

===== INSTITUTO DE ESPAÑA =====  
REAL ACADEMIA DE FARMACIA

# EL VIDRIO EN LA TECNOLOGIA MODERNA

POR EL

EXCMO. SR. D. VICENTE ALEIXANDRE FERRANDIS

DISCURSO LEÍDO EN LA SESIÓN DEL DÍA 13 DE DICIEMBRE  
PARA SU INGRESO COMO ACADÉMICO DE NÚMERO  
Y CONTESTACIÓN POR EL

EXCMO. SR. D. MANUEL LORA TAMAYO



MADRID, 1973

# EL VIDRIO EN LA TECNOLOGIA MODERNA

DISCURSO PRONUNCIADO POR  
EL EXCMO. SR. D. VICENTE  
ALEIXANDRE FERRANDIS, EN LA  
SESIÓN PÚBLICA CELEBRADA PARA  
TOMAR POSESIÓN DE LA PLAZA  
DE ACADÉMICO DE NÚMERO DE  
LA REAL ACADEMIA DE FARMACIA,  
EL DÍA 13 DE DICIEMBRE DE 1973 .

EXCMOS. SRES. ACADÉMICOS:

La vida de los hombres es una sucesión de efemérides gratas y de éxitos que nos alegran por un lado y por otro de inevitables fracasos y frustraciones de deseos que nunca llegaron a ser realidad.

Con profunda emoción he de manifestaros que este acto, en el, que se me recibe en la Real Academia de Farmacia, representa para mí uno de los acontecimientos más relevantes y felices de mi vida académica, porque siempre me he sentido estrechamente vinculado a la profesión farmacéutica, a la que tengo un gran afecto, entre otras razones porque en esta misma casa que hoy cobija a la Academia, obtuve mi primer título universitario y porque mi primera actividad profesional fue la de ejercer durante varios años como farmacéutico en Valencia, mi tierra natal, al frente de una farmacia. Mi nombramiento de catedrático en Madrid interrumpió esta actividad. Más tarde tuve la satisfacción de ser nombrado académico correspondiente iniciando así una relación con la Academia que hoy alcanza su plenitud.

Por este hallar que me habéis conferido, deseo expresar públicamente mi gratitud a los señores académicos que amablemente propusieron mi candidatura y a todos aquellos otros que benévolutamente la aceptaron.

Soy consciente de lo que significa formar parte de esta prestigiosa Corporación, que ha contado siempre entre sus miembros con las más destacadas personalidades en las distintas facetas científicas que constituyen el saber farmacéutico. Por eso, al considerar lo mucho que recibo de vosotros y lo poco que en contrapartida os puedo ofrecer, mi agradecimiento se hace todavía mayor; porque cuando enjuicio la labor que he realizado a lo largo de mi vida, lo

único que de verdad encuentro, y lo declaro sin jactancia, es una vocación decidida por la enseñanza y la investigación que, a falta de otras cualidades de mayor brillantez, tiene ciertamente la de la perseverancia, ya que a la docencia como catedrático de instituto y a la labor investigadora he dedicado prácticamente toda mi vida útil. Quizás sea esta la razón que habéis tenido para traerme al seno de la Academia ocupando un lugar entre vosotros.

Señores académicos, es justamente ese sincero propósito de trabajo lo que os ofrezco para contribuir en la medida de mis fuerzas a que esta Academia continúe desempeñando su cometido con sus tradicionales eficiencia y prestigio.

Sucedo en esta Corporación al ilustre académico, médico y farmacéutico don Gerardo Clavero y del Campo, y quiero en estos momentos, no por imperativo protocolario, sino por estricta razón de justicia, dedicar un recuerdo y rendir un homenaje a la memoria de tan relevante figura de la Medicina y de la Farmacia españolas.

Nace Gerardo Clavero en Berlanga de Duero, pueblo de la castellana provincia de Soria, en 1895. Hijo de médico rural, pronto se despierta en él una clara vocación por la noble profesión médica, llena ciertamente de sinsabores y al propio tiempo de íntimas satisfacciones. Quizás el conocimiento que le proporcionó su infancia de las difíciles condiciones sanitarias en que se desenvolvía la vida del campesino castellano le impulsaron más tarde, en los años fecundos de la vida de un hombre, y perteneciendo ya al Cuerpo Médico de Sanidad Nacional desde 1932, a peregrinar por los campos de España como un promotor incansable y tenaz de la higiene rural en general y sobre todo de la lucha contra el paludismo, verdadero azote de nuestro país en aquellas fechas, y contra el tracoma, que tantos estragos hacía en los pueblos de las costas andaluzas y levantinas. Dignos también de ser resaltados son sus magistrales estudios sobre la tuberculización en España y sobre la frecuencia y distribución estacional de la meningitis tuberculosa.

Su extraordinaria preparación científica y cultural le llevó a ocupar elevados puestos en la profesión médica: catedrático de Higiene en la Facultad de Medicina de Cádiz, director del Instituto Nacional de Sanidad y Miembro de numerosos organismos internacionales sanitarios, representando con todo prestigio a España.

Su gran capacidad intelectual y su curiosidad por todo lo relacionado con la Medicina y la Sanidad le llevó a doctorarse en Farmacia. La Real Academia de Farmacia le eligió académico numerario, tomando posesión de la plaza el 9 de marzo de 1950.

Muchas omisiones hay en estas breves palabras mías, pero de ellas se deduce claramente que la vida del doctor Clavero fue una vida cumplida con lealtad a una vocación y llena de realizaciones provechosas para su Patria.

## EL VIDRIO EN LA TECNOLOGIA MODERNA

He escogido este tema para mi discurso de ingreso en la Academia, no solamente por el indiscutible interés que presenta en nuestros días, sino también, porque constituye el objetivo de nuestras actuales investigaciones en el Instituto de Cerámica y Vidrio.

### INTRODUCCIÓN

El vidrio no ha sido nunca propiamente descubierto, ya que se ha podido demostrar que hace más de 3.000 años salió por primera vez de la mano del hombre, interviniendo en ello probablemente la casualidad. Al mezclar en recipientes cerámicos distintas piedras con potasa o sosa y calentar la mezcla al fuego se obtuvieron por fusión cuerpos vítreos, en los que por primera vez los colores aparecieron con todo su atractivo.

Quizás fuese la tradicional tendencia de las mujeres a utilizar todo aquello que resalte su belleza y la no menos inveterada inclinación de los hombres a satisfacer aquellos deseos, la causa de que la fabricación de adornos se sometiese a una prueba empírica sistemática para conocer el modo de obtener mejores y más variados colores. Las muestras que de su trabajo nos han llegado a lo largo de la historia demuestran el éxito de sus primitivos métodos.

Mucho más difícil resultó obtener vidrio incoloro, en lugar de los vidrios coloreados, para lo cual hubo que eliminar todos los componentes que pudieran dar origen al color. Pasaron muchos siglos, hasta que esto se logró, consiguiéndose así la primería materia sólida producida por el ingenio del hombre que tenía la transparencia del agua y de las piedras preciosas. Por todo ello su cotización era muy alta y así aún en tiempos de la Biblia podemos leer en la descripción del Trono de Dios, que se hace en el Apocalipsis de San Juan lo siguiente: «y enfrente del Solio había como un mar de transparente vidrio semejante al cristal» Estas palabras demuestran

claramente el enorme aprecio en que se tenía al vidrio, hasta el extremo de compararlo con el cristal de roca, que por su transparencia y otras propiedades era considerado como piedra preciosa.

Podría suponerse después de lo dicho que un material como el vidrio conocido desde tan antiguo, ha de tener agotadas ya todas sus posibilidades y que con dificultad podrá encontrar nuevas aplicaciones en competencia con materiales más modernos. Nuestro propósito en esta exposición es demostrar que el vidrio no solamente ha contribuido hasta ahora de una manera decisiva a alcanzar nuestra forma actual de vida, sino que encuentra cada día nuevos campos de aplicación hallándose de hecho en el centro de las más avanzadas tecnologías.

En esta exposición nos limitaremos a reseñar algunos vidrios especiales de los que presentan mayor interés en nuestros días. Tales son: I. Vidrios de elevada resistencia mecánica. II. Productos vitrocerámicos. III: Vidrios laser. IV. Vidrios fototrópicos V. Fibras de vidrio ópticas. VI. Vidrios coloreados para recipientes.

#### I. VIDRIOS DE ELEVADA RESISTENCIA MECANICA

La conocida fragilidad del vidrio es un obstáculo en todos aquellos usos en los que se requiera una elevada resistencia a la rotura.

Es bien sabido que la resistencia a la compresión de los vidrios es mucho mayor que la resistencia a la tracción. Esta última se ha calculado teóricamente por distintos métodos y autores. Orowan, basándose en las fuerzas atractivas existentes entre los átomos que constituyen la red del vidrio, obtuvo una ecuación para la resistencia mecánica que dice:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{E \alpha}{a_0}}$$

en la que « $\sigma_m$ » representa la resistencia mecánica teórica a la tracción, «E» el módulo de Young, « $\alpha$ » la energía superficial por unidad de -área de vidrio, y « $a_0$ » el espaciado interatómico.

Los resultados de todos los autores han coincidido aproximadamente en el valor  $1 \times 10^5$  Kpv/cm<sup>2</sup> para la citada magnitud.

Sin embargo, la realidad es, que si no se toman precauciones especiales los valores experimentales son notablemente inferiores, del orden de  $1 \times 10^3$  Kp/cm<sup>2</sup>. Es decir, que la resistencia teórica es 100 veces superior a la que se encuentra en la práctica en vidrios convencionales de buena calidad. Esta discrepancia y el hecho conocido de antiguo de que la resistencia a la tracción por cm<sup>2</sup> de las fibras de vidrio aumenta rápidamente al disminuir el diámetro de las mismas, hasta alcanzar valores próximos a los teóricos, ha dado lugar a numerosas investigaciones e interpretaciones. Una de las explicaciones que más éxito ha tenido es la debida a Griffith, según la cual todas las muestras de vidrio presentan grietas microscópicas, las cuales actúan disminuyendo la resistencia según la siguiente expresión:

$$\sigma = 2 \sqrt{\frac{E \alpha}{\pi l}}$$

en que «*l*» representa la longitud de las grietas, y las otras letras tienen el significado anteriormente indicado.

El módulo de elasticidad «E» varía poco de unos vidrios a otros, pero la energía superficial puede variar intensamente, sobre todo por la presencia de gases o líquidos que la hacen disminuir mucho. Por ello, la energía necesaria para que por fractura se formen nuevas superficies disminuye y en consecuencia la resistencia baja. La explicación según la teoría de Griffith del aumento de resistencia mecánica por cm<sup>2</sup> de las fibras de vidrio a medida que disminuye su diámetro, sería que si, por ejemplo, la fibra tiene un diámetro de  $1 \mu$ , no pueden existir en ella grietas de longitud considerable  $> 5\mu$ , que sean perpendiculares a la dirección del estirado y que son, según el citado autor, las que más disminuyen la resistencia.

Griffith, en un principio, supuso que las citadas grietas estaban repartidas al azar por todo el volumen del material quebradizo, como ocurre en los cuerpos cerámicos policristalinos y ciertos cuerpos metálicos frágiles.

En el caso de los vidrios, sin embargo, las investigaciones posteriores han demostrado que las microgrietas existen solamente en la superficie.

También parece demostrado que se producen por acciones mecánicas, aunque algunos autores estiman que puede haber una formación espontánea de microgrietas.

Los trabajos realizados en los últimos años permiten afirmar que probetas obtenidas con el máximo cuidado para evitar la formación de grietas superficiales presentan una resistencia a la tracción, que llega a ser ya de  $1/3$  del valor teórico. La diferencia que aún persiste frente al valor teórico hay que atribuirla a defectos de la estructura vítrea interna.

En las investigaciones sobre la resistencia a la tracción se observa que la fractura se origina siempre en la superficie. Cualquier perturbación (grietas, poros, etc.) en ella existente disminuye la resistencia; su número y magnitud dependen del tratamiento térmico a que se haya sometido el vidrio.

Por el uso normal de los objetos de vidrio se producen a veces, en su superficie defectos tan profundos que la resistencia a la tracción disminuye mucho. La resistencia del vidrio virgen y pulido con ácido importa  $10^4$  Kp/cm<sup>2</sup>. Su superficie presenta sólo microdefectos. Los productos corrientes de vidrio tienen una resistencia de  $10^3$  Kpy/cm<sup>2</sup>, y los muy deteriorados con macrodefectos en su superficie sólo poseen una resistencia de  $10^2$  Kp/cm<sup>2</sup>.

Por eso ya en 1933 Littleton decía: «Nosotros no medimos la resistencia del vidrio sino la fragilidad de su superficie».

Estas consideraciones generales indican el camino que debe seguirse para aumentar la resistencia del vidrio. Es cierto que resulta muy difícil evitar la producción de micro defectos en la superficie del vidrio, pero se pueden hacer inocuos estos micro y en ocasiones macrodefectos, si se pone la superficie del vidrio en un estado de compresión elevada. Para esto existen varias posibilidades: a) enfriamiento brusco por inmersión en un líquido o por corriente de aire frío, del objeto de vidrio previamente calentado por encima de su temperatura de transformación  $T_g$ . De esta forma la superficie del vidrio se solidifica enseguida, mientras que el interior del mismo se encuentra todavía plástico. es decir, a temperatura mayor. Al enfriarse la masa interna del vidrio, la superficie ya no puede ceder, porque ya es rígida, así que la zona interna queda sometida a tracción y la superficial a compresión. Por este proce-

dimiento se endurecen en la actualidad grandes cantidades de parabrisas, ventanillas de automóviles y de otros vehículos, lunas de, puertas, etc. Las ventanillas que pueden resistir incluso el impacto de balas se fabrican uniendo entre sí con láminas de plástico adecuado varias láminas de vidrio endurecido por el procedimiento descrito. La unión se realiza por prensado en caliente. b) Un segundo método de producir capas de compresión en la superficie del vidrio es provocar en ésta un cambio de composición, de forma que el material de la capa externa del vidrio tenga un coeficiente de dilatación más bajo que el del interior. Entonces, durante el enfriamiento, la parte interna del vidrio contrae más que las capas superficiales produciendo el mismo efecto que se consigue con el método del enfriamiento brusco.

El cambio de composición superficial puede realizarse de varias formas: la más directa es recubrir un vidrio de elevado coeficiente de dilatación con otro de dilatación pequeña. Los trabajos de Silvestrovitch y Boguslaavkii pueden considerarse, por lo menos parcialmente, como un proceso de recubrimiento. Estos autores produjeron una película de sílice, de bajo coeficiente de dilatación, sobre un vidrio, enfriándole bruscamente por inmersión en un aceite de silicona desde la temperatura de reblandecimiento. En cambio no se produce la película de sílice cuando se emplean otros líquidos de inmersión c) En la actualidad Kistler y otros autores han llevado a cabo trabajos muy completos sobre el aumento de resistencia mecánica en los vidrios, producido por cambio iónico. El método consiste en reemplazar en el vidrio los iones alcalinos de pequeño volumen, por ejemplo, el sodio, por otros de mayor radio; para ello se introduce el vidrio cuya resistencia mecánica se quiere aumentar en sales de potasio fundidas que estén a una temperatura inferior a la de recocido del vidrio; el tiempo de contacto es de varias horas. El cambio iónico da lugar a fuerzas de compresión considerables en la superficie producidas por las mayores exigencias de volumen de los iones más grandes en el seno de una matriz rígida. En efecto, en un estudio de los volúmenes relativos de los iones alcalinos en el vidrio, Huggins dio al ion potasio un volumen 78 por 100 mayor que el ion sodio. Independientemente de la estricta exactitud del dato es evidente que si el ion potasio ocupa un volumen tan superior

al que ocupa el sodio, el reemplazamiento por cambio iónico de este último por aquél deberá producir una expansión considerable. Por el contrario, si el ion sodio fuese reemplazado por el ion litio se produciría una contracción.

En la práctica, para producir el cambio iónico se emplea nitrato potásico fundido. Este tratamiento permite aumentar la resistencia a la rotura de un vidrio alrededor de 10 veces, sobrepasando ampliamente la obtenida con el método convencional del chorro de aire frío. De esta forma se ha conseguido hoy en día un vidrio prácticamente irrompible.

Por otra parte, la elevada resistencia mecánica obtenida con los métodos que acabamos de describir permite reducir notablemente los espesores de muchos objetos de vidrio con el consiguiente ahorro de peso y disminución de coste. Por ejemplo, en estos últimos años se han conseguido notables progresos en la disminución de peso de las botellas, en tal cuantía que pueda ya ser aconsejable, tanto desde el punto de vista comercial como económico, la adopción de envases de un sólo uso, es decir, de envases a los que sólo se les exigirá las características suficientes para asegurar el envío del fabricante al consumidor y no aquella elevada resistencia que es necesaria para asegurar al envase de vidrio los 30 ó 40 viajes de ida y vuelta que hoy en día tiene que soportar.

## II. VIDRIOS RESISTENTES A LOS CAMBIOS DE TEMPERATURA VITROCERÁMICA

### INTRODUCCIÓN

Los vidrios que se han endurecido superficialmente por diversos tratamientos presentan también, la mayor parte de las veces, mejor resistencia al choque térmico que los no endurecidos; sin embargo, no satisfacen en muchas ocasiones, suficientemente, las exigencias, prácticas. En efecto, Winkelmann y Schott llegaron a establecer basándose en consideraciones teóricas, que la resistencia a los cambios de temperatura en los vidrios venía dada por la fórmula

$$F = \frac{\sigma_z}{\alpha E} \sqrt{a}$$

en la que « $\sigma^2$ » representa la resistencia a la tracción « $\alpha$ » el coeficiente de dilatación térmica, «E» el módulo de elasticidad, y « $a$ » la conductividad térmica. Aunque una investigación profunda de la resistencia al choque térmico, efectuada por Kingery y Buessem ha demostrado que la citada fórmula es excesivamente sencilla y no tiene en cuenta todos los factores, puede servir como una orientación del comportamiento de un vidrio en este aspecto. La fragilidad (bajo valores de « $\sigma^2$ »), unida a la elevada dilatación térmica « $\alpha$ » y a la mala conductibilidad calorífica « $a$ » propias de los vidrios usuales dan lugar, con gran frecuencia, a roturas cuando el calentamiento es muy diferente de unos sitios a otros del objeto, como ocurre, por ejemplo, en el contacto con un hornillo eléctrico al rojo. Ciertamente que el desarrollo de los vidrios sílico-bóricos cuya dilatación térmica es solamente un tercio de la de los vidrios sílico-calco-sódicos convencionales supuso ya una notable mejora en la resistencia al choque térmico: los vidrios «Jena» y «Pyrex» se usan por ello en gran medida tanto en los laboratorios como en el menaje de cocina. Sin embargo, para satisfacer todas las exigencias de la técnica moderna se necesitan vidrios cuya dilatación térmica sea de diez a cien veces menor que la del vidrio de ventana. El único vidrio conocido hasta ahora con esa propiedad era el vidrio de cuarzo, pero éste, debido a su elevada temperatura de fusión y de moldeo es muy caro y solamente en casos especiales puede ser utilizado.

Para resolver este problema, hace pocos años y en distintos centros, se emprendieron investigaciones de desarrollo que han conducido a la obtención de un grupo de materiales completamente nuevo de extraordinarias propiedades mecánicas y térmicas y que reciben el nombre de vitro cerámica. Su obtención se funda en lo siguiente: como es bien conocido, los vidrios se consideran desde muchos puntos de vista como líquidos subenfriados. Por consiguiente, termodinámicamente son siempre inestables en comparación con un cristal o una mezcla de varias clases de cristales. Por ello todos los vidrios tienen tendencia a la desvitrificación; es decir a la separación de fases cristalinas. A temperatura ambiente dicha tendencia no se hace perceptible en los vidrios normales, puesto que los componentes estructurales del vidrio (iones, átomos o moléculas) no son suficientemente móviles para ordenarse según una red cristalina. Precisamente uno de

los objetivos primordiales de la industria del vidrio es evitar la cristalización a las elevadas temperaturas a las que se trabaja el vidrio. Pero por otra parte ya desde antiguo se persiguió la idea de provocar adrede la cristalización del vidrio y de ésta forma obtener materiales vitrocerámicos de propiedades muy variadas. La base científica para la obtención de estos materiales se encuentra en las clásicas investigaciones de Tammann sobre la formación de núcleos y el crecimiento de los cristales. Sin embargo, fue en el período comprendido entre 1957 y 1960 cuando se produjo, debido sobre todo a las investigaciones de Stookey, un desarrollo muy intenso en el dominio de la vitrocerámica que ha conducido a que en la actualidad exista ya una serie completa de materiales vitrocerámicos con propiedades diversas y numerosas aplicaciones.

#### *Fundamentos de la obtención de la vitrocerámica*

Las composiciones que han de originar productos vitrocerámicos primeramente se funden y moldean. Esto tiene la ventaja de que los procesos de moldeo, tales como prensado, soplado, laminado, etcétera, ampliamente desarrollados en la técnica del vidrio se pueden aplicar también a la vitrocerámica. Por otra parte es necesario que toda composición destinada a dar un producto vitrocerámico origine durante las operaciones de fusión y laboreo un vidrio que no devitrifique las condiciones para que un vidrio durante el laboreo sea suficientemente estable a la cristalización, pero que posteriormente pueda ser transformado en el estado vitrocerámico intensamente cristalizado, parecían en un principio difícilmente combinables. Esto se logró, sin embargo, en muchos casos, basándose en que la temperatura influye diferentemente sobre la frecuencia de formación de núcleos y sobre la velocidad de crecimiento de los cristales en el vidrio. La frecuencia de formación de núcleos (VN) y la velocidad de crecimiento (VC) presentan un máximo él determinada temperatura. Generalmente el máximo de la curva VN se encuentra a temperatura inferior al de la curva VC. Un caso extremo, y para los vidrios vitrocerámicos óptimo, sería aquel en el que las curvas VN y VC no se solapasen en absoluto. En ese caso puede un vidrio, que se enfría desde el estado de fusión, no cristalizar en la zona de la velocidad de crecimiento más elevada,

puesto que, excepción hecha de núcleos superficiales y extraños, no existen núcleos sobre los cuales producirse el crecimiento. Pero si se enfría el vidrio hasta penetrar en la zona de formación fácil de núcleos, entonces la velocidad de crecimiento es ya demasiado pequeña para que se puedan obtener cristales.

El vidrio solamente puede cristalizar si, después de permanecer suficiente tiempo en la zona de formación de núcleos, se calienta de nuevo a una temperatura a la que el crecimiento del cristal sea fácil. El proceso de la cristalización en este caso se puede dirigir cómodamente mediante un tratamiento térmico adecuado en temperatura y tiempo.

El moldeo de los objetos vitrocerámicos se hace en general cuando se encuentran en el estado vítreo. Por tanto, la transformación subsiguiente debe hacerse a la temperatura más baja posible, con lo que la viscosidad del vidrio es tan grande que el objeto no se deforma por el reblandecimiento. El límite inferior de temperatura viene impuesto por la zona de transformación del vidrio (caracterizada por la temperatura de transformación  $T_g$ ), en la que los procesos que llevan consigo movimientos de los componentes estructurales del vidrio Prácticamente se extinguen. De todo lo dicho anteriormente se deduce a secuencia térmica total de un producto vitrocerámico que en resumen es la siguiente: en primer lugar el vidrio fundido se enfría y al propio tiempo se le moldea la mayor parte de las veces. A continuación el cuerpo vítreo moldeado debe enfriarse hasta la temperatura normal, y para evitar la aparición de defectos, el enfriamiento debe hacerse, como en todos los objetos de vidrio, lentamente para suprimir tensiones que de lo contrario producirían rotura del vidrio. Acto seguido se calienta de nuevo primero hasta una temperatura superior a la correspondiente a la máxima frecuencia de formación de núcleos (generalmente  $50^\circ$  por encima de  $T_g$ ). Después de un tiempo de permanencia adecuado que oscila entre algunos minutos y varias horas se calienta de nuevo hasta que se produce el crecimiento de los cristales. A continuación se espera a menudo durante algunas horas hasta que la cristalización ha terminado. Por último, el producto vitrocerámico, ahora ya en gran proporción hecho producto cerámico, se enfría. La secuencia óptima de cada transformación vitrocerámica debe ser investigada en cada vidrio.

Las ventajas de los productos vitrocerámicos sobre los vidrios originales se debe a que presentan las propiedades características de las especies cristalinas que en ellos se forman. Esto ocurre ciertamente sólo en el caso de que los cristales constituyan la mayor parte del producto vitrocerámico. Generalmente el contenido cristalino importa entre el 50 y el 90 por 100 en peso del citado producto.

Esta fracción cristalina debe estar compuesta en la mayor medida posible por numerosos cristales cuyo tamaño individual sea pequeño; ya que los productos vitrocerámicos constituidos por cristales grandes son débiles desde el punto de vista mecánico. En la práctica el tamaño medio de los cristales se encuentra entre  $10^9$  y  $10^{17}$  Å. Una cristalización de esa finura exige una densidad de núcleos aproximadamente de  $10^2$  a  $10^{17}$  núcleos/cm<sup>2</sup>. Sólo pocas especies cristalinas, por ej. la mullita  $3Al_2O_3 \cdot SiO_2$ , están en situación de alcanzar en vidrios de la composición adecuadas densidades de núcleos tan elevadas. La mayor parte de los productos vitrocerámicos necesitan por consiguiente ciertas adiciones que elevan el número de núcleos en varios órdenes de magnitud. Para esto se emplean sustancias que se disuelven a temperaturas elevadas en el vidrio fundido, pero que durante el enfriamiento tienen tendencia a separarse del mismo. Tales son, entre otras, los metales nobles, algunos óxidos como el  $TiO_2$  o el  $ZrO$ , y los fluoruros, como el  $F_2Ca$ . En el caso de los metales nobles tienen lugar a menudo reacciones redox, que en los llamados productos vitrocerámicos fotosensibles son influidas por la luz ultravioleta.

Una explicación sencilla es que las sustancias añadidas para aumentar la densidad de nucleación (que son una parte pequeña del volumen total), al segregarse del vidrio, actúan por su parte como núcleos para que sobre ellos se desarrollen los cristales principales. Las formas de actuación de los formadores de núcleos son en detalle poco conocidas e insuficientemente aclaradas. En estrecha relación con ello parecen encontrarse los fenómenos de separación de fases amorfas observarlos en muchos vidrios.

*Propiedades de los materiales vitrocerámicos*

Fundamentalmente los materiales vitrocerámicos ocupan una posición intermedia entre los vidrios y los productos cerámicos propiamente dichos. Esto viene condicionado por el propio proceso de obtención anteriormente esbozado y se manifiesta asimismo en sus propiedades. Por ello las aplicaciones de los productos vitrocerámicos están en competencia, la mayor parte de las veces, con los vidrios o los productos cerámicos estrictos. Una característica esencial que los productos vitrocerámicos tienen que agradecer a su origen vítreo es la absoluta falta de porosidad. También las formas exteriores permiten reconocer frecuentemente que se han fabricado por los procedimientos de moldeo de la técnica vidriera. Puesto que la mayor parte de los productos vitrocerámicos contienen aún una parte importante de vidrio residual, en la que se incrustan los cristales, se manifiestan en ellos muchas de las propiedades de los vidrios. Así, por ejemplo, se les puede atribuir una temperatura de transformación que generalmente es superior a la del vidrio original. La presencia de la fase vítrea residual da lugar finalmente a que la mayor parte de los procedimientos conocidos para la elevación de la resistencia en los vidrios, por ej., endurecimiento químico por cambio iónico, etc., puedan aplicarse a los productos vitrocerámicos. Por otra parte muchas propiedades especiales de los productos vitrocerámicos se deben a los cristales en ellos existentes. Como ejemplo podemos citar el comportamiento ferroeléctrico o la dilatación térmica negativa de muchos de ellos.

Una exposición completa de las distintas clases de vitrocerámica existente en la actualidad requiere ya libros. A continuación se relacionan algunos ejemplos de materiales vitrocerámicos que nos indican la zona de propiedades cubiertas en la actualidad por los citados productos.

*Ejemplos de tipos de materiales vitrocerámicos*

a) *Productos vitrocerámicos de gran resistencia a los cambios bruscos de temperatura*

La singularidad de este tipo de material vitrocerámico se basa en el coeficiente de dilatación extremadamente pequeño o incluso negativo de algunos sílice-aluminatos cristalinos, tales como la cordierita ( $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ; coeficiente de dilatación térmica  $\alpha_{20-300}^{\circ\text{C}} = +10 \cdot 10^{-7}/\text{grd}$ ); la alta espodumena ( $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$ ;  $\alpha_{20-300}^{\circ\text{C}} = +9 \cdot 10^{-7}/\text{grd}$ ); y la alta eucryptita ( $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ;  $\alpha_{20-300}^{\circ\text{C}} = -90 \cdot 10^{-7}/\text{grd}$ ). Cada una de estas especies cristalinas puede obtenerse a partir de vidrios que contienen los componentes necesarios en suficiente cantidad, a los que se añade  $\text{TiO}_2$  o  $\text{ZrO}$ , como formadores de núcleos que favorecen la cristalización.

La vitrocerámica con cordierita como producto principal puede alcanzar una resistencia a la flexión de  $3.000 \text{ Kp/cm}^2$ , que aproximadamente es el quíntuplo de la correspondiente al vidrio original. Esto unido a su dilatación térmica de  $14 \cdot 10^{-7}/\text{grd}$  (en el intervalo de  $20 - 300^\circ \text{C}$ ) le comunica una resistencia al choque térmico muy elevada. Los productos vitrocerámicos a base de silicatos de aluminio y litio tienen un coeficiente de dilatación todavía más pequeño que incluso puede también llegar a ser negativo. Entre la alta eucryptita y el  $\text{SiO}_2$ , en la variedad cristalina de alto-cuarzo, existe una serie de cristales mixtos que pueden admitir asimismo los componentes  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{ZnAl}_2\text{O}$ , y  $\text{AlPO}_4$ . Esto permite obtener productos vitrocerámicos, a partir de vidrios, cuya composición corresponda a la de los citados cristales mixtos, cuya dilatación térmica sea prácticamente nula en un elevado intervalo de temperatura y que desde este punto de vista aventajan ampliamente al vidrio de sílice.

Si el tamaño de los cristales es suficientemente pequeño unos  $500 \text{ \AA}$  y su índice de refracción se diferencia poco del vidrio matriz, los productos vitrocerámicos obtenidos son transparentes porque la dispersión luminosa por partículas tan pequeñas es insignificante. Productos industriales de esta clase se ofrecen en el comercio con distintos nombres, por ej., *Zerodur* (Schott, Mainz), *Ceruit* (Owens-Illinois Glass

Corp.) o *Hercovit* (Pittsburg Plate Glass Corp.). Discos de materiales de esta clase de varios metros de diámetro se recubren con capas metálicas por evaporación y se emplean como espejos astronómicos. La Sociedad Alemana Max Planck tiene uno de cuatro metros en su observatorio central de Heidelberg. La constancia de dimensiones frente a los cambios de temperatura origina una formación de imágenes también de constancia óptima. Por otra parte posee un elevado módulo de elasticidad y buena resistencia química.

En el menaje del hogar los productos vitrocerámicos a base de silicatos de aluminio y litio se emplean en vajillas conocidas comercialmente con el nombre de «Pyroflam» (Corning Glass Work), de aspecto blanco y opaco, y de «Jena 2.000» (Schott Mainz), que es en cambio transparente; su resistencia al choque térmico es tan elevada que pueden pasar del frigorífico al horno, y viceversa, sin que se rompan. Esto es consecuencia de su pequeño coeficiente de dilatación, que impide que se originen tensiones por cambios de temperatura.

Modernamente se han obtenido placas recubridoras del horno de las cocinas con dilataciones térmicas muy pequeñas.

Muchos productos vitrocerámicos se obtienen por sinterización, aglomerándoles químicamente; los procedimientos de obtención y aglomerantes varían de unos a otros; se emplean como cambiadores de calor y soportes de catalizadores. Este tipo de productos se obtiene por moldeo y cocción de una mezcla de polvo de vidrio, plastificantes y otros compuestos inorgánicos.

### *Productos vitrocerámicos ferroeléctricos*

A partir de vidrios con elevados contenidos en componentes como el  $\text{TiO}_3\text{Ba}$  o el  $\text{NbO}_3\text{Na}$  se pueden obtener cristales de sustancias ferroeléctricas con estructura cristalina del tipo de la perovskita o pirocloro. De esta forma se obtienen productos vitrocerámicos ferroeléctricos. Las constantes dieléctricas que se pueden obtener (1.000- 2.000 a 1kHz y a 25° C) vienen limitadas por el hecho de que los cristales ferroeléctricos se encuentran embebidos en un vidrio matriz no ferro eléctrico .

Este vidrio matriz es indispensable porque los componentes fe-

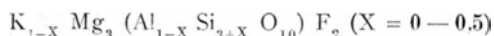
roeléctricos solos no forman vidrio. Las pérdidas dieléctricas de tales productos vitrocerámicos son relativamente pequeñas (tang  $\delta = 0,01-0,025$ , a 1kHz y 25° C); la resistencia de volumen es de unos  $10^{12} \Omega$  cm y la rigidez dieléctrica llega hasta  $4 \cdot 10^5$  V/cm.

En comparación con los productos cerámicos presentan la ventaja de su porosidad nula y de la facilidad de obtención de láminas y cintas delgadas.

Los productos vitrocerámicos que contienen  $NbO_3Na$  pueden ser transparentes y entonces tienen interés en aplicaciones electroópticas.

*Productos vitrocerámicos susceptibles de ser trabajados  
mecánicamente*

Un grupo nuevo de productos vitrocerámicos muy de actualidad está constituido por cristales de la mica fluorífera llamada *flogopita* como fase cristalina predominante. La fórmula general de las disoluciones sólidas de flogopita es:



La estructura laminar de estos minerales origina su conocida exfoliabilidad y flexibilidad. Dichas propiedades y la disposición desordenada y entrecruzada de los cristales traen consigo que estos productos vitrocerámicos sean menos propicios a la rotura que los vidrios y productos vitrocerámicos usuales, pudiendo incluso ser trabajados con máquinas herramientas normales que arranquen virutas como el torno, taladro, etc., lo que permite obtener objetos, a partir de ellos, de dimensiones muy exactas por procedimientos rápidos y baratos.

Las posibilidades de laboreo de los productos vitrocerámicos varían mucho según la composición y el tratamiento térmico. Es conveniente que su dilatación térmica sea parecida a la que poseen la mayor parte de los metales importantes ( $\alpha_{20-300}^\circ C$  entre 35 y  $150 \cdot 10^{-7}/\text{grd}$ ).

Algunas clases de estos productos vitrocerámicos tienen propiedades dieléctricas muy notables; así presentan resistencias de volumen de  $10^{14} \Omega$  cm. y un factor de pérdida de 0,005 a 1 MH, y 300°C;

Pertenecen por tanto al grupo de los mejores aisladores a elevada temperatura y aguantan temperaturas de 800° C, siempre que no hay cargas mecánicas.

*Productos vitrocerámicos de buen comportamiento mecánico y eléctrico a elevada temperatura*

Los sistemas  $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Li}_2\text{O-ZnO-SiO}_2$  dan lugar a productos vitrocerámicos que presentan buenas propiedades eléctricas a temperaturas de 1.000° C e incluso, a veces, superiores. En el primer caso los cristales mixtos de mullita constituyen la fase cristalina predominante y el producto vitrocerámico está exento de álcali.

Su dilatación térmica importa alrededor de  $+ 35 \cdot 10^{-7}/\text{grd}$  (20- 300° C) el factor de pérdida vale 25 hasta  $50 \cdot 10^{-4}$  (1 MHz) 25° C).

Los productos vitrocerámicos correspondientes al sistema  $\text{Li}_2\text{O-ZnO-SiO}_2$  contienen cristales de willemita ( $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ ), cristobalita ( $\text{SiO}_2$ ) y  $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ . Como formadores de núcleos se emplean fosfatos o metales nobles. La dilatación térmica puede oscilar entre  $+ 42$  y  $+ 174 \cdot 10^{-7}/\text{grd}$  (20 - 500 °C)- La resistencia a la flexión alcanza 3.000 Kp/cm<sup>2</sup>. Las pérdidas dieléctricas varían entre 13 y  $60 \cdot 10^{-4}$  (1 MH, 25°C) y la rigidez dieléctrica llega a alcanzar el valor de 50 KV /mm.

*Productos vitrocerámicos fotosensibles, atacables selectivamente*

A partir de vidrios fotosensibles del sistema  $\text{Li}_2\text{O-SiO}_2$  que contienen metales nobles se pueden obtener cristales de silicato de litio por irradiación con luz ultravioleta. Estos cristales tienen la particularidad de que se disuelven en ácido fluorhídrico diluido con bastante mayor facilidad que el vidrio original. En esto se basa un elegante método de elaboración de piezas de forma más o menos complicadas por vía química: las láminas de vidrio se recubren con una plantilla protectora y se irradian con luz ultravioleta. La formación de núcleos y la cristalización originada por el subsiguiente tratamiento térmico queda limitada exactamente a las partes irradiadas. Estas se

eliminan a continuación disolviéndolas con ácido fluorhídrico diluido; queda una reproducción exacta de la plantilla. Esta se irradia después de nuevo y se somete a tratamiento térmico, con lo que el vidrio se transforma en vitrocerámica, que posee mayor resistencia mecánica y un aislamiento eléctrico superior.

El procedimiento puede ser empleado, por ejemplo, en la obtención de sustratos para acoplamientos prensados. En particular, estos productos tienen además la ventaja sobre los materiales cerámicos de la mayor capacidad de pulido típica de los productos vitrocerámicos.

Objetos a los que se ha dado forma por el procedimiento de ataque químico descrito se encuentran en el comercio, con los nombres de *fotoform* (en estado vítreo) y *fotoceram* (en estado vitrocristalino).

Además de los productos vitrocerámicos citados se han desarrollado otros muchos, algunos de ellos con propiedades muy especiales, tales como, por ejemplo, la absorción de neutrones lentos en los reactores nucleares.

De todo lo dicho se deduce el extraordinario desarrollo que han tenido las propiedades y posibilidades de aplicación de los productos vitrocerámicos a pesar del corto tiempo que tienen de vida.

### III. VIDRIOS LASER: PROPIEDADES Y APLICACIONES

Como es conocido por acción láser se entiende el proceso mediante el cual se produce un haz luminoso coherente, es decir, un haz en el que todas las vibraciones están en concordancia de fase; y amplificado por medio de una aportación de energía a una sustancia activa, como, por ejemplo, el rubí, en el que son precisamente los niveles energéticos naturales del ion  $\text{Cr}^{3+}$  los que intervienen en el fenómeno.

La diferencia esencial entre esta radiación estimulada, inducida y la espontánea, que da lugar a los espectros de emisión está precisamente en que la primera es coherente y la segunda, no. La energía de un haz coherente es proporcional al cuadrado de la amplitud y ésta es la suma aritmética de la de cada uno de sus componentes, mientras que la amplitud de un haz no coherente es la suma vectorial,

es decir, depende de la diferencia de fase. Los haces coherentes permiten, por tanto, una enorme concentración de energía, y de ahí la extraordinaria importancia de los métodos para obtenerlos. En los laser de rubí la energía suministrada sirve para elevar los iones cromo hasta una banda de estados excitados desde la que pasan a un nivel metaestable para volver de nuevo al nivel fundamental emitiendo la característica fluorescencia roja del rubí.

Como se trata de un haz coherente puede enfocarse sobre un punto de 0,1 mm. de diámetro, y aunque la potencia de salida sea tan sólo de 0,4 Kw el flujo de potencia en el punto enfocado será de unos  $10^6$  w.  $\text{cm}^2$ . Para formarse una ,idea de lo que esto significa basta decir que la luz del sol enfocada con una potente lente en un punto origina una concentración de potencia del orden de  $500$  w .  $\text{cm}^2$ , es decir, que el punto enfocado por el laser sería unas diez mil veces más brillante. A raíz del descubrimiento del laser se produjo una investigación de desarrollo extraordinaria. En 1961, Snitzer logró demostrar que un vidrio activado, es decir, un vidrio al que se añadían determinadas sustancias era capaz de dar emisión inducida del tipo laser. De esta forma se extendió mucho la diversidad de los cuerpos sólidos la ser. En los cuerpos cristalinos, como el rubí, las propiedades quedan establecidas por el sistema cristalino a que pertenecen. En cambio, en los vidrios es posible variar poco a poco un conjunto de propiedades dentro de ciertos límites. La técnica de la fabricación del vidrio ofrece positivas ventajas para preparar laser, ya que permite obtenerlos de grandes volúmenes, de diversas formas y de excelente homogeneidad.

En la tabla 1 se indican los *iones activadores* que al ser incorporados a vidrios de distintos tipos producen efecto laser.

Las longitudes de onda de la emisión inducida se encuentran todas prácticamente en las proximidades del infrarrojo (entre 0,9 y  $2 \mu\text{m}$ ). De los activado res del vidrio empleados hasta ahora solamente el terbio produce emisión en la zona visible del espectro. Para ello debe ser excitado con radiación azul y ultravioleta. Hasta el momento presente el ion activador más frecuentemente empleado ha sido el neodimio. El vidrio activado con neodimio produce emisión inducida a la temperatura ambiente. Los iones activadores erbio, iterbio y tulio pueden también producir emisión inducida a la temperatura am-

TABLA 1

*Iones que originan efecto laser en el vidrio*

Ión	Tipo de vidrio	Longitud de onda de la radiación inducida ( $\mu$ m)	Temperatura de servicio en ( $^{\circ}$ K)	Duración de la fluorescencia ( $\mu$ S)
Nd <sup>3+</sup>	K-Ba-Si	1,06	300	560
	Na-Ca-Al-Si	0,92	77	
	La-Ba-Th-B	1,37	300	
Tb <sup>3+</sup>	Borato	0,542	300	
Ho <sup>3+</sup>	Mg-Li-Al-Si	1,95	77	450
Er <sup>3+</sup>	Mg-Li-Al-Si	1,55	77	8800
Tm <sup>3+</sup>	Mg-Li-Al-Si	1,85	80	500
Yb <sup>3+</sup>	Mg-Li-Al-Si	1,015	77	1450
	Ca-Li-B	1,018	77	880

biente, siempre que se añadan al vidrio simultáneamente los llamados *iones reforcadores*.

El ion reforzador absorbe radiación de longitud de onda diferente que el ion laser y fluoresce en la zona espectral en la que el ion laser se excita, o sea, que el ion reforzador transfiere su energía de excitación al ion laser; en definitiva, se aprovecha mayor parte de la energía suministrada al vidrio laser, procedente, por ejemplo, de una lámpara de xenon,

La razón concentración de ion laser/concentración de ion reforzador es crítica, puesto que una concentración excesiva del último puede disminuir la fluorescencia del vidrio laser en lugar de reforzarla. Los iones Yb<sup>3+</sup> y Er<sup>3+</sup> presentan una duración relativamente grande del estado de excitación (tabla 1). El vidrio activado con Er<sup>3+</sup> es importante puesto que emite en la zorra del espectro de 1,5  $\mu$ m para la que el cristalino del ojo humano es opaco, o sea, que por esta radiación la retina no puede ser lesionada.

TABLA II

*Vidrios laser con iones activadores y iones reforzadores*

Ión laser	Ión reforzador	Concentración de		Concentración expresada en	Tipo de vidrio	Long. de onda de la radiación inducida ( $\mu\text{m}$ )	Temperatura de servicio en ( $^{\circ}\text{K}$ )
		Ión laser	Ión reforzador				
Nd <sup>3+</sup>	Mn <sup>3+</sup>	4	0,5	% en peso	Fosfato	1,06	300
Ho <sup>3+</sup>	Yb <sup>3+</sup>	1	1	% er. peso	Silicato	1,9	80
Er <sup>3+</sup>	Yb <sup>3+</sup>	0,25	15	% en peso	K-Na-Ba-Si	1,54	300
						1,02	
	Yb <sup>3+</sup>	0,26	1,75	% en moles	Fluorofosfato	1,54	300
Yb <sup>3+</sup>	Nd <sup>3+</sup>	1	1	% en moles	Mg-Li-Al-Si	1,015	78
						1,06	
	Nd <sup>3+</sup>	0,5	0,5	% en moles	Ca-Li-Borato	1,018	300
	Nd <sup>3+</sup>	1,0	1 a 15	% en peso	Na-K-Ba-Si	1,06	300
Tm <sup>3+</sup>	Yb <sup>3+</sup> y Er <sup>3+</sup>	0,2	2 y 1	% en moles	Mg-Li-Al-Si	2,015	300

*Influencia de la composición química sobre la fluorescencia*

Se han estudiado muchos vidrios laser de diferente composición química activados con distintos iones, sobre todo neodimio, y se han investigado las propiedades de la fluorescencia y de la emisión inducida. Los vidrios de silicato son los que poseen tiempos de fluorescencia más largos (hasta 1.000  $\mu\text{S}$ ) y a continuación están los vidrios -de fluoruro, de fosfatos y de germanatos. Pero los vidrios laser además de un grado de fluorescencia elevado deben poseer las siguientes propiedades: gran resistencia frente él impulsos fuertes, estabilidad química, excelente homogeneidad óptica, elevado coeficiente de conductividad térmica e independencia del camino óptico de los cambios de temperatura. Hasta ahora los mejores resultados se han obtenido con vidrios de silicatos.

*Concentración de los iones activadores*

En los vidrios, en contraposición a lo que ocurre en muchos cristales, la concentración de los iones activadores puede ser muy grande.

Sin embargo, a partir de una cierta concentración cuyo valor fluctúa según la composición química del vidrio base, disminuye el tiempo de fluorescencia y, por consiguiente, también la intensidad del efecto producido por la emisión inducida.

En los vidrios de silicatos la citada disminución de la duración de la fluorescencia empieza a partir del 5 por 100 del contenido en  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  y en los vidrios bóricos ya con el 1 por 100. En la práctica es importante poder variar la concentración del ion activador, pues para un determinado aparato laser, caracterizado por el tamaño del cilindro laser, tipo de la lámpara excitatriz empleada, poder reflectante del espejo de salida, etc., hay una concentración óptima del ion activador en el vidrio. Así, por ejemplo, un cierto vidrio la ser (Schott LG 630), que tiene un 3 por 100 de neodimio, se puede excitar bien mientras el diámetro de cilindro de vidrio no exceda de 20 milímetros. Para diámetros mayores (30 mm y más) la concentración debe bajar, mientras que para diámetros inferiores (8 mm y menos) se recomienda aumentar la concentración si se quiere obtener una excitación uniforme en toda la sección del cilindro de vidrio.

#### *Propiedades críticas de los vidrios laser*

El umbral de energía de la emisión inducida es tanto más pequeño y la energía que sale del laser es tanto mayor cuanto más elevada es, la intensidad de fluorescencia y más pequeña la pérdida de energía en el vidrio. Esta pérdida de energía se debe a la absorción y a la dispersión de la radiación. La primera es motivada por la presencia en el vidrio de algunas impurezas, entre las cuales las más importantes son el hierro, el cobalto y el níquel. Para los vidrios de neodimio el más perjudicial de todos es el hierro al estado bivalente que posee una banda de absorción ancha alrededor de los  $1.100 \mu\text{m}$  y que origina pérdidas en la radiación de emisión del neodimio de  $1.060 \mu\text{m}$  que es una de las más importantes. En la actualidad se ha conseguido disminuir las pérdidas ópticas a  $0,001 \text{ cm}^{-1}$ .

La técnica la ser es muy exigente en lo relativo a la homogeneidad del vidrio a lo largo de grandes longitudes; las especificaciones requeridas solamente son comparables a las del vidrio óptico empleado en los aparatos astronómicos. Con los métodos de acabado

y afinado del vidrio óptico que se han alcanzado en la actualidad se puede conseguir que las variaciones en el índice de refracción no sean superiores a  $2 \cdot 10^{-6}$  a lo largo de varios centímetros.

La fracción ultravioleta de la radiación emitida por la lámpara puede producir en el vidrio núcleos que disminuyan la intensidad de la fluorescencia. Se consigue disminuir este efecto introduciendo sustancias que absorban la luz ultravioleta.

Una propiedad decisiva del vidrio en los laser de fuertes impulsos de gran potencia es la resistencia frente a la radiación laser intensa.

Son muchas las causas de destrucción que se presentan en el interior del vidrio. Una es la existencia de inclusiones absorbentes que se calientan tan fuertemente que el vidrio se rompe (grietas en el vidrio). Las inclusiones pueden ser partículas de platino (por eso se evita la mayor parte de las veces fundir el vidrio laser en platino) o relictos de la mezcla no disueltos o cristales (por consiguiente, la homogeneización de la muestra es muy importante). Otro fenómeno que puede originar destrucciones en el interior del vidrio es el autoenfocado de la radiación laser que origina intensidades de campo eléctrico tan elevadas que conducen a una perforación. Este proceso produce canalículos de burbujitas finas. Lo mismo ocurre también en los cristales, por ejemplo, el rubí. El análisis de la luz emitida en la destrucción parece indicar que la temperatura alcanzada debe ser de  $1.000^{\circ}\text{C}$ . Para el autoenfocado se han dado varias explicaciones, entre otras la electrostricción y el comportamiento eléctrico no lineal. Las pequeñas roturas en los frentes de la barra de vidrio a bajas energías de radiación se interpretan como destrucciones por autoenfocado en el interior. Por tratamiento con materias orgánicas se pueden evitar. El umbral destructor por autoenfocado se encuentra en la actualidad en los buenos vidrios laser entre 20 y 50 julios/cm<sup>2</sup>, en los impulsos fuertes de 30 ns de duración, esto es, para densidades de potencia de algunos gigawattios.

La lámpara causa igualmente calentamientos no homogéneos de la barra. Por ello se deforma la superficie de onda de la radiación laser propagada. Este efecto se atenúa si se emplea vidrio en el que el coeficiente de temperatura del índice de refracción sea negativo.

También da buen resultado evitar mediante un filtro adecuado que la fracción infrarroja de la lámpara incida sobre la radiación láser.

### *Aplicaciones del laser de vidrio*

#### *Obtención de plasma y logro de la fusión nuclear*

Los primeros resultados sobre la obtención de plasma con laser de vidrio de neodimio se conocen solamente desde hace dos años.

Las temperaturas obtenidas fueron tan elevadas que se produjo la fusión nuclear. Esto constituyó un éxito para el laser de vidrio. Debido a la buena homogeneidad óptica del vidrio se puede conseguir que la radiación que sale de un primer laser se amplifique en sucesivas etapas sin que la divergencia de la radiación sea demasiado grande.

Para evitar que la densidad de energía de la radiación sea excesiva y sobrepase el límite de rotura del vidrio se aumenta la sección de radiación en las sucesivas etapas de amplificación. En la etapa última se emplean cilindros de vidrio de 6 cm de diámetro y 1 metro de longitud. Para estos diámetros de cilindro lo mejor es reducir la concentración de neodimio al 1 por 100 y aún menos. La propiedad más importante que debe poseer el laser de vidrio para esta aplicación es una elevada resistencia frente a los impulsos de la radiación laser de potencia muy grande. En barras de vidrio de sección relativamente elevada se presenta también el problema de eliminar el calor que la radiación de la lámpara excitante comunica a la barra y que podría dar lugar a una dislocación del frente de onda de la radiación laser. Para eliminar dicha dislocación se practican incisiones circulares en la barra hasta una cierta profundidad y se hace circular un líquido frío entre los discos así obtenidos.

Para obtener la fusión nuclear se lanzó la radiación procedente de un cañón laser sobre una pequeña cantidad (no superior al tamaño de una piedra de encendedor) de deuterio congelado cuya temperatura era alrededor de 5° K (a - 269° C los núcleos atómicos se juntan); al incidir la radiación laser sobre el objetivo se produjo una nube de vapor alrededor de aquél y la temperatura se elevó a 10 millones de grados. Durante una fracción de segundo se des-

arrolló en un entorno pequeñísimo tanta energía que hubiese bastado para satisfacer durante ese intervalo de tiempo las necesidades de energía eléctrica de toda la Europa occidental: 200 mil millones de vatios.

Los instrumentos científicos demostraron que se habían liberados varios centenares de neutrones. Por tanto, se ha conseguido por primera vez la fusión nuclear empleando radiación laser obtenida mediante vidrio activado con neodimio : los núcleos ligeros se fusionan dando un núcleo más pesado y al propio tiempo se liberan neutrones. Así, pues, se está investigando sobre lo que podríamos llamar el fulminante o espoleta capaz de permitir el aprovechamiento de la fuente de energía probablemente más barata del porvenir: el agua. En efecto, según el científico atómico Glen Seaborg, el contenido en deuterio de los mares de nuestro planeta equivale a una reserva de energía de 500 océanos Pacífico de gasolina. Cada 6.000 moléculas del agua del mar contienen un átomo de deuterio; cada litro de agua del mar tiene una energía potencial de un millón de kilos de carbón. Hasta ahora la forma más moderna de obtención de energía es la fisión nuclear. En los reactores nucleares se aprovecha la energía que se libera en la fisión de los núcleos atómicos. Una dificultad de este sistema es la fracción relativamente elevada de residuos atómicos radiactivos que origina y que deben ser apartados cuidadosamente para que no contaminen el ambiente. Por otra parte, el material fisionable de que se dispone en el mundo es limitado. En un reactor nuclear de fusión en el que la energía se obtenga por fusión de los núcleos, la radioactividad residual perturbadora es despreciable. Además la materia prima para la fusión nuclear, el deuterio, se encuentra, como hemos dicho, en el agua del mar en cantidades ilimitadas. De lo dicho se desprende que los rayos laser pueden representar la chispa que desencadene la fusión nuclear. Quisiera, sin embargo, dejar bien sentado que la investigación sobre este tema no ha hecho más que empezar. Los cañones laser que estuviesen en condiciones de iniciar un proceso de fusión nuclear de deuterio y de mantenerlo deberían ser muchísimo más, potentes que los actualmente disponibles. Si se tendrá éxito en la obtención de un cañón laser capaz de alcanzar este objetivo es difícil de predecir, pero lo que está fuera de duda es que el vidrio activado

de neodimio ha permitido dar el primer paso para el aprovechamiento de una fuente de energía completamente nueva. Para la humanidad que contempla con preocupación creciente el agotamiento progresivo de las fuentes energéticas convencionales, tales como el petróleo, gas natural, saltos de agua susceptibles de aprovechamiento hidroeléctrico, e incluso el carbón, aunque a plazo mucho más largo, estas investigaciones representan una esperanza. Confiamos en que el hombre creado a imagen y semejanza de Dios y cuya inteligencia y capacidad creadora desconocemos hasta dónde puede llegar, alcance el éxito en esta singular empresa.

### *Transformación de materiales*

En la transformación de materiales (taladrar, soldar, evaporar) es importante que se pueda variar la longitud del impulso, que la serie de impulsos sea elevada y que la divergencia de la radiación sea pequeña. En lo referente a la última condición puede ser una solución el empleo de vidrio con un coeficiente de temperatura negativo. Para obtener series de impulsos elevadas, el rubí con conductibilidad térmica elevada es más apropiado que el vidrio.

Sin embargo, se puede con barras de vidrio de diámetro de 8 mm y más pequeños obtener impulsos relativamente fuertes (algunos julios) a series de impulsos más bajas (1 hasta 10 impulsos por segundo). Con una barra de vidrio de 75 mm de longitud y sección rectangular (2 x 6 mm ) se han obtenido 120 impulsos por segundo con una potencia media de 6 w.

### *Otras aplicaciones*

En la técnica de medidas de distancias el vidrio tiene mejores oportunidades que antes, desde que por eliminación de las pérdidas ópticas se ha logrado disminuir la energía umbral del efecto la ser y se ha mejorado la recepción en el infrarrojo próximo.

Un interés especial presenta el vidrio activado con erbio a causa de la emisión a  $1,55 \mu\text{m}$  por la razón ya citada.

En medicina, por otra parte, el laser de neodimio para cuya luz

la lente del ojo es transparente, se emplea para inserciones de retina. También para el tratamiento de tejidos enfermos y en odontología encuentra aplicación el laser de neodimio.

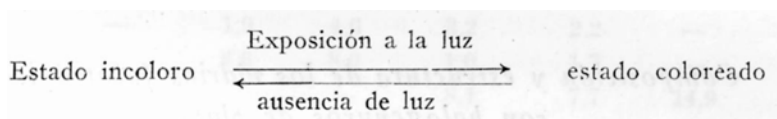
La investigación física emplea este mismo laser para trabajos sobre el efecto Raman y la dispersión Brillouin. Debido al elevado valor medio de la anchura de la banda de fluorescencia el vidrio es muy particularmente adecuado para la obtención de impulsos ultracortos. Momentáneamente se obtienen anchuras de impulso de  $10^{-12}$  segundos.

#### IV. VIDRIOS FOTOTRÓPICOS

##### *Introducción*

Por *fototropía* se entiende el cambio reversible que experimenta un material entre estados que presentan absorciones de radiación diferentes y que es originado por la luz (fotones) o en general por radiaciones electromagnéticas. La *fotocromía* es un caso especial de fototropía, en el que por lo menos uno de los estados absorbe radiaciones correspondientes al espectro visible.

La fototropía, como fenómeno fotoquímico que es, obedece a la Ley de Grothus-Draper, según la cual únicamente la luz absorbida por la sustancia fototrópica es efectiva. Al someter dicha sustancia a la acción continua de la radiación el color cambia hasta que se alcanzan equilibrio entre las reacciones directa e inversa. Así, pues, la fototropía es reversible. Cuando se elimina la luz, el sistema vuelve a su estado inicial de acuerdo con el siguiente esquema



La longitud de onda de la luz que produce el cambio en la transmisión luminosa de la sustancia y la velocidad a la que se origina el proceso dependen de la naturaleza del cuerpo y de la temperatura.

Al aumentar la temperatura se desplaza la banda de absorción hacia longitudes de onda mayores. Asimismo temperaturas más elevadas aceleran la reacción de regeneración, la cual transcurre simul-

táneamente con la reacción que produce el color, oponiéndose al proceso fototrópico.

Muchos compuestos inorgánicos, por ejemplo, de mercurio, cobre, zinc, cromo, molibdeno y wolframio presentan un comportamiento fototrópico en estado sólido o en disolución. Si el mineral sodalita  $\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}) \text{Cl}_2$ , que es incoloro, se expone a la acción, de los rayos X se vuelve azul, recuperando el estado incoloro cuando se calienta a  $450^\circ$ .

Varios autores han descrito vidrios inorgánicos que poseen propiedades fototrópicas. Los vidrios fototrópicos no deben confundirse con los vidrios fotosensibles, en los cuales se producen imágenes irreversibles análogamente a lo que ocurre en una placa fotográfica.

La existencia de vidrios fototrópicos fue descubierta en 1964; Stookey y Armistead describieron un vidrio de borosilicato que contenía halogenuros de plata a los que debe el comportamiento fototrópico. Los halogenuros de plata existentes en el vidrio con un tamaño de partícula del orden de  $> 50 \text{ \AA}$  y una concentración en volumen de 500 ppm, se descomponen al ser expuestos a la luz, exactamente igual que en el proceso fotográfico. Garfinkel ha conseguido mediante un proceso de intercambio iónico introducir halogenuros de plata sensibles a la luz, en la superficie de un vidrio.

Al someter el vidrio foto trópico a la luz la transmisión luminosa disminuye muy rápidamente hasta alcanzar lo que se llama *valor de saturación de la transmisión*. (es decir, la densidad óptica o extinción u oscurecimiento aumenta). Si la luz excitante se suprime al cabo de 10 minutos. la muestra se regenera hasta que se alcanza de nuevo la transmisión luminosa original del 92 por 100.

#### *Composición y estructura de los vidrios foto trópicos con halogenuros de plata*

Como ya se ha dicho, Stookey y Armistead descubrieron que la adición de sales de plata y halogenuros a un vidrio de boro silicato con temperaturas de fusión entre  $1.250^\circ$  y  $1.450^\circ\text{C}$  origina un vidrio, que después de oportuno tratamiento térmico presenta propiedades fototrópicas. Desde entonces se han obtenido numerosos vidrios: fototrópicos de variada composición a base de halogenuros de plata,

hasta el extremo de que en la actualidad sería difícil encontrar vidrios que no puedan hacerse fototrópicos por acción de los citados compuestos

En la tabla 1 se indican unas cuantas composiciones de vidrios fototrópicos para distintos usos, que exigen propiedades diferentes, tales como transparencia, estabilidad química, etc.

En los vidrios fototrópicos se puede, en general, distinguir entre el portador de la fototropía, esto es, los componentes del halogenuro de plata y el vidrio matriz cuya composición e historia térmica influye también sobre las propiedades fototrópicas producidas al segregarse la fase rica en halogenuros de plata, pero que actúa simplemente como una especie de disolvente de estos agregados en el vidrio recocido final.

TABLA I

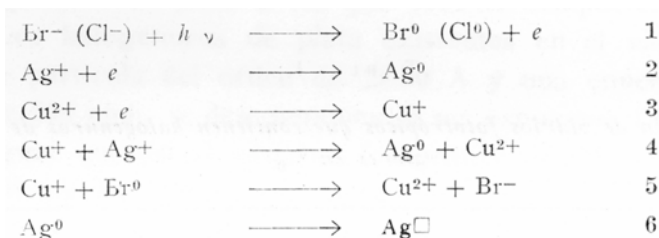
*Composición de vidrios fototrópicos que contienen halogenuros de plata  
(valores en %)*

	1	2	3	4	5	6	7
SiO <sub>2</sub> ... ..	62,8	54,0	51,0	10,5	0,8	—	—
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ... ..	15,9	16,0	19,5	30,3	46,5	54,0	55,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ... ..	10,0	9,1	6,8	14,9	22,3	22,8	8,0
Na <sub>2</sub> O ... ..	10,0	3,0	1,7	—	3,5	5,1	—
K <sub>2</sub> O ... ..	—	1,4	—	3,5	1,6	1,3	—
Li <sub>2</sub> O ... ..	—	2,3	2,5	—	—	—	0,3
PbO ... ..	—	4,3	4,7	23,9	0,2	—	29,6
ZrO <sub>2</sub> ... ..	—	1,9	4,6	3,2	2,2	—	—
BaO ... ..	—	6,6	8,0	1,0	1,7	—	2,0
MgO ... ..	—	—	—	8,1	7,7	14,9	2,0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ... ..	—	—	—	0,8	0,3	0,6	—
Ag <sub>2</sub> O ... ..	0,41	0,27	0,05	0,5	0,26	0,3	0,55
Cl ... ..	1,7	0,5	0,69	1,2	2,6	0,2	0,4
Br ... ..	—	0,5	0,11	2,1	2,3	0,5	0,7
F ... ..	2,5	0,1	—	—	8,8	0,3	1,3
CuO ... ..	0,016	0,03	0,016	0,008	0,04	0,01	0,03
	103,326	100,00	100,266	100,008	100,80	100,01	99,98

Las segregaciones que se producen en el tratamiento térmico del vidrio, inicialmente homogéneo, determinan las propiedades fototrópicas del vidrio. Se admite generalmente que su tamaño debe estar comprendido entre 50 y 300 Å. En el caso de partículas de un diámetro de 100 y separadas por una distancia de 600 Å existen, según Smith,  $4 \times 10^{15}$  partículas por  $\text{cm}^2$ .

### *La reacción fototrópica*

El proceso que tiene lugar al exponer un vidrio fototrópico a la luz puede representarse esquemáticamente sobre la base de la fotosensibilidad de los halogenuros de plata mediante las siguientes ecuaciones:



Los vidrios fototrópicos no expuestos a la luz tienen un ligero color verdoso. Este desaparece al ser expuestos a la luz; el color que entonces presenta se debe a los segregados de plata que se forman al descomponerse los granos de halogenuro de plata sensibles a la luz. El número y tamaño de los segregados de plata depende, entre otros factores, del número, tamaño y estructura de los granos de halogenuro de plata. Los átomos de plata  $\text{Ag}^0$  se depositan de acuerdo con las ecuaciones 2 y 4, y se aglutinan en los límites externo e interno de los granos de la fase halogenuro formando agregados mayores, probablemente de carácter microcristalino  $\text{Ag}^\square$  (ecuación 6).

### *Cinética de la fototropía*

La fototropía de un vidrio viene determinada por dos propiedades del material, a saber: a) *disminución de la transmisión luminosa*

(oscurecimiento), que se produce por exposición a la luz, y b) velocidad con que el vidrio se vuelve de nuevo incoloro al protegerle de la luz, es decir, *velocidad de regeneración*. El oscurecimiento producido por la luz se mide por la transmisión de saturación, con cuya denominación se expresa el valor constante que toma la transmisión a continuación de la rápida disminución inicial y que se alcanza después de exponer el material a una acción prolongada de la luz. En la práctica se emplean valores aproximados para no tener que hacer determinaciones con tiempos de exposición excesivamente largos.

Araújo y Stookey y Smith han propuesto un modelo capaz de describir el oscurecimiento del vidrio fototrópico en función de la intensidad luminosa. La velocidad de oscurecimiento, es decir, la variación en la concentración de los causantes del color por unidad de tiempo,  $\frac{dc}{dt}$  es proporcional a la intensidad  $I_d$  de la luz incidente estimulante y al número  $A$  de granos de halogenuros de plata sensibles a la luz. Se han publicado diferentes curvas que relacionan: la longitud de onda estimulante y el oscurecimiento obtenido; en líneas generales, se estableció que la excitación máxima se consigue con longitudes de onda comprendidas entre 340 y 400  $\mu\text{m}$ . Mientras, el vidrio se está oscureciendo, se está produciendo simultáneamente la reacción inversa con regeneración del halogenuro de plata.

Esta reacción inversa es proporcional al oscurecimiento «C» ya alcanzado, y en ella hay que distinguir dos procesos, a saber: la regeneración óptica y la regeneración térmica. Ambos procesos aclaran el vidrio.

Pohl describió los procesos fotoquímicos que tienen lugar en los halogenuros de plata y estableció que la luz absorbida por los centros de color tiene, igual que las temperaturas elevadas, una acción regeneradora.

La regeneración óptica se debe a la transformación de la plata metálica en catión plata por absorción de luz visible en la zona de longitudes de onda comprendida entre 550 y 750  $\mu\text{m}$ . La absorción de fotones de esta energía origina una transferencia de electrones desde la plata a la banda de conductividad de la red del halogenuro.

En el modelo propuesto por los tres autores antes citados se admite también que el aclarado óptico es proporcional a la intensidad de luz  $I_f$  correspondiente a la zona de longitudes de onda antes

citada. Resulta evidente que la reacción inversa debida a la absorción luminosa en la región visible aumenta al crecer el oscurecimiento  $C$ . La absorción de esta luz es particularmente efectiva en el estado de exposición total debido a la intensa banda de absorción en esta región.

El aclarado térmico, es decir, la recombinación de plata y halógeno para formar halogenuro como consecuencia del movimiento térmico de iones, electrones o huecos electrónicos juega también evidentemente un papel importante en la determinación del estado de equilibrio, esto es, de la transmisión de saturación.

En consecuencia, la velocidad de oscurecimiento real vendrá dada por

$$\frac{dc}{dt} = K_d \cdot I_d \cdot A - (K_f \cdot I_f + K_t) C \quad (1)$$

en donde  $K_d$ ,  $K_f$  y  $K_t$  son respectivamente las constantes de velocidad de los procesos de oscurecimiento, de regeneración óptica y de regeneración térmica. En el equilibrio  $\frac{dc}{dt} = 0$  la concentración de saturación  $C_s$  de los centros de plata productores del oscurecimiento de la ecuación (1).

$$C_s = \frac{K_f \cdot I_f + K_t}{K_d \cdot I_d \cdot A}$$

Los valores de las constantes de esta ecuación vienen determinados por la estructura, número y tamaño de las regiones de halogenuro de plata fotosensibles.

Por ejemplo, si la constante de regeneración térmica  $K_t$  tiende hacia cero, la concentración de centros de color  $C_s$  en el estado de equilibrio se hace independiente de la intensidad luminosa, puesto que la razón entre luz estimulante y luz productora del aclaramiento óptico es constante. Por el contrario, si la constante  $K_t$  es relativamente elevada, influye mucho sobre la velocidad del proceso; la concentración  $C_s$  de los centros de color es entonces proporcional a la intensidad estimulante  $I_d$ .

El modelo que acabamos de exponer puede explicar bien los datos experimentales dividiendo el proceso fototrópico elemental en efectos de superficie o interfaciales y efectos de volumen.

### *Aplicaciones de los vidrios fototrópicos*

El efecto fototrópico en el vidrio se aplicó por vez primera en oftalmología para fabricar cristales para gafas que pudiesen variar su transmisión para la luz visible de acuerdo con la intensidad luminosa que sobre ellas incide. La absorción de la radiación ultravioleta por el vidrio matriz es particularmente beneficiosa en esta aplicación, puesto que asegura que aunque el espesor de los cristales varíe (lentes correctoras) la acción estimulante y por tanto el oscurecimiento se producirá principalmente en una capa próxima a la superficie. El oscurecimiento es por tanto muy uniforme en toda la lente. Unas gafas de sol ideales cuya absorción luminosa variase con la intensidad de la radiación recibida es, por tanto, realizable en principio y se puede esperar que la velocidad de reacción de los primeros vidrios de esta clase aparecidos en el mercado pueda aumentarse en un grado tal que permita su adaptación inmediata a la luminosidad de cada momento. Otro campo de aplicación se encuentra en la conversión de imágenes; para ello se hace pasar luz ultravioleta a través de negativos. La luz ultravioleta oscurece una lámina de vidrio fototrópico de acuerdo con el ennegrecimiento de los distintos puntos del negativo, y la imagen producida de esta forma en el vidrio fototrópico puede ser leída mediante una fuente luminosa auxiliar.

También han sido obtenidos vidrios fototrópicos para holografía que, como es sabido, permite obtener imágenes en relieve. Un vidrio fototrópico para ser usado en holografía debe tener una elevada resolución. En este aspecto todos los vidrios fototrópicos son mejores que la mejor placa fotográfica, cuya resolución va unida al tamaño de grano fotográfico,

Es de esperar también el empleo de estos vidrios fototrópicos en el acristalamiento de edificios. Sin embargo, independientemente de las dificultades que presenta la fabricación de un vidrio de ventana de la composición requerida, el empleo de estos vidrios no resol-

vería del todo el problema del control de la irradiación solar en habitaciones con grandes superficies acristaladas porque el vidrio fototrópico se calienta y una parte considerable de este calor se transmite al interior. Para resolver este problema se han encontrado ya, en estos últimos tiempos, soluciones muy eficaces, que consisten en recubrir el vidrio plano usual con capas metálicas delgadas o vítreas parcialmente transparentes y de elevado poder de reflexión para la zona de la radiación solar de efecto térmico. De esta, forma se puede evitar un exceso de luz y calor por la acción del sol, y al propio tiempo disminuir sustancialmente el gasto de instalación y mantenimiento de aire acondicionado.

También los parabrisas de los coches han sido considerados como un posible campo de aplicación de los vidrios fototrópicos.

## V. LAS FIBRAS ÓPTICAS Y SUS APLICACIONES

### *Fundamentos teóricos*

En estos últimos años se han creado las condiciones técnicas necesarias para que un rayo luminoso pueda transmitirse a lo largo, de cualquier recorrido, empleando fibras de vidrio finas, de un modo análogo a como los alambres conducen la corriente eléctrica.

El fundamento teórico es el siguiente: Una fibra óptica es una realidad una fibra compuesta por: a) una parte central o núcleo, constituido por un vidrio de elevado índice de refracción,  $n_i$ , cuyo papel es transmitir la luz; su diámetro oscila entre 1 y 5 centésimas de milímetro; b) una envoltura de un vidrio de índice de refracción pequeño,  $n_e$  que rodea al núcleo y cuya finalidad es, por una parte, impedir que la luz salga de la fibra, y, por otra, asegurar la propagación del rayo luminoso.

Si en lugar de una fibra como la descrita tuviésemos una fibra constituida por un solo vidrio, la condición  $n_i > n_e$  se cumpliría también, puesto que el índice de refracción del aire es igual a 1. Si esto es así no se ve bien qué finalidad tiene la envoltura.

La explicación es que la fibra óptica se emplea en la práctica en forma de haces constituidos por algunos millares de fibras sueltas, o ensambladas por fusión. Si no existiese la envoltura, en los puntos

de contacto entre las fibras, el rayo luminoso pasaría de unas a otras y no habría posibilidad de transporte de información luminosa.

En cuanto a la influencia de la curvatura de la fibra sobre la trayectoria de los rayos luminosos está considerada como despreciable, ya que no interviene más que para radios de curvatura inferiores al radio de curvatura que puede tolerar la fibra de vidrio.

Para terminar el estudio de la trayectoria de la luz en la fibra diremos que con gran aproximación un rayo determinado, situado en un plano meridiano e incidiendo sobre la fibra bajo un ángulo  $\beta$ , saldrá de la fibra bajo el mismo ángulo.

### *Rendimiento luminoso*

Una de las cuestiones que presenta más interés para el usuario es conocer la relación entre la intensidad del flujo luminoso que sale de la fibra y la intensidad del flujo luminoso incidente, es decir, lo, que se llama *rendimiento luminoso*; sobre este índice influyen varios. factores, a saber: *a)* área eficaz, y *b)* pérdidas por reflexión y transmisión.

La manera de disponer las fibras, la forma de su sección y el espesor de la capa de vidrio de la envoltura influyen sobre la razón sección eficaz/sección aparente. En las condiciones más generalizadas la sección eficaz no representa más que el 78,4 por 100 de la sección aparente.

Las pérdidas debidas a los materiales empleados afectan también: al rendimiento luminoso y se clasifican en: 1.º) pérdidas debidas a la reflexión sobre las caras de entrada y salida, que importan aproximadamente el 4 por 100 del flujo luminoso incidente; 2.º) pérdidas debidas a la absorción del vidrio, que se estiman en el 0,5 por 100 por centímetro de vidrio atravesado cuando se emplean vidrios ópticos y para toda la gama de radiaciones del espectro, y 3.º) pérdidas debidas a la reflexión en la fibra; son pequeñas pero no despreciables cuando se trata de fibras muy finas y largas.

### *Aplicaciones*

Para mayor claridad expondremos las aplicaciones en las tres clases de conductores siguientes:

1. Conductores flexibles de luz.
2. Conductores flexibles de imágenes.
3. Conductores rígidos de luz y de imágenes.

Los *conductores flexibles de luz* están constituidos por un haz de fibras ópticas que están dispuestas en una envoltura de un material conveniente para el uso a que se destinan y montadas y pegadas en sus extremidades en conteras, la mayor parte de las veces metálicas. Este montaje permite pulir las fibras en sus extremos.

Estos conductores se pueden emplear para iluminar un objeto y para transmitir información luminosa.

Un caso muy interesante de iluminación de un objeto lo constituyen los sistemas endoscópicos. En éstos, los conductores de fibras ópticas transportan la luz desde un manantial luminoso situado fuera del endoscopio hasta la extremidad distante del mismo.

En relación con esto debe subrayarse que el deseo de los médicos de transmitir luz e imágenes a lo largo de sistemas flexibles dio, desde un principio, al desarrollo de las fibras ópticas, un gran impulso. La técnica médica fue en consecuencia la primera en emplear prácticamente las fibras ópticas.

En comparación con los sistemas endoscópicos tradicionales, las ventajas son las siguientes:

1.<sup>a</sup>) La luz es emitida por el conductor sin desprendimiento de calor. En los sistemas clásicos para observar una cavidad o conducto en el cuerpo humano había que deslizar una fuente luminosa hasta el lugar de observación, dicha fuente tenía que ser pequeña, pero al propio tiempo de gran potencia. Esto llevaba consigo una elevada temperatura de la lámpara, con todas las consecuencias inherentes a este hecho, así como una corta duración de la misma. Si se piensa además que precisamente la introducción y extracción de las sondas de exploración y tratamiento es particularmente difícil y a

veces también desagradable y dolorosa, para el enfermo, valoraremos las consecuencias de que se estropee la lámpara durante una observación. Con los instrumentos a base de fibras ópticas no se presentan estos inconvenientes, y la iluminación que con ellos se puede obtener en la actualidad es suficiente incluso para tomar películas en color, por ejemplo, del interior del estómago.

2.<sup>a</sup>) Los endoscopios de fibras ópticas no son frágiles.

3.<sup>a</sup>) La sección del conductor de fibras es constante a lo largo de todo el instrumento. Así, pues, no es necesario el aumento del diámetro en el extremo distante, es decir, en la punta del instrumento, como ocurre en los métodos de iluminación usuales.

4.<sup>a</sup>) Su coste es menor y permite una difusión mayor.

Los endoscopios ya fabricados o en curso de realización son numerosos, y así tenemos broncoscopios, laringoscopios, rectoscopios, esofagoscopios, cistoscopios, gastroscopios, coledoscopios, etc.

Otras aplicaciones médicas de las fibras ópticas son el diagnóstico y terapéutica con luz ultravioleta y la destrucción de gérmenes con esta misma radiación.

Existen también endoscopios industriales que han encontrado aplicación en numerosas ramas de la técnica, sobre todo en aquellos casos en que no es posible una inspección ocular directa. En la actualidad se hacen inspecciones, en serie, de motores con endoscopios flexibles, que permiten observar muy bien las camisas de los cilindros sin desmontar las cabezas de los mismos. Para ello se introduce un endoscopio cuyo grosor sea el de un dedo por el orificio -de la bujía de encendido. Otra aplicación, en la tecnología general, es la separación entre la fuente luminosa y el objeto iluminado, que es importante, sobre todo en técnicas muy finas. Si la iluminación se hace por el sistema clásico, el calor de la lámpara da lugar, en ocasiones, a desajustes desagradables, por ejemplo, en los aparatos de medida. Con las fibras ópticas se evita este inconveniente, y por ello se emplea en mecánica de precisión, relojería, orfebrería, etc., que exigen una iluminación intensa, fría y puntiforme.

Resulta también muy interesante la posibilidad de poder transmitir la luz producida por un foco luminoso único a diferentes puntos mediante conductores a base de fibras ópticas; en los automó-

viles, la guantera, el cenicero, el encendedor, etc., se iluminan de esta forma.

La transmisión de información luminosa fue uno de los primeros campos de aplicación de la fibra óptica. Resulta, en efecto; muy sencillo captar una señal luminosa y transmitirla a distancia al abrigo de fenómenos luminosos marginales. Por ejemplo, es particularmente interesante el caso de observación de fenómenos peligrosos, tales como las explosiones y también el que se presenta cuando hay que obtener información en medios inaccesibles.

*Los conductores flexibles de imágenes* se pueden definir con la misma definición que los conductores flexibles de luz, añadiendo, simplemente que las fibras de vidrio han de estar ordenadas en sus conteras. En efecto, si se considera la imagen como un conjunto de tantos puntos de intensidad luminosa diferentes como fibras tenga el conductor, resulta indispensable para que haya transporte de imágenes que estas fibras se encuentren en posiciones idénticas a la entrada y a la salida.

La característica más importante de estos conductores es nuevamente la flexibilidad, ya que desde el punto de vista óptico los rendimientos son inferiores a los obtenidos con la óptica tradicional

Otro punto importante que hay que tener en cuenta es el siguiente: la imagen es transportada punto a punto desde la cara de entrada a la de salida, y por ello la profundidad de campo de estos conductores es prácticamente nula. Por tanto, si el conductor óptico no puede ponerse en contacto con el objeto, habrá que suministrarle un objetivo cuyo papel será formar una imagen del objeto sobre la cara de entrada de las fibras.

Por otra parte, habida cuenta de la débil sección del conductor resulta con frecuencia indispensable un ocular para la observación de la imagen a la salida.

El campo de aplicación por excelencia de los conductores de imágenes resulta ser también el de la endoscopia, tanto médica como, industrial.

### *Conductores rígidos*

En los conductores flexibles las fibras no están ensambladas más que en sus extremos, empleando para ello materiales no vítreos. En los conductores rígidos lo están en toda su longitud, ya sea empleando un material no vítreo ya sea por soldadura entre ellos. Las aplicaciones de esta clase de conductores son de una diversidad extraordinaria; en efecto, estos conductores permiten:

1.º Modificar la sección a lo largo del conductor, tanto en forma como en magnitud, lo que permite transformar información lineal en información rectangular o circular. Una aplicación concreta de esto es la posibilidad de construir lupas de gran aumento con unas dificultades mínimas. Los dispositivos empleados se presentan en forma de conos y el aumento es igual a la relación del diámetro de las bases.

2.º Darles un perfil no rectilíneo, lo que constituye un medio extremadamente sencillo de transportar una imagen a lo largo de distancias considerables salvando los obstáculos que existan en el trayecto. La gran facilidad de montaje de un conductor de esta clase hace que se les prefiera a los sistemas a base de prismas en determinados dispositivos ópticos.

3.º Tallar las caras de entrada y salida de acuerdo con los perfiles habituales en óptica.

En los conductores rígidos, por construcción, la imagen transmitida puede ser captada en cualquier punto de su recorrido, lo que no ocurre en el conductor flexible, en donde las fibras no está ordenadas más que en sus extremos.

Esta característica se emplea en los problemas de tratamiento y de corrección de la curvatura de campo. En efecto, en un dispositivo óptico o electrónico la imagen formada sobre una superficie curva y no desarrollable, como en ciertos tubos catódicos, no puede ser registrada sobre una superficie plana sensible sin la ayuda de dispositivos ópticos relativamente complejos, que introducen inevitablemente distorsiones.

En cambio, el proceso resulta muy sencillo si la imagen se forma

sobre la superficie curva convenientemente tallada de una placa de fibras, en tanto que la otra superficie de la misma es plana.

Con lo dicho creemos haber dado una visión panorámica de las principales aplicaciones de estos nuevos conductores de fotones y haber puesto de manifiesto suficientemente que las fibras óptica se sitúan por sus posibilidades al nivel de la óptica tradicional. Es necesario, asimismo, percatarse de que en las nuevas perspectivas abiertas a la óptica por estos nuevos conductores se requiere muy frecuentemente, por no decir siempre, el empleo de los dispositivos clásicos, tales como objetivos, condensadores, etc.

Los problemas que se plantean a los fabricantes se salen del marco de esta exposición. Señalaremos, sin embargo, que son arduos. y que suponen por parte de ellos un esfuerzo de investigación considerable, tanto sobre las características de los vidrios, como sobre los procedimientos de fabricación.

## VI. EL COLOR EN LOS ENVASES DE VIDRIOS PARA ALIMENTOS

Una práctica de siglos y una abundante bibliografía han puesto de manifiesto que el vidrio empleado en la fabricación de envases posee las tres importantes propiedades siguientes: 1) Una gran impermeabilidad a los gases; 2) elevada inercia química, y 3) transparencia en el campo del espectro visible y posibilidad de colorearse en una gama infinita de colores y matices con efectos estéticos maravillosos.

La impermeabilidad del vidrio a los líquidos y gases es extraordinaria; hace unos años se descubrieron en el fondo del mar, a lo largo de la costa inglesa, botellas de cerveza inalteradas, que habían sido llenadas doscientos cincuenta años antes.

La segunda propiedad garantiza la ausencia de cesiones por parte del vidrio, capaces de alterar las características orgánicas de alimentos (vino, cerveza, leche, aceite) y de medicamentos, incluso después de largos períodos de contacto.

La transparencia del vidrio permite apreciar enseguida la presencia de alteraciones o de poner de manifiesto enturbiamientos.

Sin embargo, esa misma transparencia puede ser nociva si no se usa correctamente y permite el paso de radiaciones a las que el

producto alimenticio o el medicamento sea particularmente sensible, dando lugar a su deterioro. Por ello se han llevado a cabo trabajos de investigación para que la elección del color en las botellas no se base sólo en la tradición o en la práctica, sino que obedezca a criterios científicos determinando exactamente las longitudes de onda más nocivas en cada caso y la clase de vidrio capaz de absorberlas. en su mayor parte.

Se sabe que los vidrios industriales ofrecen una óptima protección a las radiaciones ultravioletas hasta las longitudes de onda del orden de 300  $\mu\mu$ . Se ha demostrado, sin embargo, que las radiaciones perjudiciales para un producto alimenticio no son en muchos-casos sólo las radiaciones ultravioletas, sino también una gran banda, de radiaciones en el espectro visible, que la mayoría de los autores, sitúan entre los 300 y 500  $\mu\mu$ ., aunque algún otro investigador la extienda hasta 560  $\mu\mu$ .

Según un exhaustivo trabajo de Kriz y Kaderavek resulta que para la cerveza las radiaciones entre 420 y 520  $\mu\mu$ . son las responsables de los cambios de sabor, así como de los enturbiamientos. Entre 430 y 460  $\mu\mu$ , se encuentran las radiaciones que provocan alteraciones en los aceites alimenticios, ya que catalizan las reacciones, de oxidación de los ácidos grasos insaturados con la consiguiente pérdida de calidad del producto. En ese mismo intervalo se encuentran las radiaciones nocivas para muchos productos farmacéuticos.

En el caso de la leche, las radiaciones nocivas son las ultravioletas y las alteraciones afectan particularmente a la riboflavina y al ácido ascórbico. Sin embargo, como en la práctica las botellas de leche no están sometidas mucho tiempo a la acción de la luz solar, el vidrio blanco resulta suficientemente protector.

Un vidrio ideal para recipientes tendría que tener, por tanto, una curva de transmisión tal que absorbiese completamente todas las radiaciones hasta 560  $\mu\mu$  y dejase pasar también completamente todas las otras longitudes de onda. Esta segunda condición resulta también muy útil en la práctica, porque de otra forma el recipiente de vidrio sería demasiado oscuro y no permitiría inspeccionar su contenido, posibilidad que, como ya se ha mencionado, es una de las principales ventajas del vidrio y también porque desde el punto de vista de la fabricación del vidrio, si éste es muy oscuro, presenta

baja transmisión de calor, aumentando con ello las dificultades de fusión y de elaboración.

Las curvas de trasmisión de los principales tipos de vidrio usados hoy en día en la fabricación de recipientes demuestran que si bien no se ha llegado al resultado ideal se dispone en la actualidad de vidrios para botellas que se comportan de manera muy satisfactoria.

Además, si en vez de buscar soluciones de utilidad general, buenas para la mayoría de los líquidos envasados, se perfeccionase la investigación y se especificase la longitud de onda para un cierto producto, serían posibles soluciones todavía más exactas.

Hoy la ciencia vidriera, mediante la teoría del campo de los ligandos, que relaciona la modificación del estado cuántico con la naturaleza y con la simetría alrededor del átomo central, de los átomos o ligandos vecinos, logra prever muy bien la influencia que la presencia de un ion o de más iones colorantes ejercerá sobre la capacidad de absorción de un vidrio y, por tanto, está en situación de fabricar vidrios con absorción perfectamente controlada.

El hierro, el manganeso y el cromo se encuentran entre los mentos cromógenos más empleados en la fabricación de vidrios para botellas. Empleando simultáneamente dos o más elementos se obtiene una gama extensísima de combinaciones, aumentada todavía por -el hecho de que las propiedades de absorción de un vidrio no sólo son modificables por introducción de iones cromógenos, sino también por la creación de suspensiones coloidales o dispersión de cristales submicroscópicos. Un ejemplo de esto último es la variedad de *vidrio ámbar* obtenido por adiciones de azufre y carbón, siempre que se cumplan ciertas condiciones de fusión. La curva de transmisión de un vidrio ámbar demuestra que es uno de los vidrios más interesantes por su versatilidad de uso y su pequeño coste.

No se deben tampoco olvidar los magníficos resultados y las soluciones todavía más perfectas que se pueden obtener empleando otros elementos como el cerio: sin embargo, el coste de estos elementos representa, por lo menos actualmente, un freno para su empleo masivo, ya que el factor económico no se puede subestimar en una producción en serie. El cerio permite obtener vidrios que siendo casi incoloros poseen una gran absorción de las radiaciones nocivas.

Para agotar todas las posibilidades del vidrio en lo concerniente a la protección de la luz se están realizando en todos los centros especializados numerosas investigaciones tendentes a obtener: a) vidrios incoloros pero con elevado poder de absorción; b) vidrios cuya absorción varíe en función de la luz incidente, y, finalmente, vidrios tratados superficialmente para reflejar selectivamente las longitudes de onda nocivas.

### CONSIDERACIÓN FINAL

Para terminar solamente me resta decir que a las aplicaciones reseñadas en este discurso se podrían añadir otras muchas también del mayor interés, tales como los *vidrios ópticos transparentes a las radiaciones infrarrojas*, que ha permitido la construcción de aparatos que desempeñan un importante papel en la técnica aeronáutica: los *vidrios de fosfato*, que contienen compuestos de plata y que permiten detectar, por ser luminiscentes, la existencia de radiaciones de elevada energía en los procesos nucleares con la consiguiente seguridad para los que trabajan en ellos; los *vidrios de plomo estabilizados* con cerio, que se emplean en las ventanas protectoras de las instalaciones de rayos X y en la cámara de burbujas: los *vidrios especiales para pantallas de televisión*, que deben cumplir una serie de requisitos relativos a calidad óptica, color, amortiguamiento de los rayos X producidos, superficie de excelente calidad y elevada resistencia al choque térmico: los *vidrios de calcogenuros semiconductores*, de gran importancia en el campo de la electrónica.

Por otra parte, otras nuevas aplicaciones se vislumbran en el porvenir y entre ellas quizás las más espectaculares se relacionan con las fibras de vidrio; se prevé la construcción de carrocerías de coche y de canoas de gran ligereza empleando una elevada proporción de fibras de vidrio, asimismo se espera aumentar mucho la resistencia al desgaste de los neumáticos incorporando a los mismos el citado material: también se realizan investigaciones para aumentar la resistencia mecánica de los hormigones mediante la adición de las indicadas fibras.

Incluso se estudia la posibilidad de sustituir los cables metálicos por fibras de vidrio en la transmisión de conversaciones telefónicas.

Todo lo antedicho demuestra bien claramente que este interesante material que es el vidrio, no solamente es fundamental en la tecnología moderna, sino que se prevé para él un campo de aplicaciones futuras cada vez más amplio y brillante.

Muchas gracias señoras y señores por su benevolente atención.

#### BIBLIOGRAFÍA

##### I. Vidrios de elevada resistencia mecánica

OROWAN, E.: *Inst. of Engineers and Shipbuilders in Scotland 1945-1946*, 89, 165.

GRIFFITH, A. A. *International Congress for Appl. Mech.*, Delft. 1924.

SILVESTROVITCH y BOGUSLAAVKII: *Doklady Akad. Nauk SSSR*. vol. 129, núm. 6, p. 1362. 1959.

KISTLER, S. S. *Strengthening by ion exchange*. «J. Am. Cer. Soc.», 1962, 45 (2), 59

ERNSBERGER, F. M. *Strength of Glasses*, «Proc. 8 Intern. Congress on Glasses»; Londres (1969).

##### II. Vidrios resistentes a los cambios de temperatura, vitrocerámica

BUESSEM, W. R.: *Die Temperaturwechselbeständigkeit Keramischer Massen*, «Sprechs.», 93 (1960).

KINGERY, W. D.: *Factors affecting thermal stress resistance material* : «J. Am. Ceram. Soc.», 38 (1905).

TAMMANN, G.: *Der Glaszustand*, L. vol. Leipzig, 1933.

STOOKEY, S. D.: *Catalyzed Crystallization of Glass in Theory and Practice*, «Glastech. Ber.», 32K (1959).

MCMILLAN, P. W.: *Glass Ceramics*, «Academic Press», Londres y Nueva York (1964).

FERNÁNDEZ NAVARRO, J. M<sup>º</sup>: Nucleación y cristalización en vidrios. «Bol. Soc. Esp. Cer.». 7 (1968) 4, 4.31-458.

VOGEL, W.: *Struktur und Kristallisation der Gläser*. Ed. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig. 1965.

ALEIXANDRE, V., GONZÁLEZ PEÑA, J. M. y RINCÓN, J. M<sup>º</sup>: *Cristalización en algunos vidrios del sistema  $Li_2O.MgO.Al_2O_3.SiO_2$* . «Bol. Soc. Esp. Ceram.». 10 (3) 341-365 (1971).

BEREZHOI, A. J.: *Glass Ceramics and Photo Sitalls*. «Plenum Press». Nueva York y Londres (1970).

HERCZOG, A.: *Ferroelectrics and Ferrites Crystallized from Glass*. «Glass. Ind.» 48. 445-450 (1967).

BEALL, G. H. MONTIERTH, M. R. y SMITH, G. P.: *Machinable Glass Ceramics*.

2. *Internationalem Symposium über elektromagnetische Fenster*. (1971). Paris.

MÜLLER, G.: Glaskeramische Werkstoffe. «Schott Information». 2, 1972.

FERNÁNDEZ ARROYO, G. y M. PROD'HOMME: *Estudio de la devitrificación de vidrios del sistema  $P_2O_5-Al_2O_3-Li_2O$* . «Bol. Soc. Esp. Ceram. y Vidrio», 5 (1972).

### III. Vidrios laser: propiedades y aplicaciones

SNITZER, E.: *Glass Lasers*. «Glas Ind.», 498-557 (1967).

PEARSON, A. D. y PETERSON, G. E.: *Energy Exchange Process and Lasser Oscillation in Glasses*. Proc. 7. Int. Glass Cong. Bruselas (1965).

BAUMHACKER, H. y SACHSENMASSER, P.: *Nd-Glaslasersystem zur Erzeugung hochionisierter Plasmen*. Laser H. 3. (1971).

NEUROTH, H.: *Eigenschaften und Anwendungen der Glaslaser*, «Schott Information», 1, 1972.

### IV. Vidrios Fototrópicos.

GLIEMEROTH, G. y MADER, K. H.: *Phototropic Glass*, «Angew. Chem. Internat.», Edit., vol. 9 (1970).

ARMISTEAD, W. H. y STOOKEY, S. D.: *Science* (Washington), 144, 150 (1964).

ARAUJO, R. J. y STOOKEY, S. D.: *Glass Ind.*, 687 (1967).

BLUE, M. D. y CHEN, D.: *Electronics*, 42, 108 (1969).

### V. Fibras ópticas

RIMKUS, W.: *Zur Anwendung der Faseroptik*, «Glass Instrum. Techn.» (1970).

MARTIN, B. W.: *Les fibres optiques et leurs applications*.

### VI. Vidrios coloreados para recipientes

GOTTARDI, V.: *Validità dei contenitori di vetro per olii alimentari* «La Rivista italiana delle Sostanze Grasse», XLII (1966).

ANÓNIMO: *Scelta del colore della bottiglie per il vino*. «Industria Agrar.», vol. V (1967).

JOSEPHSON, D.: *Some observati n regarding the effect of various wavelengths of milk*, «J. Dairy Sci.», 1964.

PAOLETTI, G.: *Possibilità di controllo del colore delle bottiglie da birra*. «Birra e MaltO», anno XIV (1967).

**DISCURSO  
DE  
CONTESTACION**

**POR EL EXCMO. SR. D. MANUEL  
LORA TAMAYO.**

Excelentísimos señores :

Señoras y señores:

Recibir el honroso encargo de dar la bien venida a un nuevo compañero que se integra en nuestra Corporación ha de ser siempre motivo de agradecimiento para el Académico que lo cumple, pero no sólo por la distinción presidencial que representa, sino por la oportunidad que le brinda de ejercer un padrinazgo colegial. Si esto es así, en cualquier caso, para el que os habla ahora, sube de punto el reconocimiento, porque se trata de recibir en vuestro nombre a un amigo entrañable, al que me siento unido con todo lo que esa condición lleva de carga afectiva, por lazos indestructibles de comunidad vocacional y de sincera y leal colaboración.

Vicente Aleixandre llega a nuestra Academia, desde una situación de Académico correspondiente que data de 1942, con un denso historial que le acredita de maestro, de investigador y de hombre de acción con capacidad creadora y criterio de gobierno firme y comprensivo. Su sencillez, su natural modestia, acaso ocultan estos valores ante un vidente superficial, pero la calidad de su obra múltiple, los hitos que jalonan su vida y la vasta honestidad que se respira en su trato dan la justa medida de una superior categoría.

Valenciano de origen, es hijo predilecto de Alfafar, su pueblo natal, ultima la Licenciatura en Ciencias Químicas con premio extraordinario en la Universidad del Turia, un año después que la de Farmacia en la de Madrid, para encontrarse a los veinte años con ambos títulos y una fuerte vocación docente, sin duda influido por las virtudes académicas de maestros, como el inolvidable Don Antonio Ipiens, que fue miembro ilustre de esta Real Academia y profesor suyo. Ejerció en una etapa de su vida la profesión farmacéutica; pero su inclinación a la docencia le llevó pronto a ser Catedrático de Física y Química en el Instituto de Alcoy para pasar tres años después, En 1935, y a los veintiséis de edad, tras unas oposi-

ciones brillantísimas, al Instituto del Cardenal Cisneros, de gloriosa tradición, junto con el de San Isidro, en la vida académica, por el superior prestigio de que gozó siempre su profesorado.

Permitidme, Sres. Académicos, una digresión evocadora. En los años en que Vicente Aleixandre se iniciaba, las cátedras de Enseñanza Media gozaban del prestigio suficiente para atraer la apetencia de los mejores Licenciados de cada promoción. Presenciar ejercicios de oposición (¡nefasta diversión, pero todavía entre nosotros necesaria!) constituía un atrayente aprendizaje para los alumnos universitarios que orientaban por ese camino su futura actividad profesional. Hoy, la necesaria multiplicación de Centros y, con ella, la de profesores, da también carácter masivo al proceso, resta importancia a los concursos, desvía de ellos la atención de los mejores y pone en peligro el nivel de la enseñanza impartida. Los nombres de los promovidos a Catedráticos de Instituto en Madrid, como lo fue Vicente Aleixandre tenían entonces crédito abierto, que solían consolidar después con su trabajo posterior.

Y así fue, en efecto, con él. Sin descuido alguno para su quehacer académico, que él revalorizó con obras didácticas originales, en las que se han formado numerosas promociones, inició la vía investigadora, que había de proseguir con éxito creciente en resultados y realizaciones. Empezó aquélla en el Instituto de Física y Química, junto a los profesores Enrique Moles y Miguel Crespi, y colaborando en la dirección de trabajos seguidos por éstos sobre «Adsorción de gases por las paredes de vidrio», hizo sus primera publicaciones, dentro de la serie que dio carácter a la escuela científica de aquellos investigadores. Después de nuestra guerra, en 1943 y 1945, alcanzó, respectivamente los Doctorados en Ciencias Químicas, con premio extraordinario, y en Farmacia.

Es por esta época cuando conocí personalmente a Vicente Aleixandre. Llegado yo a Madrid desde Sevilla, en 1942, los laboratorios que me asignaron en el Instituto de Física y Química eran fronterizos a los del Instituto de Edafología, creación personalísima del profesor José María Albareda, en el que reanudó sus trabajos Aleixandre. Las horas de laboratorio son propicias al diálogo amistoso y éste se producía con frecuencia entre él y yo. por la proximidad, aunque nos movíamos en campos distintos. Así empecé a valorarle y

darme cuenta de la energía potencial que acumulaba en su aparente sencillez; energía nunca perdida en la discusión ni la discordia, sino canalizada siempre en lo que podía animar una inquietud constructiva,

Su primera publicación en los dominios de la ciencia del suelo, que el talento de Albareda supo dilatar, fue en 1947, sobre arcillas españolas, y desde ella prosiguió sin interrupción, en la Química de los silicatos, que encauzó después en un orden aplicado a la Cerámica y el Vidrio, independizándose primero como Departamento del Patronato «Juan de la Cierva», y más tarde, en 1964, lo ensancha a Instituto de esta especialidad, del que ha sido creador y continúa siendo su director actual. Se acercan al centenar el número de los trabajos de investigación publicados, varios en revistas extranjeras, crea con ellos una auténtica escuela de investigación, con suficiente relieve en el exterior (donde era ya conocido por las estancias en distintos Institutos), para alcanzar cargos directivos en organizaciones internacionales, como el de presidente de la Asociación Europea de Cerámica, que ostentó desde 1968 a 1971, y de la que continúa siendo miembro en su Comité Directivo. Entre nosotros, de 1964 a 1972, ha presidido la Sociedad Española de Cerámica, creación suya, por la que ha logrado conjuntar a la industria en torno a su Instituto de investigaciones; ideal siempre perseguido para lograr el interés de aquélla, en simultánea apreciación de la servidumbre que debe a la investigación fundamental.

Creo que, con lo expuesto, que podía ilustrar, aunque lo omito por innecesario, con una detallada enumeración de otros honores y distinciones, como hijo adoptivo y Medalla de Honor de varias ciudades, Grandes Cruces del Mérito Civil y Alfonso el Sabio, etc., ha quedado de manifiesto esa doble vocación de magisterio e investigación, reafirmada cada día en un crecimiento de posibilidades a que él mismo fue abriéndose con su capacidad de creación.

\*\*\*

Pero hay una etapa en la vida de nuestro compañero a la que, por sentirme responsable de ella, quiero referirme de modo especial. Vicente Alexandre fue Director general en el Ministerio de Educación y Ciencia durante el tiempo que yo hube de regirlo. Con nombres distintos, congruentes con cambios estructurales en el Ministerio,

aunque sin variación esencial en la función, él fue, primero, director general de Enseñanza Laboral; después, al transformarse ésta, de Enseñanza Profesional, y finalmente, en la reorganización administrativa general de 1967, director general de Enseñanza Media y Profesional. Colaborador de siempre, y desde la primera hora hasta la última.

Acaso porque se diluye, con frecuencia, en compromisos u oportunistos políticos, no se valora suficientemente la figura de un Director General, que ha de ser, en todo caso, el especialista de su sector, capaz de aportar sus conocimientos y experiencia al trabajo de planificación conjunta que cristaliza en una obra ministerial. La trama administrativa es compleja, por su propia naturaleza; pero de ella hay que resaltar los nudos en que se insertan aquellas personas vinculadas permanentemente a las tareas de un Ministerio en una función determinada y son, por ello, de valor inestimable para encontrar en la consulta, el consejo y la advertencia oportunos, cuando éstos se ejercen rectamente con la honradez que debe presidir una opinión emitida sin temor a discrepar de la que pudiera tener el que, con honradez también, la solicita. Un Director General que conozca la filosofía de su especialidad, rodeado de unos funcionarios con dominio de la técnica administrativa, constituyen la más preciada asistencia que puede desear quien haya de llevar la plena responsabilidad de un gobierno. y Alexandre fue un gran colaborador en la tarea común, que supo utilizar y dirigir los elementos a su alcance para el mejor acierto en la programación a su cargo.

No ya sus condiciones personales, sino su conocimiento de la enseñanza laboral, a cuyo desarrollo había contribuido a través de comisiones y encargos especializados, su ininterrumpida actividad docente y, dentro de ella, sus acreditadas dotes de gobierno como director del Instituto del Cardenal Cisneros, hacían para mí singularmente valiosa su presencia en la Dirección General que le fue confiada. y con entrega absoluta, sacrificando su vocación inmediata, porque conocía suficientemente el honroso sacrificio de los demás, aceptó el encargo para rendir desde el primer momento con entusiasmo y decisión lo mejor de su esfuerzo en la apremiante tarea de cada día y en las más reposadas de planificación que hubo de llevar a cabo en el dominio de su competencia para el Primer Plan de

Desarrollo Económico y Social que inició y ultimó, así como la del II Plan, que dejó en las primicias de su puesta en práctica. Con independencia de su contribución a la obra legislativa, a la que Levó una radical transformación de la enseñanza profesional, con un meditado estudio de nuevas especialidades, que representan un positivo avance social, la publicación sobre «Las enseñanzas Profesionales en España» da buena cuenta de lo realizado en este período, durante el cual se incrementaron en ciento cincuenta y cuatro mil los puestos escolares en los Institutos Laborales, después llamados de Enseñanza Técnica, y en las Escuelas de Maestría, con la creación de cuarenta y seis nuevos centros, entre los primeros, y cuarenta y tres, entre los segundos, renovaciones completas en treinta y seis más, y una asistencia canalizada a la iniciativa privada, que representa un cuarenta por ciento del incremento. El proyecto del II Plan, que quedó planificado, se dirigió, fundamentalmente, a las nuevas Escuelas de Ingeniería Técnica que habían ido creándose. Y todo ello, en un régimen de austeridad económica, que cuidó siempre, como los demás colaboradores en la obra común, con ejemplar preocupación.

Tengo, pues, motivos suficiente para reafirmar mi aseveración previa de la firme capacidad de gobierno a iniciativa que, en este otro aspecto de su vida, puso a contribución cumplidamente

Una costumbre inveterada, cuya omisión podría tomarse por descortesía, obliga a glosar en este acto el discurso del beneficiario. Soy reiterativo cuando digo que fuera menester desimpresionarse de esta idea, porque en ocasiones resulta torturante decir algo más, distinto de lo que, aquél dijere, cuando su preparación es la mejor, sus conocimientos los más vastos y el trabajo que se lee es exhaustivo en su objetivo. Si ello es así, en cualquier caso, lo es más aún cuando ambos intérpretes, el que llega y el que recibe, están muy distanciados en sus campos de trabajo. Porque así pienso, y sin llegar a la heterodoxia de lo establecido, voy a limitarme a recoger aquí brevemente las impresiones y sugerencias que dejó en mí, cultivador de otra parcela, la lectura del discurso, desde distintos ángulos de visión.

En primer lugar, debo decir que he aprendido mucho con ella de los espectaculares avances que ha alcanzado la tecnología del vidrio en el momento presente: progreso inusitado que se está llevando a cabo en un plano no superior a los veinticinco años últimos. Con una sistemática de maestro y una claridad de buen expositor, Aleixandre ha hecho desfilar ante nosotros los grandes capítulos de las aplicaciones del vidrio, salpimentados con los principios científicos que vienen informando las realidades alcanzadas y las perspectivas que se ofrecen.

La industria del vidrio, como la de la cerámica, interconexas entre ciertos límites y estados, se ha desarrollado hasta época muy reciente con una técnica de recetario y en no pocos países con una economía de talleres. Ha sido precisa la conjunción de la física, la óptica y la mecánica al más alto nivel, para que aquélla alcance la categoría y el rango que hoy tiene en los variados tipos de aplicaciones que habéis podido oír.

Ofrece, sin duda, la nueva tecnología del vidrio, y ésta es una sugerencia que me complace subrayar, un interesante ejemplo de múltiple efecto de lo que la industria debe a la investigación fundamental. Fueron los laboratorios universitarios y los de Institutos de investigación, como no podía ser menos, pioneros en el desarrollo actual, y no porque necesariamente se proyectaran en la inmediata realización útil, sino porque abordaban problemas fundamentales: ¿cuál es la estructura interna del vidrio, sus enlaces, sus agrupamientos? Aún nos preguntamos ¿el vidrio es un líquido o un sólido? Del conocimiento aproximado de su estructura habéis visto cómo se llega a la influencia del cambio iónico en uno de sus temas preponderantes de investigación, el del aumento de la resistencia mecánica, que Aleixandre comenta ampliamente.

Es interesante atestiguar cómo de las recetas de transmisión hereditaria para el color de los vidrios se pasa a la comprensión científica: hay colores, como los determinados por iones de hierro, que afectan a la estructura electrónica; en otros casos, son soluciones coloidales de metales preciosos o se producen por transferencia electrónica o por separación de fases. Estas interpretaciones y la terminología que las acompaña eran desusadas; pero abrieron los ojos a una industria que se dio cuenta del provechoso giro que

podía dar a su producción. El número de investigadores se multiplicó por diez, sobre todo en países como Estados Unidos, Rusia, y Japón, y lo que es más importante, se estimuló ampliamente la investigación en la propia industria, que hoy rinde ya un elevado porcentaje de investigación fundamental!

Y es que los conocimientos existían, pero se habían quedado a nivel académico, y una nueva visión emergida de ellos los concentra y orienta en una nueva tecnología. Todo acontecer científico, por distante que parezca, de una aplicación puede ser aprovechado aún en objetivo diferente al que con su investigación se persiguiera. No es ninguna novedad ciertamente el comentario; pero es que, cuando leía esa parte del discurso sobre el vidrio laser, con todas sus numerosas derivaciones actuales hasta la obtención del plasma y logro de la fusión nuclear, que acabáis de oír, consideraba sorprendente la inesperada utilización de elementos de las tierras raras como activadores que producen efecto la ser al ser incorporado a vidrios de distintos tipos.

He aquí actuante en bien novedosa aplicación esa enmarañada complejidad de las tierras raras, sobre las que se trabaja desde finales del siglo dieciocho, en que fueron halladas en una extraña roca negra de la pequeña localidad de Ytterby, próxima a Estocolmo, para tortura y honor de inorgánicos y analistas en un constante desdoblamiento de óxidos de nuevos elementos, que continuamente alumbran, con nuevos métodos, nuevas especies. Con razón ha escrito Baskerville: «Las tierras raras nos desconciertan en nuestras investigaciones, embrollan nuestras especulaciones y nos persiguen hasta en nuestros sueños. Se nos ofrecen como un mar desconocido y murmurando extrañas revelaciones y posibilidades». En la historia del descubrimiento de los nuevos elementos, que fueron separándose y con frecuencia se rebautizan, hay toda una teoría de nombres de científicos en agotadora labor de aislamiento e identificación. No quiero omitir, ya que a esto aludo, el nombre de Urbain, químico francés, contemporáneo, que moría en 1938, al que conociéramos en Madrid durante una larga estancia más de uno de los presentes, y tiene en su haber el desdoblamiento de la «iterbia» en «neoterbia» y «lutecia».

Pero exhumando yo a este propósito alguna lectura anterior, y en

orden a aplicaciones afines, s lo destaca en los años anteriores la utilización del cerio en la protección de la lámpara de incandescencia con la «camisa Auer» y la del didimio en un cristal especial para proteger los ojos de los sopladores de vidrio, porque deja paso a las luces de cualquier color, a excepción de la del sodio, emitida por el vidrio caliente. He aquí ahora algo tan nuevo como el laser, tan distante de la problemática química inicial de las tierras raras, conocidas en su conjunto desde hace dos siglos, utilizando el neodimio, el erbio, etc., que habéis oído, como activadores para alcanzar este trascendental carácter en el vidrio.

Conjunción de investigaciones desde distintas procedencias, archivadas algunas en el curso de los años y renacidas a una nueva existencia en los más modernos ingenios y realizaciones. Esto nos lleva a un último comentario, muy de actualidad en el mundo de la investigación y el desarrollo; la gravedad que ha representado para el progreso técnico la distancia que media entre un descubrimiento científico y sus posibilidades de aplicación, que en no pocas ocasiones tiene su origen en el divorcio existente entre la investigación y la industria, entre los hombres del laboratorio y los hombres de la empresa.

Pienso que este distanciamiento se supera ya en el mundo, y que está en vías de superarse en nuestro país; pero para que éste se produzca con eficacia no puede perderse de vista, como nos muestran los numerosos ejemplos que hablan por sí mismos, que la tecnología es necesariamente tributaria de la Ciencia y, por ello, la investigación fundamental ha de cultivarse siempre, en cualquier especialidad de aplicación que se pretenda desarrollar. Bien demostrativo es que buena parte de la moderna investigación básica en vidrio, procede hoy de los laboratorios de investigación de la propia industria, como máximo acercamiento entre ambos polos, que han de unirse para que fluya la corriente de la creatividad. En esta línea de aproximación de la investigación a la industria actúa Vicente Aleixandre y su equipo de trabajo en el Instituto del Vidrio y la Cerámica, que él dirige.

Integrarse en nuestra Corporación un valor acreditado como el suyo, que ha puesto su magisterio, su vocación científica y su visión

clara de la proyección que ha de dar a ésta, al mejor servicio de un superior interés, ha de ser motivo de *goce* colectivo. Bien venido sea a esta Casa. Si le felicito como amigo, me felicito yo y nos felicitamos los miembros de esta Real Academia por contarle desde hoy entre nosotros.