

LOS NUEVOS MATERIALES Y EL AMBIENTE

Asdrúbal Valencia Giraldo

Grupo de Corrosión y Protección
Universidad de Antioquia

I am confident that advanced materials will bring significant change to human society. Whether this is for good or bad is for the future generations to discover»¹.

INTRODUCCION

Una de las tensiones mayores que existen en la actualidad es la establecida entre los imperativos del desarrollo tecnológico y la necesidad de no contaminar más el mundo. En este amplio marco se inscriben las consideraciones que se hacen aquí, enfocadas desde una disciplina particular como es la ciencia de los materiales, puesto que hay implícitas en ella dos actividades que a veces parecen contrapuestas: la producción de los materiales y la preservación del ambiente. Se observa que prácticamente todos los procesos de obtención de materiales producen contaminación del ambiente y que evitarla implica costos muy importantes para los productos en una economía de mercado abierto; por esta razón es pertinente hacer algunas reflexiones sobre la interrelación entre estas dos importantes tareas tecnológicas. Es común que al hablar del impacto del ambiente, tal discusión sólo se refiera al impacto sobre los seres vivos y aunque esto es lo primordial, no debería olvidarse que la materia «inanimada» que nos rodea sufre, y provoca, efectos del entorno de un modo que es tan determinante en nuestra vida como el que experimentamos los organismos biológicos².

La clave del problema general, y del particular que se aborda, radica en que el hombre primero fabrica y luego considera las consecuencias. El *homo faber* tiende a guiar a los *homo sapiens*. Hay ejemplos muy dolorosos de ello y todos tenemos que vivir con las consecuencias no previstas del avance

tecnológico, que aunque pueden enriquecer nuestras vidas también las amenazan³.

El hombre ha sido lento para reconocer la toxicidad de los materiales, y al reconocerla, ha sido igualmente lento para adoptar métodos seguros en su uso o para eliminar tal utilización. Esto es cierto en lo relativo a los materiales tradicionales, pero lo es más aún en el caso de los nuevos materiales. Antes de entrar a considerar la relación que existe entre el ambiente y aquellos es necesario definir los diferentes términos, es decir precisar qué es material, nuevo material, ambiente y qué interacciones se dan entre éste y aquellos, sean los tradicionales o los llamados nuevos materiales.

LOS MATERIALES

Con todo rigor, la definición de material lleva al terreno de la filosofía y al concepto fundamental de materia, mas, para los efectos de este trabajo, un material es la porción de materia a la que se le da un uso particular para desarrollar una actividad específica. Así **materia + uso = material**⁴. A su vez un material tecnológico o material de ingeniería es cualquier elemento, sustancia o compuesto, natural o no, que posea un potencial de uso práctico para el hombre; por ello la existencia y el comportamiento social del hombre en toda su historia han estado ligados a la manipulación de los materiales, los cuales inicialmente se tenían como algo natural y su diversidad y adaptabilidad

nunca se consideraron conscientemente, pero el entendimiento de la estructura y la composición de la materia permitió la creación de materiales con propiedades definidas; por eso han experimentado un crecimiento sin precedentes en las últimas décadas y la ingeniería de los materiales se ha convertido en una parte esencial en la tecnología moderna.

Los materiales tecnológicos pueden ser funcionales o estructurales. Los primeros son los que, por sus propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas, biológicas o químicas, pueden cumplir exitosamente las más variadas funciones en distintos campos del quehacer humano, constituyéndose en soporte de las tecnologías más avanzadas. Los materiales estructurales, en cambio, poseen propiedades mecánicas y térmicas especiales, que permiten que sean utilizados en la construcción de equipos y maquinaria, inclusive de edificios, lográndose con ellos nuevas tecnologías.

Es conveniente separar a los materiales tecnológicos, por sus características físicas o químicas, en tres grupos: los metales, los cerámicos y los orgánicos. También se usan, y cada día son más importantes, las combinaciones de estos materiales: los compuestos e híbridos. Desde el mismo punto de vista ingenieril los cerámicos se dividen en cristalinos y vítreos y los orgánicos o polímeros en plásticos y elastómeros⁵.

LOS NUEVOS MATERIALES

Hasta hace unos veinte años el objetivo de científicos y técnicos era el de comprender los materiales existentes en el mundo, pero en la actualidad la situación ha dado la vuelta y se están sintetizando más materiales que no se dan en la naturaleza. Debido al avance de la ciencia y la tecnología de los materiales surgieron los denominados «nuevos materiales» o «materiales avanzados» que se pueden definir como sustancias o combinación de éstas, conocidas o desarrolladas a partir de la incorporación de los principios de la ciencia de los materiales - conocidos o inducidos -

en la preparación, fabricación y utilización en aplicaciones antiguas o nuevas y que presentan siempre nuevos criterios en sus concepciones.

Los nuevos materiales se han desarrollado vertiginosamente durante los últimos años gracias a una mayor comprensión teórica y a las nuevas posibilidades para determinar las propiedades, por ello se pueden diseñar racionalmente, con características específicas e interesantes, de modo que ya no están limitados por el descubrimiento accidental o por las restricciones de los métodos sintéticos.

Al hablar de los nuevos materiales es necesario mencionar: cerámicas, metales, polímeros y compuestos.

Las nuevas cerámicas

El término «nueva cerámica» ha sido definido por la American Society for Testing and Materials como:

«Un objeto cerámico de alta ingeniería y gran desempeño, inorgánico, predominantemente no metálico, con elevado valor agregado y con atributos funcionales únicos o superiores».

A esta definición debe añadirse otro nivel de detalle que describa con especificidad rigurosa los atributos únicos o superiores. Por esta razón los productos cerámicos generalmente se dividen en líneas de funciones primarias: mecánicas, térmicas, eléctricas, ópticas, químicas y bioquímicas. En este nivel los productos difieren en identificación, procesamiento, aplicación, ensayo y normas.

Las múltiples aplicaciones de las nuevas cerámicas se deben a algunas propiedades realmente únicas como: la estabilidad a temperaturas elevadas, alta dureza y resistencia mecánica, buena resistencia al desgaste, baja densidad, semi- conductividad, superconductividad a temperaturas más altas, alta resistividad, bajas constantes dieléctricas, para sólo nombrar algunas.

Las aplicaciones de las nuevas cerámicas se pueden agrupar en: actuales, a mediano plazo (año 2000) y a largo plazo. En el primer caso se incluyen partes que soportan desgaste (sellos, rodamientos, válvulas, boquillas), herramientas de corte, ruedas de esmeril, partes resistentes a la corrosión y componentes de motor. A corto plazo se tienen las aplicaciones ya mencionadas, además de los biocerámicos y los aparatos electroquímicos.

Las aplicaciones a largo plazo incluirán: partes estacionarias y rotatorias de las turbinas, tanques de motores y partes de sistemas de generación de potencia.

Es evidente lo que significan las nuevas cerámicas y sus potencialidades como materiales de ingeniería: el motor cerámico ya está a punto, por ejemplo.

Los nuevos metales

Los nuevos metales están, tanto o más que las nuevas cerámicas, asociados con nuevos fenómenos y nuevos procesos.

Los fenómenos pueden no ser recientes, pero de alguna manera han despertado un nuevo interés, como es el caso de la memoria de forma y de la superplasticidad. La primera permite que un metal sea conformado a una temperatura dada para obtener una determinada forma, la cual puede cambiarse a otra temperatura y si el metal vuelve a la primera temperatura recupera su forma inicial. La memoria de forma depende de una cierta transformación cristalográfica del material.

La superplasticidad consiste en que ciertos metales son susceptibles de experimentar deformaciones de su longitud inicial del orden del mil por ciento sin romperse. Debido a su notable capacidad para deformarse, los materiales superplásticos se pueden forjar en formas complejas, eliminando muchas etapas de mecanización y acabado.

Entre los procesos nuevos, o renovados, están la metalurgia de polvos, el prensado isostático en

caliente, la epitaxia de haces moleculares, la solidificación direccional y la solidificación rápida. Todos estos métodos de fabricación proporcionan materiales con propiedades únicas.

La metalurgia de polvos consiste en prensar, en un molde y a temperatura elevada, polvos de un metal o aleación para compactarlos y lograr un material homogéneo y de propiedades diferentes a las del metal solidificado convencionalmente.

La compactación isostática en caliente no sólo sirve para moldear polvos en una determinada forma, como en la metalurgia de polvos, sino que también se aplica para subsanar defectos en piezas premoldeadas y construir componentes a partir de secciones de distintas aleaciones. Este proceso consiste en aplicar una presión uniforme en todas las direcciones a una temperatura alta.

La epitaxia de haces moleculares (conocida por sus siglas en inglés MBE), es una técnica mediante la cual láminas extremadamente delgadas de diferentes semiconductores se depositan como pintando con pistola. En este caso, se dirigen chorros de átomos o moléculas desde crisoles calientes, hacia un sustrato colocado al vacío. El resultado es epitaxia: un crecimiento orientado por capas sucesivas, es decir una modulación química y estructural.

La solidificación direccional consiste en lograr que el sólido formado crezca en una determinada dirección; esto permite, por ejemplo, fabricar piezas constituidas por un solo grano.

La solidificación rápida de metales, para lo cual existen varias técnicas, permite obtener aleaciones no cristalinas o sea verdaderos vidrios metálicos que exhiben propiedades sorprendentes.

Mediante los fenómenos y procesos mencionados - y otros que se investigan - se logran los llamados nuevos metales. Son sorprendentes los llamados intermetales, mezclas que van más allá de la fusión química ya que entrelazan los diversos átomos en

la misma superficie y soportan más calor que ninguna otra aleación, pero en este grupo hay muchos otros materiales nuevos.

Los nuevos polímeros

Las metas de desarrollo de los polímeros son innovaciones con el fin de mejorarlos o idear nuevas posibilidades y crear nuevas estructuras moleculares para así lograr propiedades prefijadas sean térmicas, mecánicas o químicas. Se crean así copolímeros, polímeros y aleaciones de polímeros con propiedades superiores de capacidad estructural. También son posibles los polímeros funcionales, sobre todo, dotados de propiedades definidas ópticas, magnéticas, eléctricas y electrónicas.

Entre los polímeros nuevos se puede hablar de los de alta temperatura (hasta 320°C), los durimidos que son muchos más resistentes a la tensión, los supertermoplásticos de fácil fusión y conformación, los polímeros compuestos, los copolímeros reordenados, los de conducción reversible, conductores de luz y señales ópticas y comunicaciones, fotopolímeros, polímeros conductores eléctricos, superconductores, polímeros con memoria de forma y polímeros-cerámicas.

Los plásticos degradables son materiales que se investigan con empeño porque en ciertas circunstancias es deseable su degradación.

Los nuevos materiales compuestos

Los compuestos son quizás en los que más se trabaja, debido a las extraordinarias propiedades que se logran combinando materiales. En este campo se avanza, sobre todo en materiales de matriz metálica ligera (aluminio, magnesio y titanio); compuestos de matriz cerámica (alúmina, nitruro de silicio, carburo de silicio) con refuerzos de fibra metálica; compuestos de matriz orgánica reforzados con fibra de carbono, fibra cerámica o fibra de aramida

Hay toda una cantidad de materiales compuestos sorprendentes, difíciles de enumerar siquiera aquí

EL AMBIENTE

De acuerdo con el diccionario «ambiente \ es el agregado de cosas, condiciones o influencias que rodean un sujeto», pero los límites no están muy bien establecidos. Se han definido distintos ambientes; en geología por ejemplo, se establece que «un microambiente de meteorización es de muy pequeñas dimensiones; puede ser una película delgada o la intercara de reacción de un sistema, como la superficie de meteorización de un cristal de feldespato o la atmósfera iónica alrededor de una raicilla que penetra en la roca o en los granos del suelo»². Así el microambiente define las condiciones límites en la superficie y aun dentro de los poros de un material y está determinado por la interacción de la materia con el microclima.

En la naturaleza todos los organismos vivos están adaptados para vivir bajo las condiciones impuestas por el microambiente, y pequeños cambios en él pueden inhibirlos o matarlos. También los materiales se deterioran debido a un gran número de procesos físicos, químicos y biológicos propiciados por ciertas combinaciones de factores microambientales. Así como los organismos perecen en un ambiente hostil, de la misma manera los materiales se acaban, a menos que el hombre aprenda a seleccionar los materiales adecuados para cada situación. Sin embargo hay una diferencia fundamental: mientras algunos seres vivos llegan, con el tiempo, a adaptarse a los ambientes contaminados, los materiales por el contrario, se degradan incluso en ambientes que son benignos para los seres vivos, y es más, como se verá posteriormente, estos seres son muchas veces la causa de su deterioro.

Entre los muchos tipos de ambientes donde se presenta interacción con los materiales, se considerarán aquí sobre todo aquellos que, presentándose naturalmente, son susceptibles de

cambios debido a la contaminación de origen antropogénico, vale decir el aire, el agua y el suelo.

LA INTERACCION

La interacción de un material con su entorno es de dos vías, ya sea afectando el ambiente o recibiendo su efecto, esto a su vez se puede dar de distintas maneras: interacción mecánica (desgaste, deformación o fractura), interacción química, interacción biológica e interacción electroquímica. Seguidamente se considerarán esas interacciones en los tres ambientes ya mencionados, haciendo énfasis en la corrosión, tal vez la más peligrosa debido a su ubicuidad^{6,7}.

Corrosión es el deterioro indeseado de un material por interacción química o electroquímica con su ambiente. Así que en un proceso corrosivo hay tres elementos: el material, el ambiente y la interacción.

Interacción Física

La interacción física de un material con el medio en que está se refiere a efectos de las fuerzas y de las radiaciones. Las acciones de las fuerzas se relacionan con las cargas, estáticas o dinámicas, que se imponen a estructuras y equipos. En este contexto son importantes porque esas acciones se ven incrementadas por los contaminantes, dando origen a fenómenos como la corrosión bajo tensión, la corrosión fatiga y la fisuración por hidrógeno. También esas fuerzas (tensiones y presiones) originan procesos como el desgaste abrasivo, la corrosión por erosión y la corrosión por cavitación.

De otro lado las condiciones térmicas que rodean a los materiales los afectan de muchas maneras: pueden cambiar su estructura interna, pueden disminuir las tensiones o inducir las y aumentarlas hasta provocar la falla.

La radiación, en todas sus formas, también afecta a los materiales y esto puede ir desde la acción de la luz ultravioleta sobre los polímeros, hasta el daño

provocado por la radiación electromagnética (microondas, infrarroja, rayos X y rayos gamma) y la radiación fotónica (protones, rayos beta, rayos alfa y neutrones). Las principales en el caso de la energía nuclear son los rayos gamma y la radiación protónica y es redundante insistir sobre los impresionantes efectos que pueden tener sobre la materia.

Interacción química

La interacción química de los materiales con su ambiente puede ser directa o indirecta. En el primer caso los átomos del material reaccionan con las especies químicas constitutivas del medio, sean naturales o contaminantes, de una manera a veces irreversible. Ejemplo clásico de esto es la oxidación de un metal cuando se combina con un átomo o grupo de moléculas y pierde electrones.

La interacción química indirecta ocurre cuando los materiales absorben o adsorben especies químicas que en sí no producen daño, pero que al reaccionar con ellas generan sustancias corrosivas.

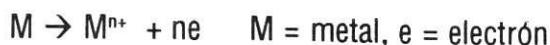
Interacción electroquímica

Se sabe desde hace tiempo que la corrosión de los materiales en medios acuosos es debida a un mecanismo electroquímico, es decir que las reacciones químicas están acompañadas de flujo eléctrico entre el ánodo y el cátodo, ya sea como electrones a través del metal o como iones a través de la solución o electrolito. Por ejemplo, sobre una pieza de metal que se corroe existen áreas anódicas y catódicas. Aunque estas áreas pueden estar separadas permanentemente, muy a menudo la totalidad de la superficie metálica está integrada por áreas anódicas y catódicas en continuo cambio de emplazamiento. En los lugares anódicos se produce un proceso de oxidación, pérdida de electrones, y el metal se disuelve. ¿Pero el metal reacciona con su ambiente? Y si es así, ¿cuál es la naturaleza del producto de corrosión? Un alambre de cobre colocado en agua destilada simplemente no reacciona; por lo tanto, no hay problema. Un

alambre de aluminio reacciona, pero el producto de corrosión, el óxido de aluminio, es tan adherente que ya no ocurrirá más reacción, se dice que el metal se pasiva; este fenómeno de la pasivación es lo que da resistencia anticorrosiva a muchas aleaciones. Un alambre de hierro reacciona más lentamente que un alambre de aluminio al principio, pero la reacción continúa porque el producto, la herrumbre, no es protector. Por consiguiente, en cada caso se debe estudiar la reacción que ocurre y los tipos de productos generados.

Ya sea una reacción rápida, como la corrosión del cinc en ácido clorhídrico, o una lenta como la herrumbre que se forma en la carrocería de un automóvil, los tipos básicos de reacciones son los mismos.

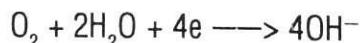
Hay una reacción anódica, punto en el cual el metal se disuelve como ión y pierde electrones, se corroe:



Los electrones fluyen por el metal hasta alcanzar el punto donde pueden ser usados (reacción catódica). Cuando el cinc se corroe en un ácido, los electrones se combinan con los iones de hidrógeno en la superficie, formando hidrógeno atómico. La mayoría de él se combina para dar burbujas de hidrógeno molecular, pero parte se puede disolver en el metal, originando el ataque por hidrógeno.



En el caso del hierro en el agua, se tendrá una reacción donde el oxígeno del agua usa los electrones del ánodo para formar iones hidróxido:



Es decir, que el hierro no se corroerá en el agua pura a menos que haya oxígeno disuelto. De la misma manera, son necesarias diversas reacciones catódicas, que permitan la reacción anódica en distintos medios.

Estas celdas de corrosión, o sea donde hay ánodos y cátodos, no sólo se presentan porque dichas zonas estén presentes en el material por efectos galvánicos (y de hecho hay muchas maneras de que se generen en esta forma), sino que también éstas pueden ser originadas por el mismo ambiente.

La corrosión electroquímica se puede clasificar según la apariencia de los productos de corrosión o de acuerdo con el medio en que ocurre. Pero todas estas especificidades están fuera del alcance de esta corta introducción.

Interacción biológica

La química de la vida puede reducirse a dos procesos esenciales: (1) el uso de la energía solar para generar reacciones que producen oxígeno y compuestos a partir de dióxido de carbono y agua y (2) la oxidación de los productos obtenidos en (1) para dar dióxido de carbono, agua y energía. Así que los organismos vivos producen su propia entropía a costa de la del sistema circundante, la cual debe aumentar.

Entre los seres vivos y los materiales pueden establecerse diferentes interacciones; sin entrar a considerar el deterioro que causan el hombre y los grandes animales, hay otros organismos cuya acción es más específica. Entre ellas está la corrosión microbiológica.

Los organismos microbiológicos o microbios de interés acá, se clasifican en cuatro grupos: bacterias, hongos, algas y fermentos. Estos microbios pueden promover acciones de deterioro como: producir ácidos (sulfúrico, fórmico, acético); destruir cubiertas protectoras; crear celdas de concentración o de aireación; producir H_2S ; concentrar aniones o cationes; oxidar iones metálicos; despolarizar sitios catódicos por consumo de hidrógeno; incrustar los equipos - torres de enfriamiento, líneas de agua, intercambiadores, etc.

Con relación a su acción deteriorante, estos microorganismos se pueden dividir en seis grupos:

formadores de ácidos, promotores de moho, formadores de lodos, sulfatorreductores, comedores de hidrocarburos y concentradores u oxidantes de los iones metálicos.

En los años 1950-60 los microbios provocaron la perforación de los tanques de combustible de aviones, hechos en aluminio.

En la industria metalmecánica contaminan emulsiones, lubricantes y refrigerantes usados en maquinado, trefilación, laminación y operaciones de embutición profunda. En petroquímica y otras industrias su acción corrosiva es frecuente.

En las aguas, naturales o contaminadas, así como en los suelos, la acción de estos organismos es bastante agresiva. Hay tres tipos de bacterias aeróbicas y anaeróbicas que tienen un fuerte influjo en la corrosión. Las bacterias *Thiobacillus* de la familia pseudomona, oxidan el azufre o sus derivados a sulfatos, con la producción simultánea de ácido sulfúrico, lo que requiere oxígeno (aeróbicas). La *Thiobacillus thiooxidans* y la *Thiobacillus acidophilus* oxidan el azufre, en tanto que la *Thiobacillus ferrooxidans* oxida el sulfuro de hierro. En condiciones anaeróbicas las bacterias sulfatorreductoras, como la *Desulfovibrio desulfuricans*, oxidan el hierro al transformar el ácido sulfúrico en sulfuro de hierro e hidróxido de hierro.

Punto aparte merece la presencia de estos organismos en el agua marina. En el mar hay zonas fuertemente contaminadas por eutroficación con valores elevados de nutrientes y pigmentos clorofílicos. Los nutrientes son los fosfatos inorgánicos, los nitratos, los nitritos y los silicatos. Cuando se sumerge un cuerpo cualquiera en el mar no tarda en cubrirse de lo que se llama velo *biológico*, formado por bacterias envueltas en mucus, diatomeas, algas unicelulares y protozoos, que retiene partículas minerales y orgánicas en suspensión en el agua. Su formación facilita la posterior fijación de organismos vegetales y animales, que constituyen las **incrustaciones biológicas**.

Hay una extensa variedad de animales y plantas, así como de colonias de microorganismos —en la actualidad se conocen unos 5.000— que se depositan sobre los materiales sumergidos en el agua de mar. Las incrustaciones biológicas constituyen un problema que provoca el incremento de la resistencia al desplazamiento de las embarcaciones y por tanto la reducción de velocidad y el aumento en el consumo de combustible y de los gastos relacionados con la aplicación de medidas preventivas. Desde el tiempo de los fenicios se conocen acciones de este tipo.

IMPACTOS ESPECIFICOS

Aunque todos tenemos idea del efecto que los materiales y su procesamiento tienen sobre el ambiente, es conveniente recordar algunos casos clásicos. El agua potable es un ambiente corrosivo para los materiales de los recipientes que la contienen y las tuberías que la conducen. Entre la clase pudiente de la antigua Roma se usaron tuberías de plomo para conducir el agua. Este metal se disuelve en ella y su ingestión produce enfermedades como el saturnismo e incluso desarreglos mentales debidos a lesiones neurológicas. En esto radicaría la clave del comportamiento de emperadores como Heliogábalo, Calígula o Nerón y en última instancia la corrosión del plomo sería la causa de la caída del Imperio Romano. Por esta misma razón los compuestos de plomo ya no se utilizan en las pinturas.

Asimismo la corrosión marina, ya mencionada, además de una estricta selección de materiales, se ha combatido de diferentes maneras; desde la antigüedad se usaba el sebo y el alquitrán para evitar las incrustaciones en los cascos de madera, así como mezclas de ceras, azufre y aceite.

Las planchas metálicas (de plomo) se empezaron a usar en España hacia 1500 y en 1625 se habla ya de láminas de cobre, las cuales popularizó Inglaterra en el S. XVIII. Se observaba que el cobre no se incrustaba, excepto en las cercanías de los

remaches de hierro, los cuales también se corroían. La extensión del uso de planchas de acero limitó la aplicación del uso de cobre por su efecto galvánico, de ahí la necesidad de pinturas antiincrustantes, que inicialmente fueron compuestos de Cu, As, Sn y Pb, es decir de metales que actuaban sobre los organismos incrustadores.

En la actualidad como sistema protector se usa una base de pinturas anticorrosivas —que pueden ser clorocaucho, brea-epoxi o bituminosas— y pinturas antiincrustantes, las cuales son de varios tipos: convencionales, en las que el aglutinante y el tóxico se disuelven simultáneamente; de contacto continuo, donde la resina es soluble y el tóxico se difunde sin que cambie la estructura de la película y autopulimentables, en las cuales el aglutinante está constituido por polímeros y copolímeros biocidas, que al hidrolizarse ceden los compuestos organometálicos de estaño y otros que han reemplazado al Cu_2O y $SCNCu$, compuestos estos descartados por su acción deletérea indiscriminada sobre los organismos marinos.

La historia señala la utilización de compuestos de cobre, cromo y plomo como aditivos en una variedad de alimentos en el siglo XVII. Aunque su toxicidad se conocía y estaba documentada, tales prácticas siguieron hasta bien entrado el siglo XIX antes de que la regulación o la conciencia se hicieran universales. En este caso no se ha terminado de evaluar el efecto del uso de tuberías de cobre para la conducción de agua doméstica.

Las enfermedades asociadas con las actividades mineras son famosas; baste mencionar la antracosis y la silicosis. En nuestro medio la contaminación de las corrientes de agua provocada por el mercurio y el cianuro de las explotaciones auríferas es de unas dimensiones apocalípticas.

También en nuestro medio puede hablarse del problema cancerígeno del asbesto. Antes de someterse a la actual reglamentación de su gobierno, numerosas empresas estadinenses trasladaron sus arriesgadas y obsoletas tecnologías,

tales como las del asbesto, a las naciones del tercer mundo y desde un principio se anticipó que la mitad de los obreros morirían de cáncer.

Pero no solamente los sólidos cancerígenos son indeseables en la atmósfera. Los sólidos del aire pueden ser polvo visible o invisible. Por ejemplo, en un proceso de manufactura se generan entre 7'000.000 y 300'000.000 de partículas por metro cúbico. El 97% de las partículas del aire no son visibles, pero pueden ser dañinas para el producto o el proceso. Eliminando el polvo visible sólo se elimina el 3%. Como el ojo discierne hasta 25 micrones, las partículas en mención son del orden 0.5 micrones y pueden ser peligrosas en muchos procesos especiales (un ejemplo es el telescopio Hubble)^{8,9}.

El riesgo de los desechos deletéreos, dispersados legalmente entre naciones del tercer mundo, pagadas para ser vertederos, ha sido experimentado incluso en nuestro país, como se recuerda de un reciente episodio.

La revolución de los plásticos ha traído consigo la contaminación severa del ambiente pues en general se degradan muy lentamente y son poco reciclables. Todos conocemos su efecto sobre el paisaje y de ahí la necesidad de plásticos degradables. Por ejemplo, cuando los envases de plástico vacíos o los juguetes desechados forman parte de la basura tirada en el campo, la acción de diversos mecanismos (entre ellos, el ataque por los microorganismos del suelo) tiende a descomponer el polímero en compuestos que enriquecen el suelo y la biodegradabilidad podría acelerar este proceso. En otros campos son de interés los plásticos biodegradables y es fácil entender por qué hay tanto interés en sintetizar polímeros biodegradables, que pueden desarrollarse después de que se conoce la naturaleza biorresistente de estos materiales.

Existen biopolímeros que se degradan con rapidez, pero no se pueden usar porque no se pueden fabricar fácilmente pues se descomponen al calentarse antes de fundirse. La modificación de

los polímeros naturales, como la celulosa que es un ejemplo típico, para que disminuya el punto de fusión, hace que se tornen biodegradables. Por consiguiente sigue existiendo la tarea de sintetizar polímeros que se biodegraden con rapidez y que se puedan fabricar fácilmente.

La contaminación del aire proviene de los polvos químicos, gases químicos y cualquier reacción que los produce en el aire. La categoría de los gases incluye clorofluorocarbonos, que contribuyen a la producción fotoquímica del smog y tienen fama de disminuir la capa de ozono. La contaminación del agua y el suelo ocurre por miles de materiales orgánicos e inorgánicos. El tema básico principal es la toxicidad de estos materiales sobre los humanos primariamente y sobre la fauna y la flora secundariamente.

Estas contaminaciones tienen efecto también, como ya se mencionó, sobre los materiales, y una de las maneras para preservarlos es mediante el uso de pinturas. Sin embargo la elaboración y uso de esas pinturas es también causa de contaminación. Podrían mencionarse algunos factores.

Las pinturas líquidas convencionales llevan solventes con cierto contenido de compuestos orgánicos volátiles (COV) los cuales se evaporan a medida que la pintura seca. Pues bien, estos compuestos orgánicos volátiles son precursores del smog en la atmósfera inferior y las regulaciones actuales tienden a limitar el contenido de COVs en las pinturas. Otro problema son los solventes, que se consideran contaminantes peligrosos del aire (CPA). Entre ellos hay muchas sustancias usuales actualmente en las pinturas como el acrilonitrilo, la anilina, el benceno, el formaldehído, el metanol, el naftaleno, el fenol, el estireno, el tolueno y otras mucho más complejas¹⁰.

Por las razones anteriores la industria de las pinturas está cambiando hacia nuevas tecnologías que eliminen los VOCs y CPAs, como se indicará posteriormente^{11,12}.

Basados principalmente en los efectos tóxicos y mutagénicos sobre las plantas y los animales de laboratorio y, en algunos casos, sobre el hombre se han producido listas de materiales peligrosos, así como fluidos que intervienen en su obtención y uso, que se pueden encontrar en el aire, el agua o el suelo. Entre ellos merecen destacarse en primer lugar los metales pesados - incluyendo el arsénico - los cuales debido a su afinidad con el azufre se unen a él y alteran su funcionamiento en los organismos vivos, en especial modificando las proteínas. En este grupo están plomo, mercurio, cobre, hierro, cinc, níquel, plata, manganeso, cadmio, molibdeno, estaño, antimonio y bario. La mayoría son tóxicos en pequeñas cantidades, pero ello varía de unos a otros y también con la forma química. Son tóxicos además el cromo y el bismuto.

Aparte del arsénico, entre los no metales más tóxicos deben mencionarse el talio, el fósforo, el selenio, los compuestos fluorados y el cianuro. El asbesto, como ya se anotó, produce enfermedades del pulmón, cáncer bronquial y tiene poder cancerígeno general. De la extensa lista de fluidos tóxicos se pueden indicar algunos gases más o menos comunes como: monóxido de carbono, fosgeno, anhídrido sulfuroso, hidrógeno sulfurado, cloro, vapores nitrosos, yperita y ozono. Entre los miles de tóxicos volátiles, además de los indicados para las pinturas, pueden señalarse el cianógeno, los cianuros, el metanol, el formol, el etilenglicol, algunos hidrocarburos, tetracloruro de carbono, anilina, sulfuro de carbono y tricloroetileno, entre otros^{13,14}.

LOS NUEVOS MATERIALES Y EL AMBIENTE

Los principales requerimientos para los nuevos materiales son económicos, de seguridad y ambientales. Estos últimos tienen un papel cada día más importante en la aceptación de los nuevos productos por el público. Los esfuerzos en el aspecto ambiental se dirigen más hacia el remplazo o mejoramiento de los materiales y procesos contaminantes o nocivos y al mismo tiempo a la minimización de cualquier posible aumento en el

costo debido a las tecnologías de remplazo. Además, el incremento en el uso de materiales estructurales compuestos no reciclables requiere que se ataque el problema de disponer de ellos cuando lleguen al final de su vida útil potencial^{15,16}.

Por fin el hombre trata de dirigir positivamente su impacto sobre el ambiente. En este siglo se han recogido datos importantes y se están instituyendo regulaciones de un alcance global para proteger la vida y el ambiente. Cumplir estas regulaciones es un desafío, particularmente en el caso de los materiales avanzados donde el desempeño es crítico.

Los temas ambientales asociados con los materiales avanzados se pueden reducir a los impactos negativos, sobre el ambiente y los organismos vivos, de los contaminantes en el aire que el hombre respira, el agua que bebe y la tierra que habita. Al mismo tiempo es necesario considerar el impacto del ambiente sobre los nuevos materiales.

Impacto sobre el ambiente

Un amplio espectro de productos y tecnologías está influido por los temas ambientales relacionados con los materiales avanzados. El enfoque normal es sobre los ingredientes usados para formular adhesivos, preparadores de superficie para unión, recubrimientos y elementos primarios de materiales compuestos. Pero el camino es muy largo. Todo empieza con la síntesis de los productos químicos orgánicos y el procesamiento de minerales orgánicos se mueve a través de la preparación superficial de sustratos, formulación y procesamiento de materiales avanzados, utillaje y fabricación, ensamble estructural y acabado, y por último, pero no menos importante, la reparación de componentes en servicio¹⁴.

Las citadas son apenas unas pocas de las muchas áreas. Todos los pasos requieren materiales para ayudar en la fabricación y en la limpieza durante y

después de la fabricación, que no son parte integral de la estructura. Estos materiales se deben recoger con seguridad y disponerlos adecuadamente para el reciclaje, la incineración o el enterramiento¹¹.

Algunos de los problemas que se tienen en la fabricación y uso de los nuevos materiales son los relativos a los solventes orgánicos, al cromo hexavalente, el asbesto, a los metales pesados y a la 4,4 metilen dianilina.

Los solventes orgánicos se usan extensivamente en la producción de los nuevos materiales ya sea en la síntesis química, como portadores para muchos materiales, en imprimantes para pegamentos y recubrimientos y en decapados y limpiezas a lo largo de todo el proceso de producción. Como se sabe, estos solventes están implicados en la toxicidad para humanos y animales, en el efecto de invernadero, la fotooxidación (smog) y el empobrecimiento de ozono en la atmósfera superior.

Las sustancias más dañinas en este sentido son los clorofluorocarbonos, los solventes clorados como el cloruro de metileno que es fácilmente absorbido por el cuerpo donde se acumula, los compuestos aromáticos e insaturados porque se descomponen y algunas cetonas y aldehídos por la fotooxidación.

La Unión Económica Europea ha prohibido totalmente el uso de «sprays» a pesar de que existen solventes que son de baja toxicidad, son saturados y no contienen cloro, ni aldehídos ni son aromáticos. Las razones de su poco uso son económicas sobre todo.

El cromo hexavalente es cancerígeno y por ello hay mucho interés en eliminar los materiales que contienen este elemento. Su mayor utilización es en la preparación superficial del aluminio para su unión adhesiva porque se logra así una unión fuerte y duradera. Hasta el momento no se ha encontrado un sustituto adecuado.

Otra área donde se usan los compuestos de cromo hexavalente es como inhibidores de la corrosión en adhesivos y recubrimientos. Los cromatos seleccionados tienen baja solubilidad en el agua y dejan iones, en las imperfecciones de la película, que protegen la superficie expuesta del aluminio. Los cromatos son únicos en su eficiencia como inhibidores de la corrosión del aluminio. En la actualidad se realizan grandes esfuerzos para encontrar alternativas no contaminantes.

Otro mineral muy usado en materiales avanzados es el asbesto, debido a su buen comportamiento químico, resistencia al calor y a la intemperie. Se le ha usado en sistemas de plásticos y adhesivos como relleno de refuerzo y tixotrópico, pero en la actualidad se le excluye de la mayoría de las formulaciones.

Muchos compuestos de metales pesados se han utilizado en los materiales avanzados como catalizadores para la síntesis química, para las reacciones de curado de los plásticos y como colorantes. Debido a que son muy tóxicos, rápidamente se han venido excluyendo de los productos y ya prácticamente no se utilizan en los nuevos materiales.

Otro constituyente que trata de evitarse en los nuevos materiales es la 4,4'-metileno dianilina (MDA) porque se le considera tóxico para los humanos. La MDA es un monómero aromático primario de diamina que se ha usado extensivamente como agente de curado en adhesivos y plásticos para alta temperatura como las bismaleimidas y poliimidas. Las investigaciones buscan materiales para alta temperatura libres de MDA.

En resumen, la tecnología de los nuevos materiales representa un amplio espectro de productos y procesos donde históricamente se han usado productos químicos con efectos negativos sobre el ambiente. Por esta razón se hacen esfuerzos para sustituirlos y los nuevos materiales son cada vez más seguros y amigos del ambiente.

De otro lado, los nuevos materiales se utilizan para purificar el entorno, como es el caso del óxido de circonio usado en sensores para controlar (vía microprocesador) las emisiones del escape de los automóviles, mejorar el ambiente y la eficiencia de la combustión, ahorrando petróleo; para el mismo propósito se utilizan catalizadores de distinto tipo. La aplicación de aerogeles y zeolitas en otros filtros y catalizadores es de gran utilidad en el combate de la contaminación ambiental.

Efecto del ambiente

Debe recordarse también que los materiales se deterioran en el ambiente y a diferencia de los seres vivos, se degradan incluso en los ambientes naturales y que la contaminación ambiental acelera aún más ese deterioro.

Se ha dicho que la forma más general de degradación ambiental es la corrosión en sus formas clásicas, pero el desarrollo de los nuevos materiales requiere una visión completa del daño ambiental. Estos materiales son sistemas complejos que se espera sean inertes frente a su entorno. Sin embargo en ellos persisten muchas formas de corrosión; más aún, debido al uso de aleantes reactivos y refuerzos de segunda fase, pueden surgir interacciones inesperadas que inducen o intensifican algunas formas menos comunes de corrosión. Los materiales no metálicos pueden interactuar con su ambiente de servicio degradando su desempeño. En consecuencia, en muchos aspectos, estas interacciones se pueden tratar de la misma manera que la corrosión¹⁸.

Las aleaciones avanzadas de aluminio, de titanio, y de magnesio sufren corrosión por picado en ambientes clorados y corrosión bajo tensión y por hidrógeno.

De otro lado los nuevos plásticos y elastómeros, aunque altamente resistentes, experimentan absorción de humedad, permeación por gases y productos químicos, daño por radiación, desgasificación e interacciones con el oxígeno.

Algunos de los nuevos materiales compuestos pueden soportar ambientes hostiles durante períodos largos de tiempo, por lo que se constituyen en soluciones prácticas y únicas para enfrentar el problema del deterioro. Pero es cierto que a su vez los materiales compuestos sufren de todas las interacciones mencionadas para metales y no metales, incluyendo los fuertes efectos del hidrógeno. Por ejemplo en los de matriz metálica puede ocurrir corrosión galvánica entre el refuerzo y la matriz, corrosión selectiva en la interfaz, defectos en la matriz provenientes de fisuras y caminos para la corrosión. Se ha dicho incluso que mientras mejores sean las propiedades mecánicas, peor es su resistencia a la corrosión¹⁹.

En cuanto a los materiales cerámicos, su comportamiento a temperatura elevada se conoce muy bien, pero su desempeño en sistemas electrolíticos acuosos a bajas temperaturas está poco estudiado y comprendido. En estos medios las nuevas cerámicas son termodinámicamente inestables, para ciertos valores de potencial y pH, porque están constituidas por óxidos, nitruros y carburos. Estos materiales se usan a veces en estas condiciones por el control cinético. Se utilizan en sistemas electrolíticos como aislantes, electrodos, espaciadores y como materiales electrónicos y estructurales. Un buen ejemplo es la degradación de la fibra óptica y de los superconductores en medios acuosos.

Además de la selección de materiales, el método más común de combatir el deterioro es mediante recubrimientos y de estos sin duda los más usados son las pinturas. Ya se mencionaron los problemas ambientales relacionados con estos recubrimientos orgánicos y las nuevas tendencias en su producción.

El nivel de compuestos orgánicos volátiles (COV) en las pinturas ha sido normalmente del orden de 850 g/l. En la actualidad se trabaja en varios frentes, uno es disminuir los COVs emitidos por las pinturas de modo que se reduzcan en un 25% para 1996, 30% en el año 2000 y hasta un 40% en el 2004, todo basado en los niveles de emisión de 1990,

aproximadamente 450 gigagramos. Otro sistema es el uso de recubrimientos de polvo curables con calor o recubrimientos curables con radiación, que al no requerir solventes eliminan los COVs. Otro método es la utilización de bases hidrosolubles; en esto se trabaja en todo el mundo, pero el desarrollo de las nuevas líneas de pinturas con base agua tardará varios años.

De estas diferentes posibilidades los polvos son las pinturas más ecológicas y ofrecen las perspectivas más prometedoras, en particular para reemplazar los barnices a base de solventes, pero por el momento el progreso se detiene en los problemas de la reciclabilidad y el acabado final²⁰.

De otro lado, además de limitar el uso de los compuestos de clorofluorocarbono (CFC) se busca la manera de eliminarlos. Así una compañía ha desarrollado un sistema para fraccionar los CFCs convirtiéndoles en ácido fluorhídrico (HF) y clorhídrico (HCl). Los CFCs son muy estables y sólo pueden destruirse a temperaturas elevadas. En este proceso se utiliza una cámara de reacción hecha de grafito y refrigerada por agua, ya que trabaja hasta 2.000°C, donde una llama de oxihidrógeno descompone más del 99.99% de los CFCs sin cantidades excesivas de NO_x o CO₂. De la misma manera se usan nuevos materiales y procesos para descontaminar el ambiente.

CONCLUSION

En resumen, las nuevas tecnologías, incluidos los nuevos materiales, tratan de ser más conscientes en lo relativo a la protección del ambiente. Los materiales avanzados son cada vez más compatibles con la conservación del mundo y es necesario que sepamos de ellos puesto que aun como usuarios debemos estar preparados. Muchas de las tecnologías, materiales y productos tóxicos que descartan los países del primer mundo van al tercero. Entre las muchas consecuencias de esta situación baste pensar en este dato escalofriante de la Organización Mundial de la Salud: se calcula que unos 50.000 individuos mueren anualmente

por envenenamiento, debido a productos químicos, gran parte de ellos en el tercer mundo²¹.

Por lo anterior es que todos, incluso quienes trabajamos con temas tan específicos como los materiales, tenemos obligación de poner nuestro

granito de arena para hacer más difícil a las naciones y corporaciones multinacionales su propósito de someterlos más mediante el traslado de tecnologías dañinas. Fuera de la voluntad política es necesario el conocimiento técnico y científico; busquémoslo.

REFERENCIAS

1. Vogely, William A., **Materials and Society**, vol. 14, No. 2, 1990.
2. Ashton, H.E. and P.J. Sereda, *Environment, microenvironment and durability of building materials*, **Durability of building materials**, Elsevier, Amsterdam, 1982, p. 49.
3. Robinett, Jane, *Ética y ordenadores: por dentro y por fuera*, **Antropos**, Nos. 94/95, 1989, p. 114.
4. Rangel Nafaile, Carlos E., **Los materiales de la civilización**, Fondo de Cultura Económica, México, 1987.
5. Valencia G., Asdrúbal, **Los materiales con que se construye la civilización**, *Revista Universidad de Antioquia*, Sept-Dic. 1994, p. 1.
6. Villas Boas, Roberto C., **Os novos materiais e a corrosao**, CETEM, Rio de Janeiro, 1991.
7. Valencia G., Asdrúbal, *El impacto del ambiente sobre los materiales*, **Seminario sobre declaración y evaluación del impacto ambiental**, U. de A., Medellín, 1993.
8. Wetzel, L.E. and S.E. Mackler, *The invisible enemy-identification and control of airborne contaminants in the manufacturing environment*, **33rd Annual Technical Conference Proceedings**, Society of Vacuum Coaters, 1990, p. 262.
9. Campbell, G.G. et al, *Assesing air pollution damage to coatings*, **J. Paint Techn.**, s.f.
10. Reisch, M. S., *Paints and coatings*, **C & EN**, v. 72, No 40, October 3, 1994, p. 44.
11. Teschendorf, Andrew F., *Environmental considerations for advanced materials*, **Advanced Materials Technology International** 1992, D. Whittaker (ed.), Sterling Publications, London, 1992, p. 13.
12. Córdoba P., D., **Toxicología**, Ediciones Corporación de Estudios Médicos, Medellín, 1986.
13. González, J., *Contaminación ambiental por metales pesados*, **Contaminación Ambiental**, CIA U. de A., Medellín, 1990.
14. Butcher, Charles, *Hoechst uses oxy-hydrogen to destroy unwanted CFCs*, **Chemical Technology Europe**, vol. 1, No. 5, November, 1994, p. 13.
15. Rosen, B.W., *Materials by design*, **ASTM Standardization news**, October 1989, p. 28.
16. Clark, J. P., y M.C. Flemings, *Nuevos materiales y economía*, **Investigación y Ciencia**, No 123, Dic. 1986, p. 15.
17. Meadowcroft, T. R., *The metals and materials engineer in the 21st century*, **Engineering and Mining Journal**, Nov. 1992, p. 19
18. Kane D, Russell and John W Oildfield, *Environmental effects on advanced materials*, **Avanced Materials Technology International**, G. B. Brook (ed.), Sterling Publications Limited, London, 1990, p. 226.
19. Arroyave, C., *La corrosión en los materiales compuestos de matriz metálica*, **Rev. Metal. Madrid**, VOL 30., No 6, nOV. 1994, P. 365.
20. Clin, Isabelle, *Las peintures ecologiques de l'an 2000*, **Galvano-organo-titements de surface**, Juin-Juillet, 1994, p. 467.
21. Shrader-Frechette, Kristin, *El riesgo industrial, las fronteras nacionales y la igualdad de protección*, **Antropos**, Nos. 94/95, 1989, p. 67.