



Universidad  
Carlos III de Madrid

## Discurso de investidura como Doctor Honoris Causa del Profesor Doctor Manuel Elices Calafat

### Nombrado Doctor Honoris Causa en el acto del Día de la Universidad del curso 94/95

Excelentísimo y Magnífico Señor Rector

Miembros del Claustro de Profesores

Señoras y señores:

#### LA IMPORTANCIA DE LAS COSAS INSIGNIFICANTES

Sean mis primeras palabras de agradecimiento -por el honor que hoy se me confiere y por la generosidad de esta Universidad- al Rector Magnífico, a toda la corporación académica, al Departamento de Ingeniería y al profesor y amigo Carlos Navarro Ugena por la iniciativa de la propuesta y por su amable presentación.

La Universidad Carlos III es una Universidad joven y como los jóvenes está llena de ilusión, energía y generosidad. Curiosamente, la Ciencia de los Materiales -también una rama joven de la Ciencia- ha sido el vehículo que me ha conducido a esta Universidad.

Mis primeros contactos con la Universidad Carlos III surgieron a través de los Cursos de Humanidades. Fue una experiencia enriquecedora la interacción con los alumnos de letras y el intento de compartir conocimientos entre personas con bagajes culturales distintos.

Recuerdo que el primer curso lo titulé: Arte, Arqueología y Física e iba dirigido a estudiantes de Letras y de Economía. Les hablé de la física atómica y, basándome en ella, de la microsonda y de sus aplicaciones en la medicina forense. Después de la física nuclear, de los neutrones y de cómo se pueden utilizar para detectar falsificaciones en obras de arte. También les hablé de los relojes atómicos y de las técnicas de datación en Arqueología.

La Universidad, con acierto, asoció a estos Cursos de Humanidades la Torre de Babel de Escher como símbolo de lo que sucede cada cierto tiempo: las propias realizaciones del hombre desplazan a su creador y lo descentran, de manera que obra y autor y, también, naturaleza y hombre, presente y pasado, se hacen ajenos. El humanismo se ha entendido como un esfuerzo constante para centrar al hombre en el mundo natural y en el mundo artificial de sus realizaciones.

En esta línea de pensamiento tuve un gran reto: Buscar tendencias unificadoras en campos aparentemente muy lejanos -Arqueología, Aspectos Legales, Física Nuclear o Astrofísica-. El nexo entre disciplinas tan dispares me lo proporcionó la joven Ciencia de los Materiales y, siempre, con el mismo principio: la importancia de las cosas insignificantes (o aparentemente insignificantes).

Permítanme que intente aclararlo un poco a través de dos ejemplos; en el primero comentaré las técnicas, basadas en el C14, que utilizan los arqueólogos para datar sus hallazgos y en el segundo el papel de los isótopos del plomo en la certificación de las obras de arte. Son dos ejemplos basados en la Ciencia de los Materiales y en ambos casos el protagonismo lo tienen materiales en cantidades aparentemente insignificantes; en el primer ejemplo, los átomos de C14 -que se hallan en la proporción de uno por cada millón de millones de átomos de C12- y en el segundo, los cuatro isótopos del plomo -cuyas diferencias de masa son menores que una millonésima de una billonésima de gramo-

#### Arqueología y radioactividad

Veamos cómo se ha datado con precisión el momento en que nuestros antepasados del Magdaleniense dibujaron los espléndidos bisontes de la cueva de Altamira. El procedimiento se basa en contar los poquísimos átomos de carbono 14 que hay en una muestra de materia orgánica; uno por cada billón (10<sup>12</sup>) de átomos de carbono 12.

Estos átomos de C14 son inestables y se desintegran transformándose en N14. Se llama período de semidesintegración al tiempo que se necesita para que un determinado número de átomos se reduzca a la mitad; en el C14 es de 5730 años. Esto significa que una muestra que tenga 10.000 átomos de C14, después de 5730 años sólo tendrá la mitad, es decir 5.000 átomos. Pasados otros 5730 años sólo quedarán 2.500 átomos y así sucesivamente. Si se conoce la cantidad original de C14 en una muestra puede calcularse fácilmente la edad de ésta sin más que contar

el número de átomos de C14 en este instante.

El C14 se produce incesantemente en la atmósfera superior por la interacción entre los rayos cósmicos y los átomos de nitrógeno. El C14 se combina con el oxígeno para formar dióxido de carbono radioactivo, que se difunde hacia la atmósfera inferior y entra en la biosfera principalmente a través de la respiración vegetal. El C14 pasa a través de la cadena alimentaria desde las plantas a los animales superiores, incluido el hombre.

Cuando el organismo se muere ya no puede ingerir más compuestos carbonados. En consecuencia, el C14 de su cuerpo ya no se reemplaza y su concentración comienza a disminuir debido a la desintegración radioactiva del C14. En estos casos se dice que en este momento se ha puesto en marcha el reloj de C14. Siempre que estos restos no se contaminen por compuestos modernos de C14 -por ejemplo, por bacterias- bastará medir la cantidad de C14 (o la proporción entre C14 y el resto del carbono) en la muestra para determinar cuánto tiempo hace que el organismo dejó de existir.

Las cronologías establecidas por datación de radiocarbono en muestras orgánicas han sido verificadas por comparación con las cronologías obtenidas contando los anillos de crecimiento en los árboles, técnica conocida como dendrocronología. De tronco en tronco -usando madera muy antigua- esta técnica ha podido extenderse hasta 9.000 años. Los especialistas de este método han detectado que la producción de C14 en la estratosfera no es del todo constante y que fluctúa con el tiempo en función de modulaciones de la radiación cósmica. Estas variaciones se han calibrado con mucha precisión con la ayuda de la dendrocronología y se dispone de información fiable -hasta 9.000 años- de la cantidad de C14 atmosférico correspondiente a cada año. Más allá de esta edad -a falta de muestras de madera apropiadas- las variaciones del C14 atmosférico son difíciles de determinar y, en consecuencia, se tienen dudas sobre la precisión de las edades basados en la constancia del C14 atmosférico. Pero el C14 se puede utilizar hasta edades del orden de 40.000 años, a partir de esta edad los contenidos en C14 son tan débiles que hacen las medidas extremadamente difíciles. Por tanto entre 9000 y 40.000 años el método del carbono 14 no está calibrado. Esta laguna tiene un enorme interés para datar el final del Paleolítico -el Magdaleniense, el Solutrense y el Auriñaciense- y también en la paleoclimatología de este período.

Curiosamente, la importancia de lo insignificante parece que -de nuevo- ayudará a resolver este problema. El nuevo procedimiento para datar, y que viene a substituir a la dendrocronología, se conoce como el método del desequilibrio uranio-torio. La correlación entre las fechas obtenidas por este procedimiento y el contenido atmosférico de C14 se ha hecho datando los corales de Barbados simultáneamente con C14 y con U-Th.

Este nuevo método se basa en la disminución radioactiva de dos isótopos intermedios -U234 y Th230 de períodos de semidesintegración de 240.000 y 75.000 años, respectivamente en el curso de la cadena de desintegración del U238. Al ser sus períodos mucho más largos que el C14, estos isótopos se pueden emplear para datar acontecimientos hasta 350.000 años. Los dos cronómetros -U-Th y C14- pueden, por tanto, compararse en todo el intervalo de aplicación del C14. En el caso de los corales, el cronómetro U-Th también se pone a cero en el momento de la formación del coral que integra en su esqueleto cantidades aparentemente insignificantes de uranio -aproximadamente tres partes por millón- a partir del agua de mar. Midiendo la cantidad de Th230 producida por la desintegración del U234, puede determinarse el tiempo transcurrido desde la formación.

Esta reciente información ha modificado la escala de tiempos obtenida con el C14 para tiempos superiores a los 9000 años. Por ejemplo; para edades de 20.000 años, las correcciones pueden llegar a ser de 3000 años. Estas correcciones han hecho reconsiderar el estudio de las migraciones y de las transformaciones de las primitivas comunidades humanas. Por citar un ejemplo clásico, es muy interesante tener una datación precisa de la colonización de América para conocer con qué rapidez los primeros cazadores y recolectores paleoindios se dispersaron, establecieron y desarrollaron su diversidad étnica y lingüística. La mayoría de los historiadores están de acuerdo en que los primeros habitantes de América vinieron de la parte oriental de Asia -se cree que en el intervalo de tiempo entre 25.000 y 12.000 años- cruzando el puente natural que entonces unía Siberia con Alaska. Esta tesis se ha puesto en duda porque al desenterrar esqueletos humanos, en puntos tan dispares como Canadá y Perú, se ha creído que eran de una antigüedad mayor. Las dataciones recientes, teniendo en cuenta las correcciones comentadas, indican que ningún esqueleto descubierto en América hasta la fecha posee más de 13.000 años de antigüedad.

Entre los rasgos más característicos que distinguen al hombre moderno de otros homínidos y del resto del reino animal está su capacidad de expresarse mediante dibujos. Las interesantes y magníficas pinturas descubiertas en Altamira, y en toda la región pirenaica española y francesa, representan un hito importante en la evolución cultural de la humanidad.

Hasta hace pocos años, estas pinturas se databan teniendo en cuenta los estilos pictóricos o basándose en la edad de restos arqueológicos encontrados junto a ellas, con el riesgo de equivocarse si los restos no estaban relacionados con la actividad de los pintores. Sólo recientemente, cuando las modernas técnicas han permitido analizar con fiabilidad cantidades aparentemente insignificantes -del orden de milésimas de gramo- se han podido efectuar dataciones precisas de estas obras de arte. Nótese que en este ejemplo estamos considerando cantidades insignificantes de una muestra ya de por sí insignificante.

Los pigmentos más utilizados para realizar las pinturas eran el rojo -a base de óxido de hierro- y el negro -que podía provenir del óxido de manganeso o del carbón-. Para datar el carbón usando la técnica tradicional, basada en la radioactividad del C14, hacía falta una cantidad de muestra considerable -la suficiente para estropear la obra de arte- por este motivo las dataciones, hasta hace poco, eran indirectas. Hace unos años, la Ciencia de los Materiales ha proporcionado una técnica, basada en la combinación de un espectrómetro de masas y un acelerador de partículas, que permite contar directamente los átomos de C14 y superar las limitaciones del tamaño de la muestra.

Utilizando esta técnica y las correcciones antes mencionadas para edades superiores a los 9.000 años, un equipo de científicos -españoles y franceses- han determinado la edad de varios dibujos de bisontes en distintas cuevas: los de Altamira datan de  $14000 \pm 400$  años BP, los de la cueva del Castillo, de  $12990 \pm 200$  años BP y los de Niaux, en el Pirineo francés de  $12890 \pm 160$  años BP (BP significa, before present y se toma como referencia presente- el año 1950).

Para obtener la cantidad de carbono necesaria para las medidas con esta nueva técnica se rascaron con un escarpelo cantidades entre 20 y 40 mg en cada muestra -pequeñas zonas de 3 mm x 3 mm o de 7 mm x 7 mm -. Después de purificar estas muestras la cantidad que quedaba para el análisis era, casi siempre, inferior a la milésima de gramo. Aún así, las precisiones en cada medida fueron de  $\pm 200$  años en edades de 13.000 años BP. Incidentalmente, y como curiosidad, del examen microscópico del carbón utilizado en las pinturas cántabras parece deducirse que éste provenía de coníferas, probablemente de pinos o enebros.

Estos ejemplos han mostrado que a veces es posible datar restos arqueológicos midiendo aquellas cantidades que parecen insignificantes. Las técnicas modernas basadas en la combinación de la espectrometría de masas y los aceleradores de partículas han permitido datar tesoros artísticos irremplazables, donde el débil espesor y la fragilidad de las pinturas lo hacían impensable hace unos años. Los resultados indican que los bisontes de Altamira fueran pintados por artistas del Magdaleniense que vivieron varias generaciones antes que los de las cuevas del Castillo y de Niaux, resultado interesante porque bastantes historiadores los consideraban contemporáneos, basándose en las afinidades estilísticas.

No quiero dejar este ejemplo sin citar un reciente descubrimiento que ha despertado mi curiosidad, como aficionado al submarinismo. Es la cueva de Cosquer, descubierta en 1985 por el submarinista francés Henri Cosquer y que hasta 1991 no se percató de que en su interior había estupendas pinturas rupestres. Las técnicas, anteriormente comentadas, han permitido datar con precisión uno de los hallazgos más antiguos del arte rupestre.

Esta gruta está situada cerca de Marsella y tiene su entrada a 37 metros por debajo del nivel del mar. Después de recorrer unos 150 metros se llega a un grupo de cavernas con un lago interior. En algunas paredes hay pinturas rupestres en buen estado porque han permanecido siempre por encima del nivel del mar. Hace unos 20.000 años el nivel del mar llegó a estar unos 120 m por debajo del actual y la gruta Cosquer distaba unos 10 km de la orilla del mar.

Las pinturas se han datado usando todas las técnicas mencionadas basadas en el C14 y se han hecho doce mediciones. Las pinturas se pueden agrupar en dos tipos muy distintos y la estimación de su antigüedad confirma que se hicieron en dos épocas separadas por 8500 años. El grupo más antiguo, que se pintó hace unos 27000 años, está formado por siluetas de manos con dedos mutilados. En realidad son negativos de manos mutiladas sobre fondos de color negro o rojo. El segundo grupo, pintado hace 18500 años, está formado por caballos, bóvidos y ciervos y también por animales marinos; focas, pingüinos y un pez.

\*  
\*  
\*

### **La composición isotópica, seña de identidad**

Durante el último cuarto de siglo muchos arqueólogos y responsables de museos se han familiarizado con el término isótopo. Los isótopos son átomos de un mismo elemento químico que difieren entre sí en cantidades de masa aparentemente insignificantes. Por ejemplo, el plomo tiene cuatro isótopos estables; el  $Pb204$ , el  $Pb206$ , el  $Pb207$  y el  $Pb208$ , cuyas masas son, respectivamente, 204, 206, 207 y 208 unidades de masa atómica. Es decir, difieren entre sí alrededor de 10-20 miligramos -menos de una millonésima de una billonésima de gramo- una cantidad que difícilmente podemos imaginar y, aún así, somos capaces de separarlos, medirlos y -lo que es más interesante- conseguir interpretar estas sutiles diferencias y darles un significado arqueológico o legal.

La composición isotópica de muchos elementos que se encuentran en la naturaleza es estable. O dicho en otras palabras, el porcentaje entre dos isótopos de un elemento es el mismo tanto si este elemento se extrae de Australia o de una mina Europea, y también es el mismo si este elemento está en forma de carbonato o de óxido. No obstante, se han encontrado excepciones que han resultado ser muy interesantes porque nos han permitido conocer el origen geográfico de estos elementos.

Uno de ellos es el plomo, cuya composición isotópica varía de un lugar a otro, dependiendo de la edad geológica y del origen geoquímico del yacimiento. Ya se ha mencionado que el plomo aparece en forma de cuatro isótopos estables - $Pb204$ ,  $Pb206$ ,  $Pb207$  y  $Pb208$ -. Los tres últimos son los productos finales de series radioactivas que empezaron con el uranio y el torio. Como cada yacimiento de plomo tiene una historia distinta -dependiendo de la época en que se formó y de cuál fue la composición inicial de plomo, uranio y torio- se ha encontrado una gran variación en la composición isotópica del plomo en los distintos yacimientos.

Estas diferencias en la composición isotópica del plomo permiten distinguir un yacimiento de otro -son algo así como la huella digital de cada yacimiento- y pueden tener aplicaciones muy interesantes. A continuación se comentan dos de ellas; la certificación de obras de arte y la identificación de la procedencia de materiales arqueológicos.

Para conocer las distintas proporciones entre los cuatro isótopos del plomo se utiliza un espectrómetro de masas y suele ser suficiente una muestra de unos 10  $\mu g$  -una centésima de miligramo- cantidad tan pequeña que se corre el riesgo de perderla durante la manipulación. Los resultados se registran en forma de relaciones entre los isótopos, por

ejemplo; P206/P204, p207/p204, p208/p204. Este grupo de tres números es característico de cada yacimiento. A veces, para facilitar su aplicación se forma un algoritmo con los tres y se obtiene el llamado índice de relación isotópica. Aunque es posible que por este procedimiento varios yacimientos tengan el mismo índice, no es muy probable que esto suceda y se simplifica bastante la comparación de los resultados al usar un solo número en vez de tres.

La procedencia del pigmento blanco más utilizado en la pintura -el albayalde-, nos proporciona un buen ejemplo de la aplicación del índice isotópico del plomo. El albayalde es un carbonato de plomo muy apreciado por su color blanco y capacidad de cubrición y los pintores lo han incorporado a su paleta desde hace más de mil años. Se han tomado muestras de albayalde de cuadros bien fechados y se ha representado en un diagrama la fecha de ejecución del cuadro en función del índice isotópico del plomo del albayalde. El resultado ha sido muy interesante: En el período entre los años 1600 y 1800, todos los puntos se agrupan en un estrecho intervalo del índice -entre 18.20 y 18.42- lo que indica que el albayalde utilizado por los pintores europeos durante esta época tenía la misma procedencia; seguramente de Cornwall y Derbyshire, en Inglaterra. Para pinturas más antiguas, antes de 1600, hay algunos puntos que se salen de este intervalo; aquéllos cuyo índice está entre 17.7 y 18.0 corresponden a pinturas cuyo albayalde provenía de Cerdeña y los puntos que se agrupan alrededor de 18.7 corresponden a pigmentos extraídos en una región cerca del Vesuvio. Para pinturas más recientes, a partir de 1800, los puntos abarcan un intervalo mucho mayor, como cabría esperar por el desarrollo industrial y el aumento del comercio mundial. En el siglo XIX empezaron a explotarse minas de plomo en Austria y en Alemania, a las que les corresponde un índice entre 18.04 y 18.20. También aparecen puntos con índices más bajos, correspondientes a las minas Australianas, y más altos, que corresponden a las minas de EE.UU. Toda esta información es de gran utilidad para poder caracterizar, datar, identificar o autenticar obras de arte.

La historia del arte está llena de anécdotas sobre falsificaciones de cuadros. La detección de varias falsificaciones hechas durante el siglo pasado y hasta mediados de éste se hizo basándose en que algunos pigmentos modernos--de los siglos XIX y XX- suelen tener una composición química distinta a la de los antiguos y las técnicas actuales de análisis permiten detectar con precisión y rapidez estas sutilezas.

Está claro que los antiguos falsificadores ignoraban estas diferencias y no las tuvieron en cuenta. Así se han descubierto las falsificaciones de varios manuscritos y cuadros de los siglos XV y XVI atribuidas al llamado falsificador español -un artista de finales del siglo pasado que, por cierto, no era español- al utilizar inconscientemente un verde esmeralda, a base de arseniuro de cobre, que no se introdujo en el mercado hasta 1814.

Los falsificadores actuales están mejor preparados -hay una abundante literatura sobre estos temas- y toman las debidas precauciones para no caer en las trampas. Es sabido que el famoso falsificador moderno Han van Meegeren compraba marcos y telas de la época de Vermeer, les quitaba los restos de pintura -para burlar el análisis por rayos X- y usaba resina de formaldehído en vez de aceite para conseguir que la pintura se secase antes, imitando el cuarteamiento típico de los cuadros antiguos resecos.

El albayalde les ha tendido dos trampas, difíciles de superar, a los falsificadores actuales. La primera proviene del contenido de impurezas y la segunda de la composición isotópica, ambas variables han ido cambiando a lo largo de la historia de una forma que no es fácil de reproducir.

Se tienen recetas para preparar el albayalde, a partir de galena, que datan de la época romana. Cada procedimiento introducía sus impurezas características. Así, por ejemplo, cuando a partir de 1790 se mecanizó el proceso y el producto se laminaba entre rodillos de latón, se introdujeron impurezas de zinc entre 15 y 70 ppm. Antes de esta época, impurezas por encima de 2 ppm pueden considerarse excepcionales. Cuando se empezaron a utilizar molinos mecánicos en vez de manuales, un par de décadas después, los niveles de cinc se elevaron por encima de las 200 ppm. Hacia 1840, el albayalde empezó a adulterarse con compuestos de cinc para abaratar su precio y ya en 1870 es normal encontrar el 1 % de cinc en su composición, cifra que se ha mantenido hasta nuestros días por otras razones. Lo mismo se puede contar en relación con las impurezas de cromo, cobre o plata que, también, están presentes en el albayalde y cuya evolución durante los últimos tres siglos está muy bien documentada. En consecuencia, un análisis de elementos aparentemente insignificantes en el albayalde -partes por millón- puede ser un valioso aliado para fechar un cuadro.

La segunda trampa -basada en la composición isotópica del plomo del albayalde- es mucho más sutil y difícil de falsificar porque la composición isotópica del plomo no varía durante los procesos de fabricación y es característica del yacimiento original. Durante el período que va desde 1600 hasta 1800, prácticamente todo el albayalde consumido en Europa provenía de las minas inglesas y, por lo tanto, tenía un índice isotópico muy bien definido -entre 18.20 y 18.42-. Antes y después de estas fechas también se dispone de correlaciones entre el índice isotópico y la procedencia del pigmento, como ya se ha comentado. Dos buenos ejemplos ilustran las posibilidades de esta técnica:

El lienzo de un gran cuadro de Rubens (1577-1640), titulado "la familia Gerbier", está formado por una gran tela rectangular central a la que se han añadido bandas laterales cosidas. Durante algún tiempo se tuvieron dudas sobre la autenticidad de las pinturas laterales pero el análisis isotópico del plomo del albayalde las ha disipado. Los 14 análisis, procedentes de muestras de las distintas partes del cuadro, han proporcionado el mismo índice isotópico que corresponde al "período inglés", del albayalde.

Otras veces, el uso del índice isotópico del albayalde puede dar suficiente información para rechazar o, por lo menos, proporcionar dudas razonables sobre la autenticidad de una pintura. Por ejemplo, un artista holandés del siglo XVII difícilmente podría haber utilizado un albayalde con un índice isotópico de 19 o 20. La National Gallery of Art sospechaba, desde hacía algún tiempo, de la autenticidad de dos cuadros atribuidos a Vermeer (1632-1775) y recurrió

al análisis del pigmento blanco. Para ello se sacaron muestras de 11 cuadros de Vermeer, de los que no se tenían dudas y se midió el índice isotópico en cada uno de ellos. Todos los resultados quedaron dentro del pequeño intervalo 18.30-18.40. Del primero de los cuadros dudosos se sacaron varias muestras y todas dieron valores entre 8.11 y 8.18, más propios de los siglos XIX o XX, y típicos de los artistas holandeses que utilizan pigmentos europeos. Del otro cuadro se sacaron muestras de la pintura y del material blanco utilizado para emplastecer la tela. Los análisis indicaron que el pigmento de base podría ser auténtico -dió un índice de 8.32- pero el blanco de la pintura -18.18-, nuevamente arrojó valores que estaban fuera del intervalo de Vermeer. Posiblemente, en este segundo cuadro se utilizó una tela antigua para pintar sobre ella.

Los arqueólogos también han sacado provecho de estas diferencias insignificantes que les han ayudado, por ejemplo, a reconstruir la economía de las sociedades prehistóricas. La medida del índice isotópico en el plomo ha permitido identificar la procedencia de objetos de cobre o de plata y la localización de los yacimientos. Se ha podido saber que en algunos casos los yacimientos se explotaron hace más de 5000 años, entre ellos la mina de plata de Lávrion, cerca de Atenas, que hasta hace poco se creía que era mucho más reciente. Por el mismo procedimiento se ha descubierto el emplazamiento de la fundición de cobre más antigua -por el momento- de Europa, ya que el índice isotópico del plomo contenido en varias dagas de cobre, fechadas sobre el tercer milenio A. de C., coincide muy bien con el del yacimiento y de la fundición encontrada en Kythnos, en las islas Cícladas.

El índice isotópico también ha proporcionado una valiosa información sobre las rutas comerciales de los pueblos primitivos. Es sabido que durante el período que va desde 1600 hasta 1200 años A. de C. se comerciaba con unos lingotes de cobre que tenían unas características especiales, si se pudiera conocer su procedencia se podrían aclarar algunos aspectos de las rutas seguidas por los comerciantes. Aparentemente los lingotes son muy parecidos, tanto por la forma y las dimensiones, y las diferencias en la metalurgia o en la química no son significativas y, por otra parte, se conocen diversos lugares de donde podrían ser originarios; Chipre, Cerdeña, y diversos centros del Próximo Oriente. Solamente el índice isotópico del plomo que contienen puede dar una pista sobre su origen. Los lingotes se han encontrado a lo largo de todo el Mediterráneo; en Creta, en Cerdeña, en Chipre, en numerosos pecios, cerca de la costa búlgara del Mar Negro, en el interior de Grecia y en Turquía. En todos los casos -unos 200 analizados-, con excepción de los de Creta, el índice isotópico indica que podrían provenir de Chipre. Los lingotes cretenses, más antiguos, podrían provenir del Medio Oriente, probablemente de Irán o Afganistán. Esta hipótesis es plausible porque se sabe que durante la Edad de Bronce ya había relaciones comerciales entre Asia y el Mediterráneo Oriental, por la presencia en el Egeo de lapislázuli procedente de Afganistán.

El plomo, sobre todo aquellos aspectos del plomo que parecen insignificantes, --como el contenido en una atmósfera no contaminada que es del orden de la millonésima de millonésima de gramo- no dejan de sorprendernos. Para terminar esta parte permítanme que les dé un dato reciente que pone de manifiesto que la contaminación ambiental no es un fenómeno sólo de nuestro siglo. Al analizar testigos de hielo, extraídos en Groenlandia, se ha podido estimar la composición del aire que respiraban nuestros antepasados. Las muestras correspondientes al período que va desde 500 años A. de C. hasta 300 años A. de C. registran una importante contaminación de plomo en la atmósfera. El contenido normal de plomo es de 0.5 pg por gramo de hielo -un picogramo es una billonésima de gramo- mientras que el correspondiente a este período es de 2 pg por gramo, cuatro veces superior. Se cree que es debido a las explotaciones mineras de los griegos y de los romanos, principalmente en Grecia, Inglaterra y en España. Se estima que alrededor del 5% del plomo que se extrajo fue a parar a la atmósfera. En las épocas de mayor rendimiento se llegaron a producir más de 80.000 toneladas de plomo por año. En épocas más cercanas, durante la Edad Media, se ha registrado otro incremento del contenido de plomo en la atmósfera -4 pg por gramo- debido posiblemente al desarrollo de la minería del plomo y de la plata principalmente en Alemania.

\*  
\*  
\*

## Presente y futuro

Mis actuales contactos con la Universidad Carlos III han surgido a través de la colaboración con el profesor Carlos Navarro; colaboración en las primeras etapas de su singladura en el Departamento de Ingeniería y colaboración en la docencia; hermosa dimensión -en palabras del actual Rector- de transmisión de la semilla del saber y de formación de personas, que los profesores universitarios debemos considerar inseparable de nuestra vocación investigadora.

Se ha dicho que el bienestar económico y social de un país depende de su nivel de ingeniería. En este siglo, el aspecto más característico de la ingeniería ha sido el cambio -tanto en la práctica ingenieril, como en el desarrollo de nuevos productos o en las tecnologías emergentes-. Para los próximos años todavía se esperan mayores cambios. Si queremos que nuestros ingenieros puedan salir airoso en este mundo cambiante deberemos darles una gran adaptabilidad y en esta dirección deberíamos dirigir nuestros esfuerzos docentes.

A la demanda de productos de mayor calidad y económicamente competitivos -de productos que tengan que soportar condiciones extremas o nuevas, biocompatibles, o liliputienses para la emergente nanotecnología- no se puede responder con las tecnologías actuales y tampoco se puede recurrir a procedimientos empíricos tradicionales, largos y costosos. Para transformar las ideas, de forma rápida y eficiente, en productos hace falta un sólido bagaje científico multidisciplinar. El ingeniero de los próximos años debe ser capaz de trabajar en distintas disciplinas porque muchos problemas que deberá afrontar serán, por naturaleza, interdisciplinarios y difícilmente las distintas ingenierías serán autosuficientes.

El reto que tenemos ahora es la formación de los Ingenieros de Materiales. Para ello hay que conectar áreas muy distintas; ingenierías tradicionales, ciencias físicas, ciencias químicas y, en algunas circunstancias, ciencias biológicas. De nuevo el nexo -el lugar de encuentro entre todas ellas- es la Ciencia de los Materiales y, si se quiere mantener una analogía con la primera parte de estas reflexiones -donde la importancia de lo insignificante era el nexo común- también se puede descubrir un principio común a las diversas manifestaciones de esta joven ciencia y es la importancia de las imperfecciones; estos aspectos inevitables de los materiales que para unos son ofensivos y para otros fascinantes.

Los historiadores han clasificado las primeras edades de la humanidad de acuerdo con los materiales utilizados. Así han surgido las clásicas edades de Piedra, de Bronce y del Hierro. Algunos han ido más allá y han extendido la clasificación hasta nuestros días. El siguiente período puede ser el del hormigón, los romanos ya se sirvieron de él para sus obras públicas y hoy en día es el material que más se consume -en volumen- en todo el mundo. El acero fue el siguiente material importante que hizo su aparición en escena, allá por el año 1800. Aunque la primera parte de la revolución industrial se basó en la fundición, obtenida a partir del hierro y del carbón mineral, la segunda parte de la revolución industrial, cuyo significado en términos económicos fue más importante, se basó en el acero. Después de la Edad del Acero podemos considerar que vino la Edad del Silicio. El silicio es el acero de la industria de los semiconductores y así como el acero permitió que la revolución industrial transformara el mundo desarrollado de su época, el silicio ha sido el soporte que ha permitido a la revolución de las tecnologías de la información transformar el mundo actual. Los desarrollos del acero y del silicio ilustran el hecho de que la ciencia e ingeniería de los materiales es una disciplina importante que no sólo facilita el desarrollo de nuevos productos e industrias si no que puede tener una profunda repercusión en la sociedad. La Edad del Silicio se inició alrededor de 1950 y representará, seguramente, la última edad basada en un solo material. En estos momentos estamos entrando ya en la Edad de los Nuevos Materiales porque el desarrollo de la Ciencia de los Materiales ya nos permite diseñar el material que necesitamos en vez de tener que seleccionar el material más idóneo que nos ofrezca la naturaleza.

El acero ha caracterizado una edad. Su gran ductilidad y la facilidad de aleación le han situado en una posición sin competidores. Curiosamente, su ductilidad se debe a las imperfecciones. Un acero perfecto -si existiera- probablemente sería tan poco maleable como una piedra.

La naturaleza cristalina del acero y los mecanismos que controlan su deformación se han desvelado en este siglo. Para entender su maleabilidad ha sido preciso recurrir a imperfecciones en su estructura cristalina, llamadas dislocaciones. Estas imperfecciones también han sido necesarias para entender el aumento de la resistencia del acero cuando se trabaja -es decir, se deforma- en frío. Con frecuencia el problema que deben resolver los metalúrgicos no es conseguir un acero más dúctil sino todo lo contrario; 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. Es un efecto similar al atasco de tráfico que se produce en un cruce cuando nadie respeta los semáforos; los coches que son los que deberían facilitar el desplazamiento, curiosamente son los que lo dificultan. Por este motivo hay quien dice que el "acero es fuerte debido a sus debilidades", en forma de imperfecciones que llamamos dislocaciones.

Otro tipo de imperfecciones del acero provienen del carbono. La diferencia entre el acero y el hierro está en la presencia de una pequeña cantidad de impurezas de carbono que pueden inducir imperfecciones en la red cristalina del hierro. Estas imperfecciones crean un campo tensional que dificulta el movimiento de las dislocaciones con el consiguiente endurecimiento del acero. Se tardó mucho en reconocer que el acero era una aleación de hierro y carbono. El papel fundamental del carbono en el acero y en la fundición no se descubrió hasta 1774. Hasta bien entrado el siglo XVIII, el herrero filósofo creía que el tratamiento térmico quitaba al hierro algún principio nocivo, lo purificaba -no en vano el fuego purifica casi todas las cosas-. 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. Ahora sabemos que el papel del flogisto lo hace el carbono y que el esoterismo que rodeaba al temple del acero no es más que la introducción de imperfecciones para contrarrestar otras imperfecciones.

Para entender y controlar la deformación del acero, necesitamos las imperfecciones. 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 Luristán. 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. 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 tenía en cautividad más de mil herreros procedentes de Damasco.

La Edad del Silicio también está indisolublemente ligada a las imperfecciones. La tecnología de la microelectrónica se basa en una deliberada y meticulosa introducción controlada de imperfecciones en cristales casi perfectos y se ha centrado en dos tipos de imperfecciones que están presentes en casi todos los dispositivos electrónicos; las impurezas y las heterouniones.

Determinadas impurezas e imperfecciones pueden afectar drásticamente las propiedades eléctricas del silicio. Si, por ejemplo, se añade boro en la proporción de 1 átomo de boro por cada 100.000 átomos de silicio, la conductividad eléctrica a temperatura ambiente aumenta mil veces. El silicio ultrapuro que se utiliza en la industria de semiconductores tiene el nivel de impurezas por debajo de 4 ppb -es decir, menos de cuatro por cada mil millones de átomos de silicio-. A la posterior adición deliberada de impurezas se la llama dopaje y en los dispositivos de silicio el dopaje debe mantenerse dentro de límites muy precisos.

En la actualidad es posible depositar, con precisión, sobre un cristal capas de átomos extraordinariamente delgadas. Por ejemplo, se puede crecer una capa cuyo espesor sea de cinco planos atómicos, no cuatro ni seis. También se sabe crecer una capa de un material distinto sobre un sustrato de silicio. En estos casos, la intercara -o heterounión- entre los dos materiales se puede considerar una imperfección bidimensional, ya que hay un cambio en la estructura al pasar de una a otra.

En 1951 W. Shockley, en la patente del transistor, ya utilizó las heterouniones entre semiconductores y, actualmente, estas imperfecciones son los componentes básicos no sólo de los componentes electrónicos que mejoran nuestra calidad de vida si no de pozos y otros artilugios cuánticos. Las heterouniones entre semiconductores se usan en tres configuraciones básicas; la heterounión simple, el pozo cuántico simple (formado por dos heterouniones) y el pozo cuántico múltiple o super-red, (que es un sandwich múltiple donde se alternan periódicamente pozos y barreras de potencial). Con estas heterouniones cuánticas se pueden modificar las propiedades electrónicas de los materiales y se pueden diseñar y fabricar nuevos materiales semiconductores.

La introducción de estas imperfecciones ha dado lugar a una nueva generación de materiales, conocidos como materiales estructurados artificialmente y a la técnica utilizada para su diseño se le llama ingeniería de estructuras electrónicas.

Estamos en los albores de una nueva Edad, que algunos ya la llaman la Edad de los Nuevos Materiales. No hay duda de que los materiales avanzados son ya un componente esencial en la industria aeroespacial, en la electrónica y en la del automóvil y que la velocidad de crecimiento de sectores clave en la economía está limitada por el progreso conseguido en la Ciencia de los Materiales. En estos momentos se está produciendo una inversión en las relaciones entre el hombre y los materiales que tendrá profundas repercusiones económicas, y que bien podría marcar el inicio de esta Era. Históricamente, la humanidad se ha adaptado a los materiales que la Naturaleza le ofrecía -ha seleccionado, en cada caso, el material más apto para sus necesidades-. Los avances conseguidos en la Ciencia e Ingeniería de los Materiales están haciendo posible que frente a una necesidad concreta se diseñe -no se seleccione- el material más idóneo. Así, materiales nuevos permitirán que se desarrollen nuevas tecnologías, que darán lugar a nuevas industrias y a un aumento del empleo y del bienestar nacional. Los nuevos materiales no existen en la Naturaleza, estarán hechos por el hombre. Su diseño se basará en un conocimiento multidisciplinar de la física, de la química y de otras ramas del saber. Las posibilidades de diseño son enormes y los nuevos materiales serán esenciales para el crecimiento económico.

\*  
\*  
\*

Mis contactos con la Universidad Carlos III siempre han estado asociados a aventuras en el campo de la Ciencia de los Materiales y por ello le estoy doblemente agradecido; por el honor que hoy me confiere y por haberme dejado trabajar en lo que me gusta.

Para seguir respondiendo a los desafíos del futuro hará falta un gran esfuerzo de cooperación entre muchas disciplinas -como ya lo está haciendo esta Universidad-. Los resultados, tanto en el servicio de las necesidades del país como en la educación de la gente joven -para que sus vidas sean útiles y tengan significado- ciertamente justifica este esfuerzo