



**TOGETHER**  
*for a sustainable future*

## OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50<sup>th</sup> anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



**TOGETHER**  
*for a sustainable future*

## DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

## FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

## CONTACT

Please contact [publications@unido.org](mailto:publications@unido.org) for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at [www.unido.org](http://www.unido.org)

07459-5

ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL

**EL VIDRIO  
Y LA  
FABRICACION  
DE VIDRIO**



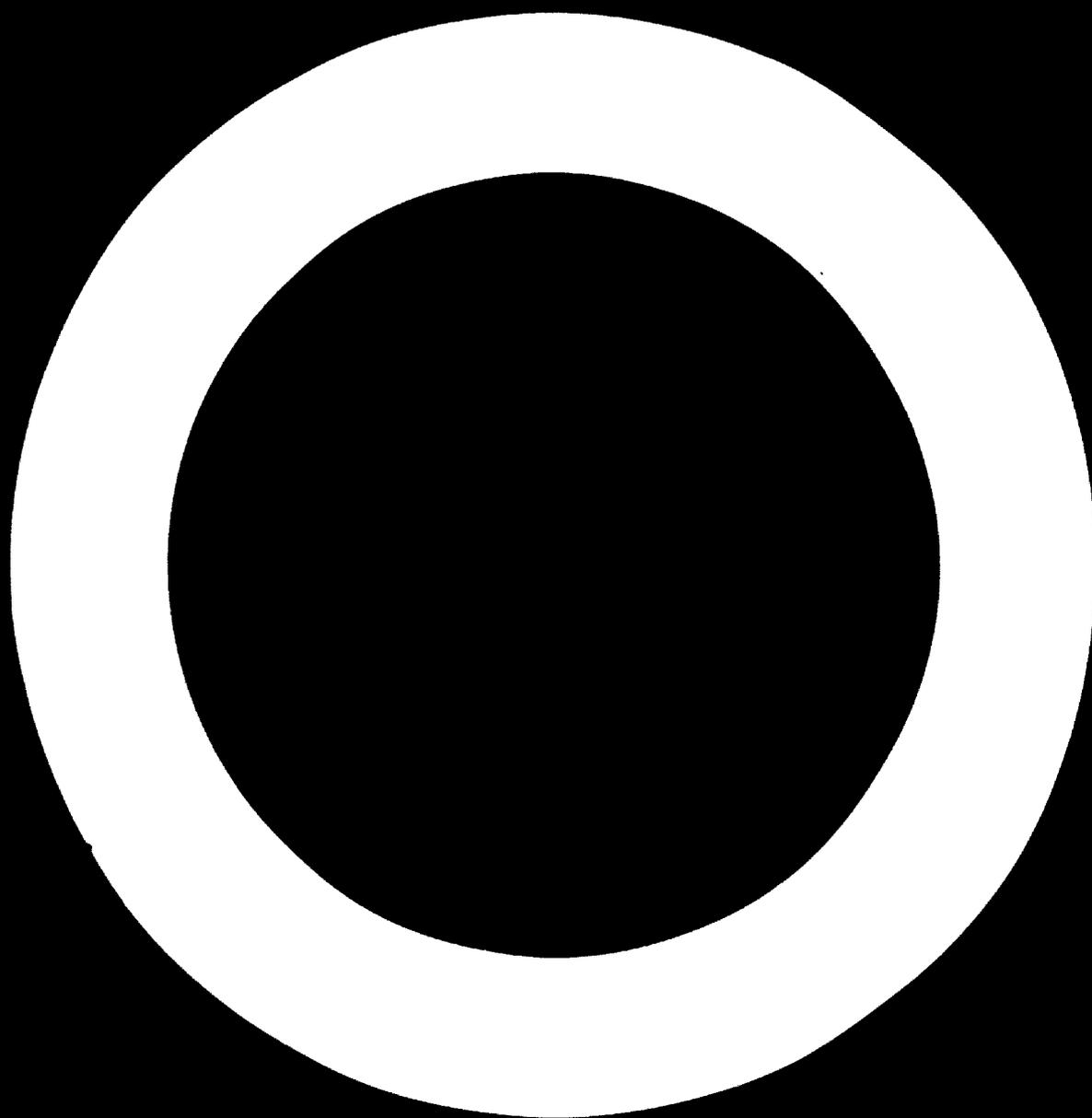
**NACIONES UNIDAS**

**ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL**  
Viena

**EL VIDRIO  
Y LA  
FABRICACION  
DE VIDRIO**



**NACIONES UNIDAS**  
Nueva York, 1977



Notas explicativas

Cuando se hace referencia a dólares (\$), se trata de dólares de los Estados Unidos, a menos que se indique otra cosa.

Cuando se hace referencia a toneladas, se trata de toneladas métricas, a menos que se indique otra cosa.

En los cuadros se emplean las indicaciones siguientes:

Los puntos suspensivos (...) quieren decir que no se dispone de datos o que éstos no constan por separado

La raya ( - ) quiere decir que la cantidad es nula o despreciable

Un espacio en blanco quiere decir que el concepto no se aplica

Los totales tal vez no representen una suma exacta por haberse redondeado las cifras.

Además de las abreviaturas, símbolos y referencias usuales, en el presente informe se utilizan las siguientes:

Å      angstrom =  $10^{-8}$  cm

psi    la fuerza de una pulgada por pulgada cuadrada

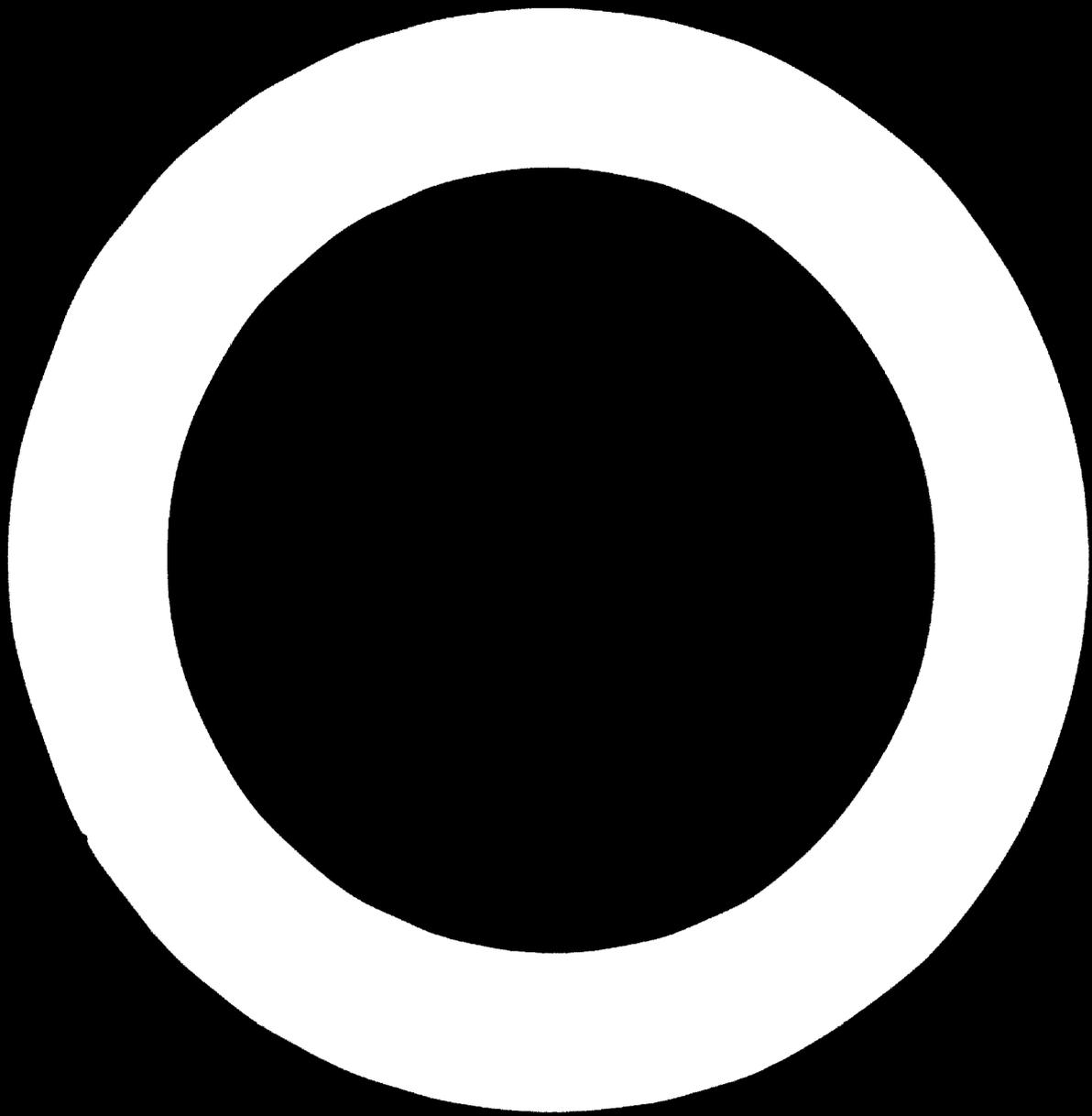
η      viscosidad

---

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos no indican, de parte de la Secretaría de las Naciones Unidas, juicio alguno sobre la condición jurídica de ningún país, territorio, ciudad o región, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

La mención de nombres de empresas o de productos comerciales no supone un respaldo por parte de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI).

Las opiniones que el autor expresa en este documento no reflejan necesariamente las de la Secretaría de la ONUDI.



Índice

<u>Capítulo</u>	<u>Página</u>
INTRODUCCION	9
I. EVOLUCION DE LA INDUSTRIA DEL VIDRIO	12
II. NATURALIEA Y PROPIEDADES DEL VIDRIO	17
Constitución	17
Propiedades físicas	19
Anomalías	23
Comportamiento en servicio	24
Vidrio ceramizado	28
III. MATERIAS PRIMAS Y ADITIVOS DE LA MEZCLA VITRIFICABLE	30
Materias primas	30
Materias añadidas a la mezcla vitrificable	36
IV. FUSION DEL VIDRIO	45
Hornos	45
Fusión	48
Borboteadores	50
Contaminación atmosférica	51
V. FORMACION DEL VIDRIO	52
Toma y alimentación	52
Defectos de prensado y de formación del vidrio	54
Soplado	56
Estirado de tubos y de vidrio plano	58
Vidrio plano laminado	60
VI. PROCESOS SECUNDARIOS DE ELABORACION DEL VIDRIO	62
Pulido al fuego y corte flameado	62
Recocido	63
Corte por rayado y fisuración	64
Desbaste y pulido	65
Moldeo secundario del vidrio	66
Templado	68
Decoración	69
VII. CONTROL DE CALIDAD Y SOLUCION INMEDIATA DE PROBLEMAS TECNICOS	72
Control estadístico	72
Realimentación	74
Diagnóstico de fracturas	76

Índice (cont.)

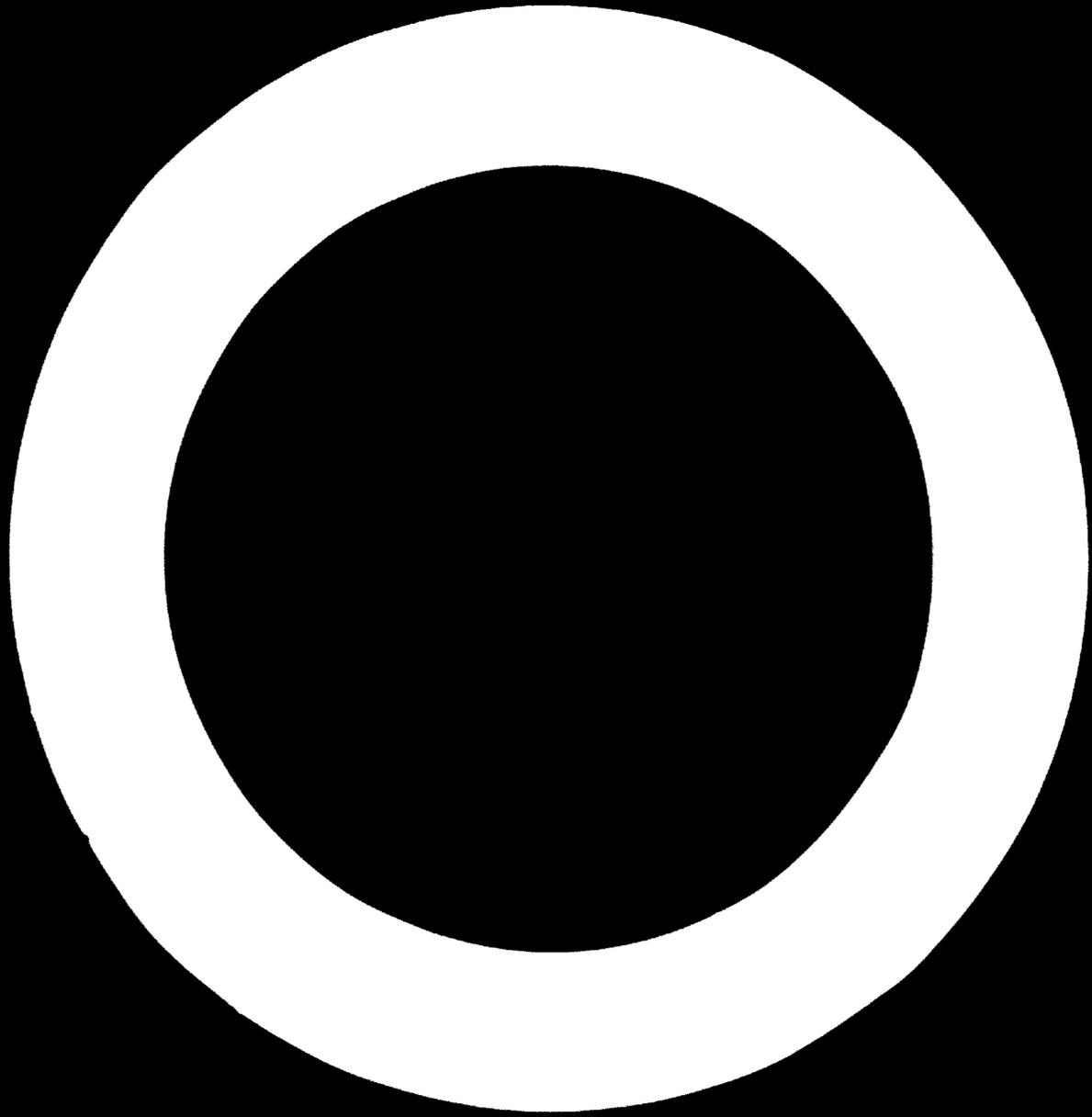
	<u>Página</u>
VIII. VIABILIDAD DE LA FABRICACION DE VIDRIO	79
Escala de explotación	81
Mercados: espectro, tendencias y penetración	81
Optimización de la tecnología	83
Plantilla de una pequeña vidrería	85
IX. PERFILES DE COSTOS Y TENDENCIAS DE LA INDUSTRIA DE ENVASES DE VIDRIO	87

Quadros

1. Producción de vidrio en Francia y la República Federal de Alemania, por tipos, en 1973	14
2. Consumo de vidrio plano estirado en diversos países, en 1971	15
3. Producción de botellas por habitante en diversos países y distribución aproximada de sus aplicaciones, en 1970	16
4. Propiedades estructurales de los iones y equivalentes iónicos de sus óxidos	21
5. Cálculo de las propiedades físicas del vidrio de sosa y cal según su composición en óxidos	22
6. Cambio de temperatura necesario para restablecer la viscosidad inicial y cambio del intervalo de trabajo cuando se sustituye una unidad de porcentaje de peso de $\text{SiO}_2$ por otro óxido	23
7. Características de fusión y descomposición, de compuestos utilizados en la fabricación de vidrio	34
8. Ejemplo de cálculo de la composición del vidrio a base de la composición de la mezcla	35
9. Efecto de la sustitución del $\text{CaO}$ por el $\text{MgO}$ en un vidrio con una composición de 16% de $\text{Na}_2\text{O}$ , 10% de $\sqrt{x \text{ MgO}, (1-x) \text{ CaO}}$ y 74% de $\text{SiO}_2$	37
10. Tiempo que tardan las burbujas de diversos diámetros en elevarse 20 cm hacia la superficie de una masa de vidrio fundido típica a diferentes temperaturas	40
11. Experimento que demuestra la disolución diferencial de burbujas pequeñas en el vidrio	40
12. Colores dados por los colorantes comunes que se emplean en la fabricación de vidrio	43
13. Cantidad aproximada de selenio requerida para decolorar vidrio en función de su contenido de arsénico y hierro	43

Indice (cont.)

	<u>Página</u>
14. Planes típicos de recocido para vidrio plano y vidrio destinado a envases	64
15. Distribución de los costos de capital, energía total y mano de obra en una vidriería de tamaño mínimo	88
16. Distribución aproximada de los costos de explotación de una vidriería de tamaño mínimo	89



## INTRODUCCION

La fabricación de vidrio, que es una de las industrias más antiguas, ha ejercido siempre una fascinación sobre el hombre a través de los tiempos. La transformación de arena y tierra comunes en un material rígido, transparente y parecido a una joya, presenta todo lo maravilloso de la alquimia. Actualmente, el mayor volumen de vidrio se fabrica sobre todo mediante procedimientos plenamente automáticos, y una visita a una moderna fábrica de botellas, por ejemplo, podría llevar a pensar que la industria es ahora simplemente cuestión de mecánica; sin embargo, una mirada entre bastidores mostrará que la fabricación del vidrio sigue siendo todavía en gran parte cuestión de arte más bien que de ciencia. El experto en tecnología del vidrio es el alquimista metido entre bastidores, que debe utilizar diariamente su arte, con ayuda de la ciencia, para lograr que las máquinas puedan funcionar adecuadamente.

Al vidrio no se le puede dar forma mediante la fuerza bruta únicamente, como ocurre con los metales o los plásticos; hay que persuadirlo a tomar una forma mediante estímulos o restricciones, de modo que su movimiento, igual que el de una mula de mala índole, se ajuste a su propia inclinación y vaya, sin embargo, en la dirección deseada. En ese sentido, la tarea del experto en tecnología del vidrio es parecida a la del gerente principal, la mayor parte de cuyo tiempo se dedica, no a trabajo rutinario de administración, sino a manipular de una u otra manera las tozudeces de la naturaleza humana. Lo malo es, sin embargo, que estas dos personas raras veces hablan el mismo lenguaje. Esto ocurre sobre todo en las nuevas industrias del vidrio en países en desarrollo, donde la capacitación formalizada para las dos tareas suele ser bastante diferente. De ahí que una de las finalidades de la presente monografía es dar a conocer aspectos de la fabricación del vidrio que proporcionen un terreno común de entendimiento para el tecnólogo y el ejecutivo.

Es interesante pensar que, en el altamente competitivo sector del vidrio, fábricas complejas y de mucha organización funcionan a menudo con una viabilidad marginal, mientras que algunas pequeñas empresas familiares, mal equipadas y con escasa organización formal, consiguen trabajar con éxito. ¿Será tal vez que, en este último caso, el tecnólogo en vidrio y el jefe de la empresa suelen ser la misma persona?

Gran parte del quehacer, tanto literal como figurativamente, consiste en procedimientos corrientes, tecnología corriente, cálculo de costos corriente, de modo que para un gerente experimentado que llega a esta industria por primera vez es fácil creer que se trata de una industria manufacturera como cualquier otra, y que sus principios de técnicas de producción bastarán para hacer frente a todas las circunstancias. Las diferencias son sutiles e insidiosas, y pueden pasar años antes que se dé cuenta de que ha estado tratando de conducir a la mula con un volante de automóvil, y que la mula y él no han hecho más que marchar casualmente por el mismo camino.

La mayor parte de las dificultades proceden de la naturaleza peculiar del vidrio. A elevadas temperaturas, el vidrio líquido empieza a comportarse como el solvente universal ideal, pues resulta un problema encontrar un material refractario químicamente resistente que sea capaz de contenerlo. Sin embargo, la característica más interesante del vidrio es que cambia gradualmente desde un líquido semejante a un jarabe, a una temperatura de fusión de unos 1.500°C, a un sólido rígido, cuando se enfría a unos 500°C, temperatura a la cual

pierde su resplandor rojizo. Durante esta transformación, su viscosidad cambia por un factor de 6 billones. Se puede dar una idea de esta colosal variación en características de trabajo representando la viscosidad del vidrio durante la fusión en el horno mediante una línea de una pulgada de largo (2,5 cm) en un gráfico. El vidrio sacado del horno y listo para su elaboración (a unos  $1.100^{\circ}\text{C}$ ) tiene una viscosidad correspondiente a una línea de 2 yardas (18,3 cm) de largo. Mientras se le trabaja para darle la forma deseada, sea a máquina, a mano o por soplado, la línea que representa la viscosidad se estira a unas 2 millas (3,2 km). Por último, el vidrio ha de ser recocido para eliminar las tensiones que se hayan introducido durante el proceso de dar forma al artículo. Esto se efectúa mediante un enfriamiento controlado a una temperatura en que la viscosidad corresponde a la distancia desde la tierra al sol, esto es, 93 millones de millas (150 millones de kilómetros).

Las características de flujo del vidrio permiten trabajarlo de diversas maneras: por soplado, para hacer botellas y jarros; por prensado, para hacer artículos de mesa; por estirado, para hacer vidrio de ventana y tubos; y por laminado, para hacer vidrio plano.

Podría pensarse que es cosa sencilla especificar las características de flujo a través de medidas de viscosidad a diferentes temperaturas de trabajo, y reglar las máquinas de formación de vidrio según principios corrientes de mecánica. No ocurre así. La viscosidad es una medida de la resistencia al flujo o al cambio de forma a temperaturas estáticas; pero, en el proceso de dar forma al vidrio, la temperatura está lejos de ser estática. El vidrio pierde temperatura a una tasa que varía considerablemente, por ejemplo, de acuerdo a la presencia de impurezas residuales y a su estado de oxidación. Por debajo de unos  $200^{\circ}\text{C}$ , el vidrio es un buen aislante térmico, pero, a temperaturas más elevadas, la radiación predomina en la transferencia de calor, y la transparencia del vidrio le presta una elevada tasa de transferencia térmica, dependiendo hasta cierto punto de su color. Por consiguiente, pequeñas diferencias en la tasa de enfriamiento pueden significar diferencias considerables en las características de flujo.

La variación de viscosidad del vidrio no es más que un aspecto de los muchos por los cuales no resulta práctico especificar completamente un proceso de fabricación de vidrio. En última instancia, entra en juego un elemento de arte y de oficio, y ahí es donde se necesita el tecnólogo en vidrio. La capacitación le ha enseñado a aplicar su arte científicamente, y su ciencia artísticamente.

La presente monografía está destinada no sólo a los que se inician en esta industria, en cualquier capacidad que sea, ora como empresario o como mensajero de oficina, sino también a los tecnólogos experimentados que nunca han tenido una instrucción formalizada en esta materia, pero que, aun hoy día, suelen ser las personas clave en la fabricación de vidrio más bien lograda. El tecnólogo en vidrio que viene saliendo de la escuela técnica acaso también encuentre aquí algo de interés.

Los temas que abarca este trabajo son bastante variados, como puede comprobarse mediante una mirada al índice. Partiendo de la historia de la industria, se pasa por un examen técnico de la teoría y la práctica de la fabricación de vidrio y una consideración de los problemas económicos que supone el establecimiento de una fábrica de vidrio, para llegar a una ojeada sobre las tendencias actuales de esta industria.

Se dice que la buena fabricación de vidrio es cuestión de poner las cosas en su lugar y mantenerlas en su lugar. El tecnólogo en materia de vidrio desempeña un papel importante en estos dos aspectos. Como principal encargado de resolver problemas, ha de saber cómo modificar la mezcla de materias primas, a menudo de un día para otro, mantener o mejorar el funcionamiento de los hornos y máquinas y, de todos modos, conservar la calidad del producto. Ha de hacer el uso más económico posible de las materias primas de que se dispone y compensar las variaciones naturales que ocurren en ellas. Por último, ha de tener un concepto del funcionamiento económico global de la planta. Es en este último aspecto donde el tecnólogo en materia de vidrio suele estar insuficientemente informado. A menudo, los controles económicos se imponen desde arriba, y le parecen ilógicos y arbitrarios al técnico que está preocupado por el vidrio que se encuentra hoy en el horno para ser trabajado mañana; lo que sucedió la semana anterior le parece que en gran parte no tiene relación con él. En muchos casos, este modo de ver las cosas está justificado. Con frecuencia, los sistemas de controlar la producción, la calidad y el funcionamiento están concebidos en primer lugar para el nivel más elevado de gestión, donde las cifras se reciben demasiado tarde para decidir soluciones eficaces; es lo que podría llamarse un control post mortem. Las cifras no serían menos útiles a la administración si estuvieran concebidas en primer lugar para guiar al técnico que tiene el control inmediato y, sólo secundariamente, para dejar constancia del funcionamiento. Esto vale sobre todo para las fábricas de los países en desarrollo, que se han construido sobre la hipótesis de que una industria del vidrio puede comprarse como si fuera una operación "llave en mano".

Si el gerente principal y el tecnólogo en materia de vidrio pueden aprender a mirar toda la operación de fabricación de vidrio con los mismos ojos, entonces podrá sacarse el mejor partido de las máquinas, equipo y procedimientos que entran en la producción, y la fábrica de vidrio podrá funcionar como un complejo coherente e independiente.

Al referirse a algunos de los aspectos científicos de la naturaleza del vidrio, el autor ha utilizado a veces conceptos que no están universalmente aceptados. Su justificación es que él mismo los ha encontrado útiles. Si un lector entendido en la materia se siente inclinado a criticarlos, tanto mejor, porque la intención del autor ha sido inducir a pensar.

## I. EVOLUCION DE LA INDUSTRIA DEL VIDRIO

Parece estar de moda que los historiadores descarten como mito la historia relatada por Plinio, en el siglo primero d.C., respecto del descubrimiento de la fabricación del vidrio. Sin embargo, estos historiadores no han podido ofrecer en su lugar más que suposiciones de lo más vagas, y parecen ignorar la verosimilitud que encierra el relato. El texto de Plinio dice así:

"En Siria existe una región conocida con el nombre de Fenicia... En este distrito se supone que nace el río Belus, que tras recorrer un curso de cinco millas desemboca en el mar cerca de la colonia de Ptolemaida. Este río corre lentamente... Muy profundo y lleno de sedimentos fangosos, sólo en la bajamar deja al descubierto sus arenas, que agitadas por las olas, se desprenden de sus impurezas quedando así limpias... Se cuenta que estando anclado en este lugar un barco cargado de nitro, los mercaderes, al querer preparar su comida sobre la orilla, utilizaron trozos de nitro sacados del buque para sostener sus calderas, porque no encontraron piedras. Al ser sometido el nitro a la acción del fuego, en combinación con la arena de la orilla, observaron la formación de pequeñas corrientes de un líquido transparente hasta entonces desconocido: este fue, según se cuenta, el origen del vidrio."

Quizá no sea este el origen del vidrio, pero pudiera muy bien ser el principio de la industria del vidrio. Se conocen superficies vidriadas verdes, es decir, revestimientos de vidrio sobre cerámica, que se remontan a algo así como al año 12.000 a.C., y es inevitable que en las civilizaciones de aquel tiempo, en las que era común fabricar cacharros de barro, se "descubriese" de cuando en cuando el vidrio. Pero sería poco probable que ninguno de estos descubrimientos reuniese los tres factores básicos que se conjugan en el relato de Plinio: 1) la combinación de nitro y fuego generando una temperatura elevada; 2) el empleo de arenas bien lavadas para dar al vidrio una claridad espectacular; 3) la circunstancia de efectuarse el descubrimiento por mercaderes, los empresarios de aquel tiempo, que seguramente querrían una oportunidad comercial tan atractiva.

Uno de los rasgos característicos de la larga historia de la fabricación del vidrio son los largos periodos de estancamiento que median entre los descubrimientos de nuevas técnicas. Así, transcurrieron unos 1.700 años entre el desarrollo de la cerámica vidriada y la fabricación de vasijas de vidrio ahuecado, que pueden considerarse como los primeros artículos propiamente de vidrio. Estas vasijas se fabricaban revistiendo con vidrio un molde de arena montado sobre un palo y extrayendo la arena a medida que se solidificaba el vidrio. Esta técnica, que sirvió para la fabricación de las vasijas de vidrio más antiguas, se conservó durante unos mil años, hasta que fue bruscamente suplantada alrededor del año 500 a.C. por la técnica del soplado, utilizada hasta nuestros días.

Con el advenimiento de la técnica del soplado la industria se desarrolló rápidamente, no sólo como consecuencia de este gran adelanto técnico, sino también sin duda, debido a la estabilidad comercial del Imperio Romano. En la propia Roma, las vasijas de cristal soplado eran muy apreciadas y se vendían a precios elevados. Plinio menciona la venta de dos copas por 6.000 sesteracios (unas 50 libras esterlinas). Sin embargo, con el rápido desarrollo de la competencia los precios se redujeron considerablemente. Las vasijas de vidrio pasaron al mercado de productos utilitarios y dejaron de ser un artículo únicamente de lujo, de la misma categoría que los de plata y oro. En el año 220 d.C. había tantos vidrieros en Roma que les fue asignada una sección de la ciudad, y Alejandro Severo impuso un impuesto a los fabricantes de vidrio, galardón bastante frecuente con que se corona el éxito.

Con el transcurso de los años se introdujeron, por supuesto, mejoras en la calidad técnica y estética del vidrio, pero no se produjo ninguna innovación tecnológica importante hasta el siglo XIX.

El primer tratado conocido sobre tecnología del vidrio aparece en unas tabletas con escritura cuneiforme que se desenterraron en Nínive. Se les atribuye como fecha el año 640 a.C. Un extracto dice así:

"Cuando acondiciones el terreno para un horno... escogerás un día favorable y un mes afortunado... aportarás embriones (nacidos antes de tiempo)... ofrecerás ante ellos las debidas libaciones."

(Si consideramos los "bancos de desarrollo" como equivalente moderno de esos "nacidos antes de tiempo", esta última instrucción sigue teniendo sentido incluso hoy.) Después de explicar la forma de propiciar a los poderes imperantes, el texto pasa a dar consejos muy prácticos: empleo de leña seca como combustible, etc.

Los comienzos de un enfoque más científico pueden verse en la obra clásica L'arte vetraria de A. Neri, sacerdote radicado en Florencia (Italia). Se publicó en 1612 y se tradujo al alemán, francés, inglés y latín. Este era un período de intenso desarrollo, y las fábricas de cristal se multiplicaban por toda Europa. Por el año 1600 estaba ya bien desarrollada la técnica del vidrio tallado. En 1615 se introdujo en Inglaterra el empleo del carbón en vez de leña para alimentar los hornos de vidrio, y ahí también se inventó en 1675 el vidrio extra-blanco, también llamado flint glass. Se le dio ese nombre porque su contenido de sílice se derivaba de pedernales (flints) o nódulos de sílice existentes en los yacimientos de tiza. También contenía óxido de plomo, lo que le daba un brillo inexistente en los vidrios de fabricación anterior. El término flint-glass se utiliza también en la actualidad para cualquier vidrio transparente e incoloro.

Con algunas excepciones notables, la tecnología del vidrio recibió muy poca atención de los científicos hasta época muy reciente. En primer lugar, consideraban el vidrio como un material anómalo, que no respondía al concepto sencillo de que la materia existe únicamente en tres estados: gaseoso, líquido y sólido. En segundo lugar, el progreso de la ciencia del vidrio se vio seriamente obstaculizado por la aceptación de la teoría del flogisto, que se basaba en ideas erróneas sobre la calcinación y la combustión, fenómenos de importancia evidente en la fabricación de un material como el vidrio, compuesto primordialmente por óxidos. En cambio, el desarrollo de la ciencia óptica, en que el vidrio juega un papel tan importante, dio lugar a mucha experimentación, que repercutió indirectamente sobre la tecnología del vidrio.

Desde un punto de vista práctico, los procesos fundamentales de fusión y trabajo del vidrio no pueden reducirse a una escala adecuada para efectuar satisfactoriamente pruebas de laboratorio, debido a la índole del vidrio. Por ejemplo, un horno moderno de fundir vidrio requiere una fuerte inversión de capital y debe poder funcionar de cuadro a ocho años. Se requiere, por ello, un gran acto de fe para introducir cualquier innovación importante, para introducirla en uno de cuyos resultados sólo pueden comprobarse en gran escala. Por esta razón, los avances de la tecnología del vidrio han sido forzosamente lentos, haciéndose una inversión mínima en cada etapa. La semiautomación y luego la automación completa introducidas a principios de siglo se iniciaron como una copia mecánica de las hábiles manipulaciones del vidriero. Más adelante, se diseñaron máquinas a base fundamentalmente de

principios mecánicos, para lograr el producto final de la manera más directa, lográndose velocidades de producción centenares de veces mayores.

El vidrio de ventana fabricado a mano se formaba ya sea por el proceso del soplado en coronas o por el proceso de soplado en cilindros. El proceso del soplado en coronas consistía en soplar una esfera rematada por un cuello y en la eliminación del cuello para dejar un agujero. El agujero se abría centrifugando el vidrio recalentado hasta que se convertía en un disco con un centro bulboso que le mantenía sujeto al pontil. La corona central, considerada como la principal desventaja de este proceso, se ha convertido en un objeto de coleccionista tan popular, que este proceso se sigue utilizando para atender así a esta demanda. El proceso del soplado en cilindros resultaba más productivo. Se soplaban los cilindros, se desprendían sus extremos, y tras rasgar longitudinalmente el cilindro se le aplanaba en un horno. En el proceso moderno, que es una variante del proceso de Fourcault, introducido en 1902, se saca el vidrio plano estirándolo directamente de la masa fundida, en forma de una cinta continua cuya anchura sobrepasa a menudo los dos metros.

Las modernas máquinas de fabricación de botellas han abandonado también la anticuada secuencia de la producción a mano. En el proceso de fabricación a mano se amasaba el vidrio sobre un tubo hueco para ser soplado en dos fases. El cuello se formaba en una fase final, después de haberse retirado la vara de soplar vidrio. Actualmente el cuello de la botella se sigue llamando en inglés el "acabado" (finish) aunque de hecho, en el proceso moderno, es la primera parte en formarse. En este proceso se alimenta automáticamente a la máquina una cantidad medida de masa de vidrio fundido, llamada la "gota", y la secuencia completa del soplado, del recocido, y, a menudo también, de la inspección y el embalaje, se encuentra totalmente automatizada.

Estos adelantos técnicos han permitido al vidriero vender un producto muy perfeccionado más o menos al mismo precio nominal del antiguo vidrio fabricado a mano, pese a la enorme reducción que ha sufrido el valor real del dinero a lo largo de los años.

Los recipientes de vidrio y el vidrio plano representan alrededor del 83% de la producción mundial de vidrio en nuestros días. En el cuadro 1 pueden verse las cifras correspondientes a la producción de Francia y de la República Federal de Alemania, consideradas en conjunto como representativas de la industria en total.

Cuadro 1  
Producción de vidrio en Francia y la República Federal  
de Alemania, por tipos, en 1973

Tipo	Volumen de producción (en millones de toneladas)	Proporción del total (%)	Producción por habitante (kg)	Tasa de crecimiento anual (%)
Vidrio de seguridad	0,536	7,8	4,8	3,72
Luna pulida y vidrio laminado	0,628	9,4	5,7	2,36
Vidrio estirado	0,627	9,4	5,7	1,28
Recipientes	4,920	73,4	44,6	5,56

Las tasas de crecimiento relativo de la luna pulida y el vidrio laminado, por una parte, y del vidrio estirado, por otra, parecen indicar que el primer tipo estaba sobrepasando al segundo en 1973. Aunque no se dispone de cifras más recientes, es sumamente probable que esto ya haya sucedido, no tanto por una modificación en la demanda del mercado sino por la invención de una nueva técnica de laminar el vidrio (proceso de flotado), con la que se obtiene un acabado de superficie muy superior. El vidrio flotado no sólo resulta un sucedáneo barato de la luna esmerilada y pulida, sino que está invadiendo el mercado convencional del vidrio plano estirado grueso.

Se ha sugerido que la invención del vidrio de ventana fue un factor decisivo en el desplazamiento de las civilizaciones hacia climas más fríos. Hoy existe ciertamente una correlación estrecha entre la producción de vidrio plano por habitante y las temperaturas medias invernales (véase la figura). En todo caso, la tasa de crecimiento de la producción de vidrio de ventana continúa siendo impresionante. En el período de 1963-1972, la producción de 27 países, con una población total de 1.551 millones de habitantes, aumentó al ritmo de un 5% anual (de 685 millones a 990 millones de metros cuadrados).

El vidrio plano, que puede ser embalado en cantidades apreciables en muy poco espacio para su expedición, es objeto de un importante comercio internacional. Las cifras de producción no constituyen, por tanto, una medida segura del nivel de consumo del país productor, y no se obtienen fácilmente cifras directas sobre el consumo. En el cuadro 2 puede verse un intento de calcular el nivel de consumo de siete países, a partir de los datos disponibles sobre la producción, las importaciones y las exportaciones.

Cuadro 2  
Consumo de vidrio plano estirado en diversos países, en 1971

País	Producción (t)	Importaciones (t)	Exportaciones (t)	Consumo (t)	Población (millones)	Consumo por habitante (kg)
Dinamarca	24.000	22.294	15.847	30.000	5	6
Francia	216.000	33.553	60.970	189.000	51	3,7
República Federal de Alemania	370.138	95.005	107.077	358.066	61,3	5,84
Italia	562.000	68.190	91.245	539.000	54,5	9,9
Japón	1.145.000	1.785	363.855	783.000	103	7,6
Suecia	52.000	30.786	-	83.000	8	10
Turquía	62.700	6.480	5.080	64.100	36	1,8

El grosor del vidrio plano suele oscilar entre 2 y 8 mm, con un promedio de alrededor de 3,5 mm. Una tonelada de vidrio de 3,5 mm de grosor corresponde a 114,3 m<sup>2</sup> (1.230 pies cuadrados).

Lo abultado de los recipientes de vidrio dificulta su exportación, por lo que las cifras locales de producción suelen ser un reflejo más fiel del nivel local de consumo. Sin embargo, las exportaciones indirectas, derivadas del empleo de botellas o jarras para contener productos destinados a la exportación, pueden alcanzar cifras considerables en algunos casos. En el

cuadro 3 puede verse la producción de 17 países que representan alrededor de un 19% de la población mundial. También se da una indicación aproximada de cómo se utilizan las botellas, a base de la experiencia del Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte.

Cuadro 3  
Producción de botellas por habitante en diversos países y  
distribución aproximada de sus aplicaciones, en 1970

<u>País</u>	<u>Población</u> <u>(millones)</u>	<u>Producción por</u> <u>habitante</u> <u>(kg)</u>	<u>Tasa de</u> <u>crecimiento</u> <u>anual (%)</u>	<u>Aplicaciones</u>	<u>Proporción</u> <u>del total</u> <u>(%)</u>
Estados Unidos	202	65,0	3,7		
Bulgaria	8,3	43,0	10,5		
Reino Unido	55,0	40,0	2,8		
Francia	50,0	35,0	8,5		
República Federal de Alemania	60,0	35,0	8,2		
Suecia	7,8	35,0	5,8	Alimentos	35,0
Italia	53,0	23,0	7,3	Bebidas	32,8
Hungría	10,2	19,3	11,0	Productos farmacéuticos	17,0
Austria	7,3	18,0	8,5	Productos de aseo	8,1
Japón	100,5	14,6	8,2	Varios	4,1
España	32,0	14,4	10,7	Exportación directa	<u>3,0</u>
Polonia	32,1	13,2	4,7		
Rumanía	19,3	12,7	9,2		
Finlandia	4,8	12,5	6,9		
Cuba	7,9	11,8	5,8		
Portugal	9,2	10,9	9,3		
Yugoslavia	19,6	10,5	10,0		
				Total	100,0

Pese a la competencia por parte de los envases plásticos y de las latas, la tasa de crecimiento del consumo de recipientes de vidrio es bastante mayor que la correspondiente al consumo de vidrio plano.

Estas estadísticas escuetas, útiles en todo caso, para efectuar una evaluación preliminar de las posibilidades del mercado, pueden despertar cierto interés si se tiene en cuenta que encierran la predicción de que, si se mantienen las actuales tasas de crecimiento, se necesitará una capacidad de producción mundial adicional de alrededor de 800.000 toneladas de botellas y de 160.000 toneladas de vidrio plano cada año. Si, por ejemplo, se adopta la hipótesis de que una fábrica de vidrio de viabilidad mínima ha de tener una producción anual de unas 20.000 toneladas, haría falta instalar unas 50 fábricas adicionales de vidrio cada año en el mundo. Aunque la mayor parte de la demanda adicional será satisfecha por plantas ya existentes y aumentando la productividad, y aunque suele ser verdad que muy pocas veces se puede armonizar una fábrica de dimensiones mínimas con la demanda de un mercado local, es claro que existen oportunidades para instalar muchas empresas nuevas en el campo cada vez mayor de la fabricación de vidrio.

## II. NATURALEZA Y PROPIEDADES DEL VIDRIO

### Constitución

Cuando un líquido se enfría se llega generalmente a una temperatura crítica, el punto de congelación, a la cual los átomos o moléculas que lo componen, y que se han estado moviendo de manera caótica, se asientan en la disposición ordenada característica de un sólido cristalino. Cuando se vuelve a calentar el sólido, los átomos se despreñen bastante abruptamente de la red cristalina a la misma temperatura crítica, llamada ahora punto de fusión, y se restablece el caos, o sea la fluidez. Este comportamiento sugiere que para cristalizar un líquido se necesitan tres cosas: pérdida de la energía del movimiento aleatorio, tiempo para que los átomos se ordenen con arreglo a la estructura cristalina, y una estructura a la cual ajustarse. Y así sucede en la realidad. Por ejemplo, si se enfría un líquido tan rápidamente que no se da tiempo suficiente a la ordenación, y si se cuida de eliminar toda mota de polvo o todo contacto con superficies que tengan una disposición microscópicamente ordenada y puedan proporcionar una estructura y servir de núcleo a la formación de cristales, el líquido puede ser sobreenfriado por debajo de su punto normal de congelación.

Por lo común, el grado de sobreenfriamiento posible es muy reducido. Se pueden producir núcleos espontáneamente y, en consecuencia, cristalizar súbitamente el líquido. Pero hay algunos compuestos líquidos que pueden ser sobreenfriados muy fácil y permanentemente. El líquido sobreenfriado más importante que se conoce se basa en el cuarzo fundido, formado a partir de la arena silícea o de minerales silicados, que figuran entre las sustancias naturales más abundantes y difundidas que se conocen.

Estamos, desde luego, hablando del vidrio. ¿Es, pues, este material realmente un líquido -si bien sobreenfriado? En la mayoría de los aspectos, es más "sólido" que los sólidos comúnmente tenidos por tales, en virtud de su fragilidad, por ejemplo. ¿Es, pues, un sólido? De hecho, la cuestión se plantea sólo porque los primeros hombres de ciencia decidieron que existían únicamente tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso. El vidrio es un "vidrio"; y todos los días se funden por lo menos 100.000 toneladas del mismo que justifican la existencia de un cuarto estado de la materia: el estado vítreo.

El estado vítreo es peculiar en muchos sentidos. Hay estados dentro del estado. Hemos visto que el tiempo es un factor importante, de manera que las propiedades del vidrio pueden depender de su historia anterior. Afortunadamente, el hombre práctico puede olvidarse en gran medida de estos efectos, siempre que acepte que, dentro de cierto intervalo de temperaturas, el intervalo "de transformación", la situación no es normal pero se le puede hacer frente con reglas empíricas bastante toscas.

Supongamos que se trata de un típico vidrio de botella que contiene alrededor de un 15% de óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y un 10% de cal ( $\text{CaO}$ ), siendo el resto sustancialmente un 75% de sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Las poblaciones relativas de iones en este vidrio son en un 60% oxígeno, de tamaño relativamente grande; un 26% silicio, más bien pequeño; un 10% sodio; y un 4% calcio. Se añade  $\text{Na}_2\text{O}$  para facilitar la fusión del vidrio, es decir, disolver la sílice y alcanzar la fusión a una temperatura más baja (unos  $1.500^\circ\text{C}$ ), porque la sílice por sí sola tiene un punto de fusión demasiado alto para fundirla en los recipientes refractarios de que se dispone.

También la cal es un agente fundente, pero su principal papel es hacer el vidrio que finalmente se obtiene insoluble en el agua y los líquidos corrientes. En vista del gran número y volumen de los iones oxígeno, podemos imaginar el vidrio fundido como un conglomerado de iones oxígeno mantenidos juntos sin mucha fuerza por los pequeños iones silicio, cada uno de los cuales forma enlaces con los cuatro iones oxígeno más próximos, y de iones calcio y sodio dispersos al azar por toda la masa tras perder su parte originaria de iones oxígeno en favor del conglomerado general. En razón de esta imagen, a los iones silicio y otros parecidos se les llama a menudo formantes de red, y a los iones dispersos, modificadores de redes.

A elevada temperatura los iones sodio, y en menor medida los iones calcio, son extremadamente activos -como perros pastores con un rebaño de ovejas. Nada hay que los mantenga en un sitio fijo, y arremeten por todas partes tendiendo a romper la red de iones oxígeno "enhebrados" por medio de los iones silicio. En otras palabras: ayudan a fundir el vidrio. Cuando se disminuye la temperatura, los iones calcio, que son más grandes y tienen una carga eléctrica doble, pierden su movilidad mucho antes que los iones sodio. Las propiedades del vidrio, por ejemplo, la fluidez y el volumen específico, se ajustan en términos generales a esta imagen, es decir, son lo que cabría esperar a base del equilibrio en una situación de conflicto entre los iones móviles que tratan de dispersar los iones oxígeno y los iones silicio que tratan de mantenerlos juntos.

A unos  $1.000^{\circ}\text{C}$ , cuando el vidrio tiene la viscosidad de un jarabe espeso, la oposición de fuerzas y la movilidad son tales que se puede formar una fase cristalina si se mantiene durante algún tiempo la masa a esa temperatura. El fenómeno se llama desvitrificación. Para evitarlo durante la fabricación, es necesario sacar el vidrio del horno a más de  $1.000^{\circ}$  y enfriarlo rápidamente durante el proceso de modelado hasta aproximadamente  $750^{\circ}$ , punto en que habrá pasado el peligro. A esta temperatura, el vidrio es casi tan blando como la mantequilla, los iones calcio se hallan virtualmente en reposo, pero los iones sodio están todavía activos y de vez en cuando vencen en la contienda con los iones silicio, de manera que puede hacerse cambiar lentamente la forma del vidrio.

Aproximadamente a los  $600^{\circ}\text{C}$  empieza el intervalo térmico de transformación. El comportamiento que aquí se registra es anómalo. Así como se necesita tiempo para que los iones se ordenen en formaciones cristalinas, también se necesita para que un ión móvil halle un entorno adecuado para abandonar su papel activo. En teoría existe siempre un hueco adecuado, porque, aunque los iones tienen carga eléctrica, el vidrio en conjunto es neutro, de manera que han de existir posiciones vacías rodeadas por iones de cargas opuestas. Pero el ión puede estar muy alejado de un hueco, y por esa sola razón verse condenado mucho más tiempo de lo que normalmente le correspondería. Así pues, se necesita tiempo para alcanzar el equilibrio apropiado para cada temperatura, y durante este tiempo cambiarán las propiedades físicas. A elevadas temperaturas, el equilibrio se establece tan rápidamente, que cualquier cambio pasa inadvertido. En cambio, a  $600^{\circ}$  el vidrio tarda segundos en estabilizarse, a  $550^{\circ}\text{C}$ , minutos, a  $500^{\circ}\text{C}$ , horas, y a  $450^{\circ}\text{C}$ , días. Ocurre así que las propiedades físicas a la temperatura ambiente no quedan definidas únicamente por la composición química del vidrio, sino que dependen también en cierta medida del tratamiento de enfriamiento que éste haya recibido.

En la práctica, después de la mayoría de las operaciones de modelado, en el vidrio hay una distribución de temperaturas tan poco uniforme que, si se lo dejara enfriar, las tensiones diferenciales que se acumularían en razón de la contracción diferencial podrían

quebrarlo. Por ello, se recuece el vidrio manteniéndolo a una temperatura uniforme lo suficientemente elevada para que ceda a esas tensiones, y de este modo las disperse, pero no lo bastante alta para que el vidrio se distorsione bajo su propio peso, y luego se lo enfría sin introducir ninguna diferencia notable de temperatura. La temperatura de recocido cae generalmente en la mitad del intervalo de transformación, de manera que este proceso tiende también a definir la condición de equilibrio o temperatura "ficticia" del vidrio y a crear, por lo tanto, propiedades reproducibles a la temperatura ambiente.

Ambas características, un intervalo de temperatura en que puede producirse la desvitricación y un intervalo térmico de transformación en que las propiedades físicas varían con el tiempo, parecen ser comunes a todos los vidrios. Existe otro fenómeno de considerable importancia técnica, que se da únicamente en vidrios de una composición particular. Se lo conoce como "separación de fases" o "separación del vidrio en el vidrio". Muchos sistemas vítreos son aparentemente tan incompatibles como el aceite y el agua a bajas temperaturas y, sin embargo, funden juntos como un líquido único a la temperatura usual de fusión. Los artículos producidos a partir de esta mezcla pueden no parecer en modo alguno excepcionales en cuanto a propiedades físicas y, sin embargo, puede comprobarse que su resistencia a los productos químicos es mucho menor que la prevista y que depende de manera crítica de la duración del tratamiento térmico en torno a los  $60^{\circ}\text{C}$ . Lo que ha ocurrido es que la mezcla se ha separado en dos vidrios diferentes a escala submicroscópica, es decir, a una escala demasiado fina para poder percibirla a simple vista. Las propiedades físicas medias no cambian, pero no obstante hay dos vidrios presentes, uno de los cuales puede ser soluble en el agua. Los vidrios borosilicados, tecnológicamente importantes, presentan limitaciones en este aspecto, pero por otra parte el efecto se ha aprovechado para la producción de vidrios con propiedades únicas (por ejemplo, vyoor) y el desarrollo de toda la nueva tecnología del vidrio ceramizado.

#### Propiedades físicas

Históricamente, la constitución del vidrio se ha inferido de los estudios sobre sus propiedades físicas, pero a los efectos de esta publicación se seguirá el camino inverso. En primer lugar, la estructura es iónica, es decir, consiste en partículas con carga eléctrica, pero no tiene electrones libres. Todos los electrones están estrechamente enlazados con sus iones respectivos y no pueden absorber luz visible como lo hacen los electrones conductores. El material es, por lo tanto, transparente. Al no haber electrones libres que transporten calor, ni una estructura periódica que propague ondas elásticas, no hay una manera fácil de conducir el calor, por lo que el vidrio es un aislante térmico. A bajas temperaturas no hay modo de conducir electricidad, y el vidrio es un buen aislante eléctrico. (Cuando la temperatura es suficientemente alta para que los iones sodio puedan desplazarse, puede desarrollarse una corriente electrolítica.) Se pueden fundir ciertos vidrios especiales que no reúnen estas características, por ejemplo, vidrios con electrones conductores libres, que absorben la luz, pero hay que considerarlos como casos excepcionales.

La estructura aleatoria significa que el vidrio es isotrópico hasta la escala atómica; sus propiedades son las mismas en todas las direcciones. No hay tampoco ninguna posibilidad de que existan planos de deslizamiento como en los metales, en los que grupos de átomos pueden

deslizarse unos en relación con otros y hacer que el material sea dúctil. Por consiguiente, el vidrio permanece elástico hasta el límite de su resistencia. No se puede imaginar que una estructura de esa naturaleza se rompa bajo fuerzas puramente de compresión; en realidad, el colapso final se produce únicamente bajo tensión.

La estructura esférica de gas nucle de cada ión significa que éstos han perdido la mayoría de las propiedades que distinguían a los átomos de los que proceden. Sus propiedades se derivan simplemente de su carga eléctrica, volumen físico y peso, de modo que cabría esperar que el valor numérico de cualquier propiedad física del vidrio fuera simplemente la suma de las aportaciones de cada uno de los iones componentes, según el número en que estén presentes. Aunque esto no siempre ocurre en lo tocante a propiedades tales como conductividad eléctrica, resistencia química y viscosidad, que implican un movimiento de iones dentro de la estructura, es básicamente cierto respecto de las propiedades que dependen únicamente de la estructura estática, tales como la densidad, el coeficiente de dilatación, el calor específico y la elasticidad. Por consiguiente, es de gran valor para el técnico del vidrio, al formular su mezcla (de materias primas), el conocimiento de las cargas, tamaños y pesos de los iones y ciertas reglas aditivas sencillas para combinarlos, a fin de aprovechar de la mejor manera posible los materiales disponibles o lograr alguna modificación de las propiedades físicas en el vidrio. Los cuadros 4, 5 y 6 están concebidos para proporcionar orientación en la cómoda formulación de mezclas.

En el lado izquierdo del cuadro 4 se dan las cargas eléctricas, tamaños y pesos de los iones utilizados comúnmente en la composición de vidrios. La escala de la estructura vítrea es determinada por el mayor y más abundante de los iones, el ión óxido ( $O^{-2}$ ), que tiene un radio cristalino iónico de 1,40 Å. Un empaquetamiento compacto de esferas de esas dimensiones dejaría huecos de dos tamaños para otros iones. El menor podría contener un ión positivo con un radio de 0,315 Å, que tendría entonces cuatro iones óxido como vecinos inmediatos. El hueco mayor podría contener un ión de 0,58 Å de radio con seis vecinos inmediatos. El ión silicio ( $Si^{+4}$ ) es demasiado grande para encajar en el hueco más pequeño, aunque podría formar una estructura estable, eléctricamente neutra, con cuatro oxígenos inmediatos. El resultado es una distorsión de la red ordenada que resultaría del empaquetamiento más denso. El ión boro ( $B^{+3}$ ), por otra parte, es tan pequeño que puede encajar en cualquier parte de la estructura, de manera que cabría prever que la adición de  $B_2O_3$  a la mezcla produjera algunos efectos inusitados.

No hay que imaginar estos huecos como cavidades cerradas; por el contrario, pequeños átomos como el helio pueden emigrar de un hueco vacío a otro siempre que su camino no esté bloqueado, por ejemplo, por iones sodio o calcio, que tienden a alojarse en tales huecos.

El peso del ión tiene poca importancia salvo por sus efectos sobre la densidad del vidrio. Figura en el cuadro 4 por una razón práctica: el técnico del vidrio maneja normalmente los pesos de los óxidos en la formulación de su mezcla y puede olvidar que pesos iguales de, por ejemplo,  $CaO$  y  $MgO$  no contienen el mismo número de iones. La columna de la derecha del cuadro 4 da el equivalente iónico de cada óxido, es decir, el número de iones metálicos en un peso dado del óxido en relación con el número de iones  $Si^{+4}$  que aporta el mismo peso de  $SiO_2$ . El número correspondiente al  $CaO$  es 1,07 y el del  $MgO$  1,49. Por lo tanto, si el técnico desea sustituir magnesia ( $MgO$ ) por cal ( $CaO$ ) sin alterar la proporción de alcalinotérreos en la mezcla, debe usar una cantidad menor de  $MgO$ , ya que éste da más iones por gramo que el  $CaO$ . La relación entre el peso de  $MgO$  y el de  $CaO$  para un número igual de iones es pues de 1,07/1,49.

Quadro 4

Propiedades estructurales de los iones y equivalentes  
iónicos de sus óxidos

<u>Ión</u>	<u>Radio (Å)</u>	<u>Peso atómico</u>	<u>Fórmula del óxido</u>	<u>Equivalente iónico<sup>1/</sup></u>
B <sup>+3</sup>	0,22	10,8	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,73
Posición 4-0	0,32			
P <sup>+5</sup>	0,34	31,0	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,85
Be <sup>+2</sup>	0,37	9,0	BeO	2,40
Si <sup>+4</sup>	0,42	28,1	SiO <sub>2</sub>	1,00
As <sup>+5</sup>	0,47	74,9	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,61
Al <sup>+3</sup>	0,53	27,0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,18
Posición 6-0	0,58			
V <sup>+4</sup>	0,60	50,9	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,66
Ti <sup>+4</sup>	0,62	47,9	TiO <sub>2</sub>	0,75
Fe <sup>+3</sup>	0,67	55,8	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,75
Li <sup>+1</sup>	0,68	6,9	Li <sub>2</sub> O	4,03
Cu <sup>+2</sup>	0,70	63,5	CuO	0,76
Mg <sup>+2</sup>	0,71	24,3	MgO	1,49
Zn <sup>+2</sup>	0,74	65,4	ZnO	0,74
Na <sup>+1</sup>	0,98	23,0	Na <sub>2</sub> O	1,94
Ca <sup>+2</sup>	0,98	40,1	CaO	1,07
Cd <sup>+2</sup>	1,00	112,4	CdO	0,47
Sr <sup>+2</sup>	1,15	87,6	SrO	0,58
Pb <sup>+2</sup>	1,26	207,2	PbO	0,27
F <sup>-1</sup>	1,33	19,0		
K <sup>+1</sup>	1,33	39,1	K <sub>2</sub> O	1,28
Ba <sup>+2</sup>	1,35	137,3	BaO	0,39
O <sup>-2</sup>	1,40	16,0		

<sup>1/</sup> Relación entre el número de iones positivos que arroja un peso dado del óxido y el número que produce el mismo peso de SiO<sub>2</sub>.

Aunque no sean tan lógicos, los factores basados en el peso porcentual del óxido en la mezcla son de más óbmoda utilización que los que se basan en el porcentaje de moles (como lo es el equivalente iónico). Los factores indicados en el cuadro 5, que están presentados de esta forma, son aplicables para calcular las propiedades térmicas y elásticas de los vidrios corrientes de sosa y cal. Sin embargo, no resultan exactos cuando la composición se desvía mucho de lo normal.

Por supuesto, es decisivo tener alguna idea del efecto de las sustituciones sobre las características funcionales del vidrio. La viscosidad es una propiedad dinámica y no cabe por lo tanto esperar que sea una función verdaderamente aditiva de las propiedades estáticas

de los constituyentes del vidrio. No obstante, es útil, al abordar un problema tan complejo, suponer que cada componente hace su aportación independiente. En el cuadro 6 se dan el aumento (+) o disminución (-) de temperatura necesarios para mantener la viscosidad en su valor inicial cuando se sustituye un punto porcentual del peso de sílice por otro óxido. En razón de la elevada variación de la viscosidad del vidrio con la temperatura, es más práctico referirse al logaritmo del valor de la viscosidad  $\eta$  (en poises) que al valor propiamente dicho. Una viscosidad de  $\log \eta = 2$  corresponde aproximadamente a la temperatura de fusión, uno de 3,5 a la temperatura a la que el vidrio se retira del horno, y uno de 13 a la temperatura de recocido. El intervalo de temperaturas entre  $\log \eta = 3,5$  y  $\log \eta = 5,5$  es el "intervalo de trabajo" del vidrio y se extiende desde cerca de 1.080°C a 850°C.

Cuadro 5

Cálculo de las propiedades físicas del vidrio de soda y cal según su composición en óxidos

a) Factores (por unidad de porcentaje de peso)

Oxido	Coefficiente de dilatación ( $10^{-4}$ por °C) (a)	Volumen específico ( $10^2$ cm <sup>3</sup> /g) (v)	Tensión superficial (dyn/cm) (y)	Módulo de Young (E) (kilobar)	Calor específico (f, g)	
SiO <sub>2</sub>	0,05	0,44	3,25	6,9	,000468	0,1657
Li <sub>2</sub> O	6,56	0,350				
Na <sub>2</sub> O	4,32	0,324	1,27	9,8	,000829	0,2229
K <sub>2</sub> O	3,9	0,357		6,9	,000335	0,2019
MgO	0,45	0,322	5,77	3,9	,000514	0,2142
CaO	1,63	0,231	4,92	6,9	,000410	0,1709
BaO	1,40	0,122	3,7	6,9		
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,66	0,460	0,23	5,9	,000635	0,198
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,14	0,373	5,98	14,7	,000453	0,1765
ZnO	0,70	0,168		9,8		
ZrO <sub>2</sub>	0,23	0,173				
PbO	1,06	0,093				

b) Fórmulas

Si los factores a, v, etc. y los pesos porcentuales p correspondientes a los constituyentes en óxidos se distinguen con los subíndices 1, 2, ..., las fórmulas de las propiedades de los vidrios son las siguientes:

Coeficiente de dilatación lineal:  $a = a_1 p_1 + a_2 p_2 + \dots$   
 Volumen específico = 1/densidad:  $v = v_1 p_1 + v_2 p_2 + \dots$   
 Tensión superficial:  $\gamma = \gamma_1 p_1 + \gamma_2 p_2 + \dots$   
 Módulo de Young:  $E = E_1 p_1 + E_2 p_2 + \dots$

Calor específico medio, 0°-t° C:  $s = \frac{ft + g}{0,00146 + t}$   
 donde 100f =  $f_1 p_1 + f_2 p_2 + \dots$   
 y 100g =  $g_1 p_1 + g_2 p_2 + \dots$

Cuadro 6

Cambio de temperatura necesario para restablecer la viscosidad inicial y cambio del intervalo de trabajo cuando se sustituye una unidad de porcentaje de peso de SiO<sub>2</sub> por otro óxido  
(°C)

Óxido sustitutivo	Viscosidad inicial (log $\eta$ )			Cambio del intervalo de trabajo (log $\eta = 3,5 - 5,5$ )
	2	3,5	13	
Na <sub>2</sub> O	-17,0	-12,5	-3,5	-4,3
MgO	-9,0	-5,0	+3,3	-3,5
CaO	-20,0	-11,8	+8,0	-5,6
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-20,0	-11,6	+7,3	-7,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	+12,5	+9,6	+2,8	+2,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-11,5	-8,0	-	-3,4
PbO	-12,4	-9,8	-2,9	-2,3

Anomalías

Además de las anomalías que ocurren en torno a la temperatura de recocido, hay dos bien conocidas que se relacionan con la formulación de la mezcla: la anomalía del borato y la de los álcalis mezclados.

La anomalía del borato llama inmediatamente la atención en el cuadro 5: el B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es el único óxido que hace una aportación negativa al coeficiente de dilatación. La explicación es la siguiente: excepto por su carga, todo ión confinado a una posición en un sólido es como una molécula de gas a una presión sumamente alta, es decir, confinada a un volumen sumamente pequeño. Bombardea las "paredes" de su hueco y las empuja hacia fuera, contribuyendo a la expansión de todo el sólido. Sin embargo, el ión es portador de una carga eléctrica positiva y está rodeado por cargas negativas. Si la carga positiva es plenamente compensada, las fuerzas electrostáticas resultantes tienden a contener el ión y a reducir su movimiento térmico. En el vidrio, los iones con una sola carga no están plenamente compensados, y su aportación a la dilatación es, por lo tanto, grande. Esto resulta del cuadro 5; los iones alcalinos con una sola carga Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> son los que hacen, con mucho, la mayor aportación. Además, a causa de su gran movilidad, pueden incluso escapar a huecos que no tengan carga eléctrica, de manera que su aportación a la dilatación se hace aún mayor. De este modo, la mayor parte de la dilatación del vidrio es atribuible a los iones alcalinos, y, a temperaturas alrededor de los 500°-600°C, cuando su movilidad se acrecienta grandemente, la dilatación aumenta rápidamente.

Ahora bien, la posición natural en que se encuentra un ión boro (0,22 Å), con su carga de +3, es el espacio muy pequeño (0,21 Å) que queda al juntarse tres iones oxígeno, es decir, uno de los pequeños canales que unen las posiciones normales del vidrio. Este es el tipo de posición o hueco que ocupan en el B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fundido, que tiene un elevado coeficiente de dilatación. Sin embargo, si los iones alcalinos ocupan posiciones adyacentes, los iones boro son rechazados por sus cargas positivas a una posición 4-0, es decir, el tipo de hueco que ocupa el silicio

en la sílice fundida, de bajo coeficiente de dilatación. Por tanto, la primera adición de  $B_2O_3$  a un vidrio que contenga álcali hará bajar el coeficiente de dilatación, como lo haría un aumento del contenido de sílice. Sin embargo, si se añade demasiado boro, éste puede formar su propio sistema vítreo rivalizando con el silicio, y puede producirse una separación de fases. El efecto de la adición de boro no es, pues, sencillo; su pequeño tamaño le permite desempeñar diversos papeles.

La anomalía de los álcalis mezclados consiste en que propiedades tales como la resistividad eléctrica y química, que suponen el desplazamiento de iones móviles, adquieren valores muy superiores si se añade una mezcla de dos álcalis que si se añade sólo uno de ellos en la misma proporción de moles. La explicación probable es que, cuanto más pequeño es el ión, tanto más fácilmente pasa por los canales de la estructura, pero tanto menos fácil es quitarlo de una posición cargada para que se vuelva móvil, porque el campo electrostático es mayor. Así pues, a una temperatura dada, un vidrio de litio tendría cierto número de iones muy móviles, mientras que un vidrio de sodio tendría más iones móviles pero de menor movilidad. En ambos casos, desde luego, hay tantos huecos cargados vacíos como iones móviles que los abandonaron, pero estos vacíos se caracterizan por su estructura estática y no por la naturaleza de los iones que hacía poco los ocupaban. Si se mezclan los dos vidrios, los iones litio más móviles ocupan rápidamente los numerosos huecos abandonados por los iones sodio menos móviles, dejando sólo a estos iones lentos en libertad para desplazarse. Es como un juego de las cuatro esquinas, en el que gana el jugador más ágil.

#### Comportamiento en servicio

El hombre de la calle no está interesado por la constitución ni por la composición química del vidrio. Lo que le preocupa es que sus ventanas o botellas conserven su transparencia y no se rompan con facilidad. En pocas palabras, le importa su durabilidad química, mecánica y térmica. El fabricante, siempre que satisfaga estos requisitos, tiene mucho margen para formular un vidrio que se adapte a sus propias condiciones.

#### Durabilidad química

La estructura de un vidrio de sosa y cal consiste principalmente, como hemos visto, en grandes iones oxígeno mantenidos juntos como un racimo de uvas por pequeños iones silicio y una dispersión de iones sodio y calcio. Por lo que hace a la durabilidad química, los iones oxígeno son pasivos: desempeñan aproximadamente la misma función que tienen en el aluminio anodizado, en el que proporcionan una película protectora sobre este metal que, en otras condiciones, es sumamente reactivo. Aunque un líquido en contacto con el vidrio puede tener una estructura de corto alcance muy semejante a la del mismo vidrio, la movilidad de sus iones es mucho mayor. Si el líquido contiene iones alcalinos, éstos tienden a emigrar hacia el vidrio, diluyendo su contenido de sílice, quizá hasta el extremo de que la capa superficial se vuelva soluble en agua. Los iones sodio, por ejemplo, forman una capa de silicato de sodio soluble (vidrio soluble) sobre la superficie. Cuando la capa superficial se disuelve, la que está debajo queda expuesta al ataque. De este modo, el ataque de una solución alcalina continuará durante tanto tiempo como permanezca sin agotar y en contacto con el vidrio. El alcance del ataque está determinado en parte por la movilidad de los iones en el vidrio y en parte por las reacciones químicas de la capa superficial enriquecida con álcalis. Cuando se interrumpe el ataque, puede quedar cal insoluble en la superficie en forma de depósito gris, lo que da al vidrio el aspecto de haber sido corroído o esmerilado.

Si la solución no contiene iones alcalinos, o si se trata de agua o ácido, los iones alcalinos se difunden fuera del vidrio y son reemplazados por pequeños iones hidrógeno (a menudo hidratado) de manera que la capa superficial se transforma en un vidrio de hidrógeno y silicato en lugar de vidrio soluble. La capa superficial permanece íntegra y actúa como una barrera contra el progreso del ataque. Puede terminar por desprenderse debido a las tensiones producidas por la diferencia de estructura. Si se escama, aparece una nueva superficie que queda expuesta a un ataque renovado. Este tipo de ataque es, por lo tanto, intermitente.

La reacción inicial del agua con una superficie vítrea es notablemente rápida. Si se toman dos botellas calientes de un túnel de recocido y se frotran entre sí, el vidrio sufre abrasión. Si se dejan las botellas en reposo durante una hora o dos, la abrasión se reduce mucho. Al parecer, el vidrio toma del aire una película invisible de humedad que lubrica la superficie. La película parece ser un gel superficial; las manchas causadas por iones metálicos, por ejemplo, hierro y cobre, que se han difundido por la película son difíciles de eliminar.

Se ha comprobado que las botellas que presentan un empañado (una película nebulosa) tras haber estado en un túnel de recocido ambientado con petróleo han mejorado su durabilidad luego que se ha lavado el empañado. El empañado es un depósito de sulfato de sodio producido por el ataque de la superficie del vidrio, por el  $\text{SO}_3$  proveniente de la combustión de un fuel-oil que contiene azufre. Como se ha sugerido anteriormente, la eliminación de los iones sodio de la superficie del vidrio mejora su durabilidad química.

La acción del ácido fluorhídrico (HF) es excepcional. Dado que el HF disuelve la sílice, el ataque es inmediato. La superficie de un vidrio desbastado puede pulirse sumergiéndolo en el ácido. Actualmente la mayor parte del vidrio tallado se pule de esta manera en una fracción del tiempo que antes requería el pulido mecánico.

Aparte de las derivadas de la movilidad de los iones y de la composición química se presentan otras complicaciones. Un incremento de la temperatura puede traducirse en una velocidad de ataque relativamente más elevada para un vidrio que para otro; una prueba acelerada efectuada a alta temperatura puede clasificar a los vidrios en un orden diferente de resistencia química que una prueba llevada a cabo a temperaturas normales. Cualquier tendencia a la separación de fases en un vidrio disminuirá por lo común su resistencia química. Esto puede invertir el efecto que se espera de algunas adiciones. Por ejemplo, la sustitución de parte del  $\text{CaO}$  por  $\text{BaO}$  en semejante vidrio, que a primera vista parece ser una equivocación, puede aumentar mucho la durabilidad por reducir la tendencia a la separación de fases. Algunos de los elementos inicialmente lixiviados de ese vidrio a la solución atacante pueden fomentar (alcalis) o impedir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ) la continuación del ataque. El problema de mejorar la durabilidad química del producto con aditivos es por lo tanto muy complejo, y sólo puede darse una indicación aproximada de la influencia de cada uno de éstos. En la siguiente lista, el número es el aumento o disminución (-) porcentual de la durabilidad que cabe esperar cuando se añade un 1% del óxido a la composición de un vidrio de botella corriente.

Na <sub>2</sub> O	-50
MgO	28
CaO	12
BaO	9
ZnO	7
PbO	2

El K<sub>2</sub>O, por sí mismo, tiene un valor parecido al del Na<sub>2</sub>O, pero si ambos álcalis se mezclan, la durabilidad es superior a la que se obtiene cuando se añade uno sólo de ellos. El Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, tiene un factor positivo de alrededor del 22%, pero sólo hasta un 2% total de alúmina en el vidrio. El B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, si reemplaza al Na<sub>2</sub>O, tiene un efecto positivo hasta una sustitución del 4%, a causa de la reducción del contenido en Na<sub>2</sub>O.

#### Durabilidad mecánica

El vidrio posee propiedades mecánicas peculiares que determinan su robustez en servicio. Aunque su resistencia a la tracción es intrínsecamente unas 1.000 veces superior a la del acero, lo prudente es utilizar en los diseños un valor 10 veces menor, es decir, de 1.000 psi. La razón por la que debe dejarse ese enorme margen es que el diseñador ha de tener en cuenta la debilidad de la superficie del vidrio. Además, la resistencia depende de la duración del ensayo y del tamaño de la muestra ensayada. Esos factores dominan de tal modo el comportamiento mecánico del vidrio, que las diferencias de composición química son relativamente insignificantes, razón por la cual pueden pasarse por alto a efectos prácticos.

Dos son las teorías principales que intentan explicar estas características. Una de ellas las atribuye a una reacción, durante la rotura, entre el vidrio y la humedad atmosférica. De la otra, que es más fundamental, nos ocuparemos aquí.

Por su completa homogeneidad, el vidrio es un material ideal para la aplicación de la teoría matemática de la elasticidad. Según esa teoría, si un material que tenga una fisura es sometido a tensión, el esfuerzo de tracción se intensifica en las proximidades de la fisura en un grado que depende del tamaño y de la forma de la misma. Si el esfuerzo es lo suficientemente intenso como para provocar un agrandamiento de la fisura, tal esfuerzo irá aumentando y producirá una rotura progresiva y catastrófica. A diferencia de la mayor parte de otras propiedades físicas, la resistencia del vidrio dependerá, pues, de que existan o no anomalías locales de estructura, más bien que de la estructura media en su conjunto. Esto lo demuestra claramente el hecho de que el vidriero pueda "oortar" el vidrio iniciando una grieta en un arañazo practicado en la superficie del mismo con una punta de diamante. Lo curioso es que el vidrio parece comportarse como si tuviera muchas pequeñas fisuras lo suficientemente grandes como para poder ser apreciadas con el microscopio, aunque en realidad nunca lo son. Tales fisuras hipotéticas son conocidas como "fisuras de Griffith" por llamarse así el primero que utilizó el concepto.

Antes hemos comparado la acción de los iones móviles del vidrio fundido con el comportamiento de los perros pastores en un rebaño de ovejas, por cuanto la actividad de dichos iones provoca, de vez en cuando, la rotura de los enlaces de silicio-oxígeno. Tal acción persiste incluso a temperaturas de recocido, y la cuestión que se plantea es si esa actividad de rotura de enlaces podría ser lo bastante importante a las temperaturas del ambiente, que son mucho

más bajas, como para que tales enlaces rotos constituyeran una fisura de Griffith. A primera vista parece que ese hecho sería tan raro que carecería de importancia, pero si se piensa que en cada centímetro cúbico de vidrio hay alrededor de un trillón de iones de sodio, y que cada uno de ellos tiene muchas posibilidades por segundo de probar sus fuerzas contra los enlaces de silicio-oxígeno, las oportunidades de éxito no son de despreciar. Podría decirse que, en este cuadro dinámico, las fisuras de Griffith se producirían, y probablemente desaparecerían de inmediato, de modo incesante en toda la masa del vidrio, y ello al azar y muchas veces por segundo. Un examen microscópico no permitiría, desde luego, detectarlas. No obstante, si el vidrio se hallara sometido a suficiente tensión, una de esas fisuras podría "congelarse" in situ, en cuyo caso el efecto intensificador de la tensión motivaría su propagación hasta originar una rotura macroscópica.

En realidad, se requerirían no uno sino varios sucesos de este tipo, en acción simultánea, para provocar una fisura autogeneradora. Ello afecta de modo considerable a la probabilidad de formación de fisuras. Si, por otra parte, la fisura se halla en la superficie del vidrio, será necesario un número mucho menor de tales sucesos, por lo que las posibilidades de rotura a partir de la superficie son muchísimo mayores que a partir del interior del vidrio.

Si esta es la explicación correcta del comportamiento del vidrio sometido a esfuerzo, habría esperar entonces varios resultados: el vidrio siempre se rompería a partir de la superficie; a mayor superficie, mayores probabilidades de rotura; cuanto más durara la tensión, mayores serían esas probabilidades; por ser la rotura cuestión de probabilidades, habría una variación inherente en los resultados de los ensayos de muestras idénticas; la resistencia aumentaría a temperaturas muy bajas, pues entonces los iones móviles pierden su movilidad; y, por último, y de manera algo sorprendente, el número de iones móviles no influiría mucho en la variación de la resistencia.

Ahora bien, todo esto ocurre en realidad. El vidrio siempre se rompe a partir de una superficie, aunque ésta puede ser una superficie interna situada en el límite de una burbuja o en una inclusión de arenisca. Las muestras de ensayos de superficie muy pequeña poseen una gran resistencia; las fibras finas de vidrio son excepcionalmente resistentes. El vidrio es unas tres veces más resistente a la carga impulsiva que a una tensión mantenida durante un tiempo prolongado. Los ensayos efectuados con muestras idénticas dan un coeficiente de variación de alrededor del 13%. A temperaturas del nitrógeno líquido, la resistencia del vidrio es mucho mayor. La resistencia de la sílice fundida, que sólo contiene trazas de sodio, es menos de dos veces la del vidrio de sosa y cal con aproximadamente 15% de  $\text{Na}_2\text{O}$ .

Proteger la superficie parece ser la única manera práctica de conseguir una elevada resistencia. El comportamiento en servicio de los vidrios de borosilicato suele ser mejor, pues resisten al rayado. En gran parte por la misma razón, las botellas son tratadas a veces con titanio, depositándose en su superficie una delgada capa de  $\text{TiO}_2$  o  $\text{SnO}_2$ . Todo proceso que pueda inducir un esfuerzo de compresión permanente en las capas superficiales aumentará la resistencia de éstas, hasta el punto de que será preciso vencer ese esfuerzo antes de que un esfuerzo de tracción pueda romper el vidrio a partir de la superficie. Desde luego, en algún otro lugar del vidrio deberá producirse una tensión correspondiente que equilibre la compresión, pero ello puede ocurrir en la masa interna del vidrio, donde la resistencia es mucho mayor. El vidrio templado se obtiene aplicando este principio. En lugar de recocer el vidrio,

Este se calienta a una temperatura uniforme oasi lo suficientemente elevada como para distorsionarlo, y a continuación es enfriado con rapidez por medio de una corriente de aire aplicada de modo uniforme a la superficie. La resultante distribución parabólica de la temperatura crea una distribución parabólica de la tensión cuando finalmente la temperatura se difunde por igual, viniendo a ser el esfuerzo de compresión en la superficie unas dos veces el esfuerzo de tensión máximo introducido en las capas centrales. De este modo, la resistencia puede aumentarse por un factor de 2,5-5. Si el vidrio llega a romperse, lo hace en pequeños trozos cuadrangulares, mucho menos capaces de causar heridas que las agudas astillas que produce al romperse el vidrio recocido. Pueden conseguirse resistencias prácticas aun mayores regularizando la estructura de la superficie en un proceso ulterior, en el que, por ejemplo, se intercambien las álcalis superficiales sumergiendo el vidrio en un baño de álcalis fundidos. Todos los procesos mencionados deben emplearse sólo con artículos acabados, pues el corte del vidrio liberaría la tensión interna de éste, provocando su rotura.

#### Durabilidad térmica

Durabilidad térmica es la capacidad de resistir bruscos cambios de temperatura. En el vidrio viene a ser como la durabilidad mecánica, por cuanto es cuestión de probabilidad y depende de los mismos factores; no obstante, depende asimismo de la composición química en la medida que ésta determina el coeficiente de expansión térmica del vidrio (véase el cuadro 5). La durabilidad térmica es inversamente proporcional al coeficiente de expansión térmica. Por supuesto, cuanto mayor sea la expansión o contracción a un cambio de temperatura dado, mayor será también la tensión introducida. La durabilidad térmica del vidrio de sosa y cal ( $\alpha = 9 \times 10^{-6}$ ) es sólo alrededor de un tercio de la del vidrio de borosilicato ( $3 \times 10^{-6}$ ), y resulta casi imposible que un cambio brusco de temperatura baste por sí solo para romper la sílice fundida ( $0,5 \times 10^{-6}$ ).

#### Vidrio ceramizado

La desvitrificación puede ser una fuente de disgustos para el técnico en vidrio. Una sección de material refractario frío en la zona de trabajo de un horno para vidrio, a la que éste se adhiere y se desvitrifique, y de la que se desprenda de vez en cuando produciendo inclusiones cristalinas, quizá en todos los artículos fabricados, puede causar estragos en las cifras de producción, debido a las tensiones creadas en torno a esas inclusiones y las consiguientes roturas que tales tensiones originan. Sin embargo, en los últimos años se ha sacado excelente partido de la desvitrificación controlada, pues ha dado lugar a la creación del vidrio ceramizado.

El éxito del vidrio ceramizado depende fundamentalmente de dos factores ya mencionados. El primero de ellos responde al principio de que utilizando una escala de dimensiones lo suficiente pequeña, como en el caso de la fibra de vidrio, se consigue una resistencia muy elevada. Por tanto, si el material se divide según una escala de dimensiones suficientemente pequeña, por desvitrificación uniforme y de grano fino, no sólo resistirá las tensiones inherentes originadas por las termocontracciones diferenciales de las distintas especies cristalinas, sino que también la resistencia práctica del compuesto puede ser muy superior a la del vidrio base. El segundo factor es la extraordinaria amplia gama de propiedades físicas que puede conferirse a estos nuevos materiales.

Como puede verse, mientras las propiedades físicas de un material son un simple promedio de contribuciones de sus iones componentes, la posible gama de propiedades será muy reducida. Tal es el caso del vidrio. Por otra parte, en los materiales cerámicos tradicionales la gama es mucho más amplia, porque los iones están dispuestos en las complejas geometrías de los minerales componentes; las propiedades constituyen entonces un promedio de las contribuciones de compuestos químicos más bien que de los iones individuales. La gama sólo está limitada por la disponibilidad de minerales naturales, y por la habilidad del técnico para sinterizar una mezcla de ellos formando un todo compacto más o menos libre de lagunas. En el caso del vidrio ceramizado, las especies minerales son creadas in situ (en realidad, pueden ser desconocidas en la naturaleza), y el problema de las lagunas no se plantea. Como consecuencia de ello, es posible una gama de propiedades muy amplia. Por ejemplo, puede obtenerse vidrio ceramizado con un coeficiente de expansión térmica nulo o incluso negativo, por lo que su resistencia a los cambios bruscos de temperatura es casi infinita. Además, el hecho de que carezcan de lagunas permite conferirles transparencia, si se eligen para ello cristalitas de propiedades ópticas adecuadas.

La cerámica de vidrio se funde y trabaja del mismo modo que los vidrios tradicionales. El truco de la nueva tecnología consiste en nuclear el tipo de desarrollo cristalino que produzca la propiedad deseada. La nucleación puede efectuarse por medio de luz ultravioleta o de un agente nucleante, como el  $TiO_2$ . La nucleación debe ser lo suficientemente eficaz como para contrarrestar la tendencia natural de la cristalización a operarse a partir de la superficie; de lo contrario, resultará una estructura bandeada, es decir, no irregular. A este respecto, es realmente ventajosa una tendencia a la separación por fase. No sólo proporciona otro parámetro para ayudar a controlar el tipo de cristal obtenido, sino que la desvitrificación se desarrolla en la masa del vidrio a partir de innumerables superficies de contacto entre fases. A menudo, por tanto, el vidrio base tiene dos vitrificantes competidores, tales como el  $SiO_2$  y el  $P_2O_5$ .

Una serie típica de operaciones en la fabricación consiste en obtener primero el artículo por medios tradicionales, enfriarlo después a la temperatura de nucleación, que suele ser muy inferior a la de desvitrificación, y mantenerlo así durante algún tiempo. La temperatura elegida corresponde a menudo a la de reblandecimiento incipiente, es decir,  $600^{\circ}C$ . La temperatura se aumenta después poco a poco con objeto de que los cristales crezcan lo bastante para conferir rigidez al artículo, y se mantiene por último a unos  $800^{\circ}C$  hasta obtener el grado de cristalinidad deseado.

Aunque los principios generales de la tecnología de la cerámica de vidrio son conocidos, el desarrollo de ésta es aún principalmente empírico. No obstante, estos nuevos materiales tienen un campo de aplicación potencial tan grande, que es probable que su tecnología se desarrolle y alcance tanta importancia como la propia tecnología del vidrio.

### III. MATERIAS PRIMAS Y ADITIVOS DE LA MEZCLA VITRIFICABLE

#### Materias primas

Las materias primas utilizadas para la fabricación de vidrio deben analizarse químicamente con objeto de determinar su composición de óxidos y poder calcular exactamente sus proporciones en la mezcla vitrificable. El vidrio final también debe analizarse para comprobar esos cálculos, pues algunos componentes pueden haberse perdido por volatilización o haber sido arrastrados en forma de polvo por las llamas. Cada horno tiene, a este respecto, sus propias peculiaridades.

Los vidrios de sosa y cal suelen contener magnesia ( $MgO$ ), alúmina ( $Al_2O_3$ ) y otros varios óxidos en pequeñas cantidades, que pueden añadirse deliberadamente o hallarse presentes como impurezas en los minerales disponibles. La idoneidad de los minerales locales para la fabricación de vidrio depende en gran parte de que estén exentos de contaminación por el hierro. Un vidrio que contenga 0,05% de  $Fe_2O_3$  tendrá un color objetable si se observa contra un mantel blanco. Cuando una mezcla contenga una cantidad de hierro tan considerable como la señalada, si se quiere vender la cristalería de mesa, fabricada con ella, habrá de enmascararse el color añadiendo descolorantes a la mezcla. En el vidrio de ventana puede tolerarse un nivel de hierro más alto (0,1% de  $Fe_2O_3$ ) porque, una vez instalada la hoja de vidrio, sus bordes quedan ocultos y el color es, por tanto, menos perceptible. Como la arena sílicea es el mayor componente de la mezcla, su contenido en hierro no deberá ser superior al 0,025% aproximadamente de  $Fe_2O_3$ , a fin de que haya un margen para la pieza caliza o la dolomita, que con frecuencia contienen un 0,1%, y para cierta inevitable contaminación de hierro que pueda ocurrir en la fábrica, sobre todo si se utiliza una elevada proporción de chatarra de vidrio (calcin). El problema de controlar el color requiere atención diaria, pues éste no sólo depende de las materias primas, sino también de la atmósfera del horno y de la regulación de la llama.

Los aspectos señalados constituyen de por sí una serie formidable de aspectos que ha de tener en cuenta el técnico en vidrio responsable. Es obvio que en una publicación de estas proporciones sólo pueden darse algunos principios rectores. La mayor parte de la literatura técnica sobre la fabricación de vidrio suele ser de carácter teórico, por lo que al técnico le resulta difícil encontrar y obtener la información necesaria para resolver problemas que se le planteen en la práctica. El intento hecho aquí de resumir la información para fines prácticos tiene los inconvenientes propios de toda simplificación, lo que ha de tenerse en cuenta.

Al ocuparse de los vidrios comunes de sosa y cal, el técnico nunca parte enteramente de cero. O bien este tipo de vidrio ya se fabrica, o bien el técnico utiliza para su trabajo una composición expuesta en un libro, por lo que las nuevas materias primas o fórmulas de la mezcla son simples variantes de una norma y, debido a la relación de los aditivos, las propiedades físicas del vidrio final pueden calcularse con arreglo a lo indicado en el capítulo II. La principal cuestión que se plantea es si el cambio causará dificultades en la fusión o trabajado del vidrio. A la inversa, puede que sea necesario ver la forma de modificar un tanto la mezcla para atenuar determinada dificultad en la fusión o trabajado.

La calidad de la arena, que constituye el 60% de la mezcla, es el aspecto más importante. Si está contaminada de hierro, deberá considerarse la conveniencia de descontaminarla. El contenido de hierro determina en gran parte la medida en que pueden utilizarse otros materiales locales, o si sólo puede conseguirse un grado aceptable de color utilizando importada arena o descolorantes. La calidad debe ser constantemente fiable, o habrá de lograrse que lo sea por medio de una mezcla preliminar, de modo que los cálculos tengan validez en todo momento. Lo mismo cabe decir, por supuesto, de cualesquiera materias primas utilizadas.

En lo que atañe a los aditivos secundarios, tales como descolorantes y agentes de afinado, es mejor considerarlos por separado; la fórmula de la mezcla suele calcularse a base de los principales componentes, a los que a menudo se añade una mezcla especial para hacer correcciones diarias. Con frecuencia, la proporción de la mezcla especial está relacionada con la proporción del calcín alimentado al horno, de forma que la proporción de calcín pueda variarse a diario para evitar una excesiva acumulación del mismo. Debe evitarse mantener grandes existencias de calcín, no sólo por razones de buena administración, sino también porque recoge suciedad y porque, debido a su incierta edad, puede no corresponder, en cuanto a composición, al vidrio que a la sazón se está fundiendo, invalidando con ello los cálculos de la mezcla.

#### Arena para vidrio

Un primer indicio de la idoneidad de una arena local puede obtenerse sometiéndola al examen de un microscopio de poco aumento. Los granos de cuarzo, fáciles de reconocer, pueden incluso aparecer incoloros, pero puede haber entre ellos algunos granos oscuros. A menudo, los granos de cuarzo están parcialmente cementados por un material amarillento, una arcilla que contiene gran parte del hierro. En general, la arcilla puede eliminarse frotando los granos entre sí y lavándolos después. En ese caso, habrá buenas perspectivas de descontaminar la arena por medios sencillos; en cambio, serán escasas si los propios granos de cuarzo están manchados de amarillo, o si los granos oscuros son numerosos. Estos últimos pueden ser de origen orgánico y desaparecer, por la acción del calor, sin perjudicar al resto del material, pero a menudo se trata de minerales de hierro o de titanio. Debido a su mayor densidad o a sus propiedades magnéticas, quizá sea posible eliminarlos por métodos muy perfeccionados y complejos. Puede obtenerse un indicio del grado de contaminación suponiendo que los granos tienen un 10% de  $Fe_2O_3$ , de modo que si hay menos de un grano oscuro por cada 100 claros, el contenido en hierro de la arena es inferior a 0,1%. Este ensayo preliminar puede indicar si estaría justificado investigar a fondo la calidad de la arena.

Si los granos de cuarzo son grandes -por ejemplo, de un diámetro superior a 0,6 mm-, la fusión será lenta. En ese caso, suele cribarse la arena para eliminar de ella los granos grandes. Si el tamaño del grano es demasiado pequeño (0,1 mm), puede formarse polvo que ocasione dificultades dentro y fuera del horno. Si se lava la arena, las cerneduras serán a menudo arrastradas con la arcilla; pero si los granos de la arena original no son de un tamaño bastante uniforme (0,5 mm aproximadamente), la cantidad de arena aceptable obtenida puede ser escasa debido a las grandes pérdidas experimentadas en la criba y en el lavado.

La limpiadora por frotación y el clasificador suelen ser los elementos más eficaces de una planta beneficiadora. El limpiado por frotación consiste de ordinario en hacer pasar la

arena, con agua, por una batería de potentes impulsores, cuyas paletas impulsan el lodo alternativamente hacia arriba y hacia abajo, determinando su salida final al exterior. El contenido de sólidos del lodo debe ser elevado (del 70 al 80%), de modo que las partículas se raspen mutuamente. El lodo es diluido después para que pueda ser bombeado (lo que a veces se hace mediante equipo más complicado de dudoso valor) al clasificador, en el cual la arena y la arcilla son separadas por levigación. Esta máquina consiste en un tornillo de Arquímedes que actúa dentro de un conducto cilíndrico por el que se hace pasar una corriente de agua, con objeto de que la arcilla y las partículas finas sean arrastradas por la corriente y el depósito de arena sea impulsado hacia una salida situada a un nivel superior, yendo a parar a los fosos de desagüe. Existen tanques ultrasónicos que pueden ser muy eficaces para separar las cerneduras y las partículas de arcilla.

Uno de los inconvenientes de la preparación de arena es que en algunas fases ha de estar seca y en otras mojada. El costo de secado es alto, y la arena seca crea problemas de polvo. Al ser recibida del arenal, contiene a menudo piedras o agregados que deben eliminarse para que no dañen al equipo de proceso. Si la arena es almacenada bajo cubierta durante unos días, normalmente podrá reducirse su contenido de humedad para que pueda ser cribada a través de una malla con abertura de  $1/4$  de pulgada sin necesitar secado ulterior, y ser transformada después en lodo. La arena final contendrá alrededor de un 40% de agua, que puede reducirse al 15% en pozos de drenaje debidamente diseñados. Esta humedad residual se eliminaría desde luego en el horno de fusión, pero ello requeriría combustible. Por tanto, lo lógico es eliminarla antes, con lo que es posible efectuar el cálculo de la mezcla a base de arena seca sin necesidad de conocer el contenido de humedad. Eliminando por completo la humedad se consigue también un material fluyente, apto para ser manipulado por medios mecánicos, pero capaz de crear problemas de polvo y de segregación, que suelen mitigarse añadiendo agua a la mezcla en la mezcladora. A base del análisis químico de la arena preparada, el técnico en vidrio puede juzgar hasta qué punto le es posible utilizar otras materias primas locales. Por ejemplo, el contenido de alúmina puede haberse eliminado al lavar la arena, lo que hace necesario reintroducir aproximadamente un 2% de alúmina.

#### Fuentes de álcalis y alcalinotérreos

El segundo componente de la mezcla, y el más caro, es el que proporciona los álcalis, de ordinario la ceniza de sosa (carbonato sódico), que con frecuencia es preciso importar. La ceniza de sosa se prepara especialmente para la industria del vidrio en forma de gránulos fluyentes de gran pureza, y no plantea problemas siempre que se almacene como es debido. Los alcalinotérreos Ca y Mg suelen añadirse como carbonatos, que se descomponen al alcanzar la temperatura en que emiten radiaciones rojas; se considera ventajosa la formación de  $CO_2$  al remover el vidrio fundido. Sin embargo, la principal razón para utilizar los carbonatos es su bajo costo así como sus excelentes propiedades de almacenamiento en forma de piedra caliza. La inclusión de  $MgO$  es opcional en las formulaciones de vidrio para botellas, pero en cambio es esencial en el caso del vidrio plano, pues al fabricarlo ayuda a resolver el problema de la desvitricación.

La forma y el tamaño de grano de estos materiales son importantes. Incluso a su temperatura más alta, el vidrio fundido es unas 1.000 veces más viscoso que el agua, y el entremezclado que puede producirse durante la fusión es pequeño. La homogeneidad del vidrio final

depende, pues, en gran parte, de la eficacia con que los materiales se mezclen en frío y de la ausencia de segregación posterior. Esa eficacia depende, a su vez, de la forma y del tamaño de los granos. Si todos los materiales consistieran en granos esféricos del mismo tamaño, el entremezclado mecánico normal sería muy eficaz, pues todos los granos serían tratados por igual. En ese caso, el diámetro ideal de los granos sería de aproximadamente 0,5 mm, lo que permitiría el mejor acomodo entre la velocidad de fusión y la tendencia a la formación de polvo de la arena cuarzosa. Si las partículas son de tamaño desigual, las más pequeñas quedarán atrapadas durante la fusión, perturbando con ello la composición local. Si los granos son de tamaño uniforme pero demasiado grandes, en el vidrio fundido final habrá zonas ricas y zonas pobres.

En la práctica, y debido a la distinta tensoactividad de los diferentes materiales, hay una duración óptima para el entremezclado. Si esa duración se prolonga, ciertos componentes pueden aglomerarse y formar bolas, de modo que el tamaño real de los granos llega a ser excesivo. Es un proceso análogo al de la bola de nieve que aumenta de tamaño a medida que rueda. Por esta razón, las mezcladoras capaces de una acción de cizallamiento son preferibles a las que sólo están animadas de un simple movimiento de volteo.

Los puntos de fusión de la mayor parte de los distintos componentes óxidos son superiores a las temperaturas prácticas de fusión del vidrio, por lo que la "fusión" de éste a, por ejemplo, 1.500°C, es en realidad una reacción química entre los componentes ácidos y alcalinos más bien que una fusión y disolución físicas. (Véase el cuadro 7.) La alúmina ( $Al_2O_3$ ), por no ser ni ácido ni álcali, es difícil de "disolver" en este sentido. Conviene introducirla en forma de un mineral de cuya estructura sea parte constituyente, como el feldespató ( $K_2O, Na_2O, Al_2O_3, 6SiO_2$ ), que funde a una temperatura de 1.100 a 1.200°C.

La descomposición de los carbonatos se produce a lo largo de una gama de temperaturas, y, aunque es obvio que la secuencia de sucesos durante la fusión es importante, no es posible definir previamente las condiciones. Tales hechos se pueden derivar del cuadro 7 o se han aprendido por la experiencia. Si el  $NaNO_3$  (punto de fusión (p.f.): 307°C) es la única fuente de  $Na_2O$  de la mezcla, puede fundirse por completo e ir a parar a los fosos de desagüe, antes que la mezcla haya alcanzado una temperatura lo suficientemente elevada para reaccionar con la sílice. La presión del  $CO_2$  procedente del  $CaCO_3$  alcanza 1 atm a unos 950°C, pero se disuelve en carbonato alcalino fundido a 800°C aproximadamente, entrando así en estrecho contacto para reaccionar con la arena cuarzosa. Si el  $Na_2SO_4$  fundido se reduce a sulfito mediante adición de polvo de carbón, su reacción al cuarzo es incluso mayor. A causa de todo esto, conviene añadir el álcali en más de una forma.

Las pequeñas sustituciones de  $CaO$  (p.f.: 2.572°C) por  $MgO$  (p.f.: 2.800°C) no parece que tengan gran importancia a efectos de velocidad de fusión. Sin embargo, en experimentos con un vidrio básico del 14% de  $Na_2O$ , 12% de  $CaO$  y 74% de  $SiO_2$ , la sustitución de dos unidades porcentuales en peso de  $CaO$  por  $BaO$  (p.f.: 1.923°C) resultó óptima en lo que respecta a la reducción del tiempo de fusión. Esa cantidad redujo el tiempo de fusión en un 40%. Si 0,2 del contenido de  $Na_2O$  fuera suministrado por  $Na_2SO_4$  en lugar de  $Na_2CO_3$ , se obtendría una ganancia óptima similar, y la sustitución de 1 unidad porcentual en peso de  $SiO_2$  por  $B_2O_3$  aportaría la mitad de esa ganancia.

Quadro 7

Características de fusión y descomposición, de compuestos utilizados en la fabricación de vidrio

Compuesto	Punto de fusión (°C)	Temperatura de descomposición (°C)	Producto de descomposición	Características del producto	
				Punto de fusión (°C)	Temperatura de descomposición (°C)
SiO <sub>2</sub>	1.725				
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	618	...	Li <sub>2</sub> O	~1.700	
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	851	700-1.000	Na <sub>2</sub> O	1.275 <sup>a/</sup>	
NaNO <sub>3</sub>	307	380	Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	480	657
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	884				
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	891	...	K <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	490	
MgCO <sub>3</sub>		~ 700	MgO	2.800	
CaCO <sub>3</sub>		~ 800	CaO	2.572	
BaCO <sub>3</sub>		1.450	BaO	1.923	
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	490				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.050				
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					
cristalino	193 <sup>a/</sup>				
amorfo	315 <sup>b/</sup>				

<sup>a/</sup> Sublima.

<sup>b/</sup> Con sublimación.

En el cuadro 8 se indica la manera más cómoda de convertir la composición de la mezcla en composición teórica del vidrio. Es usual empezar por calcular los pesos relativos de las materias primas de la mezcla, dando por supuesto que el peso de la arena es de 1.000. A continuación se calculan las aportaciones de óxido de cada material a base de sus fracciones de peso (determinadas mediante análisis químico) presentes en el material. (Los valores utilizados en el cuadro se suponen a título de ejemplo.) En una primera aproximación, puede hacerse caso omiso de ingredientes secundarios tales como agentes colorantes o de refino.

Quadro 8

Ejemplo de cálculo de la composición del vidrio a base de la composición de la mezcla

Composición de la mezcla					Composición del vidrio		
Materia prima	Peso relativo	Contribución de óxido			Óxido	Peso relativo	Proporción del total (%)
		Óxido	Fración de peso en la materia prima	relativo en la mezcla			
Arena	1.000	SiO <sub>2</sub>	0,997	997			
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,003	3			
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00025	0,25		SiO <sub>2</sub>	1.099
Ceniza de sosa	335	Na <sub>2</sub> O	0,580	194	Na <sub>2</sub> O	221	14,6
Torta de sal	5	Na <sub>2</sub> O	0,430	2,2	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11	0,7
Bórax	30	Na <sub>2</sub> O	0,163	4,9	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30	2,0
		B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,365	11,0	CaO	90	5,9
Feldespató	150	SiO <sub>2</sub>	0,680	102			
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,180	27	MgO	64	4,2
		Na <sub>2</sub> O	0,130	20			
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,001	0,2	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,6	0,04
Dolomita	160	CaO	0,560	90			
		MgO	0,400	64			
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,001	0,2			
Total	1.680			1.516	1.516	100	

Nota: La relación teórica vidrio-mezcla ( $1.516/1.680 = 0,902$ ) sólo tiene en cuenta la pérdida de gas y agua de las materias primas. En la práctica, las fracciones de peso determinadas por el análisis químico (cuarta columna) son ajustadas para cada horno con objeto de corregir las pérdidas por volatilización y las pérdidas por el polvo que arrastran las llamas a los conductos de chimenea. Estas pérdidas adicionales suelen representar un conjunto entre un 5 y un 10%, y la relación práctica vidrio-mezcla (vidrio fundido-factor de peso) puede situarse entre 0,80 y 0,85.

Las pérdidas por volatilización tampoco se han tenido en cuenta en el citado ejemplo. Sin embargo, pueden ser importantes. Los valores que a continuación se indican se han tomado de la literatura técnica. Se refieren al porcentaje del componente, no del vidrio, y en la práctica varían de un horno a otro, lo que depende, al parecer, del grado en que la mezcla vitrificable esté expuesta a las llamas.

Na <sub>2</sub> O de ceniza de sosa (carbonato)	3,2
Na <sub>2</sub> O de torta de sal (sulfato)	6,0
K <sub>2</sub> O	12,0
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,0
ZnO	4,0

El cálculo inverso, es decir, el derivar la composición de la mezcla de la composición del vidrio deseado, puede efectuarse utilizando factores recíprocos, empezando para ello por la materia prima más compleja y deduciendo los óxidos aportados por ella. Sin embargo, en el caso de pequeñas desviaciones, con frecuencia resulta igualmente fácil operar por el método de ensayo y error en sentido progresivo.

### Materias añadidas a la mezcla vitrificable

#### Aditivos destinados a evitar la desvitrificación

Cuando se fabrican objetos a presión o por soplado en un molde, la desvitrificación rara vez constituye un problema importante, ya que el vidrio se enfría rápidamente, durante el intervalo de desvitrificación, por contacto con el molde. En el caso del vidrio estirado para hojas o tubos, el enfriamiento no se produce de manera brusca, por lo que el proceso depende, esencialmente, de que se logre mantener las temperaturas convenientes para que el vidrio adopte la forma deseada sin ayuda de una ruleta.

Para cada composición vítrea existe una temperatura crítica, conocida como temperatura de licuefacción, por encima de la cual el vidrio fundido se transforma en un líquido estable, en tanto que por debajo de ella empiezan a formarse las fases cristalinas. A la temperatura de licuefacción, las fases líquida y cristalina se encuentran en equilibrio, y los cristales ni crecen ni se disuelven. En el caso de un vidrio con una composición de 16% de  $\text{Na}_2\text{O}$ , 12% de  $\text{CaO}$  y 72% de  $\text{SiO}_2$ , esa temperatura es de  $1.040^\circ\text{C}$ , y la tasa máxima de crecimiento tiene lugar a una temperatura algo inferior, a saber,  $955^\circ\text{C}$ . El crecimiento suele iniciarse en la superficie, extendiéndose hacia el interior a razón de aproximadamente 1 mm/h. Por debajo de  $955^\circ\text{C}$ , la tendencia cada vez mayor de los cristales a crecer queda compensada por la movilidad cada vez menor de los iones. Naturalmente, la viscosidad aumenta también con rapidez a medida que disminuye la temperatura; pero esta circunstancia no influye en la tasa de crecimiento de los cristales, que requiere una cierta ordenación de los iones no directamente relacionada con la viscosidad propiamente dicha. Ahora bien, como la movilidad de los iones decrece rápidamente con la temperatura, cabría esperar un rápido descenso de la tasa de desvitrificación al disminuir la temperatura de licuefacción.

La adición de una pequeña cantidad de prácticamente cualquier óxido soluble que no sea uno de los tres principales,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$ , reducirá la tendencia a la desvitrificación, puesto que dificultará aun más la unión de los iones al retículo cristalino; es decir, provocará un descenso de la temperatura de licuefacción. La adición de una cantidad demasiado grande puede dar lugar a una nueva especie cristalina con una tasa de crecimiento relativamente mayor.

La sustitución parcial del  $\text{CaO}$  por  $\text{MgO}$  en un vidrio de sosa-cal reviste gran importancia práctica e ilustra este punto. En un vidrio base con una composición de 16% de  $\text{Na}_2\text{O}$ , 10% de  $\text{CaO}$  y 74% de  $\text{SiO}_2$ , dos cristales diferentes, la cristobalita ( $\text{SiO}_2$ ) y la devitrita ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$ ), crecen a la temperatura de la tasa máxima de crecimiento. Al reemplazarse el calcio, se suprime la desvitrificación, si bien terminarán por aparecer nuevos cristales con contenido de  $\text{MgO}$ , en la forma indicada en el cuadro 9. Las cifras sugieren que la cuantía de la desvitrificación podría reducirse a alrededor de un 20% utilizando  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$  en la proporción de aproximadamente 6 a 4, a condición de que las características de trabajo del

vidrio no resulten adversamente afectadas. De la casualidad de que el mineral denominado dolomita ( $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{CO}_2$ ) contiene  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$  en la proporción de 5,82/4,17. La roca llamada dolomita, que se forma en la naturaleza a partir de soluciones ricas en carbonatos de calcio y magnesio, es rica en el mineral dolomita y es de composición homogénea sobre grandes áreas. Una roca mucho más común que contiene dolomita es la caliza dolomítica: una caliza que se ha enriquecido en  $\text{MgO}$  como resultado del intercambio de iones con las soluciones de magnesio que se filtran a través de ella. Esa roca tiene una proporción de  $\text{CaO}/\text{MgO}$  mucho más variable.

Cuadro 9

Efecto de la sustitución del  $\text{CaO}$  por el  $\text{MgO}$  en un vidrio con una composición de 16% de  $\text{Na}_2\text{O}$ , 10% de

$[x \text{ MgO}, (1-x) \text{ CaO}]$  y 74% de  $\text{SiO}_2$

X (%)	Temperatura de licuefacción (°C)	Temperatura de la tasa máxima de crecimiento (°C)	Tasa de crecimiento (mm/h)	Especies cristalinas
0	1.000	910	0,095	Cristobalita ( $\text{SiO}_2$ )
	970	910	0,31	Devitrita ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$ )
2	995	895	0,02	Cristobalita
	950	895	0,11	Devitrita
4	970	860	0,01	Cristobalita
	925	860	0,06	Devitrita
6	920	850	0,008	Cristobalita
	880	850	0,005	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$
8	950	860	0,018	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$
	970	910	0,008	Diápsido ( $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ )
10	1.100	910	0,05	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$

El efecto de la sustitución de, por ejemplo, un 4% sobre la viscosidad puede juzgarse por las cifras del cuadro o imaginando que un 4% de  $\text{CaO}$  es reemplazado primero por un 4% de  $\text{SiO}_2$  y que esta sílice es reemplazada luego por un 4% de  $\text{MgO}$ . Para ello sería preciso aumentar en  $4(20-9) = 44^\circ$  la temperatura correspondiente a  $\log \eta = 2$ , con lo que la fusión resultaría más difícil.

La adición de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a la mezcla (lo que equivaldría, poco más o menos, a sustituir la sílice por  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) tiene efectos similares. El resultado más favorable se obtiene con una adición de aproximadamente un 2%. Con esta adición, la temperatura de licuefacción disminuye en unos  $40^\circ\text{C}$  (lo que corresponde, más o menos, a una sustitución con un 4% de  $\text{MgO}$  en el cuadro 9), si bien será preciso aumentar la temperatura de fusión en alrededor de  $25^\circ\text{C}$  y la de trabajo en unos  $19^\circ\text{C}$ .

Aunque el objetivo perseguido es siempre obtener un vidrio homogéneo y de composición calculada, en la práctica puede darse una variación considerable con respecto a la composición calculada, debido, por ejemplo, a la disolución de refractarios, y particularmente a la volatilización diferencial de constituyentes. Es muy probable que la superficie caliente expuesta sea deficiente en  $\text{Na}_2\text{O}$ . Es instructivo tomar una composición típica de sosa-cal, como 16% de  $\text{Na}_2\text{O}$ , 10% de  $\text{CaO}$  y 74% de  $\text{SiO}_2$ , y observar la temperatura de licuefacción a medida que se extrae el  $\text{Na}_2\text{O}$ :

Contenido de $\text{Na}_2\text{O}$ , %	16	14	12	10	8	6	4
Temperatura de licuefacción, °C	1.000	1.120	1.240	1.400	1.470	1.520	1.580

Está claro que, si la superficie, una vez eliminado el álcali por volatilización, no se ve compensada por difusión desde dentro, se desvitrificará incluso a una temperatura de fusión de  $1.500^\circ\text{C}$ . Esto explica la formación de espuma en el horno de fusión, a que se hace referencia en el siguiente capítulo. También se produce desvitrificación cuando se trabajan a la llama vidrios simples de sosa-cal, que suelen dar una superficie mate trabajándolos de este modo. La intensa coloración amarilla de la llama indica la presencia de vapor de sodio en la misma; uno de los primeros trucos del oficio consistía en fundir sal común sobre la superficie para devolverle el brillo.

#### Afinantes

El tiempo requerido para que se disuelvan todas las materias primas, o final de la fusión bruta, no representa más que una pequeña parte del tiempo total necesario para eliminar las burbujas del vidrio (tiempo de afinado) y hacerlo homogéneo (tiempo de refinado). (El término "refinado" se aplica, a menudo, a ambos procesos, mientras que a los agentes de afinado añadidos para acelerar la eliminación de las burbujas se les denomina, a veces afinantes.)

Los procesos involucrados en el afinado no se comprenden cabalmente, pero la consideración de la interacción entre el gas y el vidrio puede darnos una idea aproximada de los mismos (así como del problema de las burbujas, en general). El vidrio es una mezcla de óxidos en que los iones del metal y del oxígeno se hallan en proporciones estequiométricas casi exactas; ahora bien, pueden producirse ligeras variaciones, de importancia en ciertas propiedades, como el color, que dependen de la presencia de mezclas de trazas. Así, se habla de vidrios oxidados y reducidos aun cuando no se trate más que de pequeñas diferencias en el potencial de oxígeno. Esas diferencias son debidas, a menudo, a la atmósfera reinante en el horno por encima del vidrio fundido. Este se ajusta a esa atmósfera, y el contenido de los gases disueltos refleja las presiones parciales de los gases existentes en la atmósfera del horno. El volumen total de los gases disueltos a una presión y una temperatura normales es, aproximadamente, igual al volumen del vidrio, aunque, naturalmente, la proporción por peso es muy pequeña, alrededor de 5 partes en 10.000. En algunos aspectos, el gas disuelto se comporta como si estuviera químicamente combinado, y en otros como si hubiera sido absorbido físicamente. Cuando el vidrio contiene un óxido como el  $\text{As}_2\text{O}_3$ , que absorbe fácilmente oxígeno para transformarse en  $\text{As}_2\text{O}_5$ , puede absorber alrededor de 20 veces el contenido normal de oxígeno.

Cuando se deposita vidrio fundido en una cámara de vacío, suele espumar hasta alcanzar unas seis veces su volumen inicial. Eso sugiere, en primer lugar, que la nucleación de las burbujas se verifica sin dificultad (al contrario que en el caso del agua recalentada, que "choca" y "golpetea"), y, en segundo lugar, que el gas disuelto tarda en difundirse hasta la superficie, desde donde puede escapar sin tener que formar nuevas burbujas. El tiempo de difusión es proporcional al cuadrado de la distancia: tarda 100 veces más en recorrer 1 cm que en recorrer 1 mm. Por consiguiente, el gas penetrará con más facilidad en una burbuja cercana que en una más distante, aunque de mayor superficie. También se sigue que, aunque, por término medio, el gas contenido por el vidrio está en equilibrio con el gas de la atmósfera del horno, se producirán desviaciones locales y rápidas, con relación al promedio, en la proximidad de cada burbuja de gas contenida por el vidrio.

Es sabido que la solubilidad del gas en el vidrio decrece al aumentar la temperatura. La velocidad de difusión, en cambio, aumenta rápidamente con la temperatura. Naturalmente, tanto la solubilidad como la velocidad de difusión varían según los gases de que se trate. La pequeña molécula de hidrógeno puede penetrar en el vidrio fácilmente a temperaturas intermedias, sobre todo si los canales de la red no están bloqueados por iones modificadores, pero las grandes moléculas de  $\text{CO}_2$  parecen tener una velocidad de difusión muy reducida. Claro está que el gas difundente puede reaccionar también, sea con los iones del retículo cristalino, sea con otras especies en difusión. Como ya se ha señalado, el oxígeno puede ser absorbido por el  $\text{As}_2\text{O}_3$  y combinado químicamente para formar  $\text{As}_2\text{O}_5$ . El hidrógeno puede transformarse en agua por oxidación, o el monóxido de carbono en bióxido de carbono por igual procedimiento, y esas moléculas más grandes pueden quedar atrapadas físicamente por no poder difundirse con facilidad. Es éste un problema de índole práctica que se plantea frecuentemente al fundir vidrio en condiciones de reducción. Un vidrio refinado en una atmósfera que contenga hidrógeno y monóxido de carbono retendrá cierta cantidad de dichos gases después de alcanzado el equilibrio. Si se expone ahora el vidrio a una atmósfera oxidante, en la zona de trabajo o antecámara de la unidad de fusión, los gases, al difundirse hacia el exterior, se juntarán con el oxígeno que se difunde hacia el interior, pudiendo formarse burbujas de  $\text{CO}_2$  y de  $\text{H}_2\text{O}$  inmediatamente debajo de la superficie. Este fenómeno, conocido por "formación tardía de burbujas", puede ser muy persistente, ya que está terminada la fase de refinado y las burbujas son demasiado pequeñas para elevarse por su propia fuerza ascendente hasta la superficie. De manera análoga, en el caso de una atmósfera oxidante, de la boquilla del quemador pueden desprenderse algunas de las partículas de carbón que ahí se forman y caer sobre el vidrio oxidado. El monóxido de carbono que se forma se difunde hacia el interior del vidrio y se transforma en  $\text{CO}_2$  en un nuevo proceso de oxidación; este  $\text{CO}_2$  se precipita en forma de burbujas finas, que dañan el producto.

Además de grandes cantidades de aire y humedad, durante la fusión de las materias primas se desprenden importantes cantidades de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y otros gases, principalmente en forma de grandes burbujas, las cuales se elevan rápidamente, flotan y revientan en la superficie de la masa fundida. Las burbujas pequeñas, con menos fuerza ascendente, tardan más tiempo en elevarse. La situación queda ilustrada en el cuadro 10, en el que se indica el tiempo que tardan las burbujas de diversos diámetros en ascender 20 cm hasta la superficie de la masa fundida a distintas viscosidades. Las temperaturas correspondientes que se indican son las de un vidrio típico de rosa-cal.

Las burbujas tienen sólo dos posibilidades de eliminarse: o flotan hasta la superficie y escapan, o el gas que contienen se disuelve en el vidrio. Las cifras del cuadro 10 indican que una burbuja de menos de 1 mm de diámetro tardará más de tres horas en ascender desde el fondo de un tanque de 1 m de profundidad, incluso a la temperatura más elevada. Puesto que esa es, más o menos, la velocidad a que circulan las corrientes de convección en la cuba, pudiera decirse que las velocidades más bajas no son significativas y que las burbujas de diámetro inferior a 1 mm han de eliminarse por otros medios.

La desaparición de la burbuja por disolución depende de la solubilidad del gas que contenga, de su concentración en el vidrio que la rodea, y de la presión que tenga el gas dentro de la burbuja. A causa de la tensión superficial que obra sobre la superficie curva de la burbuja, la presión del gas que contiene es más elevada que la presión hidrostática exterior; en la última columna del cuadro 10 se indica la sobrepresión calculada.

Cuadro 10  
Tiempo que tardan las burbujas de diversos diámetros en elevarse 20 cm hacia la superficie de una masa de vidrio fundido típica a diferentes temperaturas (minutos)

Diámetro de la burbuja (cm)	Temperatura °C					Sobrepresión (atm)
	1.542 log $\rho$ = 2,2 $\rho$ = 158,5	1.451 log $\rho$ = 2,4 $\rho$ = 251,2	1.373 log $\rho$ = 2,6 $\rho$ = 398,1	1.305 log $\rho$ = 2,8 $\rho$ = 631,0	1.245 log $\rho$ = 3,0 $\rho$ = 1.000	
1,0	0,4	0,6	0,9	1,5	2,4	0,0012
0,5	1,5	2,5	3,8	6,2	9,8	0,0024
0,1	38,9	61,5	97,3	154,3	244,7	0,0118
0,05	155,2	245,8	389,7	617,5	978,7	0,0239
0,01	388,3	615,4	975,3	1.540,9	2.449,9	0,1184

Cuadro 11  
Experimento que demuestra la disolución diferencial de burbujas pequeñas en el vidrio <sup>g/</sup>

Tiempo transcurrido (min)	Diámetro observado de cuatro burbujas marcadas a, b, c, d (0,25 mm)				Observaciones
	a	b	c	d	
0	3	4	5		Separación 3-4 mm
25		4	6		Se disuelve la burbuja a
45		3	7		
50		2	6	20	Se acerca la burbuja grande d
55		1	3	20	
60				20	Se disuelven las burbujas b y c, quedando solamente la burbuja grande d

<sup>g/</sup> Basado en un examen microscópico de un vidrio de borosilicato a 1.300°C.

Estas sobrepresiones no son suficientemente importantes para determinar un aumento significativo de la concentración total de gas disuelto, pero sí tienen mucha importancia localmente, es decir, dentro de distancias lo suficientemente pequeñas para que la propagación se efectúe de manera rápida. Para estar en equilibrio, una burbuja pequeña tendría que hallarse rodeada de una mayor concentración de gas disuelto que una burbuja grande, pero, si las burbujas se hallan próximas las unas a las otras, la difusión nivelará el gradiente de concentración, con el resultado de que la burbuja pequeña tenderá a disolverse, y la grande a crecer. La realidad de esta situación queda ilustrada por el experimento del cuadro 11, en el que fueron observadas con microscopio tres burbujas, situadas a una distancia de 3-4 mm entre sí, y luego una cuarta de mayor diámetro. El vidrio empleado era un borosilicato a una temperatura de aproximadamente 1,300°C. Como se verá, incluso situadas a distancias diez veces mayores que sus diámetros, las burbujas más pequeñas son absorbidas por las más grandes.

Es evidente que, si pudiera explotarse esta solubilidad diferencial, se contaría con un medio de acelerar el afinado del vidrio, ya que, a un mismo tiempo, las burbujas pequeñas, de escasa fuerza ascensional, se disuelven, en tanto que las más grandes adquieren mayor fuerza ascensional. Una forma de lograr esto sería saturar el vidrio con un gas que se propagase fácilmente. Para los vidrios oxidados, es obvio escoger el oxígeno; la práctica común consiste en añadir óxidos de arsénico o antimonio con suficiente nitrato para transformarlos por oxidación en los óxidos superiores  $As_2O_5$  ó  $Sb_2O_5$ , que son también solubles en el vidrio. Estos óxidos suelen retener su excedente de oxígeno hasta la temperatura más alta de fusión, liberándolo luego cuando más falta hace. Un exceso de oxígeno daría lugar a la formación de espuma, por lo que poco se ganaría añadiendo más de 1 lb por 1,000 lb de arena de la mezcla. Cuando la mezcla tiene un alto contenido de calcio, conviene tener presente que el óxido de arsénico que contiene ha de ser reoxidado mediante la adición de nitrato. La sosa añadida como nitrato deberá ser suficiente para oxidar todo el  $As_2O_3$ .

Otra manera posible de acelerar el afinado sería provocar la coalescencia de las burbujas. En el afinado con arsénico, la coalescencia parece ser extremadamente rara. El autor la observó solamente una vez en el curso de sus experimentos. Las burbujas pueden adherirse unas a otras durante largo tiempo si son de igual diámetro, hasta que, finalmente, se rompe el equilibrio y una crece a expensas de la otra. Ahora bien, si se añade sulfato a la mezcla, la situación cambia por completo, y la coalescencia pasa a constituir la norma. Aparentemente, se trata de un efecto de tensión superficial, desempeñando el sulfato el papel de "rompeespumas". Como ese efecto requiere un contacto efectivo, tendrá escasa importancia en las fases posteriores de afinado, cuando los "puntos finos" (burbujas finas) se hallan bien dispersos.

#### Colorantes y decolorantes

Pueden agregarse a la mezcla pequeñas cantidades de óxidos coloreados con el fin de dar color al vidrio. Algunos óxidos, como el de cobalto, producen colores muy intensos, por lo que se usan en cantidades sumamente pequeñas. Por ejemplo, una sola parte por millón de óxido de cobalto dará un vidrio azul pálido.

El color producido por un colorante depende del medio que rodee al respectivo ion colorante en el vidrio y, de manera particular, del potencial de oxígeno de éste. Por ello, muchos colores son sensibles a la atmósfera del horno. En el cuadro 12 se indican algunos de los colorantes comúnmente utilizados, así como los colores que producen en diferentes atmósferas.

Las más de las veces, lo que preocupa al tecnólogo en vidrio es la eliminación de colores indeseados: por ejemplo, el verde resultante de la inevitable presencia de algo de óxido de hierro en las materias primas. Dos son las posibilidades que se le ofrecen: puede fundir en condiciones oxidantes, de modo que el hierro dé un color verde-amarillo pálido menos objetable, o puede encubrir el color residual añadiendo deliberadamente colorantes (llamados hoy agentes decolorantes) de un tono complementario, del mismo modo que las lavanderías pueden añadir azul para cambiar una blancura amarillenta en una blancura azulada, que es más aceptable. En el caso del vidrio, la tarea requiere considerable pericia. Se trata no sólo de atender a las variaciones que se registren en el contenido de hierro de las materias primas, sino, además, de enfrentarse con el problema cuantitativo y cualitativo de las variaciones que se den en las condiciones de fusión, ya que una atmósfera de horno más reductora hará que el tono básico desvía hacia un verde-azul y, al mismo tiempo, intensificará el color. En un horno de fusión continua han de transcurrir cuatro o cinco días para que los cambios en la composición de la mezcla alcancen un 50% de eficacia, y otros cuatro o cinco para que alcancen el 75%. Al adoptar medidas de emergencia para corregir la repentina aparición de, por ejemplo, un color verde en un vidrio que se quiere incoloro, se corre, pues, el riesgo, de obtener un vidrio rosa, porque las condiciones que dieron lugar al verde se corrigieron por sí solas antes de que se efectuara el cambio de la mezcla.

El tono verde-amarillo del hierro oxidado requiere un color violeta complementario que lo encubra. Si el vidrio es de potasa-cal, en lugar del mucho más común de sosa-cal, puede utilizarse óxido de níquel; desafortunadamente, el color violeta no se forma en los vidrios de sosa-cal. El neodimio es un decolorante excelente, pero resulta demasiado caro para su aplicación en la mayor parte de los vidrios. Para el vidrio fundido en crisol puede utilizarse bióxido de manganeso, pero, en estos casos, el vidrio resulta sensible a la solarización, es decir, adopta un color morado tras una larga exposición a la luz solar. La práctica más común consiste en emplear selenio (rosa) en combinación con óxido de cobalto (azul). Aunque esos productos químicos son costosos, su poder colorante es tal, que pueden utilizarse cantidades muy pequeñas de los mismos.

Aquí se plantea un conflicto básico en lo que respecta a los elementos requeridos. El cuadro 12 muestra que el costoso selenio es fugaz en condiciones de oxidación; y, sin embargo, estas condiciones son necesarias para evitar la coloración verde-azul del hierro. Si se dependiera sólo de la atmósfera del horno para encontrar el justo equilibrio, se obtendrían colores variables. Es preciso recurrir a un estabilizador; y, como ya se señaló en relación con el afinado, el  $As_2O_3$  actúa como regulador del oxígeno y es muy eficaz para la estabilización de los colores, aunque este procedimiento entraña una considerable pérdida de selenio. En el cuadro 13 se indican las cantidades de selenio que suelen requerirse para vidrios con un contenido dado de hierro y arsénico. Habida cuenta de que el arsénico ha de actuar también como agente afinante, una mezcla que tenga alrededor de 0,05% de  $As_2O_3$  parece constituir una buena solución intermedia. Si se utiliza mucho más arsénico, habrá que tener en cuenta que el tono de color queda perceptiblemente influenciado por el recocido.

Parece lógico suponer que la cantidad de óxido de cobalto empleada esté directamente relacionada con el contenido de  $Fe_2O_3$ , como también con la cantidad de selenio que el arsénico no haya hecho fugaz. En la práctica, pocas veces se analiza el contenido de hierro; éste se infiere de la coloración, y el óxido de cobalto añadido representa unas 0,5 partes por millón.

Cuadro 12

Colores dados por los colorantes comunes que se emplean en la fabricación de vidrio

Colorante	Condiciones de fusión	
	Oxidación	Reducción
Oxido de cobalto	Azul-violeta	Azul-violeta
Oxido crómico	Verde-amarillo	Verde-esmeralda
Oxido de hierro	Verde-amarillo	Verde-azul
Dióxido de manganeso	Amatista a morado	Ninguno
Oxido de neodimio	Violeta	Violeta
Oxido de níquel	Violeta (en vidrios de potasa) Marrón. (en vidrios de sosa)	
Selenio	Fugaz	Rosa
Se-CdS	Ninguno	Rubi (previo recalentamiento)
Azufre	Ninguno	Amarillo a ámbar
Uranio	Amarillo con verde fluorescente	Verde fluorescente

Cuadro 13

Cantidad aproximada de selenio requerida para decolorar vidrio en función de su contenido de arsénico y hierro (Partes por millón en la mezcla)

Contenido de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> del vidrio (%)	Contenido de As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> de la mezcla (%)			
	0,00	0,05	0,10	0,25
0,01	1,9	5,0	6,9	16,9
0,02	3,8	9,4	13,7	32,5
0,03	5,6	13,1	20,6	50,0
0,04	7,5	17,5	30,6	67,4
0,05	11,2	25,0	41,2	89,8
0,06	16,9	36,2	60,0	125,0
0,07	28,7	63,0	100,0	

Cuando un vidrio transparente se colorea debido a una reducción del potencial de oxígeno, es posible, teóricamente, corregir la coloración aumentando la cantidad de los colorantes complementarios añadidos; sin embargo, con cada uno de tales aumentos se reduce la transmisión total del vidrio, dando a éste un aspecto gris apagado. Naturalmente, más vale remediar la causa que tratar de disimularla encubriéndola. Por consiguiente, el técnico tratará de determinar las causas y remediarlas antes de proceder a modificar una composición de mezcla bien establecida. El tono de color y la rapidez con que aparece son indicativos; por ejemplo, la rápida aparición de un tono verde-azul se debe probablemente al choque de la llama. ¿Elimina debidamente el separador magnético los fragmentos extraños de hierro? ¿Están la mezcla o el calcín contaminados por impurezas carbonosas que tienden a reducirlos? ¿Está la atmósfera del horno debidamente controlada, por lo menos con un 2% de excedente de aire? Si las llamas tocan el vidrio, ¿debe ello a que el carbón que se forma en las boquillas de los quemadores desvía las llamas, o a una alineación defectuosa? Si está satisfecho con las respuestas a esas preguntas, el técnico se formulará la siguiente: ¿Hay suficiente nitrato para oxidar el arsénico? En el caso de que el arsénico por sí solo resuelva la situación, no habrá problema; pero, si se necesita más arsénico, es probable que haya que aumentar también la cantidad de selenio, de acuerdo con las cifras del cuadro 13.

El instrumental sirve de poco cuando se trata de calibrar esas ligeras variaciones de color. La comparación de colores se efectúa, a menudo, observando el color mediante varillas de 15 cm de largo que se extraen del horno cada día y reteniendo aquellas que formen una gama de colores, a efectos de comparaciones futuras. Es útil recordar que, para obtener un cambio perceptible de coloración, suele ser necesario modificar el agente colorante en la proporción de un 10%.

#### IV. FUSION DEL VIDRIO

Para la fusión del vidrio no se trata simplemente de alcanzar la temperatura necesaria. Se necesita bastante tiempo, y la mayor parte del combustible utilizado se destina a mantener la temperatura durante el proceso. La eficiencia de fusión queda determinada en gran parte por la posibilidad de completar el proceso en el tiempo más breve posible, de suerte que el costo del combustible se reduzca al mínimo.

El calor termodinámico del vidrio acabado es sólo algo así como 0,017 kWh/kg más elevado que el de las materias primas. Si se compara ese valor con los aproximadamente 0,45 kWh/kg necesarios para calentar el vidrio hasta la temperatura adecuada para trabajarlo, se verá claramente que importa poco que se utilicen materias primas o calcín como material de partida. Para mantener la temperatura del horno durante la fusión se necesita cuatro veces más energía, es decir, unos 2 kWh/kg. Esta, naturalmente, es la energía consumida por hora, y no la correspondiente a la producción total, siendo en buena parte un costo fijo mientras el horno está funcionando. De hecho, la fracción variable del insumo de combustible es bastante superior al 20% que sugieren las mencionadas cifras, ya que, al aumentar la carga del horno, no sólo habrá de emplearse más combustible para mantener la temperatura, sino que, además, deberá aumentarse ésta con objeto de compensar el menor tiempo disponible para el proceso de fusión.

Con frecuencia, el rendimiento de hornos de idéntico diseño y ajustados a la misma temperatura de control varía mucho. Una explicación, muchas veces pasada por alto, es que, aunque en el caso ideal (cuando no hay pérdidas de calor) el insumo de calor se refiere sólo a la temperatura a que el vidrio se extrae del horno, y no a cualquier temperatura más elevada que éste haya alcanzado, en realidad la velocidad de fusión depende considerablemente de esas temperaturas más altas y de su distribución en el horno. A causa de las pérdidas de calor, el insumo local de éste, correspondiente a la diferencia entre la temperatura más alta y la de extracción, no se recupera totalmente dentro de la cámara del horno. Con todo, el principio sigue siendo válido: la distribución del insumo de calor es tan importante como su magnitud.

#### Hornos

En los hornos caldeados con fuel-oil, se precisa muchísimo calor para calentar la enorme masa de aire necesario para quemar el combustible. Por cada 1.000 Btu de capacidad calorífica del combustible se necesitan unos 10 pies cúbicos de aire. Si el calor necesario para calentar el aire se lo llevan los gases residuales descargados por el canal de chimenea a 1450°C, la pérdida será de 475 Btu, con lo que el valor calorífico efectivo del combustible queda reducido a 525 Btu. Es corriente, pues, precalentar el aire con los gases residuales calientes. En el horno de regeneración, se hacen pasar los gases residuales por una cámara de grandes dimensiones, en cuyo interior se han dispuesto ladrillos refractarios sueltos que tienen la misión de "almacenar" calor; mientras tanto, se deja pasar el aire de combustión a través de una cámara de regeneración similar, calentada de igual modo en un ciclo anterior. Las funciones de las dos cámaras se invierten aproximadamente cada 30 minutos.

En este sistema, el aire de combustión suele precalentarse hasta unos  $930^{\circ}\text{C}$ , aprovechándose así el 83% del valor calorífico del combustible. Tiene el inconveniente de que el horno ha de estar provisto de dos grupos de quemadores, así como de un complejo sistema de válvulas para invertir la llama, el aire y los gases residuales. La inversión ha de efectuarse de manera rápida y eficaz (de ordinario, automáticamente), pues es preciso evitar toda alteración de las condiciones de fusión. Las cámaras de regeneración suelen ocupar más espacio que el horno propiamente dicho.

El horno de recuperación emplea un sistema de recuperación de calor más sencillo. Los gases residuales calientes y el aire de combustión pasan por los canales paralelos de un intercambiador de calor, de material refractario o de metal (recuperador), sin que haya que realizar inversiones. En cambio, las condiciones requeridas son muy rigurosas, ya que los gases calientes y el aire frío circulan en mucha proximidad, en una complicada estructura, y cualquier filtración mutua de los mismos puede descomponer el sistema. Por este motivo, pocas veces se consigue un precalentamiento que exceda de los  $700^{\circ}\text{C}$ , por lo que el aprovechamiento efectivo del valor calorífico del combustible es de aproximadamente un 75%.

En el caso de los grandes hornos, el mayor costo de capital que entraña el sistema regenerativo suele justificarse por las mayores economías obtenidas; de ahí que este sistema sea más corriente que el recuperativo.

Los hornos continuos caldeados con fuel-oil plantean también un problema, por cuanto la llama ha de tener un volumen y una longitud suficientes para que la combustión pueda completarse antes de ser introducida en el canal de llamas. En los grandes hornos esta operación puede realizarse en sentido transversal a la cuba, y la distribución de la temperatura puede regularse controlando cuatro o cinco quemadores. Por ello, los grandes hornos suelen ser de quemadores transversales. La adopción de este sistema en los hornos pequeños exigiría la instalación de numerosos quemadores pequeños (véase más abajo la parte relativa a los hornos unitarios de fusión); en estos hornos, el caldeo suele efectuarse por un extremo: la llama se proyecta longitudinalmente a la cuba, y los gases se canalizan de nuevo, en una vuelta en U, hasta el extremo por donde entraron, pasando de allí al recuperador o regenerador.

También puede obtenerse la distribución de temperatura deseada mediante un aislamiento diferencial. Evidentemente, el aislamiento deberá utilizarse con prudencia, ya que su reactividad con el vidrio fundido y los gases del horno aumenta rápidamente con la temperatura interfacial, determinada en gran parte por el grado de aislamiento exterior. En el siguiente cuadro se indican las pérdidas relativas de calor de dos hornos de regeneración de 90 t/d, uno de ellos un horno típico de cuba construido en 1955 y el otro un horno similar construido 20 años más tarde.

	<u>1955</u>	<u>1975</u>
Fusión del vidrio y cesión de calor a la temperatura de trabajo	19,1	19,1
Paredes y fondo de la cuba	<u>16,9</u>	<u>9,01</u>
	36,0	28,1
Canal de chimenea	18,3	18,3
Bóveda	9,8	3,04
Pantallas	2,8	1,68
Rampa del quemador	<u>2,7</u>	<u>1,26</u>
Total parcial	33,6	24,3
Sistema regenerador	13,3	6,10
Agua y aire de refrigeración	8,4	8,40
Causas desconocidas	<u>8,7</u>	<u>6,38</u>
Total parcial	<u>30,4</u>	<u>20,88</u>
Total general	100,0	73,3

El hecho de que la pérdida del horno más moderno fuera un 27% inferior se debió a la aplicación de un aislamiento más sólido, lo que fue posible gracias al empleo de los superiores materiales refractarios disponibles en 1975. El consumo específico de energía de los dos hornos fue de 2,42 kWh/kg y 1,77 kWh/kg.

El diseño de un horno no queda dictado exclusivamente por su rendimiento térmico. Cuando es preciso efectuar frecuentes cambios de color, por ejemplo, es importante realizar el cambio con la mayor celeridad posible. Los cambios suelen efectuarse sangrando el horno y recargándolo con calcín y mezcla. Aparte de que se empleará tiempo y se gastará combustible en el intervalo, se formará una gran cantidad de calcín si la cuba es de gran capacidad. Este problema se resuelve, en parte, con el horno de fusión unitario, un horno de capacidad y costo bajos, concebido para abastecer una sola máquina formadora de vidrio. En este horno, la adaptabilidad es más importante que la economía de combustible. El horno unitario se compone de una serie de canales largos y estrechos, en los que el vidrio va pasando por las distintas fases de fusión. Está equipado con numerosos quemadores transversales de pequeño tamaño, pero los gases quemados revierten al extremo del horno, de modo que éste posee algunas de las características del horno de llama en herradura. El horno de fusión unitario se ha difundido tanto, que actualmente se construye de tamaño mucho mayor que el previsto por el diseño originario, dotándosele a veces de recuperadores, con el fin de economizar combustible.

Más adaptables aun que los hornos unitarios son los hornos totalmente eléctricos, de rendimiento térmico mucho mayor que el de aquéllos. Los hornos eléctricos, sin embargo, presentan el inconveniente de utilizar un combustible costoso, la electricidad. En estos hornos el calor se produce dentro del vidrio mismo por efecto de las pérdidas óhmicas; las pérdidas térmicas son mínimas. El vidrio se funde, en realidad, no desde la superficie, sino desde el interior. Naturalmente, el vidrio ha de estar en un recipiente y es lógico que se pierda calor a través de las paredes de éste; pero, conforme se ve por las cifras del cuadro anterior, que dan el primer total parcial correspondiente a 1975, se puede obtener un rendimiento de por lo menos 19,1/28,1, o sea, 68%. En la práctica, se han

alcanzando rendimientos de entre 60% y 80%, ya que es posible obtener temperaturas de vidrio más elevadas y, por otra parte, pueden utilizarse cubas mucho más pequeñas que en los hornos tradicionales.

Es práctica corriente aprovechar las ventajas de ambos tipos de hornos colocando electrodos en los de tipo tradicional, caldeados con aceite, para acelerar la fusión con calor eléctrico. Se han introducido los llamados "hornos de fusión mixtos", que utilizan combustible líquido, para el consumo en vacío y para compensar las pérdidas de calor, y electricidad, para la fusión del vidrio.

Como ya se ha dicho, el rendimiento de un horno de fusión de vidrio depende muchísimo de la pericia de quienes lo controlan y de la norma de calidad del vidrio producido. Con todo, los rendimientos previstos, indicados en el cuadro siguiente, de las diferentes tecnologías de fusión de vidrio para envases pueden servir de pauta a fines de comparación. Las expresiones dan el consumo total diario (24 h) de energía en kilowatios/hora en función de la capacidad normal C (toneladas por día) y de la masa extraída T (toneladas por día). En cada expresión, los dos primeros términos (entre paréntesis) representan la tasa de consumo fijo, y el tercero, la tasa de consumo variable.

#### Hornos de combustible líquido

Regenerador	(14 654 + 1407C) + 1612T
Recuperador	(17 100 + 885,8C) + 1783T
Horno unitario	(15 322 + 720,6C) + 2363T

#### Mixtos

Recuperador de combustible líquido, con un 50% de calefacción auxiliar eléctrica	(17 100 + 1445,9C) + 500T
Horno de fusión mixto	(17 100 + 40,72C) + 600T

#### Eléctricos

Totalmente eléctrico	(1143,8 + 171,8C) + 460T
----------------------	--------------------------

Atendiendo al costo del combustible, se comprueba que, en el caso de hornos de grandes dimensiones, el de regeneración es el más económico, pero, en el caso de hornos más pequeños, existe una mayor gama de opciones, que pueden estar determinadas por otras consideraciones. Naturalmente, pueden utilizarse combustibles distintos del aceite -en México café en grano llegó a quemarse-, y, en ocasiones, los hornos están equipados con sistemas dobles -es decir, para dos combustibles-, de modo que, por ejemplo, pueda pasarse del gas natural al fuel-oil en un plazo mínimo, para superar dificultades de suministro. El excepcional rendimiento de los hornos totalmente eléctricos suele verse contrapesado por el alto costo de la energía eléctrica, con lo que puede estarse pagando una ineficiencia en la generación de electricidad.

#### Fusión

Una buena práctica de fusión, es decir, tratar de obtener el máximo partido del horno, se asienta sobre dos principios generales. El más obvio y más importante de los dos es evitar la contaminación del buen vidrio, una vez formado, por vidrio que no se ha fundido del todo. El segundo se ha mencionado ya, a saber: una elevada temperatura local y, por

ente, una fusión más rápida, no tienen por qué entrañar un mayor costo de combustible, siempre que el exceso de calor asociado a la alta temperatura sea bien aprovechado ulteriormente.

Es evidente que el primero de esos principios puede cumplirse calentando la mezcla de materias primas homogéneamente, de modo que todas sus partes pasen simultáneamente por cada una de las etapas y que el proceso no se vea detenido por posibles entremezcladuras. Esto se practica en la fusión en crisol y en los hornos de colada diaria que trabajan con arreglo a un ciclo. En estos casos, se coloca, en frío, en el crisol o en el horno de colada diaria una mezcla de cuantía suficiente para satisfacer las necesidades del día, se calienta hasta que se funde, y luego se trabaja. El crisol, que puede estar cubierto, se encuentra en un horno que funciona continuamente; mientras que, en el horno de colada diaria, la propia cuba de vidrio hace las veces de horno y suele calentarse directamente por llamas aplicadas sobre el vidrio. Cuando el nivel del vidrio ha descendido tanto que ya no se pueden hacer tomas a mano, se repite el ciclo. Naturalmente, este proceso no se adapta a la producción de vidrio con máquinas automáticas, pero sí resulta apropiado para la fabricación manual de objetos de valor.

El horno de fusión unitario es otro medio que permite cumplir el primero de los principios mencionados. La mezcla se introduce de manera continua por un extremo de un canal largo, y pasa por las diversas etapas de fusión a medida que avanza hacia la zona de trabajo. El segundo principio se puede cumplir, en cierta medida, haciendo pasar parte del calor excedente de la sección más caldeada por las secciones anteriores, más frías, utilizando los gases calientes para transportarlo.

En los hornos de cuba de tipo tradicional, la situación no está, ni mucho menos, tan bien definida. La cámara de fusión, que no puede ser sino un 50% más larga que ancha, se comunica con la zona de trabajo, una cámara mucho más pequeña, a través de una "garganta" o abertura situada en la parte inferior de la "barrera fija" que separa las dos cámaras. Pudiera pensarse que dicha garganta, situada a bajo nivel, sirve para separar el vidrio fundido del que no lo está; de hecho, la función de desespumado que realiza la barrera en la parte superior permite expulsar sólo las contaminaciones más ligeras, mientras que el vidrio parcialmente fundido que llega hasta ella será, de manera casi segura, arrastrado hacia abajo por su propia viscosidad, alcanzando así la zona de trabajo. La verdadera función de la barrera fija es actuar como barrera térmica, de suerte que el vidrio que llega a la zona de trabajo tenga una temperatura lo suficientemente baja para que pueda trabajarse. Es preciso encontrar otros medios que permitan determinar si el vidrio que se encuentra en la zona de la barrera fija está ya completamente fundido y refinado. Si bien una barrera mecánica no sería viable, sí podría crearse una barrera térmica estableciendo una zona de temperatura excesiva, en sentido transversal a la cuba, sobre una distancia igual a las dos terceras partes de la longitud de la cámara de fusión. El recalentamiento del vidrio en ese punto lo hará que se eleve y que, al alcanzar la superficie, fluya hacia adelante, hasta la barrera fija, y hacia atrás, hasta el piñón de fusión, empujando en este último sentido los materiales no fundidos que floten sobre la superficie. Además de impedir de este modo la contaminación por la mezola no fundida, el excedente de calor ayuda a fundir la mezola. Cuando, como consecuencia de esta acción, se ha enfriado el vidrio recalentado, éste se hunde hasta el fondo, siendo arrastrado de nuevo hasta la zona de exceso de temperatura para repetir su beneficiosa acción.

Entretanto, la corriente de vidrio sobrecalentado que fluye hacia adelante se refina rápidamente, debido a su exceso de temperatura, hasta que al entrar en contacto con la barrera fija se enfría y se hunde. Esas corrientes de convección entrañan un movimiento de masa mucho mayor que el originado cuando se extrae vidrio del horno, razón por la cual el vidrio que desciende por la barrera fija refluye por el fondo para elevarse en la zona caliente y repetir su acción de refinado.

Así pues, con un correcto control de horno, se respeta el primer principio, y, comoquiera que por lo menos la mitad del exceso de calor revierte a la mezcla en fusión, también se cumplirá el segundo principio. Está claro, sin embargo, que la barrera térmica exige un riguroso mantenimiento de las temperaturas, ya que, si la zona caliente se desplaza de un lugar a otro o pierde intensidad, puede atravesarla una bolsa de vidrio sin fundir, que será arrastrada en el avance giratorio del vidrio, mermando la calidad de éste. Para controlar la situación, no basta confiar en los registros de temperatura, sino que deberá examinarse con frecuencia la superficie del vidrio en fusión. Esta deberá presentar un despejado lago de vidrio que se extienda desde la barrera fija hasta una línea de espuma situada hacia la mitad de la cuba. Esa línea es el borde delantero de la mezcla en fusión. Puede haber también una fina línea de espuma a lo largo de la barrera fija: se trata, normalmente, de la sílice formada a causa de la pérdida de volátiles por el vidrio recalentado. El volumen de la espuma no aumentará, porque el vidrio recalentado la reconvierte continuamente en solución.

Unas mirillas bien situadas y de fácil acceso son una importante ayuda para fines de control; en algunos casos, se emplea la televisión en circuito cerrado.

#### Borboteadores

A veces, a través de la cuba, se colocan un rebosadero y borboteadores para estabilizar la barrera térmica. Los borboteadores son unos dispositivos sencillos mediante los cuales, a través de tubos situados en el fondo de la cuba, se introducen burbujas de unas 6 pulgadas de diámetro, a las que se deja alcanzar la superficie, donde revientan. Existe la creencia común y equivocada de que las burbujas ascendentes empujan el vidrio hacia arriba, como lo harían los cuerpos sólidos, pero no es así; en las superficies de contacto gas-vidrio no puede haber acción de deslizamiento. El movimiento ascendente se produce porque la densidad media de una columna de vidrio que contenga burbujas es inferior a la de una columna vecina que no las tenga. De ahí que el vidrio de la columna tienda a flotar. Como el desplazamiento del vidrio en el lugar en que primeramente se forma la burbuja puede erosionar los refractarios del fondo, conviene instalar los tubos a alguna distancia de éste. Es preciso pulsar o calibrar el aire, porque si se mantuviera la presión necesaria para iniciar la formación de una burbuja contra la tensión superficial, se obtendría una burbuja de tamaño indefinido.

### Contaminación atmosférica

Ya se dijo, en relación con la formulación de la mezcla (capítulo III), que era necesario tener en cuenta las pérdidas por volatilización de algunos de los constituyentes durante la fusión. En algunos casos, la pérdida supera el 10%. Gran parte del material volatilizado se condensa en las cámaras de regeneración y en el canal de chimenea, lo que constituye un inconveniente, pero una parte del mismo escapa al exterior, contaminando la atmósfera. En el caso de los vidrios ordinarios de sosa-cal, el principal contaminante es el sulfato sódico, pero en el de los vidrios de plomo o los ópalos de fluoruro, los contaminantes son mucho más serios, lo que puede hacer necesario el empleo de equipo costoso para extraerlos o eliminarlos de los gases residuales.

La principal fuente de sustancias volátiles, en un horno de tipo clásico, es la extensa área de vidrio en fusión expuesta a las llamas en la cámara de fusión. En los hornos totalmente eléctricos, en los que la superficie de la masa fundida está recubierta de una capa de mezcla fría, las sustancias volátiles quedan atrapadas in situ, por lo que la pérdida de flúor, por ejemplo, se reduce de aproximadamente un 30% a un 2½%. Por ello, para la fusión continua de tales vidrios, se prefiere el horno totalmente eléctrico. En el caso de la fusión en crisol para producción manual, este problema no se plantea, puesto que el crisol se mantiene cerrado durante la fusión.

Sería instructivo llevar la cuenta de todos los insumos de un horno de fusión de vidrio como medio de determinar la pérdida que va a parar a la atmósfera. Por ejemplo, un horno caldeado con aceite puede fundir 50 toneladas de vidrio al día con un consumo de 10 toneladas de aceite. Si éste contiene un 5% de azufre, quiere ello decir que un 0,5 toneladas de azufre van a parar a algún sitio. Si el azufre pasa a la atmósfera en forma de 1,5 toneladas de ácido sulfúrico, difícilmente podría hablarse de un acto de buena vecindad... De hecho, una gran parte del azufre reacciona con los vapores de la sosa en el horno, dando lugar a la formación de unas 2 toneladas de sulfato sódico, buena parte del cual se condensará en los canales de chimenea, las cámaras de regeneración, etc. Así, pues, la pérdida de la costosa sosa de la composición vítrea (que, en este caso, supone un costo diario de unos 90 dólares) no resulta totalmente antieconómica cuando se emplea aceite con un alto contenido de azufre, puesto que se verá compensada por la benéfica neutralización de un contaminante más indeseable.

Normalmente, cuanto más elaborado sea el sistema de recuperación de calor (es decir, cuanto menor sea la temperatura de salida) tanto menor será la cantidad de los contaminantes descargados por la chimenea, pero tanto más necesario será también limpiar ésta regularmente. Los costos de capital y mantenimiento de calderas de recuperación etc., han tendido a militar contra estos dispositivos economizadores de energía. Ahora bien, en vista del creciente reconocimiento de los males de la contaminación, sería prudente propiciar una decisión, basada en factores económicos, que permitiera atenuar esos males.

## V. FORMACION DEL VIDRIO

Tan espeso como el jarabe, tan blando como la mantequilla, tan duro como el hierro; esos son los símiles que pueden aplicarse al vidrio, según su temperatura. Sin embargo, nunca es dúctil o plástico en el sentido en que muchos materiales lo son, es decir, la fluencia no puede inducirse solamente por la fuerza. Si, en razón de su temperatura, el vidrio tiene fluidez, responderá a la fuerza de una manera predecible; pero, si no la tiene, responderá quebrándose. Por ello, la conformación del vidrio es siempre una cuestión de combinar la temperatura con la fuerza y el estrechamiento; y, como, mientras se le trabaja, el vidrio suele experimentar rápidos cambios de temperatura, con la consiguiente variación brusca de la fluidez, es preciso ajustar el proceso de trabajo en consecuencia.

En cambio, por su misma naturaleza, el vidrio admite numerosos procesos de formación no aplicables a otros materiales. Por soplado, puede transformarse en objetos de paredes delgadas, o por estirado, en láminas, tubos o fibras, constituyendo el enfriamiento natural y el consiguiente aumento de la viscosidad un control inherente del proceso. Estos procedimientos, soplado y estirado, junto con el de prensado simple, han hecho del vidrio el material universal que conocemos.

### Toma y alimentación

Uno de los problemas que plantea la elaboración del vidrio es el traslado de la cantidad necesaria de masa fundida hasta el lugar donde va a ser trabajada. Como ocurre con el jarabe, si se usa una cuchara, la cantidad que se adhiere a ella es tal, que resulta imposible calibrar el contenido con precisión. En el proceso de estirado, este problema puede resolverse estirando el producto continuamente, a partir de la masa fundida, y subdividiéndolo en las longitudes deseadas una vez enfriado. En el moldeo por colada, como en la fabricación de vidrio plano, el crisol que contiene el vidrio puede volcarse de forma que el vidrio caiga sobre la mesa de colada, o puede dejarse que rebasa el crisol de manera continua y vaya a parar a las máquinas laminadoras. Pero el problema subsiste en la producción directa de artículos individuales.

En la producción a mano, se utiliza un pontil, en lugar de una cuchara. Es una larga varilla de hierro provista de una bola (a menudo de arcilla) en un extremo. Inmergiendo y haciendo girar esta bola en el vidrio fundido, puede tomarse la cantidad justa de vidrio, trasladarla a la estación de trabajo y dejar que se decante, interrumpiendo la corriente de vidrio cuando se ha depositado la cantidad deseada. Este proceso exige pericia y discernimiento por parte del levantador y del cizallador.

Si el vidrio va a soplarse en molde, el pontil es un tubo, y el vidrio excedente se expulsa por soplado en forma de prolongación bulbosa del objeto, de espesor suficientemente delgado para que pueda quebrarse para separarla del pontil. El recortado del objeto se deja para un proceso ulterior. Este método nada satisfactorio de toma se aplica incluso en la producción semiautomática, siendo la operación de moldeo propiamente dicha la única automatizada.

Como la operación de toma a mano es engorrosa, antieconómica (un 30% o más del vidrio tomado se devuelve al recipiente de calafn), y a todas luces inadecuada para la producción automática, se han concebido dos métodos automáticos de toma. En el primero, aplicable a los objetos de vidrio soplado, una copa de metal hueca, del tamaño y forma adecuados, se coloca abierta y boca abajo sobre la superficie del vidrio y se aplica al vacío. Normalmente, esa copa participa también en la conformación preliminar del objeto producido, por lo que se le llama molde preliminar, que no debe confundirse con el molde de acabado que se utiliza para dar al producto su forma definitiva. El molde preliminar, llenado por succión, se utiliza luego para trasladar el vidrio. Si el producto a soplar tiene una configuración simétrica, es evidente que la distribución de la temperatura en el vidrio levantado deberá ser también simétrica. Uno de los problemas inherentes a este método de levantado es que la inmersión de un molde frío en la masa fundida deja una zona enfriada que influye en la toma siguiente. En consecuencia, este método se complica por la necesidad de hacer girar el crisol que contiene el vidrio o de agitar éste, a fin de que las sucesivas copas de succión encuentren vidrio fresco.

El segundo método automático de toma está mucho más difundido. Por un angosto canal de distribución, la antecámara, que comunica con la zona de trabajo del horno, el vidrio fluye hasta un alimentador, situado en el otro extremo, dispositivo que suministra porciones medidas ("gotas") de vidrio. La función de la antecámara consiste en regular la temperatura del vidrio según las necesidades del alimentador; tiene dos secciones, una de enfriamiento y otra de calentamiento. En algunos casos, está dotada de agitadores para mejorar la homogeneidad; pudiendo también añadirse, en este punto, vidrios coloreados, de modo que puedan fabricarse objetos coloreados desde el alimentador mientras en el horno se está fundiendo vidrio incoloro.

Básicamente, el alimentador consiste en un orificio, situado en la parte inferior del canal, y un punzón refractario que empuja el vidrio a lo largo del mismo, más o menos según el principio de la jeringa. De este modo, en lugar de fluir en una corriente constante, el vidrio sale por impulsos, cortándose en forma de gotas que luego se alimentan a la máquina formadora. El punzón, de movimiento alternativo, suele estar accionado por una leva, de modo que su movimiento puede calcularse y sincronizarse con las cuchillas de las tijeras automáticas a fin de regular la configuración de las gotas. El peso de éstas se determina, de manera aproximada, por el tamaño de las cubetas intercambiables y por la temperatura, y de manera precisa por el movimiento del punzón. Normalmente, éste está envuelto por una camisa que gira lentamente o por un cilindro suspendido, que contribuye a que la temperatura del vidrio sea simétrica, y que puede dejarse caer al fondo del canal para interrumpir el suministro de vidrio cuando se reemplazan las cubetas o los punzones.

Este sistema presenta numerosas ventajas. Permite alimentar las prensas automáticas y las máquinas de soplado; puede regularse el peso de las gotas sin necesidad de interrumpir la campaña de fabricación; y, gracias a su larga antecámara, las máquinas se hallan a una distancia del horno que permite una explotación y mantenimiento más sencillos y en un ambiente más fresco. Otra ventaja consiste en que pueden adaptarse chapas de orificios de dos, y aun tres, agujeros, de modo que puedan suministrarse múltiples gotas cuando el tamaño del objeto producido es suficientemente pequeño para que la máquina pueda transportar moldes con múltiples cavidades.

### Defectos de prensado y de formación del vidrio

Hasta para las operaciones más sencillas de prensado se utilizan moldes. Estos se componen de las siguientes piezas: el porta-aguja o punzón; el cuerpo; y el cerquillo. El porta-aguja determina la forma interior del objeto producido; el cuerpo, la forma exterior; y el cerquillo, la del borde superior. La misión principal del cerquillo consiste en proporcionar una superficie deslizante bien ajustada que sirva de guía para la introducción del porta-aguja y permita a éste penetrar a fondo sin que se produzcan fugas de vidrio.

Se coloca en el cuerpo una toma o gota de vidrio fundido del tamaño que requiera el objeto terminado. Para realizar esta operación cómodamente, es preciso desplazar el cuerpo con relación al porta-aguja. Así, los movimientos, sea que se efectúen automáticamente o a mano, son sencillos: movimiento del cuerpo hasta un punto preciso, y movimiento vertical del porta-aguja mientras el cuerpo se halla estacionario en ese punto. Normalmente, el cerquillo va sobre una caja de resortes montada en el porta-aguja, de modo que puede colocarse en el cuerpo antes de que el porta-aguja complete su carrera descendente. Análogamente, en la carrera ascendente, el cerquillo sirve para retener el vidrio en el cuerpo mientras se extrae el porta-aguja de aquél. A menudo, el cuerpo tiene también una sección central libre, o "saltador", la cual, en un movimiento ascendente, puede elevar el vidrio prensado del cuerpo cuando se ha enfriado suficientemente para que conserve su forma. Si la forma del vidrio es tal que no puede sacarse en un cuerpo de una sola pieza, éste se construye de dos o más piezas articuladas.

Como ya se ha dicho, la fuerza bruta, por sí sola, no basta para lograr un buen prensado, sino que es preciso tener en cuenta también los cambios de temperatura del vidrio. Consideremos en detalle la secuencia de operaciones. La gota caliente, tal vez a una temperatura de  $1100^{\circ}\text{C}$ , cae en el molde, que puede estar funcionando a una temperatura media de unos  $450^{\circ}\text{C}$ . Al primer contacto, la temperatura de la superficie de contacto puede elevarse a unos  $650^{\circ}\text{C}$ - $700^{\circ}\text{C}$  por efecto del metal, cuya conductividad térmica es mayor que la del vidrio. Si la temperatura de la superficie de contacto es mucho más elevada, es decir, si la temperatura del molde es demasiado alta, el vidrio fluirá sobre el metal y, o se adherirá a él, disolviendo cualquier posible capa de óxido, o replicará los detalles de la estructura cristalina del metal. En cualquiera de los casos, el producto terminado presentará una coloración mate en las partes afectadas. Si el molde está demasiado frío y la temperatura de la superficie de contacto es inferior a la temperatura de endurecimiento del vidrio, el proceso tendrá lugar a una presión prácticamente nula, con el resultado de que la superficie del molde dará una conformación tosca al vidrio, que presentará un aspecto jaspeado o de piel de naranja. Existe, pues, una gama relativamente pequeña de temperaturas críticas de molde a las que el vidrio puede entrar en íntimo contacto con la superficie del metal sin fluir o desparramarse por ella.

Consideraciones algo similares determinan la aparición de ondulaciones, es decir, la serie de marcas que, a veces, rodean el área de contacto de la gota cuando yace en el molde. Esas ondulaciones se producen cuando el vidrio fluye tan despacio que la periferia curva, enfriada por la proximidad del metal, es sobrepasada por el vidrio más caliente, el cual, a

su vez, se enfría por detrás y es sobrepasado; y así sucesivamente. Las ondulaciones así formadas pueden eliminarse posteriormente por prensado, siempre y cuando el enfriamiento no haya sido excesivo.

Cuando el porta-aguja comienza a comprimir el vidrio en el molde, el vidrio fluye tan rápidamente que no se forman ondulaciones. Sin embargo, si el vidrio tiene un constituyente volátil, el vidrio fresco desplazado del centro de la gota puede exudar vapor, el cual se condensa sobre el metal frío antes de que llegue la corriente de vidrio y se acumula allí, de modo que, al cabo de un rato, puede producirse un halo o cerco de vidrio mate en el lugar en que éste (o el metal) reacciona con el condensado.

Si, a causa de la forma del molde o de la gota en él depositada, el vidrio fluye en dos frentes que más tarde se juntan, es frecuente que la línea de unión presente lo que pudiera tomarse por una fisura. Como el vidrio se pliega sobre sí, este defecto se denomina a menudo "pliegue de colada". Otro defecto es la "marca de tijeras", asociado muchas veces al pliegue de colada. Se forma cuando el enfriamiento ocasionado por las tijeras no ha sido restablecido por el calor más intenso del vidrio antes del prensado.

Por último, si el molde está demasiado frío, la capa superficial del vidrio fundido puede solidificarse y experimentar un choque térmico hasta el punto de que se cuartece, mientras que la masa del vidrio conservará suficiente fluidez para que pueda conformarse. Cuando es la gota la que se ha enfriado demasiado, el cuarteado puede extenderse a toda la masa vítrea. Si las piezas del molde sometidas a presión dieran de sí (a causa, por ejemplo, de un mal ajuste del cerquillo), puede aparecer una serie similar de grietas finas debidas a la presión. Muchas veces, este fenómeno es imputable al cerquillo, que, al tener menos contacto con el vidrio caliente que ninguna otra pieza, tiende a enfriarse, dando lugar a la aparición de grietas en el borde, lo que obliga a rechazar el producto.

Esos posibles defectos se han descrito a fin de ilustrar los casos en que se pueden originar problemas al formar el vidrio. No aparecen sólo en la operación de prensado, sino que pueden darse en muy diversas situaciones. El conocimiento de los mismos es esencial para la solución inmediata de problemas técnicos.

El molde tiene otras funciones que la simple determinación de la forma del producto; así, ayuda también a eliminar suficiente calor del vidrio fundido para que éste se endurezca. Por ello, la temperatura del molde y su distribución son extremadamente importantes. La temperatura media del molde depende de la velocidad de trabajo, de la rapidez con que el calor que recibe del vidrio se disipa en el aire o en la mesa de prensado, así como de su capacidad calorífica, sus propiedades térmicas y su forma exterior. La distribución de la temperatura depende, principalmente, de la forma exterior; esta última, si ha sido bien concebida, puede contribuir mucho a eliminar buena parte de los defectos mencionados.

Otro método de prensado es el molde con rebosadero, particularmente útil cuando se desea obtener pequeñas e intrincadas formas sólidas. Se asemeja mucho al moldeo por inyección de materiales plásticos, con la salvedad de que el mecanismo de presión forma parte del equipo del moldeo. El molde es un simple molde de presión del tipo arriba descrito, salvo que el cuerpo del mismo está provisto de agujeros ("fonts") a través de los cuales se hace pasar el

vidrio a presión a una o más cavidades de la forma deseada. El cuerpo consta de dos o más elementos, a fin de facilitar el acceso a las piezas brutas prensadas; éstas se separan en el agujero, y los puntos de rotura se pulen en un proceso posterior.

### Soplado

Las pompas de jabón, como todo niño sabe, pueden soplar de forma exactamente esférica y con paredes tan delgadas que aparezcan colores de interferencia. Para ello, no se requiere prácticamente ninguna destreza. La tensión superficial, que actúa libremente sobre el líquido móvil, es la que determina la esfericidad de la pompa, al hacer que el líquido ocupe el área más pequeña posible que contenga el volumen de aire encerrado; el jabón añade la propiedad de que, cuando la película se torna demasiado delgada en algún punto, la tensión superficial aumenta en él y aporta más líquido para reforzarlo, estabilizando así la pompa líquida.

En el soplado de las burbujas de vidrio, la tensión superficial no logra los mismos fines sino parcialmente, ya que el vidrio no es lo suficientemente fluido para que pueda ser redistribuido por la tensión; ahora bien, como las secciones delgadas se enfrían y endurecen más aprisa que las gruesas, existe un mecanismo similar a la función del jabón, que tiende a hacer que el espesor final sea más o menos uniforme. Las secciones inicialmente más gruesas se hinchan hasta que también ellas se van adelgazando y endureciendo. La forma final depende de la distribución del espesor en la gota de vidrio inmediatamente antes del soplado. Por ello, la fabricación de objetos por el procedimiento de soplado a pulso (es decir, sin molde) exige mucha destreza, y el artesano ha de emplear una buena parte de su tiempo en el "mármol", operación que consiste en colocar la gota en una mesa lisa (que, en otro tiempo, era de mármol) y hacerla girar de un lado para otro hasta que adopte la forma preliminar que permita transformar el vidrio en el objeto deseado. Aun en el caso de que se utilice un molde en la operación de soplado final, se necesita una preparación especializada. En realidad, en la producción totalmente automática de vidrio soplado, la obtención de la forma preliminar constituye una parte esencial del proceso, aunque esa operación puede realizarse también por moldeo (en el llamado molde preliminar, anteriormente descrito).

En los tiempos en que las botellas se fabricaban a mano, la formación del borde (o gargantilla) de la botella era la fase final, y aun cuando, en la botella moderna, se fabrique por medios automáticos o semiautomáticos, la gargantilla es la primera parte que recibe su forma definitiva; esta parte del recipiente sigue denominándose, en inglés, "finish" u operación final. La parte superior de una botella o jarra suele tener una configuración compleja, con entrantes (hilos de rosca o rebordes), forma que se logra cumplidamente, cuando el vidrio ha alcanzado su máxima temperatura, por un procedimiento que, esencialmente, es de prensado, aunque puede ejecutarse con aire comprimido. Una vez formado, el extremo superior permite retener el vidrio semifundido cuando se pasa de una operación a otra. Por consiguiente, es la primera parte del prensón que se conforma; la parte del molde preliminar en que se hace, se traspa al molde de acabado, junto con el prensón.

La forma del molde preliminar es muy importante, ya que esa forma, y el enfriamiento producido por el contacto con el molde, determinan la manera como el vidrio se dilatara en el molde de acabado final y, por ende, la distribución del espesor de las paredes de la botella.

Cuando se levanta el vidrio por el procedimiento de succión, la copa de succión hace de molde preliminar y el borde se forma por vacío. La forma definitiva se obtiene en un molde de acabado soplando aire a través de la gargantilla. Estos son ejemplos de un procedimiento de succión-soplado. En un procedimiento de soplado-soplado, se coloca una gota en un molde preliminar invertido y, soplando aire desde arriba, se fuerza el vidrio hacia abajo para formar la gargantilla. Se da la vuelta al paresón al ser éste transferido al molde de acabado. Este procedimiento se adapta particularmente bien a la fabricación de botellas de boca estrecha. Para las jarras de boca ancha, utilizase un procedimiento de prensado-soplado. El paresón se forma, en posición invertida o erecta, por presión mecánica.

Una máquina totalmente automática para la fabricación de botellas es un equipo complejo que cada 12 segundos ejecuta, por botella, alrededor de una docena de movimientos mecánicos rigurosamente cronometrados. Ese ritmo de fabricación de botellas, cinco por minuto, no es suficientemente rápido para que el procedimiento resulte económico. Por ello, la producción se multiplica fabricando botellas en secuencia superpuesta, con el correspondiente aumento de la complejidad mecánica. En algunas máquinas de fabricar botellas, las piezas mecánicas van montadas sobre mesas rotatorias (una o dos, transfiriéndose el paresón entre ellas). Otras tienen secciones, cada una de las cuales es una máquina independiente de hacer botellas, alimentadas sucesivamente con gotas mediante un canal de distribución. Este tipo presenta muchas ventajas; pueden fabricarse, simultáneamente, botellas desiguales, a condición de que los pesos y las velocidades de producción sean idénticos, y puede pararse una sección, a fines de mantenimiento, sin necesidad de interrumpir la producción por completo. Las máquinas sirven tanto para el procedimiento de soplado-soplado como para el de prensado-soplado.

El reglaje óptimo de tan complejas máquinas para la fabricación de un determinado tipo de botella, es tarea que requiere mucho tiempo. Aunque se precalientan los moldes, no se establece su temperatura de trabajo hasta que se ha efectuado el reglaje definitivo de las máquinas. Por consiguiente, han de transcurrir algunas horas antes de que se puedan comenzar a producir botellas de calidad con un rendimiento de, por ejemplo, un 90%. Y puede tardarse algunos días en recuperar los costos inherentes al período de prueba. Por ello, para que pueda justificarse una producción totalmente automática, es necesario estipular pedidos mínimos de 100.000-150.000 botellas.

Los objetos de vidrio soplado fabricados en moldes calientes exhiben la costura donde se han unido las dos mitades del molde de acabado. Cuando no interesa que se vea (como en el caso de los vasos), el objeto puede fabricarse con una máquina de molde empastado, que emplea moldes de acabado fríos revestidos de una pasta porosa (normalmente, serrín de corcho) y que se mantienen humedecidos por rociado o inmersión. Como el calor del vidrio genera vapor en la superficie del molde, el vidrio se sopla contra ese colchón de vapor. Durante el soplado, se hace girar o bien el vidrio o bien el molde. Como no se produce fricción entre el colchón de vapor y el vidrio, habrá un movimiento rotatorio relativo entre el molde y éste, que eliminará la marca de la costura. El vapor se escapa por unos agujeros practicados en el molde.

La disposición mecánica general de las máquinas de molde empastado no se diferencia de la de una máquina de prensado-soplado con molde caliente, aunque en estos productos sin costura la parte del paresón correspondiente a la gargantilla se arranca o corta, y se desecha. Por ello, no hay razón alguna para que esta parte rechazada se moldee con precisión. En algunas máquinas, la gota se transforma toscamente en un disco de gran espesor, que se coloca sobre una placa fina de metal provista de un orificio algo más pequeño que el disco. Cuando el vidrio empieza a hundirse en el orificio una cabeza sopladora se inclina sobre él y lo va soplando para que entre en un molde empastado colocado debajo. Gracias a una arista que lleva la placa en su interior, el vidrio se separa por encima y por debajo de la misma, quedando limpia para el ciclo siguiente. La máquina de cinta ultrarrápida, utilizada para la fabricación de bombillas eléctricas, es de este tipo, con la salvedad de que el vidrio fluye continuamente desde el horno, pasando por un par de rodillos que dan a la corriente de vidrio la forma de una cinta con discos de gran espesor equiespaciados en toda su longitud. Se hace que esos discos coincidan con una línea de placas con orificios montadas sobre una cadena continua. Los moldes empastados y las cabezas sopladoras son transportados, igualmente, por cadenas de marcha continua, con lo que la operación es continua y el movimiento lineal, y no circular. Pueden alcanzarse velocidades de producción de hasta 250 piezas por minuto.

La complejidad de las máquinas formadoras de vidrio, así como las rigurosas condiciones en que trabajan, especialmente en lo que respecta a la variación de la temperatura y a los residuos abrasivos de vidrio roto, hace que el mantenimiento regular de las mismas revista suma importancia. Ahora bien, como cada máquina representa una parte tan considerable de la producción de la fábrica, el tiempo improductivo resulta extremadamente costoso. Por eso, es importantísimo que, en la medida de lo posible, el mantenimiento se haga mientras las máquinas trabajan. De no ser posible, deberá hacerse durante los momentos de inactividad forzosa, cuando haya que cambiar los moldes o las piezas de alimentación. La planificación del mantenimiento exige una estrecha colaboración con el personal encargado del control de calidad, a fin de que pueda recibirse a tiempo la información necesaria sobre los trabajos a realizar; y exige también un atento planeamiento de la producción para lograr que los equipos de mantenimiento y de cambio de moldes estén disponibles cuando se les necesita, de modo que puedan realizar sus tareas en el tiempo más breve posible.

#### Estirado de tubos y de vidrio plano

Ya se ha recalcado más arriba la importancia del molde preliminar, el paresón, en el caso del vidrio soplado. En el estirado del vidrio, el moldeo preliminar es, de hecho, el único positivo que se hace. Las dimensiones finales están determinadas por la medida en que el vidrio se estira en una dirección y, por tanto, se contrae en direcciones perpendiculares al estirado. Su confirmación termina cuando el vidrio, en proceso de enfriamiento, se endurece demasiado para que pueda seguir deformándose.

Si se forma y se estira un cilindro hueco, de paredes espesas, la relación entre el diámetro de la pared interior y el espesor de ésta permanecerá invariable; pero, ya que no hay variación en el volumen del vidrio, el área de la sección transversal se reducirá en proporción inversa al aumento de la longitud. Como la pérdida de calor, con la consiguiente merma de la ductilidad, depende del tiempo, el aumento de la longitud está determinado por

la velocidad de estirado. Así, pues, es posible estrechar los tubos hasta el tamaño que se desee, variando la velocidad de estirado. La relación entre el diámetro de la pared interior y el espesor de ésta, en cambio, queda determinada por el molde preliminar.

Naturalmente, si la producción ha de ser continua, el moldeo preliminar deberá hacerse también de manera continua. En la máquina Danner, se hace vertiendo un chorro de vidrio a lo largo de un mandril giratorio, algo inclinado sobre la horizontal; el vidrio estirado se extrae por el extremo libre, donde llega adoptando una forma cilíndrica. La forma preliminar está determinada, en parte, por el diámetro del mandril y por el espesor que se dé al vidrio, así como por la presión del aire soplado a través del mandril. El flujo del vidrio hacia el mandril suele controlarse de manera parecida a como se controla en la alimentación por gotas, con la salvedad de que el punzón permanece estacionario y actúa como válvula reguladora.

En el procedimiento Vello, la forma preliminar se obtiene haciendo fluir el vidrio a través de una arandela colocada entre piezas refractarias; el vidrio va cayendo verticalmente, pero se le hace pasar a una posición horizontal mientras su grado de ductilidad permite torcerlo. En algunas máquinas, el vidrio fluye, sobre un rebosadero circular, a través de un orificio central. En otras, se estira el vidrio hacia arriba desde un molde preliminar, que tiene forma de cebolla y está situado en un cubilete circular con un cono central, por cuyo vértice se sopla aire. De este modo, pueden fabricarse tubos de gran diámetro (18 cm).

Naturalmente, con cualquiera de dichas máquinas pueden producirse barras de vidrio, suprimiendo el suministro central de aire; de hecho, pueden hacerse directamente desde un orificio distribuidor. Un caso extremo de fabricación de barras es la producción de vitrofibra. Uno de los problemas que plantea la fabricación de fibras de vidrio finas es el estirarlas a una velocidad que permita obtener las dimensiones deseadas. Otro problema es el de poder manipular la enorme longitud de fibra así estirada sin dejar, por ello, de producir pesos económicos. Un solo gramo de vidrio puede dar entre 6 y 8 kilómetros de filamento.

Se emplean métodos diferentes de fabricar fibra de vidrio, según que el producto sea filamento continuo y uniforme destinado a reforzar tejidos o materiales plásticos, o que se requieran trozos más cortos, como para la confección de materiales de aislamiento térmico o acústico. Las fibras pueden estirarse desde los extremos de barras expuestas lentamente a las llamas, y se estrechan por la acción de un tambor rotativo; o bien a partir de una cubeta de platino con unas 35 boquillas, a través de las cuales se estira la masa fundida, atenuándose las fibras mediante un chorro de vapor o aire; o bien pueden obtenerse por centrifugación, expulsándose las fibras por el borde de un disco que gira a gran velocidad. A menudo, se emplea una combinación de estos medios.

En la fabricación de tubos, barras o fibra de sección redonda, las fuerzas de tensión superficial no plantean ningún problema, puesto que son neutralizadas en la dirección del estirado y son simétricas a través de la sección. Cuando se estira vidrio plano, en cambio, es preciso concebir el proceso de modo que se supere la tendencia de la sección a estrecharse y redondearse por efecto de las fuerzas de tensión superficial. En el sistema Fourcault,

obtiénese la forma preliminar sumergiendo la "débiteuse" en la masa fundida. La "débiteuse", base de material refractario de una cadena de estirado vertical, tiene en su centro una ranura longitudinal por donde el vidrio fundido asciende a la superficie y desde la cual, por medio de unos rodillos recubiertos de amianto, es estirado hacia arriba; la contracción lateral se impide mediante ruletas, que enfrían los extremos del vidrio y mantienen así el ancho de la hoja. Para iniciar el proceso, utilizase un cuadro metálico de puesta en marcha, que, mediante rodillos dispuestos en pares en la cadena de estirado, arrastra hacia arriba el vidrio que se adhiere a él a su paso por la ranura de la "débiteuse", iniciando así el proceso de estirado. Es preciso controlar rigurosamente el enfriamiento de la hoja, a fin de que se vaya solidificando correctamente y no esté ni demasiado caliente (pues, de lo contrario, podría resultar dañada por los rodillos estirados) ni demasiado fría (para que éstos no la rompan). A su paso por la cadena de estirado vertical, la hoja deberá recocerse suficientemente para que pueda cortarse con facilidad en el extremo superior de la cadena, así como para poder obtener un alto rendimiento de hojas rectangulares. Si la hoja no se recociese como es debido, puede producirse una fisura de extremo a extremo de la cadena, lo que obligaría a interrumpir el proceso y a reiniciar la fastidiosa operación de puesta en marcha para restablecer el estirado. También se romperían los extremos de la hoja, engrosados por la acción de las ruletas.

El sistema Fourcault es más fácil de controlar que las variantes más modernas del mismo, ya que el estirado se efectúa a partir de una forma predeterminada, esto es, la ranura de la "débiteuse". Por ello, éste es el sistema que suele recomendarse cuando se monta por primera vez una industria de vidrio plano. Las variantes del sistema prescindían de la "débiteuse" (que ha de ser reemplazada cada dos meses, aproximadamente), y la forma preliminar queda determinada por la propia lámina, por control de la temperatura y por las ruletas. De este modo, se consigue un estirado más rápido y se evita la aparición, en la superficie del vidrio, de las líneas verticales a que puede dar lugar cualquier irregularidad de la "débiteuse". La placa de vidrio se dobla, en una máquina, sobre un cilindro cuando aún está blanda, y luego prosigue su camino horizontalmente, con lo que se facilitan las operaciones de recocido y corte.

#### Vidrio plano laminado

Como sucede con cualquier otro líquido, si se vierte vidrio fundido sobre una mesa y no la moja, fluirá en todas direcciones hasta que la tensión superficial que actúa sobre los bordes curvos equilibre la presión hidrostática. Para un vidrio dado, el espesor final es siempre el mismo; en el caso de los vidrios de sosa-cal, es de unos 6 mm. Salvo en la parte inmediata a los límites, la superficie es perfectamente plana. Naturalmente, si en un avance el vidrio se enfría demasiado deprisa, el proceso se detendrá y el espesor de la placa será mayor y desigual.

No es posible utilizar una mesa de fundición a las temperaturas del vidrio fundido, sin que éste la moje. Por ello, al olear vidrio plano en este tipo de mesa, es preciso que la temperatura de ésta sea inferior a la de aquél; también es necesario acelerar el flujo y la

homogeneización del vidrio pasando un rodillo por su superficie. Así, tanto la cara superior como la inferior de la lámina de vidrio se enfrían al entrar en contacto con el metal, con lo cual ambas superficies se resienten de los defectos ya mencionados en relación con el flujo de vidrio en el moldeo a presión. Tras el recocido, las superficies deberán desbastarse y pulirse, si se desea lograr una transparencia total. El producto terminado se conoce con el nombre de vidrio plano.

Si, en lugar de una mesa, se emplea un segundo rodillo en el lado inferior de la placa de vidrio, se obtendrá una mejor textura de superficie, ya que resulta mucho más fácil regular la temperatura del cilindro. El proceso podrá entonces hacerse continuo vertiendo el contenido del horno a través de un par de rodillos enfriados por agua a una velocidad que permita moldear el vidrio y, al propio tiempo, lo deje suficientemente flexible para que pueda aplanarse antes del recocido. Si se usan rodillos grabados o impresos, el dibujo será trasladado al vidrio; de este modo, puede hacerse una amplia gama de dibujos para ventanas en las que no se desee una perfecta transparencia. Si se introduce un rollo de reja de alambre en la fusión y se la hace pasar por los rodillos con ésta, se obtendrá un vidrio plano con alambre embebido. Cuando estos vidrios se rompen en servicio, la reja de alambre permite retener los fragmentos, característica ésta que hace que esa clase de vidrio sea la preferida para tragaluces, puertas, ventanas de fábricas, etc.

Todos los productos laminados que se han mencionado se fabrican en láminas continuas, y se cortan, según las dimensiones deseadas por los clientes, al final de la línea de producción. Si se fabrica luna pulida, el desbaste y pulido pueden realizarse también en la banda continua como operaciones integrantes de la línea de producción, que en este caso puede tener una extensión de hasta 400 m, en la cual la lámina de vidrio avanza paulatinamente entre cabezas desbastadoras y pulidoras. Este último proceso, sin embargo, está siendo reemplazado rápidamente por el de vidrio flotado.

El proceso de vidrio flotado es, en realidad, un retorno a los principios básicos, gracias al descubrimiento de que la mesa de colada puede sustituirse por un baño de metal fundido que, sin adherirse a la fusión, esté lo suficientemente caliente para no enfriarla. La superficie en contacto con el metal líquido tiene la misma calidad final que la superficie libre superior. El metal usado es el estaño, al que se protege contra la oxidación estableciendo una atmósfera reductora en la cámara por encima del baño. De hecho, se siguen utilizando rodillos, pero su función consiste en distribuir el vidrio fundido sin enfriarlo excesivamente. El vidrio pasa de los rodillos al baño, sobre el cual flota, adquiere su espesor final, y luego atraviesa el túnel normal de recocido. Puede producirse vidrio más delgado que el límite natural, estirando los extremos de la lámina por medio de ruletas, como en la fabricación de vidrio plano. La calidad óptica del producto es casi tan buena como la de la luna pulida y su resistencia es mayor.

Mediante un sencillo proceso electrolítico, puede fabricarse una clase especial de vidrio flotado para regular el aumento del calor solar en los edificios. Mientras el vidrio semi-fundido está flotando sobre el estaño en la cámara de baño, se deja flotar un charco de aleación fundida sobre la cara superior del vidrio, y se aplica corriente continua entre este charco y el estaño fundido, dando lugar a que los iones colorantes metálicos suban a la superficie, y el vidrio se coloree sin merma de su transparencia.

## VI. PROCESOS SECUNDARIOS DE ELABORACION DEL VIDRIO

Todo postratamiento del vidrio que entrañe temperaturas superiores a unos  $450^{\circ}\text{C}$ , suele hacer necesaria una segunda operación de recocido; por ello, siempre que es posible, el postratamiento del vidrio se hace cuando éste está aún caliente, es decir, antes del primer recocido, a fin de que no haya que repetir este último proceso, el cual lleva mucho tiempo. Normalmente, en los procesos que entrañan altas temperaturas, la tensión superficial actúa como medio inherente de reformar parte del vidrio sin la aplicación de herramientas, con lo que el producto queda limpio y exento de marcas.

### Pulido al fuego y corte flameado

La tensión superficial tiene siempre el efecto de reducir la superficie, de forma que las asperezas que ésta presenta tienden a desaparecer. Como se trata sólo de un efecto superficial, bastará con que esté fluidificada la superficie del vidrio. Esto quiere decir que, cuando se calienta solamente la superficie de un producto de forma compleja, éste puede pulirse al fuego sin que pierda su forma.

Así, por ejemplo, un vaso moldeado a presión suele presentar asperezas en el interior del borde, debido a que, en la operación de prensado, se origina un movimiento relativo, en ese punto, entre el porta-aguja y el cerquillo. Esas asperezas pueden eliminarse, antes del recocido, mediante una máquina de terminado al fuego, que hace pasar la pieza bruta por un túnel de llamas sobre una peana giratoria. El diseño de las máquinas de terminado al fuego no siempre está bien concebido. El objeto perseguido consiste en asegurar el calentamiento de la superficie, pero velando por que el cuerpo reciba sólo el calor necesario para impedir su enfriamiento y figuración, y no el suficiente para que el objeto se deforme o reblandezca. A causa de la transparencia del vidrio, el calor radiante penetra profundamente en la masa vítrea, transmitiendo al cuerpo un calor indeseado. Ahora bien, como el calor que calienta la superficie es el calor conveccional procedente de la llama, el diseño deberá ser tal, que permita que este calor alcance las partes que han de pulirse. Por lo tanto, la función de las paredes del túnel debe consistir en proporcionar una temperatura ambiente general de unos  $700^{\circ}\text{C}$ , evitar que se produzcan corrientes, y confinar las llamas, a fin de que no sean una fuente de calor radiante.

Si se expone una varilla o fibra de vidrio a una llama, el extremo se funde y se va transformando en una perla casi esférica por efecto de la tensión superficial. Si se sigue aplicando la llama, la perla aumenta de tamaño hasta que la tensión superficial, que actúa alrededor de la circunferencia de la fibra, no puede soportar más el peso acumulado. Entonces la fibra se va adelgazando hasta que la perla se desprende. Inmediatamente, la cola que queda en la fibra se va concentrando hasta formar una nueva perla. De igual modo, si se calienta intensamente una estrecha banda circunferencial de un cilindro de vidrio suspendido, el extremo inferior, demasiado pesado para que pueda ser sostenido por la tensión superficial, se desprenderá, separándose del vidrio en ese punto. El extremo inferior de la parte suspendida se concentrará inmediatamente hasta formar una perla reforzada de perfecta lisura. Es posible fabricar vasos, por ejemplo, soplando inicialmente la forma con una prolongación, la que más tarde se corta de este modo.

El espesor de la perla está determinado, naturalmente, por la cantidad de vidrio que se haga fundir, es decir, por el espesor del vidrio y la anohura de la llama. La perla tiende a adoptar la forma deseable de una pera, a menos que el vidrio sea demasiado delgado, en cuyo caso será más redonda y tendrá en su tallo un entrante colector de impurezas. Por ello, en el caso de los vasos más finos, el vidrio se suele recocer, el excedente se parte o corta, y las asperezas se eliminan aplicando con mucho cuidado sólo la llama suficiente para alisarlo sin que adopte la forma de una perla.

#### Recocido

Los vidrios ordinarios pueden romperse a causa de los termoesfuerzos originados por diferencias de temperatura que excedan de unos  $50^{\circ}\text{C}$ . La pieza bruta, soplada o prensada, recién extraída del molde puede estar expuesta a diferencias de temperatura mucho mayores. No se rompe porque el vidrio está lo suficientemente blando para ceder, pero, si se deja endurecer en presencia de tales diferencias, permanecerá una tensión correspondiente en el vidrio, cuando éste alcance la uniformidad térmica a la temperatura ambiente. Para evitar las roturas debidas a las tensiones, es preciso recocer el vidrio.

El recocido consta de dos etapas. En la primera, se deja que la temperatura se haga uniforme manteniendo el vidrio a una temperatura suficientemente alta para que descargue las tensiones que se originen en él, pero no tan alta que el vidrio reblandecido se deforme por su propio peso. Una vez que el vidrio se ha liberado de tensiones y ha alcanzado la temperatura uniforme, se enfría con la lentitud necesaria para que no vuelvan a producirse diferencias térmicas. La velocidad de enfriamiento puede aumentarse cuando el vidrio está lo suficientemente frío ( $450^{\circ}\text{C}$ ) para ceder otra vez a los termoesfuerzos; éstos desaparecerán cuando las diferencias de temperatura que los originan hayan dejado de existir, al alcanzar el objeto la temperatura ambiente.

Cuanto mayor sea la temperatura de mantenimiento, tanto menor será el tiempo necesario para descargar esas tensiones en la primera etapa, pero si es demasiado alta, la velocidad inicial de enfriamiento habrá de ser tan reducida, que el tiempo total empleado en el recocido resultará inadmisiblemente largo. Por el contrario, si se elige una temperatura de mantenimiento baja, el vidrio tardará demasiado tiempo en liberarse de tensiones, pero podrá acortarse la etapa de enfriamiento. El tiempo de recocido más breve corresponde a algún procedimiento intermedio; mientras que el tiempo real depende del espesor del vidrio y del grado de perfección del recocido que se desee. Como ya se dijo en el capítulo II, las propiedades físicas del vidrio cambian con el tiempo a las temperaturas de recocido, por lo que, para optimizar el proceso, es necesario guiarse por reglas empíricas. Para el vidrio óptico, se precisa un recocido bueno, y éste puede durar días, y aun meses, cuando se trata de piezas grandes; pero en el caso de objetos de vidrio ordinario el ciclo puede completarse en menos de tres horas, haciéndose pasar los objetos, sobre una correa sin fin, por un túnel u horno continuo de recocer con control de temperaturas. Para la mayor parte del vidrio plano y del utilizado para envases, las temperaturas críticas son la del punto superior ( $545^{\circ}\text{C}$ ) y la del punto inferior ( $510^{\circ}\text{C}$ ) de recocido. Los planes típicos de recocido se basan en que el vidrio se mantenga a  $5^{\circ}$  por encima del punto superior del recocido durante un tiempo que dependerá del espesor,

y se enfríe a una velocidad que también dependerá del espesor, hasta que el vidrio esté a unos  $10^{\circ}$  por debajo del punto inferior de recocido. Entonces podrá aumentarse la velocidad de enfriamiento en aproximadamente un 20% con cada descenso ulterior de  $10^{\circ}$ . En el cuadro 14 se dan ejemplos de planes de recocido de este tipo.

Quadro 14

Planes típicos de recocido para vidrio plano y vidrio destinado a envases

Espesor del vidrio (mm)	Tiempo de mantenimiento a $550^{\circ}\text{C}$ (min)	Velocidad de enfriamiento inicial ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )
3	4	4,2
5	10	1,8
10	20	0,5

Corte por rayado y fisuración

La destreza con que el vidriero parte el vidrio precisamente a lo largo de una raya trazada sobre el mismo con una punta de diamante o una rueda de acero, es un arte adquirido que no es fácil analizar ni explicar. La naturaleza de dicha raya es importante. Las tensiones que actúan sobre el vidrio cuando se le aplica una punta de diamante o una rueda de acero son inmensas, aunque sólo se emplee la presión de los dedos sobre la herramienta. Si están estrechamente localizadas, es decir, si la punta o la rueda están suficientemente afiladas, pueden hacer que el vidrio se deforme sin fisurarse (más o menos por la misma razón por la cual las fibras finas resisten las roturas). El vidrio queda surcado, produciéndose el mayor desplazamiento en el fondo del surco. La distorsión que queda después de pasar la punta es la mejor gufa de una fisuración ulterior.

Si la punta es demasiado roma, o si se oprime tanto que sus lados más anchos se apoyan en el vidrio, éste tiende a "escamarse" en uno de los lados de la raya. El resultado será una banda quebradiza que, naturalmente, tenderá a servir de gufa de una fisura; sin embargo, cada escama tiene su diminuto sistema de fractura, que puede desviar la fisura de la raya. Por ello, la mejor raya es la que se hace de un solo trazo, con una presión apenas insuficiente para que se produzcan exfoliaciones laterales. Con un diamante, el ángulo a que se mantiene la punta es sumamente importante; con las ruedas de cortar, se requiere menos destreza.

La fisura se inicia fácilmente golpeando el lado opuesto. Lo que ocurre, según parece, es que una fisura muy grande está guiada por otra relativamente menor, la fina línea de tensión permanente debida a la distorsión causada por el diamante. En la extremidad de la fisura, sin embargo, la tensión no es permanente: es una intensificación de cualquier esfuerzo pasajero aplicado exteriormente al vidrio. Si el esfuerzo aplicado no es simétrico en torno a la raya, la fisura puede desviarse. Ahora bien, un esfuerzo simétrico aplicado al comienzo de la fisura puede no permanecer simétrico al avanzar ésta, cambiando así la geometría de la pieza trabajada. Y aquí entra en juego otra habilidad del vidriero: aplicar un esfuerzo que permanezca simétrico durante todo el proceso de fisuración.

En la producción repetitiva, se suele rayar y partir por medios mecánicos. Con frecuencia, en el caso de objetos cilíndricos, la fisuración puede lograrse por termoesfuerzo, y con una precisión tal, que basta un corto trazo para iniciarla, trazo que no es necesario que circunscriba el cilindro.

#### Desbaste y pulido

Como ocurre con el diamante del vidriero cuando el ángulo de corte no es el adecuado, si el vidrio se frota con cualquier abrasivo duro, se rayará, produciéndose exfoliaciones laterales. Si las rayas siguen direcciones aleatorias, el desbaste de la superficie será homogéneo. Para un abrasivo dado, el daño es aproximadamente proporcional al tamaño de las partículas abrasivas; con el carborundo de granulometría 100 se obtiene una aspereza superficial unas dos veces mayor que con el carborundo de granulometría 200; el vidrio se arranca unas dos veces más de prisa; y el rayado resultante es unas dos veces más profundo. Por consiguiente, cuando el desbaste ha de ir seguido de pulido, se economiza tiempo si se hace por etapas y utilizando partículas cada vez más finas, desbastando en cada etapa hasta la profundidad del rayado que quedó de la etapa anterior. De este modo, solamente quedará por pulir el rayado correspondiente a, por ejemplo, el carborundo de granulometría 600. En la práctica, suelen utilizarse materiales cada vez más blandos (corindón, granate o arenilla), que dejan un rayado menos profundo.

Si se desea obtener una superficie mateada, puede pararse el proceso cuando se ha logrado la textura requerida. También puede tratarse el vidrio en el chorro de arena (con sujeción a ordenanzas sanitarias) o con otros abrasivos transportados por aire. La operación normal de desbaste se hace en húmedo, sirviendo el agua para distribuir las partículas, mantener el vidrio frío y arrastrar los residuos.

Es difícil explicar, en términos macroscópicos, la naturaleza del pulido, arte practicado incluso antes del descubrimiento del vidrio. Según una teoría, el calor que se genera en la superficie de contacto entre el vidrio y la herramienta pulidora es suficiente para fundir el vidrio, y, por consiguiente, la acción equivale al pulido a la llama. Suele utilizarse rojo para pulir (óxido férrico,  $Fe_2O_3$ ), o a veces óxido de cerio,  $Ce_2O_3$ , en una solución cremosa, aplicándose con una pulidora de fieltro o de pez. Es absolutamente cierto que el pulido más rápido se logra cuando la pulidora está a punto de secarse, que corresponde al momento de máxima fricción, aunque una supuesta temperatura superior a  $600^{\circ}C$  apenas es compatible con el hecho de que el agua siga en íntimo contacto con la superficie. La paradoja se resuelve cuando se comprende que la acción de deslizamiento de las partículas finas del polvo abrasivo imparte a los iones individuales de la superficie del vidrio suficiente energía traslacional para que se muevan, en el sentido del deslizamiento, con tanta libertad como si tuvieran la energía cinética aleatoria media correspondiente a una temperatura alta.

Cualquiera que sea la teoría, es bastante fácil, con una pulidora y solución de rojo, transferir vidrio de las crestas a las depresiones de las asperezas, puliendo así el vidrio. Pueden eliminarse completamente, por pulido, asperezas de hasta 0,02 mm de profundidad de manera que todos los defectos se hagan invisibles. Son esos defectos invisibles los que impiden que el vidrio desbastado y pulido sea tan resistente como el pulido al fuego.

Un método muy diferente es el de pulido al ácido, en el que la superficie se disuelve con una solución de ácido fluorhídrico. Si se sigue la acción con el microscopio, se verá que la disolución comienza a partir de núcleos de la superficie y continúa, a partir de cada núcleo, sobre un frente esférico, de modo que la superficie presenta un picado microscópico con una textura que depende de la densidad de los núcleos y la longitud del ataque. Estas variables pueden regularse tan bien con la temperatura y la mezcla de ácido sulfúrico, que es posible obtener una gama de texturas, desde el satinado hasta el pulido fino, casi tan amplia como la obtenida por medios mecánicos. El pulido al ácido se emplea mucho en la producción de cristal tallado, pero rara vez resulta aceptable para el vidrio óptico. La superficie, a condición de que se mantenga intacta, es más resistente que la que se obtiene por pulido mecánico. La robustez de las bombillas eléctricas "esoarchadas" (con un baño interior de escarchado) se debe en gran parte a este proceso de reforzado con ácido, y la inaccesibilidad de la superficie interior significa que su resistencia perdura indefinidamente.

#### Moldeo secundario del vidrio

Con frecuencia, la formación primaria del vidrio, particularmente los tubos, no es más que la primera etapa en la producción del objeto terminado. Este, a veces, es complejo, como en el caso de ciertos instrumentos de laboratorio, y requiere otras etapas de formación, pero, las más de las veces, se trata sólo de un simple retoque o unión de dos piezas. Solamente cuando se requieren cantidades muy grandes (bombillas eléctricas, válvulas de radio, frascos Dewar, etc.) se emplean medios de fabricación exclusivamente mecánicos; incluso en tales casos las máquinas suelen limitarse a imitar las operaciones de los procesos de fabricación manuales. Algunas de esas operaciones entrañan cambios tan radicales de forma, que el vidrio, o algunas partes de él, ha de someterse de nuevo a la originaria temperatura de trabajo. Otras requieren sólo una simple flexión, como, por ejemplo, los parabrisas curvos de automóvil, bastando temperaturas de  $700^{\circ}$ - $800^{\circ}$ C para que el vidrio responda a las fuerzas de flexión en un tiempo prudencial. Para la obtención de una doble curvatura, se necesita una temperatura más alta. Temperaturas aun mayores (unos  $1.200^{\circ}$ C) se requieren para la soldadura de dos piezas, ya que, para lograr una buena transición de una parte a otra del objeto terminado, es preciso que el vidrio tenga suficiente fluidez para que responda a las fuerzas de tensión superficial. Naturalmente, las dos piezas no pueden calentarse por encima del punto en el que perderían su forma; el calor deberá estar localizado. El calentamiento a la llama es la solución más corriente. En el caso de piezas pequeñas que pueden sostenerse con las manos, la operación se realiza con un soplete manejado por diestros operarios (sopladores).

Los sopladores son, seguramente, los obreros más especializados de la industria. Han de ser capaces de coordinar perfectamente los movimientos de ambas manos; saber el momento exacto en que han de soplar, cuando deben dejar que la tensión superficial cumpla su cometido, y si se debe dejar que el calor penetre o se disperse; y recordar instintivamente el grado de calentamiento de todas las partes de la pieza, so pena de deformarla o de provocar una tensión suficientemente grande para iniciar una fractura en algún punto remoto de la misma.

Los condensadores y otros equipos de laboratorio tienen, en los procesos industriales, contrapartes cuyo peso es excesivo para que puedan manipularse manualmente. Los tornos para trabajar el vidrio reemplazan a las manos, y los quemadores de superficies curvas, al modesto soplete. Como gran parte del calor generado por estos quemadores se pierde, son sustituidos a veces por un sistema de calentamiento eléctrico que funciona de la siguiente manera: dos pequeñas llamas de hidrógeno, diametralmente opuestas y dirigidas a través de dos boquillas de cobre, inciden sobre el tubo que ha de calentarse o soldarse. Las llamas de hidrógeno tienen suficiente efecto calorífico directo para calentar una banda circunferencial del vidrio giratorio hasta el punto de que conduce electricidad, y la aplicación de una alta tensión entre las boquillas crea un arco a través de las llamas de hidrógeno ionizado y una corriente a través del vidrio que produce calor óhmico en el interior de la masa de éste.

Cuando es necesario soldar piezas vítreas sin que el calor dañe otros componentes cercanos, el problema puede resolverse utilizando vidrio fundente, un vidrio muy blando que es compatible con las partes principales en la expansión térmica, y que puede triturarse y aplicarse en forma de pasta a las superficies que se desea unir. El fundente se vuelve un líquido móvil a 550°-600°C, y, al penetrar en la junta, la suelda. El fundente puede formularse como un vidrio ceramizado (capítulo II), de modo que, una vez inflamado, pueda resistir una temperatura más alta que la de cocción. Esta técnica es particularmente útil, por ejemplo, para soldar los respaldos cónicos a las pantallas de los tubos de imagen de televisión, con lo que se obvia el problema de calentar uniformemente la junta rectangular en un torno.

Hay otros productos para los cuales el vidrio granulado es un punto de partida secundario. Partículas cuidadosamente graduadas de vidrio granulado de borosilicato, químicamente resistente se colocan en moldes y se calientan a 800°C, hasta que los granos se funden y forman los discos porosos de vidrio sinterizado que se emplean para los filtros químicos. Análogamente, el vidrio granulado, con un aglutinante combustible de plástico, puede prensarse en frío en un molde conveniente y luego cocerse como la cerámica. Las formas así premoldeadas tienen dimensiones precisas y exactamente las mismas propiedades físicas que el vidrio base, pudiendo formar parte de una estructura compleja de éste o servir como perlas aisladoras en los componentes electrónicos.

El vidrio granulado puede utilizarse también para fabricar una espuma rígida de vidrio de estructura celular. Los granos de vidrio se mezclan con un agente gasificante, como granalla de carbón, y se calientan en un molde rudimentario hasta una temperatura a la que el vidrio se fluidifica y se generan los gases. El producto final es un material rígido, cuyo volumen está constituido, en más del 90%, por un vacío (burbujas encerradas que no atrapan humedad). Los bloques brutos pueden cortarse y modelarse fácilmente, con sierra y escofina, en la forma deseada, sirviendo de excelente aislante, particularmente a bajas temperaturas, a las que la condensación podría mermar el rendimiento de los aislantes permeables.

### Templado

La imprevisible resistencia del vidrio en servicio, y el peligro que entrañan los fragmentos resultantes de su rotura, limitan considerablemente sus aplicaciones. Aunque las muestras de prueba pueden indicar resistencias de 5.000-6.000 libras por pulgada cuadrada (lpc), sólo debe emplear una resistencia calculada de 1.000 lpc, para obtener un margen de seguridad que tenga en cuenta las reducciones de resistencia debidas a las rozaduras o al rayado. Este margen, más que un factor verdadero de seguridad en el sentido empleado por los ingenieros, es un factor que tiene en cuenta posibles abusos.

El proceso de templado del vidrio constituye un arma de doble filo al eliminar esos inconvenientes. Mediante el pretensado térmico o químico del vidrio, por el que todas las superficies expuestas quedan sometidas a una compresión permanente, se lo inmuniza contra cualquier daño superficial que no alcance la zona de compresión. De este modo, la resistencia en servicio aumenta por un factor de tres a cinco. Naturalmente, es preciso que en la masa del vidrio haya un esfuerzo de tracción equilibrador, pero sucede que eso resulta ser una ventaja. Cuando el vidrio queda expuesto por la penetración del daño superficial, se quiebra en numerosos fragmentos cúbicos de aristas mucho menos afiladas que las aristas cortantes que resultan muchas veces cuando se rompe el vidrio recocido. Por este motivo, el vidrio templado está clasificado como vidrio de seguridad. Un buen templado térmico del vidrio dependerá de que se logre un espectro de esfuerzos simétrico a lo largo de la sección. En el caso de una placa plana, suele ser de forma parabólica, con una compresión máxima en ambas superficies igual en valor al doble de la tensión inducida en las fibras centrales. La capa protectora exterior tendrá entonces un espesor aproximadamente igual a la sexta parte del espesor de la placa.

Ya se dijo, en relación con el recocido, que el esfuerzo residual era elevado en el vidrio cuando la temperatura de mantenimiento era alta y el enfriamiento ulterior rápido. En el templado térmico se explota este hecho al máximo. Se hace que la temperatura de mantenimiento sea la más alta que el vidrio pueda soportar sin reblandecerse, y se acelera la velocidad de enfriamiento hasta el punto máximo que pueda soportar sin romperse por efecto del esfuerzo temporal debido al enfriamiento. De hecho, se sobrepasa ligeramente la temperatura de flexión, y la pieza trabajada suele presentar señales de distorsión, o marcas de pinzas. Se necesita esa alta temperatura para crear una distribución de temperatura parabólica -y, por ende, un espectro parabólico de esfuerzos- antes de que el vidrio se vuelva rígido; lo que ocurre en algún momento entre el punto superior y el punto inferior de recocido. Si esto se consigue, todas las partes del vidrio habrán pasado por la temperatura crítica a la misma velocidad de enfriamiento y todas ellas tendrán las mismas propiedades físicas. De no conseguirse, las velocidades de enfriamiento del vidrio, a diferentes profundidades, serán distintas y, como ya se dijo en el capítulo II, las propiedades físicas variarán de acuerdo con el espesor. En el primer caso, cuando se ha logrado la uniformidad térmica en el vidrio, las diferencias de temperatura "congeladas" en el vidrio dan un espectro de esfuerzos que es una réplica exacta de la distribución de la temperatura. En el segundo caso, el espectro de esfuerzos está distorsionado.

El enfriamiento rápido suele conseguirse mediante chorros de aire, cuidadosamente dispuestos para que el enfriamiento sea homogéneo y el aire viciado pueda escapar. También se usan, a veces, baños de sales licuadas o de aceites. Estos dan un espectro de esfuerzos algo diferente, por ser también diferente el proceso de termotransferencia, pudiendo lograrse un mejor producto terminado cuando el objeto presenta bruscas variaciones de espesor.

Por la rapidez con que se enfría desde una temperatura elevada, el vidrio templado conserva parte del carácter de esa temperatura, teniendo un punto inferior de recocido unos  $100^{\circ}\text{C}$  más bajo que el del vidrio recocido. Por consiguiente, su temperatura de servicio máxima es más baja.

Existen también medios químicos de obtener en el vidrio una capa superficial de compresión que lo endurezca. Puede cambiarse la constitución química de las capas superficiales sustituyendo un álcali por otro, o provocando en ellas una conversión de tipo vidrio ceramizado. Si se sumerge una hoja de vidrio de sosa-cal en sal fundida con una concentración de algún otro ion álcali, habrá una tendencia a que se produzca un intercambio de iones, tendencia que será bastante acusada cerca del punto inferior de recocido del vidrio. Cuando las capas superficiales se enfrían hasta la temperatura ambiente, quedan sometidas a un esfuerzo que variará según las diferencias que registre la expansión térmica originada por el intercambio de iones. Es, pues, una cuestión de "congelar" las diferencias de expansión, en lugar de las diferencias de temperatura, como en el templado térmico. Puede lograrse una compresión superficial muy alta y, por consiguiente, una resistencia también muy alta, pero la capa protectora será más delgada y menos eficaz contra las rozaduras más intensas. Naturalmente, el espectro de esfuerzos a través de la sección distará mucho de ser parabólico.

Mediante otro tratamiento, al que se recurre a menudo para dar mayor solidez a las botellas en el uso, se aplica a la superficie una capa protectora adicional, no para aumentar la resistencia del vidrio a los daños superficiales, sino para reducir éstos al mínimo. Un tratamiento de endurecimiento en el "extremo frío", es decir, aplicado en el extremo frío del horno de recocido, puede consistir en rociar o vaporizar materia orgánica para que forme una película sobre el vidrio. La película lubrica cualquier contacto ulterior entre el vidrio de las botellas, contacto que puede producir rasguños en las mismas. El tratamiento por titanización en el "extremo caliente" suele ser más eficaz a este efecto, probablemente porque la película de óxido de estaño que se forma en la superficie durante ese proceso es rígida y, teniendo menor expansión térmica, queda sometida a compresión, contribuyendo, así, a aumentar la resistencia. En ambos casos, las películas se aglomera al vidrio por medios químicos, lo que significa que los enlaces silicón-óxígeno del vidrio se mantienen en la película, en el primer caso porque la materia orgánica de ésta es una silicona, y en el segundo porque el enlace del óxido de estaño Sn-O es compatible con el enlace Si-O del vidrio. En ambos casos, las películas son invisibles por ser tan delgadas.

#### Decoración

En los 2000 años de desarrollo relativamente lento que median entre la invención de la caña de vidriero y la aparición de la tecnología moderna, a comienzos de este siglo, se practicaron una inmensa variedad de ornamentaciones artísticas. El hombre de nuestros días no es, después de todo, más inteligente que el de hace 2000 años. Lo único que ha cambiado ha sido

el acervo de conocimientos y el medio tecnológico. Muchos de los adelantos modernos ajenos a la decoración no son otra cosa que adaptaciones de antiguas recetas y prácticas con las que se buscaba el mérito artístico. Por ejemplo, pudiera decirse que el proceso de titanización a que acabamos de referirnos se basa en el hecho, bien conocido de los antiguos, de que al vidrio puede dársele una irisación, con los colores permanentes del arco iris, exponiéndolo cuando está caliente al vapor del cloruro de estaño. La decoración es, pues, no tanto una cuestión de desarrollo tecnológico como de elegir las técnicas más compatibles con las ideas modernas de producción en serie. Aquí consideraremos solamente una de esas técnicas.

Muchas de las decoraciones aplicadas a la cerámica resultan desvaídas cuando se trasladan al vidrio transparente; es preciso darles un fondo opaco para obtener un contraste satisfactorio. En el vidrio, los colores han de ser gruesos y fuertes. Por otra parte, han de vitrificar a una temperatura suficientemente baja para evitar que el vidrio se deforme, y, dado su espesor, deberán tener en la cochura una expansión compatible con la del vidrio. Como la composición de los vidrios ordinarios ya es resultado de la optimización del costo de las materias primas, la facilidad de fusión y la utilidad en servicio, es inevitable renunciar en parte a esa fórmula óptima cuando se desea producir un vidrio intensamente coloreado y que vitrifique a una temperatura a la cual el vidrio base es prácticamente rígido. Como la decoración representa una parte tan pequeña de la sustancia del objeto, el costo no es una consideración muy importante, y a veces pueden emplearse incluso metales preciosos, como el oro y el platino, sin que ello entrañe un excesivo aumento de costos. En cambio, la durabilidad química, particularmente cuando se emplean temperaturas de recocido bajas, es casi siempre muy inferior a la del vidrio base, de modo que éste puede durar más que su decoración.

La técnica de impresión más idónea para aplicar un espesor adecuado de color es la serigrafía, proceso que suele ser directo, aunque en ocasiones se emplea un papel de calco que luego se aplica al vidrio. En este proceso, se aplica una solución de pintura a través de un fino tamiz de nylon oscuro o de acero inoxidable, con los agujeros obturados o abiertos de suerte que forme un estarcido, según lo requiera el dibujo. Este tamiz se presiona contra el vidrio por medio de una rasqueta, que sirve también para hacer pasar la pintura a través del estarcido. Cuando se suprime la presión, el tamiz se desprende del vidrio, quedando el dibujo en forma de una serie de puntos, que se unen por fusión cuando se recuece el objeto.

Cuando se requiere más de un color, es preciso proceder a una serie de aplicaciones del estarcido en lugares precisamente marcados. Si una botella ha de llevar una etiqueta de color aplicado, se la forma con un hoyuelo convenientemente situado, de modo que los ajustes de coincidencia puedan hacerse automáticamente por referencia a ese punto. Para no tener que esperar a que se seque la pintura entre colores, hoy es corriente emplear una cera como soporte de la pintura y utilizar tamices calentados. La cera se solidifica sobre la botella fría, e inmediatamente se le puede sobreponer el siguiente color, sin que se produzcan manchas.

El objeto suele recocerse en un horno continuo para decorar, cuya parte posterior es exactamente igual que un horno de recocido y desempeña la misma función. En la parte delantera, hay una prolongación donde se calientan las botellas frías, primero hasta una temperatura de aproximadamente 400°C, para fundir el soporte de la pintura, y luego hasta 580°C, para fundir el esmalte. Si no se consigue fundir completamente el medio orgánico en el primer paso, se producirá una situación como la mencionada más arriba en lo que respecta a la producción

de vidrio espuma, es decir, una estructura efervescente desteñida. Si no se alcanza la temperatura de vitrificación, el lustre será deficiente, y la durabilidad química se verá mermada a causa de la mayor área superficial de la primera fase de pulido.

La preparación y mezcla de las pinturas cerámicas para este proceso es un arte altamente especializado, que, normalmente, se deja a los proveedores de la pintura. Los tamices de seda empleados en serigrafía, en cambio, se preparan en la vidrería. Utilizanse casi exclusivamente métodos fotográficos. Los tamices se recubren con un preparado de alcohol polivinílico o gelatina, sensibilizado mediante bicromato, y se exponen a la luz ultravioleta en contacto con un positivo fotográfico. Las áreas expuestas del preparado -en las que el positivo es claro- se vuelven insolubles en agua caliente. Las áreas no expuestas -las partes oscuras del positivo- permanecerán solubles. Lavando los tamices en agua, se elimina el preparado que obstruye las áreas por donde ha de pasar la pintura.

Algunos fabricantes mezclan ellos mismos las pinturas cerámicas cuando requieren una gran diversidad de colores, como en la industria de cosméticos. Hay también una creciente tendencia a emplear pinturas orgánicas para aplicaciones que requieren condiciones menos rigurosas. Estas pinturas pueden cocerse a una temperatura mucho más baja (unos 180°C), lo que permite obtener acabados con tintes orgánicos y metales no preciosos en una gama casi infinita de colores.

## VII. CONTROL DE CALIDAD Y SOLUCION INMEDIATA DE PROBLEMAS TECNICOS

Para la mayoría de los usuarios de productos de vidrio, la calidad del vidrio, en cuanto tal, no es la preocupación principal. Lo que al comprador de botellas, por ejemplo, le interesa es que éstas sean de la capacidad requerida; que los corchos, cápsulas o cierres adquiridos a otro proveedor sean los apropiados; y que la altura, diámetro y resistencia de las botellas sean compatibles con las características funcionales de sus máquinas de llenado (que pueden tener que trabajar eficientemente a velocidades de hasta 500 botellas por minuto). A fin de cuentas, es el comprador quien ha de tratar con el consumidor final y quien contrae determinadas responsabilidades legales para con éste en lo que respecta al peso o volumen del contenido y a la resistencia del producto en el uso.

El fabricante de botellas, por su parte, sabe que la precisión de los moldes en que se soplan éstas no representa más que una exigua parte de sus problemas. Trabaja con un material que, a diferencia del metal, no se conforma invariablemente en el molde. El volumen, por otra parte, depende del peso de la gota, que es variable, y de cualesquiera deformaciones que las botellas puedan experimentar cuando se extraen del molde. Asimismo, el espesor de las paredes depende del peso de la gota, y su distribución es variable. Aunque las botellas se fabricaran a la modesta velocidad de unas 80 por minuto, se requeriría una legión de inspectores provistos de calibradores para comprobar las dimensiones críticas de cada botella. No cabe duda que pueden construirse máquinas automáticas o electrónicas capaces de realizar la mayor parte de esas mediciones a velocidades extremadamente altas, pero con esto no se resuelve el problema del costo de la inspección; en lugar de pagar los sueldos de esa legión de inspectores, se hace una importante inversión de capital en máquinas, y luego hay que emplear personal altamente calificado para prepararlas y mantenerlas.

Naturalmente, el precio que paga el comprador deberá cubrir todos los costos involucrados: el de fabricar la botella, el de las piezas rechazadas y el de la inspección. Por tanto, le tiene cuenta al comprador, en primer lugar, cerciorarse de que la precisión dimensional que pide no es mayor de la que realmente necesita, y, en segundo lugar, aceptar algún método menos costoso de comprobación de esas dimensiones. Es evidente que, si no se selecciona más que una pequeña fracción de las botellas a efectos de medición, el costo de la inspección se reducirá proporcionalmente. Pero ¿quién puede asegurar que esa muestra sea representativa del conjunto de la mercancía? Y ¿qué probabilidades habrá de que, una vez aceptada ésta, algunas botellas resulten de mayor tamaño, al punto que se rompan en la máquina de llenado o que la deterioren? El método estadístico de control de calidad permite responder a tales preguntas.

### Control estadístico

El término "promedio", corrientemente empleado, es un término estadístico perfectamente definido. Decir que, en cada partido de fútbol, se marca un promedio de 1,8 goles es decir algo estadísticamente significativo, aun cuando no sea posible marcar una fracción de gol en un partido real. El uso del término implica que las medidas en que se piensa se hallan dispersas o distribuidas de una manera específica en torno al valor que se llama promedio. Uno de los términos empleados para especificar la distribución es el de "desviación estándar".

Esta se ha definido de forma tal que puede calcularse, igual que el promedio. Los estadígrafos han comprobado que, a condición de que las variaciones se deban a causas aleatorias, es posible describir suficientemente la distribución conociendo tan sólo esos dos valores, el promedio y la desviación estándar.

Concretando, si la frecuencia de ocurrencia de un valor medido, en un grupo de mediciones que varían por causas aleatorias, se representa gráficamente en función del valor medido, la curva de distribución resultante será la llamada normal, o gaussiana. Es una curva campanular y simétrica alrededor de cierto valor, el promedio (A). Su forma se asemeja a una f cursiva unida, en la parte superior, a su propia imagen en un espejo. La distancia horizontal desde el punto en que la cruceta de una de las efes cruza el trazo vertical de la letra hasta A, es igual a la desviación estándar (DE). Si la DE es grande, la curva será ancha; si es pequeña, será estrecha. Pero lo interesante es que la forma de la curva está perfectamente definida por la DE: a partir de ésta puede calcularse la probabilidad de ocurrencia de un valor determinado en el grupo de mediciones. Por tanto, cabe prever que el 16% de todos los valores yacerán por debajo de  $A - DE$  (y un 16% por encima de  $A + DE$ ), 2,3% por debajo de  $A - 2DE$  y 0,13% por debajo de  $A - 3DE$ , a condición de que las variaciones se deban efectivamente a causas aleatorias.

La estadística, por supuesto, abarca mucho más; pero, para los fines que perseguimos, bastará este primer paso. En verdad, para muchos fines no hará falta aplicar el principio sino de manera rudimentaria. Supóngase, por ejemplo, que la densidad del vidrio de un horno se mide de manera precisa todos los días y que los valores obtenidos se expresan gráficamente, en forma de puntos, en función de una escala de tiempos. Si las variaciones se deben a causas aleatorias, con el transcurso del tiempo aparecerá una serie de puntos dispersos alrededor de algún valor central que no acusará una marcada tendencia ascendente ni descendente. A ojo, se puede trazar, a través de los puntos, una línea que parezca representar el valor promedio de A. También se pueden trazar líneas por encima y por debajo de A entre las cuales esté comprendido aproximadamente el 68% de los puntos, quedando alrededor del 16% por encima de la línea superior y el 16% por debajo de la inferior. Así, esas líneas corresponderán a  $A + DE$  y  $A - DE$ . Duplicando y triplicando la separación, pueden también trazarse líneas que correspondan a  $A \pm 2DE$  y  $A \pm 3DE$ . El diagrama resultante se denomina gráfico de control. Mientras la mayor parte de los puntos diarios aparezcan entre las líneas 1DE, ocasionalmente entre las líneas 2DE, y raramente fuera de ellas, el proceso estará controlado y no habrá necesidad de proceder a ninguna medida. En cambio, si los puntos se desvían sistemáticamente del centro, es un indicio de que se ha introducido alguna característica no aleatoria, y entonces habrá que proceder a diagnosticar y rectificar la situación. En este ejemplo, la desviación puede deberse a un error sistemático de pesado, a un cambio en la composición de las materias primas, o a una pérdida excesiva de volátiles durante la fusión. Si los puntos se dispersan más (o menos), es un indicio de que ha aparecido (o desaparecido) algún nuevo factor aleatorio; por ejemplo, las máquinas pesadoras pueden estar desestabilizadas y requerir mantenimiento.

Los gráficos de control son extremadamente útiles, pero no son un fin en sí mismos, es decir, no controlan nada. Lo único que hacen es proporcionar información que sirve de base para proceder de manera lógica. En el gráfico, dicho sea de paso, deberán anotarse detalladamente las medidas que se adopten.

Hoy es fácil obtener computadoras electrónicas de bolsillo, de precio módico, que permiten realizar cálculos estadísticos con rapidez y que pueden utilizarse, en la fábrica, para atender la vital necesidad de determinar rápidamente el significado de alguna variación registrada, a fin de tomar en el acto las oportunas medidas correctoras, o -lo que es igualmente importante- evitar innecesarios ajustes del reglaje de las máquinas, en un intento vano de corregir lo que no es más que una variación aleatoria.

La elaboración de normas de calidad basadas en la estadística suele ser bastante arbitraria y, por consiguiente, no es la solución que mejor favorezca los intereses de todos. Como la curva normal nunca llega hasta el cero en sus extremidades, existe siempre la posibilidad teórica de dejar pasar un objeto que, normalmente, debería rechazarse. En la práctica, la distribución efectiva, aunque se acerca lo bastante a una distribución normal para que puedan aplicarse las matemáticas simples, no tiene extremidades infinitas. En la fabricación de botellas, por ejemplo, se da una cierta cantidad de rechazos automáticos: la máquina no puede hacer botellas con desviaciones extremas, con relación al promedio, sin romperlas.

La norma deberá perseguir dos objetivos: hacer aceptablemente pequeña la probabilidad de que una botella defectuosa llegue a la máquina de llenado, y minimizar el tamaño de la muestra necesaria para obtener esta garantía. Por ejemplo, un embotellador sabe por experiencia que, por término medio, ha perdido 5 de cada 1.000 botellas por rotura en las máquinas de llenado. Por consiguiente, no es probable que le disguste si una de cada 1.000 botellas que se le entregan corre igual suerte. Con esa meta (norma) presente, conociendo la desviación estándar y utilizando tablas de la curva normal de errores, el fabricante de botellas puede determinar la tolerancia que ha de admitir en su trabajo, si sólo piensa ensayar, por ejemplo, el 10% de una consignación que no contendrá más de una botella defectuosa entre mil. Cuanto menor sea la fracción ensayada, más rigurosa habrá de ser esa tolerancia.

#### Realimentación

La función de un departamento de control de calidad no consiste simplemente en observar o seleccionar la calidad, sino justamente en lo que el término implica: controlar. Es de vital importancia que los encargados de controlar la calidad en la línea de producción sean avisados inmediatamente por el departamento, cuando se manifieste alguna tendencia, buena o mala, en la calidad. El recocido de los objetos y su enfriamiento hasta la temperatura ambiente suelen requerir unas tres horas. Con las ultrarrápidas máquinas modernas, eso significa que podría rechazarse un lote entero de, tal vez, 15.000 objetos. Debería determinarse, cuando menos, el peso de la gota y verificarse la calidad por zonas antes de introducirse el vidrio en el túnel.

Al personal encargado del control de calidad incumbe notificar directamente cualquier discrepancia, aunque sea de manera oficiosa, a quien se crea en posición de rectificarla, ya que ese personal es el primero que obtiene la información. Los informes y registros oficiales son secundarios. Así, pues, es preciso que el personal encargado del control de calidad aprenda a identificar los defectos y que se relacione con todas las categorías de personal de producción, a fin de que sus actividades sean aceptadas como un servicio y no como una búsqueda de defectos (en el sentido de las reclamaciones). Por consiguiente, el control de calidad es

una función que corresponde al personal, supervisado por el vitrotecnólogo y no directamente por el director de producción. Normalmente, los clasificadores forman parte del equipo de producción, ya que, a menudo, se encargan también de embalar los productos. En este caso, el personal encargado del control de calidad actúa a modo de árbitros: mantiene las normas de comparación a las que han de ajustarse los clasificadores.

El departamento de control de calidad está respaldado por el laboratorio, cuya principal misión es el control de calidad en profundidad. Es preciso realizar frecuentes análisis de las materias primas, tanto desde el punto de vista de la consistencia como del contenido, así como determinar el contenido de humedad de los materiales almacenados, a fin de asegurarse de que el cálculo de la mezcla vitrificable es válido. Mediante sencillas comprobaciones -por ejemplo, de la fracción soluble en ácido de la mezcla- puede saberse si las operaciones de pesado y mezcla son satisfactorias. En un tiempo, la composición del vidrio fundido se determinaba por análisis químicos. Un análisis completo, sin embargo, requería cinco días y era demasiado lento para que constituyese un control eficaz. Gracias a los métodos modernos, más rápidos, el análisis químico ha vuelto a adquirir vigencia como medio directo de medir la composición. Sin embargo, se siguen empleando mucho, por su rapidez, las inferencias con respecto a la composición basadas en la medición de las propiedades físicas. Como el vidrio se vende sobre la base de sus propiedades, y no de su composición, este método de control no carece de lógica.

Algunas mediciones físicas son tan precisas y fáciles de ejecutar, que constituyen un medio inestimable de prevenir contratiempos. La densidad, por ejemplo, puede medirse fácilmente (o, mejor dicho, compararse con unas normas) hasta una precisión de una parte por 100.000, utilizando fragmentos diminutos. De este modo, no sólo puede detectarse cualquier tendencia en la composición, sino que, además, puede medirse la homogeneidad del vidrio examinando muchos fragmentos del mismo objeto. La densidad se compara con una norma por el método de flotación o posamiento, en el cual los fragmentos se colocan en un líquido denso, regulado por la adición de elementos, hasta que los fragmentos empiezan a flotar a la temperatura ambiente. Al ser calentados ligeramente, los fragmentos comienzan a hundirse a una temperatura que dependerá de su densidad. La escala de temperaturas puede calibrarse como una escala de densidades. Con este sensible método de verificación, pueden detectarse, a menudo, indicios de posibles problemas mucho antes de que éstos adquieran proporciones tales, que obliguen a rechazar el producto.

En otra prueba cualitativa de análoga sensibilidad se examina, bajo luz polarizada, una sección del objeto acabado. En este método, se corta una sección anular de una botella con una rueda abrasiva, o bien rayándola y luego fracturándola con un hilo caliente. La sección cortada se inmerge en un líquido con el correspondiente índice de refracción, desapareciendo así las asperezas de las superficies fracturadas; si a continuación se coloca entre películas polaroides cruzadas, puede verse el vidrio inhomogéneo en forma de bandas claras y oscuras. Esta prueba puede hacerse también de manera cuantitativa, aunque no con mucha precisión, asignando números a una serie graduada de muestras inhomogéneas.

El personal encargado del control de calidad en la fábrica es el que más directamente interviene en la prevención de problemas en la fabricación del vidrio. Cuando surgen problemas ajenos a su competencia, puede recurrirse a tecnólogos o a expertos de laboratorio de más

experiencia. A menudo, los problemas se refieren a la rotura del vidrio. El diagnóstico de las fracturas por esos expertos es un paso importante hacia la solución de los problemas.

#### Diagnóstico de fracturas

A condición de que puedan examinarse todos los fragmentos de un objeto de vidrio roto, es casi siempre posible encontrar el punto en el cual se originó la fractura. Como también se revela el estado de tensión existente al formarse las fisuras, es posible, asimismo, determinar la causa de la rotura.

Hay tres consideraciones generales por las cuales es relativamente fácil el diagnóstico de fracturas. En primer lugar, la resistencia del vidrio es tal, que la posibilidad de que éste, en presencia de esfuerzos normales, se rompa instantáneamente desde más de un punto es mínima, por no decir despreciable; solamente en presencia de esfuerzos extremadamente altos puede esa posibilidad ser significativa. En segundo lugar, como el vidrio es amorfo a escala microscópica, las características que se manifiestan en una superficie fisurada no pueden deberse más que a los esfuerzos existentes en el vidrio en el momento de producirse la fisura en dicho punto. Y, en tercer lugar, la velocidad de propagación de la fisura está limitada a un valor aproximadamente igual a la tercera parte de la velocidad del sonido en el vidrio. Cuando se alcanza ese límite, el esfuerzo en el extremo de la fisura es sumamente grande.

Considerando en primer término el último de esos puntos, se apreciará que el esfuerzo, en el extremo de una fisura, depende de la longitud de ésta, ya que la totalidad del esfuerzo originariamente soportado por el vidrio a lo largo de la línea de la fisura con anterioridad a la fractura, ha de estar concentrado en el extremo una vez que se ha producido ésta; detrás del extremo, el vidrio está separado por la fisura, y se halla libre de esfuerzos. Por ello, las fisuras tienden a acelerarse a medida que se prolongan. Ahora bien, como la velocidad última es limitada, aunque no así la intensificación del esfuerzo debida al aumento de la longitud, se alcanza una etapa en la que la primera de las consideraciones generales falla. Entonces, pueden producirse fracturas múltiples, ramificándose la fisura en tres o más direcciones. Esta ramificación da a la rotura un dibujo que es característico del tipo de esfuerzos prevaleciente en el momento de la fractura; y la distancia recorrida antes de producirse la ramificación es una medida inversa de la magnitud del esfuerzo con el que se produjo la rotura.

Supóngase, por ejemplo, que una botella cilíndrica, debilitada por una raya profunda practicada en su lado, se somete a una presión interna lo suficientemente alta para hacerla estallar. La presión interna tiende a partir la botella de extremo a extremo. La raya intensifica la tensión localmente, pero puede no estar en una posición exactamente paralela al eje. Por tanto, la primera fisura se inicia a partir de la raya, tanto en sentido ascendente como descendente, y tiende a dirigirse a lo largo del eje tan pronto como rebasa la zona de influencia de la raya desalineada; pero seguidamente la tensión presente en ambos extremos aumenta tanto que la fisura se ramifica arriba y abajo para formar, por así decir, puntas de flecha que señalan al origen. El origen se encontrará, aproximadamente, a mitad de camino entre ellas, quedando señalado por una punta en el lugar donde se inició la realineación. La ramificación primaria puede ir seguida de una secundaria, aunque algunas de las

ramas subsidiarias pueden cesar bruscamente cuando se libera la presión. El dibujo de fragmentación puede también ser complejo a causa de la forma de la botella.

A modo de segundo ejemplo, supóngase que una botella similar, sin presión interna, recibe un golpe de martillo en un costado. La tensión inducida será extremadamente alta y localizada. Las fisuras se ramificarán una y otra vez dentro del área afectada por la contusión del martillo, presentando el aspecto general de múltiples grietas radiales que parten de una sola estrella central. La rotura se hace aun más compleja a causa de la forma de la botella, y de la interferencia de una grieta con otra al encontrarse alrededor de ella.

Reuniendo los fragmentos de una botella rota, suele ser posible reconocer el dibujo de fragmentación, identificar el origen y determinar, así, la causa de la rotura. En los dos ejemplo expuestos, las fuerzas de rotura se aplicaron en el exterior. En el caso de las roturas térmicas, la situación varía bastante, ya que cada termoesfuerzo producirá una tensión equilibradora en otro punto de la botella, y, a medida que se extiende una fisura, la distribución total de tensiones varía en toda la botella. Así, pues, el sistema de fisuración se ajusta inicialmente a un dibujo impuesto, pero acaba por volverse sinuoso en respuesta a la cambiante distribución de tensiones. Puede haber ramificaciones, pero no es probable que sean simétricas alrededor del origen de la fractura, ya que la forma de la botella no es simétrica en torno a ese punto. Además, la velocidad de la fisura suele mantenerse baja, ya que la fisuración libera tensión a medida que avanza y ésta compensa, en parte, la tendencia de la tensión a intensificarse en el extremo de la fisura. El origen de la fractura rara vez se manifiesta con nitidez, por lo que, normalmente, es preciso emplear la segunda consideración general y estudiar las características de la superficie fracturada.

Las señales que quedan en una superficie fracturada contienen un cúmulo de información. La fisura se desarrolla con un borde delantero curvado y convexo en la dirección de avance. Si vacila, por cualquier causa, es casi seguro que la distribución de la tensión habrá variado ligeramente en el intervalo, por lo que, cuando la fisura reinicie su crecimiento, lo hará en una dirección algo diferente, dejando como rastro de esa vacilación una señal curvada indicativa de la dirección de avance. Si, a causa de la forma del producto, o de un momento de torsión que se le hubiere aplicado, hay una tendencia al torsionamiento del plano de la fisura, quedarán unas señales en forma de abanico, que irán ensanohándose en la dirección de avance. Esas señales reflejan las tendencias que compiten entre sí para que la fisura se mantenga en un plano, sin dejar por ello de responder a la torsión. El abanico es también un indicador de dirección.

Si la rotura fue ruidosa, las ondas sonoras habrán viajado hacia atrás y hacia adelante, en el vidrio, durante el crecimiento de la fisura y, en su desarrollo, ésta las habrá registrado en forma de ondulaciones superficiales de pequeño paso. Esas señales, que se pueden ver perfectamente bajo la lupa con una luz de incidencia rasante, indican la dirección en que se propagó la fisura, tal y como lo hacen las señales dejadas por las vacilaciones, a que ya se ha hecho referencia.

Así, pues, en la superficie de fractura de un objeto de vidrio roto, puede observarse cierto número de señales indicadoras de la dirección. Si cada uno de los bordes de los fragmentos se marca con flechas según esas señales, y se reconponen el objeto de vidrio, se verá que la totalidad del sistema de fisuración parte de un solo origen. Este puede no

presentar ninguna característica si la rotura se produjo con una tensión anormalmente baja, pero entonces suele haber una pequeña punta, debido a que, probablemente, la fisura incipiente no estaba bien alineada con la tensión máxima y se hizo necesario un cierto realineamiento. A menudo, sin embargo, el área de origen se distingue claramente, apareciendo como una superficie especular lisa rodeada de señales laminares, que no son otra cosa que señales de vacilaciones centradas en el origen. El examen microscópico suele revelar algún defecto en este punto. Como los fragmentos que calzan entre sí han de presentar señales correspondientes, el examen de los mismos proporciona una confirmación.

A veces, el área especular lisa del origen de una fractura está limitada por una zona "gris", que presenta trazas de un ligero desbaste. Más allá de esa zona, puede encontrarse un área dislocada de la que han saltado fragmentos cortantes. La zona gris constituye un indicio de que la tensión local fue muy intensa y de que hubo una tendencia latente a la ramificación; en efecto, los fragmentos son efectos de ramificación. Si la zona gris se halla cerca del origen verdadero, ello quiere decir que la tensión originariamente aplicada al vidrio fue muy intensa, ya que la pequeñez del área especular es una indicación de que la tensión no pudo ser muy intensa. Esta constituye una fuente de información sobre el estado de la tensión en el momento de producirse la rotura. Ya se han mencionado otras dos, a saber: que la torsión tiende a producir señales en forma de abanico y, cuando es muy intensa, fragmentos; y que las ondas elásticas o de sonido quedan registradas en forma de ondulaciones de una intensidad que refleja la amplitud de aquéllas.

La destreza en el diagnóstico de fracturas es un arma inestimable para la solución inmediata de problemas técnicos; pero la destreza y la confianza sólo se adquieren con la experiencia, que ha de poseerse antes de que surjan los problemas. Afortunadamente, la experimentación es fácil, y el estudio de las fracturas resulta fascinador.

### VIII. VIABILIDAD DE LA FABRICACION DE VIDRIO

En nuestros días, la fabricación automática de vidrio es una industria que requiere mucho capital, y que ha de tener un alto volumen de producción para ser viable. Ahora bien, incluso en las fábricas mejor administradas, se considera normal que la tasa de rechazos alcance aproximadamente un 10%; por lo que, para que sean viables, se requiere un alto grado de pericia, experiencia y "know-how"; la viabilidad puede perderse tan fácilmente por falta de esos requisitos —con la consiguiente incapacidad para obtener la producción proyectada— como por una demanda insuficiente. Una meta de producción de alrededor de un 60% para el primer año, que se aumentará gradualmente hasta alcanzar un 90% en el tercero, se considera razonable y corresponderá, probablemente, al tiempo necesario para penetrar en el mercado; si bien durante ese período se requerirá una cantidad sustancial de capital de explotación.

En los países en desarrollo, el establecimiento de industrias de fabricación de vidrio suele tener por objeto la sustitución de las importaciones, y, por consiguiente, al menos en teoría, la demanda se conoce por las estadísticas de importación. En la práctica, sin embargo, no se conoce el grado de penetración que cabe esperar en el mercado, a menos que la industria vaya a estar protegida por barreras arancelarias, por lo menos durante las primeras fases de desarrollo. Pero esa protección excluye la posibilidad de exportar como medio de ampliar la demanda, ya que, en esos casos, la industria rara vez consigue superar el nivel de producción de sus etapas iniciales, con el resultado de que los precios permanecen altos y la calidad tiende a mantenerse baja. Es muy difícil prever las tendencias del mercado respecto de los tres primeros años, y aun después; cabe, incluso, que la creación misma de la industria influya de manera importante en esas tendencias. Si la industria es verdaderamente viable, convertirá seguramente en realidad los posibles mercados, ya que proporcionará vidrio producido localmente; pero si, en razón de las barreras arancelarias, su viabilidad es sólo aparente, puede tener el efecto contrario, al obligar a los clientes de botellas a adquirir otro tipo de envases, como, por ejemplo, bidones y recipientes de material plástico.

Suele creerse que el problema de la pericia y el "know-how" se resuelve ejecutando el proyecto por el sistema de "llave en mano". Por diversas razones, este sistema entraña un desproporcionado gasto de capital y un alto costo de producción, a causa de los elementos dependientes del capital, como la depreciación y los intereses. Además, incluso con la mejor voluntad del mundo, la administración de una fábrica "llave en mano" sólo puede ofrecer capacitación en fábricas extranjeras bien establecidas, donde rara vez se producen contratiempos; con el resultado de que los enviados a recibir capacitación adquieren una falsa confianza que no les ayudará a resolver los problemas propios de las industrias incipientes, insertas en un medio muy diferente.

Una solución más satisfactoria consiste en invitar a participar en empresas mixtas a fabricantes de vidrio extranjeros que, además, aporten "know-how" de manera permanente. Sin embargo, esos participantes no suelen ser desinteresados, y pueden ejercer influencias que no convengan a los intereses de la industria local. También tenderán, naturalmente, a imponer una tecnología basada en sus prácticas nacionales, con objeto de facilitar la transferencia de información, aun cuando esa tecnología tal vez no sea la más apropiada para el país en desarrollo, lo que podría condenar indefinidamente a la industria local a un papel subordinado.

Cuando el mercado es grande, resulta bastante fácil juzgar la viabilidad de un proyecto de fabricación de vidrio, por lo que no se requerirá sino un estudio superficial. La concepción de una empresa viable exige más estudio, si bien hay cierto margen de libertad para elegir la escala de explotación. Ahora bien, si el mercado es limitado, como suele ocurrir en los países en desarrollo, el estudio de viabilidad resultará más difícil, requiriendo, por lo menos, la concepción preliminar de una empresa viable. Dada la importancia del volumen, y a veces también por razones de prestigio político, hay una tendencia a hacer estimaciones optimistas de tendencias futuras, y aun a incluir productos incompatibles, como son los envases y el vidrio plano, con el fin de "hinchar" el volumen. A menudo, se ha seguido este procedimiento, indiscutiblemente arriesgado, bajo el estímulo de un hecho curioso: que es más fácil obtener un préstamo grande que uno pequeño.

Otro procedimiento, menos espectacular, consiste en crear una empresa más pequeña pero verdaderamente viable, prescindiendo, en caso necesario, de secciones del mercado poco prácticas y, adoptando, si hace falta, tecnología distinta de la tradicional con el fin de optimizar la situación. Una vez que se ha establecido una fábrica viable de vidrio en un país, puede servir de cabeza de puente para una expansión ulterior. Las etapas posteriores podrán irse identificando con mayor certidumbre y a base de un "know-how" nacional. Este procedimiento tiene el inconveniente de que las etapas de planificación exigen mucho más estudio. También es preciso que los planificadores vigilen el proyecto hasta la puesta en marcha, ya que es poco probable que el empresario de una empresa "llave en mano", o un socio extranjero, acepten la tecnología y los procesos establecidos. Salga o no salga adelante el proyecto, se incurrirá en un gasto preliminar: los honorarios del consultor y del personal contratado para ayudarlo en los detalles. Por supuesto que este personal, del que saldrán los futuros directivos, se beneficiará mucho de la experiencia.

Las cifras que se dan en el capítulo I sobre el consumo por habitante sugieren que la sección de la industria que más probabilidades tiene de ser viable, en un país en desarrollo, es la fabricación de envases, por lo que servirá mejor que ninguna otra para ilustrar las tres etapas de gestación de un proyecto:

- a) Estudio de previabilidad destinado a determinar si se justifica la realización de un estudio detallado;
- b) Estudio de viabilidad destinado a determinar el producto y la tecnología más idóneos, estimar la viabilidad del proyecto y establecer las bases de licitación;
- c) Preparación de los pliegos de condiciones. En el caso de pliegos de condiciones para proyectos "llave en mano", lo que se persigue es especificar y precisar la tecnología y estipular los requisitos legales sólo en la medida necesaria para que las propuestas de licitación sean comparables, dejando a los licitantes margen suficiente para recomendar las soluciones que estimen oportunas para la tarea de producir las cantidades especificadas. Cuando no se prevea un proyecto "llave en mano", la tecnología deberá definirse con la precisión necesaria para que puedan solicitarse ofertas respecto de los distintos elementos de equipo o secciones del trabajo. Esto hará necesario planificar provisionalmente la producción, a fin de optimizar el empleo del equipo y la mano de obra.

La comparación de las ofertas de licitación así como la reevaluación del proyecto a la luz de las ofertas en firme que se reciban, no entrañarán más que algunos retoques menores. En cambio, es probable que puedan hacerse considerables economías en costos de capital explotando al máximo las capacidades ya existentes en el país, tarea en la que podría necesitarse una orientación detallada por parte del consultor.

### Escala de explotación

El tamaño del mercado y, por ende, la escala de explotación a considerar, tiene más aspectos que el importante ya mencionado, es decir, el efecto del volumen sobre la absorción de costos fijos. Si el volumen exige varias líneas de producción, ésta puede planificarse de suerte que la carga del horno sea sustancialmente constante; un horno concebido para esta capacidad permitirá fundir en condiciones más económicas. En cambio, si basta una máquina formadora para satisfacer toda la demanda, la eficiencia de fusión será muy inferior cuando se fabrique un objeto de poco peso, y cualquier avería que se produzca parará la producción completamente. Asimismo, cualquiera que sea la escala de explotación, se requerirán muchos elementos de capital, siendo desproporcionadamente alto el costo de los utilizados para pequeñas producciones. Del mismo modo, las necesidades de personal son relativamente más altas cuando se trabaja en pequeña escala. La magnitud de los pedidos individuales es otra consideración importante; una campaña de producción con máquinas automáticas deberá durar lo suficiente para absorber el tiempo invertido en la preparación de las máquinas.

Así, pues, los intentos de reducir la escala de explotación en una fábrica de tipo tradicional han de tener un límite absoluto, que corresponderá a una instalación con un solo horno y dos máquinas. Tanto para la producción de envases de vidrio como para la de vidrio plano, este límite corresponde a una producción anual de unas 10.000 t, o 30 t/d. Con unos consumos anuales por habitante, bastante optimistas, de 10 kg de envases de vidrio y 2 kg de vidrio plano (véase el capítulo I), esas fábricas requerirían poblaciones de uno y cinco millones en que apoyarse.

Si el mercado es mucho más grande, es fácil hacer una evaluación preliminar empleando los métodos corrientes del economista. Este puede partir del supuesto de una tecnología de tipo tradicional, soslayando así en gran parte los detalles tecnológicos. Ahora bien, si la evaluación revela sólo una viabilidad marginal, será preciso que las bases empleadas en los cálculos sean examinadas por un especialista, ya que no se sigue necesariamente que la tecnología utilizada en los países industrializados sea la más apropiada para los países en desarrollo. En fin de cuentas, los orígenes de la industria de fabricación de vidrio fueron modestos, e incluso hoy algunas pequeñas fábricas de botellas pueden competir satisfactoriamente con sus vecinos más grandes prestando especial atención a los costos y a la elección del producto.

Poco es lo que se puede hacer en el caso de la fabricación de vidrio plano; en cambio, en lo que respecta a los envases de vidrio existe la posibilidad de romper con la tradición y, tal vez, concebir una empresa viable donde, a primera vista, pudiera parecer imposible. La evaluación de la viabilidad será entonces tarea compleja: entrañará la optimización de la tecnología en conjunción con el espectro de demanda del mercado.

### Mercado: espectro, tendencias y penetración

Las estadísticas de importación pocas veces precisan el tamaño, la forma y el color de los envases o las cantidades que comprende cada uno de los pedidos. Esa información, el espectro de mercado, es de vital importancia para la producción automática. No sólo es preciso prescindir de los pedidos que sean más pequeños que el mínimo económico, sino que el volumen

total de cada color también ha de ser suficiente para justificar el tiempo de producción perdido -tal vez una semana- por la necesidad de cambiar el color del vidrio en el horno.

Afortunadamente, gran parte de las importaciones de botellas va destinada a un número relativamente reducido de empresas embotelladoras, por lo que esta parte del espectro resulta fácil de determinar. Suele ocurrir que un país que no ha contado nunca con un proveedor nacional importa una variedad de formas y tamaños mayor de la necesaria, por haber tenido el mundo entero en donde elegir. Será preciso, pues, estudiar la posibilidad de introducir cierto grado de normalización y estimar la probable tendencia de la demanda futura.

La demanda de diversos tipos de botellas y jarras pequeñas, así como de vasos y servicios de mesa, que sea compatible con la fábrica proyectada, es más difícil de cuantificar. Las ventas suelen hacerse a través de los agentes de los fabricantes, y el espectro del volumen depende de la eficacia profesional de éstos. En última instancia, la mejor política que se puede adoptar respecto a este sector del mercado, es probablemente tratar de penetrar en él con los medios de que se disponga, y no duplicándolo artículo por artículo; es decir, diseñar productos que sean compatibles con el equipo instalado y abrirse camino compitiendo en el terreno de los precios. Esto ha de tenerse presente cuando se realice el estudio del mercado.

Tal estudio se hará mejor mediante entrevistas que enviando cuestionarios por correo. En las entrevistas personales puede apreciarse de forma inmediata la importancia que merece una opinión o pronóstico, mientras que los cuestionarios, siempre impersonales, pueden ser engañosos. El éxito del estudio depende muchísimo del grado de entusiasmo que despierte el proyecto de fábrica. Los entusiastas verán la posibilidad de reducir los costos mejorando las entregas y reduciendo los inventarios, etc., y sus pronósticos pueden resultar exageradamente optimistas. Los no entusiastas pueden temer que una fábrica local provoque un alza de precios como consecuencia de la protección aduanera.

Dada la importancia que tiene la escala de explotación para el éxito de la empresa, es sumamente importante que los pronósticos sean precisos. Desgraciadamente, son sumamente dudosos, por lo que es preciso estimar esa incertidumbre. Las opiniones del estudio del mercado proporcionan una estimación. El estudio de las tendencias acusadas en el pasado por las importaciones, por caprichosas que sean, ofrece otra. Las tendencias del producto nacional bruto o del ingreso por habitante proporcionan otras. En los países en desarrollo, la tasa de crecimiento del consumo de vidrio suele ser de alrededor de un 10%. Este dato es importante, ya que puede tardarse dos años en ejecutar el proyecto y tres más en consolidarlo. Con esa tasa estimada de crecimiento, ¿deberá diseñarse la fábrica con capacidad suficiente para satisfacer el 160% de la demanda del mercado penetrable en ese momento, corriendo así el riesgo de aumentar la fracción improductiva de capital? ¿O deberá establecerse sobre bases más modestas, fijándose un límite a la producción, cualquiera que sea el crecimiento de la demanda? Se trata de preguntas complejas, y para contestarlas es preciso conocer el volumen máximo y mínimo previsto.

En el caso del vidrio plano, el espectro no es sólo la gama de espesores que se requieren, sino también las calidades necesarias para satisfacer la demanda. Cuando se fabrican espejos y vidrio laminado de seguridad, por ejemplo, hay que poner mayor cuidado en la eliminación de

defectos visuales, burbujas, estrías, ondulaciones, etc. Las calidades superiores se obtienen por selección, y no por designio; por lo cual, a menos que el espectro del mercado coincida con la gama natural de calidades producidas, la disparidad conducirá a una sobreproducción de las calidades inferiores y a una subproducción de las superiores.

Es importante conocer las dimensiones del vidrio rectangular más comúnmente utilizado, ya que los rectángulos han de cortarse económicamente de la banda de vidrio estirada desde la máquina. Obviamente, cuanto más ancha sea la banda estirada tanto mayor será el margen de economía en el corte. En algunas grandes fábricas de vidrio plano, se estiran bandas anchas, se analizan los pedidos de los clientes y se calcula y establece automáticamente el proceso de corte por computadora, a fin de maximizar el vidrio vendible. En las fábricas pequeñas, pocas veces se puede hacer esto, por lo que es importante que la anchura del vidrio estirado (una vez recortados los bordes) sea un múltiplo de las anchuras y longitudes de los tamaños más corrientes. En la práctica, las pérdidas debidas a la operación de corte representan alrededor del 30%.

#### Optimización de la tecnología

Una fábrica de vidrio en un país en desarrollo posee pocas ventajas, por lo cual es preciso sacar el máximo partido de éstas en la competencia con las fábricas de los países industrializados, que cuentan con mayores mercados, personal especializado y "know-how". El costo en fábrica de las botellas importadas es con frecuencia un 20% más alto que el precio c.i.f., debido a los gastos de manipulación portuaria, roturas, etc., pero estos mismos factores hacen que aumente también el costo del equipo de producción importado. El suministro local de arena para vidrio suele considerarse una ventaja importante, ya que la arena constituye alrededor del 70% del peso de la materia prima utilizada, pero sólo alrededor del 10% del costo de ésta, y, si ha de beneficiarse, su costo final puede variar poco del de la arena importada.

El costo de la mano de obra, si se la emplea eficientemente, suele ser más bajo en los países en desarrollo. Las posibilidades de optimización están subordinadas al empleo eficiente de la mano de obra. La utilización de dos personas para hacer el trabajo de una es, sin duda, particularmente antieconómico en la industria del vidrio, donde "demasiados cocineros pueden arruinar el puchero". Es preciso determinar si la capacitación puede ser eficaz y si la dirección puede hacer frente a posibles faltas de cooperación, antes de tratar de reducir los gastos de explotación utilizando más mano de obra y menos capital de lo que sería normal en una fábrica de tipo corriente. Sobre la base escueta de que la explotación del capital cuesta un 30% (10% por depreciación, intereses y mantenimiento, respectivamente), parece ser que pueden invertirse hasta 10.000 dólares en maquinaria para reemplazar a una persona que cuesta, en total, 3.000 dólares anuales, incluida la capacitación. Este argumento, naturalmente, es válido sólo para aquellas tareas repetitivas que pueden ser ejecutadas con una máquina que, trabajando las 24 horas del día, reemplace a 3 ó 4 trabajadores. Pero, si no se utiliza la máquina al máximo, será mucho más ventajoso invertir en el trabajador, que puede realizar cualesquiera otras tareas.

El problema de reemplazar a las personas por máquinas se plantea especialmente con escalas de explotación mínimamente viables. De ordinario, cuando se crea una nueva industria, los sindicatos aceptan la idea y no surgen problemas si se llega a un acuerdo de antemano. A un levitador manual de vidrio, por ejemplo, puede destinársele a aplicar etiquetas de color cuando no se le necesita en la función para la que fue contratado.

La capacidad de maximizar el empleo de la mano de obra hace también posible maximizar la utilización del capital, con lo que se optimizará toda la planta. Considérese, por ejemplo, el caso en el que la demanda de botellas basta sólo para justificar el empleo de una sola máquina, en lugar de las dos que se necesitan para que una fábrica de tipo corriente sea viable. El espectro de las ventas de botellas suele ser algo parecido en la mayoría de los países, tratándose, en su mayor parte, de botellas de tipo normalizado destinadas a refrescos, cerveza, vinos y licores. La mayoría de las botellas pesan entre 300 y 750 g, con pesos mínimo y máximo aproximados de 50 y 1.000 g. Una máquina de hacer botellas de 4 secciones exigiría de 3,6 a 28 t/d de vidrio fundido para ceñirse a los pesos extremos, y un horno diseñado para satisfacer las necesidades máximas estaría funcionando solamente al 13% de su capacidad cuando se fabricasen las botellas más pequeñas. Aparte de la baja eficiencia de fusión, la utilización de este importante componente del capital sería muy baja. Pero supóngase que se excluyen los pesos extremos de la máquina automática. En ese caso, el horno podría diseñarse para producir 24 t/d de vidrio para las botellas de 750 g; si se produjeran botellas de 300 g, lo que exigiría una producción de 14,4 t/d, el horno seguiría trabajando al 60% de su capacidad.

Supóngase, ahora, que el horno está dotado de medios para levantar el vidrio a mano y que las botellas de tamaños extremos se fabrican en máquinas semiautomáticas, cuando lo permite el exceso de capacidad de fusión. En este caso, la utilización del horno podrá aumentarse a casi el 100% de su capacidad en cualquier momento, y las economías que se obtuviesen compensarían, probablemente, la inferior productividad inherente a los métodos de fabricación semiautomáticos, siempre que los equipos de levitadores manuales pudieran emplearse ventajosamente cuando no hicieran falta en el horno.

Hay otras prácticas distintas de las tradicionales que pueden contribuir a hacer viable una empresa pequeña. La electrofusión es el medio más eficiente de fundir vidrio, pero no se usa mucho en los países industrializados, debido al alto costo de la energía eléctrica y al hecho de que su tecnología y "know-how" se han basado en combustibles baratos y en la fusión en gran escala. De hecho, como podrá apreciarse por los datos del capítulo IV, existe un punto de equilibrio entre los hornos eléctricos y los de combustible líquido, que favorece la electrofusión con capacidades de horno inferiores a las 15-30 t/d, según los costos relativos del combustible. En el caso de las empresas pequeñas, la electrofusión puede revelarse más barata, tanto en lo que respecta al costo de inversión como al de mantenimiento, y mucho más adaptable, en cuanto permite cambiar rápidamente los colores y ajustar el insumo de energía al volumen de vidrio requerido. El "know-how" ha de aprenderse en cualquiera de los casos, pero los ingenieros electricistas pueden contratarse con facilidad.

La elección del combustible -energía eléctrica o combustible líquido- suele depender de la confianza que se tenga en los pronósticos de la demanda futura. Los hornos eléctricos son pequeños y de corta vida, no precisan de edificios especiales y, por consiguiente, pueden diseñarse para atender necesidades a un plazo relativamente corto y ampliarse en caso necesario. Los hornos regeneradores de tipo clásico, en cambio, son estructuras grandes que requieren edificios especiales y que no pueden ampliarse fácilmente, salvo al precio de su completa reestructuración. Por lo tanto, uno se ve forzado a optar por un diseño que responda a un pronóstico de la demanda a largo plazo, a subutilizar la instalación a corto plazo y a soportar el costo del capital improductivo, a cambio de un costo de fusión más bajo.

Como se verá, la tarea de montar una empresa viable en una situación extrema es, en gran parte, una cuestión de reducir el costo del capital maximizando su utilización. Cuando se inicia un proyecto importante, hay una tendencia a invertir dinero en cosas que no son absolutamente esenciales, en la creencia de que tal vez no pueda encontrarse el dinero para adquirirlas si se necesitan más tarde, o porque se acepta a ciegas el asesoramiento interesado de algún proveedor de equipo. En algunos países en desarrollo se han construido muchas de estas fábricas "chapadas en oro" que no serán viables hasta que sus propietarios reduzcan el capital a valores realistas, consigan enjugar las pérdidas acumuladas y reconozcan que el valor de la planta está determinado, no por lo que cuesta, sino por lo que produce.

#### Plantilla de una pequeña vidriera

Conviene recordar que la mayor parte de los consejos que dan los libros de texto, sobre gestión y administración de empresas, se refieren a la solución de los problemas que se plantean en las empresas grandes (generalmente, industrias mecánicas), en que las ramificaciones hacen difícil obtener una visión de conjunto. No tiene sentido limitarse a reproducir en miniatura los organigramas de los libros de texto. En el caso de las pequeñas empresas, el personal puede trabajar, esencialmente, como un equipo, sin descripciones de empleo formalizadas y sin la jerarquización y departamentalización que son necesarias en las grandes empresas. El personal ha de estar estructurado como un equipo de fútbol, con extensas áreas de competencia bien entendida, pero con funciones imbricadas y entrelazadas según mejor convenga a la marcha del "partido" en un momento dado. Así, la composición de la plantilla estará determinada por el volumen de trabajo, y no por la necesidad de incluir en ella toda clase de especialistas; los especialistas aprenden pronto a cubrir un campo más amplio que el de su especialización.

De manera muy parecida, los controles administrativos y presupuestarios o los sistemas de fijación de precios se han concebido para atender las necesidades de organizaciones grandes y, frecuentemente, tienen aspectos que no se ajustan a la realidad y que se aceptan sólo porque la magnitud de la escala hace necesaria cierta simplificación arbitraria. Cuando se aplican a organizaciones pequeñas, esos controles pueden no servir más que para complicar las cosas. Acaso no tengan otro valor que hacer posible la presentación de un cuadro mensual de la situación a algún órgano rector. Sin embargo, el Consejo no ejerce control como no sea al nivel de decisión, por lo que esos sistemas no son sistemas de control sino simples registros de la marcha de la empresa, engorrosos y, a menudo, perjudiciales para la moral y el trabajo en equipo.

En las pequeñas organizaciones, el gerente puede hacerse fácilmente una idea de la situación general, y los sistemas de control que se utilicen deberán tener por objeto servir a quienes se hallan realmente en situación de controlar, de suerte que sean los primeros, y no los últimos, en conocer los resultados de la empresa. Cuanto más sencillo sea el indicador de resultados, tanto mejor. Como gran parte de los costos son costos fijos y pueden relacionarse con el rendimiento de los departamentos en función del tiempo, no suele ser difícil hallar unas cifras de rendimiento que sean, a la vez, realistas y significativas para la persona responsable. Esas mismas cifras podrán prepararse luego en forma más apropiada para su presentación al órgano rector.

En los países en desarrollo, el problema del personal no consiste en encontrar personas con formación académica, sino más bien en que, al carecer de experiencia práctica, pueden tender a adaptar la organización a los sistemas que han aprendido en la universidad. Lo que se necesita son directivos que hagan lo contrario: estudiar las necesidades de la organización y hallar el sistema que mejor se adapte a ella, aun cuando parte de su formación académica quede sin aprovechar.

## IX. PERFILES DE COSTOS Y TENDENCIAS DE LA INDUSTRIA DE ENVASES DE VIDRIO

Como ya se dijo en el capítulo I, el precio nominal de las botellas se ha mantenido curiosamente constante desde los días de la producción manual, pese a la enorme merma de valor real sufrida por el dinero. Desgraciadamente, esos tiempos quedaron atrás, pues las posibilidades de absorber los mayores costos de producción han sido explotadas ya en su mayor parte. El hecho de que la industria del vidrio se nutriera primordialmente de materias primas que se daban en la naturaleza era un factor estabilizador, pero hoy día los constituyentes sintetizados, principalmente el carbonato sódico, dominan el costo de fabricación (alrededor del 70% del costo total), el cual, en consecuencia, sigue las tendencias inflacionistas mundiales. El proceso de formación del vidrio está hoy día casi totalmente automatizado, y la eficiencia de fusión ha alcanzado casi el límite máximo con la introducción de refractarios que ofrecen un mejor aislamiento térmico de los hornos, como ya se vio en el capítulo V.

Examinando de diferentes maneras la estructura de los costos de una vidriería, cabe formarse una idea de la probable orientación de las tendencias. Naturalmente, las magnitudes y la distribución de los costos varían de un país a otro y de una fábrica a otra, pero los valores relativos que se dan en los cuadros 15 y 16 se consideran razonables para una fábrica de tamaño mínimo, con un horno que alimenta dos máquinas automáticas y las correspondientes líneas de producción. Para 1976, el costo total del capital podría ser del orden de los 4 millones de dólares y el costo anual medio de explotación de unos 200 dólares por tonelada de vidrio producido (10.000-12.000 t/a); la fuerza de trabajo total podría sumar de 100 a 120 personas; y la energía total requerida para explotar la fábrica -sea electricidad, gas o aceite- podría ser del orden de 7.000 kW.

En el cuadro 15 se indica la distribución relativa del capital junto a la de la energía y la mano de obra porque, en cierta medida, éstas son complementarias y podrían representar otros medios de realizar el mismo trabajo. Cuando los salarios aumentan a mayor ritmo que los costos del equipo, se observa, naturalmente, una tendencia a la automatización para reemplazar la mano de obra, aunque no sea esa la única motivación. Hace algunos años, era corriente emplear los métodos arcaicos de la pala y la carretilla para componer la mezcla, ya que el alto costo de un taller mecánico de composición no podía justificarse, sobre una base departamental, por la mano de obra que podría economizarse. Sin embargo, con el desarrollo de mejores métodos de control de calidad, se comprobó que la mayor precisión obtenida con la planta automática en el pesado y la homogeneidad de la mezcla se traducía en una mejor calidad del producto. En las grandes fábricas, esta operación suele realizarse hoy por medios totalmente automáticos, siendo el propio fundidor el encargado de ponerla en marcha pulsando un botón.

Según se desprende del cuadro, tanto la inspección como la decoración (donde las botellas recuperables son etiquetadas permanentemente, etc.) tienen un contenido de mano de obra relativamente alto. Estas dos actividades pueden ser automatizadas en gran parte, pero, como las máquinas requieren mucho mantenimiento, parte de la mano de obra destinada a esas actividades puede pasar a engrosar el siguiente renglón del cuadro.

Como ilustración de pasadas tendencias, la industria en general, en el Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte, consiguió mantener el costo de la mano de obra en alrededor

de un 33% del costo total de explotación durante el período 1968-1974, pese a haber aumentado el salario medio en un 130%. Esto se logró, principalmente, gracias al aumento de la productividad (las plantillas se redujeron en tan sólo un 10%), debido, sin duda, a una mayor mecanización y a la duplicación del valor de venta de la producción.

Cuadro 15

Distribución de los costos de capital, energía total y  
mano de obra en una vidriera de tamaño mínimo  
(%)

<u>Concepto</u>	<u>Capital</u>	<u>Energía total</u>	<u>Mano de obra</u>
Construcciones e infraestructura	17,50		
Tratamiento de la arena y del calcofn	3,60	4,24	2
Taller de composición	6,71	0,85	4
Horno	13,43	59,19	4
Alimentadores	9,11	6,61	-
Máquinas formadoras	11,99	4,24	8
Recocido	7,19	9,11	4
Inspección y embalaje	0,48	-	18
Decoración	8,39	12,08	12
Taller y mantenimiento	2,88	0,57	15
Laboratorio	1,20	-	6
Abastecimiento de electricidad	4,80	-	5
Gas, aceite y agua	6,71		
Compresor y vacfo	3,60	3,11	4
Transportes y varios	2,40	-	8
Gestión y administración			<u>10</u>
Total	100	100	100

Es probable que cada vez se empleen más las computadoras en la delicada operación de controlar las gotas, en la cual la conservación de la forma y del peso del vidrio puede mejorar la calidad, el rendimiento y la consistencia del producto y acortar el tiempo improductivo de preparación entre trabajos. Es probable, también, que la inspección automática se oriente hacia el extremo de entrada, o caliente, del túnel de recocido, con lo que la retroalimentación de información a la máquina y a la distribuidora se efectuará con mayor rapidez.

En el cuadro 16 se indica la distribución aproximada de los costos de explotación. Para determinar el costo de los intereses, se ha supuesto que el capital social representa un 40% y que el saldo de la inversión se ha obtenido a un interés del 9%. La necesidad de prever un margen suficiente entre el valor comercial y los costos de explotación es evidente, pero no sólo en atención a los dividendos de los accionistas, sino también porque hay que reembolsar el préstamo; hay que disponer de fondos para capital de explotación, a fin de pagar las reservas de materias primas y de productos que aún no lo hubieren sido; hay que contar con una reserva de fondos con que saldar la diferencia entre el valor de las reposiciones y la provisión por depreciación, así como para atender a posibles expansiones o modernizaciones.

Quadro 16

Distribución aproximada de los costos de explotación  
de una vidriería de tamaño mínimo  
(%)

<u>Concepto</u>	<u>Fijos</u>	<u>Variables</u>	<u>Total</u>
Materias primas <sup>a/</sup>	-	24,9	24,9
Otros materiales	-	3,4	3,4
Combustibles	14,4	4,5	18,9
Electricidad	2,0	-	2,0
Mano de obra	12,6	2,0	14,6
Mantenimiento (excluida la mano de obra)	2,2	-	2,2
Transporte	1,3	-	1,3
Depreciación	19,3	-	19,3
Intereses del préstamo	<u>13,4</u>	<u>-</u>	<u>13,4</u>
Total	65,2	34,8	100,0

<sup>a/</sup> Se ha supuesto un país en desarrollo no bien dotado de materias primas.

Cuanto mayor sea la proporción de los costos variables tanto más fácil será controlar y reducir los costos cuando la demanda sea baja, por lo que se preferirá una tecnología que permita lograr tal cosa. En el ejemplo dado, los costos variables representan sólo alrededor de una tercera parte, si bien un contador competente que posea un sistema de contabilidad adaptado a las necesidades de la fábrica podrá descubrir muchos elementos de los costos fijos susceptibles de control, por lo que las divisiones establecidas en el cuadro son un tanto arbitrarias. Con todo, gran parte del costo anual está predeterminada por el diseño inicial de la fábrica, por lo cual debe considerarse atentamente esta fase de toda nueva empresa. Desgraciadamente, en los países en desarrollo, el cliente no está lo suficientemente informado para resistir la presión de los vendedores del proveedor, y puede verse inducido a aceptar equipo complejo que, aun siendo excelente en sí, no se justifica desde el punto de vista de la escala de explotación proyectada.

A veces compensa pasar un elemento de los costos fijos a la columna de costos variables, contratando los servicios fuera de la fábrica. De hecho, se ha manifestado una tendencia de este tipo, en cuanto los hornos suelen ser reconstruidos, hoy, por contratistas exteriores, lo que evita la necesidad de emplear personal de plantilla para la ejecución de este trabajo ocasional, pero vital.

Para ilustrar la influencia que tiene la selección de tecnología, señalaremos que los hornos eléctricos, así como los de combustible líquido auxiliados con electricidad, presentan la ventaja de que el insumo de energía puede adaptarse mejor a la demanda de vidrio. En el caso de los hornos eléctricos, el insumo de energía es aproximadamente un 50% inferior (lo que hace que las condiciones de trabajo sean mucho más agradables), pero, como este "combustible" es cinco veces más caro que el aceite, es preciso evaluar las demás ventajas de la fusión con electricidad. Por ejemplo, la prevención de la contaminación atmosférica, de incalculable valor, es objeto de creciente atención y, en algunos países, puede hacerse obligatoria,

particularmente en lo relativo a los vidrios de fluoruro o plomo. Asimismo, como en los hornos eléctricos, que son mucho más pequeños, el restablecimiento de las condiciones de fusión y el paso de un color a otro pueden realizarse con rapidez, el número de días productivos por año es un 10% más alto; de este modo, los costos fijos de toda la fábrica quedan reducidos al 90%, lo que representa una sustancial ventaja económica. Por otra parte, el costo de construcción es inferior, y resulta mucho más favorable el factor de utilización (la relación entre la demanda media y máxima de energía en un momento dado), en el que suele basarse la tarifa. De esta manera se reduce el gasto total de la fábrica en energía. En muchos países, las tarifas eléctricas son fijadas por el gobierno; unas veces sale beneficiado el usuario industrial, otras el particular. Incluso cuando no se produce energía hidroeléctrica, los costos de la empresa abastecedora de electricidad no están determinados exclusivamente por el costo del combustible, por lo cual el aumento gradual de los precios del petróleo tiende a reducir las diferencias entre los costos de la electricidad y del aceite empleados para la fusión del vidrio. Si se estima que el abastecimiento público es demasiado caro, cabe considerar la conveniencia de producir la electricidad privadamente, lo que podrá hacerse por unos 3 centavos/kWh (contra unos 0,62 centavos/kWh que cuesta el aceite). Esa tarifa puede ser inferior a la aplicada por una empresa pública, ya que no habrá que pagar el costo de la distribución, que es un componente caro del presupuesto de esas empresas.

Para reducir el costo de la partida "otros materiales" y el de la manutención, tanto en la fábrica como en el local del cliente, se ha tendido a emplear nuevos métodos de embalaje. El costo de hacer llegar intacto el frágil producto a manos del usuario final, no es despreciable. La práctica anterior de embalar los servicios de mesa con paja en toneles recuperables consumía mucha mano de obra en el punto de partida y en el de llegada, era un tanto desordenado, y estaba sujeto a las ordenanzas sanitarias. El mayor costo de las cajas de cartón especialmente diseñadas puede cargarse, a menudo, al cliente cuando este tipo de embalaje le reporta alguna ventaja. Además, las cajas de cartón pueden servir también para otros fines, como ofrecer un método conveniente de almacenamiento al mayorista, constituir un medio atractivo de exhibición en el comercio y simplificar la envoltura de los objetos vendidos directamente al público. En el caso de las botellas y del vidrio plano, la función del embalaje consiste, primordialmente, en reducir al mínimo las roturas debidas a la manutención, ya que estos productos reciben, de alguna manera, un segundo tratamiento antes de llegar a manos del cliente final. A veces, un embotellador suministrará sus propias cajas de cartón o jaulas y las volverá a utilizar para la entrega de su producto embotellado.

Parece ser que la etiqueta "¡Vidrio: trátese con cuidado!" no tiene otro efecto que sugerir a la persona que manipula el envase que éste ha sido concebido para soportar una manipulación abusiva; por consiguiente, lo que no hace es manipular el envase con cuidado. En cambio, el envase recibirá cuidado cuando es evidente que lo requiere. Así, los objetos grandes y frágiles de vidrio suelen ir mejor protegidos cuando se encajonan en jaulas, que permiten ver la índole del contenido. Del mismo modo, las bandejas con unas 500 botellas, protegidas nada más que por una lámina de plástico termocontraído que las mantiene juntas, son tratadas con el cuidado que obviamente requieren. Cuando el producto puede transportarse en camión desde la fábrica hasta el domicilio del cliente, este método de embalaje suele ser el preferido y es cada vez más utilizado.

Puede utilizarse un procedimiento análogo para transportar vidrio plano. Dada su naturaleza, el producto puede embalarse con una alta densidad, es decir, con una relación baja entre el material de embalaje y el producto. Sin embargo, aún pueden realizarse considerables economías de material, diseñando el envase de suerte que ofrezca apoyo y resistencia a las fuerzas que se estime haya de soportar, en lugar de emplear una caja "acorazada". Hay muchos productos nuevos, como la pellicula de plástico con amortiguamiento por aire, tableros compuestos, etc., que dan mayor libertad al diseñador y pueden aliviar la situación en un país en que escasee la madera para los embalajes de jaula.

También se ha tendido a fabricar botellas menos pesadas. En general, la resistencia mecánica de un envase de vidrio está determinada por la resistencia de su sección más delgada; así, cuando la resistencia es el único factor que hay que tener en cuenta, las secciones más gruesas representan un derroche de vidrio. Por consiguiente, existe la posibilidad de reducir el peso del producto controlando mejor la distribución de su espesor. Por otra parte, las botellas de poco peso pueden fabricarse más de prisa en las máquinas formadoras, con lo que se obtendrán economías, no sólo en materias primas y combustible, sino también en todos los gastos fijos que se acumulan en función del tiempo. Uno de los inconvenientes de las botellas de poco espesor es que las que resultan dañadas superficialmente en servicio no pueden ser utilizadas de nuevo por el embotellador, es decir, no son recuperables. Ahora bien, el enorme crecimiento de los supermercados, en los que la devolución de las botellas vacías es de todas formas casi imposible, ha creado la necesidad de envases llamativos no recuperables que entrenen un derroche mínimo de vidrio.

Las botellas más delgadas se refuerzan, a menudo, aplicándoles un revestimiento invisible de óxido de estaño o una pellicula orgánica (o ambas protecciones) para reducir al mínimo los daños por rozadura. Cuando son nuevas, tienen una duración extraordinariamente larga. El óxido de estaño se forma in situ cuando las botellas pasan por el túnel de recocido, con lo que parece aumentar su resistencia intrínseca. La pellicula orgánica, que se aplica a las botellas enfriadas en la sección final del horno, tiene el efecto de lubricar cualquier contacto frotador entre las botellas, de suerte que no resulten rayadas tan fácilmente.

La práctica de emplear botellas no recuperables en lugar de las que se utilizan de 30 a 40 veces antes de ser desechadas ha dado lugar, naturalmente, a problemas relacionados con la contaminación del medio ambiente por los desechos. Se ha intentado, muchas veces, devolver esos desechos en forma de calcoín a las vidrierías, para su refundición. La dificultad está en el costo. Como puede verse en el cuadro 16, el valor potencial del calcoín, utilizado como sustituto de materias primas, representa alrededor del 25% del costo de fabricación, por lo cual podría decirse que una botella rota sigue valiendo, por ejemplo, 20% de su precio de compra. Más eso sólo sería cierto si el calcoín pudiera devolverse, sin contaminar y reducido a una grava fluyente, al horno en que se fundió la primera vez. Este tipo de recirculación se practica, naturalmente, dentro de la propia fábrica. Pero el calcoín, en este caso, suele estar limpio, y el único costo adicional es el imputable a las operaciones de triturado y manipulación. Cada vez que se vuelve a fundir el calcoín, suele sufrir cierta contaminación por el hierro y cierta pérdida de volátiles, por lo que se registra una progresiva degradación de la calidad, degradación que será leve si la proporción de calcoín no es alta.

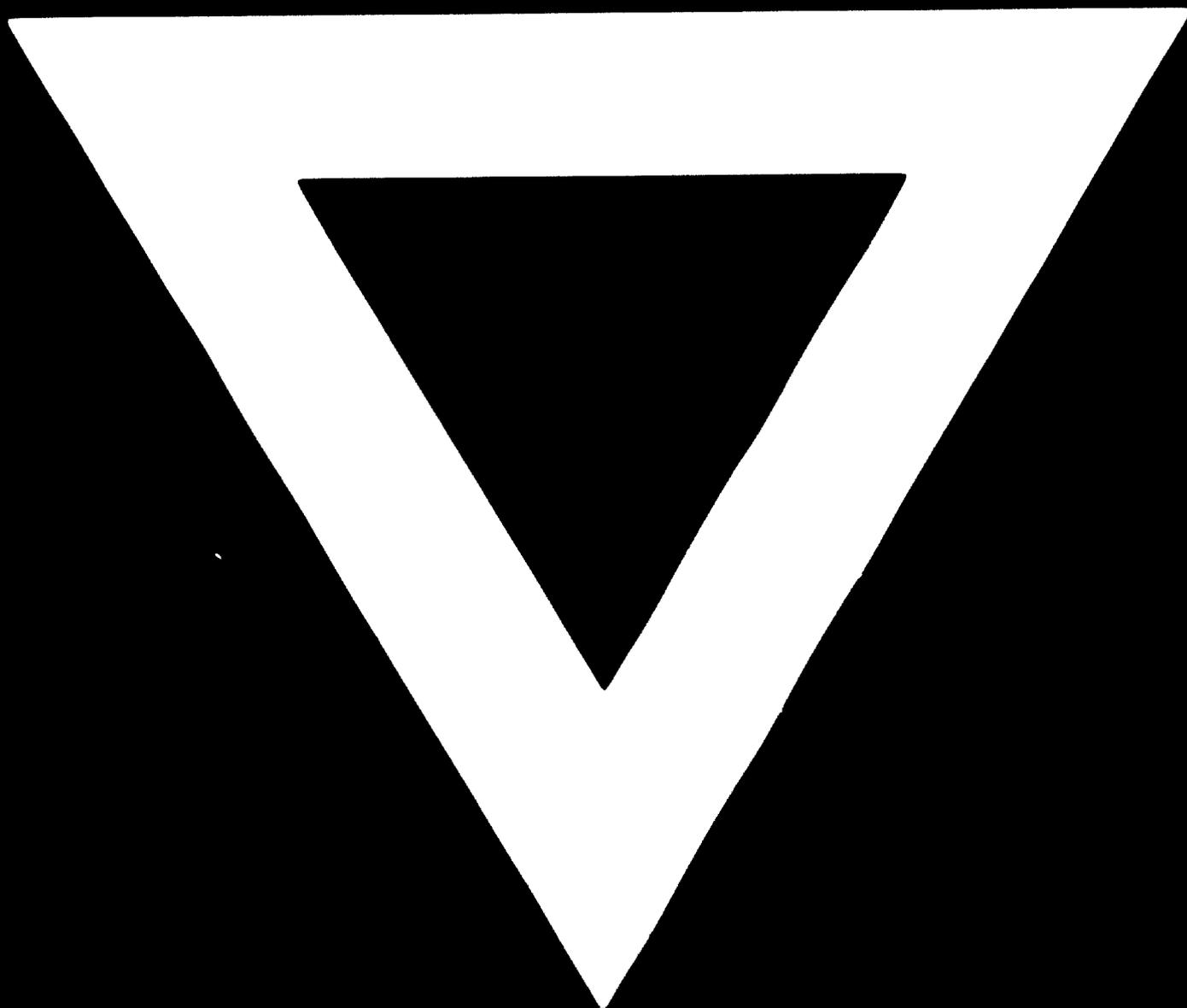
Normalmente, en una planta de embotellar, es posible separar a poco costo el vidrio roto, según los fabricantes y los colores, pero el costo adicional de transporte, eliminación de etiquetas y separación de las cápsulas metálicas no puede evitarse. El calcín transportado a la fábrica desde el exterior se conoce por calcín "ajeno" y ha de utilizarse con cautela, porque puede ser de una composición tan diferente que trastorne los procesos de fusión y formación.

El costo real de recuperar el vidrio de desecho del consumo doméstico es prohibitivo, aunque, en algunas colectividades, la recogida del vidrio por voluntarios no retribuidos oculta una parte de ese costo. La tarea es comparable a la que realizan los servicios postales; con las actuales tarifas postales, resultaría más barato usar botellas nuevas. La única solución práctica parece ser la de utilizar los actuales sistemas de recogida de desperdicios, e incentivar a los trabajadores para que la operación sea rentable. A juzgar por el cuadro 3, una ciudad de 100.000 habitantes tendría que recoger, lavar y separar unas 10 toneladas de vidrio roto de diversos colores, sacándolas de entre unas 1.000 toneladas de desperdicios de toda clase. Por otra parte, la separación por colores constituye un problema formidable. Puede utilizarse calcín de distintos colores para fabricar bloques aislantes y revestimientos para tubos de vidrio celular, o para la elaboración de hormigón y la construcción de carreteras, pero no hay que olvidar que el vidrio de desecho es también muy útil para consolidar los vertederos de basuras y protegerlos contra la erosión por el viento y el agua. El vidrio desechado puede tener un aspecto desagradable al principio, pero termina por convertirse en una "arena" de naturaleza no muy diferente de aquella con que se fabricó.

Printed in America  
70-487 - June 1970-200

ED/105

**C-677**



**78.11.15**