

# Defectos Frecuentes del Vidrio. Definición, Clasificación y Caracterización

Gabriel Adrián Borsella

HYALOS. Tecnología de Desarrollo y Proceso en Materiales Vitreos - [tecnologiadelvidrio@yahoo.com.ar](mailto:tecnologiadelvidrio@yahoo.com.ar)  
Vicepresidente de ADIETEC Asociación de Innovadores y Emprendedores Tecnológicos - [adietec@yahoo.com.ar](mailto:adietec@yahoo.com.ar)

Tema expuesto en la conferencia brindada durante las Jornadas del Vidrio del 2008, en la sede de ATAC.  
(El desarrollo completo en DVD puede consultarse o adquirirse en la Biblioteca de ATAC)

## Resumen

El presente trabajo forma parte de un programa de enseñanza de Hialurgia como ciencia aplicada, desarrollado por el autor. Dentro de tal contexto, la sistematización de un temario en extremo múltiple y complejo como implica el conocimiento de los fenómenos físicos y químicos que intervienen en los diversos procesos de fabricación de vidrios y sus manufacturas debe por fuerza respetar una linealidad coherente, tomando como fundamento esencial la naturaleza particular del estado vítreo de la materia. Por otro lado, tanto o más importante resulta la experiencia práctica no sólo a nivel de experimentación, sino llevada a escala industrial, donde la cantidad de factores intervinientes se multiplican y exceden por mucho los límites de un laboratorio de análisis. Cuestiones como la Calidad, el consumo Energético, la selección de Materias Primas y los Procesos más adecuados tanto para la elaboración, los costos, el impacto ambiental y la funcionalidad de los productos - entre otros temas de similar importancia - hacen, en definitiva, a la finalidad concreta de este desarrollo.

Como presentación de este programa, el crítico tema de los Defectos en la fabricación de vidrios, tratando de enfocarlo desde un punto de observación independiente de los procesos y las características distintivas de cada material, resulta un parámetro importante para la dinámica de tratamiento de la Hialurgia, en su pretensión de aunar dentro de lo posible la ciencia básica con la tecnología aplicada a la industria.

Palabras clave: Estado vítreo, Isotropía, Inhomogeneidad, Reología, Proceso continuo, GMP.

## Abstract

*The present work is part of a learning programme of Hialurgia as applied science, developed by the author. Within this context, the systematization of an agenda extremely multiple and complex as implies the knowledge of chemical and physical phenomena that are involved in the diverse glass fabrication processes and it's manufacturing must respect by force a consistent linearity, taking as an essential basis fundament the particular nature of the glassy state of matter. On the other hand, as much or more important is the practical experience not only at the experimentation level, but carried on an industrial scale where the number of factors involved are multiplied and exceed by far the limits of an analytical laboratory. Issues such as quality, energy consumption, the selection of raw materials and processes more appropriate for the design, cost, environmental impact and functionality of products -among other issues of similar importance- do, ultimately, the specific purpose of this development.*

*As a presentation of this program, the critical issue of defects in the glass manufacture, trying to approach it from an independent point of observation of the processes and the distinctive characteristics of each material, is an important parameter for the dynamic treatment of Hialurgia, in its attempt to join, as far as possible, the basic science with the technology applied to the industry.*

Keywords: State vitreous, Isotropic, Inhomogeneities, Rheology, Continuous process, GMP (Good Manufacturing Practice).

## Introducción

El concepto de "defecto del vidrio" resulta tan abstracto como la propia definición del material al que hace referencia. Aún hoy existen diversidad de criterios como para cohibir pronunciarse de manera categórica acerca de la naturaleza de esta clase de materiales (desde "sólidos amorfos" hasta "líquidos extraordinariamente viscosos", pasando por considerandos múltiples entre ambos extremos, con mayor o menor rigor científico). No será aquí donde se pretenda salvar las diferencias y arribar a una solución definitiva. Lo que sí se dirá, de una vez, es que se está hablando particularmente de silicatos en estado vítreo. Desde este parámetro perfectamente elucidado de estado de agregación específico es donde se puede, por igual, considerar "defecto del vidrio" a todo aquello que interrumpa la isotropía del sistema material aislado. Es decir, todo lo que constituya una separación de fases o superficie de discontinuidad, creando así una heterogeneidad definida o, la mayor parte de las veces, una inhomogeneidad gradual. En cualquier caso lo que cambia en la matriz vítrea son las propiedades intensivas de acuerdo al punto que se analice.

Por tanto, se puede considerar "defecto de un vidrio", desde este enfoque, a cualquier discontinuidad no deseada detectable por medios físicos, químicos u ópticos del material en estudio, tomando

como "ensayo en blanco" a un vidrio patrón de características claramente especificadas.

No obstante, esta definición peca de parcial en cuanto a sus implicaciones prácticas a escala industrial. Cuando en la industria del vidrio se habla de defectos, estos guardan una decidida connotación cualitativa en relación al producto elaborado. Por tanto, a los efectos del desarrollo de este trabajo, se trasladará la definición del párrafo precedente a un sistema material mayor y dinámico: esto es, el propio proceso de fabricación, desde la formulación hasta las etapas finales de segunda elaboración y almacenamiento.

## Definición

Defecto del vidrio: Alteración accidental de cualquier parte del proceso de fabricación con consecuencias negativas en la calidad, los costos, los tiempos y el prestigio de la Empresa.

En efecto, dentro de la linealidad que implica todo proceso, constituye un error muy extendido en la industria en general el acusar recibo de la existencia de un defecto recién cuando se hace observable en la fase final, a partir del conformado del artículo. Es evidente que los distintos y sofisticados equipos de inspección, sumado a la capital importancia del Control de Calidad y servicio de Asistencia al Cliente, son claves a la hora de la detección de las irregularidades de orden

morfológico, y, en segundo término, ciertos aspectos relacionados con la funcionalidad del material en relación al producto, como ser determinados ensayos de resistencias térmicas, mecánicas, químicas, presión interna, etc. Sin embargo, como se desprenderá del presente trabajo, tales irregularidades pueden gestarse a partir de la prístina formulación teórica, la selección de materias primas, la composición y calidad de mezcla, la humedad de la misma, el aporte de casco reciclado, la combustión, la fusión, afinado y acondicionamiento, la velocidad de extracción y el nivel de cuba, los puntos críticos de viscosidad en cada etapa del proceso, el procedimiento de conformado, el tratamiento térmico, los recubrimientos de archa, el sistema de embalaje, la segunda elaboración, el transporte, el almacenamiento, hasta la misma funcionalidad tanto del vidrio como del artículo para lo que fue programado en la formulación inicial.

Con todos estos factores se genera el círculo de producción que, conforme a las GMP o buenas prácticas de manufactura, debe permanecer estable, con tácita mejora continua de la Calidad.

Se reconocen tres grados de peligrosidad en orden decreciente:

- Clase 1: Muy críticos.
- Clase 2: Averías principales
- Clase 3: Baja Calidad.

En tanto los últimos no constituyen amenaza de accidente para el usuario, son generalmente discriminados como de segunda o tercera calidad y suponen un desmedro del valor para la venta, los de Clase 1 y 2 son descartados entre el sector de Revisación y el control de calidad sistemático, sin trascender la línea de producción.

Por todo esto es que los defectos, como norma, pueden ser corregidos y pueden ser eliminados, pero ante todo, DEBEN SER EVITADOS. En consecuencia, para reducir el riesgo de aparición de defectos al mínimo, y aislar con máxima seguridad el estado del proceso donde se ha originado alguno para su inmediata corrección o eliminación, se establecerá a continuación una clasificación de los mismos sujeta a estos fines.

**Clasificación**

Los defectos del vidrio se clasifican en primer término como:

- 1) Morfológicos
- 2) Funcionales
- 3) Inhomogeneidades

Los defectos morfológicos o de forma, atañen exclusivamente al artículo y se subdividen en:

- Deformaciones
- Superficiales
- Distributivos

Los defectos funcionales guardan relación directa con dos aspectos interdependientes como son las Especificaciones de Producto y el Proceso de Fabricación. Así es como en ambos casos tienen importancia crítica:

- Propiedades Físicas
- Propiedades Químicas
- Reología

En tanto, los defectos de homogeneidad refieren a:

- Inhomogeneidades Químicas
- Inhomogeneidades Térmicas
- Inhomogeneidades Físicas

Estructurada así la clasificación básica se procederá al desarrollo de cada uno de los Ítems en cuestión.

**Caracterización**

**Defectos morfológicos**

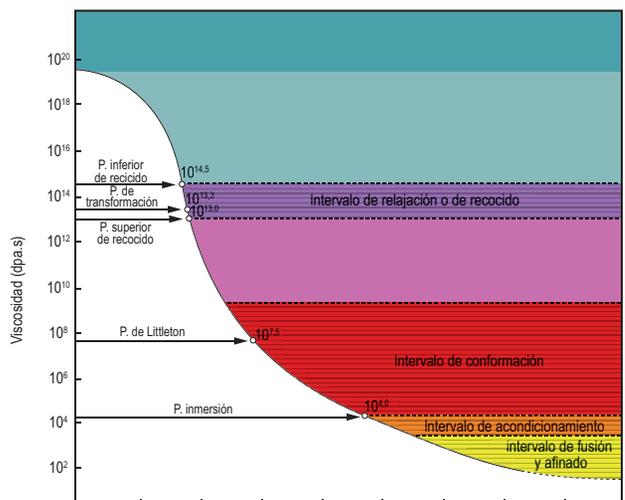
El ámbito de control de los aspectos morfológicos suele ser el más ríspido y diversificado de la empresa, como es el departamento de Calidad y todos los sectores relacionados como Revisación, Producción, Automáticos, Moldería, Programación, Diseño, Cambio de Artículo y Asistencia al Cliente. El objeto principal en todos los casos es que los artículos cumplan dimensional, espacial, superficial y distributivamente los cánones del Diseño, el Aspecto y la Funcionalidad pautados con el cliente.

El control permanente de cada línea de Producción impone la necesidad de todo tipo de calibres fijos, de altura, diámetro, espesores, verticalidad, planitud, etc. entre defectos clasificados individualmente con nombres usualmente asociados a lo cotidiano, tales como amarrelado, columpio, anginas, cuerda, manchón, costura, alabeo, nódulo, entre muchos otros de acuerdo al ramo de la industria.

**Deformaciones**

Son los más notorios y, particularmente, los más críticos para los sectores de Revisación y Control de Calidad, fase final de la producción de la primera elaboración de los artículos de vidrio. Podría parecer que esta clase de defectos de forma son aquellos en donde la naturaleza del material guarda menor incidencia. De hecho, los defectos morfológicos prescinden del propio vidrio. Si el artículo, producto o manufactura que fuere se ajusta a los cánones del plano, espesores, planitud, longitud, diámetros o la perfecta correspondencia con la moldería, rodillos, baño de flotado, etc. de acuerdo al tipo de proceso que se ejecuta, esta clase de defectos no discrimina entre plásticos, metales, cerámicos u otros, en tanto no existan deformaciones dimensionales, espaciales ni de conformado. No obstante, el origen de estas anomalías no es otra cosa que la importancia excluyente de la curva de viscosidad en relación a los tiempos térmicos de cada fase del estado vítreo. Entonces, conforme a ello, es fundamental aquí la formulación y el perfecto conocimiento de las propiedades plásticas del vidrio durante el enfriamiento hasta lo que se denomina "temperatura de molde" que, en la teoría, corresponde a una viscosidad de 107 dPa. Por debajo de esta temperatura el vidrio adquiere una rigidez que impide cualquier desfaje de forma, dimensional o espacial.

Se observa, pues, que una de las causas más frecuentes de los defectos de esta índole - si bien son usualmente controlables con ajustes de temperatura y tiempo de conformado- no responden tanto al sector de producción como al inicio mismo de la Investigación y Desarrollo aplicada al proceso.



Curva de Viscosidad en función de la Temperatura con algunos puntos fijos relevantes en el proceso de elaboración de vidrio

## Superficie

La tensión superficial es acaso uno de los factores físicos más determinantes en la elaboración de vidrio. Tiene influencia crítica durante la fusión, el afinado y el acondicionamiento, generando fases de fundido de propiedades muy distintas tanto físicas como químicas, dependiendo inclusive de la incidencia redox de la atmósfera de horno. La fase superior actúa favoreciendo la homogeneización y el desprendimiento de burbujas, tanto por promover las corrientes de convección interfacial como por su carácter fuertemente tensioactivo. Asimismo, su importancia es crucial en los procesos de soplado, moldeado, colado, flotado, laminado, estirado y fibrado. El vidrio es uno de los materiales de mayor tensión superficial en relación a su viscosidad, lo cual permite, por ejemplo, obtener esferas perfectamente simétricas de gran diámetro, sólo por acción natural de la misma.

Ahora bien, todos estos atributos, cuando no guardan concordancia ni con el proceso en su conjunto, ni con la funcionalidad de los productos que se fabrican pueden resultar altamente peligrosos.

Los defectos de superficie pueden tener su origen desde el propio inicio de la fusión hasta la salida de boca, sea cual fuere el proceso de conformado. Por su particularidad intrínseca, la tensión superficial es responsable de escamados, rugosidades, lágrimas, nódulos, cuerdas y estrías que no se corrigen por temperatura.

También, la tensión superficial puede afectar determinados tratamientos como la adherencia de estaño, tanto en artículos huecos (tratamiento en caliente, para reforzar la resistencia mecánica) como en vidrio plano (proceso Float, espejos, etc.), el ácido oléico o sucedáneos (tratamiento en frío, para evitar rayaduras por roce en el archa), la decoración, el esmaltado, etc., que requieren de una perfecta compatibilidad entre el vidrio y cada uno de estos materiales (temperaturas, pre-recocido, tiempo de exposición, espesor del recubrimiento, grado de vitrificación, hasta condiciones redox de atmósfera de horno inhibidoras del estañado del vidrio flotado). En ocasiones ocurre la lamentable sumatoria de varios de estos problemas en una misma producción.

Nuevamente, se hace primordial la necesidad de no desconocer las características relativas al material que se elabora como así tampoco la de aquellos otros que entran en contacto con él a lo largo de todo el proceso de fabricación, hasta las propiedades funcionales requeridas para el uso, comenzando por los refractarios de cuba en contacto con el fundido.

La razón por la cual los defectos de superficie se alistan entre los morfológicos es que en todos los casos son mensurables en unidades de longitud aunque (en el caso de los recubrimientos) las magnitudes sean nanométricas.

## Distribución

Bien conocidos son, en la industria del vidrio en general, los defectos de distribución de masa. A diferencia de los morfológicos, este tipo de alteraciones no conllevan una discordancia con el modelo del artículo en cuanto a sus dimensiones espaciales exteriores de conformado, y aquí sí se hace evidente la naturaleza vítrea del material. En todos los casos, los problemas de distribución (espesores, fondos, ondulaciones, alabeos, púas, columpios, etc.) se producen fuera del horno, entre el intervalo de la curva de viscosidad que va desde Log 3 a Log 6, siendo más graves los de temperaturas más elevadas. La velocidad de extracción es, por mucho, la principal responsable de la mala distribución del vidrio fundido.

En este punto, vale remarcar algo que es elemental y no puede soslayarse: La curva de viscosidad de un vidrio determinado es un proceso reversible y fijo. Esto significa que, mientras no se altere la composición química del material, tanto la velocidad de enfriamiento como la de calentamiento son invariables e independientes del calor entregado. Obviamente, a mayor temperatura de horno, mayor cantidad de mezcla vitrificable se fundirá en menos tiempo, pero a partir de allí cada punto de temperatura correspondiente a los diversos estadios de la viscosidad permanece fijo en el proceso natural de cada vidrio en particular.

Por ello, una extracción demasiado rápida en relación a los tiempos de enfriamiento del material no sólo afectará la distribución de masa de los productos, sino muchas otras propiedades térmicas, mecánicas y químicas.

La relación "Extracción-Viscosidad-Proceso" debe ser ajustada con rigor matemático.

Otro problema que afecta a la distribución, aunque en mucha menor medida, es la segregación por diferencias de densidad que ocasionalmente pueden aparecer en las cubas de fusión, y más aún, en los crisoles. No obstante, puede tomarse como una inhomogeneidad, por lo que este caso se discutirá más adelante.

## Defectos funcionales

La funcionalidad es la sumatoria de propiedades físicas, químicas y reológicas que determina la caracterología del vidrio en relación al uso que han de tener los artículos elaborados con él -conforme la Especificaciones Técnicas de los mismos-, así como el tipo de proceso de fabricación necesario para llevarlas a cabo.

Se hace la distinción entre defectos de orden físico, que comprenden las diversas resistencias mecánicas, térmicas, acústicas, eléctricas, magnéticas, la dilatación, propiedades ópticas, conductividad calorífica, densidad, tensión superficial, etc., de los de origen químico, en donde la composición define todas las propiedades, y las reológicas, determinadas por la curva de viscosidad (de carácter fisicoquímico) que es la regla la dinámica del proceso, como ya se ha señalado.

## Propiedades físicas

Entre las causas físicas que pueden dar lugar a la aparición de defectos, sea en el proceso como en la utilidad de los productos, se encuentran las propiedades mecánicas, las térmicas y la ópticas. Estas propiedades son las que definen la idoneidad de un cierto tipo de vidrio en relación a la utilidad del artículo, al tiempo que restringe las modalidades de trabajo.

Existen diversas especies de vidrio para múltiple variedad de artículos. Un vidrio de borosilicato termorresistente tipo "Pyrex ®" requiere una temperatura de fusión y afinado mucho más elevada que un silicato sódico-cálcico corriente y, por ende, varían la combustión (debe realizarse con oxígeno), los refractarios del horno y su diseño, que deben tolerar esas condiciones, y el tratamiento térmico de relajación de tensiones. Para usos similares existe también el tipo "Vycor ®", cuyo altísimo porcentaje de sílice (96 %) se obtiene en un proceso que involucra la fusión con bórax, la separación de fases, el ataque ácido y la sinterización superior a los 900 °C.

Un vidrio plano estirado para aberturas tiene una formulación, proceso, extracción y embalaje totalmente distinto del vidrio flotado, donde las condiciones de elaboración son muy estrictas, a pesar de tener ambos la misma utilidad.

En la industria del vidrio hueco es común referirse a los tiempos de enfriamiento como "largos" o "dulces" y "cortos" o "secos". Esta distinción no sólo se ajusta al trabajo de conformado (en el primer caso, aptos para soplado y modelado; en el segundo para prensado rápido), sino que determina, entre otras cosas, la mayor o menor fragilidad térmica y mecánica, la microdureza, las propiedades acústicas, etc.

La calidad óptica de un vidrio es determinante casi siempre. La transparencia, el brillo y el color son cualidades fundamentales de los vidrios en general. El índice de refracción, la reflexión y la dispersión por sí solos deciden, por ejemplo, que un llamado "cristal" sea empleado en artículos artísticos suntuarios o en oftalmología. Asimismo, el perfecto afinado en cualquier caso, se vale de procedimientos térmico-mecánicos, crisoles y tiempos de fusión altamente variables. Más críticos resultan estos mismos factores en la fabricación de fibra óptica, donde se suman la anelasticidad, el coeficiente de dilatación y la resistencia a la tracción. Defectos ópticos pueden aparecer mucho tiempo después de fabricado el artículo: la solarización amarilla del arsénico, rosa del selenio y violeta del

manganeso, y el ennegrecimiento secular del cristal al plomo por reducción del óxido a partículas metálicas.

La absorción de calor varía con el color. Así, un vidrio verde oliva requiere de una cuba de fusión no mayor a los 60 cm. de profundidad en los grandes hornos continuos industriales, en tanto un incoloro duplica ese nivel de cuba sin inconvenientes.

La presencia de óxidos conductores (aún incoloros) favorece la fusión por inducción eléctrica al tiempo que debilitan la acción aislante del vidrio final.

Las tensiones físicas deben ser eliminadas por tratamientos térmicos adecuados a la velocidad de enfriamiento de cada vidrio, ajustando el tiempo de recocido al espesor máximo de las piezas producidas. Las enojosas "calcinaduras" o microfisuras causadas por contacto con objetos fríos durante el conformado son probablemente el más nocivo de los defectos de la industria del vidrio, dado que, por lo general, se advierten una vez que se ha liberado la tensión, produciendo la fractura.

En resumen, no es difícil deducir si los defectos físicos son desviaciones accidentales y, entonces, actuar en consecuencia, o si son producto de una incompatibilidad entre la formulación, el conformado y la utilidad del artículo fabricado, para lo que deberá revisarse el proceso desde su punto de partida.

Los controles rutinarios de implicancia física son la medición de densidad, resistencia al choque térmico, medida de la presión interna, detección anisotrópica por luz polarizada, coeficiente de dilatación lineal o Expansion, medida del Color por método C.I.E. y diversas experiencias de fractura, tracción o compresión, para determinar distintas resistencias mecánicas.

**Propiedades químicas**

Una fábrica de vidrio empieza por la formulación química del material a elaborarse. Los innumerables anhídridos, óxidos, sales y halógenos que intervienen en las complejas redes y estructuras de los materiales vítreos, los puntos eutécticos de fusión, la incidencia de pequeñas fluctuaciones ponderales, hacen a la esencia de todo el estudio, investigación, desarrollo, planificación y control de proceso que luego deberá adecuarse en análisis de mercado, infraestructura, combustión, mano de obra y maquinarias.

Un vidrio es un complejo sistema material donde confluyen libremente todo tipo de compuestos químicos, complejos, polarizaciones iónicas, disoluciones, sobresaturaciones, coexistencia de dos o más estados de oxidación para un mismo elemento, entre muchas otras particularidades imposibles de desarrollarse o estabilizarse en otro tipo de soluciones líquidas. Ante tal complejidad, los investigadores han uniformado su criterio en cuanto a las sucesivas transformaciones de los componentes iniciales y su interrelación a temperaturas determinadas, dando lugar a la determinación fundamentalmente de cambios de fase y formación de eutécticos que experimenta durante el proceso de fusión, hasta el acondicionamiento térmico posterior al afinado. En base a lo anterior, es prioritario conocer y respetar la velocidad de reacción en su conjunto, determinando lo que se conoce como extracción.

La dinámica de la extracción depende de tres factores esenciales: la necesidad calorífica de la masa vitrificable, las temperaturas teóricas mínimas requeridas para completar exitosamente todas las reacciones químicas y físicas, y los tiempos de conformado. De aquí que se evidencie la importancia de mantener una velocidad de extracción acorde a estas exigencias naturales. Una extracción alta potenciará la aparición de infundidos y oclusiones gaseosas, mientras un tiempo demasiado prolongado de residencia en el horno dará lugar a devitrificaciones, evaporación de componentes, segregación de fases vítreas, coloraciones indeseables, etc.

Entre los defectos funcionales de raíz química, sin dudas la mayor razón de los mismos es el balance ácido-base del fundido. Un vidrio de bario es fuertemente básico; en consecuencia, atacará los componentes ácidos y anfóteros del refractario en contacto, como la sílice y la alúmina. Luego, el artículo se manchará con facilidad con humedad atmosférica y dióxido de carbono, constituyéndose un

ácido hipotético muy débil. Un Opal de fluoruro no puede fundirse en una cuba de electrofundido convencional, dada su corrosión fuertemente ácida. Por lo mismo, la resistencia química de estos vidrios, como los de fosfato, son altísimas ante los agentes atmosféricos y ácidos de cualquier índole, pero extremadamente sensible a las lejías, alcohol, amoníaco e hidróxidos.

La cesión de álcalis debe ser nula en los vidrios para medicinales, denominados "neutros" por su adecuado equilibrio ácido-base. Un envase de bebidas alcohólicas no debe ceder metales pesados en medio acético. Los artículos de uso en laboratorios son de borosilicato, o de alta sílice, lo cual retarda - ya que no impide- la aparición de manchas opacas tanto por acción de ácidos y álcalis fuertes.

La medida de la Resistencia Hidrolítica divide a los distintos vidrios en cinco clases de acuerdo a ensayos con solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 0,02 N de concentración o de HCl al 0,01 N en ml por gramo de vidrio. Estos ensayos se realizan en autoclave a presión constante y puede determinarse la RH en vidrio molido o por ataque a la superficie interna, de agua a 121°C durante 30 minutos o una hora, conforme las normas atendidas. La resistencia al ataque por Acido Clorhídrico establece igualmente cuatro clases de vidrios, mientras la resistencia alcalina los divide en tres. En muchos casos se apela a tratamientos desalcalinizadores de intercambio iónico para extraer el sodio de la superficie, o bien, en el caso de los vidrios planos de exteriores, a revestimientos orgánicos de vida útil limitada.

En cuanto a los defectos de producción, generalmente están relacionados con el desgaste de material refractario y suele aparecer en forma de cuerdas, nódulos, devitrificaciones e infundidos.

Como se expuso anteriormente, la fase superior del fundido, enriquecida en tensoactivos como el sulfato, provoca una abrasión mayor a la altura del nivel de la cuba que puede observarse con claridad en los hornos al final de una campaña. Si bien aquí, la fuerte tensión superficial juega un rol primordial, el carácter ácido de la misma influye muchísimo en esta interacción química entre ambos materiales. Gran parte de los defectos de naturaleza química, pues, surgen de una errónea formulación y un desconocimiento de la calidad y composición de los refractarios utilizados en la construcción del horno.

En otro orden, no menos importante es el rol que juega la combustión y la consecuente atmósfera de horno en las reacciones químicas que se desarrollan. El estado rédox de los gases de combustión y aquellos que se desprenden de la masa fundida los vuelve extraordinariamente reactivos, siendo muchas veces indeseables. Ya se hizo referencia a la marcada diferencia de la acción de la tensión superficial en estado oxidante y en estado reductor. Tanto o más crucial es esta variable en la compleja etapa de afinado o eliminación de burbujas residuales. Aunque, sin dudas, la mayor incidencia -fundamental para el proceso- la ejerce en la coloración y decoloración por reacción directa de intercambio electrónico con los óxidos cromóforos de metales de transición y no metales de más de una valencia. Baste un solo ejemplo, muy conocido: Un vidrio corriente de silicato sodocálcico de solamente 0,070 % de contenido de Hierro, como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, y 0,20 % de SO<sub>3</sub> es incoloro en atmósfera muy oxidante, verde aguamarina en atmósfera neutra y ambarino en medio reductor. Por tanto, la mayor parte de los defectos de coloración hay que buscarlos por el lado de la combustión. Incluso se forman botones de silicio o aluminio metálicos, cuyo grado de peligrosidad responden a la clase 1 debido a las fuertes tensiones que desarrollan a su alrededor, luego de un tiempo de exposición a gases reductores. Con todo, vidrios coloreados como los amarillos, rubies, violetas, turquesas o negros, no pueden desarrollar sus cromóforos por otro medio, como ser, por caso, electrofusión, ya que, aunque no forme parte concreta del fundido, la interacción de los gases de combustión es capital para este proceso.

Es de señalar que, precisamente, gran parte de la dificultad en la obtención de vidrios de colores regulares y estables, se debe a la falta de un estricto control de la atmósfera de horno. El análisis de gases debe ser de práctica sistemática y constante, puesto que mínimas desviaciones en porcentajes de oxígeno o monóxido de carbono pueden dar por tierra con toda una producción.

En relación con lo antedicho, la evacuación de gases, el mantenimiento de los regeneradores y el tiraje de la chimenea es otra de las cosas que deben suscitar atención constante. Muchas veces, hasta la presión atmosférica trae alteraciones. De todos modos, aquí se trata ya de un factor físico y no químico, cuya eventualidad es casi imposible de solucionar y menos aún, prevenir. Un recurso muy sencillo y efectivo de regularizar el afinado es el conteo estadístico de bullones y burbujas, por onza de vidrio, estableciendo parámetros cualitativos de acuerdo al producto.

Si bien se tratará con más detalle en el apartado sobre inhomogeneidades químicas, el tema de las inclusiones sólidas conocidas como "devitrificaciones" se deriva de las propiedades químicas de los compuestos que conforman el vidrio y las reacciones que tienen lugar cuando se mantiene el fundido un tiempo prolongado a una temperatura crítica, que demarca ni más ni menos el límite exacto entre la estructura molecular vítrea y la cristalización. Este punto, bien conocido como *Liquidus*, corresponde al Log 2,5 de la curva de viscosidad y señala la temperatura máxima de equilibrio entre la fase cristalina predominante y la fase líquida según el tipo de vidrio. La aparición de estos defectos, así como contaminaciones de refractarios, metales, burbujas de sulfato, cromita, etc. pertenecen a la clase más peligrosa y ese descarte no puede retornar al horno. Son muy frecuentes luego de largas campañas de trabajo, por el desgaste propio de los materiales, o por mala calidad de los mismos.

La selección, control y análisis de Materias Primas con especificaciones técnicas definidas, la supervisión experta en la elección de los materiales de construcción del horno y su ubicación en el mismo, la mezcla y grado de humectación de la composición (para evitar volaje o segregaciones), y el permanente contralor de la formulación teórica del vidrio con los análisis químicos de este, junto a las novedades de producción son la mejor forma de mantener dentro de cauces acotados la estabilidad y la calidad fijadas como parámetro.

### Propiedades reológicas

Se ha remarcado ya que la curva de viscosidad define el estado vítreo de una sustancia. La viscosidad es la medida del rozamiento interno de las moléculas de un fluido. En los gases es prácticamente nula, en tanto que en los líquidos, a pesar de su movilidad, es notoria y mensurable. Se sabe que el aceite es más viscoso que el agua, independientemente de ser menos denso que ella. Tanto en el caso de los gases como los líquidos es una variable física que depende de la naturaleza de la sustancia y se expresa en Pascal por segundo ( $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

El comportamiento característico de los cambios de estado en la mayor parte de las sustancias inorgánicas no descomponibles por calor es fijo y definido en condiciones estables. Las sustancias capaces de vitrificar, por el contrario, no reconoce cambios de fase sino en un amplio margen de temperatura, razón por la cual, al no cristalizar como los demás materiales, no pueden ser definidos como sólidos ni como líquidos reales. Sólo son definibles los puntos fijos de viscosidad a diversas temperaturas. Un ejemplo servirá para ilustrar esta propiedad: la viscosidad de un vidrio a temperatura ambiente es varios órdenes de magnitud superior a los metales en idénticas condiciones externas. Y aún así, su estructura molecular sigue siendo propiamente la de un líquido subenfriado.

En consecuencia, el dominio de cada punto crítico de la curva de viscosidad es indispensable para la fusión, afinado, acondicionamiento, extracción, conformado, recocido o templado (según la funcionalidad requerida al artículo) de cualquier tipo de vidrio que se vaya a elaborar. Esto, a su vez, dictamina la mecánica y los tiempos de cada fase del proceso.

Como, además, el vidrio fundido es un mal conductor del calor, en una misma cuba se tienen simultáneamente innumerables fases con viscosidad propia, interactuando entre sí. Cada fase, al enfriarse, genera tensiones mecánicas muy altas de orden térmico que originan el estallido espontáneo o la fractura, forzando la necesidad del tratamiento de relajación y unificación de tensiones, conocido como recocido o revenido de archa. Esta característica es aprove-

chada en el llamado templado, que a diferencia del recocido, consiste en el enfriamiento uniforme y rápido de las superficies internas y externas, originando una suerte de encamisado de fuerza que aumenta la resistencia mecánica varias veces. Es el caso de los parabrisas que, al romperse, liberan sus tensiones internas originando pequeños y regulares fragmentos, y más aún en vidrios antibala o cierta vajilla para horno de vidrio sódico-cálcico corriente sometida a este tratamiento.

Volviendo a la importancia de la viscosidad, hay que decir que su medición práctica es muy complicada. Cada punto crítico requiere un método distinto, entre los que se destacan el *Softening Point* o punto de Littleton (Log 7,6) y el punto de Transformación (Log 13). Generalmente la curva de relación viscosidad-temperatura se obtiene teóricamente mediante las ecuaciones de Vogel-Fulcher-Tammann, o de Lakatos, que pueden consultarse en bibliografía especializada. Actualmente, existen gran cantidad de programas de base de cálculos desarrollados por Investigadores independientes o Tecnólogos de los principales grupos multinacionales del rubro. A los efectos de mayor certidumbre, lo recomendable es el método de los tres puntos, muy extendido, donde se determinan experimentalmente tres puntos alejados entre sí y, luego, por algunas de las ecuaciones antedichas se trasladan los resultados a la gráfica.

De lo que se trata, cuando se opera una modificación química en una formulación cuyo objetivo es ajustar los tiempos termodinámicos del conformado, es de alterar la curva de viscosidad. Esta surge como consecuencia directa de la interacción aditiva de las propiedades físicas de cada compuesto utilizado. Evidentemente, esta circunstancia matemática facilita mucho las cosas a nivel teórico, lo que no implica descuidar el resto de los aspectos técnicos relativos al conocimiento cabal de la acción química de cada sustancia participante del conjunto.

En definitiva, los defectos reológicos del vidrio son, en cierto modo, indirectos, dado que las propiedades del estado vítreo son inherentes a su curva de viscosidad, desde la fusión hasta el enfriamiento.

### Inhomogeneidades

Cualquiera sea la característica del defecto, al tratarse de un material isotropo como el vidrio, no deja de ser una discontinuidad de fase. Más aún cuando, conforme al criterio adoptado para el presente desarrollo, el sistema material considerado es todo el proceso de fabricación. Es decir que todo defecto es una inhomogeneidad. La diferencia entre esta denominación y una heterogeneidad es la ausencia de límites precisos. Se ha visto que la naturaleza del vidrio es de transiciones graduales, más allá de los puntos fijados convencionalmente con arreglo a resultados prácticos a lo largo de la curva de viscosidad. Dentro del mismo foco, entonces, se hablará de Inhomogeneidad, refiriéndose a discontinuidades generales, sean de orden Químico, Físico o Térmico. También se aclara este último punto: la discriminación de las inhomogeneidades térmicas del resto de las inhomogeneidades físicas se debe a la multiplicidad de factores que engloba por sí sola la primera, para las peculiaridades de este estado de transición continua del grupo de materiales en estudio.



Vista bajo luz polarizada de un artículo de vidrio defectuoso:

- 1- Deformación
- 2- Inhomogeneidad física
- 3- Superficie irregular
- 4- Composición infundida
- 5- Cuerda térmica
- 6- Inclusiones gaseosas
- 7- Mala distribución interna: pared delgada
- 8- Cuerda química
- 9- Vidrio pegado: Púas
- 10- Devitrificación o piedra refractaria.

**Inhomogeneidades químicas**

Una devitrificación o cristalización, es, justamente lo opuesto a la estructura molecular desordenada del estado vítreo. Como tal, su aparición obedece al proceso termodinámico inverso a la fusión. Cuando en algún punto de la cuba el fundido permanece lo suficiente a esta temperatura o inferiores, aunque de baja viscosidad todavía para permitir el proceso de nucleación de las moléculas, el simple contacto de una superficie de discontinuidad (como puede ser un desprendimiento de material refractario infusible) obra de germen de la cristalización de compuestos sustraídos del propio vidrio. La mayor parte de las inclusiones sólidas o "piedras" tienen esta característica particular y su composición química depende de infinidad de factores. Sin embargo, mediante la observación de estos infundidos en microscopio polarizador puede determinarse perfectamente su naturaleza y detectar el sector del horno donde se produce, o, al menos, su causa. Desde ya, es el más acabado ejemplo de discontinuidad de la isotropía vítrea y, en la mayoría de los casos, no afectan sólo la estética del artículo, sino que supone un riesgo altísimo de rotura, por las tensiones que la rodean. La bibliografía sobre estos compuestos y su clasificación e identificación es muy amplia, por lo que no se abundará demasiado en este tema. Sólo añadir que los relativamente recientes vidrios cerámicos surgieron del aprovechamiento beneficioso de los mecanismos de devitrificación. Desarrollando metódica y controladamente distintos tipos de devitrificación, aún imperceptibles a la vista, las redes cristalinas refuerzan enormemente la resistencia mecánica y térmica, como la malla metálica del vidrio armado, pero a nivel molecular. La cohesión que se logra ha permitido obtener varillas que de un extremo están atrapadas en hielo mientras por el otro son sometidas a la llama de un soplete, sin romperse.

Otro ejemplo, más cercano, de desvitrificación controlada la constituyen los vidrios Opales. Según se trate de vidrios de fluoruro, de fosfato o de zircón, como ejemplos ilustrativos, las causas de la opacidad difieren: en el caso del opal de fluoruro las inhomogeneidades uniformemente esparcidas en la matriz vítrea es una mezcla de cristales de fluoruro de calcio segregado durante el acondicionamiento térmico, por inmiscibilidad de este compuesto en vidrios con alto contenido de alúmina, y microgotitas de fluosilicato. El inconveniente que plantea este tipo de opacificación (al margen de sus efectos ambientales), es que a medida que se desarrollan y multiplican los cristales de fluoruro, se desprende el fluosilicato con mayor rapidez. Generalmente, al final de la extracción, el vidrio se ha transparentado al punto de no ser aprovechable. Los opales de fosfato, en tanto, si bien registran por difracción de rayos X presencia de compuestos segregados, como apatito o metafosfato de calcio, deben su carácter óptico a la formación de gotitas de fases separadas. Aquí, es crítica la etapa de conformado y el tratamiento de archa, al tiempo de evitar la nucleación y crecimiento de cristales grandes durante el acondicionamiento, produciendo a la par un desigual desarrollo de la opacificación y el empobrecimiento de las excelentes propiedades térmicas de estos vidrios. Finalmente, los vidrios opacificados por Zircón, óxido de Cerio o similares, son de empleo más sencillo, aunque menos efectivo que los anteriores. Aquí, la segregación se produce por inmiscibilidad luego de fundir el vidrio a elevadas temperaturas para permitir la disolución total del óxido, para que cristalice inmediatamente después, al llegar la temperatura a Log 2,5 o superior. El elevado índice de refracción de estos compuestos promueve una opacificación satisfactoria y homogénea. No obstante el porcentaje de su empleo es mínimo, dadas las fuertes tensiones que introducen en el vidrio; algo que no ocurre en los otros casos.

Los vidrios que contienen altas cantidades de álcalis o cationes de radio atómico elevado como el Bario y el Plomo, bajan tanto su temperatura de *Líquidus* que no devitrifican. De igual modo actúa el Magnesio en el vidrio plano, flotado o estirado, puesto que para el conformado de la lámina uniforme del espesor deseado debe retar-

darse la velocidad de extracción a una temperatura en la que un vidrio similar, pero para artículos de menaje, devitrificaría irremediablemente. Esta es la causa por la que el casco o calcín de vidrio plano es incompatible con la formulación de un vidrio para envases, cuyo conformado mecánico, sea soplado o prensado, requiere de otra viscosidad, y viceversa.

Como se ha manifestado en el apartado sobre propiedades químicas, hay otro tipo de inclusiones sólidas y gaseosas. Entre las primeras se hallan desprendimientos de material refractario cuyo origen se determina asimismo en el microscopio. Luego, por supuesto, contaminaciones externas como metales, cerámicos, canto rodado, etc. que pueden entrar en la mezcla vitrificable a través del casco de reciclado externo, la arena deficientemente tratada o simple negligencia. Otras inclusiones sólidas nocivas son por mala combustión (botones metálicos) o fusión deficiente (vidrio "crudo"). Incluso ciertos óxidos difícilmente fusibles incorporados adrede como el Circón, el Rutilo o la Cromita, tanto más si la granulometría de los mismos no es uniformemente impalpable.

Las inclusiones gaseosas pueden tener causas químicas o físicas. En el primer caso responden a un mal afinado, a reabsorción de gases de la atmósfera de horno o a introducción accidental de sustancias descomponibles en las fases finales de la extracción. Nunca el afinado es completo. Al contrario, la cantidad de gases que disuelve el vidrio durante el acondicionamiento es la causa por la cual, cuando un vidrio sin bullones se vuelve a fundir hasta temperatura de gota (Log 3) se infecta de ellos, dado que a baja temperatura se libera gran parte de esos gases. El análisis de gases de burbujas implica una destreza manual especial, puesto que hay que reblandecer el vidrio mediante soplete y formar una boquilla delgada que contiene el gas ocluido, para luego sumergirlo y liberarlo dentro de reactivos específicos. Más sofisticada y costosa resulta la cromatografía gaseosa.

Otro tipo de inhomogeneidad química es la que se da en vidrios de bases muy densas, por segregación de fases, como los flint de plomo o los crown de bario. Se observan principalmente en los espesores gruesos, como ondulaciones muy marcadas en el seno de la masa vítrea. Aquí, los responsables son el tiempo de acondicionamiento y la falta de pericia en la toma de la "posta", como se da en llamar a la porción de fundido que se retira para su conformado por soplado con caña, modelado artesanal, o prensado.

Las inclusiones vítreas son por demás conocidas. Las cuerdas, nódulos y estrías son fases de fundido de viscosidad mayor, tanto por falta de homogeneidad durante la fusión, como por estar enriquecidas en algún componente por mezcla defectuosa en el sector de composición. Se puede identificar la naturaleza de una cuerda de este tipo por satinado con ácido fluorhídrico o fluoruro de amonio con ácido clorhídrico. También hay métodos ópticos interferométricos para medir la desviación lumínica que produce. La medida de la inhomogeneidad y su caracterización se efectúa por observación transversal de un corte del artículo a 45°, inmerso en un líquido orgánico de índice de refracción similar al vidrio en estudio, por medio de un microscopio dotado de cuña de cuarzo con nícoles cruzados, o lámina de yeso, con lo que se mide el retardo en grados y se transforma en PSI o unidades de tensión. Este método reconoce sólo las tensiones de carácter químico y sirve para diferenciarlas de las cuerdas térmicas que se tratarán a continuación.

**Inhomogeneidades Térmicas**

El estado vítreo es por naturaleza térmicamente inhomogéneo. A tal punto es así, que constituye, junto a la viscosidad, una característica propia pasible de definir tal estado.

Un vidrio que se deja enfriar naturalmente desde su estado plástico, cualquiera sea su composición química, está sometido a tensiones de tracción y compresión tan violentas que la menor incidencia de contacto externo provoca su estallido o fractura. Esto significa que, cuando se habla de la isotropía como distintiva del estado vítreo, se come-

te el mismo error conceptual que llamar "cristal" a cierto tipo de vidrios finos. La realidad es diametralmente opuesta: Así como un cristal presenta una ordenación molecular regular, repitiendo la celda básica ilimitadamente contra el desorden estructural de un sólido amorfo o un líquido subenfriado, un vidrio que no ha tenido un tratamiento térmico diferenciado de relajación de tensiones luego de alcanzar su rigidez se halla entre las sustancias más anisótropas existentes.

En consecuencia catalogar de defectos a estas inhomogeneidades no es técnicamente correcto. Obviamente, para que tenga sentido elaborar artículos de vidrio, es indispensable modificar artificialmente su tiempo de enfriamiento: bien extendiéndolo y sosteniéndolo en casi dos órdenes de magnitud dentro de un pequeño rango apenas superior al punto de transformación (el recocido de archa), bien acelerándolo por enfriamiento brusco y parejo mediante aire comprimido incidente en su superficie (templado). Entonces, la inhomogeneidad térmica no es un defecto propio del vidrio, sino específico del proceso de fabricación.

Sólo al uniformar las tensiones en la masa el material se vuelve isótropo, tal se lo define por regla general.

Sin embargo, dicha uniformidad debe comenzar a buscarse desde el inicio de la fusión. Para ello es fundamental la acción de las corrientes de convección interfacial que tienen lugar tanto por diferencias de temperaturas entre los extremos de la cuba, como por la acción (que ya se ha descrito) de la tensión superficial en la miscibilidad entre las fases. Siempre es positivo que esta diferencia térmica esté bien definida, dado que, a las viscosidades mínimas en que se halla el vidrio en esta etapa, el movimiento ascendente de las capas más calientes y el descendente de las más frías genera torbellinos en el seno del fundido que no solo homogeneiza al material térmica, sino química y físicamente, a la par que favorece la desgasificación masiva antes de llegar a la etapa de afinado.

En los crisoles u hornos circulares el fundido se halla mucho más estático, precisamente por la ausencia definida de este delta de temperatura, por lo que es forzosa la agitación mecánica con maderas húmedas, espátulas refractarias o brazos metálicos refrigerados internamente.

Dentro del mismo ítem, el gradiente térmico es igualmente importante. Al tratar las propiedades físicas, se tocó este punto. Aquí es limitante el nivel de la cuba en relación a la merma creciente de temperatura de acuerdo a los cationes metálicos absorbentes de la radiación presente y su concentración.

La conductividad calorífica a distintas temperaturas incide drásticamente no solo en la homogeneidad del fundido, sino en sus propiedades físicas finales, atento a la funcionalidad del producto elaborado. Hay que decir, además, que las tensiones jamás se eliminan totalmente y, muchas veces, sin incidencia directa de factores externos, algunos artículos de vidrio se rompen de manera espontánea luego de muchos años. El calor, la luz y la humedad van lentamente descubriendo canales donde no parecía haberlos hasta que la tensión contenida se libera en fractura.

Tanto el poder calorífico como la conductividad son parámetros a tener en cuenta para calcular las calorías mínimas necesarias para fundir un vidrio determinado y para predecir el transcurso del proceso y las propiedades finales del material. La presencia de óxidos metálicos y alcalinos es siempre favorable en este sentido. En caso de pretender un vidrio aislante, estas sustancias deberán ser reducidas al mínimo indispensable.

El control de tensiones se realiza en la misma línea de producción, al final del archa, mediante la observación del artículo bajo luz polarizada. En tanto, la medida de las mismas se lleva a cabo en Laboratorio de Calidad, midiendo el ángulo de extinción del retardo con microscopio polarizante. La diferencia entre tensiones de orden térmico y las expuestas anteriormente, de carácter químico, es que las últimas permanecen cuando se compensa el índice de refracción por inmersión en un líquido adecuado, en tanto las primeras desaparecen.

Las tensiones pueden ser de tracción o de compresión. El analista debe observar la probeta transversalmente en un ángulo de 45°,

pero debe tener muy en claro cada cual, dado que en el ángulo inverso, los colores se intercambian. Bajo placa de color las tensiones de tracción son azules cuando son leves, evolucionando a colores verdosos y blancos de acuerdo a su peligrosidad. Las tensiones de compresión son amarillas a rojo violeta. Si una tensión de tracción es externa, delgada, extensa y brillante, el artículo debe descartarse inmediatamente pues el riesgo de rotura es altísimo. Por el contrario, si características similares se presentan como compresión, el artículo será más resistente que aquellos que no presentan tensión alguna, pero de todas formas, es un defecto de tratamiento que debe corregirse.

El estudio de las tensiones es, desde luego, mucho más complejo, existiendo varios órdenes de magnitud en estos colores de interferencia que pueden dar lugar a equivocaciones graves. Los mismos principios ópticos se aplican cuando se observa un infundido sólido en estas condiciones.

El tratamiento de recocido viene determinado por la curva de viscosidad entre el intervalo que va desde Log 13 a Log 14,5, y el periodo depende del espesor máximo de la pieza. Un error frecuente en muchas industrias es trabajar en el mismo archa, simultáneamente, artículos de tamaños y espesores muy disímiles.

En aquellos artículos que deberán ser sometidos a segunda elaboración de recubrimiento (decorado, esmaltado, espejado, etc.) no es conveniente la eliminación total de las tensiones, dado que al ser sometidos a nuevos tratamientos térmicos de mayores temperaturas puede sobrevenir la aparición de sobre tensiones que ya no podrán ser eliminadas.

El contacto con refractarios fríos, próximos a las bocas de extracción, genera las cuerdas térmicas superficiales. Las mismas son visibles y constituyen un problema recurrente en todas las industrias de vidrio. Rige para ellas lo mismo que las detectadas por polarimetría. En la toma con caña de conformado artesanal tienen lugar en los *Fore bays* del horno, o canales de extracción, y responden a una diferencia de fases de distinta temperatura. Como la fase superior está en contacto con el exterior debe mantenerse a temperatura de gota por calor adicional. El objeto es uniformar las temperaturas del vidrio que fluye por el puente, a ras del piso, con el resto que pierde calor propio aceleradamente. Esto nunca se logra del todo, con lo que la práctica y la pericia del artesano busca evitar esta superficie límite interfacial. Estas cuerdas no son peligrosas, pero alteran indudablemente la calidad óptica del artículo.

### Inhomogeneidades físicas

Entre las inhomogeneidades físicas más frecuentes se hallan aquellas relacionadas con divergencias en la dilatación lineal de un solo vidrio, entre dos vidrios soldados, encamisados, o el proceso conocido como "colate", constituido por tres capas de vidrio concéntricas. Si bien los vidrios son los materiales con menor dilatación lineal, esta no deja de ser crítica para la funcionalidad de los productos elaborados. El coeficiente de dilatación lineal determina, entre otras cosas, las resistencias térmicas y mecánicas. En un artículo perfectamente elaborado en todos los aspectos del proceso, la fragilidad del mismo viene determinada por esta magnitud: cuanto mayor sea este valor, tanto más frágil será el material. Los vidrios más resistentes son los de sílice fundida, con una dilatación lineal casi nula. Los más vulnerables son aquellos que contienen gran cantidad de modificadores de red en su estructura vítrea que, por regla general, funden a bajas temperaturas. Dos vidrios de distinto coeficiente de dilatación lineal no se sueldan entre sí.

El coeficiente de dilatación lineal depende exclusivamente de la formulación y su medición se realiza aprovechando justamente esta propiedad del vidrio de sílice, ya que la probeta del vidrio en estudio, con forma de varilla alargada de dimensiones fijas se suelda una varilla similar de sílice vítrea. Se coloca dentro del equipo, lla-

mado dilatómetro diferencial y se calientan a razón de 5° C por minuto hasta alcanzar la temperatura de reblandecimiento. Entonces una varilla palpadora activa el micrómetro que da el valor, al que hay que descontarle el blanco de la sílice. La inhomogeneidad en la dilatación lineal produce tensiones de masa, que provocan problemas similares a anteriores expuestas y pueden medirse del mismo modo. Las microfisuras o "calcinaduras" es un defecto concreto de diferencias de dilatación lineal entre el vidrio y el objeto caliente en contacto (molde, tijera, pinza, etc.)

Nuevamente, las distintas fases del fundido, resultan inhomogeneidades. Existen inclusiones gaseosas provocadas por tracción de presión negativa, cuando una gran masa de vidrio se enfría bruscamente. De igual forma, los bullones pequeños (picado) y grandes (blisters), obedecen a razones contrapuestas y nada tienen que ver con el afinado. En el primer caso surgen espontáneamente cuando el canal de acondicionamiento baja sensiblemente su temperatura, y estos gases, antes disueltos, se separan. El segundo caso es lo que se conoce como "rebullido" y se originan ante un incremento brusco de temperatura en el mismo canal. Ambos son problemas de solubilidad, por lo que deben caracterizarse con precisión para tomar la medida acertada al pretender corregir el problema y no acentuarlo.

La inhomogeneidad en la densidad se da con mayor frecuencia por causas físicas antes que químicas. Ya no se trata de segregación de componentes pesados de los livianos, sino de una distribución irregular de la red vítrea. Esto también origina tensiones. En dos vidrios de idéntica composición química y propiedades, aquel que ha sido recocido satisfactoriamente habrá agrupado más homogéneamente sus moléculas que otro sin tratamiento térmico. Como resultado, el primero es más denso que el segundo, siendo, como se aclaró, químicamente iguales. Un programa de recocido adecuado a una mufia eléctrica elimina esta aparente contradicción. Antes de iniciar la medición estadística de la densidad, como parámetro más preciso de seguimiento de fluctuaciones del proceso, han de someterse las probetas de los distintos vidrios a controlar al mismo programa Standard de recocido en Laboratorio, permitiendo entonces la correcta interpretación de las variaciones eventuales.

**Resumen**

El mayor defecto de la industria del vidrio en general es, precisamente, el concepto de defecto del vidrio. Cuando se conoce el conjunto de la dinámica del proceso en todos sus puntos, no solo se eliminan los defectos, sino que se inhibe su aparición. Dicho conocimiento da lugar a perfeccionar los procedimientos y ganar prestigio para la Empresa, y simultáneamente, lo que en principio puede aparecer como nocivo, termina originando nuevas tecnologías y productos, cuando se lo utiliza deliberadamente. El proceso de elaboración de vidrio es una unidad lineal en donde cada factor interviniente debe conocerse y ponderarse con idéntico criterio. De esta interrelación coherente, y no de fases aisladas, depende exclusivamente la calidad final.

Los defectos se miden en costo. Se malgasta energía, recursos no renovables, tiempo y dinero. Pero lo más grave que se pierde es la confianza del Mercado. Esto acaba minando, de breve a mediano plazo, la estabilidad de la propia Empresa.

Este Curso de Hialurgia -del cual el tema de los defectos es sólo una parte introductoria muy general a otros más amplios y específicos- tiene por finalidad recuperar el terreno perdido en largos años de vaciamiento tecnológico a nivel humano, y, a partir de ello, sentar las bases para el desarrollo de una rama de la industria llamada a ser líder, cuando los derivados del petróleo y los metales se vuelvan prohibitivos. El vidrio es un material noble, extremadamente dúctil, infinitamente reciclable y sobre todo ecológico. Del aprovechamiento de las innumerables propiedades del estado

vítreo de los compuestos de silicatos dependerá en gran parte el futuro de la Tecnología de los Materiales.

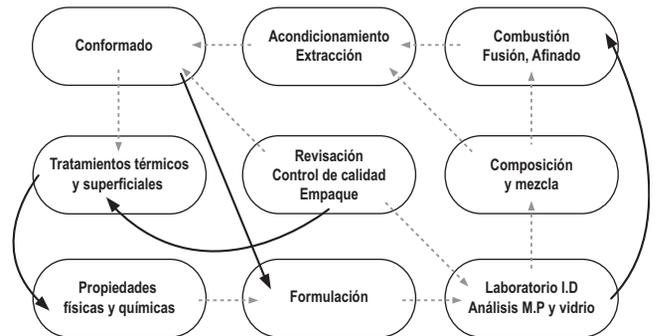


Diagrama de flujo de proceso de elaboración de vidrio, donde se expone la evolución e interrelación entre los diferentes estadios de control de defectos.

**Bibliografía e información consultada (por orden de edición)**

- *Tratado de Química Analítica F.P. Treadwell, W.D. Treadwell. Manuel Marín & Cía - 1956.*
- *Fundamentos Físico-Químicos de la Fabricación del Vidrio Hermann Salmang. Aguilar - 1962.*
- *The Handbook of Glass Manufactur F. V. Tooley. Books for Industry 1974.*
- *Química Adolfo Beguet. Cesarini Hnos. - 1976*
- *Manual de Física B.M. Yavorsky, A.A. Detlaf. Ediciones Cientec - 1977.*
- *Los Vidrios. Eduardo A. Mari. América Lee - 1982*
- *Metalurgia y materiales para construcciones mecánicas José L. Ferro. Cesarini Hnos. - 1982.*
- *El Vidrio. José María Fernandez Navarro. C.S.I.C Instituto de Cerámica y Vidrio Madrid - 1985.*
- *Fundamentos de Química Analítica. Douglas A. Skoog, Donald M. West. Reverté - 1988*
- *Revistas:*  
*Vidrio Latinoamericano - Glass Technology - Cerámica y Cristal - Vidrioteca Artículos diversos.*
- *Instituciones oficiales consultadas:*  
*ATAC - INTEMIN - CIDEMAT - IRAM*
- *Consultas personales y agradecimientos:*  
*Dr. Octavio Piccinini (entre 1992 y 1997), Dr. Eduardo Mari (mayo de 1997), Lic. Ricardo Hevia (mayo de 1997), Ing. Carlos Villarejo (entre 1990 y 2001), Sr. Luis Angel Parente (entre 1990 y 2001), Ing. Septimio Ricciuti (1995 a 1998), Lic. Carlos Solier (mayo de 1997 y abril de 2004), Lic. Marcelo d'Almeira (julio 2006 a junio 2007), Luis Arnoldo Alonso Ibáñez (desde octubre de 2005 a la fecha).*



## TECNOLOGIA DEL VIDRIO

- ELABORACIÓN Y VENTA DE COMPOSICIONES ARTIFICIALES - VIDRIOS ESPECIALES

**GABRIEL ADRIAN BORSELLA**

Tecnólogo Químico y Físico

Avda. 14 N° 5563 - (1884) Berazategui, Bs. As. - Argentina  
Tel.: (54-11) 4216-4339 - 15-1158-486606  
tecnologiadelvidrio@yahoo.com.ar





**ACC Resources Co., L.P.**

Established 1957

"Líder en comercialización de Productos de China, con control de Embarque y Calidad"

"Barcos fletados con frecuencia de arribos cada 120-150 días"

**ATENDEMOS LAS NECESIDADES DE LAS SIGUIENTES INDUSTRIAS:**

**REFRACTARIA  
Y  
CERAMICA**

- BAUXITA •OXIDO DE MAGNESIO
- MAGNESIA ELECTROFUNDIDA
- FLINT CLAY •GRAFITO CRISTALINO
- ALUMINA ELECTROFUNDIDA
- ALUMINA CALCINADA •CEMENTOS CALCICOS ALUMINOSOS •CARBURO DE BORO •ESPINELA •POLVO DE ALUMINIO
- SILICIO METALICO •SILICA FUME
- CROMO •NITRURO DE FERRO •SILICIO
- OLIVINA •HIDROXIDO DE ALUMINIO
- TALCO •CAOLIN •FELDESPATO

**FERTILIZANTES  
Y  
ALIMENTACIÓN  
ANIMAL**

- OXIDO DE MAGNESIO •OXIDO DE MAG. CAUSTICO •SULFATO DE MAGNESIO HEPTAHIDRATADO •SULFATO DE MANGANESO •OXIDO DE CINC
- SULFATO DE CINC •SULFATO DE HIERRO •SULFATO DE COBRE •SULFATO DE ALUMINIO •SULFATO DE COBALTO
- CARBONATO DE COBALTO

**OTRAS**

- BARITA •OXIDO DE ALUMINIO
- HEXAMETAFOFATO DE SODIO
- CARBONATO DE BARIO •CAOLIN
- FELDESPATO •HIDROXIDO DE ALUMINIO
- BAUXITA GRADO QUIMICO •FLINT CLAY GRADO QUIMICO •OXIDO DE MAGNESIO CAUSTICO •FLUORITA •PAPYRAL •CARBURO DE SILICIO •SULFATO DE SODIO
- CARBONATO DE SODIO (liviano y pesado)

**REPRESENTANTES DE:**

**ALMATIS (EX ALCOA WORLD CHEMICALS)**

Cementos cálcico aluminosos de alta alúmina, alúminas calcinadas, tabulares y especiales

**HEIDELBERG - Alemania**

Cementos cálcico aluminosos de baja y media alúmina Istra 40 e Istra 50

**LAEIS BUCHER GMBH - Alemania**

Prensas hidráulicas-Automatización-Industria refractaria

**IBIDEN Co.,Ltd. - Japón**

Nitruro de ferrosilicio

**PEÑOLES S.A. de C.V. - México**

Oxidos de magnesio

**TATEHO DEAD SEA FUSED MAGNESIA Co. - Israel**

Magnesita electrofundida - Oxidos de magnesita



**ACC RESOURCES ARGENTINA SRL**

Alicia M. de Justo 1080 P. 2°Cormorán. (1107) Bs. As., Argentina  
Tel.: (54-11) 5238-7788 Fax.: (54-11) 5238-7787  
www.accrarg.com.ar | inquiries@accrarg.com.ar

Nuestra forma  
de mejorar la  
productividad

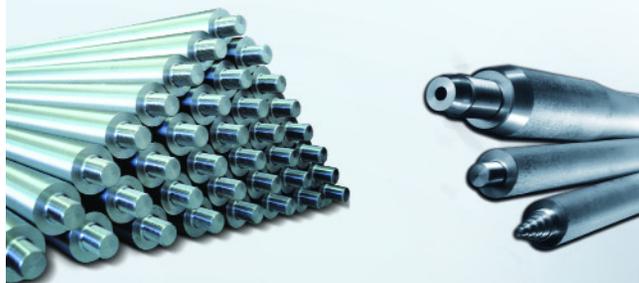


**PLANSEE**

PLANSEE hace la producción de vidrio más efectiva, más productiva y más sostenible para el medio ambiente.

Somos el líder mundial en productos de Molibdeno y Tungsteno para la industria del vidrio. Ofrecemos:

- electrodos para fundición de vidrio en Molibdeno de alta calidad
- entrega inmediata de producto en stock para electrodos estándar
- soluciones a medida de nuestros clientes
- revestimientos anticorrosivos para hornos de fundición
- equipamiento avanzado para agitación y dosificación



PLANSEE Metall GmbH, 6600 Reutte, Austria - Tel.: +43 (0) 5672 600-3250  
Fax: +43 (0)5672 600-512 - glass.technology@plansee.com - www.plansee.com