# 1

# GENERALIDADES DEL PROCESO DE FABRICACION DE VIDRIO PLANO

## 1.1 MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACION DE VIDRIO

Las materias primas empleadas en la fabricación de vidrios convencionales se clasifican principalmente en 4 grupos según su comportamiento en el proceso de fusión, estos son :

- Vitrificantes
- Fundentes
- Estabilizantes
- Componentes Secundarios

### VITRIFICANTES

SILICE

La sílice es el principal elemento en la mayoría de los vidrios comerciales, formando aproximadamente tres cuartas partes de su composición. La principal fuente de sílice para la industria del vidrio la constituyen las arenas de cuarzo, cuyo uso depende de sus características mineralógicas, químicas y granulométricas.

La proporción de sílice en la arena debe estar en el rango 98.5 - 99.5 % permitiéndose de 0.1 a 0.5 % de $Al_2O_3$ vía impurezas ( feldespatos, caolín , etc. ). De los minerales pesados contaminantes , tabla 1, se permite hasta 0.1% debido a problemas de coloración y formación de inclusiones en el producto final, por ejemplo, el contenido de $Cr_2O_3$ se limita de 0.0002 a 0.0006 % mientras que el de $Fe_2O_3$ se permite de 0.003 a 1 % según sea el tipo de vidrio, tabla 2.

| Mineral | Fórmula | Densidad [g/cm³] |
|---|---|---|
| Anfiboles | Metasilicatos con grupos OH− o F− | 2,9 - 3,7 |
| Arizonita | $Fe_2(TiO_4)_3$ | 4,5 |
| Casiterita | $SnO_2$ | 6,8 - 7,1 |
| Circón | $ZrSiO_4$ | 3,9 - 4,8 |
| Corindón | $Al_2O_3$ | 3,9 - 4,1 |
| Cromita | $(Fe, Mg)\ Cr_2O_4$ | 4,5 - 4,8 |
| Distena | $Al_2O_3.SiO_2$ | 3,6 - 3,7 |
| Epidota | $Ca_2(Fe,Al)Al_2Si_3O_{12}(OH)$ | 3,3 - 3,5 |
| Espinela | $MgO\ Al_2O_3$ | 3,5 |
| Goethita | $FeO\ OH$ | 3,8 - 4,3 |
| Ilmenita | $FeO\ TiO_2$ | 4,5 - 5,0 |
| Magnetita | $FeO.Fe_2O_3$ | 5,2 |
| Olivino | $MgO\ FeO\ SiO_2$ | 3,2 - 4,2 |
| Pirita | $FeS_2$ | 5,0 - 5,2 |
| Piroxenos | Metasilicatos de elementos divalentes | 3,1 - 3,5 |
| Rutilo | $TiO_2$ | 4,2 - 4,3 |
| Titanita | $CaO.TiO_2.SiO_2$ | 3,4 - 3,6 |
| Topacio | $Al_2SiO_4\ (F,OH)_2$ | 3,5 - 3,6 |
| Turmalina | $NaF_3(AlF)_6\ (OH)_4/(BO_3)_3/Si_6O_{18}$ | 3,0 - 3,3 |
| Zoisita | $Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH)$ | 3,2 - 3,4 |

Tabla 1. Principales minerales contaminantes de las arenas de cuarzo que se utilizan en la industria del vidrio.

| Tipo de vidrio | $Fe_2O_3$ [%] |
|---|---|
| Optico | 0,003 - 0,005 |
| Cristal de plomo | 0,006 - 0,012 |
| Vidrio blanco fino y semicristal | 0,015 - 0,020 |
| Vidrio blanco ordinario | 0,020 - 0,030 |
| Vidrio plano | 0,030 - 0,050 |
| Vidrio semiblanco | 0,050 - 0,100 |
| Vidrio de botella verde | 0,500 - 1,00 |

Tabla 2. Concentraciones máximas de $Fe_2O_3$ permitidas en las arenas de cuarzo para distintos tipos de vidrio.

## ANHIDRIDO BORICO

Es un componente esencial de los vidrios neutros para laboratorio, de vidrios resistentes al choque térmico, de la fibra de vidrio y de vidrios especiales. Los vidrios de borosilicato constituyen un grupo aparte debido a sus características estructurales y aplicaciones. El $B_2O_3$ es un aditivo en los vidrios sódico-cálcicos ordinarios ya que acelera su fusión, mejora su estabilidad química y su resistencia al choque térmico. Además de las fuentes naturales. La industria vidriera emplea como principales materias primas bóricas, productos químicos preparados, tales como ácido bórico y borato de sodio.

## ANHIDRIDO FOSFORICO

El $P_2O_5$ se limita únicamente a algunos vidrios ópalos y a vidrios de propiedades ópticas especiales por su transparencia en el ultravioleta y su baja transmisión en el infrarojo.

## FUNDENTES

Modificadores de red que favorecen la formación de vidrio al disminuir la temperatura de fusión.

## OXIDO DE SODIO

De los óxidos alcalinos , el de sodio es el que aparece en mayor proporción en los vidrios ordinarios. Se introduce al vidrio vía Carbonato de Sodio. Por los diversos problemas que se presentan , sólo de un 20 a 25 % de $Na_2O$ del vidrio se agrega vía Sulfato de sodio.

## OXIDO DE POTASIO

Usualmente el óxido de potasio se introduce en el vidrio a partir de carbonato de potasio. Debido a que el ion de potasio es mas grande que el de sodio, los vidrios con potasio son más viscosos que los que contienen sodio.

## OXIDO DE CALCIO

Su presencia en el vidrio aumenta la estabilidad química y mecánica. Desde el punto de vista funcional, actúa como estabilizante aunque estructuralmente tiene el carácter de modificador de red. La materia prima que se emplea para introducir el óxido de calcio es la caliza natural ( $CaCO_3$ ), la cual debe tener un contenido mínimo de 55.2 % de CaO.

## OXIDO DE MAGNESIO

Desempeña un papel semejante al CaO. La materia prima más

utilizada para introducir MgO al vidrio es la dolomita ( $CaCO_3.MgCO_3$ ).

OXIDO DE BARIO

El BaO aumenta la densidad, índice de refracción y brillo. Debido a su elevado radio iónico, aumenta la viscosidad, le hace más moldeable e incrementa el intervalo de trabajo. Se utilizan los nitratos y carbonatos de bario.

## ESTABILIZANTES

OXIDO DE ALUMINIO

La incorporación de Alúmina origina un aumento de la resistencia mecánica, mejora la estabilidad química, aumenta la refractariedad, disminuye el coeficiente de dilatación térmica, mejora la resistencia al choque térmico, reduce la tendencia a la devitrificación, aumenta la viscosidad y el intervalo de trabajo. En la mayoría de los vidrios sódico-cálcicos comerciales se utiliza de 1-3% de $Al_2O_3$. Las materias primas que más se utilizan para incorporar $Al_2O_3$ en el vidrio son los feldespatos debido a que funden a temperaturas relativamente bajas y se incorporan fácilmente. En algunos casos se utilizan bauxita, caolines y algunas rocas aluminosas.

## OXIDO DE PLOMO

El óxido de plomo es uno de los componentes que más enoblecen la calidad del vidrio, proporcionándole un alto índice de refracción, brillo, aumento de densidad y sonoridad. Los vidrios de Pb deben fundirse en atmósferas fuertemente oxidantes. El principal inconveniente que presentan es que son más blandos que los sódico-cálcicos ordinarios. El PbO se introduce casi siempre bajo la forma $Pb_3O_4$, a veces como Carbonato básico y raramente como PbO.

## OXIDO DE ZINC

La adición de óxido de zinc en proporciones hasta del 5% resulta generalmente favorable a la mayoría de los vidrios comunes. Este componente actúa mejorando la resistencia química, elvando el índice de refracción, aumentando la dureza y reduciendo el coeficiente de dilatación térmica. Las principales materias primas que se utilizan son el $ZnCO_3$ y ZnO.

En la fabricación del vidrio , intervienen otros constituyentes minoritarios con funciones específicas : colorantes, decolorantes opacificantes, fluidificantes, agua , cullet, etc.

| COMPOSICION EN OXIDOS | | | COMPOSICION DE LA MEZCLA VITRIFICABLE | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | partes en peso de materia prima (c) | | | | | | |
| | | | 66.51 ARENA (99.2 % $SiO_2$) | 9.04 FELDESPATO (65.6 % $SiO_2$ 17.8 % $Al_2O_3$ 10.3 % $Na_2O$ 6.3 % $K_2O$) | 19.82 SOSA ($Na_2CO_3$) | 1.36 CARBONATO POTASICO ($K_2CO_3$) | 10.82 DOLOMITA (21.9% MgO 30.3 % CaO) | 11.55 CALIZA ($CaCO_3$) | |
| OXIDO | mol % $a_{mi}$ | peso % $a_{pi}$ | % de oxidos incorporado con cada materia prima | | | | | | |
| $SiO_2$ | 71.31 | 71.91 | 65.98 | 5.93 | | | | | Σ = 71.91 $SiO_2$ |
| $Al_2O_3$ | 0.95 | 1.61 | | 1.61 | | | | | Σ = 1.61 $Al_2O_3$ |
| $Na_2O$ | 12.12 | 12.52 | | 0.93 | 11.59 | | | | Σ = 12.52 $Na_2O$ |
| $K_2O$ | 1.17 | 1.84 | | 0.57 | | 1.27 | | | Σ = 1.84 $K_2O$ |
| MgO | 3.52 | 2.37 | | | | | 2.37 | | Σ = 2.37 MgO |
| CaO | 10.43 | 9.75 | | | | | 3.28 | 6.47 | Σ = 9.75 CaO |
| | | | peso de materia prima con referencia a 100 partes de arena (c) | | | | | | |
| Σ | 100.00 | 100.00 | [illegible] | 13.59 | 23.50 | 2.30 | [illegible] | [illegible] | Σ = 100.00 |

Vidrio sódico - cálcico

| Tipo de vidrio | Componentes (peso %) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $B_2O_3$ | $Na_2O$ | $K_2O$ | MgO | CaO | BaO | PbO | $Fe_2O_3$ | Otros |
| Plano estirado | 71-73 | 0,5-2 | — | 12,5-15 | 0-1 | 1-4 | 4-10 | — | — | <0,3 | — |
| Plano flotado | 70-71,5 | 0,5-1,5 | — | 13-14 | 0-1 | 4-5 | 8-9,5 | — | — | <0,3 | — |
| Semiblanco para envases | 69-73 | 1-2,5 | — | 12-15 | 0-2 | 1-2,5 | 8-10 | 0,5 | — | <0,1 | — |
| Verde para envases | 65-71 | 1-5 | — | 12-16 | 0-1 | 1-2 | 8-12 | — | — | 0,2-2 | $Cr_2O_3$ 0,1-0,3 |
| Servicio de mesa | 71-74 | 1-2 | — | 11-15 | 0-4 | 0-2 | 7-9 | 0-3 | — | <0,02 | — |
| Bombillas y tubos | 70-72 | 0,5-1,5 | — | 15-17 | 0-1 | 2,5-4 | 5-6 | 0-2 | — | <0,05 | — |
| Material de laboratorio | 71-73 | 1,5-4,5 | 5-7 | 6-8 | 0-1 | 2-4,5 | 2-4 | 0-3 | — | <0,1 | — |
| Farmaceutico neutro | 70-75 | 3-9 | 5-9 | 6-9 | 0-1 | 0-1 | 3-7 | 2-4 | — | <0,1 | — |
| Termómetros | 50-72 | 2-5 | 2-10 | 10-14 | — | 0-5 | 0-7 | — | — | <0,05 | ZnO 0-7 |
| Fibra | 53-64 | 5-15 | 5-9 | 1-14 | 0-1 | 0-5 | 2-15 | — | — | <0,1 | — |
| Cristal | 55-62 | — | 0-1 | 0-3 | 8-14 | — | 0-3 | 0-3 | 24-35 | <0,01 | ZnO 0-1 |
| Flint ordinario | 43-45 | — | — | 1-2 | 7-8 | — | — | — | 47-49 | <0,01 | — |
| Crown de silicato | 63-69 | — | 2-2,5 | 4-5 | 15-16 | — | 0-8 | 0-11 | 0-1 | <0,01 | ZnO 2-3 |
| Crown de fosfato | — | 2-8 | 2-3 | — | — | — | — | 28-38 | — | <0,01 | $P_2O_5$ 56-60 |

Diferentes tipos de vidrio

Figura 1. Composición química de vidrios comunes

## 1.2 PROCESO DE ELABORACION DEL VIDRIO

Se puede considerar que el proceso de fabricación del vidrio está formado por las siguientes seis etapas.

- Reacción de los componentes y formación del vidrio.
- Disolución del excedente de sílice sin reaccionar.
- Afinado y homogenización.
- Reposo y Acondicionamiento térmico.
- Conformación
- Enfriamiento y Recocido

Las primeras cuatro etapas ocurren en el horno de fusión, donde la materia vitrificable experimenta un aumento de temperatura hasta un máximo de unos 1550 ºC seguido de un enfriamiento y de un período de estabilización en el que la masa vítrea debe alcanzar la homogeneidad térmica requerida para su conformación.

### REACCIONES DE LOS COMPONENTES Y FORMACION DE VIDRIO

La formación de vidrio comprende una serie de transformaciones físicas y reacciones químicas en alta temperatura. Durante este proceso los componentes de la mezcla experimentan múltiples modificaciones que incluyen transformaciones cristalinas, evaporación de agua, deshidratación de sales, disociación de los carbonatos y sulfatos, reacciones químicas, fusión, disolución. La simultaniedad con que se producen algunas de estas

transformaciones físico-químicas y el elevado número de componentes que intervienen en los sistemas de la mayoría de los vidrios, hacen muy complejo el estudio de los equilibrios de todas estas reacciones. Aunque las reacciones químicas entre los componentes de la mezcla vitrificable empiezan a producirse a bajas temperaturas, mientras éstos se hallen todavía en estado sólido, trancurren con lentitud hasta que se alcanza la temperatura de formación de los primeros eutécticos, y tiene lugar la aparición de fase líquida. La tabla 3 muestra las reacciones que se producen durante el calentamiento de una mezcla vitrificable correspondiente a un vidrio sódico-cálcico industrial.

| Temperatura (°C) | Transformación |
|---|---|
| ~ 500 | $Na_2CO_3 + CaCO_3 \longrightarrow Na_2Ca(CO_3)_2$<br>$Na_2CO_3 + CaMg(CO_3)_2 \longrightarrow Na_2Ca(CO_3)_2 + MgCO_3$ |
| ~ 630 | $MgCO_3 \longrightarrow MgO + CO_2$ |
| 750 | Formación de $xNa_2CO_3 . yCaCO_3$ |
| < 780 | Formación de $Na_2O.SiO_2$<br>$Na_2O.SiO_2 + SiO_2 \longrightarrow Na_2O.2SiO_2$ |
| 780 | Fusión del eutéctico $Na_2Ca(CO_3)_2$-$xNa_2CO_3$ $yCaCO_3$<br>Fusión del resto del compuesto $xNa_2CO_3$ $yCaCO_3$ |
| 834 | Fusión del eutéctico $Na_2O.2SiO_2$-$Na_2O.SiO_2$ |
| > 900 | Aparición de la primera fase líquida que puede ser enfriada en estado vítreo. El cuarzo empieza a disolverse en esta fase líquida. |
| 1088 | Punto de fusión del $Na_2O.SiO_2$ |

Tabla 3. Reacciones producidas durante la formación de vidrios sódico-cálcicos.

## DISOLUCION DEL EXCEDENTE DE SILICA SIN REACCIONAR.

Después de haber reaccionado entre sí los componentes de la mezcla vitrificable y de haber dado lugar a la formación de una fase fundida, todavía queda un exceso de sílica no incorporada al vidrio. Su incorporación se lleva acabo mediante un proceso de disolución, gobernado por un proceso difusional. Un fenómeno característico que se produce durante la disolución de la sílica en el vidrio es la formación de numerosas burbujas producidas por el aumento de acidez que experimenta el fundido. En la primera etapa de reacción y fusión el fundido era muy alcalino y ello favorecía la disolución química de cantidades importantes de $CO_2$, $SO_3$ y vapor de agua. Pero al irse incorporando la sílice, el vidrio se va haciendo cada vez más ácido y la solubilidad de dichos gases disminuye produciéndose segregación en forma de burbujas.

## AFINADO Y HOMOGENIZACION DEL VIDRIO

El proceso de homogenización del vidrio y de la eliminación de parte de los gases disueltos y de las burbujas ocluídas se denomina afinado. Durante este proceso, uno de los aspectos de mayor importancia es el de la interacción del vidrio con las fases gaseosas que se encuentran en contacto con él. Su importancia radica no solo en la complejidad y diversidad de las reacciones que tienen lugar, sino también en sus repercuciones prácticas, ya

que el equilibrio vidrio-gas determina la disolución gaseosa, la formación y eliminación de las burbujas y en definitiva, el grado de calidad del producto obtenido. La tabla 4 describe la interacción vidrio-gas en las diferentes etapas del proceso de elaboración del vidrio mientras que en la tabla 5 se indican las principales fuentes de aportación de gas al vidrio.

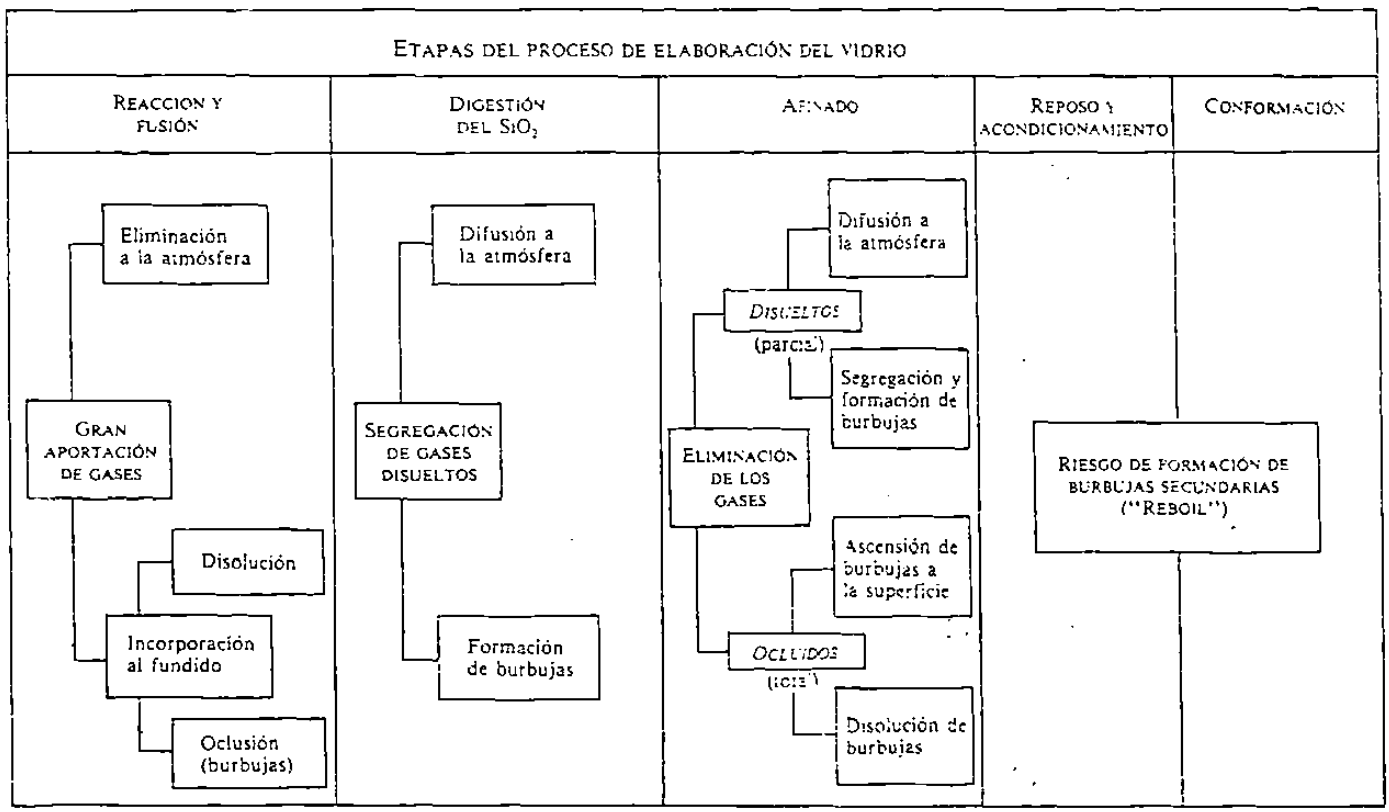



Tabla 4. Interacción vidrio - gas en las diferentes etapas del proceso de elaboración del vidrio.

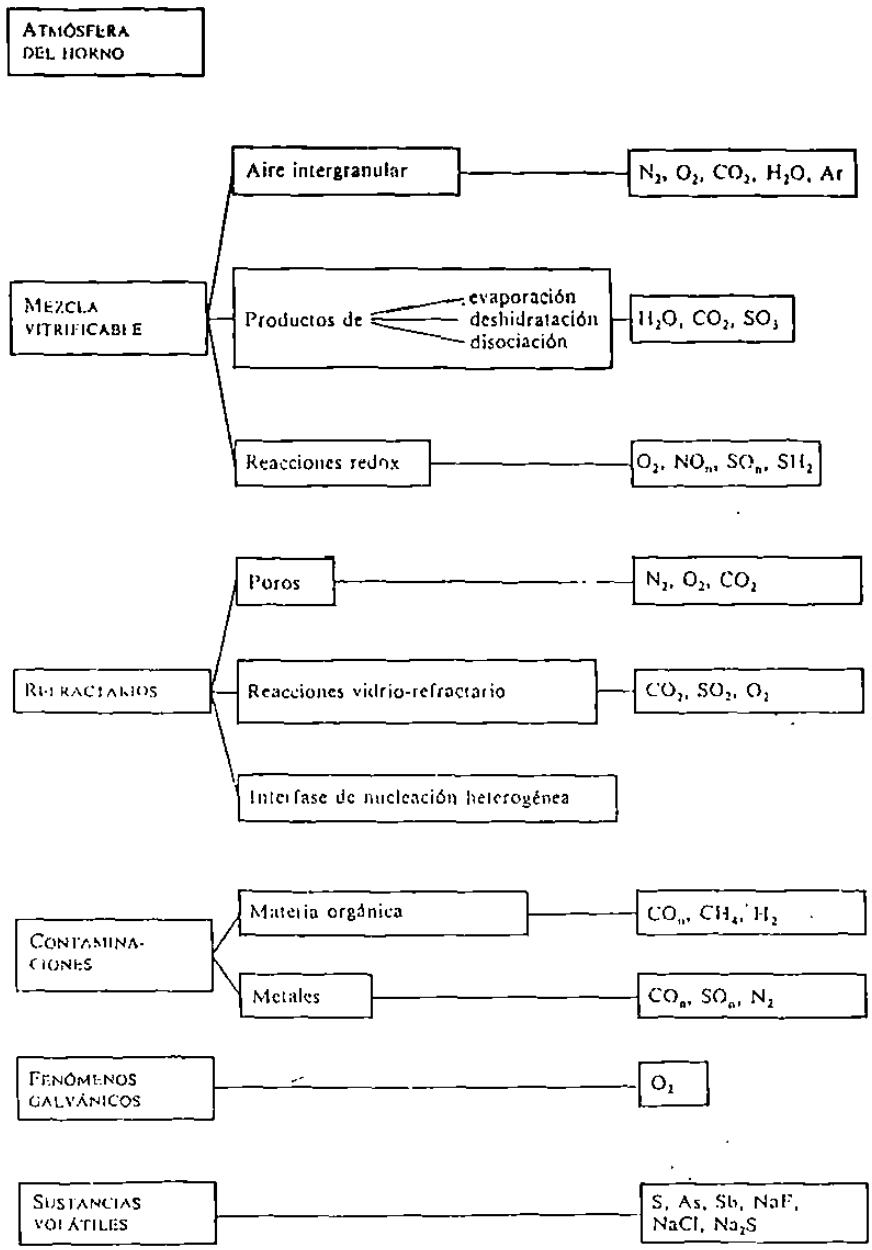



Tabla 5. Principales fuentes de aportación gaseosa al vidrio durante las etapas de reacción de sus componentes.

## PROCEDIMIENTO DE AFINADO

Mientras que gran parte de las burbujas formadas en el vidrio llegan por sí solas a la superficie y rompen en ella, otras de menor tamaño o situadas a mayor profundidad, no disponen de tiempo suficiente para escapar de la masa fundida. La eliminación de éstas burbujas puede realizarse mediante procedimientos químicos, térmicos o mecánicos.

### AGENTES QUIMICOS DE AFINADO

Todos los procedimientos químicos de afinado poseen como característica común la adición al vidrio de sustancias que se descompongan térmicamente dando lugar a un intenso desprendimiento de gases. Las burbujas formadas son de mayor tamaño, lo que les permite ascender en poco tiempo a la superficie al mismo tiempo que arrastran a las burbujas más pequeñas que se encuentran a su paso, homogenizando así , las capas estratificadas de vidrio.

Para que se pueda aprovechar al máximo el potencial gaseoso de los afinantes, éstos deben tener una elevada tensión de descomposición, lo que les permitirá retrasar su evolución gaseosa hasta zonas de alta temperatura en las que el fundido haya cedido ya la mayor parte de sus gases y en las que la viscosidad de éste sea lo suficentemente baja para facilitar la ascención y eliminación de las burbujas nacientes.

Los gases cedidos por la sustancia afinante deben ser, en lo posible, diferentes de los que se hallan ocluídos en las burbujas que se tratan de eliminar. De este modo, si la burbuja no contiene el gas que actúa como afinante, la presión parcial de éste en el interior de la misma será lógicamente nula y bastarán bajas presiones de descomposición del gas afinante para conseguir su difusión en el interior de la burbuja y acelerar su crecimiento. Recíprocamente en las burbujas grandes formadas por el gas afinante se favorecerá la penetración por difusión de los gases aún disueltos en el fundido, disminuyendo así progresivamente su contenido gaseoso. Ya que las burbujas formadas después de las etapas de reacción y absorción de la sílice están constituídas por $CO_2$, $N_2$, $H_2O$, se emplean preferentemente afinantes que produzcan $O_2$ y $SO_2$. Las burbujas pequeñas que se mantienen en el vidrio después de la etapa de afinado serán absorbidas durante la etapa de enfriamiento. Como agentes afinantes principalmente se emplean sulfatos ( que liberan $SO_2$ ), óxidos de arsénico y antimonio junto con nitratos, ( liberando $O_2$ ), óxidos y peróxidos que aportan $O_2$, halogenuros que se volatilizan y cloratos y percloratos que también forman $O_2$.

PROCEDIMIENTOS FISICOS DE AFINADO

El movimiento de agitación del fundido debido al desplazamiento de las burbujas no siempre resulta suficiente para lograr una buena homogenización.

Por eso, esta acción química se refuerza mediante otras acciones de tipo físico. La más común de todas consiste en provocar una calentamieto brusco. Por una parte se produce una fuerte desgasificación del vidrio y por otra la disminución que experimenta la viscosidad acelera el movimiento de ascensión de las burbujas. Un aumento de 50°C puede reducir a la mitad el tiempo de afinado. Un aumento excesivo de la temperatura incrementa volatilización del vidrio y la corrosión del material refractario. Otro recurso, frecuentemente usado, es el de introducir en el horno, sistemas de inyección gaseosa, llamados borboteadores, para producir un burbujeo contínuo. Las burbujas suelen ser de gran tamaño y constituyen un buen método de agitación y de arrastre de las pequeñas inclusiones gaseosas que encuentren a su paso.

## REPOSO Y ACONDICIONAMIENTO TERMICO

El propósito de esta etapa es lograr que el vidrio alcance homogeneidad térmica al mismo tiempo que su temperatura disminuya hasta la temperatura de fabricación. Al homogenizar la temperatura, la viscosidad se homogeniza logrando obtener velocidades de flujo de vidrio similares. Con el acondicionamiento térmico concluye el proceso de fusión del vidrio y éste queda en disposición de ser extraído y moldeado en su forma definitiva.

## 1.3 FABRICACION DE VIDRIO PLANO

La idea de fabricar una hoja de vidrio por un procedimiento de estirado mecánico fué desarrollada casi simultáneamente en Bélgica por Fourcault ( 1902 ) y en Estados Unidos por Colburn ( 1903 ). La finalidad, era conseguir extraer verticalmente , del baño de vidrio una lámina rectangular contínua que inmediatamente después de emerger, fuese cuidadosamente enfriada.

### SISTEMA COLBURN-LIBBEY-OWENS

En el procedimiento ideado por Colburn y explotado industrialmente por la firma Libbey-Owens, la hoja nace directamente de la superficie del vidrio fundido, como se muestra en la figura 2. Dos pares de rodillos dentados refrigerados por agua, sujetan la lámina por sus bordes y ejercen sobre ella una tracción ascendente. Después de un breve recorrido de unos 60-70 cm (donde la hoja recién formada disipa parte de su calor), pasa entre dos pantallas metálicas refrigeradas y luego doblada en ángulo recto sobre un rodillo de acero pulido. A partir de ese momento, avanza en dirección horizontal a través de un túnel o canal de enfriamiento de unos 60 m, deslizándose bajo su propio peso sobre una serie de rodillos transportadores forrados de asbesto . La velocidad de estirado varía inversamente al espesor de acuerdo a la expresión :

$$Vd^n = k$$

siendo V la velocidad de estirado, d el espesor de la lámina y k una constante propia de cada instalación. Para un espesor de 3 mm, la velocidad se mantiene en el rango 90-120 m/h.

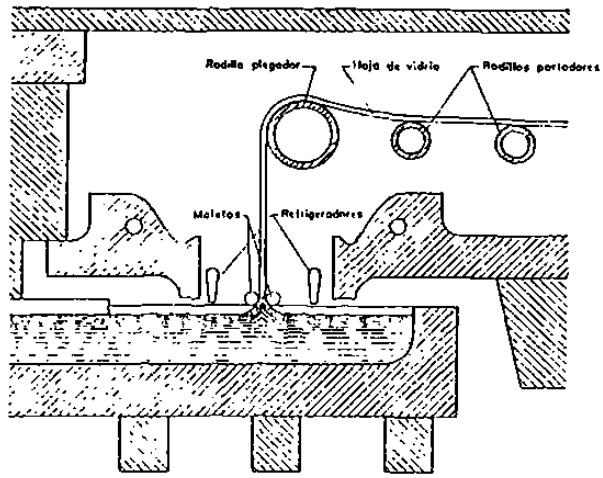



Figura 2. Sistema Colburn-Libbey-Owens de estirado de vidrio plano.

El procedimiento Libbey-Owens permite la obtención de un amplio rango de espesores ( incluyendo menores a 1 mm ) con un rendimiento elevado. Sin embargo, las numerosas complicaciones mecánicas y el delicado mantenimiento de la instalación han hecho caer en desuso este procedimiento y apenas se emplea en la actualidad.

## SISTEMA FOURCAULT

En este sistema, la hoja de vidrio emerge del baño a través de la rendija de una pieza alargada de material refractario, llamada distribuidor,el cual se encuentra parcialmente sumergido en el vidrio, figura 3. Por efecto de la presión hidrostática que ejerce el vidrio fundido, éste penetra por la rendija formando una cresta que sirve de arranque a la hoja plástica.

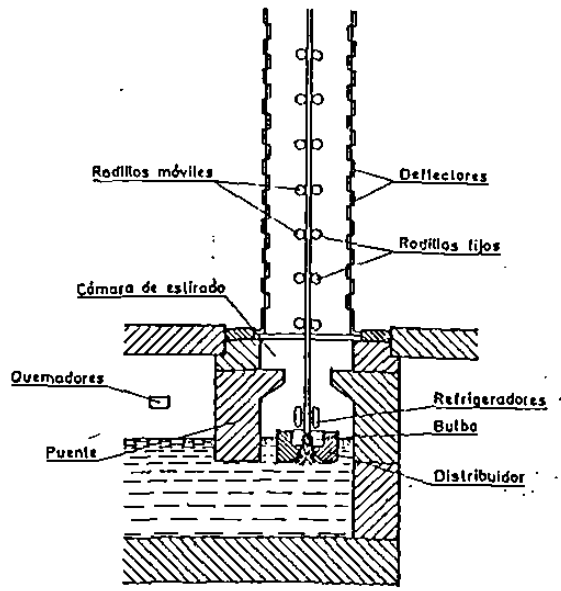



Figura 3. Sistema Fourcault de estirado de vidrio plano.

El estirado se inicia mediante un bastidor metálico especial que se sumerge en el vidrio fundido. La lámina de vidrio se enfría lateralmente mediante dos cilindros refrigerantes con el fin de evitar la retracción transversal y así mantener su espesor. El avance de la lámina de vidrio transcurre verticalmente en todo su recorrido a lo largo de la cámara de estirado, donde se eleva mediante varios juegos de rodillos de acero protegidos con asbesto . En su recorrido ascendente, la lámina se recoce lenta y gradualmente desde 950 °C ( temperatura al momento de su extracción ) hasta unos 100 °C. Cuando el borde libre de la lámina alcanza una determinada altura, se efectúa el corte de la hoja manual o mecánicamente. El espesor de la lámina de vidrio puede modificarse variando la velocidad de estirado, la cual depende de la viscosidad y temperaturas en el rango 900-950 °C. Un defecto relativamente frecuente del vidrio estirado verticalmente es la aparición de finas cuerdas o estrías en la dirección del estirado que alteran su calidad y que son débidas al efecto contaminante que resulta de la disolución lenta del material refractario del distribuidor, favorecida por la contínua abrasión del vidrio fundido.

## SISTEMA PITTSBURGH

Este procedimiento tiene en común con el Fourcault el sistema de estirado,pero en lugar del distribuidor existe una pieza de material refractario ( barra de estirado ) totalmente sumergida en el vidrio a unos 70 mm debajo de su nivel y situada inmediatamente debajo de la línea de estirado, figura 4.

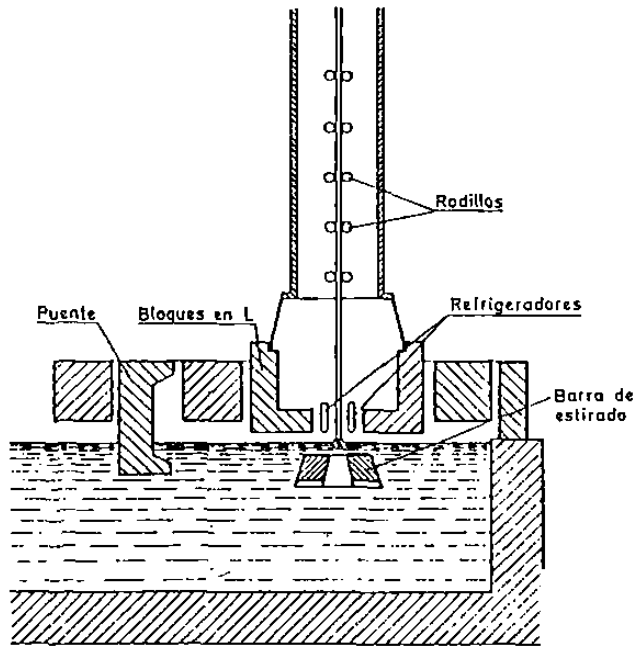



Figura 4. Sistema Pittsburgh de estirado de vidrio plano.

Esta pieza actúa como pantalla térmica que protege a la hoja de vidrio en su inicio además de que lo mantiene a una temperatura más elevada, reduciendo así el riesgo de devitrificación.

De los tres procedimientos de estirado descritos, éste es el que proporciona mejor calidad y más alto rendimiento. La mayor temperatura de trabajo, además de favorecer la homogeneidad del vidrio y de disminuir su tendencia a devitrificar, permite disminuir apreciablemente la proporción de álcali en su composición y por consiguiente mejorar su estabilidad química y mecánica.

## PROCEDIMIENTO DE LAMINADO CONTINUO

La figura 5 muestra el sistema Boudin de colado contínuo, donde el vidrio fundido, una vez afinado, pasa a la zona de acondicionamiento térmico y después al exterior através de rodillos de laminación.

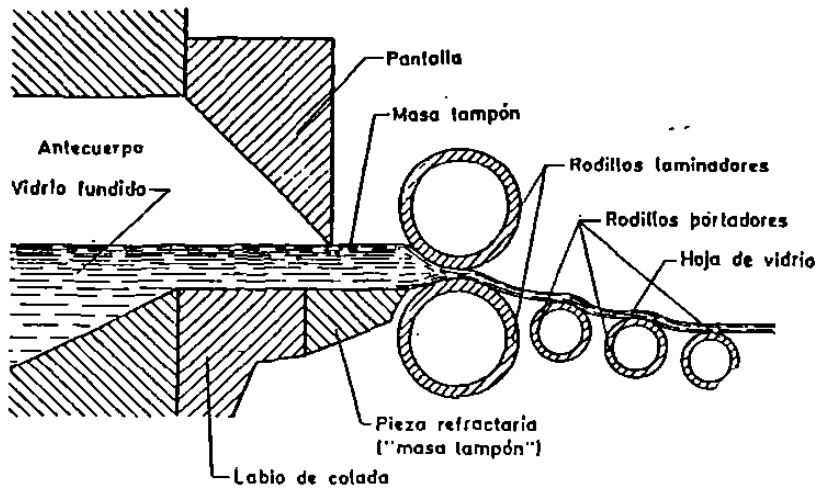



Figura 5. Procedimiento Boudin de colado continuo

Una vez formadas las láminas, se procede al recocido y enfriamiento respectivos.

## PROCEDIMIENTO DE FLOTADO

En el año de 1959 y tras un gran esfuerzo tecnológico, la firma británica Pilkington Brothers dió a conocer un nuevo procedimiento de fabricación de vidrio plano que había de constituir una auténtica revolución industrial de este sector. Esquemáticamente el proceso de trabajo es el siguiente. El vidrio se funde en un horno de grandes dimensiones y después de afinado y acondicionado se le hace caer por rebosamiento entre dos rodillos laminadores o bien sobre un canal situado a la salida del horno, formando una lámina contínua que después de enfriada hasta unos 1150 °C , penetra en una cámara donde transcurre la etapa principal de todo el proceso . La lámina de vidrio se recibe

dentro de esta cámara sobre un baño de estaño fundido de unos 30 cm de profundidad y flotando sobre él se extiende y avanza horizontalmente. Al salir de esta cámara pasa por un túnel largo de recocido y finalmente se corta, figura 6.

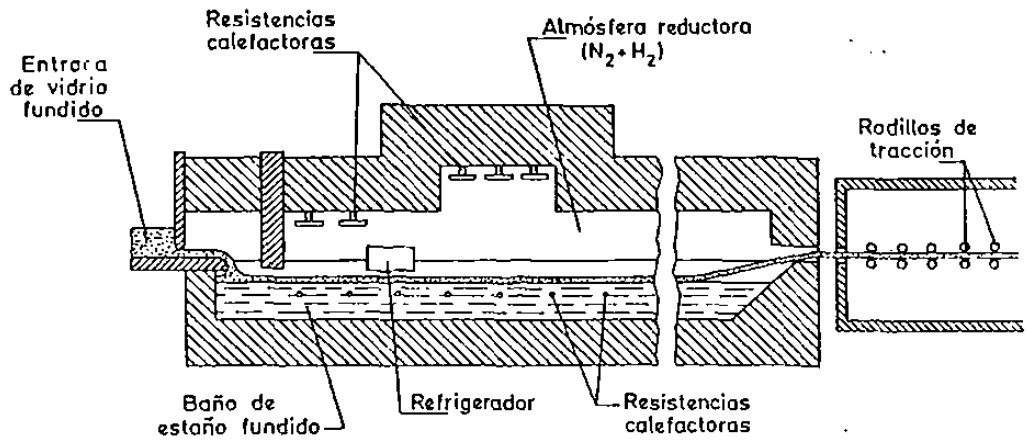



Figura 6 . Procedimiento de fabricación de vidrio plano flotado.

La aportación importante y original de este procedimiento radica en la posibilidad de obtener directamente una lámina de vidrio pulida por ambas caras, sin necesidad de ser sometida a ninguna operación posterior de desbaste y pulido. El vidrio adquiere por su cara superior un pulido a fuego mientras que por la cara inferior recibe el pulido especular que le comunica la superficie libre del baño de estaño fundido sobre el que se

desliza. Para proteger a éste de su oxidación es preciso mantener en la cámara una atmósfera reductora, lo cual se consigue haciendo pasar una corriente de nitrógeno con un 0.5% de hidrógeno. El baño de estaño está dividido en varias zonas calentadas eléctricamente a temperaturas diferentes rigurosamente controladas. En la primera zona, mantenida a unos 1020°C el vidrio se extiende sobre el baño metálico. De acuerdo a su densidad y su tensión superficial cada vidrio alcanza un espesor determinado. Para un vidrio sódico-cálcico ordinario este espesor es de 6.3 mm.

El vidrio pasa después a una segunda zona en la que, mediante un sistema de refrigeración se enfría hasta unos 700 °C. En la tercera zona se vuelve a calentar a 850°C adquiriendo el pulido a fuego y su espesor definitivo. Acontinuación se hace descender nuevamente su temperatura hasta 650°C y finalmente abandona el baño de estaño para pasar al túnel de recocido.

Las principales ventajas de este proceso de fabricación son las elevadas velocidades de extracción que se pueden alcanzar ( para un vidrio de 6 mm llegan a ser de 240 m/h ) además de una elevada calidad en el producto.

2

VIDRIO TEMPLADO

## 2.1 TEMPLADO DEL VIDRIO PLANO

INTRODUCCION

Como se observa con frecuencia, el vidrio plano puede fracturarse al aplicársele cargas mecánicas ligeras como las generadas por impacto,presión o choque térmico. Los fragmentos de vidrio puntiagudos pueden causar serias lesiones, figura 1 . Un tratamiento especial da origen a un vidrio menos susceptible a la fractura y reduce considerablemente el riesgo de lesiones. A este producto se le conoce como cristal de seguridad.

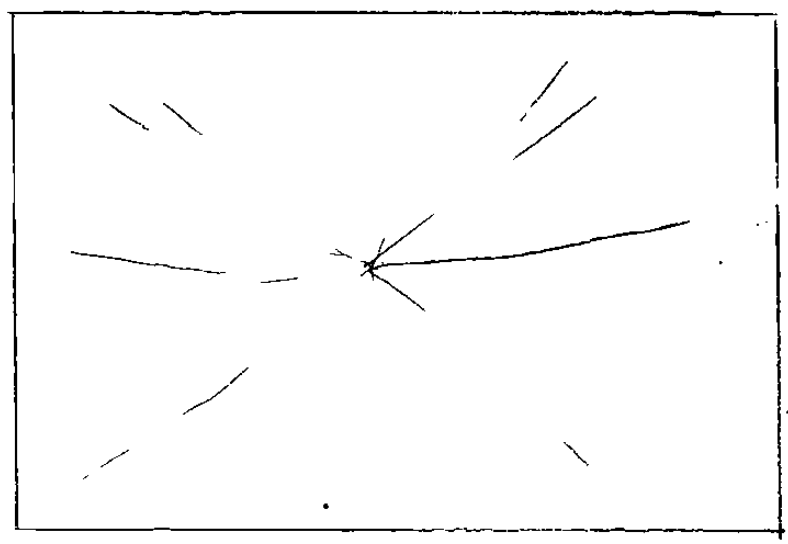


Figura 1. Patrón de fractura de un vidrio plano normal

Durante la producción de vidrio de seguridad, vidrio plano cortado es suspendido verticalmente u horizontalmente en el sistema de manufactura donde se calienta en forma rápida hasta aproximadamente 150 °C por encima de la temperatura de transformación e inmediatamente es templado con aire frío. Como resultado de este proceso de templado, la masa interna de vidrio se enfría más lentamente que la superficie externa, produciendo en esta esfuerzos de compresión en el rango 70 - 140 Mpa como lo muestra la figura siguiente :

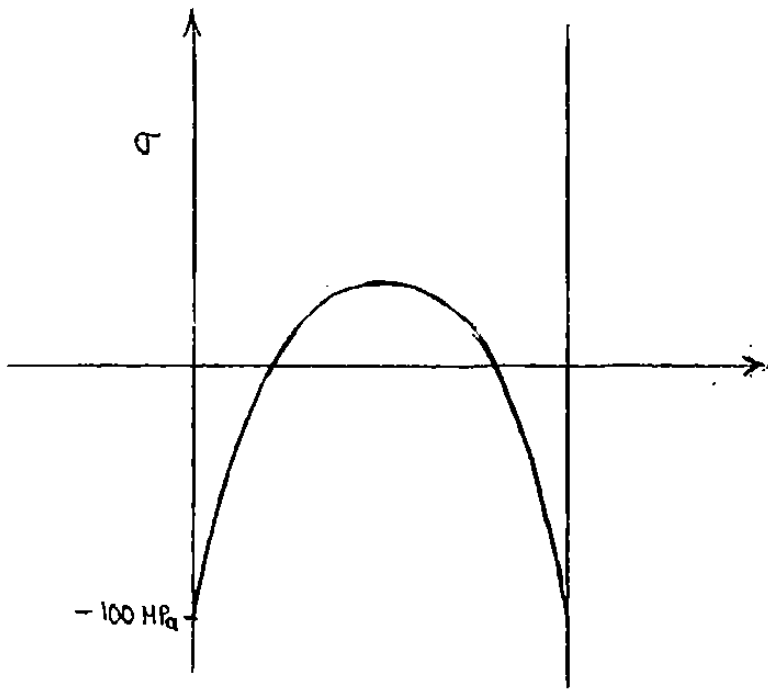



Figura 2. Magnitud y distribución de esfuerzos residuales en el vidrio templado.

El producto obtenido mediante este proceso es llamado vidrio templado o cristal monolítico de seguridad. Los principales factores que afectan la magnitud de los esfuerzos residuales son la expansión térmica del vidrio a temperaturas superiores e inferiores de la temperatura de transformación ( Tg ) , su módulo de elasticidad y la diferencia de temperaturas arriba de Tg que exista entre las superficies con respecto a la masa interna de vidrio. Los esfuerzos compresivos obtenidos son aproximadamente 3-4 veces la resistencia " normal " del vidrio plano, y estos aumentan con el espesor del vidrio. Cuando el vidrio templado es sometido a impacto ( como cuando una piedra golpea un cristal de un automóvil o en un accidente automovilístico ) este se fractura en trozos muy pequeños de forma regular y sin picos, figura 3,cuyo tamaño puede controlarse en el proceso de templado.

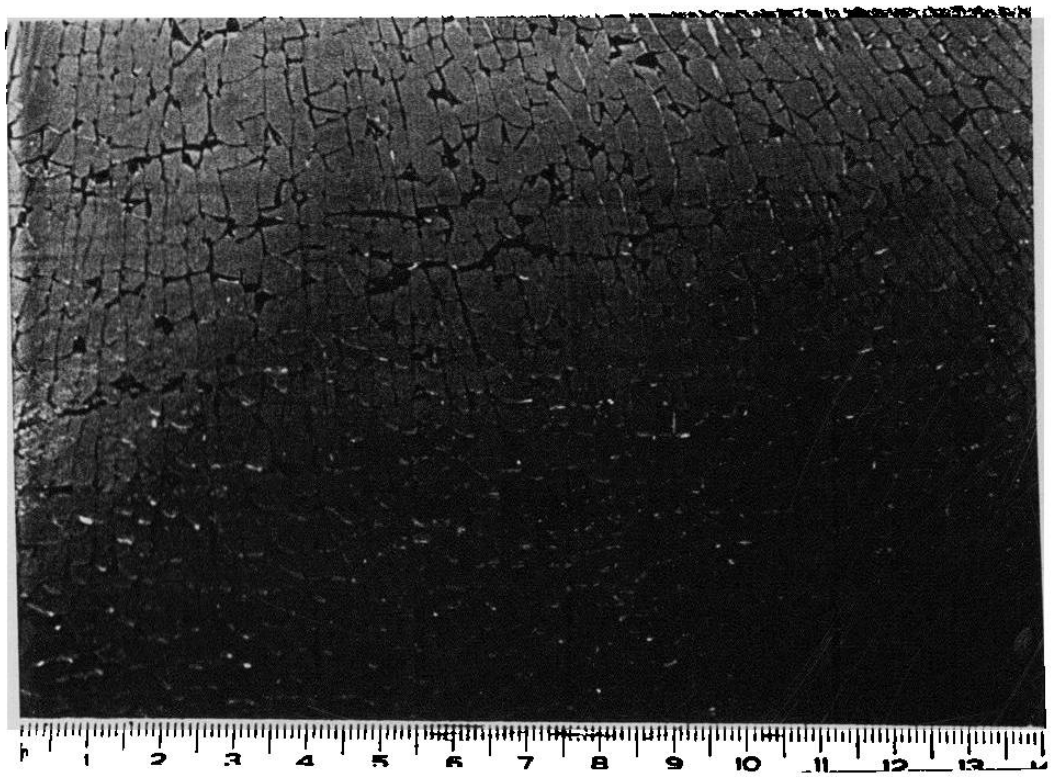



Figura 3. Patrón de fractura de un vidrio templado.

Todos los vidrios planos pueden ser templados, recientemente la industria automotriz utiliza vidrios flotados templados. Los vidrios monolíticos de seguridad y otros productos son producidos por las mismas compañías de vidrio plano.

## 2.2 MANUFACTURA DE CRISTAL AUTOMOTRIZ

Como se mencionó anteriormente, el cristal automotriz es producido a partir de vidrio plano flotado, el cual se somete al siguiente proceso :

a) CORTE según forma final del producto.

b) BARRENADO si es necesario.

c) PULIDO DE LOS BORDES.

d) LAVADO

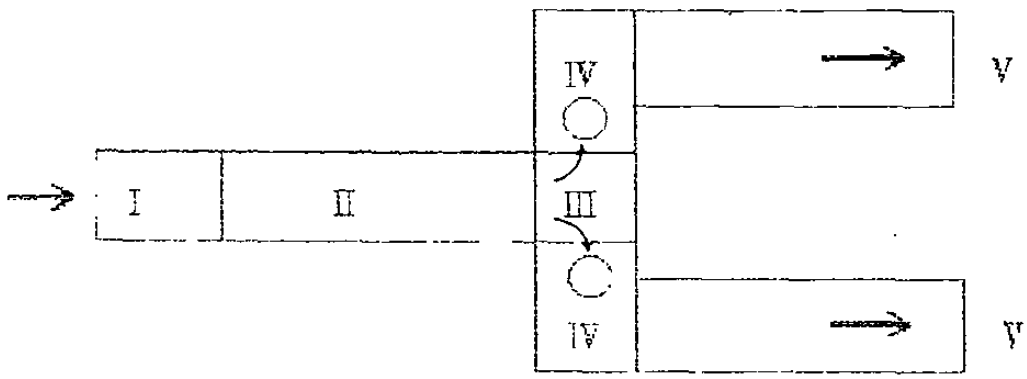
e) PINTADO si se requiere.

f) TEMPLADO

g) INSPECCION Y EMPAQUE.

La figura 4 muestra esquemáticamente la línea de templado. El vidrio plano cortado, pulido, lavado y pintado es transportado horizontalmente a través de un horno de resistencias eléctricas mediante rodillos de sílica de alta pureza, figura 5, y calentados a una temperatura final de alrededor de 686 °C. En la parte final del horno, el vidrio se curva por gravedad según los requerimientos del producto final y después es templado en cuestión de segundos con aire a temperatura ambiente. Posteriormente es transportado a la zona de inspección y empaque.

Dentro del horno de calentamiento del cristal se tienen dos líneas de inyección de $SO_2$, el cual actúa como lubricante entre los rodillos transportadores y el vidrio a templar y como desalcalinizante de la superficie con lo cual se tiene un aumento en la resisitencia química. Más adelante se verá en forma más amplia el papel que juega el $SO_2$ en el proceso de manufactura del vidrio templado.




I CARGA DE VIDRIO PLANO CORTADO, PULIDO, LAVADO Y PINTADO.

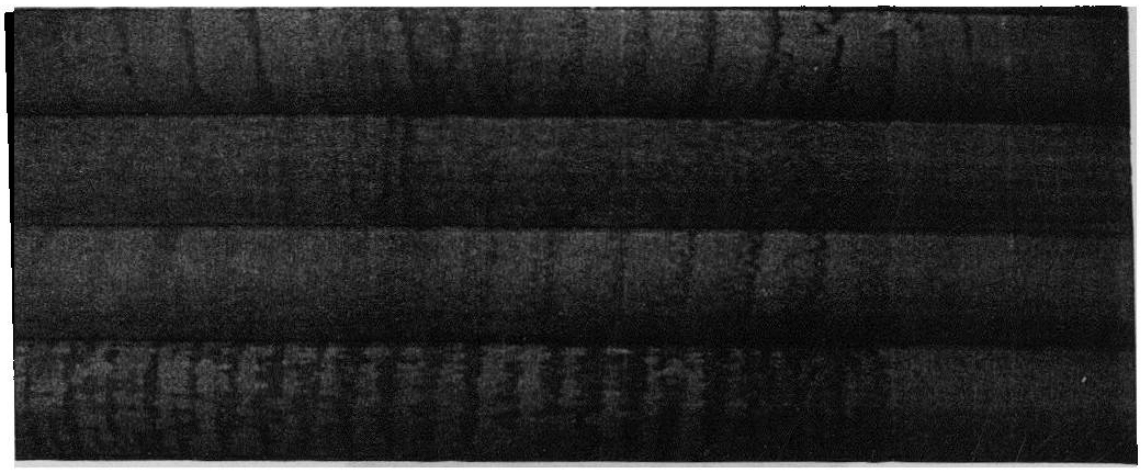
II CALENTAMIENTO EN HORNO DE RESISTENCIAS ELECTRICAS, TRANSPORTACION MEDIANTE RODILLOS DE SILICA, INYECCION DE $SO_2$.

III CURVADO DEL CRISTAL A 685 C.

IV TEMPLADO DEL CRISTAL MEDIANTE AIRE A TEMPERATURA AMBIENTE.

V INSPECCIÓN Y EMPAQUE.

Figura 4. Representación esquemática de una línea de templado de cristal automotriz.



Rodillos después de operación

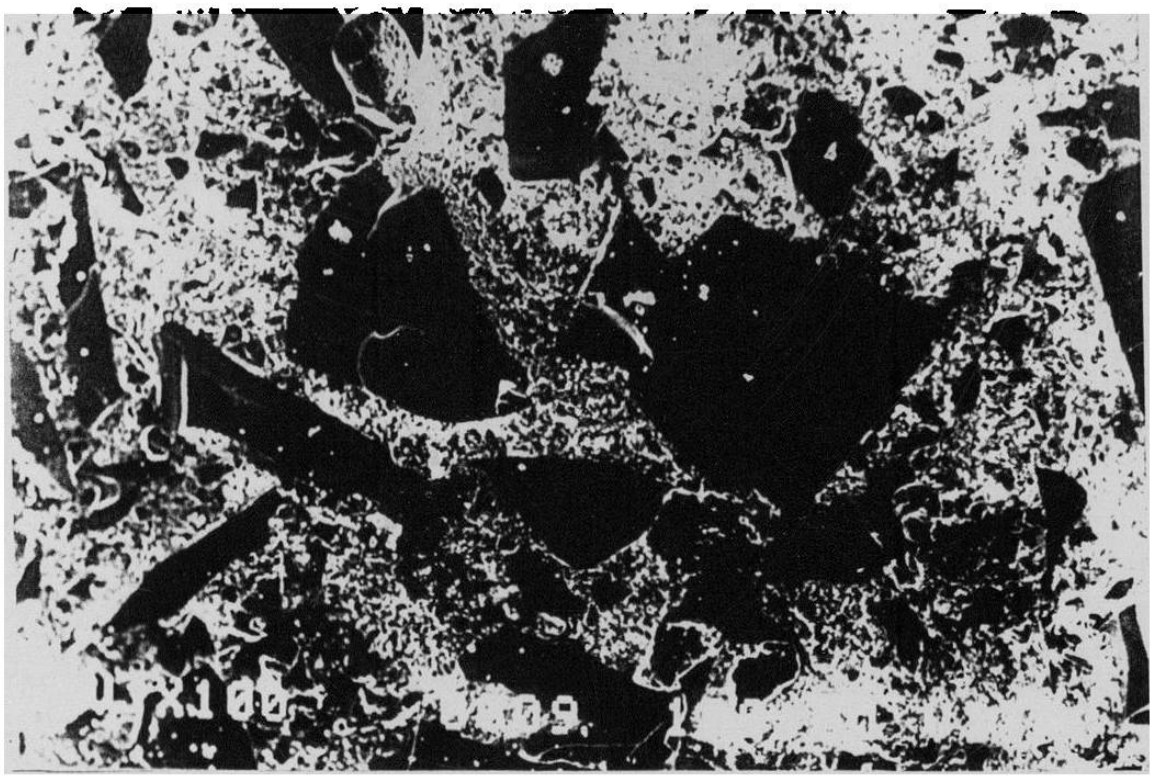



Imagen de la fractura interna de un rodillo x 100

Figura 5. Rodillos de sílica, medio de transportación de vidrio en el horno de templado.

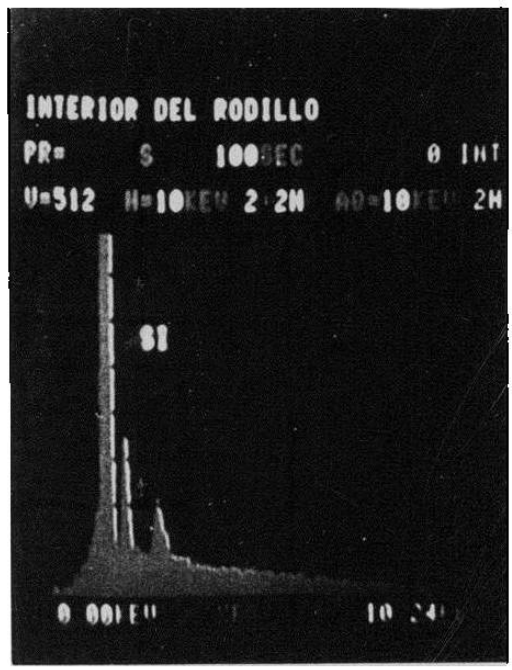



Figura 6. Análisis elemental del rodillo mostrado en la figura 5, solo se detecta Si.