

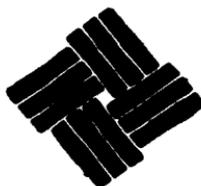
323 817

9
20

UNIVERSIDAD ANAHUAC

ESCUELA DE INGENIERIA

CON RECONOCIMIENTO DE VALIDEZ OFICIAL DE ESTUDIOS DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



UNIVERSIDAD ANAHUAC
VINCE IN BONO MALUM

ANALISIS DE LA DISTRIBUCION DE ESFUERZOS EN UN VIDRIO TRATADO TERMICAMENTE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

JUAN LUIS SANCHEZ GARCIA

ASESOR: ING. FRANCISCO HERRERA CASTAÑEDA

MEXICO, D. F.

1994

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

UNAM



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A Dios, que me dio unos padres que supieron enseñarme el camino sinuoso de la vida, unos hermanos que han sabido apoyarme en ese camino, una familia que ha sabido corregir mis fallas, unos amigos que me han sabido acompañar, y una mujer a quien darle mi amor y mi vida.

INDICE

| | | |
|------------|---|----|
| CAPITULO 1 | EL VIDRIO EN MEXICO | |
| | 1.1 GENERALIDADES | 4 |
| | 1.2 DIFERENTES TIPOS DE VIDRIO..... | 8 |
| | 1.3 FABRICACION DEL VIDRIO PLANO..... | 12 |
| | 1.4 DISTRIBUCION COMERCIAL EN MEXICO | 22 |
| CAPITULO 2 | EL VIDRIO TEMPLADO | |
| | 2.1 INTRODUCCION..... | 24 |
| | 2.2 TEORIA DEL TEMPLADO TERMICO..... | 26 |
| | 2.3 PROCESOS DE TEMPLADO..... | 27 |
| | 2.4 ESTRUCTURA MOLECULAR..... | 36 |
| | 2.5 PLANICIDAD ENTRE CARAS..... | 38 |
| | 2.6 ESFUERZOS PERIMETRALES..... | 45 |
| CAPITULO 3 | PRUEBAS PARA VERIFICAR LA CALIDAD DEL VIDRIO TEMPLADO | |
| | 3.1 PRUEBAS DESTRUCTIVAS..... | 50 |
| | 3.2 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS..... | 55 |
| CAPITULO 4 | DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS | |
| | 4.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO..... | 72 |
| | 4.2 FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO..... | 76 |
| | 4.3 EXPERIMENTACION..... | 78 |
| CAPITULO 5 | ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS..... | 85 |
| CAPITULO 6 | CONCLUSIONES..... | 90 |
| CAPITULO 7 | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS..... | 92 |

CAPITULO 1
EL VIDRIO EN MEXICO

1.1 GENERALIDADES DEL VIDRIO

El vidrio es un cuerpo duro y frágil, generalmente transparente, que resulta de la solidificación, al enfriarse, de una mezcla fundida de arenas silíceas, cal, y carbonatos de sodio o de potasio. Este es siempre una mezcla de tres clases de componentes, unos de los cuales son vitrificantes, (sílice, anhídrido bórico), otros fundentes (carbonato de sosa, álcalis, etc), y otros por último estabilizantes (cal). Si bien los componentes son cristalinos, no ocurre lo mismo con la materia vítrea que se obtiene al solidificarse la mezcla, ya que ésta, por más que se le dé muchas veces el nombre de cristal, es desde el punto de vista físico, un líquido cuya dureza debe interpretarse como la consecuencia de una extraordinaria viscosidad.

Un cristal es un cuerpo solidificado en forma poliédrica.

Vidrios planos transparentes y translúcidos:

Se denomina vidrio plano a todo producto de vidrio en forma de lámina o placa transparente, translúcida u opaca, incolora o de color, que se obtiene por los procesos de soplado, estirado, colado, laminado o flotado. Generalmente se agrupa a estos productos en dos categorías: vidrio plano pulido y vidrio plano estirado.

El vidrio plano pulido incluye las placas de vidrio plano transparente e incoloro cuyas dos caras perfectamente planas, pulidas y paralelas originan una visión nítida, sin distorsión. Este material, obtenido por colado o laminado y pulido posterior, o bien, desde hace pocos años, por flotado, se denomina comunmente (e incorrectamente) "cristal", denominación que proviene del uso común en Italia y Francia. Por supuesto, nada tiene que ver este vidrio con el "cristal al plomo" u otros productos de vidrio que reciben la misma denominación, el uso indiscriminado de la palabra "cristal" le ha hecho perder todo significado técnico y provoca confusiones, especialmente en las transacciones comerciales, razón por la cual se recomienda utilizar la denominación correcta ; vidrio plano pulido.

El vidrio plano estirado, también denominado "vidrio para ventanas", o "vidrio en hojas", se fabrica por estiramiento continuo (procesos Fourcault, Pittsburgh y derivados); sus caras son pulidas "a fuego", pero no son perfectamente planas y paralelas presentando ondulaciones. En la tabla 1.1 se indican las denominaciones que se da a los más importantes productos de vidrio plano en distintos idiomas.

TABLA 1.1 NOMENCLATURA DE ALGUNOS PRODUCTOS DE VIDRIO PLANO
SEGUN LA "INTERNATIONAL COMMISSION OF GLASS."

| INGLES | FRANCES | ALEMAN | ESPAÑOL |
|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| flat glass | verre plat | Flachglas | vidrio plano |
| sheet glass | verre á vitres | Tafelglas | vidrio de ventanas vidrio estirado |
| cast glass | verre coulé | Gussglas | vidrio colado |
| rolled glass | verre laminé | gewalzttes Glas | vidrio cilindrado |
| figured glass patterned glass | verre imprimé | Ornamentglas | vidrio impreso |
| plate glass | glace polie | Spiegelglas | vidrio plano pulido |
| safety glass | verre de securité | Sicherheitsglas | vidrio de seguridad |
| laminated safty glass | verre de securité feuilleté | Verbunds-sicher heitsglas | vidrio laminado armado (sandwich) |

La expresión general, vidrios planos, identifica, así mismo, a una rama específica de la industria vidriera que abarca una gran variedad de productos, los cuales pueden provenir directamente de una industria primaria, o sea establecimiento industrial que posea hornos de fusión y lleve a cabo todas las operaciones necesarias hasta llegar al producto final, o bien pueden ser el resultado de una segunda elaboración por parte de una industria transformadora, que utiliza como materia prima el vidrio producido por alguna industria primaria. Las operaciones de segunda elaboración pueden incluir una o varias de las siguientes operaciones: corte, curvado, tallado, biselado, esmerilado, espejado, templado, etc. o bien la fabricación de productos compuestos en combinación con otros materiales (caso de los vidrios laminados, los paneles aislantes, los vidrios reflejantes, etc).

En lo que respecta a su composición química, los distintos tipos de vidrio plano incoloro fabricados en la actualidad tienen composiciones muy similares (TABLA 1.2), los coloreados incluyen el agregado de algún agente colorante a esas composiciones y los opales de algún agente que provoque la aparición de fases cristalinas (fluoruros o fosfatos).

TABLA 1.2 COMPOSICION QUIMICA TIPICA DE VIDRIOS PLANOS
FABRICADOS EN DISTINTOS PROCESOS. (% EN PESO)

| PROCESO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Na ₂ O | SO ₃ |
|----------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------|-----|-------------------|-----------------|
| ESTIRADO FOURCAULT (E.E.U.U.) | 72.9 | 0.5 | 0.2 | 7.9 | 2.8 | 15.0 | - |
| ESTIRADO FOURCAULT (BELGICA) | 72.0 | 0.6 | 0.2 | 10.4 | - | 16.0 | 0.8 |
| ESTIRADO PITTSBURGH | 72.5 | 1.5 | 0.1 | 8.0 | 3.9 | 13.5 | 0.5 |
| LAMINADO | 70.8 | 0.2 | 0.2 | 12.7 | 1.7 | 13.7 | - |
| PLANO PULIDO | 72.5 | 0.5 | 0.1 | 11.8 | 1.2 | 13.4 | 0.5 |
| FLOTADO | 71-73 | 0.5-2 | s/d* | 9.5-13.5 | - | 13-16 | - |

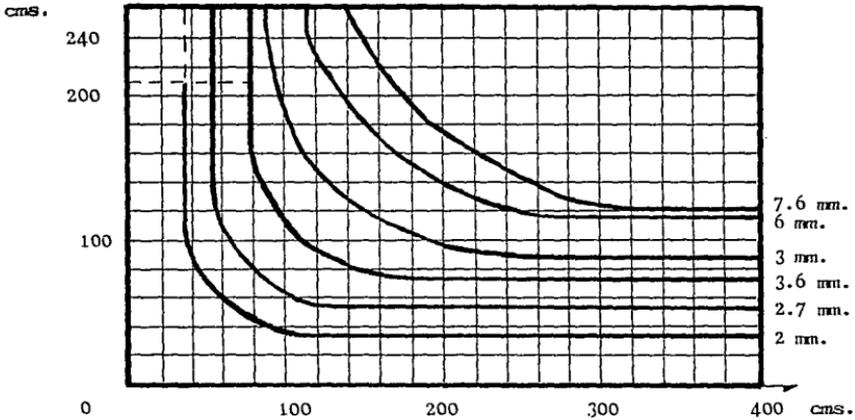
(s/d sin datos)

Para cálculos aproximados se toma una densidad de 2.45 g/cm³, así una placa de vidrio de 1m² de superficie y 2 mm de espesor pesa aproximadamente 5 Kg y para el mismo espesor, una tonelada de vidrio corresponde a una superficie de unos 200 m². Es importante tener en cuenta que muchas estadísticas se dan en m² de vidrio plano, sin indicar el espesor, lo que impide, en esos casos, calcular el peso correspondiente, otras veces se dan valores de producción o consumo "reducidos" a 2 mm ó a 3 mm de espesor, para poder efectuar comparaciones. También se han desarrollado gráficas para poder calcular el espesor del vidrio en función de la presión de viento, como la figura 1.1 en la cual se puede calcular el cristal para presiones de viento de hasta 100 km/h en forma continua o hasta 132 km/h en ráfagas, y hasta 12 metros de altura.

El vidrio pulido y el vidrio flotado presentan características y requerimientos similares entre sí, actualmente en México existen tres calidades principales:

- 1) calidad automotriz (gran exigencia en cuanto a defectos)
- 2) calidad construcción (admite cantidades mínimas de burbujas)
- 3) vidrio normal (admite burbujas y es más ondulado)

FIGURA 1.1 SELECCION DEL ESPESOR DEL VIDRIO PLANO PARA VENTANAS. (LOS VIDRIOS PAG. 375)



El vidrio plano translúcido se fabrica en una gran variedad de espesores, que en México van de 2 mm a 19 mm y hasta de 6 metros de largo en sus diferentes tonalidades.

Cada día los vidrios planos toman una mayor importancia y participación en el diseño arquitectónico, ya que gracias a su alta eficiencia para aislar acústica y térmicamente, aunado con su elegante apariencia resultan muy atractivos y duraderos para ser utilizados en muchos edificios.

1.2 TIPOS DE VIDRIO

Actualmente existen diferentes tipos de vidrios, éste debe seleccionarse de acuerdo al uso, y condiciones. los mas comunmente conocidos son los siguientes:

El Vidrio Recocido

Se le llama vidrio recocido, a aquel vidrio, que ha sido liberado de sus esfuerzos luego de ser fabricado, esto se realiza por medio de un enfriamiento paulatino, lo cual permite que el cristal sea un vidrio blando, esto significa que es fácil de cortar. La mayoría del vidrio utilizado en la Industria de la Construcción, y en la Mueblera, es de este tipo, teniendo la desventaja de ser relativamente frágil al impacto, y fracturarse en piezas grandes y cortantes.

El Vidrio Templado

Los vidrios de seguridad templados son hoy en día de uso corriente en puertas de edificios, mamparas, antepechos, vidrieras y cerramientos de todo tipo, así como en ventanillas de vehículos. Si bien las técnicas de templado se conocen desde el siglo pasado, las tecnologías de fabricación de vidrios planos templados en escala industrial sólo se desarrollaron a partir de la década de los 50's. Se trata de vidrios planos sometidos a un tratamiento de templado térmico, consistente en un calentamiento hasta la proximidad del punto de ablandamiento, y un enfriamiento rápido (producido generalmente por chorros de aire proyectados a presión sobre las caras). El vidrio así tratado, presenta sus capas superficiales a compresión y en su zona interna en tensión (tracción), lo que aumenta notablemente, (del orden de unas cinco veces) su resistencia mecánica. Cuando se rompe, las tensiones internas liberadas hacen que se fragmente en trozos muy pequeños, de forma aproximadamente cúbica y sin bordes cortantes y, por consiguiente, ino cuos.

Con respecto a los mismos vidrios perfectamente recocidos, además de presentar una resistencia al impacto, a la flexión y a los choques térmicos muy superior, los vidrios templados térmicamente presentan una resistencia química algo menor y densidad e índice de refracción también más bajos. El proceso de "templado químico", por su elevado costo, no se utiliza en el caso de los vidrios planos.

La rotura de los vidrios templados siempre tiene lugar en forma explosiva. Muchas veces la causa no es aparente, rompiéndose "solos" o por acción de un esfuerzo mecánico relativamente menor. La explicación está en que los sucesivos impactos, flexiones y demás esfuerzos van creando microfisuras sobre las superficies y alterando el equilibrio de las tensiones, y cuando se llega a una situación límite en algún punto del material, éste se destruye catastróficamente. Los tamaños de los fragmentos dependen de la distribución de las tensiones, y ésta a su vez de la forma en que se llevó a cabo el enfriamiento.

Es necesario tener presente que sólo pueden templarse eficazmente vidrios con sus superficies perfectamente lisas y sin fisuras, dado que la distribución de las tensiones no sería simétrica y, por lo tanto, su resistencia mecánica sería muy baja. Además, una vez templado el vidrio no se puede someter a ningún tipo de trabajo mecánico (corte, perforación, biselado, pulido, etc), ya que al alcanzar las fisuras la zona central en tracción se produciría la rotura. También deben curvarse previamente (caso de los vidrios automotrices). Para fabricarlos se parte, por lo tanto, de vidrios planos (estirados, pulidos, o flotados) de primera calidad, con un mínimo de defectos (siendo las exigencias máximas para el caso de ventanillas para vehículos), ya cortados y conformados en su diseño definitivo. Para aplicaciones en arquitectura, se fabrican también planchas de vidrio templado esmaltadas a color (y por lo tanto opacas) o bien con dibujos para fines ornamentales u otros. El esmaltado con pintura vitrificable se hace previo al proceso de templado.

Las planchas de vidrio templado se prestan favorablemente, en la construcción de edificios, para la colocación suspendida, permitiendo así el cierre de espacios de grandes dimensiones con visibilidad prácticamente total. Para disminuir la presión del viento se colocan costillas o "contrafuertes" del mismo material. El vidrio resulta así sometido solamente a la acción de su propio peso y a la presión del viento.

El Vidrio Laminado

Los vidrios de seguridad laminados o "inastillables", están constituidos por dos placas de vidrio plano unidas rígidamente entre sí por medio de una lámina plástica. En caso de rotura, los fragmentos quedan adheridos al plástico impidiendo daños a las personas o a las cosas, conservando el cierre del vano y permitiendo la visibilidad. Las planchas pueden ser vidrio plano estirado, pulido o flotado, recocido o templado, confiéndole, en este último caso, la mayor resistencia mecánica posible. Puede haber varias capas vidrio/plástico superpuestas (vidrios "antibalas", ventanillas de aviones), y pueden ser incoloros o de color. El color puede ser el de la lámina plástica, o bien usarse vidrios coloreados. Como puede verse, la cantidad de combinaciones posibles es muy grande, para satisfacer los más diversos requerimientos.

El origen de estos vidrios parece haber sido casual. Su inventor, el químico francés F.E. BENEDICTUS, Ha relatado que mientras ordenaba su laboratorio (a principios del año 1903), cayó un recipiente redondo al piso desde una altura de 3 metros. El recipiente se rompió pero para su sorpresa, los trozos quedaron unidos manteniendo la forma original. Un examen posterior le permitió establecer que el recipiente contenía nitrocelulosa, y que por evaporación del solvente, había quedado una delgada película del polímero ("celuloide") sobre las paredes, a la cual quedaron adheridos los fragmentos de vidrio resultantes de la rotura. En esos días ocurrieron algunos accidentes automovilísticos que por sus características (y por ser seguramente los primeros) impresionaron grandemente al público, ya que los accidentados quedaron desfigurados por los trozos de vidrio del parabrisas, y en algunos casos murieron por cortaduras producidas por los mismos. BENEDICTUS desarrolló el primer vidrio de seguridad al unir dos láminas de vidrio mediante una lámina de "celuloide", patentó su invento en 1910 y fundó la hoy famosa empresa Triplex. El vidrio de seguridad tuvo un

rápido desarrollo dentro las dos guerras mundiales, y en particular cuando la firma Ford de los Estados Unidos lo adaptó a sus parabrisas, lo que fue seguido de normas oficiales obligatorias en ese país, Inglaterra y Francia.

En sus primeras épocas estos vidrios eran sumamente costosos, para la fabricación se requería vidrio plano pulido de la mejor calidad, y el celuloide era también costoso. La superficie del vidrio se recubría con gelatina, y luego se aplicaba la capa de barniz de nitrocelulosa, y se comprimía encima de la otra lámina de vidrio. A continuación, el conjunto se sumergía en un baño de alcohol de temperatura controlada, y finalmente, se comprimía a alta temperatura (200-250 °C) los bordes debían sellarse con alquitrán para impedir la entrada de humedad. Se probaron más tarde otros plásticos, hasta que en 1947 se desarrolló con gran éxito el polivinilbutiral (PVB) prácticamente insensible a la humedad y muy estable a la luz, usándose en espesores de 0.6 a 0.8 mm.

El método de fabricación actual implica en primer lugar la preparación de láminas de vidrio (planas previamente curvadas) que van a pegarse entre si y que deben corresponderse exactamente en toda su superficie, su limpieza y "armado", con la capa de PVB en un ambiente con aire acondicionado y filtrado, finalmente la adhesión a presión en autoclave.

Los largos años de uso del vidrio laminado de seguridad han permitido establecer, sin lugar a dudas, su elevada efectividad, no solamente en el caso de parabrisas de automóviles, sino en ventanillas de toda clase de medios de transporte terrestres, marítimos y aéreos, y también en ventanas, cerramientos, vidrieras, protección de instrumentos y objetos de valor, y otras aplicaciones especiales. Desde este punto de vista es superior al vidrio de seguridad templado, aunque naturalmente es más costoso. La combinación de vidrio templado, con láminas de PVB es la que ofrece la máxima seguridad. Gran número de normas, nacionales como la NOM-P-10, NOM-P-5, etc, e internacionales como la ASTM y la ANSI, regulan el uso y las características de estos vidrios.

Los Vidrio Planos y la Seguridad.

Se denominan vidrios de seguridad a aquellos fabricados o tratados de manera tal que el riesgo en caso de accidentes se reduzca notablemente. Tanto en el caso de ventanas y cerramientos en general, como en el de las ventanillas de vehículos de todo tipo (automóviles, vagones de ferrocarril, aviones, etc.), los vidrios están sometidos a una serie de esfuerzos mecánicos (presión del viento, impacto de objetos o personas, flexión durante el uso, y otros), que deben resistir sin romperse y, en caso de rotura hacerlo en forma tal, que los fragmentos no constituyan un peligro para la integridad de las personas, dado que los bordes de las "astillas" suelen ser extremadamente filosos, debido justamente al tipo mismo de rotura frágil sin deformación plástica. En lo que respecta a la presión del viento, ella depende de la velocidad "V" y está dada, para una incidencia de ángulo recto, por la fórmula $P = V^2 / 16$, en la tabla 1.3 se muestra la presión correspondiente a distintas velocidades del viento.

TABLA 1.3 PRESION SOBRE LA SUPERFICIE DE UN VIDRIO PLANO CORRESPONDIENTE A DISTINTAS VELOCIDADES DE VIENTO QUE INCIDE EN FORMA PERPENDICULAR

| Velocidad (m/s) | Presión (kgf/m ²) |
|-----------------|-------------------------------|
| 6 | 2 |
| 8 | 4 |
| 10 | 6 |
| 12 | 9 |
| 14 | 12 |
| 16 | 16 |
| 18 | 20 |
| 20 | 25 |
| 22 | 30 |
| 24 | 36 |
| 26 | 42 |
| 28 | 49 |
| 30 | 56 |

Para incidencia oblicua, dicha presión siempre es menor que para la incidencia perpendicular. Sobre la base del valor de presión se puede seleccionar el espesor más adecuado, existiendo distintas especificaciones al respecto. Los vidrios de seguridad permiten utilizar espesores menores para igual presión del viento que los vidrios planos comunes sin ningún tratamiento térmico.

Uno de los primeros vidrios de seguridad fue el denominado vidrio armado; con él se fabrican techos y claraboyas, y en su uso como vidrio resistente a impactos ha sido gradualmente sustituido por los vidrios tratados descritos anteriormente, actualmente se le usa más para evitar la propagación de incendios y para impedir la caída de trozos de vidrio en caso de rotura, ya que ellos quedan adheridos a la red metálica. Por lo general se fabrica en espesores de 5 a 7 mm. con malla metálica cuadrada (12 x 12 mm) o hexagonal (21.5 mm de lado) Las uniones pueden ser torcidas o soldadas, también se le fabrica ondulado, por curvatura del vidrio armado plano en moldes especiales a alta temperatura.

Actualmente hay dos tipos básicos de vidrios de seguridad: los vidrios tratados térmicamente o "templados", y los vidrios laminados, o "inastillables"

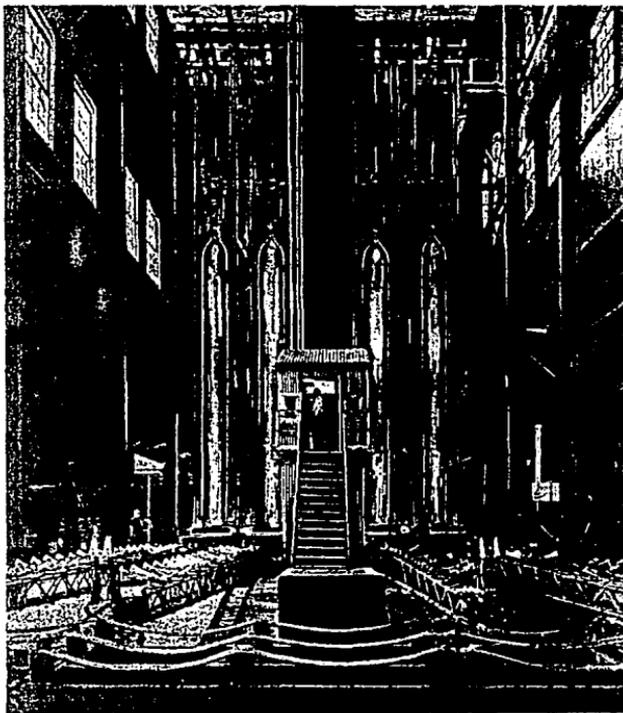
1.3 FABRICACION DEL VIDRIO PLANO

Aún cuando el soplado del vidrio es un arte muy antiguo, sus primeras aplicaciones en vidrio para ventana, lo llevaron a cabo los Sirios durante el siglo VII, cuando se desarrolló el "Proceso de Corona", una combinación de soplado y girado, en donde se formaba una burbuja de vidrio con un tubo metálico, juntando un pico metálico al lado contrario del tubo de soplado, removiendo el extremo, y girando la burbuja, se deja hasta que la fuerza centrífuga aplana a la burbuja abierta para formar un disco con un diámetro de 90 centímetros a 1 metro, posteriormente se cortaban cuadros pequeños de las partes suaves del vidrio, el vidrio fabricado para ventanas entonces se fabricaba casi todo con este proceso, incluso muchas de las famosas catedrales Europeas tienen este tipo de vidrio, agregándole un valor artístico.

Posteriormente en los siglos XII y XIII se comenzó a fabricar con el método del cilindro manual, el cual era fabricado comenzando por una burbuja soplando por un tubo metálico, a esta se le va girando en forma de péndulo y soplando hasta que se alcance el tamaño deseado, se va aumentando el grosor de las paredes volviendo a sumergirlo en el vidrio fundido una vez que se ha endurecido algo y esto se repite varias veces hasta obtener el espesor deseado, posteriormente se cortan los extremos y por el centro, luego se vuelve a calentar para que por gravedad se forme una placa de vidrio, se deja enfriar lentamente, finalmente se corta a la medida deseada, con este método se obtuvieron las láminas de mayor tamaño en ese tiempo de hasta tres metros cuadrados, sin embargo este vidrio soplado era de muy baja calidad comparado con los fabricados actualmente, el proceso producía rayas y burbujas, la superficie era rugosa en apariencia por su proceso de enfriamiento y de calentamiento, al igual que tampoco era completamente plano ni uniforme en su espesor. Excepto por la producción de piezas muy baratas de gafas para el sol, o de vidrios decorativos, este proceso está prácticamente obsoleto.

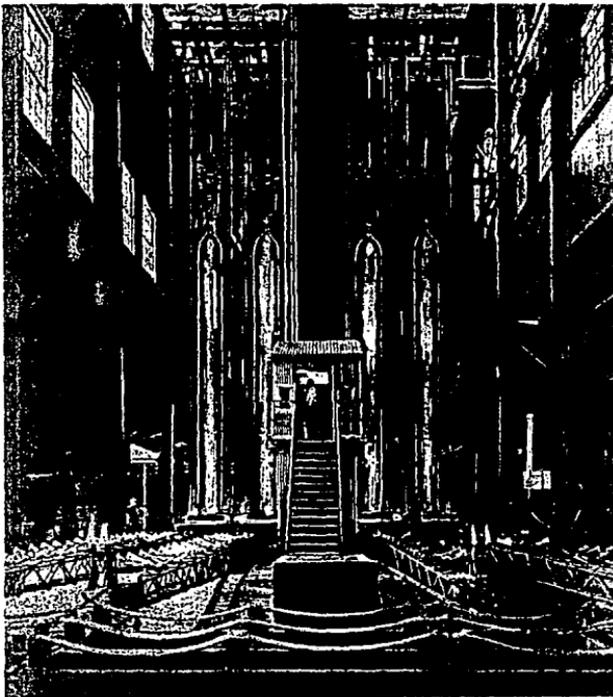
La fabricación de hojas de vidrio mecanizada a gran escala tuvo lugar a principios de este siglo en 1903, en donde Lubber y la "AMERICAN WINDOW GLASS COMPANY" desarrollaron un método para fabricar cilindros muchas veces más grande que los fabricados a mano, llegando a fabricarse de hasta 12 metros de largo y de 90 centímetros de diámetro, con un método similar pero automatizado, de igual manera que en el proceso manual los extremos son cortados y luego es recalentado para hacerlo plano, cortándolo posteriormente en las medidas deseadas. figura 1.2

FIGURA 1.2 MAQUINA PARA FABRICAR VIDRIO POR BURBUJAS
(DISEÑO DE AMERICAN WINDOW GLASS COMPANY)
pag.. 692 The Handbook of Glass Manufacture vol. II



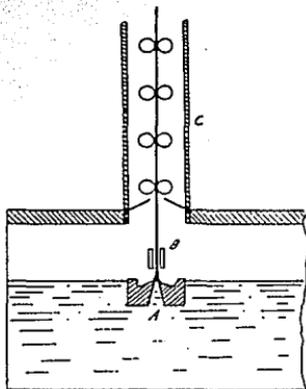
Después de que en 1903 Lubber mecanizó el proceso de cilindros soplados, éste comenzó a tener un crecimiento muy fuerte hasta principios de los años veintes, cuando el proceso de "Fourcault" comenzó a demostrar su superioridad, ya que el sistema de burbujas cilíndricas de Lubber no era continuo y con muchas imperfecciones además de laborioso, fue en 1929 cuando la última máquina de este tipo funcionó. En el método de Fourcault (figura 1.3) el vidrio es extraído verticalmente a través de un refractario ranurado llamado "Debiteuse" en un cordón continuo.

FIGURA 1.2 MAQUINA PARA FABRICAR VIDRIO POR BURBUJAS
(DISEÑO DE AMERICAN WINDOW GLASS COMPANY)
pag.. 692 The Handbook of Glass Manufacture vol II



Después de que en 1903 Lubber mecanizó el proceso de cilindros soplados, éste comenzó a tener un crecimiento muy fuerte hasta principios de los años veintes, cuando el proceso de "Fourcault" comenzó a demostrar su superioridad, ya que el sistema de burbujas cilíndricas de Lubber no era continuo y con muchas imperfecciones además de laborioso, fue en 1929 cuando la última máquina de este tipo funcionó. En el método de Fourcault (figura 1.3) el vidrio es extraído verticalmente a través de un refractario ranurado llamado "Debiteuse" en un cordón continuo.

FIGURA 1.3 PROCESO CONTINUO DE FOURCAULT
 A) REFRACTARIO O "DEBITEUSE"
 B) ENFRIADORES C) TRANSPORTADOR VERTICAL
 pag. 693 The Handbook of Glass Manufacture vol II



El problema principal de este sistema, es la tendencia a bajar, o escurrirse, volviéndose un cordón muy delgado, esta dificultad fue superada agregando unos rodillos que prácticamente agarraban a la hoja en su orilla instalados poco arriba del "Debiteuse". La superficie del vidrio fabricado con este método tenía lo que se llama acabado o pulido a fuego, que es el acabado brillante que se obtiene al permitir que el vidrio fundido se enfríe sin tener contacto con ninguna superficie sólida mientras permanece suave, de cualquier forma el cordón solidificado tiene un cierto límite permisible de ondulaciones, que no pueden ser evitadas, las cuales son generadas por pequeñas diferencias en la viscosidad, y éstas a su vez provocadas por la falta de homogeneidad química y térmica.

En la producción con este método se pueden observar corridas con gran calidad, con mediocre calidad, y con mala calidad, y esto se puede deber por factores como:

- 1) La corrosión en los refractarios.
- 2) Deterioro en el funcionamiento de la máquina.
- 3) Cambios atmosféricos en el estirado.
- 4) Factores humanos.

Este refractario (Debiteuse) utilizado en el sistema Fourcault tiene una forma muy especial. Con una apertura diseñada científicamente por donde el cordón de vidrio de cualquier espesor o solidez puede ser estirado verticalmente, este refractario flota

sobre el vidrio debido a al gran diferencia de densidades, sin embargo tiene un sistema que permite bajarlo sin que el vidrio rebasa sus superficie.

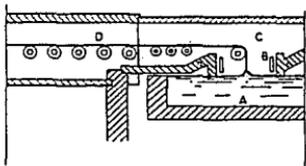
Para el control del espesor se deben controlar cuatro variables:

- 1) Mientras más alta este la temperatura del vidrio fundido se obtienen láminas más delgadas.
- 2) Mientras que el nivel de flotación del refractario sea menor el vidrio se obtiene más grueso, o la velocidad de estirado es mayor
- 3) Mientras más cercanos estén los enfriadores al vidrio, y menor sea la temperatura del agua circulante, se obtiene vidrio con mayor espesor
- 4) La velocidad del estirado, mientras más rápido sea, el vidrio es más delgado.

Mientras Fourcault desarrollaba su sistema continuo vertical en Bélgica, en Estados Unidos de Norte América en 1910 Colburn trabajaba independientemente en jalar el vidrio de forma de hojas planas. Las ideas de Colburn para un proceso continuo de hojas planas fue desarrollado exitosamente por Libbey-Owens-Ford Company. (figura 1.4) El vidrio fundido es enfriado un poco en el trayecto del tanque de fusión a la cámara de estirado, en donde es recalentado a una temperatura uniforme, en preparación para un estirado de poca distancia hasta un rodillo en donde da vuelta y se transporta de forma horizontal, para recocer. en este proceso no se utiliza ningún refractario como el Debiteuse u otro, y se obtienen láminas de vidrio de 2.5 metros hasta 4 metros de ancho, y de 0.88 mm hasta 5.6 mm de espesor, desde luego que la uniformidad de la temperatura y la composición del cristal son de suma importancia

FIGURA 1.4 PROCESO CONTINUO LOF-COLBURN

- A) VIDRIO FUNDIDO B) ENFRIADORES
C) RODILLO DE TRACCION D) TRANSPORTADOR HORIZONTAL
pag. 694 The Handbook of Glass Manufacture vol II



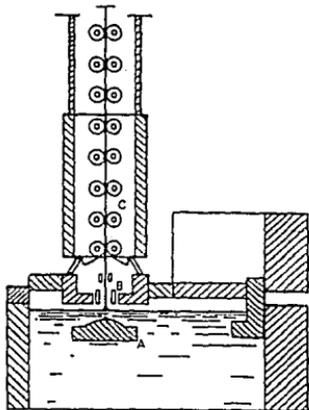
Proceso Pittsburgh; éste fue introducido en el año de 1925 por la compañía Pittsburgh Plate Glass, ahora P.P.G. Industries, Inc. Es un sistema similar al de Fourcault, excepto que el refractario flotante es sustituido por un una barra sólida sumergida,

la cual tiene una ceja y esta es sumergida unas cuantas pulgadas abajo de la superficie del vidrio fundido, y su fin es de marcar la línea de origen de la lámina y controlar las corrientes de convección en la cámara de estirado, (figura 1.5) Normalmente se instalan cuatro máquinas alimentadas por un tanque de 1200 ó 1400 toneladas, produciendo aproximadamente 250 toneladas al día, en años recientes, el número de máquinas por tanque se ha incrementado, hasta ocho, y no es raro llegar a encontrar 10 por tanque. La calidad producida por este sistema ha sido mejorada considerablemente. P.P.G. anunció recientemente que el vidrio estirado es igual o mejor que el vidrio flotado, y se puede producir desde 1.27 mm hasta 3.2 mm. La calidad y ventajas en costos son significantes en los rangos bajos de espesor, en donde se tienen muchas aplicaciones inmediatas.

FIGURA 1.5 PROCESO CONTINUO VERTICAL DE PITTSBURGH PLATE GLASS COMPANY.

- A) REFRACTARIO SUMERGIDO B) ENFRIADORES
C) TRANSPORTADOR VERTICAL

pag. 695 The Handbook of Glass Manufacture vol II



El vidrio en placa "Plate Glass" se define como transparente, plano, teniendo superficies planas y pulidas, sin mostrar distorsión al reflejar o ver objetos a través de él a cualquier ángulo, en los últimos años este ha sido utilizado para la fabricación de espejos. Hoy en día sus aplicaciones se han extendido a la industria automotriz, la construcción, y la industria mueblera.

Los métodos utilizados para producir placas de vidrio pulidas y aquellos requeridos para ventanas son muy diferentes después de que el procesos de fundición y de revenido, es en el rolado, en el pulido y en el abillantado en lo que se distingue las placas o láminas pulidas a los vidrios para ventanas.

Mientras el vidrio estirado y pulido a fuego mantiene su brillo y transparencia al no tener contacto físico en sus caras sino hasta estar perfectamente solidificado, el vidrio rolado pierde estas propiedades por el contacto con la base o mesa y por el otro lado con el rodillo, por lo que para poder restaurar esto, en estas fábricas de vidrio se pueden encontrar básicamente dos secciones;

- 1) la operación de fabricación de las láminas de vidrio
- 2) el pulido y abrillantado de sus caras.

El primer paso en el proceso de fabricación del vidrio en placas consiste en fundir la materia prima, en un tanque, vaciarlo en una mesa o base, rolar o aplanar el vidrio, y en la segunda etapa es el acabado o el pulido de las placas de vidrio, en este proceso las placas obtienen una planicidad casi perfecta y de caras paralelas por lo que al contrario de otras láminas de vidrio no hay distorsión perceptible de objetos vistos a través de este vidrio

Para lograr satisfacer los requerimientos de variedad de placas de vidrio actualmente se deben de producir diferentes colores, espesores, composiciones y tamaños al igual que deben de mantener altos estándares de calidad por lo que se han desarrollado tres diferentes métodos de fabricación:

- 1) Vaciado (pot casting)
- 2) lading
- 3) Tanque de rolado continuo

Este último utilizado para altos volúmenes de producción

Excepto por los procesos preliminares los tres procesos son esencialmente iguales, los primeros dos se utilizan para hacer composiciones especiales y colores especiales utilizados en cantidades bajas, o para los tamaños grandes también llamados "jumbo", el método de rolado continuo se emplea en líneas de producción alta y para vidrio que van desde 7/64 a 1 1/4 pulgadas de espesor (de 2.7 mm a 31.7 mm)

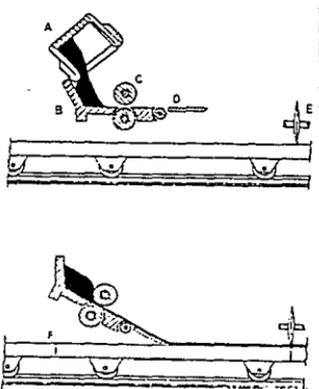
Posteriormente Bicheroux hizo cambios significantes a la máquina de P.P.G. Industries. Inc. sustituyendo el rodillo de aplanado por dos rodillos logrando láminas más suaves y por lo mismo menos pérdidas de tiempo y de material, en las operaciones de pulido posteriores.

Cuando la lámina es formada por dos rodillos, el tiempo de contacto entre el vidrio y los rodillos es muy corto, más uniforme y un enfriamiento menos severo.

En el proceso exitoso de Bicheroux se empleaban dos rodillos del mismo diámetro, el contenedor con vidrio se vacía en un recipiente metálico, éste alimenta a una velocidad sincronizada con una mesa en donde se va depositando el vidrio ya moldeado y cortando en caliente. (figura 1.6)

FIGURA 1.6 SISTEMA BICHEROUX

- A) CONTENEDOR DE VIDRIO EN POSICION DE VACIADO
B) RECEPTOR DE VIDRIO C) RODILLOS FORMADORES
D) MESA DE DESLIZAMIENTO E) CORTADOR DE VIDRIO CALIENTE
F) MESA MOVIL DE ENDURECIMIENTO
pag. 699 The Handbook of Glass Manufacture vol II



El recipiente o moldeador puede llegar a contener hasta 2.6 metros cúbicos de vidrio y fabricar láminas de 3.65 metros de ancho y desde 12.2 hasta 30.48 metros de largo dependiendo de el espesor.

El sistema de rodillos de P.P.G. Industries Inc. es similar al de Bicheroux en cuanto que el vidrio es fundido en recipientes individuales, y moldeado por rodillos, este método difiere principalmente en el tipo de rodillos, en el método utilizado para depositar el vidrio y para sacarlo de los rodillos (figura 1.7), El vidrio fundido es depositado directamente sobre un rodillo cilíndrico de un diámetro de aproximadamente 3.65 metros de diámetro, este cilindro es equivalente a la mesa de carga, como se puede ver en este caso no es necesario utilizar un recibidor debido al diámetro del cilindro, posteriormente se deposita en contenedores para su recocido, los cuales deben de ser de un tamaño bastante grande

Proceso Vaciado Continuo

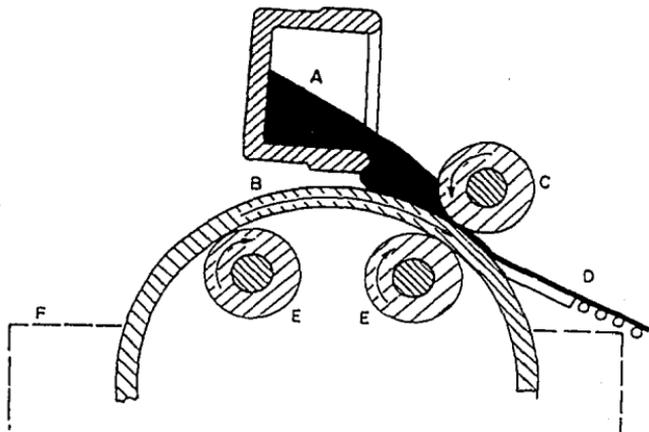
Al principio el proceso de tanque con cordón continuo se presentó con dos problemas principales, primero el vidrio fabricado con tanque era considerado de menor calidad que el de fundición en olla, segundo los mecanismos y otros artefactos eran responsables de mantener el ancho del cordón, y consecuentemente las dimensiones máximas de las láminas, las cuales eran muy pequeñas como para tomar una participación importante del mercado de vidrio. El sistema Bicheroux y P.P.G. de rodillo cilíndrico solucionó estos dos problemas, y permite el uso de pulido continuo, hoy en

da el ancho del cordón continuo por fundición en tanque ha crecido muchas veces, (107 cm a 335 cm) Este sistema tiene la desventaja de ser más lento que el de rolado, además de causar defectos como burbujas, contaminación, y algunos otros.

FIGURA 1.7 SISTEMA P.P.G. DE ANILLO

- A) CONTENEDOR DE VIDRIO EN POSICION DE VACIADO
- B) MESA DE ANILLO DE VACIADO
- C) RODILLO FORMADOR
- D) MESA DE DESLIZAMIENTO
- E) SOPORTES TRANSMISORES
- F) HORNO DE CALENTAMIENTO DE MESA.

pag. 700 The Handbook of Glass Manufacture vol II

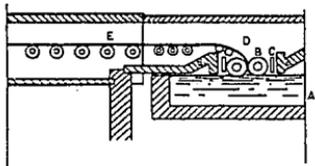


Posteriormente Libbey Owens, observando del éxito de Colburn con el sistema continuo vertical, modificó el sistema para poder así entrar al mercado de vidrio automotriz. En este sistema se jala al vidrio hacia arriba por medio de unos rodillos, acostándolo posteriormente, la superficie rugosa que queda después de rolarlo no es problema ya que este vidrio es pulido posteriormente, este proceso de rolado vertical fue muy utilizado por algunos años como complemento de la producción horizontal rápida con rodillos.

FIGURA 1.8 SISTEMA MODIFICADO POR LIBBEY OWENS

- A) VIDRIO FUNDIDO
- B) RODILLOS FORMADORES
- C) ENFRIADORES
- D) PRIMER TRANSPORTADOR
- E) TRANSPORTADOR HORIZONTAL

pag. 701 The Handbook of Glass Manufacture vol II



El sistema de rolado horizontal continuo que sigue utilizándose actualmente consiste básicamente en:

- 1) Hacer fluir el vidrio a través de una rendija cerámica, la cual le da una forma preliminar, con lo que el vidrio tiene tiempo para enfriarse
- 2) Se pasa a través de dos rodillos enfriados por agua, con lo que se le da el espesor y el ancho deseado.
- 3) se estira suavemente para mejorar su planicidad y finalmente
- 4) se pasa por una cámara de rodillos para recocido, y finalmente enfriándolo a la temperatura ambiente, de esta forma el vidrio puede ser fabricado de cientos de metros de largo y de 1.80 a 3.30 metros de ancho, la velocidad de fabricación es regulada por el nivel de vidrio, el espesor va de 3 mm a 25 mm. Este proceso puede operar de forma continua las 24 horas, con excepción de paros para mantenimiento.

El proceso de "VIDRIO FLOTADO"

Este proceso fue desarrollado por los hermanos Pilkinton en Inglaterra, y difiere radicalmente de los procesos anteriores, sin embargo existen varios pasos comunes, como son la fundición de la materia prima, la mezcla de los componentes, el corte de las láminas.

El proceso de flotado difiere de los otros, pues el vidrio fundido fluye horizontalmente de la cámara de fundición a la cámara de flotado, la cual es una especie de alberca poco profunda, de aproximadamente 48 metros de largo y de 3.6 metros de ancho, durante su paso por estos cuarenta y ocho metros en la cámara de flotado, el vidrio adquiere una forma perfectamente plana, y con una gran uniformidad de espesor, el producto final es una lámina plana y suave, sin requerir pulido, con este método se pueden obtener un rango amplio de espesores, (figura 1.9)

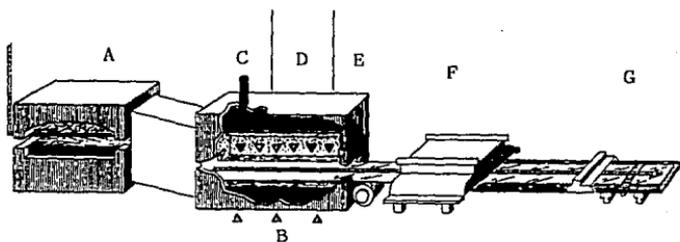
El estaño ha sido seleccionado como el medio de flotación, debido a que tiene una gravedad específica apropiada.

Posterior a la cámara de flotado, se tiene una cámara de recocido para liberar de esfuerzos al vidrio y poderlo cortar fácilmente.

FIGURA 1.9 SISTEMA DE VIDRIO FLOTADO

- A) VIDRIO FUNDIDO
- B) FLOTADO SOBRE ESTAÑO
- C) CALENTAMIENTO POR GAS
- D) ZONA DE PULIDO A FUEGO
- E) ZONA DE ENFRIAMIENTO (ATMOSFERA CONTROLADA)
- F) ZONA DE RECOCIDO
- G) SECCION DE CORTE.

pag. 710 The Handbook of Glass Manufacture vol II



Actualmente en México se utiliza principalmente el proceso de vidrio flotado, el cual produce una excelente calidad de vidrio, al igual que lo produce a un costo inferior al vidrio estirado, el vidrio producido en México tiene una calidad muy competitiva a nivel internacional incluso su proceso de recocido (liberación de esfuerzos) es superior al de algunos fabricantes internacionales ya que al ser suficientemente prolongado nos permite que el vidrio sea suave, es decir que pueda ser cortado fácilmente, por lo que también es más fácil de procesar en los cantos o para algún barreno. Actualmente existen muchos fabricantes a nivel internacional, como lo son Pittsburgh Plate Glass IND. GUARDIAN, etc. sin embargo a nivel nacional solo existe un solo fabricante importante que es el grupo "VITRO" los demás fabricantes nacionales, únicamente fabrican vidrio estirado, y con una calidad poco competitiva.

1.4 DISTRIBUCION COMERCIAL EN MEXICO

El vidrio de forma comercial se maneja en diferentes medidas estándar en México principalmente se utilizan las siguientes:

En vidrios planos delgados 3 mm, 1.8 m X 2.4 m

En vidrios de 4,5 mm 1.8 m X 2.6 m, 2.3 m X 2.6 m,

En vidrios de 6 mm 1.8 m X 2.6 m, 2.3 m X 2.6 m, 3.5 m X 2.6 m
pudiendo fabricarse medidas de hasta 6 m de largo

En vidrios gruesos se ocupan generalmente 1.52 m y 2.59 m X 3.25 m, pudiéndose fabricarse también de hasta 6 m de largo.

Es posible fabricarlo en medidas mayores, sin embargo, existe el problema de el transporte, ya que si el cristal es demasiado largo no cabría en el trailer, o si la altura es excesiva, pegaría en los puentes de las carreteras.

El vidrio se comercializa generalmente a granel, y este es transportado por camiones con una especie de pirámide con el cual se estiba el vidrio en paquetes y con separadores teniendo un menor riesgo de rotura, descargándose y cargándose generalmente con grúa, para lo cual se pueden encontrar diferentes sistemas como las llamadas zapatas las cuales son ya poco usadas al igual que las eslingas, actualmente se utiliza un sistema llamado Graff el cual incrementa la velocidad de carga y descarga evitando los riesgos de rotura por presión de los cables en las eslingas o en las zapatas.

Generalmente se cargan paquetes de menos de 2000 kgs para poder así tener un manejo mas rápido y seguro adicionalmente a estos sistemas, se han desarrollado diferentes tipos de transporte del vidrio en todo el mundo, buscando en todos los casos el menor riesgo, evitando manejos innecesarios, por lo que se han llegado a diseñar camiones en los cuales únicamente se engancha "la pirámide", y la levanta con un sistema hidráulico, sin embargo este sistema no ha sido utilizado en México debido a el tipo de caminos ya que este sufriría muchas roturas al viajar tan cerca del suelo, otra ventaja que tiene este sistema es que la carga va a un nivel bajo, por lo que tiene posibilidades de transportar carga de mayor tamaño. Apoyados un poco en este sistema se ha desarrollado una pirámide desmontable, la cual no viaja a un nivel muy bajo, sin embargo al poderse desmontar completamente de la caja del camión permite que el tiempo en andén sea muy breve, y con esto mover un volumen mayor de vidrio en un periodo menor y con menores riesgos, sin embargo este sistema no se ha utilizado en México para suministrar vidrio a los clientes.

Los cambios que se darán en un corto plazo por el sistema de comercialización serán importantes, y se sumarán a los sistemas de distribución y comercialización mundiales.

CAPITULO 2
EL VIDRIO TEMPLADO

2.1 INTRODUCCION

El endurecimiento térmico de un vidrio fue conocido en el siglo 17, pero únicamente como curiosidad, y era realizado únicamente introduciendo vidrio fundido en agua.

En los años treinta una adaptación de este concepto fue realizado comercialmente. Láminas planas de vidrio fueron calentadas a una temperatura abajo de su punto de fusión, luego enfriado por chorros de aire, a este producto se le llamó vidrio templado

Este proceso es relativamente fácil de ingeniar, porque tolera una amplia variedad de condiciones, por lo tanto no es difícil entender que por muchos años existió una teoría rudimentaria de templado térmico, más recientemente la industria ha insistido en explorar los límites del proceso, la industria quiere mayor resistencia, vidrios más delgados, y menor distorsión en la planicidad, naturalmente esto a requerido una teoría cuantitativa.

El desarrollo de esta teoría comenzó en 1949 por el Sr Bartenev en la antes URSS, y esta ahora bastante desarrollada, pudiera decir uno que en un orden de un segundo o tercer refinamiento.

En los puntos siguientes se expondrá brevemente la teoría desarrollada sobre el endurecimiento térmico del vidrio y los procesos para su obtención.

Hace aproximadamente 100 años hubo numerosos intentos para templar vidrio plano, templando láminas calientes con aceite, sin embargo esto no fue exitoso comercialmente, sin embargo se comenzaron a realizar correcciones, y cambios entre otros utilizando rodillos de acero, para el templado, y muchos otros refinamientos se realizaron posteriores a este, una dificultad aparente fue la distorsión en la superficie, otro fue el enfriamiento no uniforme, causado por los rodillos, y el vidrio no estaba en contacto con los rodillos en todos los puntos, y una película de aire podía arruinar el temple.

La mayoría de los libros de tecnología respecto al vidrio escritos antes de 1930, mencionan pobremente el endurecimiento del vidrio por calor, quitándole importancia, mencionando que no se ha encontrado utilidad práctica para este. Un buen templado no fue logrado sino hasta comienzos de los treinta, bajo patrones de templado con aire, los cuales han sido seguidos de numerosos refinamientos, e innovaciones, en la actualidad millones de metros cuadrados son producidos anualmente.

El vidrio plano es suministrado normalmente en forma de vidrio recocido, de forma que puede ser fabricado y trabajado fácilmente.

Cuando el vidrio está completamente templado no es posible cortarlo, perforarlo, o trabajarlo sobre sus superficies o cantos, de tal forma que debe de ser trabajado completamente para el diseño que ha sido proyectado antes de templarse.

El incremento en el costo debe de ser justificado, con las propiedades que obtiene al ser templado, como lo es el incremento de su resistencia mecánica, lo que hace de el vidrio templado un producto atractivo y de gran valor para puertas de acceso, aparadores de tiendas, guardas para campos deportivos, anaqueles, ventanas para automóviles, vidrios para refrigeradores, etc, su habilidad para resistir choques térmicos, lo hace atractivo para ventanas de hornos, lavadoras automáticas, secadoras. El vidrio templado también tiene una utilidad como vidrio de seguridad derivado de su incremento de esfuerzos y su patrón de fractura, lo que lo hace muy valioso en la rama automovilística o en vidrios para televisiones.

Entre 1957 y 1960 el vidrio templado de seguridad fue reemplazando al vidrio laminado principalmente en la rama automotriz para los vidrios laterales, el vidrio templado ha sido utilizado por más de 30 años en muchos lugares en vidrios para cancelas de baños, fachadas de edificios o entradas para edificios, con estas nuevas aplicaciones se comenzaron a desarrollar diferentes métodos de fabricación con técnicas más modernas y eficientes.

Incluso los problemas del templado del vidrio no son tan complejos ya que se trata de vidrio plano, y no de diferentes espesores, sin embargo los principales problemas son el mantener una distorsión óptica mínima, así como rayas, o manchas en el vidrio, torceduras, o cualquier otro defecto óptico. Hace aproximadamente 15 años el sistema más popular para sujetar el vidrio era la utilización de pinzas, similares a las pinzas diseñadas para sujetar el hielo, sin embargo, se presentan muchas dificultades para poder mantener la planicidad en piezas grandes, al igual que el material del que están fabricadas dichas pinzas ya que es necesario que estas sean resistentes al calor, y diseñadas para no obstruir el paso del calor al vidrio, es necesario tener cuidado de que el vidrio no se funda en las pinzas o se pegue a estas, El vidrio y las pinzas deben de diseñarse para que se expandan y contraigan independientemente esto previene al vidrio de una rotura durante la tensión provocada en el enfriamiento.

El éxito del templado depende en gran parte de el calentamiento uniforme del vidrio, normalmente son utilizados hornos eléctricos ya que estos proporcionan un calor uniforme y su control es más sencillo, las resistencias de calentamiento pueden ser divididas en zonas separadas, con lo que se puede controlar el calor perdido en cada zona por el tamaño de los vidrios ayudados de una computadora, existen otros hornos que utilizan gas, sin embargo su manejo es más complicado, pero por otro lado el consumo de energéticos es más económico.

2.2 TEORIA DEL TEMPLADO TERMICO

La teoría de templado que fue comprendida en los años treinta, es relativamente sencilla. El vidrio es calentado a una temperatura a la cual es re-arreglado, el vidrio debe ser suficientemente rígido para poder ser manejado sin serias deformaciones y suficientemente fluido para liberar esfuerzos internos relativamente rápido, cuando el aire frío es aplicado, la superficie se solidifica y se contrae, mientras el núcleo permanece relativamente liquido, mientras el enfriamiento continua la contracción del núcleo se resiste por las ya solidificadas capas de la superficie, y cuando el enfriamiento termina, el núcleo permanece en tensión, y las superficies en compresión.

La descripción del proceso de templado fue expresado como un modelo matemático por Bartenev, con el auxilio de algunas suposiciones simples. Este modelo asume que el estado inicial del vidrio esta libre de esfuerzos, pero que existe una distribución especifica de temperaturas, posteriormente asume que el vidrio tiene solo una temperatura de solidificación, sobre la cual es perfectamente liquido, y bajo esta es perfectamente elástico, este modelo puede ser tratado con los métodos estándar usados para el calculo de esfuerzos termoelásticos. En el estado final, la distribución térmica ha decaído, y la distribución de esfuerzos permanece

Bartenev probó sus resultados experimentalmente enfriando únicamente por la convección libre, esto es por un valor bajo del coeficiente de transmisión térmica, recientemente Gardon ha extendido las pruebas de Bartenev incluyendo un amplio rango de coeficientes de transmisión, y ha refinado los cálculos para incluir una contribución importante a la conducción térmica, así como el aspecto de la temperatura de solidificación efectiva del cristal depende del rango local de enfriamiento, estos refinamientos convirtieron los cálculos tan complejos que deben ser realizados con auxilio de computadoras

2.3 PROCESOS DE TEMPLADO

En su acepción mas amplia, el término templado incluye todo tratamiento, térmico o químico, del cual resulte una mayor resistencia mecánica del vidrio por creación de una capa en estado de compresión en su superficie. Al estar la superficie en compresión, se dificulta la propagación de las microfisuras, resultando en una mayor resistencia mecánica. El método tradicional es el templado térmico, consistente fundamentalmente en enfriar el objeto de vidrio rápidamente, habiéndolo precalentado a una temperatura determinada. En los últimos años se ha desarrollado el proceso de templado químico. Es práctica común aunque totalmente incorrecta, denominar "templado" a cualquier tratamiento térmico, particularmente al recocido.

El vidrio a ser templado por lo expuesto anteriormente tiene que ser un vidrio suave, es decir un cristal que no contenga esfuerzos superficiales, pues de lo contrario puede ocasionar problemas en el momento de ser calentado debido a que en ese momento sufre un choque térmico al pasar de una temperatura ambiente relativamente fría a la temperatura del interior del horno de templado, esto es trabajar los bordes del cristal, realizar barrenos y cualquier otro trabajo que se desee pues de lo contrario al intentar realizarlo ya templado rompemos la capa externa (a compresión), y nos provoca una explosión al liberarse el interior (a tensión).

También es necesario que los trabajos que se realicen en el vidrio sean realizados con equipo adecuado, esto es suficientemente refrigerado con agua para evitar el calentamiento pues esto nos puede provocar esfuerzos en el cristal a templar, o fisuras pequeñas que nos provocaran fractura durante el calentamiento.

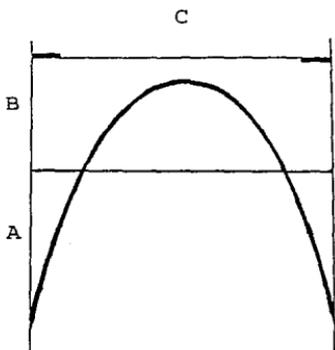
TEMPLADO TERMICO

Los efectos de un enfriamiento rápido del vidrio sobre su resistencia mecánica son conocidos desde hace mucho tiempo. La leyenda cuenta que el emperador romano Tiberio mandó matar a un artesano vidriero que descubrió este modo de hacer más resistente al vidrio por temor a que un material tan al alcance de la mano pudiera llegar a hacer depreciable sus tesoros. En el siglo XVII, el príncipe Ruperto encontró que haciendo gotear vidrio fundido en agua se formaban gotas o lagrimas del material, que resistían sin romperse un golpe muy fuerte dado con un martillo en su parte mas gruesa. Estas "Gotas de Ruperto" o "Lagrimas batavicas", como se les llamo, estallan y se rompen en infinidad de pequeños fragmentos, cuando se corta su extremidad mas delgada. El templado térmico sólo halló su aplicación industrial cuando en 1874 el francés Roger De La Bastie patentó un método para templar objetos de vidrio mediante calentamiento a alta temperatura e inmersión rápida en grasa o aceite a temperatura ambiente. Su éxito fue tan considerable que muchos países desearon adquirir su patente, pero De La Bastie fijo su valor en un franco por habitante, y tal fue el precio pagado por la Unión de Fabricantes Alemanes en 1890. W. Siemens disgustado por tal operación, desarrolló y patentó, al poco tiempo, otro sistema de enfriamiento, que utilizaba moldes metálicos enfriados exteriormente, para extraer rápidamente la mayor cantidad de calor posible de la superficie de vidrio en contacto con ellos. Descartado el enfriamiento con agua por la cantidad de roturas que se producen, se desarrolló a comienzos del siglo XX el enfriamiento con aire a presión, que a partir de 1920 se aplicó

con éxito al templado de vidrios planos, y luego de la Segundo Guerra Mundial al templado en objetos huecos, de formas simples, como vajilla (platos, copas, tazas)

El proceso de templado fundamentalmente consiste en calentar la pieza de vidrio hasta una temperatura cercana al punto de ablandamiento, para inmediatamente enfriarlo con alguno de los sistemas mencionados. En el enfriamiento brusco, la superficie del material se vuelve rígida en seguida, contrayéndose, en tanto que el interior se mantiene fluido a alta temperatura, dada la mala conductividad térmica del vidrio. a medida que se enfría la masa, las partes internas tienden a contraerse, lo cual es imposibilitado por las partes externas que ya están rígidas. A medida que la temperatura se equilibra con el ambiente, se desarrollan entonces fuertes esfuerzos de compresión en la superficie. contrabalanceadas por los esfuerzos de tensión internas. Al uniformarse la temperatura queda establecido un sistema de esfuerzos permanentes con una distribución parabólica en el espesor como lo podemos ver en la figura 2.1 La forma de la curva y los valores máximos de la compresión y la tensión dependen del salto de temperatura, de la velocidad de enfriamiento, de las propiedades térmicas del vidrio usado, y del diseño geométrico del objeto. Este último aspecto limita la aplicación del método a aquellos objetos en los cuales se puedan enfriar ambas superficies con igual velocidad, para lograr una distribución simétrica de los esfuerzos en el espesor. El caso ideal es el de los vidrios planos ya que la distribución del aire para el enfriamiento es relativamente sencilla. En las formas huecas más o menos simples, en las cuales el diámetro de la boca sea mayor que el de la base se complica el diseño ya que la salida del aire de enfriamiento complica el mantener un enfriamiento similar en el interior que en el exterior sin embargo se puede aplicar un enfriamiento casi uniforme con implementos especiales como toberas, y es por este motivo que no pueden templarse el tubo de vidrio, ni tampoco botellas, frascos u objetos similares, ya que el enfriamiento no sería igual en el interior que en el exterior

FIGURA 2.1 DISTRIBUCION DE ESFUERZOS A LO ANCHO DE UN VIDRIO TEMPLADO
A) ZONA A COMPRESION B) ZONA A TENSION
C) ESPESOR DEL VIDRIO
pag. 146 Glass Science and Technology



La fractura del vidrio templado tiene lugar cuando el esfuerzo de tensión aplicado supera el valor de la compresión en la superficie; en otras palabras, la resistencia mecánica del objeto se ve aumentada en una cantidad igual al esfuerzo de compresión de la superficie. Para formas simples y espesores gruesos, la resistencia aumenta de 2 a 5 veces con respecto al mismo objeto sin templar, es decir, recocido. Para espesores delgados, dicho aumento es menor, ya que resisten menos el choque térmico. Se obtienen buenos resultados con vidrios de coeficiente de dilatación elevado (Ej vidrios comunes silicatos sódicos-cálcicos), mientras que para vidrios con bajo coeficiente de dilatación (Ej. borosilicatos térmicos, o vidrio de sílice), el efecto es pequeño o nulo ; ello se explica sobre la base de razonamiento expuesto anteriormente.

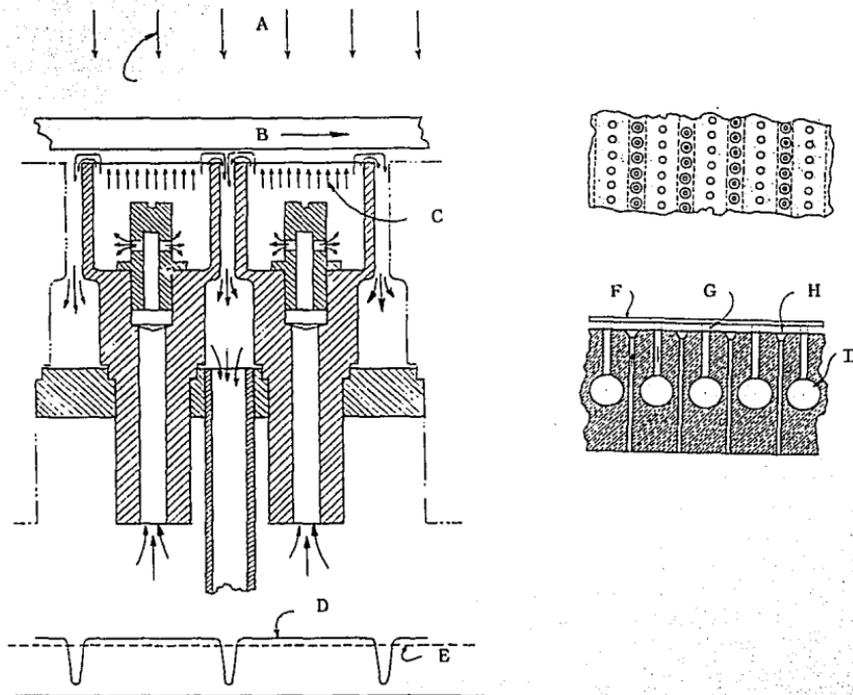
La fractura de los vidrios templados se produce cuando la profundidad de una fisura supera el espesor de la capa superficial en compresión y llega a la zona de tensión. Dicha fractura tiene carácter explosivo, por la energía acumulada en el material. y los fragmentos resultantes son pequeños, y sin cantos filosos (a 90 grados) por lo que no resultan peligrosos, como las astillas resultantes de la rotura de un vidrio recocido. El tamaño de los fragmentos se puede regular convenientemente variando el salto de temperatura y la velocidad de enfriamiento. En los vidrios planos se puede lograr un "templado diferencial", enfriando en diferentes condiciones determinadas zonas del mismo.

El templado térmico se realiza principalmente de dos formas que son; aquella en la que el vidrio se transporta a través de rodillos cerámicos, (esta se explica en el punto 2.4) y el proceso de cama de aire, en el cual el vidrio se desliza sobre un colchón de aire, sin embargo esto tiene también algunas limitaciones, es bien conocido que un vidrio es fácilmente transportable al flotarlo sobre una cama de aire, la cual se forma al perforar una placa, e inyectar aire por estas perforaciones, sin embargo si esto se hace con el vidrio caliente se tendería a formar una burbuja, por lo que en 1967, Mc Master, y Nitschke diseñaron una placa cerámica la cual contenía un sistema de perforaciones las cuales inyectaban el aire caliente, y por otro lado perforaciones a un lado de las otras las cuales sacaban el aire utilizado, estas segundas perforaciones se encuentran a poca distancia de las que inyectan el aire como se ve en la figura 2.2, con esto se evitó que el aire inyectado viajara mucha distancia, y es posible utilizar presiones mayores, este sistema permite flotar el vidrio sobre aire, provocando menor distorsión, e incluso facilidad para su curvado.

FIGURA 2.2

SISTEMA DE FLOTADO SOBRE AIRE

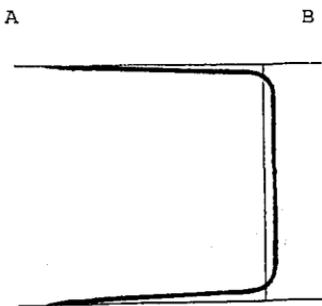
- A) CALOR RADIANTE UNIFORME
 - B) MOVIMIENTO DEL VIDRIO
 - C) PRESION Y TEMPERATURAS UNIFORMES TRASMITIDAS POR CONVECCION A LA SUPERFICIE DEL VIDRIO
 - D) COMPORTAMIENTO DE LA PRESION A LO LARGO DEL VIDRIO
 - E) PRESION PROMEDIO DE SUSTENTACION
 - F) VIDRIO
 - G) ORIFICIOS DE SALIDA DE AIRE
 - H) ORIFICIOS DE ENTRADA
 - I) CONDUCTO DE ESCAPE DE AIRE
- pag. 831-832 The Handbook of Glass Manufacture



TEMPLADO QUIMICO

Los métodos de templado químico se desarrollaron en varios laboratorios a la vez hacia fines de la década de los 50's. Consisten fundamentalmente en intercambiar un ion alcalino del vidrio (Ej. Li^+ o Na^+) por otro ion alcalino de una sal fundida en contacto con el vidrio, y cuyo radio ionico sea mayor (Na^+ o K^+), respectivamente. Al ocupar los iones más grandes los sitios que ocupaban los más pequeños en el retículo desordenado del silicato, producen un estado de compresión en la superficie. A este tratamiento, por su similitud con el templado térmico, se denomina templado químico. En efecto si bien por mecanismos diferentes, el resultado final es similar: al estar la superficie en estado de compresión se evita el crecimiento y la propagación de las microfisuras, con lo cual la resistencia mecánica aumenta notablemente. Sin embargo, hay una diferencia muy importante: en el caso del templado químico no aparece una zona central con una gran esfuerzo de tensión, como en el caso del templado térmico, y ello hace que cuando se rompen los objetos así tratados no lo hagan en forma explosiva. la figura 2.3 esquematiza la distribución de las tensiones en el espesor de un vidrio templado por vía química, pudiéndose apreciar las diferencias con la figura 2.1 mayor valor del esfuerzo de compresión superficial y menor valor del esfuerzo de tensión interna.

FIGURA 2.3 DISTRIBUCION DE ESFUERZOS EN UN VIDRIO
CON TEMPLADO QUIMICO
A) ZONA A COMPRESION B) ZONA A TENSION

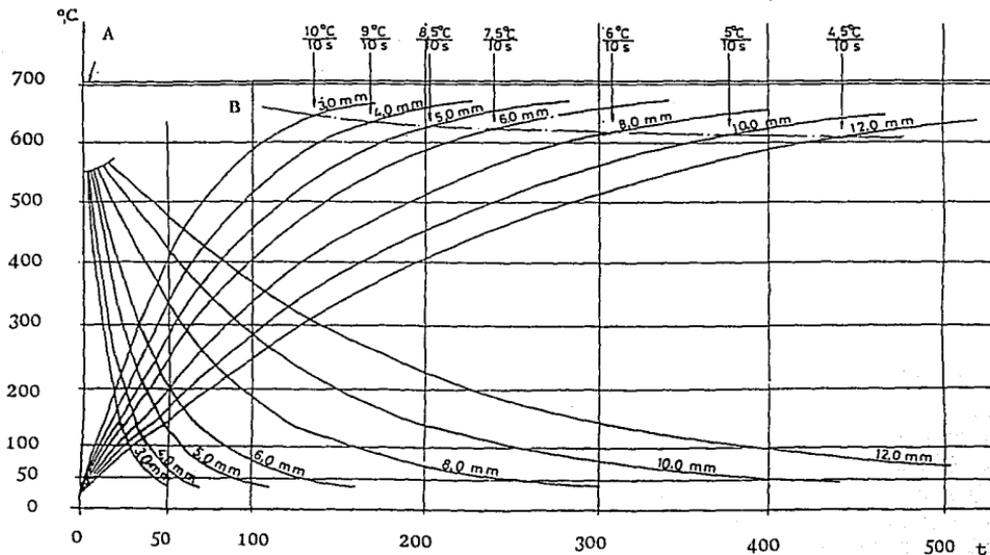


Desde el punto de vista industrial, los tratamientos de intercambio iónico con sales fundidas se aplican a objetos relativamente pequeños y de valor elevado, dado el costo relativamente alto del proceso (lentes para anteojos de seguridad, tubos para centrifugación, platos para memorias magnéticas, etc.) Pero dejando a un lado el factor costo, hay importantes diferencias entre el templado térmico y el químico que comportan ventajas para este último. La más importante se refiere a la distribución de las tensiones ya mencionada: el proceso térmico da como resultado tensiones internas de tensión muy elevadas, lo que produce la fragmentación explosiva del objeto al romperse, y, en consecuencia, se requiere que los artículos por templar tengan un espesor de 3 a 4 mm como mínimo. En un objeto tratado por intercambio iónico, en cambio, los esfuerzos de tensión internos son mucho menores y dicha limitación no existe; Esto tiene particular importancia en lentes de seguridad, que no requieren ser muy gruesos, y por lo tanto pesados e incómodos. Otra diferencia importante se refiere a la magnitud de los esfuerzos de compresión en la superficie: en el procesado químico se alcanzan valores dos a tres veces superiores - en casos especiales mucho más - que en el térmico, añádase a esto que en el intercambio iónico es posible regular la profundidad de la capa en compresión, cosa que no resulta posible en el enfriamiento rápido. Esto es muy importante, ya que de la profundidad de la capa dependerá que puedan propagarse o no las fisuras más profundas, o sea las más críticas.

Las variables del proceso influyen de diversa manera sobre el resultado final. La temperatura es un factor fundamental. El límite inferior de la misma es obviamente, la temperatura de fusión de la sal utilizada. En cuanto al límite superior, no deben utilizarse temperaturas por encima del intervalo de transformación del vidrio, porque se produciría la relajación relativamente rápida de las tensiones creadas, anulándose el efecto buscado. En lo que respecta al tiempo, con un tratamiento prolongado se logrará una mayor penetración por difusión (que es el mecanismo que controla el proceso), pero aumentará asimismo el grado de relajación de las tensiones producido por el mismo mecanismo. En la práctica, los tiempos de tratamiento están, según el caso, entre 6 y 48 horas.

La composición del baño de sales fundidas depende de la composición del vidrio. Para vidrios comunes sódicos-cálcicos se utiliza nitrato de potasio, puro o mezclado con nitrato de sodio. Se ha encontrado que al aumentar el contenido de Al_2O_3 en el vidrio, aumentan el grado de intercambio, pudiendo disminuirse el tiempo de tratamiento. Se han desarrollado así, comercialmente, vidrios aluminosilicatos de litio que se someten a intercambio iónico con nitrato de sodio fundido obteniéndose resistencias mecánicas notablemente elevadas. El alto costo de estos vidrios, sin embargo limita sus aplicaciones. La presencia de B_2O_3 en el vidrio tiene el efecto opuesto: en los vidrios borosilicatos no se obtienen resultados satisfactorios. Por último, el estado de la superficie juega también un papel muy importante, habiéndose propuesto distintos pretratamientos para incrementar la efectividad del proceso; en particular, todo indica que la presencia de una capa superficial hidratada (tipo "gel de sílice") ayuda, de alguna manera, a que la difusión de los iones que se intercambian tenga lugar más rápidamente. Por el contrario, un pretratamiento con ácido fluorhídrico tiene un efecto desfavorable.

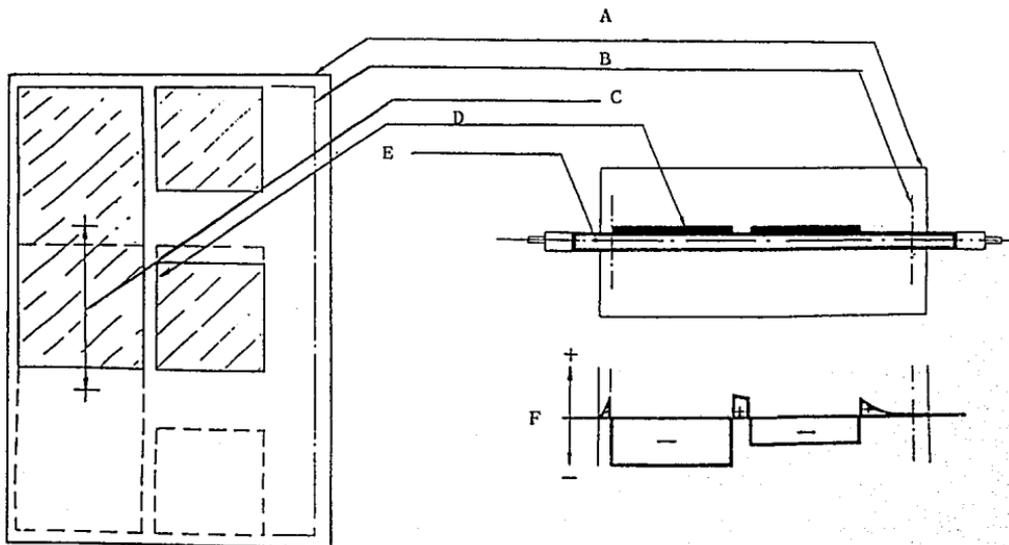
GRAFICA 2.1 DIFERENTES TEMPERATURAS SEGUN EL
 ESPESOR DEL VIDRIO
 A) NIVEL MAXIMO DE TEMPERATURA DEL HORNO
 B) TEMPERATURA CORRECTA DE TEMPLADO
 TEMPERATURA AMBIENTE 20 GRADOS CENTIGRADOS
 Tamglass Operator's Manual



Es importante también en nuestro proceso de templado poner atención en la carga de los vidrios que se van a templar ya que si hacemos una gráfica de la distribución de temperatura como lo vemos en la figura 2.4 vemos que en la parte del rodillo en donde pasó el vidrio, este se llevó calor y baja su temperatura, quedando una mayor temperatura en las partes cercanas a donde no pasó el vidrio y una menor temperatura en donde pasó el vidrio

FIGURA 2.4 SOBRE CALENTAMIENTO DE LOS RODILLOS A LOS LADOS DEL VIDRIO

- A) LIMITE DEL HORNO B) AREA DE CALENTAMIENTO
 C) DISTANCIA DE TRANSFERENCIA EN EL HORNO
 D) VIDRIO E) RODILLO CERAMICO
 F) DIFERENCIA DE TEMPERATURAS EN LA SUPERFICIE DEL RODILLO
 Tamglass Operator's Manual



Debido a esto es importante hacer cargas intercaladas, esto es ponerlas en un ciclo de un lado de la mesa de carga, y en el otro ciclo, del otro lado de la mesa de carga, dejando espacio entre las piezas, cuando se carga más de una por ciclo, y evitando cargas en un solo lugar de la mesa pues puede provocarnos roturas de vidrios o distorsión óptica por un calentamiento no uniforme.

Es importante que se guarden siempre ciertas normas para la fabricación del vidrio templado, entre las principales son:

1) El ancho mínimo del vidrio con perforaciones debe de ser de por lo menos 8 veces el espesor del vidrio

2) La distancia de la orilla de las perforaciones a la orilla del vidrio deberá de ser de al menos 1.5 veces el espesor del vidrio para los de 6 mm o menores, y de cuando menos 2 veces el espesor del vidrio para los de 8 mm a 19 mm.

3) Alrededor de la perforación deberá de haber un cinturón de vidrio que será de al menos del mismo diámetro que la perforación

4) Los agujeros rectangulares o cuadrados, deberán de tener las esquinas redondeadas de al menos el espesor del vidrio

5) La distancia entre la orilla de un barreno y una esquina deberá de ser de al menos 4 veces el espesor del vidrio

Estas son las principales normas de calidad del vidrio antes de ser templado, el seguimiento de estas evitará roturas principalmente en la zona de enfriamiento.

También es importante señalar que por ningún motivo se recomienda el re-templado de una pieza, ya que esto puede ocasionar costosos daños a el equipo, principalmente a las resistencias inferiores ya que estas recibirían el vidrio y las dañaría.

La elaboración de estas normas la realiza internamente cada empresa con la ayuda de ciertas características de el equipo de templado, las cuales son proporcionadas por el fabricante del equipo, y la experiencia que se tiene en el manejo del vidrio.

2.4 ESTRUCTURA MOLECULAR

"VIDRIO TEMPLADO", es llamado así por analogía al acero templado, ambos son esforzados por un "temple", un proceso en el que se calienta el material a un punto crítico de temperatura y luego rápidamente se enfría. en este punto termina la analogía, los efectos inmediatos de este tratamiento térmico son muy diferentes para ambos materiales. En el acero un nuevo balance de dureza y tensión es producido por la precipitación de carburos. Por otro lado el vidrio permanece con la misma composición, y su dureza queda virtualmente sin afectar, en cambio el templado varía el sistema de esfuerzos internos, manteniendo permanentemente las superficies a compresión. lo puede hacer debido a que el vidrio es fuerte a compresión pero débil a la tensión. Con este hecho casi invariablemente origina un desperfecto en la superficie, que actúa como un multiplicador de esfuerzos para esfuerzos locales a tensión, la precompresión de la superficie permite una carga externa mayor antes de que la carga de tensión sea rebasada.

Una gráfica típica de la distribución de esfuerzos a lo largo del espesor del vidrio es la siguiente Fig 2.5 . la distribución de esfuerzos es prácticamente parabólica, compresión en la superficie, balanceada por la tensión en el interior. Debido a que normalmente no existen flujos internos en el vidrio que actúen como elevadores de esfuerzos, la tensión interna está intacta. Por otro lado una carga externa impuesta que tienda a poner la superficie más vulnerable en tensión, ahora debe neutralizar la preesforzada a compresión antes de que los esfuerzos de "tensión" comiencen a acumularse.

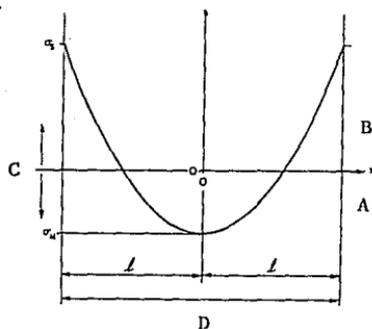
Visto desde este punto de vista, cualquier compresión de la superficie es inútil, de cualquier forma, considerando el amplio rango de esfuerzos de las superficies fluidas del vidrio, los efectos de endurecimiento no son significantes hasta que rebasan la desviación estándar del esfuerzo de ruptura del vidrio. Normalmente el esfuerzo para un vidrio recocido puede tomarse como 300 kg/cm^2 ($4,400 \text{ psi}$) la superficie a compresión de un vidrio "completamente templado", comercial es normalmente $1,000 \text{ kg/cm}^2$ ($14,700 \text{ psi}$), por lo que el esfuerzo efectivo del temple es de $1,300 \text{ kg/cm}^2$, que corresponde al cuádruple o al quíntuple del esfuerzo.(endurecimiento).

Este incremento en el esfuerzo de ruptura no es la única cualidad del vidrio templado. Otra en algunas aplicaciones igual de importante es que cuando ocurre la ruptura, los fragmentos del vidrio templado deben ser menos peligrosos y filosos. Los fragmentos grandes son una consecuencia directa de los bajos esfuerzos del vidrio recocido, por lo que cuando un vidrio recocido se rompe bajo una carga relativamente baja la energía de tensión adentro del vidrio es también baja y por lo tanto pequeñas nuevas superficies son creadas en el proceso de fractura, el vidrio débil con un mal flujo se puede romper en solo dos o tres partes grandes, teniendo cantos filosos y puntas filosas. El vidrio templado no es solamente más fuerte, pudiendo acumular más energía tensión con cargas externas, sino que también los esfuerzos del temple imparten al vidrio mayor energía de tensión, aún con ausencia de carga externa. por lo que cuando el vidrio se rompe, la energía de tensión es suficientemente fuerte como para

crear una explosión y convertir el vidrio en fragmentos muy pequeños con muy poco filo, casi cúbicos y con puntas a 90°

Diferentes normas o estándares se han desarrollado para este tipo de vidrio comercial, por seguridad especialmente el de la industria automotriz, construcción, y la de cristales ópticos.

FIGURA 2.5 DISTRIBUCION ESFUERZOS EN UN VIDRIO TEMPLADO
A) ZONA EN TENSION B) ZONA A COMPRESION
C) ESFUERZOS DE TEMPLADO D) ESPESOR DEL VIDRIO
pag. 146 Glass Science and Technology



Naturaleza de los esfuerzos del templado

Los esfuerzos producidos en un vidrio plano a través de un enfriamiento brusco de sus superficies, son bidimensionales en un plano isotrópico de esfuerzos, constante en la extensión de la pieza de vidrio (excepto en las orillas), y variando únicamente por el espesor

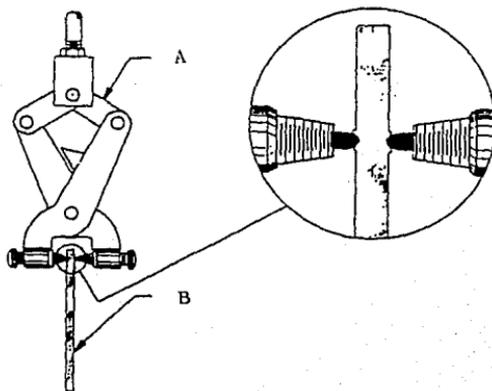
2.5 PLANICIDAD ENTRE CARAS

Historicamente el primer sistema para templar, consistía en la utilización de pinzas las cuales cargaban el vidrio de forma vertical como se muestra en la siguiente figura 2.6 sin embargo el mayor problema asociado con la utilización de pinzas consiste en la marca que estas producen, esto es causado por la acción punzante de las pinzas las cuales ejercen cierta presión sobre el vidrio en el momento en el que éste alcanza una temperatura superior a la de su punto de plasticidad. estas marcas al igual que otras distorsiones pueden ser minimizadas pero no eliminadas, reduciendo el tiempo que el vidrio pasa en el horno ya obtenido su punto de plasticidad, así como reduciendo la temperatura que va a obtener el vidrio, adicionalmente es necesario tener cuidado en el número de pinzas a utilizar, ya que de lo contrario tendríamos un "jalón" en los puntos en donde se instalan las pinzas provocadas por exceso de peso en cada una de éstas, ya que esto provocaría en lugar de puntos, puntos alargados, y los cantos quedarán ondulados.

FIGURA 2.6 TEMPLADO CON PINZAS

A) PINZA B) VIDRIO

pag. 832-8 The Handbook of Glass Manufacture vol II

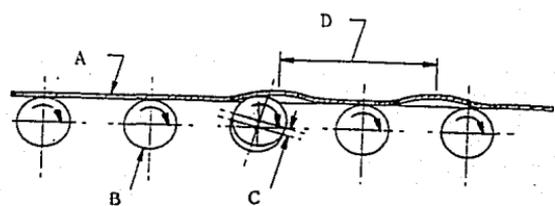


El otro método más moderno, y últimamente más utilizado es en el que se ^{emplean} utilizan rodillos para transportar el vidrio a el interior del horno, y en las toberas de enfriamiento, así como para colocarse en la mesa de carga y de descarga, este método ha eliminado totalmente las marcas de pinzas, y sus problemas consecuentes, sin embargo este proceso también trae otros problemas, como lo son; marcas provocadas por los rodillos cerámicos ya sea por daños en los rodillos, o por contaminación sobre éstos, transferencia de calor de los rodillos a el vidrio, desalineamiento entre ejes de rodillos, y distorsiones por exceso de distancia entre rodillos.

En este último en el que mecánicamente la distorsión provocada entre rodillo y rodillo está determinada por la distancia que existe entre estos, y la velocidad de el transportador, en la práctica un espaciamiento de 15 cms entre rodillos a una velocidad del transportador de 80 a 90 m/min produce una calidad aceptable en el vidrio de 6 mm.

La distorsión provocada por excentricidad de los rodillos es causada generalmente por rodillos huecos, o de materiales que no soportan adecuadamente choques térmicos, actualmente los rodillos están fabricados de materiales cerámicos especiales (fused sílica) los cuales tienen una excelente resistencia a los choques térmicos, y mantienen íntegramente sus dimensiones, de cualquier forma, falta de homogeneidad en su estructura amorfa, puede causar un rodillo perfectamente recto en frío, pero puede llegar a una distorsión de hasta 3 mm de distorsión en caliente. esto puede provocar una distorsión en el vidrio, con un período de repetitividad igual a la circunferencia de el rodillo como se puede ver en la figura 2.7 en la cual se exagera la distorsión para poder ser apreciada

FIGURA 2.7 DISTORSION POR EXCENTRICIDAD DE RODILLOS
 A) VIDRIO B) RODILLO
 C) EXCENTRICIDAD DEL RODILLO RESPECTO AL CENTRO
 D) LONGITUD DE ONDULACION IGUAL AL PERIMETRO
 TOTAL DEL RODILLO
 pag. 832-9 The Handbook of Glass Manufacture vol II



La distorsión causada por rodillos desiguales puede tener un período de repetitividad relacionada a la distancia entre rodillos. Los rodillos fabricados con tolerancias de aproximadamente 0.002 pulgadas han mostrado dar buenos resultados.

Las marcas en la superficie inferior del vidrio pueden ser causadas por contaminación en los rodillos o en el mismo vidrio, lo mejor para evitar esto es tener los mejores cuidados de limpieza en el proceso.

Los daños superficiales causados por los rodillos se manifiestan con una diferencia de endurecimiento en las superficies entre la superior y la inferior, la prueba de impacto de bola (NOM P-5-CT) muestra que la superficie superior es más fuerte que la inferior, la cual ha tenido contacto con los rodillos, esta diferencia puede ser minimizada con la utilización de rodillos limpios (con un buen mantenimiento) y con vidrio limpio.

Durante la entrada de el vidrio a el horno en un equipo horizontal, la parte inferior del vidrio y los rodillos calientes experimentan un contacto brusco, que puede causar daños en el vidrio además de que la transferencia de calor que existe entre los rodillos calientes y el vidrio provoca mayor calentamiento en la parte inferior que en la superior, y ya que el vidrio reacciona elásticamente a este proceso de calentamiento, la parte inferior se expande más rápido que la parte superior lo que provoca una distorsión dejando el vidrio de forma cóncava. por lo que los extremos del vidrio se levantan sin hacer contacto con los rodillos hasta adquirir su punto de plasticidad, sin embargo se provocó un exceso de calentamiento en el centro.

El incremento de presión causado porque menos de la superficie del vidrio esta soportando su peso, puede también provocar distorsiones ópticas o marcas como rayones en el área central. una forma de contrarrestar este efecto, es incrementando la temperatura en la parte superior de el horno.

La tendencia de que las partes longitudinales del vidrio se levanten por causa de la transferencia de calor de los rodillos a el vidrio se puede contrarrestar incrementando la temperatura en la parte superior de el horno, o variando los tiempos dentro de el horno.

El otro sistema de soporte del vidrio dentro de el horno consiste en una cama de aire caliente, o de gases combustibles, en estos el espacio entre el vidrio y el soporte inferior es de aproximadamente 0.010 pulgadas de ancho, por lo que se debe de tener un extremo cuidado para asegurarse de que todo el vidrio es calentado de forma uniforme en todos sus lados, para evitar el contacto con el soporte inferior, así como importante es que el soporte inferior este perfectamente nivelado, y que se mantenga así durante el funcionamiento a temperaturas de operación.

El método primario de calentar el vidrio en el proceso de templado es por radiación suministrada por resistencias eléctricas, o por quemadores de gas, aún cuando estos elementos estén calculados para proporcionar energía uniforme en todo el vidrio, existen variantes como lo son la transferencia de calor recibida por el vidrio al hacer contacto con los rodillos, o la transferencia de calor por convección forzada que recibe el vidrio al flotar sobre la cama de aire, estos efectos deben de ser compensados por el operador dependiendo de el tamaño de los vidrios y sobre todo por sus espesores.

Aún cuando estos calentamientos desiguales no existieran y el vidrio se pudiera calentar con un flujo de energía uniforme, el calentamiento no sería uniforme ya que los cantos o extremos de el vidrio se van a calentar más rápido que el centro, esto es debido que los extremos reciben radiación en las caras y en los cantos, lo que eleva la temperatura en los cantos, y esto puede acarrear problemas en el proceso de enfriado.

El enfriamiento de el vidrio se puede llevar a cabo por diferentes sistemas o con diferentes fluidos, sin embargo el más económico y fácil de manejar es el aire a presión aplicado con boquillas uniformemente distribuidas en toda el área del vidrio

Efectos en el enfriamiento:

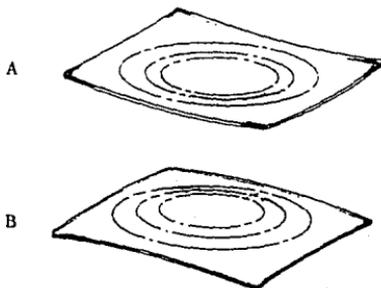
Cuando una pieza plana de vidrio se calienta a una temperatura uniforme y se enfria a una temperatura uniforme se mantiene plana, y mostrará un grado uniforme de temple, sin embargo como se vió anteriormente una pieza de vidrio no puede ser calentada de forma uniforme, los efectos de enfriar uniformemente una pieza no isotérmica se pueden ver en el resultado en las siguientes condiciones.

Extremos o cantos sobrecalentados. (Cuando una pieza plana sobrecalentada en sus extremos, logra el enfriamiento a la temperatura ambiente obtiene una forma cóncava o convexa, debido a que los extremos del vidrio sufrieron una contracción mayor que en el centro del vidrio, por lo que existen diferencias de esfuerzos del centro a los extremos (figura 2.8)

FIGURA 2.8 EFECTOS DE SOBRECALENTAMIENTO EN LOS EXTREMOS

A) CONCAVO B) CONVEXO

pag. 832-10 The Handbook of Glass Manufacture vol II



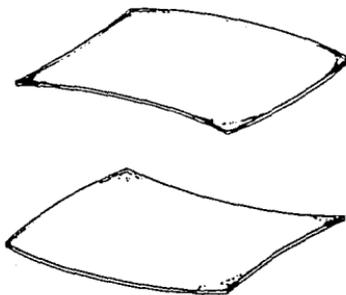
Superficies sobrecalentada.- Una pieza teniendo una superficie más caliente que otra esto es que existe un gradiente de temperaturas entre las superficies, se vuelve arqueada o en forma de plato luego de que la pieza obtuvo la temperatura ambiente debido a que la parte sobrecalentada se contrae más que la parte menos caliente, como se muestra en la figura 2.9, en esta la forma arqueada es típica de las piezas rectangulares, y la forma de plato en las piezas cuadradas, el estado final de esfuerzos no es igual en ambas caras.

FIGURA 2.9 EFECTO DE SUPERFICIE CALIENTE EN LA FORMA FINAL
pag. 832-11 The Handbook of Glass Manufacture vol II



Sobrecalentamiento en el medio.- En el caso de que el centro de el vidrio se caliente más en el centro que en los extremos provoca formas caprichosas ya que al obtener la temperatura ambiente los bordes o cantos son más largos que el centro. El esfuerzo de compresión adicional en los extremos o cantos causado por las diferencias de largos entre el centro y los extremos ocasiona la forma distorsionada como se muestra en la figura 2.10

FIGURA 2.10 EFECTO DE SOBRECALENTAMIENTO EN EL CENTRO
pag. 832-11 The Handbook of Glass Manufacture



Aún si la pieza estuviera calentada uniformemente existiría una distorsión causada en la operación de enfriamiento, por ejemplo si una superficie se enfría más despacio que la otra se formaría cóncava hacia arriba al adquirir la temperatura ambiente, y esto puede ser causado por la existencia de rodillos transportadores en los enfriadores, diferencia en el balance de presiones de aire, etc.

Normalmente, los vidrios se transportan a las toberas en pocos segundos después de haber salido del horno por lo que se podría considerar que comienzan a enfriarse de forma uniforme, sin embargo en la mayoría de los hornos de templado esto no pasa, ya que el vidrio es transportado por ejemplo en un vidrio de 6 mm de 3 metros de largo a una velocidad de 60 cm/s lo que le llevara de aproximadamente 10 segundos para entrar completamente a las toberas, por consecuencia una parte del vidrio se encuentra aún caliente mientras la otra ya está siendo enfriada por el aire. El gradiente longitudinal de temperaturas resultante ocasiona un estiramiento de los extremos longitudinales ya que estos están aún suaves, cuando el vidrio logra la temperatura ambiente, este muestra una forma ondulada al tratar de distribuir el estiramiento. Una solución a esto es retardar el enfriamiento de el área central de la pieza hasta que los cantos se enfrien utilizando unas toberas longitudinales pero no uniformes, este es un caso en donde un vidrio calentado a temperatura uniforme y enfriado de forma uniforme no produce un vidrio perfectamente plano.

En la práctica estos cambios de variables no ocurren aisladamente uno u otro, sino que se presentan combinados varios de ellos por lo que resulta sumamente difícil lograr vidrios perfectamente planos, por lo que es importante un constante entrenamiento al operador ya que de el dependerá la calidad de los vidrios.

El sistema más aceptado para la detección de una distorsión entre las caras del cristal consiste en un reflejo de una pantalla con rayas blancas y negras de forma diagonal, combinada con una aplicación de luz abundante sobre la cara superior del cristal, y se puede observar la distorsión de la pantalla sobre el cristal.

El control de dicha distorsión se puede lograr mediante la variación de la temperatura dentro de el horno de temple, ya que logrando que el temple adecuado se obtenga a menor temperatura, esto provocara que la variación de la planicidad sea menor, sin embargo no siempre es posible obtener un temple adecuado con temperaturas bajas, ya que el temple en el vidrio se logra provocando un choque térmico de acuerdo a el espesor del vidrio.

Cuando se quiere fabricar un vidrio laminado utilizando vidrios templados es un factor importante la planicidad entre las caras ya que debido a el proceso que el vidrio laminado requiere, se puede tener problemas en falta de adherencia del poli-vinil-butiral (P.V.B) ya que las caras al no son perfectamente planas no harán contacto perfecto una con otra.

Como resultado de el embargo petrolero de la OPEP en 1973 y la subsecuente alza de precios de 1973-74 y 1979-80, la demanda por vidrio automotriz y arquitectónico más delgado se ha incrementado con el objetivo de ahorrar energía, al principio por disminución del peso, posteriormente en la utilización para vidrio insulado resistente a tormentas. Al vidrio delgado, en su contexto, es aquel de 3.2 mm de espesor, o más delgado.

La producción de vidrio delgado no afecta a la operación de calentamiento del horno, excepto que por el corto tiempo de calentamiento (aproximadamente 2 minutos para un vidrio de 3.2 mm) el transportador requiere de velocidades de transferencia mayores, esto ayuda a minimizar las ondulaciones provocadas entre rodillos, al igual que lo hace el espaciamiento entre rodillos, por lo que se puede tener una alta productividad en piezas de este espesor. Sin embargo el enfriamiento del vidrio delgado si presenta serias dificultades, ya que por ejemplo para templar un vidrio de 3.2 mm requiere de 1.9 veces más de presión, 1.4 veces más de cantidad de aire, y 2.6 veces más de energía consumida en el sistema de lo que se requiere para 4 mm, Por consecuencia el templar vidrio delgado es más costoso que templar vidrio grueso, al igual que el ruido al templar vidrio delgado se convierte en un serio problema.

Se han hecho muchos esfuerzos por reducir los altos costos de producción en los vidrios delgados, desarrollándose sistemas de toberas más eficientes, al igual que utilizar sistemas de manejo de aire más eficiente.

En los vidrio curvos el enfriamiento uniforme se vuelve algo muy complicado ya que es sumamente difícil lograr que las distancias de las toberas a el vidrio sea siempre igual como resultado de el enfriamiento no uniforme, la distribución de esfuerzos es también no-uniforme, y como resultado da una fractura con muy malos patrones iridiscentes o tornasolados , los cuales no son patentes con un enfriamiento uniforme.

Otros métodos han sido y están siendo estudiados para eliminar las dificultades que se han presentado al templar vidrio delgado, estos son el templado químico y el templado de cama fluida, entre otros, pero ninguno de estos ha mostrado ser comercialmente exitoso excepto en mercados muy pequeños como lo son en aeronaves, parabrisas especiales,etc.

Es importante mencionar que gracias a el control de los sistemas como el de calentamiento , enfriamiento, encorvado, transporte, etc con la computadora, se ha lograda alcanzar el presente nivel de calidad, y esto seguirá incrementándose a medida que se instalen controles y monitores en los diferentes sistemas del equipo de templado.

Actualmente en la industria automotriz se busca minimizar los costos de producción así como el consumo de energía, lo que ha llevado a cambios en los sistemas de ensamble de los vidrios, los cuales en algunos caso llegan a tener los cantos expuestos, y son sujetados únicamente con adhesivos especiales, y para que estos tengan un buen funcionamiento es importante lograr una menor distorsión. Igualmente en el área arquitectónica la utilización de vidrios con películas reflejantes de alta eficiencia provocan un calentamiento alto, especialmente en los vidrios de color, aunado a las presiones de viento que se tienen en los edificios altos, obligan a utilizar vidrio templado, sin embargo la distorsión en sus caras es muy patente pues las películas reflejantes hacen más notorios los defectos por distorsión en las caras.

2.6 ESFUERZOS PERIMETRALES O DE TEMPLADO

La única prueba no destructiva de medir los esfuerzos de templado internamente balanceados es con técnicas fotoelásticas, el problema para esta técnica consiste en la interpretación ya que para algunas figuras es sumamente difícil de interpretar.

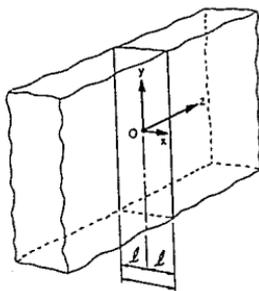
La medición fotoelástica de los esfuerzos de templado se basa en el hecho que la mayoría de los vidrios son activos en sus esfuerzos ópticos, y se convierten en birrefringencia bajo la acción de esfuerzos. La birrefringencia o retardo óptico en un trayecto largo del rayo, de luz medida es proporcional a la diferencia local de los principales esfuerzos, esta birrefringencia puede ser medida visualmente por los colores que produce, o puede ser medido cuantitativamente. El equipo básico para esta observación, es el polariscopio, el cual consiste esencialmente en un analizador polarizado tandem. Dependiendo de la aplicación, se incluyen elemento ópticos especiales en este, y compensadores, tales como un "Babinet", para mediciones cuantitativas.

La interpretación de esfuerzos ópticos en el vidrio templado puede ser simplificado frecuentemente, escogiendo un punto de partida para la medición, en donde uno de los principales esfuerzos es cero, de tal forma que la birrefringencia observada puede ser interpretada como directamente proporcional a el otro esfuerzo principal, de tal forma que para observar la distribución de esfuerzos en un vidrio templado a través de su ancho, debe de observarse de canto, esta técnica es aplicable a piezas pequeñas y planas, también ha sido posible examinar piezas grandes a través de las esquinas, utilizando prismas a 45° para pasar la luz por ellos. observando la pieza a través de los cantos es decir a lo largo de el eje "z" con luz polarizada a 45° a los ejes "x" y "y" con el analizador situado a 90° a el polarizador, el polariscopio mide el esfuerzo en "y" mientras que para el esfuerzo en "x" es igual a cero además mide el esfuerzo en "y" a lo largo del trayecto de luz (ver figura 2.11)

FIGURA 2.11 SISTEMA DE COORDENADAS

A) ESPESOR DEL VIDRIO

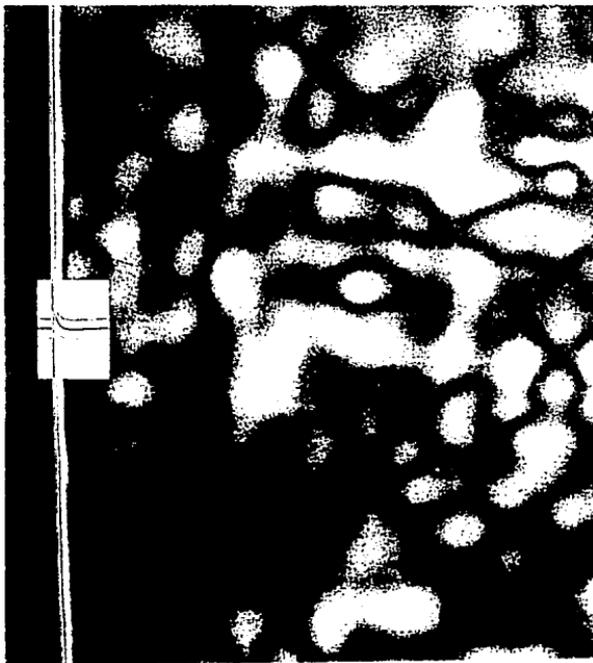
pag. 168 Glass Science and Technology



A

Bartenev en 1949 demostró que una pieza de forma de tira teniendo un ancho Z mayor de cuatro veces su espesor tiene una distribución de esfuerzos independiente a el tamaño de la pieza, y el esfuerzo en "y" prácticamente queda sin afectar por los esfuerzos perimetrales, en la figura 2.12 se ve una fotografía del patrón ondulado en la tira de vidrio templado, la parte superior de la fotografía muestra ondulaciones producidas por el cruzamiento de las películas polarizadas, excepto en los extremos, las líneas son paralelas a las caras del vidrio.

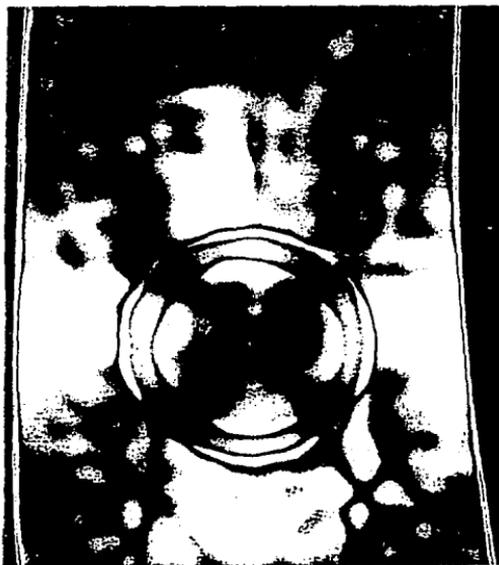
FIGURA 2.12 VISTA DE CANTO DE UNA TIRA DE VIDRIO TEMPLADO
EN UN POLARISCOPIO
pag. 210 Glass Science and Technology



Estas son líneas de retardo óptico continuo y por lo tanto de esfuerzos constantes; por ejemplo las dos líneas onduladas negras "línea cero" en la 0.21 parte del espesor del vidrio, representa los planos neutrales, en donde los esfuerzos del templado son cero la parte inferior muestra las ondulaciones producidas por un compensador de Babinet en la línea óptica, con sus ondulaciones orientadas perpendicularmente a las del vidrio, la línea cero de esfuerzos puede ser observada ahora como una gráfica de la distribución ordinaria de los esfuerzos a lo largo del espesor del vidrio como se vió en la figura 2.5

Ya que los esfuerzos ordinarios del vidrio templado están siempre balanceados en un mismo punto de su espesor, esta observación generalmente muestra diferencias en las principales membranas de esfuerzos. En vidrio uniformemente templado los esfuerzos de membranas son cero, y no se observa birrefringencia en toda la cara del vidrio, excepto en los cantos, en donde solo pueden existir esfuerzos paralelos a los cantos, y con el esfuerzo normal igual a cero, estos esfuerzos perimetrales son fácilmente medibles e interpretados, utilizando un compensador de Babinet en los cantos, como se puede ver en la figura 2.13, en donde nos permite visualizar la distribución de los esfuerzos perimetrales fuera de el canto, el resto de la fotografía muestra un patrón desordenado de ondulaciones negras, que van de negro y gris, pero no con colores, esto es debido a la variación de los esfuerzos entre las membranas, variando por menos de la mitad de una de las líneas de esfuerzos, y producidas por desuniformidades en el enfriamiento del vidrio, este efecto es posible observarlo en condiciones naturales de iluminación, con una poca de luz parcialmente polarizada.

FIGURA 2.13 VISTA FRONTAL DE UN VIDRIO TEMPLADO A TRAVES DE UN POLARISCOPIO
pag. 211 Glass Science and technology



CAPITULO 3

PRUEBAS PARA VERIFICAR LA CALIDAD DEL VIDRIO TEMPLADO

INTRODUCCION

A medida que el vidrio templado ha tomado un papel importante en la vida cotidiana, los estándares industriales y gubernamentales se han desarrollado para asegurar aceptación del producto en los consumidores. En los últimos años se ha puesto un mayor énfasis en el aspecto de seguridad, los estándares exigen requerimientos mínimos, y pruebas para asegurar estos. Así pues las normas Mexicanas, (NOM-P-5-CT-1993, Y NOM P-10-1983) e internacionales (ANSI Z97.1 1984, ASTM C148-92, etc) marcan la resistencia mínima al impacto, así como la cantidad de fragmentos que deben de formarse si se llega a presentar una rotura, por ejemplo el vidrio templado automotriz debe de resistir el impacto de caída de una bala de acero de media libra, y el impacto de un costal de cuero con balas con un peso total de 11 libras soltado a diferentes alturas en la prueba de bala, 10 de 12 muestras deben de permanecer sin romper, luego la altura de la bala es incrementada hasta que todas las pruebas se rompan, para que la prueba sea aceptable, ninguno de los fragmentos debe de rebasar 4.3 gramos de peso, estas piezas no son piezas de medidas comerciales, estas son piezas cuadradas de 30 centímetros de lado, y son producidas intercaladas con la producción comercial, sin embargo es difícil asegurar que estas piezas tendrán un tratamiento térmico igual al de piezas fabricadas en serie, al igual que por su dimensión y geometría no lograrán responder de igual forma a un mismo impacto

En estos estándares para vidrio templado no se hace referencia a los esfuerzos de templado, y las pruebas son todas destructivas, las razones para esto es que las pruebas no destructivas y su medición en piezas grandes, no es fácil, ninguno de los métodos conocidos ha logrado aceptación internacional, además de que la medición de los esfuerzos de templado en una o muchas regiones de un vidrio, no asegura que el vidrio ha sido templado adecuadamente

3.1 PRUEBAS DESTRUCTIVAS

Medición de los esfuerzos de templado

Los esfuerzos de templado internamente balanceados, no pueden ser medidos mecánicamente, y estas técnicas de medición son necesariamente destructivas, uno de los métodos no destructivos, se basa en el hecho de que el vidrio está ópticamente esforzado, y activo, por lo que en algunos casos los esfuerzos térmicos pueden ser medidos fotoelásticamente.

Además de los métodos orientados específicos en los diferentes estándares, otra prueba merece ser mencionada:

El método utilizado por Davidenkov y Shevandin en 1939, en el que la superficie de un vidrio pequeño templado es desgastado progresivamente de una de sus caras, el remover una parte de la capa en compresión causa que el vidrio se vuelva esférico, y conociendo el espesor de vidrio removido, es posible calcular el esfuerzo interno a tensión teniendo también la curvatura formada. Este método bien puede ser muy laborioso, sin embargo nos permite determinar el esfuerzo de templado en la superficie de una pieza pequeña.

La importancia de esta prueba consiste en que el vidrio puede sufrir un impacto superior al que nos marca cualquier norma, y por consiguiente romperse, en este caso queremos que los fragmentos resultantes de la fractura sean inofensivos para la persona que tenga contacto con ellos.

Ya que los esfuerzos se concentran siempre en las esquinas de un cuerpo, es esta parte la más débil y en donde es más fácil romper un vidrio.

En la prueba de fractura se toma ya fracturada la pieza las 10 partículas libres más grandes obtenidas 3 minutos después de la fractura, y la masa de estas no debe de exceder los 65 cm^2 , (esto se considera realizando una prueba de impacto con costal como se verá en la sección 3 de este capítulo), por otro lado cuando la fractura ocurra en cualquier nivel de impacto y resulten algunas piezas separadas, ninguna de ellas debe ser de tal naturaleza o forma que pudiera describirse como filos cortantes, puntiagudos, o en forma de daga.

Para comprobar la calidad del vidrio templado se procede a romper una pieza y se realiza la medición de las partículas de la siguiente manera.

Se cuentan la cantidad de partículas que se encuentran en un cuadro de 5 cm X 5 cm, y se compara esta cantidad con la que se tiene en la tabla 3.1, en caso de que la cantidad de fragmentos sea menor al de dicha tabla se debe de efectuar una segunda lectura, tomando un cuadro de 10 cm X 10 cm, en el cual deben de existir como mínimo la cantidad de fragmentos que se tienen en la tabla 3.1 multiplicada por cuatro.

TABLA 3.1 ESPECIFICACION DE FRACTURA
NOM-P-10-1983

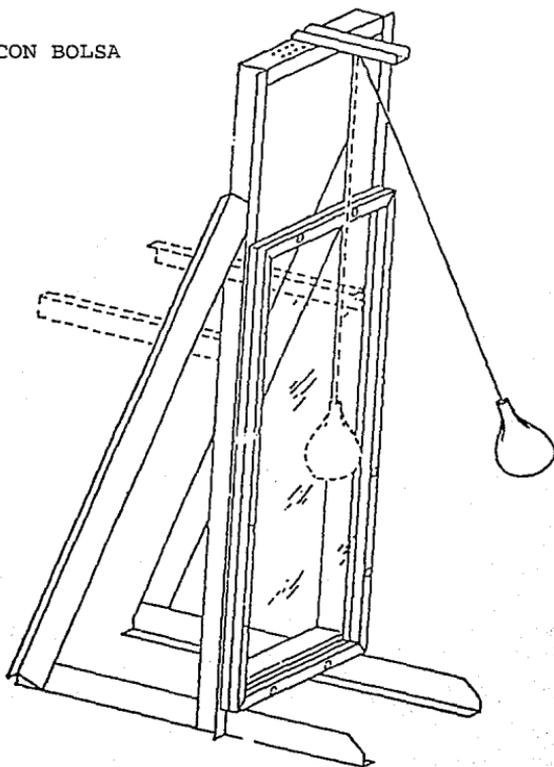
| ESPEJOR NOMINAL DEL VIDRIO mm | No MINIMO DE PARTICULAS EN UN CUADRO DE 5 X 5 |
|----------------------------------|--|
| 4 | 30 |
| 5 | 40 |
| 6 | 40 |
| 8 | 40 |
| 10 | 50 |
| 12 Y MAYOR | 50 |

RESISTENCIA AL IMPACTO

Para la medición de la resistencia del vidrio a los impactos es necesario realizar las pruebas impacto con bolsa, en este caso se utilizan especímenes de prueba con una medida de 1900 mm x 860 mm, pueden emplearse especímenes de prueba más pequeños, pero los resultados obtenidos con estos sólo son aplicables a tamaños menores e iguales al tamaño del espécimen probado.

Para esta prueba se utiliza un aparato el cual está formado por un armazón de acero, el cual soporta la muestra en un plano vertical, este debe de ser lo suficientemente rígido como para soportar el impacto de la bolsa, en la figura 3.1 se muestra un esquema de todo el equipo requerido. Adicional a este se requiere una bolsa de cuero reforzada, llena de municiones de plomo, con una masa total de 46 kg más, menos 0.1 kg.

FIGURA 3.1 IMPACTO CON BOLSA



Estando todos los vidrios a probar a una temperatura de entre 20 y 30 grados centígrados se coloca la bolsa a una altura de 300 mm, según se muestra en la figura 4.1, si no hay ruptura, el espécimen debe de impactarse otra vez pero con una altura de caída aumentada a 450 mm, si la ruptura no ocurre, este se debe de impactar nuevamente a 1200 mm, estos representan niveles de energía de impacto de 135 joules, 203 joules, y 541 joules respectivamente.

En caso de haber desintegración de la pieza es necesario medir la masa total de la 10 partículas libres más grandes obtenidas 3 minutos después de la fractura, esta no debe de exceder de la masa de 65 cm² del vidrio original, existen fracturas por impactos diferentes al anterior, ya sea con objetos punzo-cortantes, o de mayor masa, en este caso ninguna de las partículas de vidrio debe de tener formas que se puedan describir como filos cortantes, puntiagudas, o en forma de dagas.

Para que el cristal templado cumpla con la norma debe de permanecer intacto después de una prueba de caída de 1200 mm.

Otra prueba de impacto es la prueba de impacto con bola de acero. Para la cual se debe de contar con un bastidor de madera en donde se va a colocar la muestra de vidrio con unas dimensiones de 300 mm x 300 mm, probándose este al impacto de una bola de acero de 227 grs. de masa \pm 3 gramos.

Se fijan los especímenes a probar en el bastidor de madera, quedando perfectamente asentados, se deja caer libremente la bola de acero desde la altura indicada en la tabla 3.2, la cual varía de acuerdo al espesor del espécimen. la bola debe caer como máximo a 2.5 cms del centro geométrico de la muestra.

TABLA 3.2 ALTURA DE CAIDA PARA LA PRUEBA DE IMPACTO CON BOLA DE ACERO. (NOM-P-5-CT 1983)

| ESPESOR mm | ALTURA (mínima) M |
|---------------|----------------------|
| 3.18 a 3.43 | 2.00 |
| 3.80 a 4.20 | 2.00 |
| 4.60 a 5.00 | 2.50 |
| 5.40 a 5.90 | 3.00 |
| 6.20 a 7.20 | 3.50 |

RESISTENCIA TERMICA

Los vidrios templados presentan una resistencia térmica considerablemente mayor que los vidrios sin templar o recocidos, por lo que son una buena opción a utilizarse en casos como estufas caseras u hornos de bajas temperaturas, lo más recomendable es que cuando sean utilizados para hornos sean instalados dos vidrios de forma paralela uno de otro, con una separación de aproximadamente 25 mm en la cual se forma una cámara de aire caliente y nos disminuye el choque térmico entre el exterior y el interior. a este tipo de vidrio se le conoce como vidrio insulado, y puede ser fabricado por un sin fin de combinaciones de vidrios. es importante mencionar que la resistencia a choques bruscos y de gran dimensión de temperatura, no es el objetivo del vidrio templado ya que para esto existen vidrios de alta resistencia como lo es el vidrio refractario, comercialmente conocido como "PYREX", aunque este su uso principal se encuentra en utensilios domésticos como refractarios para comida, vajillas, sartenes, etc. y su composición química es muy diferente al vidrio plano comercial. Por lo anterior se puede decir que el vidrio templado es de gran utilidad en lugares en donde los cambios de temperatura existen, pero no son de gran magnitud, tomando como un máximo de 250 °C

3.2 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

DISTORSION OPTICA

Uno de los puntos más importantes del cristal templado es el mantener la menor distorsión óptica, ya que las ventajas de seguridad y resistencia no tendrían ningún beneficio. dentro de las distorsiones ópticas los principales puntos son los siguientes.

Torceduras localizadas.

Estas se presentan en los cristales en los extremos, o esquinas, formando piezas irregulares, las cuales al descansarlas sobre bases niveladas de mármol no permiten que toda la cara asiente completamente contra el plano, estas no deben de exceder de 1.5 mm en una longitud máxima de 300 mm, para las piezas cuadradas o rectangulares, de 2.4 mm en las tiras para una longitud de 300 mm, entendiéndose por tiras las siguientes.

- 1.- aquellas en las que su ancho mínimo será igual o mayor que la longitud dividida por 10.
- 2.- hasta 1800 mm de longitud, cuando el ancho es igual o menor que la longitud dividida por 8.
- 3.- de 1801 a 2400 mm de longitud, cuando el ancho es igual o menor que la longitud dividida por 7.
- 4.- de 2401 a 3350 mm de longitud, cuando el ancho es igual o menor que la longitud dividida por 5, la tabla 3.3

PLANICIDAD

Por naturaleza del proceso a que se ha sometido al templar el vidrio, la planicidad del templado puede variar respecto a la del mismo vidrio antes de templarse, para esto se establece una tabla de tolerancias máximas. La flecha se medirá con la lámina de vidrio templado en posición vertical, apoyado en los cuatro lados del claro

TABLA 3.3 TOLERANCIAS DE PLANICIDAD
NOM-P-10-1983

| LONGITUD DEL VIDRIO mm | ESPESOR NOMINAL DEL VIDRIO | | | | | |
|---------------------------|------------------------------------|----|----|----|----|------------|
| | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 Y MAYOR |
| | DESVIACION MAXIMA DESDE SUP. PLANA | | | | | |
| 0- 499 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 500- 899 | 5 | 4 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 900- 1199 | 8 | 6 | 5 | 3 | 3 | 2 |
| 1200- 1499 | 10 | 8 | 6 | 5 | 3 | 2 |
| 1500- 1799 | 11 | 10 | 8 | 6 | 4 | 3 |
| 1800- 2099 | 13 | 12 | 10 | 8 | 5 | 3 |
| 2100- 2399 | 15 | 14 | 12 | 11 | 6 | 4 |
| 2400- 2699 | 18 | 17 | 15 | 14 | 10 | 5 |
| 2700- 2999 | -- | -- | 19 | 15 | 12 | 6 |
| 3000- 3299 | -- | -- | -- | -- | 15 | 8 |
| 3300- 4000 | -- | -- | -- | -- | 18 | 10 |

Aún cuando no se encuentran normalizadas, las rayas en las caras de los vidrios juegan un papel importante ya que éstas producen una distorsión de la imagen, y son causadas por diferentes motivos; los principales son: las causadas por mal manejo del vidrio durante su proceso de pulido, barrenado, etc. las otras son ocasionadas por sobrecalentamiento de los rodillos dentro del horno de templado, y causan que el vidrio se apoye en una parte pequeña de la cara del vidrio incrementando la fricción y ocasionando rayas difíciles de eliminar

FOTOELASTICIDAD

La medición de esfuerzos fotoelásticos, con la utilización de equipo de polarización se utiliza en varios campos, para la determinación de esfuerzos en materiales transparentes

a.- Análisis experimental de esfuerzos, utilizando modelos transparentes de esfuerzos bidimensionales.

b.- Medición de esfuerzos superficiales en partes de maquinarias, cubiertas de una capa delgada transparente fotoelástica.

c.- Medición de esfuerzos internos en un modelo tridimensional, utilizando la técnica de "congelamiento de esfuerzos"

d.- Medición de esfuerzos utilizando la técnica de luz difusa

e.- Medición de esfuerzos residuales en materiales transparentes internamente esforzados

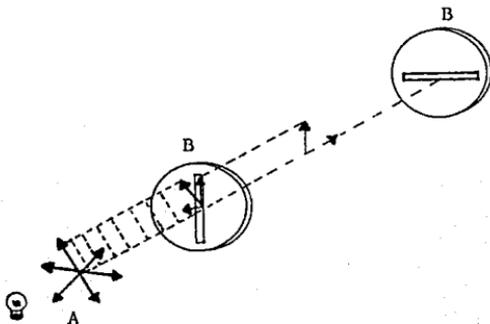
El equipo para medir estos esfuerzos se llama polariscopio o polarímetro, y sus componentes principales se muestran en la figura 3.2 existen polarímetros muy versátiles, que proveen toda la información necesaria para medir esfuerzos en materiales transparentes utilizando métodos fotoelásticos, y pueden ser equipados con diferentes aditamentos para satisfacer necesidades diversas como lo son plásticos, vidrios planos envases, etc. incluso cuando es necesario analizar piezas pequeñas, o cuando se presentan gradientes de esfuerzos muy altos, se adiciona un microscopio, proporcionando suficiente amplificación y resolver el problema, así como también se pueden adaptar diferentes niveles de iluminación

PRINCIPIOS DE LA LUZ POLARIZADA.

La luz se propaga en forma de vibraciones electromagnéticas, similares a las ondas de radio, un medio incandescente emite energía, la cual se propaga en todas direcciones, y contiene un "espectro" completo de vibraciones, de diferentes frecuencias o longitudes de onda, tan solo una parte de este espectro es captado por el ojo humano (longitudes de onda de entre 400 y 700 nm)

La vibración asociada con la luz visible, es perpendicular a la dirección de propagación, un emisor de luz, produce un tren de ondas conteniendo vibraciones en todos los planos, así pues con la aplicación del primer filtro (figura 3.2), solo se permitirá el paso de una componente de estas vibraciones, a esto se le llama "luz polarizada", o "plano polarizado", debido a que la vibración únicamente actúa en un plano. Si otro filtro polarizado (A) se sitúa después del primero se extingue completamente el rayo de luz, siempre y cuando los ejes de ambos filtros se encuentren perpendiculares uno del otro a 90°

FIGURA 3.2 ACCION DE POLARIZADORES A 90° EN LUZ SIN POLARIZAR.
Residual Stress Measurements
A) DIRECCION DE LA VIBRACION B) POLARIZADORES



La retardación de la luz provocada por los esfuerzos en el material se puede observar de diferentes colores, los cuales llevan una secuencia como la podemos observar en la tabla 3.4

TABLA 3.4 SECUENCIA DE COLORES OBSERVADOS
TRAS LA RETARDACION DE LA LUZ

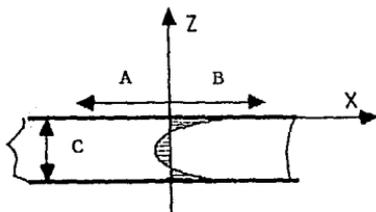
| Color | Retardación nm | Onda de con onda (franjas) | Retardación completa de plano |
|-----------------------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Negro | 0 | 0 | 570 |
| Gris | 150 | | 450 |
| Blanco-Amarillo | 250 | | (+) 300 |
| Amarillo | 300 | | 200 |
| Anaranjado | 450 | | 100 |
| Rojo | 500 | | 50 |
| Indigo-Violeta (color frontera 1) | 570 | -----1----- | 0 |
| Azul | 600 | | 50 |
| Azul-Verde | 650 | | 100 |
| Verde-Amarillo | 750 | | 220 |
| Amarillo | 850 | | (-) 270 |
| Anaranjado | 950 | | 400 |
| Rojo | 1050 | | 480 |
| Indigo-Violeta (color frontera 2) | 1140 | 2 | 570 |
| Verde | 1300 | | |
| Verde-Amarillo | 1400 | | |
| Rosa | 1500 | | |
| Violeta | 1700 | 3 | |
| Verde | 1750 | | |

Los principales equipos utilizados para la medición de los esfuerzos en los vidrios templados son el polarímetro de esfuerzos perimetrales, y el polarímetro de ángulo de roce superficial.

El primero, el polarímetro de esfuerzos perimetrales mide los esfuerzos en los vidrios, pero únicamente en su canto.

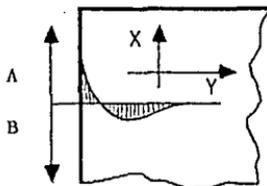
El vidrio recocido al ser tratado térmicamente, en una operación de calentamiento controlado, seguido por un ciclo de enfriamiento brusco, provoca como resultado esfuerzos residuales en el vidrio, estos esfuerzos son de compresión en la superficie, y de tensión en el centro figura 3.3, esto viéndolo en un corte del espesor.

FIGURA 3.3 DISTRIBUCION DE ESFUERZOS TIPICA EN EL ESPESOR DEL VIDRIO TRATADO TERMICAMENTE (VIDRIO TEMPLADO)
A) TENSION B) COMPRESION C) ESPESOR DEL VIDRIO



Sin embargo lo mismo ocurre viendo la distribución de esfuerzos de un canto hacia el centro del vidrio figura 3.4 ya que el canto del vidrio también va a lograr un esfuerzo de compresión.

FIGURA 3.4 DISTRIBUCION DE ESFUERZOS TIPICA EN UN VIDRIO TRATADO TERMICAMENTE CERCA DE SU ORILLA.
A) COMPRESION B) TENSION



Las especificaciones actuales del vidrio tratado térmicamente (ASTM C-1048) definen dos diferentes productos que son el vidrio totalmente templado (F.T.) y el vidrio endurecido (H.S.), basados en su nivel de compresión superficial o del canto, ambos productos han ganado una gran aceptación en el mercado por sus características de fractura, o por su resistencia al impacto.

Los esfuerzos residuales en un vidrio templado, son la llave para el control de la calidad del producto que cumpla con las especificaciones exigidas por el mercado.

Existen dos procedimientos para la medición de los esfuerzos perimetrales del vidrio, el primer procedimiento es llamado procedimiento de " CANTO ". Este es utilizado cuando los filos del canto están realizados con equipo fino y poco profundo por lo que no tenemos mucha interferencia para visualizar la cercanía del canto.

El segundo método se utiliza cuando se va a medir un vidrio con filos trabajados con lija gruesa, o un filo muy profundo, y se llama de " PROXIMIDAD DEL CANTO ".

MEDICION DE LA RETARDACION.

La luz polarizada vibrando a lo largo de los esfuerzos perimetrales (G_E) se propaga a lo largo del vidrio esforzado a diferente velocidad que la luz vibrando en un plano perpendicular a el vidrio. Como resultado de la diferencia de velocidades las dos vibraciones P_1 y P_2 (figura 3.5) se separan y su distancia relativa, o retardación, R , está relacionada a G_E con la siguiente ecuación:

$$R = C_B G_E t$$

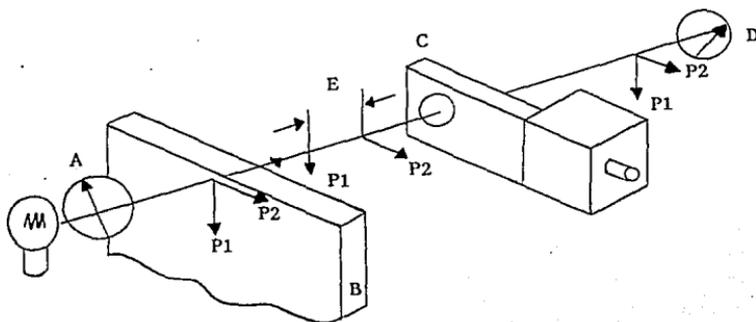
En donde G_E es el esfuerzo perimetral.

t es el espesor del vidrio.

y C_B es la constante de esfuerzo óptico del material
(Constante de Brewster)

Esta retardación relativa produce un patrón de interferencia, resultando en franjas de colores, como se puede observar utilizando el polarímetro. Cuando la retardación es de cero (vidrio endurecido) se observará en el polarímetro un campo negro. En un vidrio templado se observa una franja negra cercana a el canto, e indica la profundidad de la zona de compresión.

FIGURA 3.5 COMPOSICION DEL POLARIMETRO CON EL COMPENSADOR
A) POLARIZADOR B) VIDRIO C) COMPENSADOR
D) ANALIZADOR E) RETARDACION



La herramienta más útil para medir la retardación es el compensador. (también llamada cuña) El compensador agrega una retardación ajustable y hace mas lenta a la onda rápida. Cuando la retardación del compensador y del espécimen son iguales y de signo opuesto la suma de los dos es cero y la franja negra se observa en el punto a medir.

Los compensadores pueden anular un amplio rango de retardaciones, por lo que estos son calibrados uno por uno de fábrica, dando esta un factor " b " el cual debe de ser utilizado para el calculo de los esfuerzos del contador del compensador.

Para realizar las mediciones de esfuerzos de los cantos utilizaremos un equipo GES-100 producido por STRAINOPTIC TECHNOLOGIES INC.

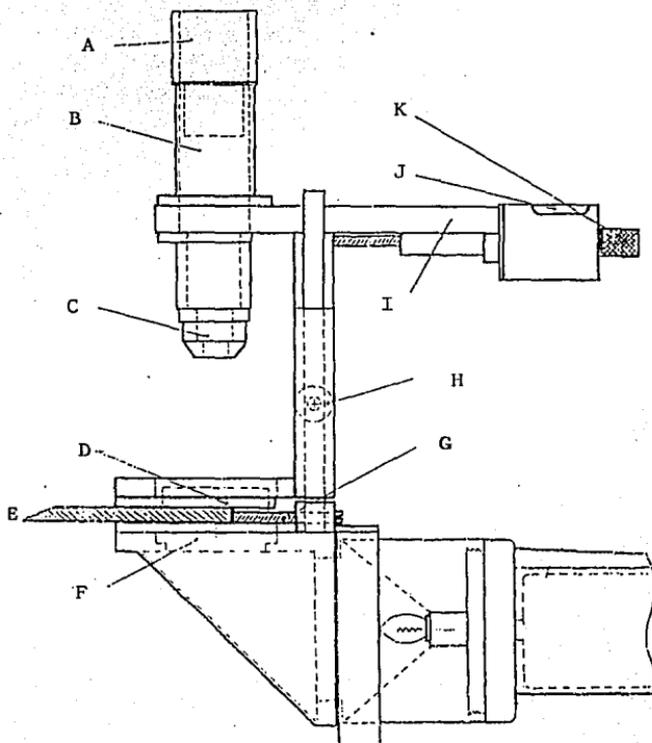
La medición de los esfuerzos perimetrales con el método de "CANTO" es de la siguiente forma.

- 1) Se coloca el vidrio en el equipo, fijándolo con los tornillos para prensarlo.
- 2) Se afocan los numero con el lente superior del equipo.
- 3) Se ajusta a ceros el contador del compensador

En caso de que la visibilidad del canto sea buena se utiliza este método, de lo contrario se deberá utilizar el método de "PROXIMIDAD DEL CANTO".

- 4) Se rota la perilla del compensador en sentido contrario de las manecillas del reloj, en donde la numeración comenzará a crecer, y la franja negra se irá acercando a el canto del vidrio.
- 5) Se toma la medición del compensador (R_E) cuando la franja negra se encuentra en el canto.

FIGURA 3.6 MEDIDOR DE ESFUERZOS DE CANTO
 A) OCULAR B) MICROSCOPIO C) LENTE
 D) RETICULA DE MEDICION E) VIDRIO F) POLARIZADOR
 G) TORNILLO POSICIONADOR H) PERILLA FIJADORA
 I) COMPENSADOR J) MEDICION DE RETARDACION
 K) PERILLA DEL COMPENSADOR



Una vez realizada la medición de la compresión del vidrio en el canto se realiza el cálculo con la siguiente ecuación.

(sistema métrico)

(sistema inglés)

$$G_E = (R_E b) / t C_B \quad (3.1) \quad \text{o} \quad G_E = (R_E F b) / t \quad (3.2)$$

La selección de la ecuación depende de las unidades de medición que utilizemos

en donde: R_E Es la retardación del canto obtenida con el polarímetro

C_B, F Es la constante de esfuerzo óptico del material (tabla 3.5)

t Es el espesor del vidrio

b Es la constante de calibración del compensador.

TABLA 3.5 CONSTANTES DE ESFUERZO-OPTICO DE MATERIALES

| VIDRIO | CONSTANTE DE BREWSTER C_B | | F <u>psi x pul</u> franja |
|---------------------------------|-----------------------------|-------|------------------------------|
| | 10 | m / N | |
| SILICE/POTASA | 2.55 | | 1,270 |
| SILICA-PLOMO (SRM 708) | 2.85 | | 1,140 |
| BOROSILICATO | 3.80 | | 850 |
| ALTO CONT. DE PLOMO (SRM709) | -1.359 | | -2,400 |
| 60% Pb O | 2.00 | | 1,600 |
| VIDRIO ESTIRADO | 2.68 | | 1,220 |
| VIDRIO FLOTADO | 2.7 | | 1,210 |

PROXIMIDAD DEL CANTO:

Este método se utiliza cuando el canto no puede ser observado libremente, por lo que se requiere:

- 1) Se ajusta el polarímetro del mismo modo que se hizo en el caso de "CANTO".
- 2) Rotar la perilla en sentido contrario a las manecillas del reloj, con lo que la franja negra avanzara hacia el canto del vidrio.
- 3) Determinar dos lecturas R_1 en X_1 , y R_2 en X_2 , para lo que se sugiere ocupar la tabla 3.6 para diferentes rangos de espesor del vidrio.

TABLA 3.6 SELECCION DE X_1 Y X_2 PARA DIFERENTES ESPESORES DE VIDRIO

| | 1/8" A 3/16" (3 mm A 5 mm) | 1/4" A 3/8" (6 mm A 10 mm) | 1/2" A 1" (12 mm A 24.5 mm) |
|-------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| X_1 | 0.6 mm A 0.8 mm | 1.0 mm | 2.0 mm |
| X_2 | 1 mm A 1.3 mm | 1.6 mm | 3.0 mm |

Estas son distancias sugeridas del canto a el punto de medición, en donde cada división vista por el polarímetro es de 0.1 mm

X_1 , y X_2 son la distancia del canto a el punto en donde se medirán R_1 , y R_2 respectivamente, en el caso del vidrio delgado es recomendable tomar X_1 como 0.6 mm, cuando el canto no está desbastado muy profundo en caso de no ser posible tomese X_1 como 0.8 mm.

Una vez que han sido tomadas las lecturas R_1 , y R_2 , la resultante R_E se obtiene con la siguiente ecuación:

$$R_E = 3.8 R_1 - 2.8 R_2 \quad (3.3)$$

Ya obtenida la resultante R_E , se puede proceder a el cálculo con la ecuación 3.1, o 3.2

POLARIMETRO DE ANGULO DE ROCE SUPERFICIAL

El polarímetro de ángulo de roce superficial, mide los esfuerzos superficiales de los vidrios midiendo la birrefringencia producida en las muestras de vidrio como resultado de los esfuerzos, la birrefringencia es directamente proporcional a los esfuerzos (Ley de Brewster)

$$n_1 - n_2 = (e_1 - e_2) \times C_B \quad (3.4)$$

en donde C_B es la constante de Brewster del material.

$n_1 - n_2$ es la birrefringencia.

$e_1 - e_2$ es la diferencia de los principales esfuerzos.

Para poder medir la birrefringencia en la muestra de vidrio, es necesario pasar la luz a través de la superficie.

Esto se puede llevar a cabo operando en un ángulo crítico la combinación de exponentes del prisma del equipo y la refracción de la muestra. (figura 3.7). Para lograr una refracción crítica el exponente "N" del prisma debe ser mayor que el exponente "n" de la muestra de vidrio, y la luz debe incidir en la interface prisma-vidrio a un ángulo crítico c. El ángulo crítico es determinado por la fórmula:

$$c = n/N \quad (3.5)$$

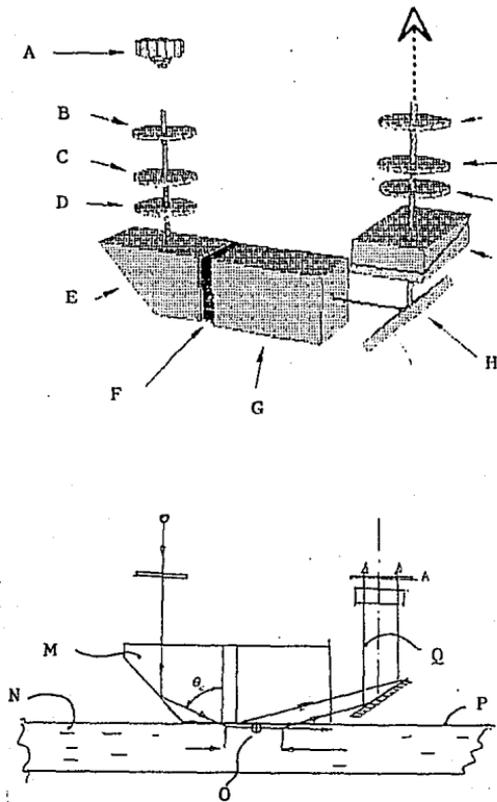
En donde n y N son los índices de refracción de la muestra de vidrio, y de el prisma del equipo respectivamente.

Es necesario utilizar un fluido de contacto o exponente intermedio para proveer contacto óptico entre el prisma y la muestra.

En el ángulo crítico, el ángulo de refracción es de 90 grados, y la luz que entra a la muestra viaja adyacente a la superficie, cuando esto se logra, la luz estará viajando en donde es necesario, a poca distancia de la superficie.

Así como lo indica su nombre, el "Polarímetro de Angulo de Roce Superficial" utiliza un método de análisis con polarímetro, este requiere que la luz que viaja a través de la superficie de la muestra de vidrio sea polarizada en un plano, a la entrada, y esto se logra agregando un filtro polarizado en la trayectoria orientado a 45 grados del plano de incidencia.

FIGURA 3.7 POLARIMETRO DE ANGULO DE ROCE SUPERFICIAL
 A) LAMPARA B) LENTE C) LENTE CILINDRICO
 D) FILTRO POLARIZADOR E) PRISMA DE ENTRADA
 F) DIVISION G) PRISMA DE SALIDA H) ESPEJO
 I) CUÑA DE CUARZO J) FILTRO POLARIZADOR
 K) LENTE L) LENTE DE SALIDA M) INDICE n
 N) INDICE N O) ESFUERZO MEDIDO
 P) CARA ESTAÑADA DEL VIDRIO FLOTADO
 Q) RETARDACION R



Debido a que la única luz a utilizar es la que viaja por la superficie de la muestra la demás luz debe ser eliminada al máximo. Para ayudar a esto, el prisma del equipo está dividido en dos partes, un prisma de entrada y un prisma de salida, divididos por un separador opaco. El prisma de entrada sirve para que la luz entre a la muestra de vidrio, mientras que el prisma de salida recoge la luz que ha viajado en la superficie del vidrio, El propósito del divisor opaco es evitar que la luz reflejada directamente entre a el prisma de salida

La luz polarizada que entra a la muestra de vidrio y viaja por la superficie tiene un origen común en el divisor opaco. Después de que el viaje de la luz pasa el divisor, comienza a entrar a el prisma de salida, la luz no entra a el prisma de salida en un solo punto, sino que entra gradualmente a todo lo largo de la superficie de contacto. Debido a que la retardación es directamente proporcional a el largo de la trayectoria "t". Los rayos de luz que entran a el prisma de salida, después de viajar por la muestra del vidrio varían sus distancias y tendrán valores de retardación "R" proporcionales al producto de estas distancias y de la birrefringencia presentada a lo largo de la trayectoria.

$$R = (t)(n_1 - n_2) \quad (3.6)$$

Si el esfuerzo en la superficie es constante bajo el largo del contacto del prisma, la retardación de la luz de que entra a el prisma de salida variará linealmente a lo largo, sin embargo, si el esfuerzo no es constante la retardación variará de manera indicativa a la variación del esfuerzo.

La variación de la retardación en esta luz es analizada con una cuña de cuarzo, en conjunto con un segundo filtro polarizador. el cual tiene sus ejes orientados a 90 grados a el primer filtro. a esta combinación se le llama "compensador de cuña de cuarzo", o "compensador lineal".

En caso de no haber esfuerzos superficiales no habrá birrefringencia, y la retardación "R" será de cero por lo que se observarán franjas paralelas en el compensador. (figura 3.8)

Cuando el esfuerzo es uniforme, la variación lineal en la retardación, tiende a cambiar el sistema de franjas, que se forma en el compensador a un ángulo de la dirección de la retardación constante. En este caso el sistema de franjas seguirá consistiendo de un sistema de franjas rectas paralelas, pero se presentarán inclinadas a un ángulo de la vertical, La tangente de este ángulo es directamente proporcional a los esfuerzos superficiales. (figura 3.9)

La medición de los ángulos se puede realizar por medio de un disco instalado en el observador de el equipo, el cual contiene una línea ajustada para ser rotada e indicar el ángulo de las franjas observadas en el compensador, esta raya está ajustada inicialmente a cero grados cuando el vidrio no está esforzado. (figura 3.10)

FIGURA 3.8 VISTA DE FRANJAS PARALELAS SIN ANGULO EN UN VIDRIO SIN ESFUERZOS

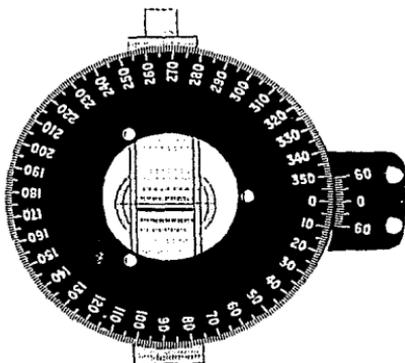


FIGURA 3.9 VISTA DE FRANJAS PARALELAS CON ANGULO PROVOCADO POR LOS ESFUERZOS EN EL VIDRIO

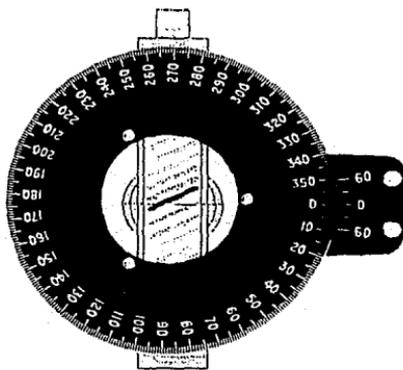
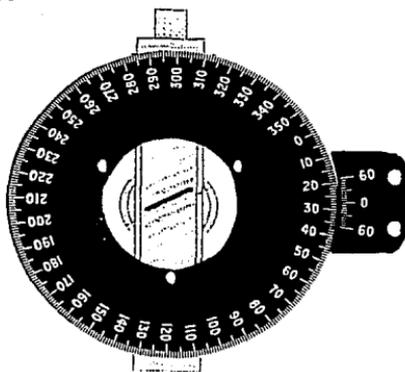


FIGURA 3.10 AJUSTE DEL DISCO PARA DETERMINAR EL ANGULO Y ASI EL ESFUERZO



Para obtener una medición de el esfuerzo se utiliza una tabla previamente calculada para cada material, en el caso del vidrio utilizamos la tabla 3.7

TABLA 3.7 RELACION DE ANGULO-ESFUERZO

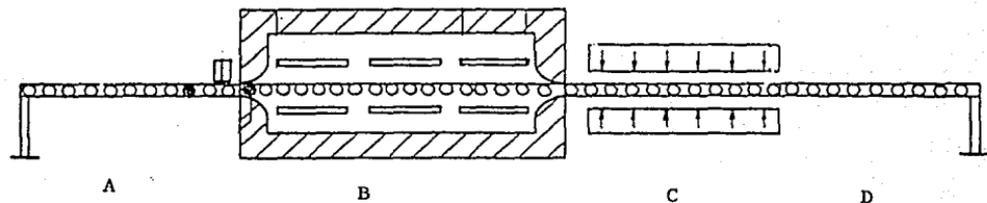
| ANGULO | ESFUERZO EN VIDRIO FLOTADO | |
|--------|----------------------------|--------|
| | PSI | MPa |
| 50° | 7,247 | 49.97 |
| 51° | 7,509 | 51.78 |
| 52° | 7,783 | 53.67 |
| 53° | 8,070 | 55.64 |
| 54° | 8,370 | 57.71 |
| 55° | 8,685 | 59.88 |
| 56° | 9,015 | 62.16 |
| 57° | 9,364 | 64.56 |
| 58° | 9,732 | 67.10 |
| 59° | 10,120 | 69.78 |
| 60° | 10,533 | 72.62 |
| 61° | 10,970 | 75.64 |
| 62° | 11,437 | 78.86 |
| 63° | 11,935 | 82.29 |
| 64° | 12,468 | 85.97 |
| 65° | 13,041 | 89.92 |
| 66° | 13,658 | 94.17 |
| 67° | 14,326 | 98.78 |
| 68° | 15,051 | 103.78 |
| 69° | 15,842 | 109.23 |
| 70° | 16,707 | 115.20 |

CAPITULO 4
DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO

El sistema utilizado para el temple de vidrio y está integrado por: 1) una mesa de carga, 2) un horno, 3) una sección de toberas, 3) una mesa de descarga, 4) un sistema de sopladores y 5) un sistema computarizado para su operación (figura 4.1)

FIGURA 4.1 DISTRIBUCION DEL EQUIPO DE TEMPLADO
A) MESA DE CARGA B) HORNO C) TOBERAS
D) MESA DE DESCARGA



COMPUTADORA DE OPERACION

La computadora es una parte muy importante dentro del proceso, ya que nos permite controlar los ciclos, la oscilación dentro del horno y toberas, mantener la temperatura constante, coordinar los movimientos de transporte del vidrio de un ciclo a otro, apertura y cierre de compuertas, tamaño de los vidrios que entran, y en general todos los movimientos dentro del equipo están coordinados por esta

La computadora, contiene un programa, en el cual se ajustan todas las variables de operación del proceso, como son:

Tiempo de calentamiento: este se ajusta dependiendo del espesor del vidrio, con aproximadamente 40 segundos por milímetro, llegando a ajustarse en el caso de un vidrio con mayor absorción de calor como los vidrios de color, así como los vidrios con perforaciones y resaques.

Tiempo de templado: este se ajusta dependiendo del espesor, y es el tiempo en el que el vidrio se encuentra totalmente templado

Tiempo de enfriamiento: este es el tiempo necesario para que el vidrio pueda ser retirado de la zona de toberas, a una temperatura en la que pueda ser bajado con las manos.

Aceleración: es la aceleración en el movimiento oscilatorio del vidrio.

Velocidad de transferencia: es la velocidad con la que el vidrio va a pasar de un ciclo al otro, ya sea de mesa de carga, al horno, del horno al área de toberas, o del área de toberas al área de descarga.

Velocidad normal: es la velocidad con la que el vidrio va a estar oscilando dentro del horno, o de los sopladores.

Temperaturas: esta es la temperatura de los elementos térmicos dentro de el horno, controlándose cada uno de los 6 grupos de elementos.

Al igual que la coordinación de los movimientos, la computadora nos indica también los errores que se han cometido como pueden ser falta de presión de aire en la línea, falta de concordancia entre el tiempo y temperatura, y ayudar a detectar una falla mecánica dentro del sistema.

MESA DE CARGA

La mesa de carga para vidrio es un equipo sencillo, en el cual se acomodan las piezas antes de ser transportadas al horno, está equipada con rodillos transportadores ahulados, los cuales acercan el vidrio a la puerta de entrada del horno sin dañar al vidrio, y este es detectado por una fotocelda, detectando la posición inicial del vidrio así como su longitud, para que en caso de ser un vidrio demasiado grande lo expulsa evitando que choque contra las compuertas de entrada o de salida del horno

HORNO

El horno es una especie de caja, la cual tiene paredes aislantes muy eficientes que mantienen la temperatura del exterior a menos de 50 °C, mientras que el interior se encuentra casi a 700 °C

El horno es calentado por 90 resistencias eléctricas, acomodadas en 6 grupos de 15 resistencias cada una, estando 3 grupos en la parte superior y 3 grupos en la parte inferior. Estas resistencias están en contacto con termopares que miden la temperatura y envían la información a la computadora la cual controla la variación de la temperatura dentro del horno. Mientras el horno no está trabajando se puede dejar a la temperatura a 500 °C con lo cual se evita el consumo excesivo de energía, también cuenta con un sistema para comenzar un precalentamiento antes de comenzar a trabajar, y así tener el horno a la temperatura adecuada de trabajo en el momento de comenzar las labores evitando así la pérdida de al menos una hora de trabajo.

El horno cuenta con un dispositivo el cual permite fijar temperaturas límite, para en caso de que se rebase alguna de estas las resistencias se apagarán automáticamente evitando así algún daño mayor

Los rodillos transportadores dentro del horno son de un material cerámico completamente lisos permitiendo transportar el vidrio en el interior del horno en forma oscilatoria, estos rodillos son una parte muy importante para la buena calidad del vidrio templado ya que cualquier defecto en su superficie se copia sobre el vidrio dejando en el una marca permanente.

SOPLADORES

Esta sección es también, un sistema oscilatorio, y está constituida por rodillos metálicos forrados por un cordón de fibra de vidrio, o kevlar, materiales que por sus características resisten las altas temperaturas sin llegar a quemarse fácilmente.

Aquí se le aplica al vidrio aire a presión para lograr su temple, y enfriamiento, la presión se ajusta dependiendo del espesor del vidrio ya que el enfriar con mucho aire a un vidrio de mayor espesor nos va a provocar mayor distorsión o incluso roturas, quedando el vidrio demasiado esforzado. La altura de las toberas también es regulada dependiendo del espesor a templar.

MESA DE DESCARGA

En esta sección del equipo únicamente se verifica la distorsión del vidrio con la ayuda de un equipo luminoso, teniendo una pantalla de acrílico con franjas negras y blancas permitiendo observar con el reflejo sobre el vidrio la distorsión provocada por el templado, y permitiendo retirar el vidrio ya templado.

VENTILADORES

El equipo que se encuentra en esta sección son dos sopladores o ventiladores radiales de 200 H.P. cada uno, un ventilador axial de 20 H.P. y un compresor de tornillo de 125 H.P.

El buen aprovechamiento de este equipo es importante pues el consumo de energía eléctrica es muy alto al utilizar un motor de 200 H.P. por lo que es necesario un buen entrenamiento del operador en el manejo de estos equipos

Este equipo se encuentra aislado del resto, principalmente por el ruido que se genera en esta sección, para lo cual se han instalado paredes de block forradas de cartón de huevo para evitar que el ruido rebote en las paredes, esto no elimina totalmente el ruido pero si lo disminuye en un gran porcentaje.

DISPOSITIVOS DE EMERGENCIA

Adicional a estos sistemas el equipo contiene un equipo de emergencia, el cual se puede accionar en caso de una falla eléctrica pudiendo retirar del horno el vidrio, ya que si se deja dentro del horno el vidrio se fundirá sobre los rodillos dañándolos irreversiblemente.

4.2 FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

Para comenzar a operar el horno, es necesario primero tenerlo a la temperatura adecuada de funcionamiento dependiendo del espesor, para lo cual es importante programar la producción del día, antes de comenzar a templar vidrio, el motivo es que debido a que para templar un vidrio grueso se necesita una menor temperatura, se debe comenzar por los espesores mayores, y terminar con los espesores menores lo que nos va a provocar ir de menor temperatura a mayor temperatura, ya que el aislamiento del horno no nos permite bajar la temperatura rápidamente y si nos permite subirla rápidamente.

La inspección que se realiza antes de meter el vidrio al horno es sumamente importante ya que el vidrio debe de tener los acabados como barrenos, resagues y cantos, dentro de las normas de producción de lo contrario se incrementa el riesgo de una rotura repentina dentro del horno lo que nos provocaría pérdida de tiempo al tener que enfriar el horno para su limpieza.

No es recomendable operar el horno cuando tiene piezas de vidrio roto en el interior, ya que el vidrio en estado líquido es buen conductor de electricidad y puede provocar la fractura de los elementos térmicos al ocasionar un corto

Los requerimientos de calidad principales son los siguientes:

- 1) Todos los trabajos en el vidrio deberán ser realizados con equipo refrigerado por agua, principalmente, ruedas diamantadas, las cuales dejan un acabado más suave, que el de otros abrasivos
- 2) El diámetro de los barrenos en los vidrios deberán ser siempre mayor a el espesor del vidrio.
- 3) Las entradas y resagues deberán tener esquinas redondeadas con un diámetro mayor que el espesor del vidrio
- 4) La distancia de la orilla del barreno a la orilla del vidrio deberá ser siempre mayor a dos veces el espesor del vidrio
- 5) La distancia de la orilla del barreno a la esquina más cercana deberá de ser de por lo menos cuatro veces el espesor del vidrio

Una vez realizada la inspección del vidrio en la mesa de carga, se debe de programar las variables del horno de acuerdo con el espesor a trabajar, y permitir que estas variables como la temperatura sean estables. Con las variables ajustadas se procede a meter el vidrio dentro del horno.

Dentro del horno el vidrio va a estar en un movimiento oscilatorio en donde se va a mantener el tiempo programado en el cual va a lograr obtener la temperatura uniforme de toda su masa. Mientras tanto la computadora va a regular el funcionamiento de los elementos térmicos para compensar la temperatura que es absorbida por el vidrio.

Tomando en cuenta que el vidrio va a absorber temperatura por radiación y por convección es necesario considerar la posición de los vidrios en cada carga ya que si se carga todo el vidrio únicamente de un lado los rodillos tendrán una menor temperatura de un extremo con respecto a el otro y esto nos puede ocasionar desde problemas relativamente sencillos de distorsión hasta fracturas dentro del horno, ya que al vidrio es necesario calentarlo de forma uniforme para evitar una fractura.

Una vez que el vidrio obtiene una temperatura uniforme del centro con respecto a las caras pasa automáticamente a el área de sopladores en donde se produce un enfriamiento de las superficies expuestas antes que en el centro lo que nos va a provocar el temple del vidrio. La presión de viento es regulada dependiendo del espesor, a menor espesor, mayor presión, a mayor espesor menor presión, esto es debido a que lo que se está buscando es un choque térmico, y debido a que un vidrio delgado se enfría muy rápido, es necesario aplicar una mayor presión para adelantarnos a ese enfriamiento natural.

En este proceso es importante la utilización de la presión adecuada con el menor equipo ya que se puede templar vidrio grueso con un soplador mayor, únicamente cerrando las compuertas, sin embargo el ocupar el soplador menor nos va a reducir considerablemente el consumo de energía eléctrica.

Finalmente el vidrio sale a la mesa de descarga en donde se ven los defectos de distorsión en el vidrio con la ayuda de un equipo iluminado llamado "cebra", el cual consiste de rayas blancas y negras con iluminación y la distorsión del reflejo de este sobre el vidrio nos permite saber si se está sobrecalentando el vidrio o se está trabajando a la temperatura adecuada, los rodillos de esta sección son similares a los de la mesa de carga siendo estos forrados de hule.

Existe un sistema de emergencia el cual arroja un chorro de agua sobre el vidrio en caso de falla eléctrica, evitando así que los rodillos sean quemados por el vidrio caliente, sin embargo este sistema no evita la rotura del vidrio.

4.3 EXPERIMENTACION

Para este efecto se utilizaron piezas de vidrio de un solo espesor (6 mm) de dimensiones 300 mm X 300 mm, en donde se varió las condiciones de temperatura y presión, haciendo el experimento con 18 piezas de acuerdo a la siguiente tabla, haciendo dos de cada una de estas.

| PRESION | T E M P E R A T U R A °C | | |
|---------|--------------------------|---------|---------|
| | 669/766 | 705/730 | 740/766 |
| 1.0 kPa | 1a | 2a | 3a |
| 1.3 kPa | 1b | 2b | 3b |
| 1.7 kPa | 1c | 2c | 3c |

A partir de esta tabla se determinó cual es la mejor muestra dentro de las normas de calidad, adicional a las mediciones del polarímetro, con lo que determinaremos los esfuerzos superficiales del vidrio,

Para los cálculos de los esfuerzos perimetrales o cercanos al canto, utilizamos la fórmula 3.3, y la 3.2, obteniendo de ellas la siguiente ecuación

$$G_E = (R_E F b) / t \quad (3.2)$$

$$R_E = 3.8 R_1 - 2.8 R_2 \quad (3.3)$$

$$G_E = ((3.8 R_1 - 2.8 R_2) F b) / t$$

Sustituyendo los valores con la tabla 3.5, la constante del equipo, y el espesor del vidrio, obtenemos:

$$G_E = ((3.8 R_1 - 2.8 R_2) (1270) (0.00906)) / (0.24409)$$

Simplificando:

$$G_E = (3.8 R_1 - 2.8 R_2) (47.13917) \quad (4.1)$$

La cual es la ecuación a utilizar para calcular el esfuerzo perimetral en las diferentes pruebas de vidrio.

Para la muestra "1a" templada con una temperatura de 669/766 y una presión de 1.0 kPa, se obtuvo los siguientes resultados:

ESFUERZO SUPERFICIAL: ANGULO - 62° EQUIVALENTE A 11,437 psi

ESFUERZO PERIMETRAL: $X_1 = 1 \text{ mm}$ $X_2 = 1.6 \text{ mm}$

$$R_1 = 116 \quad R_2 = 68$$

$$G_E = ((3.8)(116) - (2.8)(68)) (47.13917)$$

$$G_E = 11,803.65 \text{ psi}$$

DISTORSION OPTICA: MUY BAJA

FRACTURA: 52 FRACCIONES EN UN CUADRO DE 50 mm X 50 mm

IMPACTO CON BOLA DE ACERO: ROTA

Para la muestra "1b" templada con una temperatura de 669/766 y una presión de 1.3 kPa, se obtuvo los siguientes resultados:

ESFUERZO SUPERFICIAL: ANGULO - 64° EQUIVALENTE A 12,468 psi

ESFUERZO PERIMETRAL: $X_1 = 1 \text{ mm}$ $X_2 = 1.6 \text{ mm}$

$$R_1 = 106 \quad R_2 = 58$$

$$G_E = ((3.8)(106) - (2.8)(58)) (47.13917)$$

$$G_E = 11,332.25 \text{ psi}$$

DISTORSION OPTICA: MUY BAJA

FRACTURA: 77 FRACCIONES EN UN CUADRO DE 50 mm X 50 mm

IMPACTO CON BOLA DE ACERO: ROTA

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Para la muestra "1c" templada con una temperatura de 669/766 y una presión de 1.7 kPa, se obtuvo los siguientes resultados:

ESFUERZO SUPERFICIAL: ANGULO - 65° EQUIVALENTE A 13,041 psi

ESFUERZO PERIMETRAL: $X_1 = 1 \text{ mm}$ $X_2 = 1.6 \text{ mm}$

$$R_1 = 121 \quad R_2 = 72$$

$$G_E = ((3.8)(121) - (2.8)(72)) (47.13917)$$

$$G_E = 12,171.34 \text{ psi}$$

DISTORSION OPTICA: MUY BAJA

FRACTURA: 137 FRACCIONES EN UN CUADRO DE 50 mm X 50 mm

IMPACTO CON BOLA DE ACERO: ROTA

Para la muestra "2a" templada con una temperatura de 705/730 y una presión de 1.0 kPa, se obtuvo los siguientes resultados:

ESFUERZO SUPERFICIAL: ANGULO - 66° EQUIVALENTE A 13,658 psi

ESFUERZO PERIMETRAL: $X_1 = 1 \text{ mm}$ $X_2 = 1.6 \text{ mm}$

$$R_1 = 175 \quad R_2 = 125$$

$$G_E = ((3.8)(175) - (2.8)(125)) (47.13917)$$

$$G_E = 14,848.83 \text{ psi}$$

DISTORSION OPTICA: SE COMIENZAN A PERCIBIR IMPERFECCIONES SOBRE EL VIDRIO, PROVOCADAS POR LOS RODILLOS.

FRACTURA: 73 FRACCIONES EN UN CUADRO DE 50 mm X 50 mm

IMPACTO CON BOLA DE ACERO: ROTA

Para la muestra "2b" templada con una temperatura de 705/730 y una presión de 1.3 kPa, se obtuvo los siguientes resultados:

ESFUERZO SUPERFICIAL: ANGULO - 67° EQUIVALENTE A 14,326 psi

ESFUERZO PERIMETRAL: $X_1 = 1 \text{ mm}$ $X_2 = 1.6 \text{ mm}$

$$R_1 = 137 \quad R_2 = 90$$

$$G_E = ((3.8)(137) - (2.8)(90)) (47.13917)$$

$$G_E = 12,661.58 \text{ psi}$$

DISTORSION OPTICA: SE COMIENZAN A PERCIBIR IMPERFECCIONES SOBRE EL VIDRIO, PROVOCADAS POR LOS RODILLOS.

FRACTURA: 104 FRACCIONES EN UN CUADRO DE 50 mm X 50 mm

IMPACTO CON BOLA DE ACERO: RESISTIO

Para la muestra "2c" templada con una temperatura de 705/730 y una presión de 1.7 kPa, se obtuvo los siguientes resultados:

ESFUERZO SUPERFICIAL: ANGULO - 68° EQUIVALENTE A 15,051 psi

ESFUERZO PERIMETRAL: $X_1 = 1 \text{ mm}$ $X_2 = 1.6 \text{ mm}$

$$R_1 = 163 \quad R_2 = 105$$

$$G_E = ((3.8)(163) - (2.8)(105)) (47.13917)$$

$$G_E = 15,339.08 \text{ psi}$$

DISTORSION OPTICA: SE COMIENZAN A PERCIBIR IMPERFECCIONES SOBRE EL VIDRIO, PROVOCADAS POR LOS RODILLOS.

FRACTURA: 138 FRACCIONES EN UN CUADRO DE 50 mm X 50 mm

IMPACTO CON BOLA DE ACERO: RESISTIO

Para la muestra "3a" templada con una temperatura de 740/766 y una presión de 1.0 kPa, se obtuvo los siguientes resultados:

ESFUERZO SUPERFICIAL: ANGULO - 65° EQUIVALENTE A 13,041 psi

ESFUERZO PERIMETRAL: $X_1 = 1 \text{ mm}$ $X_2 = 1.6 \text{ mm}$

$$R_1 = 215 \quad R_2 = 148$$

$$G_E = ((3.8)(215) - (2.8)(148)) (47.13917)$$

$$G_E = 18,978.23 \text{ psi}$$

DISTORSION OPTICA: PRESENTA IMPERFECCIONES MAS PROFUNDAS PROVOCADAS POR LOS RODILLOS, ADEMAS DE ONDULACIONES LIGERAS

FRACTURA: 85 FRACCIONES EN UN CUADRO DE 50 mm X 50 mm

IMPACTO CON BOLA DE ACERO: ROTA

Para la muestra "3b" templada con una temperatura de 740/766 y una presión de 1.3 kPa, se obtuvo los siguientes resultados:

ESFUERZO SUPERFICIAL: ANGULO - 67° EQUIVALENTE A 14,326 psi

ESFUERZO PERIMETRAL: $X_1 = 1 \text{ mm}$ $X_2 = 1.6 \text{ mm}$

$$R_1 = 191 \quad R_2 = 135$$

$$G_E = ((3.8)(191) - (2.8)(135)) (47.13917)$$

$$G_E = 16,395 \text{ psi}$$

DISTORSION OPTICA: PRESENTA IMPERFECCIONES MAS PROFUNDAS PROVOCADAS POR LOS RODILLOS, ADEMAS DE ONDULACIONES EN LOS CANTOS DEL VIDRIO

FRACTURA: 118 FRACCIONES EN UN CUADRO DE 50 mm X 50 mm

IMPACTO CON BOLA DE ACERO: RESISTIO

Para la muestra "3c" templada con una temperatura de 740/766 y una presión de 1.7 kPa, se obtuvo los siguientes resultados:

ESFUERZO SUPERFICIAL: ANGULO - 68° EQUIVALENTE A 15,051 psi

ESFUERZO PERIMETRAL: $X_1 = 1 \text{ mm}$ $X_2 = 1.6 \text{ mm}$

$R_1 = 190$ $R_2 = 132$

$$G_E = ((3.8)(190) - (2.8)(132)) (47.13917)$$

$$G_E = 16,611.84 \text{ psi}$$

DISTORSION OPTICA: PRESENTA IMPERFECCIONES MAS PROFUNDAS PROVOCADAS POR LOS RODILLOS, ADEMAS DE ONDULACIONES EN TODA LA CARA DEL VIDRIO, DIFICULTANDOSE INCLUSO LA MEDICION DE ESFUERZO SUPERFICIAL.

FRACTURA: 152 FRACCIONES EN UN CUADRO DE 50 mm X 50 mm

IMPACTO CON BOLA DE ACERO: RESISTIO

CAPITULO 5

ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

Como pudimos observar en los capítulos anteriores, la industria del vidrio aún cuando se comenzó a desarrollar en el siglo VII no ha sido sino hasta este siglo cuando se ha desarrollado a nivel industrial y por lo mismo no ha tenido el mismo avance que otros materiales, pudiendo concluir que el vidrio que mejor se acopla para las necesidades de la industria del templado es el vidrio flotado por su alta calidad en la planicidad de caras que va ligado a la baja distorsión, comparada con su competidor más cercano que es el vidrio pulido, en sí el vidrio templado es una industria muy nueva, ya que incluso libros escritos en los años 30's mencionan la existencia del vidrio templado pero sin ninguna aplicación práctica, además de que en ese entonces su fabricación era muy costosa, y complicada así como la calidad que se lograba obtener no era muy buena, sin embargo con el desarrollo de nuevos procesos, como lo fueron el templado con pinzas se dio un gran salto y se comenzó el templado del vidrio a nivel industrial, y con este sistema se trabajó durante muchos años, sin embargo la calidad de este proceso no es muy buena ya que al tener que suspender el vidrio de pinzas, estas dejan su marca en el vidrio y en algunos casos no puede ser ocultada, en México este proceso entro en los años 50's , con el paso del tiempo se ha comenzado a encontrar más utilidad al vidrio templado, en equipos electrodomésticos, decoraciones, equipo de electrónica, transporte, etc. actualmente el proceso más común es el de templado con rodillos de cerámica, ya que este con el mantenimiento apropiado, y una buena capacitación logra obtener una calidad muy buena, con distorsión relativamente baja, y calidad de templado alta, se vislumbran nuevas tecnologías para la fabricación del vidrio templado en el futuro, sistemas que como vimos no tienen contacto con la superficie, por lo que quedan exentos de rayas muy pequeñas, o defectos que los rodillos pueden provocar al tener adheridos a ellos pequeñas imperfecciones producidas por contaminación dentro del horno, sin embargo hasta hora no se ha logrado mantener el vidrio sin distorsión causada por la presión del aire caliente que mantiene al vidrio flotando.

Otra tecnología poco desarrollada es el templado químico, el cual no produce distorsión en los vidrios, y nos da una excelente calidad en el templado, esta técnica solo es utilizada en casos muy especiales ya que su alto costo, no permite ser utilizada para aplicaciones comunes, por lo que el templado térmico con rodillos es en estos días la mejor opción para la industria del templado.

Con respecto a la calidad, la forma actual de pruebas al vidrio templado son básicamente pruebas destructivas, que nos indican muchas cualidades del vidrio templado y son de suma importancia, como lo es los fragmentos en que se rompe una pieza templada, ya que si una pieza templada se fracciona en piezas muy grandes puede provocar daños como cortadas en la piel, otra prueba importante es el impacto que resiste el vidrio templado el cual es muy superior al vidrio recocido, y nos permite tener la confianza de instalarlo en un edificio expuesto a fuertes vientos, y saber que el vidrio va a resistir la presión del viento, sin embargo es importante añadir a estas pruebas la medición de los esfuerzos residuales principalmente los superficiales que son los que podemos medir fácilmente, y nos dan un parámetro tangible de que tan bien o mal templado esta un vidrio, además que esta prueba no es destructiva, y se puede hacer de forma aleatoria en la corrida de producción, o a un vidrio instalado en caso de tener duda de su calidad de temple, y para esto el polarímetro de ángulo de roce, o el polarímetro de esfuerzos superficiales pueden ser los más adecuados pues estos nos miden de forma muy precisa los esfuerzos superficiales en el vidrio además de ser sumamente sencillo de utilizar.

Para el manejo de estos equipos lo más recomendable es utilizar el polarímetro de ángulo de roce ayudado por un método estadístico y realizar pruebas aleatorias a vidrio ya templados de un lote, esto debido a la fragilidad del equipo el cual debe ser manejado por una persona que conozca su manejo y mantenimiento.

El polarímetro de esfuerzos perimetrales es conveniente utilizarlo en la línea de producción el cual puede ser utilizado por el operador, y determinar parámetros del contador para cada espesor, esto para simplificar su operación y no tener que realizar un cálculo cada vez que se realiza una medición.

En un período muy corto será necesario la revisión de las normas de calidad del vidrio templado en México ya que en la fecha en que se realizó la última revisión (1983), aún no se contaba con equipo moderno para la medición de los esfuerzos superficiales, incluso observando la norma únicamente toca someramente en su parte 5.1.5.2 los esfuerzos de compresión, sin darles una mayor importancia, siendo que estos nos indican si el vidrio se encuentra en buenas condiciones de temple sin realizar pruebas destructivas, por lo que considero que esta medición se debería realizar periódicamente a la producción, en forma aleatoria, de hecho la ASTM (American Society for Testing and Materials), y la ANSI (American National Standards Institute), harán revisión de sus normas en 1994 y 1995, incluyendo en estas la medición de los esfuerzos superficiales, y los esfuerzos internos del vidrio templado por medio de el uso del polarímetro de ángulo de roce.

En resumen, el vidrio templado es un vidrio esforzado internamente con la ayuda de un tratamiento térmico, y sus esfuerzos pueden ser medidos con la ayuda de polarímetros, ya sean de ángulo de roce, para medir sus esfuerzos superficiales, o un polarímetro para esfuerzos perimetrales con el que podemos medir los esfuerzos en los cantos de un vidrio, estos son los métodos no destructivos para medir la calidad de un vidrio templado, sin embargo tenemos otros métodos destructivos para conocer la calidad del vidrio pues nos indican si el vidrio que hemos templado es seguro o no lo es, estos son la medición de fragmentos en un vidrio templado roto, o la prueba de impacto la cual nos indica si el vidrio resiste a un cierto impacto medido, por lo que considero que la combinación de estas cuatro técnicas de verificación de calidad deben de hacerse en conjunto para saber si un vidrio es confiable y puede utilizarse como vidrio de seguridad en equipo de transporte, del hogar, o en edificios.

En las pruebas realizadas en el capítulo 4 vemos que la pieza que mejor cumple con las normas es la probeta número 2b ya que esta presenta el menor grado de distorsión óptica, así como cantidad de fragmentos adecuados, y resistencia al impacto con bola de acero, por otro lado, la prueba fabricada con menor consumo de energía, y que resiste las pruebas es la pieza 2b. Lo más recomendable es realizar una prueba similar para cada espesor de vidrio variando las temperaturas y las presiones de proceso con lo que puede uno lograr determinar los parámetros óptimos de proceso para lograr una calidad constante en el producto, sin embargo no debemos olvidar que estas condiciones pueden cambiar en un corto plazo ya que la temperatura, del medio ambiente, así como la humedad influyen en el proceso pues el enfriamiento se puede retardar o acelerar. (TABLAS 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5)

TABLA 5.1 RESULTADOS DE ESFUERZOS SUPERFICIALES CON DIFERENTES CONDICIONES (PSI)

| MUESTRA | 1 | 2 | 3 |
|---------|--------|--------|--------|
| A | 11,437 | 13,658 | 13,041 |
| B | 12,468 | 14,326 | 14,326 |
| C | 13,041 | 15,051 | 15,051 |

TABLA 5.2 RESULTADOS DE ESFUERZOS PERIMETRALES CON DIFERENTES CONDICIONES (PSI)

| MUESTRA | 1 | 2 | 3 |
|---------|--------|--------|--------|
| A | 11,803 | 14,848 | 18,978 |
| B | 11,332 | 12,661 | 16,395 |
| C | 12,171 | 15,339 | 16,611 |

TABLA 5.3 RESULTADOS DE DISTORSION OPTICA CON DIFERENTES CONDICIONES

| MUESTRA | 1 | 2 | 3 |
|---------|------|-------|------|
| A | BAJA | BUENA | ALTA |
| B | BAJA | BUENA | ALTA |
| C | BAJA | BUENA | ALTA |

TABLA 5.4 RESULTADOS DE FRACTURAS CON DIFERENTES CONDICIONES

| MUESTRA | 1 | 2 | 3 |
|---------|-----|-----|-----|
| A | 52 | 73 | 85 |
| B | 77 | 104 | 118 |
| C | 137 | 138 | 152 |

TABLA 5.5 RESULTADOS DE IMPACTO DE BOLA DE ACERO DE SEGUN TABLA 14B DE LA NOM-P-5-CT-1983 A 3.5 METROS DE ALTURA

| MUESTRA | 1 | 2 | 3 |
|---------|------|---------|---------|
| A | ROTA | ROTA | ROTA |
| B | ROTA | RESISTE | RESISTE |
| C | ROTA | RESISTE | RESISTE |

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

Se propone que lo más adecuado para certificar la calidad óptima del vidrio templado, es la combinación de las técnicas antes descritas, es decir utilizando el polarímetro de ángulo de roce, el cual nos indica con una gran exactitud el esfuerzo superficial del vidrio en cualquier punto, ya que este se puede colocar en la superficie del vidrio sin necesidad de estar cerca de la orilla, y aplicando directamente una tabla nos indica el esfuerzo superficial del vidrio con lo que podemos tener un parámetro para determinar si el vidrio medido esta bien o mal templado, y sin tener que realizar pruebas de fractura a un lote ya fabricado.

Por otro lado el polarímetro de esfuerzos perimetrales nos ofrece la ventaja de poderse instalar fácilmente e indicarnos la magnitud del esfuerzo de compresión en las orillas, con lo que también podemos determinar si el vidrio está bien o mal templado, pudiendo utilizarse este en la línea de producción ya que no es un equipo tan delicado como el polarímetro de ángulo de roce.

Los métodos tradicionales que son utilizados en la línea de producción como lo es el impacto de bola, y la cantidad de fragmentos por decímetro cuadrado, nos pueden seguir ayudando a certificar la calidad del producto, pero utilizados en conjunto con el equipo de polarimetría

Con esto podemos ver que las normas nacionales e internacionales no están completas y estas deberán ser modificadas en un corto plazo incluyendo en ellas métodos de certificación de calidad que utilicen las técnicas más modernas de medición de esfuerzos.

Finalmente el Tratado de Libre Comercio ayudará a apresurar la revisión de estas normas para así poder estar a la vanguardia de la tecnología internacional.

CAPITULO 7

BIBLIOGRAFIA

- 1) UHLMANN DONALD AND N.J. KREIDL
GLASS SCIENCE AND TECHNOLOGY
ELASTICITY AND STRENGTH IN GLASSES
ACADEMIC PRESS 1980
- 2) TOOLEY FAY V.
THE HANDBOOK OF GLASS MANUFACTURE
3RD EDITION
ASHLEE PUBLISHING CO., INC.
VOLUMEN I 1984
- 3) TOOLEY FAY V.
THE HANDBOOK OF GLASS MANUFACTURE
3RD EDITION
ASHLEE PUBLISHING CO., INC.
VOLUMEN II 1984
- 4) MARI A. EDUARDO
LOS VIDRIOS
PROPIEDADES, TECNOLOGICAS DE FABRICACION Y APLICACIONES
EDITORIAL AMERICA LEE BUENOS AIRES ARGENTINA
1982
- 5) STANDARDS TECHNOLOGY TRAINING
RESIDUAL STRESS MEASUREMENTS
PRINCIPLES AND APPLICATIONS
1990
- 6) NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-P-5-CT-1983
VIDRIOS, CRISTALES Y PLASTICOS DE SEGURIDAD PARA VEHICULOS
MOTORIZADOS, CARROS DE FERROCARRIL Y REMOLQUES.
DIRECCION GENERAL DE NORMAS
- 7) NOM-P-10-1983
PRODUCTOS DE VIDRIO-VIDRIO Y CRISTAL DE SEGURIDAD PARA LA
CONSTRUCCION.
DIRECCION GENERAL DE NORMAS

- 8) NORMA ASTM C 148-92
STANDARD TEST METHODS FOR POLARISCOPIIC EXAMINATION OF GLASS CONTAINERS
- 9) ASTM C 770-77
STANDARD TEST METHOD FOR MEASUREMENT OF GLASS STRESS-OPTICAL COEFFICIENT
- 10) ASTM C 978-87
PHOTOELASTIC DETERMINATION OF RESIDUAL STRESS IN A TRANSPARENT GLASS MATRIX USING A POLARIZING MICROSCOPE AND OPTICAL RETARDATION COMPENSATION PROCEDURES
- 11) ASTM C 1048-92
STANDARD ESPECIFICATION FOR HEAT-TREATED FLAT GLASS-KIND H.S., KIND F.T. COATED AND UNCOATED GLASS
- 12) ASTM D4093-91
STANDARD TEST METHOD FOR PHOTOELASTIC MEASUREMENTS OF BIREFRINGENCE AND RESIDUAL STRAINS IN TRANSPARENT OR TRANSLUCENT PLASTIC MATERIALS
- 13) ASTM F218-68
STANDARD METHOD FOR ANALYZING STRESS IN GLASS
- 14) GLASS TEMPERING ASSOCIATION
ENGINEERING STANDARDS MANUAL
1991
- 15) NORMA ANSI Z97.1-1984
FULLY TEMPERED SAFETY GLASS FOR GENERAL CONSTRUCTION USAGE
AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE
SPECIFICATION NO. 64-3-16B REV#5

- 16) NORMA CAN/CGSB-12.1-M79
GLASS, SAFETY, TEMPERED OR LAMINATED
CANADIAN GENERAL STANDARDS BOARD
- 17) CAN/CGSB-12.2-M76
GLASS, SHEET, FLAT, CLEAR
CANADIAN GENERAL STANDARDS BOARD
- 18) CAN/CGSB-12.3-M76
GLASS, POLISHED PLATE OR FLOAT, FLAT, CLEAR
CANADIAN GENERAL STANDARDS BOARD
- 19) CAN/CGSB-12.4-M76
GLASS, HEAT ABSORBING
CANADIAN GENERAL STANDARDS BOARD
- 20) CAN/CGSB-12.20-M89
STRUCTURAL DESIGN OF GLASS FOR BUILDINGS
CANADIAN GENERAL STANDARDS BOARD
- 21) CONSUMER PRODUCT SAFETY COMMISSION
CPSA STANDARD ON ARCHITECTURAL GLAZING MATERIALS
16 CFR 1201
- 22) FLAT GLASS MARKETING ASSOCIATION
GLAZING MANUAL
1988
- 23) NORMA SAE J674b
SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, INC.
- 24) SAE J673
SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, INC.