickering, 1978). En la figura 22 se observa a la dere-

cha el modelo de Bain para explicar la transformación de austenita cúbica centrada en las caras a martensita tetragonal centrada en el cuerpo que constituye una fase de alta dureza. La presencia de átomos intersticiales de Carbono juega un rol protagónico en esta transformación (no se muestran en la figura). A la derecha abajo, el aspecto que puede presentar la martensita en una observación metalográfica. El nombre martensi-

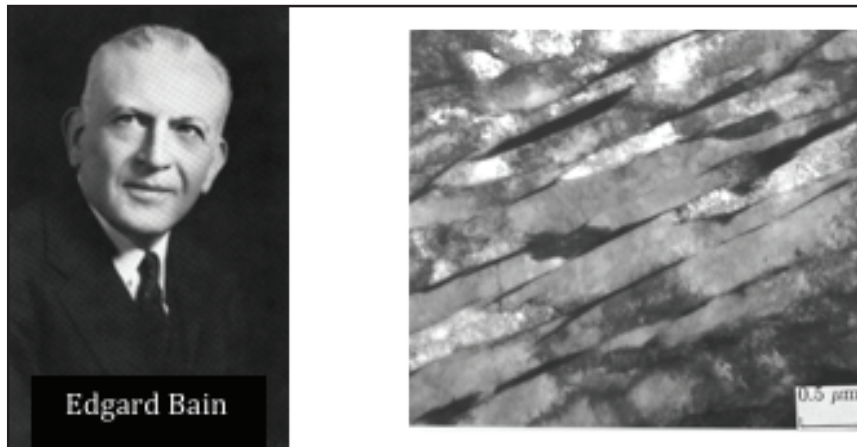
ta se adoptó en reconocimiento al metalurgista alemán Adolf Martens (que aparece en la foto) que, si bien no participó del estudio de esa fase, realizó importantes contribuciones a la metalurgia.

La bainita, identificada por Bain y Davenport hacia 1930, es otro constituyente microestructural que, junto con la martensita, permite obtener aceros con excelente combinación de resistencia mecánica y tenacidad. La figura 23 muestra el aspecto de la bainita en una observación mediante microscopía electrónica de transmisión. Nótese la fina estructura en forma de bastones de ferrita que este constituyente microestructural posee y que es un factor contribuyente a su excelente combinación de resistencia mecánica y tenacidad. Los aceros más avanzados en la actualidad hacen uso de estos constituyentes microestructurales para lograr excepcionales propiedades mecánicas. Ejemplos de estos últimos son los aceros inoxidables super-martensíticos, los aceros al C-Mn de fase dual y los aceros TRIP.

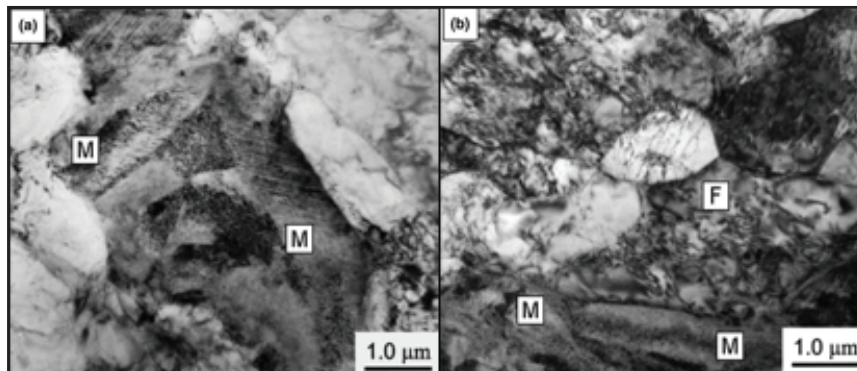
En la figura 24 se pueden ver micrografías electrónicas de transmisión mostrando la subestructura de las placas de martensita (a) y la elevada densidad de dislocaciones en la ferrita adyacente a la martensita en aceros de grano ultrafino de fase dual (b). En estos aceros de última generación, el tamaño de grano ferrítico es del orden de 1 nm y la fracción en volumen de martensita de aproximadamente 30% con resistencias a la tracción del orden de 1000 MPa.

Los nuevos desarrollos en aceros deben necesariamente ir acompañados de avances paralelos en el campo de la soldadura. En este sentido, la forma de mejorar la resistencia mecánica y la tenacidad de una

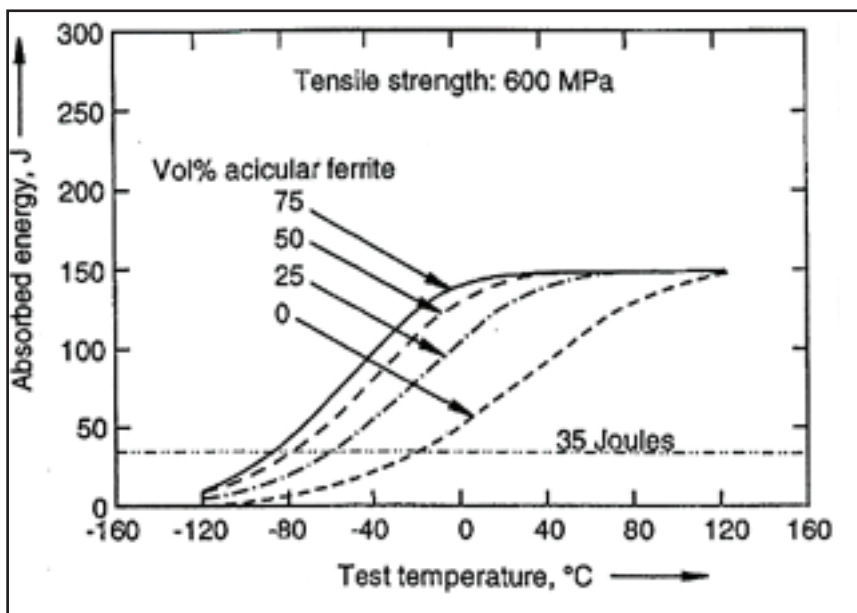




**Figura 23** – Aspecto de la bainita observada en el microscopio electrónico.



**Figura 24** – Micrografías electrónicas mostrando la subestructura de las placas de martensita (a) y la alta densidad de dislocaciones en la ferrita adyacente a la martensita en aceros de fase dual (b). [Abe N., Kitada T., Miyata S. (1980) Transactions of the JWS, 11, 4: 29-34.].



**Figura 25** – Modificación del rango de temperaturas de transición dúctil-frágil con el contenido de ferrita acicular en una soldadura de acero ferrítico. [Kou S. (2002) "Welding metallurgy" 2nd Ed.].

soldadura es también a través del control microestructural. Trabajos realizados por distintos investigadores en los años '70 condujeron a la observación que la ferrita acicular es la microestructura óptima para el metal de soldadura de aceros ferríticos ya que conduce a una adecuada combinación de resistencia y tenacidad a la fractura a baja temperatura. La figura 25 ilustra de qué modo la temperatura de transición dúctil-frágil descende a medida que aumenta, en el depósito de soldadura, la proporción del microconstituyente ferrita acicular (Kou, 2002).

La razón por la cual este constituyente otorga buenas propiedades al cordón de soldadura es debido a que posee una microestructura de grano extremadamente fino, del orden de algunos micrones, con una elevada relación de aspecto de aproximadamente 0.1 y con una gran desorientación entre placas lo que resulta eficaz para impedir la propagación de fracturas por clivaje (Abe, 1980). La figura 26 muestra a la izquierda el aspecto que presenta la ferrita acicular al microscopio electrónico de barrido y a la derecha un detalle con mayor resolución mostrando el rol que juegan algunas inclusiones no metálicas, tales como pequeñas partículas de óxido, en la nucleación de las placas de ferrita acicular (Lancaster, 1987; Svoboda, 2004).

Las ventajas de obtener materiales con microestructuras altamente refinadas son también aprovechadas en la producción de aleaciones no ferrosas. Un método utilizado para producir aleaciones de aluminio nano-estructuradas es mediante la técnica conocida como "melt-spinning" que consiste en una rueda de Cu que gira a alta velocidad logrando así el brusco enfriamiento del aluminio fundido que se va depositando sobre la misma como se

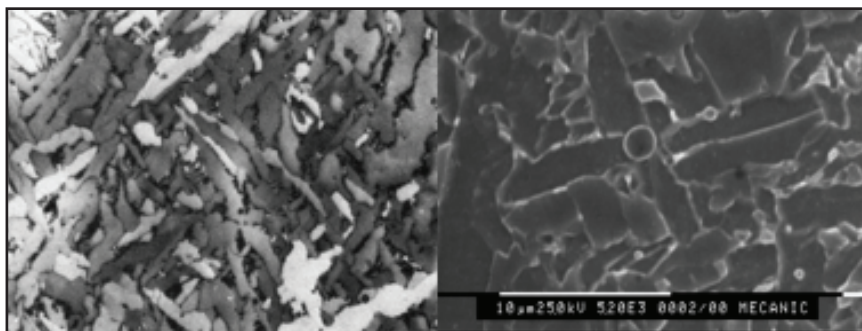
muestra en la figura 27 (Saporiti, 2010).

Este intenso sobreenfriamiento permite la formación de núcleos estables que al crecer conforman una estructura de grano ultrafino en forma de cinta. El material así logrado se consolida posteriormente por compresión.

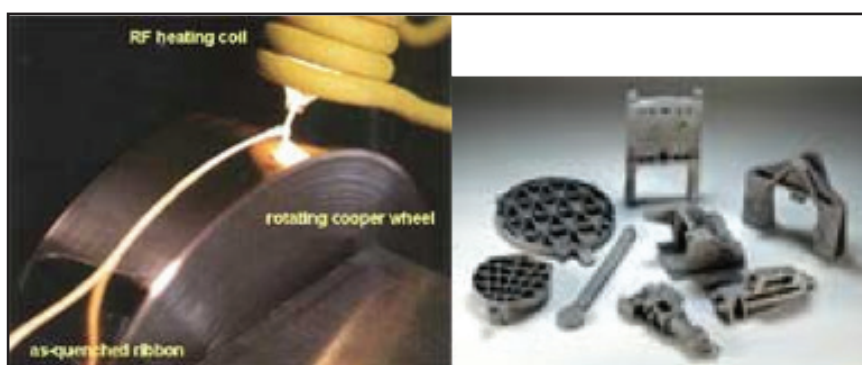
Los materiales compuestos permiten obtener combinaciones de propiedades imposibles de obtener con un solo tipo de material. Entre los materiales compuestos se destacan los reforzados por fibras o por partículas. En la figura 28 vemos a la derecha formas estructurales de plásticos reforzados con fibra de carbono (CFRP). A la izquierda un paquete de fibras de vidrio antes de su inclusión en polímero.

Un ejemplo de compuesto avanzado es el constituido por una matriz de carburo de silicio (SiC) reforzada con fibras largas del mismo material (SiCf/SiC). Este es un material experimental para los futuros reactores de fusión debido a su elevada resistencia mecánica a altas temperaturas y su baja activación neutrónica. Actualmente se investiga el mejoramiento de su conductividad térmica.

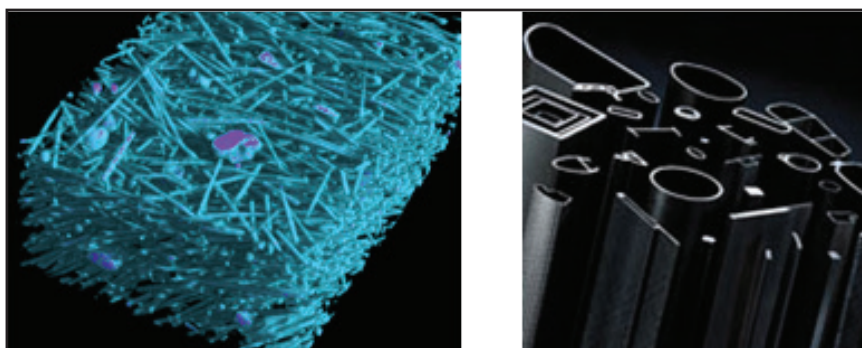
En el campo de los materiales cerámicos se han producido también avances notables como consecuencia de un mayor conocimiento en la química y el control microestructural de los mismos. La figura 29 muestra hojas de cuchillos de cerámicos avanzados de grano ultrafino que retienen el filo 10 veces más que los de acero incluyendo los de alto carbono. En un ensayo de desgaste consistente en corte de blocs de papel repetido 1000 veces se observa el menor desgaste en el cerámico avanzado con respecto a un cerámico convencional (Kyocera Advanced Ceramics).



**Figura 26** – Ferrita acicular observada mediante microscopio electrónico de barrido. A la derecha, nucleación de placas de ferrita acicular en una partícula, posiblemente óxido [Svoboda H. (2004) Tesis de Doctorado, FIUBA].



**Figura 27** – Producción de cintas de aleación de aluminio nanoestructuradas mediante el proceso melt-spinning y algunas formas fabricadas mediante tales aleaciones (Saporiti, M.F. (2010) “Estructura de aleaciones amorfas y nanoestructuradas de base aluminio”. Tesis de Doctorado FIUBA.).

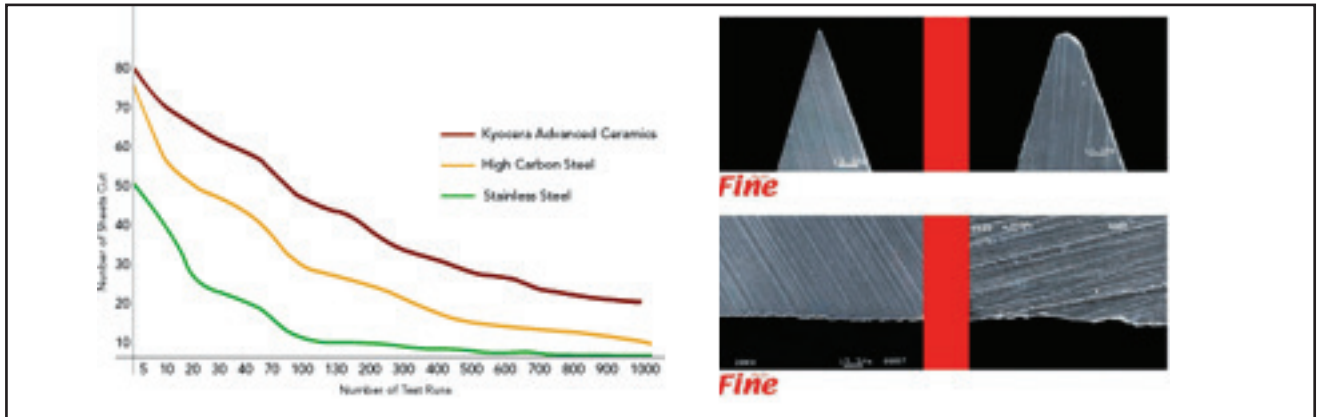


**Figura 28** – Paquete de fibras de vidrio antes de ser incluidas en polímero y formas estructurales hechas con refuerzo de fibras de carbono.

La figura 30 muestra ejemplos de aplicación de cerámicos avanzados. Las tejas utilizadas en la región de nariz del Space Shuttle como blindaje térmico durante el reingreso a la atmósfera. Tejas de alúmina reforzadas con fibras del mismo material

utilizadas en servicio de alta abrasión (Finn Inc. Advanced Ceramics) y rótula de cadera de alúmina.





**Figura 29** – A la izquierda se registra la cantidad de cortes realizados sobre bloques de distinta cantidad de hojas y a la derecha el desgaste resultante de un cerámico avanzado frente a uno convencional. Kyocera Advanced Ceramics, [www.kyoceraadvancedceramics.com/ceramic/](http://www.kyoceraadvancedceramics.com/ceramic/).

## ■ GLOSARIO

**Material estructural:** Cualquier material que se utilice para construir componentes estructurales, es decir elementos cuya función principal es la de soportar esfuerzos mecánicos.

**Estructura:** La “arquitectura” en distintas escalas de descripción de un material, es decir desde la escala atómica a aspectos macroscópicos.

**Tensión de fluencia:** La fuerza por unidad de área que es necesario aplicar a un material para que comience a deformarse plásticamente.

**Material cristalino:** Material en el que sus átomos se encuentran ordenados siguiendo un patrón periódico espacial. Los metales constituyen un subgrupo de los materiales cristalinos.

**Cristal (o monocristal):** También denominado grano cristalino. Es una porción de material, generalmente pequeña, que tiene estructura cristalina con una orientación común de los planos atómicos.

**Policristal:** Un agregado de cristales. Cada cristal individual tiene su orientación particular de planos atómicos que cambia al pasar a un cristal vecino.



**Figura 30** – Ejemplos de aplicación de cerámicos avanzados. (Finn Inc. Advanced Ceramics, [www.finn-inc.com/advanced\\_ceramics.html](http://www.finn-inc.com/advanced_ceramics.html)).

**Defecto cristalino:** Cualquier alteración del ordenamiento perfecto de los átomos en un cristal.

**Dislocación de borde:** Es el defecto cristalino que corresponde a un plano atómico incompleto en el seno de un cristal

**Tamaño de grano:** El diámetro promedio de un grano o cristal.

**Fase:** La menor porción homogénea que puede identificarse en un material.

**Ferrita:** Una fase de muchos aceros constituida esencialmente por átomos de Fe en ordenamiento cúbico centrado en el cuerpo con algunos átomos de carbono en los intersticios que dejan los átomos de Fe.



**Ferrita acicular:** Una forma de ferrita que presenta al microscopio óptico un aspecto de “tejido de canasta de mimbre” es decir de gran entrecruzamiento de cristales de ferrita.

**Martensita:** Una fase presente en algunos aceros constituida esencialmente por átomos de Fe en ordenamiento tetragonal centrado en el cuerpo con átomos de carbono intersticiales.

**Transición dúctil-frágil:** Un cambio de comportamiento de dúctil a frágil que exhiben algunos materiales metálicos cuando se reduce su temperatura.

#### ■ BIBLIOGRAFÍA

- Abe N., Kitada T., Miyata S. (1980). Transactions of the JWS 11, 4: 29-34.
- Ashby, M.F. (2005) Materials selection in mechanical design. Elsevier, 3rd Ed.
- Cottrell, A. (1975) An introduction to metallurgy. Publisher: Crane, Russack, 2nd Ed.
- Evans R.W., Wilshire B. (1993) Introduction to creep. The Institute of Materials, London.
- Finn Inc. Advanced Ceramics, [www.finn-inc.com/advanced\\_ceramics.html](http://www.finn-inc.com/advanced_ceramics.html)
- Kou, S. (2002) Welding metallurgy. John Willey and Sons, NY, 2nd Ed.
- Kyocera Advanced Ceramics, [www.kyoceraadvancedceramics.com/ceramic/](http://www.kyoceraadvancedceramics.com/ceramic/)
- Lancaster, J.F. (1987) Metallurgy of Welding. London: Allen & Unwin, 4th.Ed. ISBN 0-04-669010-7.
- Martínez Vidal, C. (1996) Sabato en CNEA. CNEA-UNSAM, Buenos Aires.
- Philips, R. (2001) Crystals, Defects and Microstructures: Modeling across scales. Cambridge University Press, Cambridge.
- Pickering, F.B. (1978) Physical Metallurgy and the Design of Steels. Materials Science Series, Science Publishers, London.
- Saporiti, M.F. (2010) Estructura de aleaciones amorfas y nanoestructuradas de base aluminio. Tesis de Doctorado FIUBA, Argentina.
- Shackelford, J.F. (2004) Introduction to materials science for engineers. Editor: Prentice-Hall United States, 6th Ed.
- Svoboda, H. (2000) La teoría de dislocaciones desde la epistemología de Lakatos, Trabajo Final, Curso de Filosofía de las Ciencias Naturales, FIUBA, Argentina.
- Svoboda, H. (2004) Propiedades mecánicas y microestructura de depósitos con alambres tubulares en aceros ferríticos de alta resistencia. Tesis de Doctorado, FIUBA, Argentina.
- Van Vlack, L.H. (1989) Elements of materials science and engineering. Addison-Wesley, 6th Ed.
- Vasallo, D. (1970) Comunicación interna, Dpto. de Metalurgia, CNEA, Buenos Aires, Argentina.