

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ANALISIS DE ROTURA DE PARABRISAS EN EL  
EMPAQUE Y EL TRANSPORTE

POR

ING. JESUS ALBERTO GONZALEZ RODRIGUEZ

T E S I S

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERIA DE MANUFACTURA CON  
ESPECIALIDAD EN DISEÑO DE PRODUCTO

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE 2002

ANÁLISIS DE ROTURA DE PARRISAS EN EL  
EMPAQUE Y EL TRANSPORTE

J. A. G. R.

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
2002  
.G668

2002



1020148458

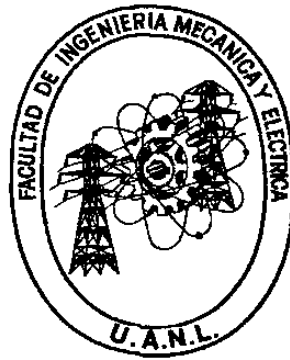
982 113

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
2002  
.G668



FONDO  
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ANÁLISIS DE ROTURA DE PARABRISAS EN EL EMPAQUE Y EL TRANSPORTE

POR

ING. JESÚS ALBERTO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA DE  
MANUFACTURA CON ESPECIALIDAD EN DISEÑO DE PRODUCTO

MONTERREY N.L. A DICIEMBRE DE 2002

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Subdirección de Estudios de Postgrado

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Análisis de rotura de parabrisas en el empaque y el transporte", realizada por el alumno Ing. Jesús Alberto González Rodríguez, matrícula 617699 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería de Manufactura con especialidad en Diseño de Producto.

Comité de Tesis



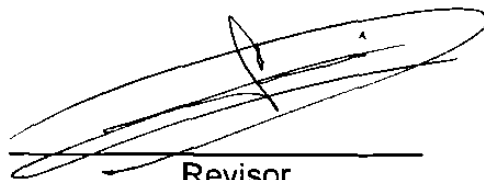
Asesor

Dr. Moisés Hinojosa Rivera



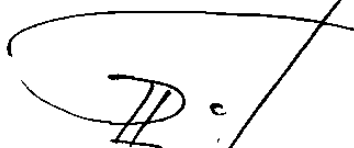
Revisor

Dr. Ubaldo Ortiz Méndez



Revisor

M.C. Francisco Eugenio López Guerrero



Vo.Bo.

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez  
División de Estudios de Post-grado

Monterrey N.L., Noviembre del 2002

# **DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS**

*Dedico el presente trabajo con todo cariño para mi esposa Tayde, mi hija Lucía, mis padres Alberto y María de la Luz, y mi hermana Jessica.*

*Agradezco sinceramente el apoyo del Dr. Moisés Hinojosa Rivera por el tiempo dedicado en la asesoría de esta tesis, y de los ingenieros:*

*Dr. Ubaldo Ortiz Méndez (Postgrado Fime Uanl)  
M.C. Eugenio López (Postgrado Fime Uanl)  
M.C. Francisco Javier Garza Méndez  
Ing. Jonathan Sánchez (Postgrado Fime Uanl)  
Ing. Larry Smith (Visteon Tulsa Glass Plant)  
Ing. Thomas Cleary (Visteon Glass Systems)  
M.C. Marco Antonio Méndez (Postgrado Fime Uanl)*

# PRÓLOGO

Hacia los 1890's los hermanos Duryea; Elwood Haynes, A.L. Riker, los gemelos Stanley y Henry Ford, fueron pioneros de una de las industrias más frutíferas: La industria automotriz. Cabe mencionar que en nuestra cultura los automóviles representan diferentes aspectos ligados al status: Elegancia, buen gusto, poder adquisitivo, capacidad, etc. Cuando el legendario Enzo Ferrari dio inicio a la producción artesanal de automóviles, éstos llegaron al plano de objetos artísticos. Pero, ¿qué hay en común en todos los automóviles y que es, al mismo tiempo, lo que los diferencia?. La respuesta es muy simple: Los materiales de los cuales están hechos, entre otras cosas. Un diseñador realiza una obra, un prototipo de automóvil. Éste al llegar a la producción requiere de piezas con diferentes formas, algunas de ellas, si bien estéticas, son muy complicadas. Cuando las personas hablan de un auto, los comentarios característicos son muy típicos; la línea, el color, etc., pero, ¿qué hay de los "vidrios"? El vidrio es uno de los materiales más importantes en la industria automotriz, los vidrios de los parabrisas y ventanillas deben soportar en algunos lugares temperaturas tan calientes como 50 °C ó tan frías como -30°C, entre otras cosas. Los "cristales", como comúnmente se les dice, cumplen diferentes funciones en los autos: estética, aislamiento, seguridad, etc.

El vidrio es uno de los materiales en los que la industria de Nuevo León está basada. Originalmente, la producción de vidrio en la región fue orientada a satisfacer la demanda de recipientes para bebidas y también la demanda de vidrio plano. Con el paso del tiempo se ha visto que la industria tradicional ha tenido que evolucionar. Actualmente la industria automotriz tiene fuerte presencia en la región de Nuevo León y Coahuila. El presente escrito es un



ejemplo de colaboración e interacción entre las industrias y las instituciones educativas de la región, para abordar una problemática particular.

El autor nos presenta en este trabajo la clasificación y análisis de un problema específico: La alta incidencia de roturas en el empaque y el transporte del vidrio parabrisas, específicamente en la planta Vitro Flex, S.A. de C.V. en García N.L.

Los comercios se están globalizando y con ello el compromiso de las industrias es ser cada vez más competentes. Poco a poco la industria tendrá que ir incorporando el método científico en la resolución de problemas como el planteado en este trabajo, justamente como lo hace el autor de este documento.

El ingeniero Jesús González plantea en este trabajo la solución a este problema, empleando el método y el conocimiento científico. El autor concluye que uno de los principales parámetros a mejorar es el diseño de los contenedores. Las técnicas y experimentos planteados en este trabajo hacen de éste un documento de interés de alto nivel, además de la agradable lectura.

Espero que este trabajo sea del agrado del lector como lo ha sido para un servidor.

Francisco Javier Garza Méndez

San Nicolás de los Garza a 26 de Octubre de 2002.

# ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO</b>	<b>PAG.</b>
Síntesis	8
1. Introducción	13
1.1 Descripción del problema	13
1.2 Objetivo de la tesis	14
1.3 Hipótesis	14
1.4 Límites de estudio	15
1.5 Justificación del trabajo de tesis	15
1.6 Metodología	16
1.7 Revisión bibliográfica	16
2. Marco Teórico	18
2.1 ¿Qué es el vidrio?	18
2.1.1 Definición y concepto de vidrio	18
2.1.2 Estructura atómica del vidrio	19
2.1.3 Punto de fusión	21
2.1.4 Cristalización	21
2.1.5 Los materiales amorfos	21
2.1.6 Algunos materiales amorfos	22
2.2 La viscosidad del vidrio	23

2.2.1	Viscosidad y temperatura	23
2.3	Propiedades mecánicas del vidrio	24
2.3.1	Dureza	24
2.3.2	Escala "Mohs"	25
2.3.3	Otras escalas	25
2.3.4	Resistencia a la abrasión	26
2.3.5	Fragilidad	26
2.4	Resistencia mecánica	28
2.4.1	Compresión, corte y tensión	29
2.4.2	Efectos de tiempo, temperatura y humedad	30
2.5	Otras propiedades y características	31
2.6	Materias Primas para la fabricación de vidrio	33
2.7	Proceso de elaboración de vidrio	38
2.8	Fabricación de vidrio plano	41
2.9	Los vidrios de seguridad	43
2.9.1	Historia del vidrio laminado	44
2.9.2	Protección que ofrece	45
2.9.3	Elementos de un parabrisas	46
2.9.4	La fabricación (proceso básico)	46
3.	Esfuerzos en el vidrio	50
3.1	Desarrollo de esfuerzos permanentes en el vidrio	50
3.1.1	Pérfiles de esfuerzos en una placa de vidrio simétricamente enfriada durante el recocido y templado	54
4.	Fractura	55

4.1	Mecánica de la fractura	55
4.2	Hipótesis de las fracturas superficiales	57
4.3	Modos de aplicación de cargas	60
5	Medición de esfuerzos aplicados en los parabrisas usando la técnica de sensores de deformación	61
5.1	Introducción	61
5.2	Medición de deformación con sensores de deformación	62
5.2.1	Principio de funcionamiento de los sensores de deformación.	63
6	Caso de estudio: Análisis de parabrisas rotos en el empaque y el transporte	64
6.1	Introducción	64
6.2	Metodología para el análisis del problema	68
7	Técnicas de análisis del problema y desarrollo experimental	70
7.1	Recolección de la evidencia de la rotura en el empaque	70
7.2	Análisis y clasificación de la información	73
7.3	Hipótesis de la rotura de parabrisas en el empaque	77
7.4	Estimación de los esfuerzos de rotura según el patrón de la fractura	79
7.5	Determinación de los esfuerzos analizando el origen de la fractura	82
7.6	Determinación de los esfuerzos mecánicos sufridos por los parabrisas en el empaque usando sensores de deformación	89
7.6.1	Objetivo del experimento de medición de esfuerzos por medio de sensores de deformación.	90

7.6.2 Descripción del experimento	90
7.6.3 Procedimiento del experimento	91
7.6.4 Resultados del experimento	94
7.6.5 Interpretación de los resultados	96
8. Conclusiones y recomendaciones	98
8.1 Conclusiones	98
8.2 Recomendaciones	100
Bibliografía	101
Lista de Tablas	102
Lista de Gráficas	103
Apéndice A.	105
Resumen Autobiográfico	110

## Síntesis

En el presente trabajo se analiza un problema industrial en el área de fabricación de vidrio automotriz, específicamente parabrisas. El problema es la alta incidencia de parabrisas rotos durante el empaque y el transporte de éstos desde la planta de manufactura hasta su destino en la planta de ensamble de vehículos. El hecho de que el cliente reciba una pieza dañada al desempacarla, representa una característica crítica de calidad para él, además del costo involucrado por reposición del parabrisas, disposición de la pieza defectuosa, así como otros costos. Algunos intangibles como la pérdida de imagen como proveedor de la industria automotriz.

El problema se presenta en la planta de vidrio Vitroflex que es proveedor de importantes plantas ensambladoras de vehículos Ford en Estados Unidos de Norteamérica. El vidrio como materia prima y producto terminado se fabrican en el área de la ciudad de Monterrey, México, y se embarca a su destino final a las plantas localizadas a más de 3000 kilómetros de distancia. El modo de transporte generalmente utilizado es el ferrocarril en sus diferentes variantes por ser económico en comparación al transporte por carretera. El costo del flete representa un factor importante en la ecuación de costos del negocio.

Los indicadores de desempeño de calidad de Vitro Flex de piezas dañadas en el empaque muestran en la actualidad niveles promedio de las 2000 partes por millón (PPMs), pero hay clientes en los que se mantiene un nivel de hasta 6000 PPMs mensuales. Una meta interna de la planta es reducir este nivel un 50% por lo menos. El reporte e indicador de piezas rotas en empaque se lleva a tal detalle que especifica el área donde ocurrió la fractura en los parabrisas, esta información proviene del reporte de visitas del representante de la planta que visita a los clientes.

Como antecedentes al problema se puede mencionar que el empaque actual es utilizando un contenedor metálico cerrado con tres paredes y que cuenta con dos barras de hule con ranuras como soportes inferiores y dos respaldos también de hule que sirven como apoyo vertical. Los parabrisas se cargan y mantienen de forma vertical en el contenedor inclinados de 3 a 7 grados contra el respaldo que son dos colchones de hule de aproximadamente 4 pulgadas de diámetro y una pulgada de espesor. Se acomodan en cada una de las ranuras del soporte inferior y se separan en la parte superior por piezas de plástico en cada dos parabrisas. Todos los parabrisas van racargados uno con otro hacia el respaldo del contenedor. Este tipo de empaque pretende aprovechar la alta resistencia a la compresión del vidrio para mantener un paquete compacto. Al terminar de cargar todas la piezas del contenedor, generalmente 78, se flejan los parabrisas con dos flejes de plástico hacia el respaldo, comprimiendo aún más el paquete. Ver figura 1.

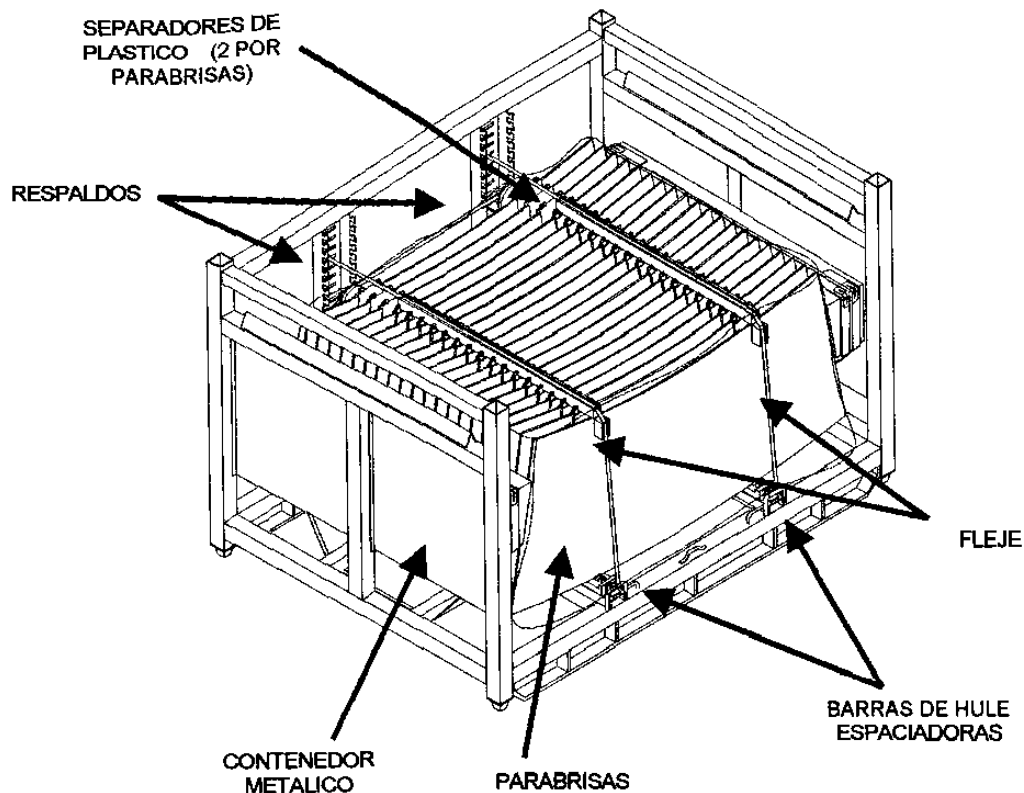


Figura 1. Contenedor metálico con parabrisas

El diseño de empaque mencionado sería efectivo si las piezas de vidrio que se acomodan en él fueran completamente idénticas, sin embargo existen tolerancias de fabricación que hacen que esta suposición no sea del todo cierta. Se investigaron los antecedentes de diseño del empaque y se encontró que su principio fue el suponer que las piezas serían idénticas y no se generarían esfuerzos mecánicos aplicados en el empaque por ser una masa compacta. Se hicieron pruebas de simulación del transporte, pero en éstas una vez más no se consideraron todas las variables involucradas. Este diseño de empaque ha funcionado relativamente bien para las plantas de vidrio localizadas cerca de los clientes y que embarcan por carretera, pero para el caso específico de Vitroflex ha sido ineficiente.



Las propiedades mecánicas del vidrio tales como su resistencia a la flexión y un buen análisis del comportamiento mecánico del paquete, son factores que se deben tomar en cuenta para el diseño.

El presente trabajo ofrece un marco teórico como primera parte para la mejor comprensión del vidrio y su comportamiento mecánico. También se incluye información del proceso y elementos para la fabricación de vidrio plano que sirve como materia prima para los parabrisas automotrices. Así mismo se describe el proceso de fabricación de los parabrisas en la planta de manufactura y las características de estos como producto.

Dado que el problema que se trata es la falla de parabrisas en el empaque, se incluye un capítulo que trata la fractura de vidrio y proporciona las bases para el análisis del problema.

La metodología que se siguió para el análisis del problema tratado fue la recolección de información y evidencia de la rotura de parabrisas tanto con el cliente como en la misma planta de manufactura. Esta información se procesó y analizó para clasificar el problema. También sentó las bases para el planteamiento de la hipótesis de la rotura de los parabrisas en el empaque.

Se aprovecharon diferentes técnicas análisis de fractura en el vidrio para determinar los niveles de esfuerzo a que ocurrían las fallas con el fin proveer información de la magnitud del problema. Una de estas técnicas fue la estimación del esfuerzo de falla del vidrio analizando el origen de la fractura por medios microscópicos.

Finalmente se usó la técnica de medición de esfuerzos con sensores de deformación para conocer el comportamiento del empaque y las condiciones a que se sometía el vidrio dentro de este. El resultado del uso de esta técnica arrojó la comprobación de la hipótesis planteada y sentó los precedentes que

pueden guiar a un rediseño del empaque que resuelva el problema. Lo anterior se discute en el capítulo de conclusiones y recomendaciones al final del presente trabajo.

# 1. Introducción

## 1.1 Descripción del problema

La empresa Vitro Flex produce y exporta parabrisas laminados para automóviles. Sus clientes son ensambladoras de vehículos en diferentes partes de Estados Unidos, México y Canadá. El empaque utilizado para los envíos desde la planta hasta su destino son contenedores metálicos en los cuales ocasionalmente se rompe el parabrisas y esto ocasiona quejas y cargos por parte del cliente. La rotura ocurre durante el empaque y transporte del parabrisas.

Los métodos de transporte y manejo de materiales son variados dependiendo de cada cliente.

Las partes por millón de rechazo de calidad por empaque (PPM) no cumplen con las expectativas del cliente. Las PPM actuales de esta familia de productos promedian las 2000 PPM y hasta 6000 PPM en algunos casos. Se tiene una meta interna de la compañía que es de 1000 PPM.

Las consecuencias de la rotura en empaque son cargos por el cliente y los costos asociados con ello, por ejemplo, visitas del representante de la compañía, cargos variados por manejo y disposición de las piezas rotas y sobre todo, pérdida de imagen.

Los costos anuales por parabrisas rotos en el empaque alcanzan los \$785,080 M.N.

## 1.2 Objetivo de la tesis

Analizar los factores que provocan esfuerzos aplicados en el parabrisas durante el empaque causando su fractura, con el fin de proponer soluciones para la eliminación o reducción de dichos factores. La propuesta de solución inferirá los elementos a tomar en cuenta para el rediseño del contenedor, el cual sea capaz de garantizar de mejor manera la integridad del producto y reducir el índice de rotura a niveles aceptables.

## 1.3 Hipótesis

Se busca probar que en el diseño de empaque actual, el parabrisas se encuentra expuesto a niveles altos de esfuerzos mecánicos aplicados, causando los niveles actuales de rotura.

## 1.4 Límites de estudio

El estudio se limita a las condiciones y circunstancias actuales de la empresa VitroFlex, productora de vidrio automotriz para el mercado original y de repuesto. La tesis se enfoca al análisis de una familia de productos que son los parabrisas, cuyo su destino son ensambladoras de automóviles localizadas en Estados Unidos, Canadá y México.

## 1.5 Justificación del trabajo de Tesis

El costo de la fractura de parabrisas antes de llegar a su destino final en el ensamble de un vehículo va más allá del costo de reposición de dicha parte y de los costos asociados con ello. El costo de pérdida de imagen y confianza ante el cliente por una falta de reacción positiva ante el problema, puede ser de gran escala en momentos donde el cliente tiene diferentes opciones de un mismo producto dada la competencia actual. El problema se presenta de tal manera que se hace necesaria la aplicación del método científico para resolverlo. La investigación realizada y reportada en este trabajo, aporta los elementos necesarios para conducir a la solución del problema.

## 1.6 Metodología

1. Marco teórico del vidrio y generación de esfuerzos en éste, como preámbulo para el entendimiento del problema.
2. Comprensión del comportamiento mecánico del vidrio.
3. Recopilación de información para obtener una base estadística que permita la definición exacta del problema.
4. Análisis de la fractura de vidrio.
5. Experimentación con sensores de deformación para cuantificar los niveles de esfuerzos mecánicos en el vidrio durante el empaque.
6. Conclusiones y recomendaciones.

## 1.7 Revisión Bibliográfica

Siendo este un estudio sobre el desempeño de un producto automotriz, se tomó en cuenta la literatura relacionada con las partes automotrices además de la literatura propia sobre el vidrio, con fin de encontrar una comparación referencial a este estudio. Se encontró dentro de la base de datos de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE por sus siglas en inglés). Un estudio sobre los esfuerzos mecánicos inducidos en los parabrisas durante su ensamble en el vehículo. La referencia de este artículo es : SAE 1999-01-3160. "Windshield investigation-manufacturing and installation stresses."

Dicho artículo se enfoca a la medición de los esfuerzos inducidos en el vidrio usando un innovador medidor de esfuerzos llamado Polariscope Grey-Field. En

este estudio se usó este equipo para detectar zonas de alto esfuerzo cuando se ensamblaba el parabrisas en la carrocería. Conociendo dichas zonas, se buscó la solución al hacer correcciones en la carrocería para reducir los esfuerzos inducidos. Se hizo la acción correctiva y se verificaron los resultados. Las razones que motivaron este estudio fue la alta incidencia de rotura del parabrisas en el vehículo.[1]

En el caso de estudio que se presenta en este trabajo, se busca un fin similar. Las condiciones de la rotura y la experimentación difieren, pero se busca detectar áreas de altos esfuerzos en el empaque y buscar una solución a ellos.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 ¿Qué es el vidrio?

#### 2.1.1 Definición y concepto de vidrio.

La ASTM (American Society for Testing and Materials) a través de su comité C-14 sobre vidrio y productos de vidrio, adoptó la siguiente definición para el vidrio como material de ingeniería:

**VIDRIO** – “Un producto inorgánico de fusión que se ha enfriado a una condición rígida sin cristalizarse”

Los físico-químicos lo llaman:

*“un líquido sub-enfriado”*

El concepto de “vidrio” se aplica a:

- Un estado de la materia
- Un producto comercial



El estado "vítreo" de la materia es una condición que es importante explicar pues define un tipo de sustancia con características muy especiales y entre las cuales se encuentra el vidrio comercial.

Las sustancias "vítreas" son un estado específico de la materia y se incluyen entre los materiales amorfos, clasificación que abarca a los sólidos que carecen de estructura cristalina [2].

### 2.1.2 Estructura atómica del vidrio

Existen básicamente tres tipos de arreglo u orden entre las unidades constitutivas (átomos, iones o partículas) en los materiales: desorden, arreglo de corto alcance y arreglo de largo alcance.

En materiales como el vidrio se presenta un arreglo atómico de corto alcance; esto es, éste se extiende solamente a los átomos vecinos más cercanos. Tomando como ejemplo la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) se tiene que el silicio posee una valencia 4 y comparte sus electrones con cuatro átomos de oxígeno, obteniendo un total de ocho electrones. Por otra parte, el oxígeno tiene una valencia de seis y comparte sus electrones con dos átomos de silicio, obteniendo un total de ocho electrones, ver figura 2.1 [3].

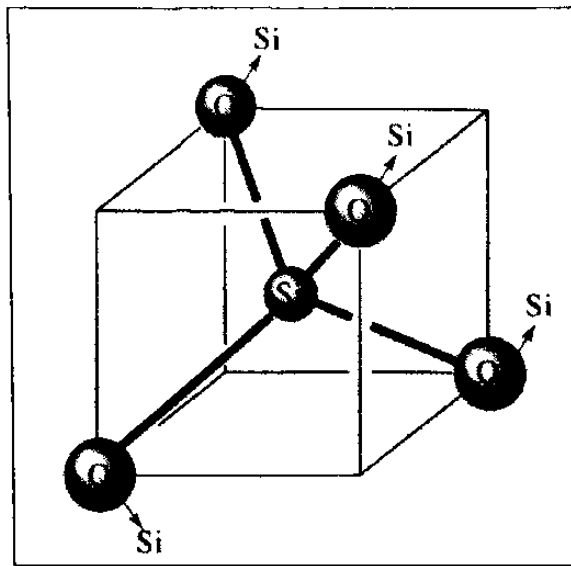


Figura 2.1 Estructura tetraédrica de la sílice

En la figura 2.2 se puede apreciar el ordenamiento de corto alcance para la sílice.

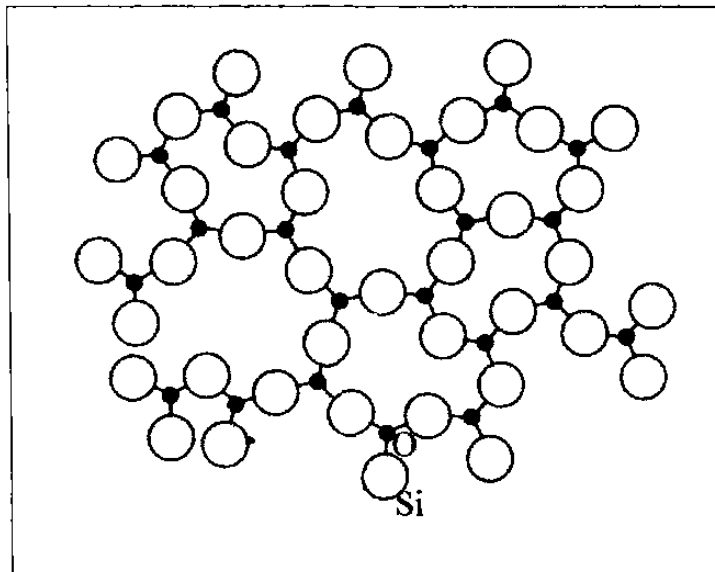


Figura 2.2 Red vítrea de la sílice

### 2.1.3 Punto de Fusión

Cuando un líquido que está a una temperatura por encima de su punto de fusión se comienza a enfriar, llegará un punto en el cual sufrirá un cambio abrupto de líquido a sólido cuando llega a una temperatura fija y específica para cada material.

A medida que el líquido se solidifica, cede calor y su masa se mantiene a una temperatura fija hasta que todo está completamente sólido y entonces sí continúa bajando la temperatura del sólido. Esta temperatura se llama de "solidificación" o de "congelación" o de "fusión".

### 2.1.4 Cristalización

La mayor parte de los líquidos al solidificarse forman "cristales", es decir arreglos ordenados de átomos en un patrón geométrico definido que se repiten y se agrupan en sentido tridimensional.

En físico-química la palabra "cristal" tiene el significado anterior, pero familiarmente, le damos una connotación de claridad y transparencia, cualidades que posee el vidrio, por lo que al denominar al vidrio "cristal", podemos pensar que su estructura es cristalina siendo que precisamente el vidrio tiene la característica contraria, es decir no es "cristalino" en su arreglo atómico sino amorfo.

### 2.1.5 Los materiales amorfos

Los materiales "amorfos" cuando se enfrían, se tornan más y más viscosos pasando gradualmente a una condición rígida y contrariamente cuando estos cuerpos rígidos se calientan de nuevo, gradualmente se "suavizan" y se van convirtiendo en un líquido cada vez menos viscoso. Al irse

solidificando, sus átomos no toman un arreglo ordenado sino que se acomodan al azar, por lo que se llaman sustancias amorfas.

Estos materiales que no cambian de estado abruptamente ni forman cristales al solidificarse son físicamente vidrios, independientemente de su composición química.

### 2.1.6 Algunos materiales amorfos

Algunos ejemplos de materiales amorfos o vítreos son: los caramelos y chichosos de dulce y otras preparaciones de azúcar y agua; el selenio amorfo (a diferencia del selenio "monoclínico" que sí es cristalino); el trióxido de arsénico que si se condensa rápidamente tendrá estructura cristalina, pero que si se condensa lentamente formará un vidrio transparente e incoloro; el bórax (sal de boro y sodio) y el óxido de boro que también producen vidrios de por sí y como añadidos (vidrios de boro-silicato); la sílica fundida (el vidrio más puro) y finalmente las mezclas a partir de las sílicas y los silicatos que son vidrios comerciales.

Entre los materiales orgánicos están las resinas naturales del pino como la "pez" y la "cola" que son transparentes y van de viscosos a sólidos gradualmente.

## 2.2 La viscosidad del vidrio

### 2.2.1 Viscosidad y Temperatura.

La viscosidad es una medición de la fricción interna de un fluido. Es la propiedad por la cual un fluido se resiste a cualquier fuerza deformante, por lo tanto la viscosidad es una de las influencias controladoras del movimiento y de la deformación de un fluido. La viscosidad de los líquidos disminuye al aumentar la temperatura.

La viscosidad se considera como “la propiedad más importante del vidrio” ya que afecta a todos los procesos de formación como soplado, prensado, estirado, rolado, doblado, flotado e inclusive en la fundición afecta las corrientes dentro del horno y la liberación de gases en la refinación.

La unidad de medición de la viscosidad es el “poise”. Un número mayor indica que el fluido es más viscoso.

En la tabla 2.1 se dan algunos valores importantes de la viscosidad y temperaturas relacionadas con características del vidrio soda-calcio.

Como ejemplo, el vidrio se saca a doblar en los hornos de templado a 620°C y sale de la cámara de flotado hacia el recocedor a 600°C aproximadamente[2].

Tabla 2.1 Valores importantes de viscosidad y temperatura en vidrios soda calcio.

	LOG. VISC.	°C
Rango de Fusión (Según ASTM)	1.5 - 2.5	1235
Estirado en Proceso Fourcault	4.0 - 4.4	1050
Punto de Suavización ASTM (Softening Point)	7.6	680
Deformación por Gravedad	11.3 – 11.7	560-550
Punto de Recocido ASTM (Annealing Point)	13.0	520
Rango de Recocido ASTM	13.0 – 14.4	520-490
Punto de Esfuerzos ASTM (Strain Point)	14.6	480

## 2.3 Propiedades Mecánicas

### 2.3.1 Dureza

Es la capacidad de un material, de resistir pequeñas indentaciones, es decir resistir la penetración, rayado o abrasión causados por otro material.

No hay una sola manera de medir la dureza, ya que de por sí no es una característica única y claramente definida, sino una combinación de varias propiedades. Todos los procedimientos de medición son empíricos y son del tipo comparativo, donde se define el método del experimento y los resultados obtenidos para diversos materiales se califican como valores de escalas comparativas.

### 2.3.2 Escala de "Mohs"

La escala más sencilla es la de Mohs, basada en la capacidad de un material a ser "rayado" superficialmente por otro, dando el No.1 al más suave y el 10 al más duro, No es una escala lineal, pues la diferencia de dureza entre 9 y 10 probablemente sea tan grande como entre 1 y 9. En esta escala la dureza del vidrio se sitúa entre 4.5 y 7. Ver tabla 2.2.

Tabla 2.2 Escala de Mohs para dureza

<b>Escala</b>	<b>Material</b>
1	Talco
2	Yeso
3	Calcita
4	Fluorina
5	Apatita
6	Feldespatos
7	Cuarzo
8	Topacio
9	Corindon
10	Diamante

### 2.3.3 Otras escalas.

Basadas en la penetración de un material duro que con una carga aplicada trata de penetrar el material de prueba, hay escalas diferentes de medición de dureza como las siguientes:

Brinell, Vickers, Knoop, Rockwell y Shore.

La tabla 2.3 muestra los valores de dureza Knoop de algunos vidrios.

Tabla 2.3 Dureza de algunos vidrios en la escala de Knoop

<b>Tipo de vidrio</b>	<b>Valor</b>
90% Plomo (Cristal)	188
Flint Denso	340
Soda-Caliza (Flotado)	443
Boro – silicato Crown	472
Sílica fundida	489

#### 2.3.4 Resistencia a la abrasión.

El vidrio se considera un material duro y esto es importante pues manifiesta una alta resistencia a la abrasión, lo cual permite mantener su transparencia por largo tiempo. Sin embargo, en usos automotrices y especialmente en parabrisas, el efecto de los limpiaparabrisas al operar con polvo de la atmósfera, a la larga va rayando el vidrio.

La resistencia alta a la abrasión mantiene al vidrio en una posición competitiva favorable con respecto a por ejemplo los plásticos transparentes como los acrílicos y policarbonatos.

#### 2.3.5 Fragilidad.

El concepto de fragilidad no ha sido definido satisfactoriamente. Se dice que una cosa es frágil si se rompe repentinamente.

Se dice que algo es “tan frágil como el vidrio” porque cuando se flexiona se dobla muy ligeramente y luego repentinamente se deshace en pedazos,



mientras que otros materiales como los metales, bajo esfuerzo se flexionan y se van deformando o doblando hasta que se quiebran. De hecho son difíciles de quebrar porque bajo esfuerzos “fluyen” es decir, se deforman plásticamente.

Por lo tanto, el concepto de “fragilidad” es la negación de la capacidad de “fluir” o de deformarse, o de tener plasticidad.

Si una varilla de vidrio se tuerce hasta romperla, las partes rotas encajan perfectamente una contra otra sin muestra de haberse deformado, cosa que no sucedería con un metal que sí se deforma al grado de no encajar las piezas rotas entre sí.

Para considerarse “frágil” un material debe satisfacer los siguientes requerimientos:

- 1.- Debe fallar a la tensión y no al corte.
- 2.- Debe tener un valor alto de su Módulo de Young.
- 3.- Debe tener un valor relativamente alto de resistencia a la tensión.
- 4.- Debe desarrollar fracturas en forma de “tenedor”.

El porqué debe cumplir con los requisitos anteriores se explica enseguida:

- 1.- Equivale a decir que el esfuerzo de ruptura no debe ser mayor que el esfuerzo de cedencia, o en otras palabras debe romperse antes de ceder o fluir.
- 2.- Esto es para excluir algunos materiales gelatinosos que cumplen con las otras condiciones.
- 3.- Esto es para excluir algunos materiales que más que frágiles se clasifican como exfoliables, como algunos tipos de piedras “lajas”. Esta clasificación es asunto de grado pues el límite no se puede establecer claramente.

Cumpliendo con las 3 primeras características, tendríamos que los materiales podrían considerarse frágiles y a ellos pertenecen el vidrio, el cuarzo, granito, basalto, (y muchas rocas sedimentarias e ígneas), ladrillos, refractarios, cerámica, etc. pero no tienen la fragilidad por excelencia característica del vidrio, pues les falta la 4ª. condición.

4. El material debe ser capaz de desarrollar fracturas que al irse formando, a avanzar la fractura, se subdividen en forma de tenedor, es decir una fractura se divide en más de una que a su vez al continuar el esfuerzo de tensión, se subdividen en más fracturas múltiples. Esto es lo que causa la aparición de "ASTILLAS", es decir piezas largas, angostas y agudas, lo cual difícilmente en los demás materiales frágiles.

La propiedad de reducirse violenta y explosivamente a astillas y de convertirse en añicos, es una propiedad que queda casi exclusivamente confinada al vidrio.

## 2.4 Resistencia Mecánica.

La resistencia del vidrio tiene poca relación con su composición química, inclusive en vidrios del mismo tipo, esta puede ser diferente. La condición de la superficie, sin embargo, tiene gran influencia en sus propiedades de resistencia. La resistencia teórica a la tensión del vidrio es mayor a 137,900 MPa ( $2 \times 10^6$  psi) . La resistencia efectiva del vidrio recocido es entre 20.7 y 55.2 MPa (3000 y 8000 psi). El vidrio templado del tipo usado en autos, tiene altos esfuerzos de compresión en las capas exteriores con tensión en el interior y resistencias entre 82.74 y 275.8 MPa (12,000 y 40,000 psi ). Nuevos tratamientos químicos han producido resistencias mayores a 1379 MPa (200,000 psi ). Una superficie lisa en una botella recién salida del molde,

soportara esfuerzos de 689.5 MPa (100,000 psi) ó más. Cuando la superficie se raya o talla inclusive ligeramente, más de la mitad de su resistencia se pierde. Para el tiempo en cuanto entra a servicio el producto, su resistencia puede ser tan baja como 20.7 MPa (3,000 psi ).

Un entendimiento de la “sensibilidad de la fisura” de materiales frágiles puede ayudar a explicar esta gran pérdida de resistencia. Los esfuerzos son concentrados en la punta de la fisura de cualquier material, pero con materiales dúctiles, la punta de la fisura cede, lo agudo de la punta se achata y la concentración de esfuerzos es reducida para que la fractura no se prolongue mas. De hecho, la mayoría de los materiales dúctiles se endurecen en la punta de la fisura lo suficiente para compensar el esfuerzo aumentado en ese punto. Con materiales frágiles como el vidrio, los esfuerzos frecuentemente exceden la resistencia del material en la punta de la grieta. Se desarrolla una fractura, y la falla se propaga a la velocidad del sonido.

Es conocido que microfracturas existen en toda la superficie de los vidrios como resultado del manejo en la manufactura y distribución en cantidades variando de 1,000 por centímetro cuadrado en una pieza de vidrio fina, a mas de 50,000 por centímetro cuadrado en vidrio comercial. Aunque esas microfisuras pueden ser pequeñas, si son lo suficientemente agudas, su concentración de esfuerzos puede ser considerable. Este efecto es proporcional a la raíz cuadrada de la relación de la profundidad de la fisura al radio de la punta de esta. Por lo tanto una fisura de únicamente 1 $\mu$ m de profundidad puede causar una falla.

#### 2.4.1 Compresión, corte y tensión.

Siendo la resistencia mecánica o resistencia a la rotura un factor tan importante en la fabricación y uso del vidrio, es así mismo un factor que no está todavía perfectamente comprendido, que no puede ser medido todavía con

suficiente precisión y que no puede garantizarse una medida cuantitativa de resistencia como sucede con otros materiales como los metales. Además comparado con otros materiales, el vidrio tiene baja resistencia mecánica y es una de sus mayores debilidades. Si el vidrio tuviera una resistencia a la rotura mucho mayor al mismo precio, desplazaría a muchísimos materiales y productos.

Para todo fin práctico la resistencia del vidrio a la compresión y al corte es tan grande que la podemos considerar infinita y preocuparnos solamente por la resistencia a la tensión que es la parte débil del vidrio.

#### 2.4.2 Efectos del tiempo, temperatura y humedad.

Una muestra de vidrio puede ser por ejemplo soportar un esfuerzo de 68.94 MPa (10,000 psi) por un minuto, pero puede fallar a 41.36 MPa (6000 psi) si la carga se aplicada durante varias horas. Este debilitamiento del vidrio se conoce como "fatiga estática".

En el vidrio, los efectos de tiempo y temperatura, parecen estar relacionados con la reacción del agua sobre las fallas de la superficie ya que esta acelera el que las fracturas se propaguen bajo esfuerzo. Cuando el vidrio se prueba en una atmósfera seca, su resistencia aumenta considerablemente.

En pruebas con vidrio enfriado con nitrógeno líquido a  $-196^{\circ}\text{C}$  donde todo el vapor de agua atmosférico está congelado, no solo es más resistente al vidrio sino que el efecto de "fatiga estática" desaparece y las cargas las puede soportar por tiempo indefinido.

A medida que la temperatura sube en un ambiente normal, la resistencia disminuye hasta llegar a unos 100°C donde llega a un mínimo de allí comienza a aumentar hasta que al llegar al punto de suavización su resistencia mecánica disminuye aceleradamente.

Los efectos de la temperatura y la humedad se explican por el efecto de del agua sobre la liga de los átomos de Sílica de Oxígeno pues ayudan a que se rompa esa liga.

## 2.5 Otras propiedades y características

Podemos mencionar otras propiedades del vidrio tales como una transparencia alta y permanente en vidrio claro o de colores. Traslucidez u opacidad con variedad de colores. Superficies muy lisas sin necesidad de operaciones de acabado posteriores. Alta resistencia a ataques químicos (excepto al ácido hidrofúorhídrico). No se contamina con los materiales con los que está en contacto (no guarda olores ni sabores). Estabilidad dimensional, permanencia de las formas. Bajo peso específico (relativamente). Ver la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Peso específico de diferentes materiales.

<b>Material</b>	<b>Peso específico (gr/cm<sup>3</sup>)</b>
Agua	1.0
Aluminio	2.7
Madera	0.35 – 0.72
Fierro Vaciado	7.2
Plásticos	1.0 – 1.6
Acero	7.8
Concreto	1.9 – 2.5
Latón	8.5
Vidrio	2.5
Cobre	8.9
Granito	2.5 – 3.1
Plomo	11.3

Otras propiedades y características del vidrio s son su baja conductividad de calor. Alta resistencia al calor. Bajo coeficiente de expansión. Buena resistencia a los esfuerzos térmicos. Buenas propiedades dieléctricas (en frío). Facilidad de formar en caliente piezas de formas intrincadas y amplio rango de colores permanentes.

## 2.6. Materias Primas para la fabricación de vidrio

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

- I. Vitrificantes
- II. Fundentes
- III. Estabilizantes
- IV. Componentes secundarios

### I. Vitrificantes

#### Sílice

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

La proporción de sílice en la arena debe estar en el intervalo de 98.5-99.5% permitiéndose de 0.1 a 0.5 % de  $Al_2O_3$  via impurezas (feldespatos, caolín, etc).

#### Anhídrido Bórico

Es un componente esencial de los vidrios neutros para laboratorio, de vidrios resistentes al choque térmico, de la fibra de vidrio y de vidrios especiales. Los vidrios de borosilicato constituyen un grupo aparte debido a sus características estructurales y sus aplicaciones. El  $B_2O_3$  es un aditivo en los vidrios sódico-cálcicos ordinarios ya que acelera su fusión, mejora su estabilidad química y su resistencia al choque térmico. Además de las fuentes naturales, la industria

vidriera emplea como principales materias primas bóricas productos químicos preparados, tales como ácido bórico y borato de sodio.

#### Anhídrido fosfórico

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

## II. Fundentes

Son modificadores de red que favorecen la formación del vidrio al disminuir la temperatura de fusión.

#### Oxido de Sodio

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

#### Oxido de potasio

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

#### Oxido de calcio

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



### Oxido de magnesio

Desempeña un papel semejante al CaO . La materia prima más utilizada para introducir el MgO al vidrio es la dolomita (  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  ).

### Oxido de Bario

El BaO aumenta la densidad, índice de refracción y brillo. Debido al elevado radio ionico del bario, aumenta la viscosidad, hace al vidrio más moldeable e incrementa el intervalo de trabajo. Se utilizan los nitratos y carbonatos de Bario.

## III. Estabilizantes

### Oxido de Aluminio

La incorporación de alúmina origina un aumento de la resistencia mecánica, mejora la estabilidad química, aumenta la refractariedad, disminuye el coeficiente de dilatación térmica, mejora la resistencia al choque térmico, reduce la tendencia a la devitrificación, aumenta la viscosidad y el intervalo de trabajo. En la mayoría de los vidrios sódico-cálcicos comerciales se utiliza de 1 a 3% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Las materias primas que mas se utilizan para incorporar  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en el vidrio son los feldspatos debido a que funden a temperaturas relativamente bajas y se incorporan fácilmente. En algunos casos se utiliza bauxita, caolines y algunas rocas aluminosas.

### Oxido de Plomo

El óxido de plomo es uno de los componentes que más ennoblecen la calidad del vidrio, proporcionándole un alto índice de refracción, brillo, aumento de densidad y sonoridad. Los vidrios de Pb deben fundirse en atmósferas fuertemente oxidantes. El principal inconveniente que presentan es que son más blandos que los sódico-cálcicos ordinarios. El PbO se introduce casi siempre bajo la forma de  $\text{Pb}_3\text{O}_4$ , a veces como carbonato básico y raramente como PbO.

## Oxido de Zinc

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

En la fabricación del vidrio, intervienen otros constituyentes minoritarios con funciones específicas: colorantes, decolorantes, opacificantes, fluidificantes, agua, cullet, etc. En la tabla 2.5 se indica la composición química de los diferentes tipos de vidrio [4].

Tabla 2.5 Composición química de diferentes tipos de vidrios.

Tipo de vidrio	Componentes (peso %)										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	BaO	PbO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Otros
Plano estirado	71-73	0.5-2	–	12.5-15	0-1	1-4	4-10	–	–	<0.3	–
Plano flotado	70-71.5	0.5-1.5	–	13-14	0-1	4-5	8-9.5	–	–	<0.3	–
Semiblanco para envases	69-73	1-2.5	–	12-15	0-2	1-2.5	8-10	0.5	–	<0.1	–
Verde para envases	65-71	1-5	–	12-16	0-1	1-2	8-12	–	–	0.2-2	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.1-0.3
Servicio de mesa	71-74	1-2	–	11-15	0-4	0-2	7-9	0-3	–	<0.02	–
Bombillas y tubos	70-72	0.5-1.5	–	15-17	0-1	2.5-4	5-6	0-2	–	<0.05	–
Material de laboratorio	71-73	1.5-4.5	5-7	6-8	0-1	2-4.5	2-4	0-3	–	<0.1	–
Farmacéutico neutro	70-75	5-9	5-9	6-9	0-1	0-1	3-7	2-4	–	<0.1	–
Termómetros	50-72	2-5	2-10	10-14	–	0-5	0-7	–	–	<0.05	ZnO 0-7
Fibra	53-64	5-15	5-9	1-14	0-1	0-5	2-15	–	–	<0.1	–
Cristal	55-62	–	0-1	0-3	8-14	–	0-3	0-3	24-35	<0.01	ZnO 0-1
Flint ordinario	43-45	–	–	1-2	7-8	–	–	–	47-49	<0.01	–
Crown de silicato	63-69	–	2-2.5	4-5	15-16	–	0-8	0-11	0-1	<0.01	ZnO 2-3
Crown de fosfato	–	2-8	2-3	–	–	–	–	28-38	–	<0.01	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 56-60

## 2.7. Proceso de elaboración de vidrio

Se puede considerar que el proceso de elaboración de vidrio esta formado por las siguientes seis etapas.

- I. Reacción de los componentes y formación del vidrio
- II. Disolución del excedente de sílice sin reaccionar
- III. Afinado y homogenización
- IV. Reposo y acondicionamiento térmico
- V. Conformación
- VI. Enfriamiento y recocido

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

Reacciones de los componentes y formación de vidrio.

La formación de vidrio comprende una serie de transformaciones físicas y reacciones químicas en alta temperatura. Durante este proceso los componentes de la mezcla experimentan múltiples modificaciones que incluyen transformaciones cristalinas, evaporación de agua, deshidratación de sales, disociación de los carbonatos y sulfatos, reacciones químicas, fusión y disolución. La simultaneidad con que se producen algunas de estas transformaciones físico químicas y el elevado número de componentes que intervienen en la mayoría de los vidrios, hacen muy complejo el estudio de los equilibrios de todas estas reacciones. Aunque las reacciones químicas entre los componentes de la mezcla vitrificable empiezan a producirse a bajas temperaturas, mientras estos se hallen todavía en estado sólido, transcurren

con lentitud hasta que se alcanza la temperatura de formación de los primeros eutécticos, y tiene lugar la aparición de la fase líquida. La tabla 2.6 muestra las reacciones que se producen durante el calentamiento de una mezcla vitrificable correspondiente a un vidrio soda-calcio industrial.

Tabla 2.6 Reacciones producidas durante la formación de vidrios soda-calcio.

Temperatura (°C)	Transformación
~500	$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$
	$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaMg}(\text{CO}_3) \rightarrow \text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 + \text{MgCO}_3$
~630	$\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$
750	Formación de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ y $\text{CaCO}_3$
<780	Formación de $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$
	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$
780	Fusión del eutéctico $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot x \text{Na}_2\text{CO}_3$ y $\text{CaCO}_3$
	Fusión del resto del compuesto $x \text{Na}_2\text{CO}_3$ y $\text{CaCO}_3$
834	Fusión del eutéctico $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$
>900	Aparición de la primera fase líquida que puede ser enfriada en estado vítreo. El cuarzo empieza a disolverse en esta fase líquida.
1088	Punto de fusión del $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$

Disolución del excedente de sílica sin reaccionar:

Después de haber reaccionado entre sí los componentes de la mezcla vitrificable, y de la formación de una fase fundida, todavía queda un exceso de sílica no incorporada al vidrio. Su incorporación se lleva a cabo mediante un proceso de disolución, gobernado por un proceso difusional. Un fenómeno característico que se produce durante la disolución de la sílica en el vidrio es la formación de numerosas burbujas producidas por el aumento de acidez que experimenta el fundido. En la primera etapa de reacción y fusión el fundido era

muy alcalino y ello favorecía la disolución química de cantidades importantes de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_3$  y vapor de agua. Pero al irse incorporando la sílice, el vidrio se va haciendo cada vez más ácido y la solubilidad de dichos gases disminuye, produciéndose segregación en forma de burbujas.

#### Afinado y homogenización del vidrio.

El proceso de homogenización del vidrio y de la eliminación de parte de los gases disueltos y de las burbujas ocluidas se denomina afinado. Durante este proceso, uno de los aspectos de mayor importancia es el de la interacción del vidrio con las fases gaseosas que se encuentran en contacto con él. Su importancia radica no solo en la complejidad y diversidad de las reacciones que tienen lugar, sino también en sus repercusiones prácticas, ya que el equilibrio vidrio-gas determina la disolución gaseosa, la formación y eliminación de las burbujas y en definitiva, el grado de calidad del producto obtenido.

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

#### Reposo y acondicionamiento térmico.

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

## 2.8. Fabricación del vidrio plano

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

A continuación se mencionan los sistemas de fabricación de vidrio plano.

- I. Sistema Colburn-Libbey-Owens
- II. Sistema Fourcault
- III. Sistema Pittsburgh
- IV. Laminado Continuo
- V. Flotado

### Fabricación de vidrio flotado

En el año de 1959 y tras un gran esfuerzo tecnológico, la firma británica Pilkington Brothers dio a conocer un nuevo procedimiento de fabricación de vidrio plano que había de constituir una auténtica revolución industrial de este sector. Esquemáticamente el proceso de trabajo es el siguiente: El vidrio se funde en un horno de grandes dimensiones y después de afinado y acondicionado se le hace caer por rebosamiento entre dos rodillos laminadores o bien sobre un canal situado a la salida del horno, formando una lámina continua que después de enfriada hasta unos 1150°C, penetra en una cámara donde transcurre la etapa principal de todo el proceso. La lámina de vidrio se recibe dentro de esta cámara sobre un baño de estaño fundido de unos 30 cm

de profundidad y flotando sobre el se extiende y avanza horizontalmente. Al salir de esta cámara pasa por un túnel largo de recocido y finalmente se corta.

La aportación importante y original de este procedimiento radica en la posibilidad de obtener directamente una lámina de vidrio pulida por ambas caras, sin necesidad de ser sometida a ninguna operación posterior de desbaste y pulido. El vidrio adquiere por su cara superior un pulido a fuego mientras que por la cara inferior recibe el pulido especular que le comunica la superficie libre del baño de estaño fundido sobre el que se desliza. Para proteger al estaño de la oxidación es preciso mantener en la cámara una atmósfera reductora, lo cual se consigue haciendo pasar una corriente de nitrógeno con un 0.5% de hidrógeno. El baño de estaño está dividido en varias zonas calentadas eléctricamente a temperaturas diferentes rigurosamente controladas. En la primera zona, mantenida a unos 1020°C el vidrio se extiende sobre el baño metálico. De acuerdo a su densidad y tensión superficial cada vidrio alcanza un espesor determinado. Para un vidrio sódico-cálcico ordinario este espesor es de 6.3 mm.

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

Las principales ventajas de este proceso de fabricación son las elevadas velocidades de extracción que se pueden alcanzar (para un vidrio de 6 mm llegan a ser de 240 m/h) además de una elevada calidad en el producto [4].



## 2.9. Los vidrios de seguridad

Los vidrios de seguridad aparecen como una respuesta a la necesidad de subsanar la mayor debilidad que tiene el vidrio, es decir, su fragilidad.

La manera más obvia de aumentar su resistencia mecánica al impacto, es la de aumentar el espesor del vidrio, pero esto no resuelve totalmente los problemas, pues sigue siendo factible de romperse y al hacerlo, deja de resguardar aquello que mantenía aislado, ya sea el interior de una casa, una vitrina de un establecimiento comercial etc.

Además tiene otro inconveniente, pues como ya hemos visto anteriormente, al fracturarse el vidrio tiende a hacerlo en líneas rectas y a formar trozos muy agudos que son un potencial peligro para las personas pues además de agudos, sus bordes son filosos y pueden causar punciones y laceraciones considerables.

Estos inconvenientes se hacen más patentes en los vidrios de los vehículos, donde el movimiento de los mismos aumenta la posibilidad de rotura y de causar daño a los ocupantes. Por esto, en los vidrios de seguridad de los automóviles se busca:

- Reforzar el vidrio para disminuir la posibilidad de fractura.
- Evitar que las partículas resultantes de una fractura hieran a las personas.

Las soluciones que surgen dan por resultado básicamente dos productos, o combinaciones de ellos que son:

- Los vidros laminados.
- Los vidrios templados.

Ambos encuentran aplicación tanto en la industria de los vehículos de transporte como automóviles, camiones, autobuses, vehículos recreativos, trenes, aviones, embarcaciones de diversa índole, etc., así como en la industria de la construcción para ventanas, puertas, vitrinas en casas habitación, hoteles, comercios, bancos, prisiones etc.

### 2.9.1 Historia del vidrio laminado

Los primeros automóviles utilizaban vidrios ordinarios y con el movimiento y las piedras del camino, etc., se rompían con la misma facilidad que cualquier vidrio, siendo motivo de preocupación el hecho de que la cercanía del vidrio a los pasajeros los hacía correr peligro de cusarse heridas, además del hecho de que no ofrecían protección contra el que quisiera entrar a los automóviles.

Los primeros vidrios reforzados o de seguridad fueron los laminados, los cuales se usaron para todos los vidrios de los automóviles, es decir, tanto para los parabrisas, como para los laterales y traseros (medallones).

Las primeras investigaciones sobre vidrios de seguridad para automóviles empiezan alrededor de 1926 en los laboratorios de Libbey Owens-Ford (LOF) y para fines de los años 20's se empezó a extender el uso de vidrio laminado que por muchos años consistió de piezas planas.

Un gran cambio ocurrió en 1949 cuando los antiguos parabrisas planos de de 2 piezas con un poste entre ellas, fueron reemplazados por un parabrisas curvo y de una sola pieza. Esto introdujo en la industria del vidrio automotriz la tecnología del doblado del vidrio a tolerancias muy precisas y el manejo de

piezas grandes. En la industria automotriz en general, se usa el vidrio como un elemento decorativo y de alto grado de diseño, siguiendo las líneas aerodinámicas de los automóviles y además mejorando la visibilidad de los conductores al no tener obstáculos a la visión.

Para fines de los años 50's los parabrisas ya eran del tipo "envolvente" dando lugar a mayor complejidad en su fabricación por lo fuerte de las curvaturas de los lados.

En 1966 aparecen los parabrisas con vidrio flotado con una hoja de plástico Polivinil Butiral (PVB) de alta resistencia a la penetración (hpr) que es el principio de la idea de parabrisas antilacerativos que hacen su aparición en 1984.

## 2.9.2 La protección que ofrece.

Son varios los tipos de protecciones que provee:

Resistencia a la penetración. La hoja de PVB además de mantener adheridas a las dos hojas de vidrio, de por sí es un material resistente a la penetración al mismo tiempo que flexible y detendrá la mayor parte de los proyectiles que se encuentran normalmente al manejar un automóvil.

Integridad del parabrisas. Al estrellarse con un impacto los vidrios, no se separan las partículas y permanece el parabrisas como una unidad que sigue aún roto protegiendo del viento a los pasajeros y manteniendo cerrado el vehículo.

Inastillable. Las piezas rotas que son largas, agudas y filosas y que serían un peligro para los pasajeros, por la acción adhesiva del PVB permanecen en su lugar a excepción de pequeñas astillas o esquirlas que si bien pueden causar algún daño, éste no sería de gravedad.

Amortiguamiento. La elasticidad del PVB permite que cuando en un accidente un pasajero choque con su cabeza contra el parabrisas, el impacto sea absorbido hasta cierto punto y el daño del impacto sea menor que si chocara contra un objeto rígido.

Fragilidad. La hoja de PVB no le quita lo frágil a los vidrios, pues éstos son ordinarios y tan frágiles como cualquiera, pero la propagación de las fracturas se detiene por la acción adhesiva del PVB y son de menor consecuencia.

### 2.9.3 Elementos de un parabrisas

En la actualidad un parabrisas consta de 2 hojas de vidrio de 2.0 mm o dos hojas de 2.2 mm en ambos casos con una hoja de PVB de 0.7 mm de espesor entre ellas. Hace algunas años las hojas de vidrio eran de 3.0 mm de espesor y aún mas, pero con la tendencia a reducir espesores para bajar peso, ya inclusive se usan espesores de vidrio de 1.8 mm en EU y hasta 1.5 mm en Alemania.

El vidrio puede ser claro o ligeramente verde (tintex) en EU y Mexico, o azul (Japón) o bronce (Europa) y el PVB puede ser claro, o ligeramente verde y puede llevar o no la banda gradiente, que es el sombreado que vemos en la parte superior de algunos parabrisas.

### 2.9.4 La fabricación de parabrisas (proceso básico)

#### Preparación del vidrio

Los vidrios se cortan por pares, siendo necesario en el caso de los parabrisas curvados, hacer la pieza exterior más grande para compensar la curvatura.

Se pulen o se matan filos de los cantos y se lavan las piezas siempre por pares.

## Doblado

La suavización de un vidrio es un proceso gradual y continuo por lo que su rigidez no se pierde de improviso a una cierta temperatura sino que poco a poco se va volviendo menos rígido, empieza a deformarse y finalmente a fluir, es decir su viscosidad va disminuyendo a medida que aumenta su temperatura.

De lo anterior se concluye que si deseamos darle forma curva a un vidrio plano, debemos de elevar su temperatura hasta que pierda su rigidez, pero no tanto para que fluya o no mantenga su curvatura. De hecho, un vidrio que se empieza a doblar, seguirá deformándose y no mantendrá su curvatura a menos que se enfríe con suficiente rapidez para que vuelva a hacerse rígido.

El par de vidrios se coloca en un molde que lo sostiene horizontal y perimetralmente y entran a un horno que mediante la aplicación de calor lleva al par de vidrios a una temperatura tal que se empieza a suavizar (baja su viscosidad), a fluir y se dobla por la acción de la gravedad hasta adquirir la curvatura del perímetro del molde.

Si el vidrio esta demasiado caliente fluirá de mas y su parte central se hundira fallando la tolerancia llamada de gap central. Si no se calienta suficientemente no adquirirá la curvatura perimetral adecuada y fallará por la tolerancia llamada gap perimetral.

Debido a la característica del proceso de doblado, se hace necesario producir piezas por pares, para que ajusten perfectamente entre sí.

## Ensamble

Los pares de vidrio se lavan, los rollos de PVB se lavan y entran ambos al cuarto de ensamble con atmósfera controlada, donde se coloca el PVB entre las hojas de vidrio y se corta a la medida.

### Autoclave

El conjunto de vidrio y PVB se precalientan, se prensan para que se adheiran y se empieza a expulsar el aire entre ellos. Se introducen a una autoclave, que es una cabina hermética, donde bajo la acción de calor y la presión, se produce la firme adhesión entre ellos y la transparencia del PVB

### Otras operaciones

Las operaciones descritas anteriormente son básicas, pero hay otras operaciones adicionales, algunas de las cuales no se dan en todos los casos.

- Operaciones intermedias de lavado, limpieza e inspección
- Aplicación de antena para radio integrada en el parabrisas
- Pintura negra cerámica perimetral para la protección contra los rayos UV
- Adhesión del botón para montaje del espejo retrovisor.
- Aplicación de sellos y marcas del fabricante
- Empaque

La figura 2.3 muestra el diagrama de flujo para la fabricación de parabrisas

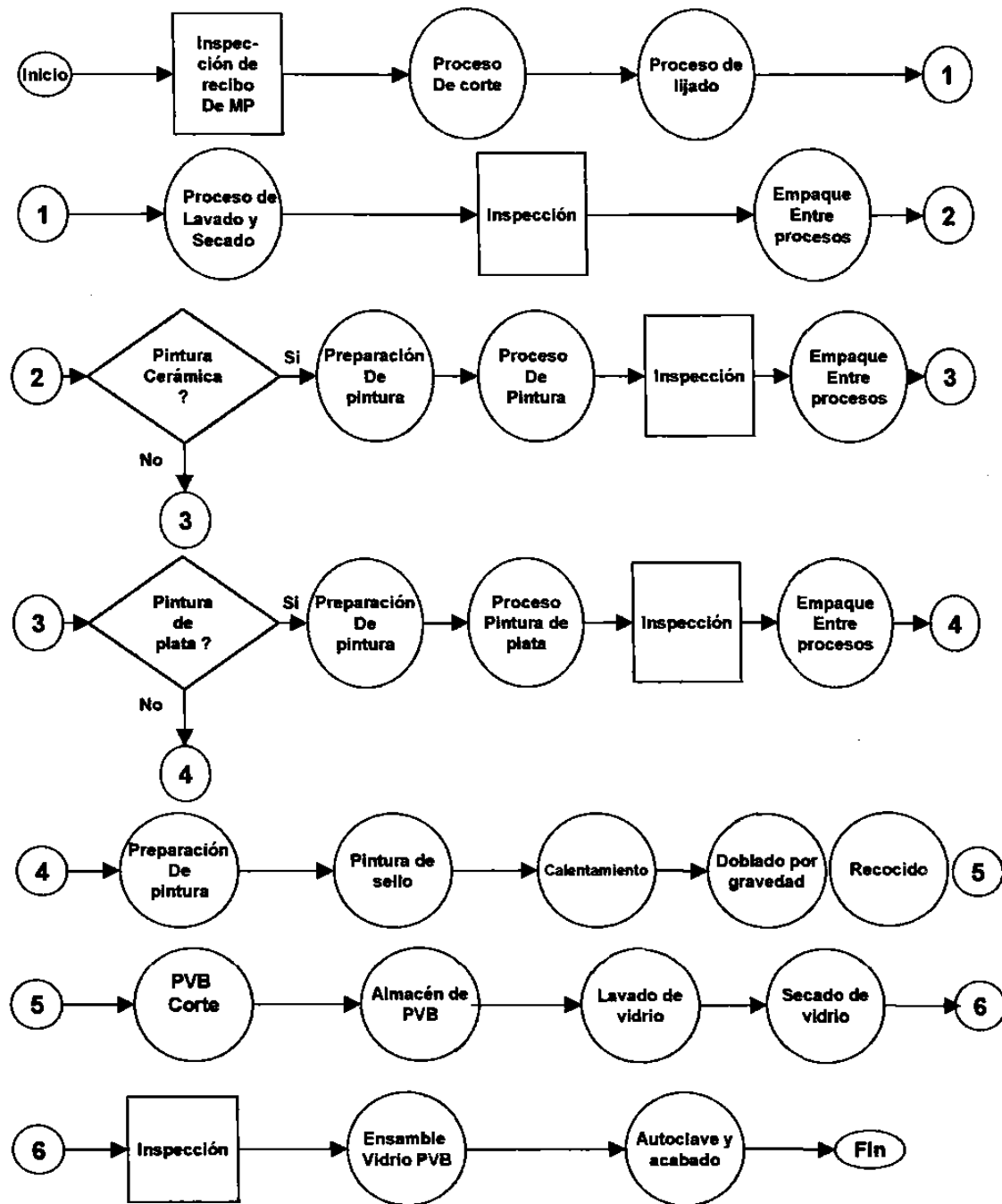


Figura 2.3 Diagrama de flujo de fabricación de parabrisas

## 3. Esfuerzos en el vidrio

### 3.1. Desarrollo de esfuerzos permanentes en el vidrio

En general, los esfuerzos en un sólido elástico sin fuerzas aplicadas se desarrollan únicamente si hay un gradiente no lineal de temperatura a través del cuerpo. Tales esfuerzos son temporales o transitorios; ellos existen mientras exista el gradiente de temperatura. Los líquidos por otro lado, no pueden mantener esfuerzos cortantes por ningún período de tiempo finito, tales esfuerzos se relajan por el flujo viscoso. El vidrio se comporta como un líquido cuando está dentro de su fase líquida, todos sus esfuerzos se relajan debido al flujo viscoso. Sin embargo, durante el enfriamiento, en el rango de transición al estado sólido, los esfuerzos se tienden a desarrollar dentro del cuerpo, los cuales ya no se relajan debido a la ausencia de flujo viscoso. Los diferentes mecanismos para tal desarrollo de esfuerzos son los siguientes:

1. El enfriamiento del exterior resulta en un gradiente de temperatura "congelado" con una mayor temperatura en el interior (fig 3.1). Las capas interiores continúan relajándose debido al flujo mientras que las exteriores se enfrían gradualmente. En efecto, el estado libre de esfuerzos es un sólido con



un gradiente de temperatura. La necesidad de contraer más relativamente al exterior a temperatura ambiente y el esfuerzo del criterio de compatibilidad elástica entre las capas causa la aparición de compresión en el exterior y tensión en el interior. La magnitud de los esfuerzos desarrollados es relativa al coeficiente de expansión lineal del sólido. Este mecanismo es también llamado mecanismo viscoelástico.

2. Las capas exteriores se enfrían a una velocidad mayor que las interiores durante el enfriamiento normal. Por lo tanto, las capas exteriores tienden a poseer una estructura enfriada rápidamente teniendo un volumen más alto en estado libre. De nuevo, la influencia del criterio de compatibilidad elástica causa que las capas exteriores desarrollen compresión y las interiores desarrollen tensión. La magnitud de los esfuerzos desarrollados es proporcional a la diferencia entre los volúmenes de los sólidos enfriados rápidamente y lentamente.

3. El hecho de que diferentes capas viajen a través del rango de transición del vidrio en diferentes instantes de tiempo causa el desarrollo de un "gradiente de temperatura de enfriamiento ficticio". Esto es una heterogeneidad estructural transitoria. La desaparición del gradiente de temperatura de transición ficticio causa la aparición de compresión en el exterior y tensión en el interior.

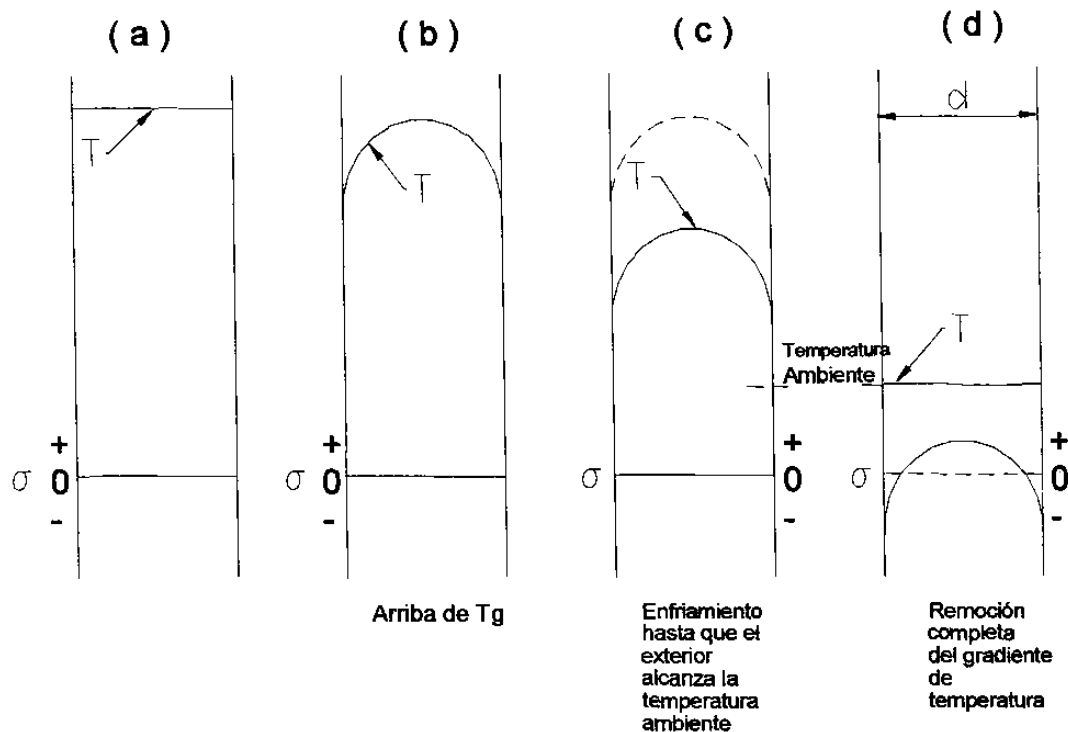


Figura. 3.1 Esquema simplificado de la generación de esfuerzos permanentes en vidrio debido a gradientes de temperatura durante el enfriamiento. (a) Vidrio sin gradiente de temperatura por encima de la región de transición no tiene esfuerzos. (b) Gradiente de temperatura desarrollado en el enfriamiento; por lo tanto, no se desarrollan esfuerzos debido a la rápida relevación mientras el vidrio permanece por encima de  $T_g$ . (c) Enfriamiento abajo de  $T_g$  mientras mantiene el mismo gradiente de temperatura de enfriamiento no produce esfuerzos aún. (d) Desaparición final del gradiente de temperatura produce esfuerzos que ahora son permanentes.  $T$  es la temperatura,  $d$  es el espesor del vidrio,  $\sigma$  es el esfuerzo.  $+\sigma$  significa tensión y  $-\sigma$  significa compresión.

Durante la formación de vidrio, varias regiones de éste realmente tienen diferentes velocidades de enfriamiento debido a la aplicación no uniforme del calentamiento/enfriamiento y el espesor usualmente no uniforme; por lo tanto, se propicia la formación de esfuerzos. Hay un pequeño riesgo de fractura mientras el vidrio permanece algo viscoso, pero una vez que el material empieza a solidificarse, los esfuerzos empiezan a acumularse. Para un vidrio común enfriado a través de la región de transición a velocidades normales de enfriamiento, cerca del 60% del total de los esfuerzos es debido a los

mecanismos 1 y 2. Pueden resultar torceduras de la relevación de momentos flexionantes desiguales a través del cuerpo de un producto de vidrio. Debido a esto, las torceduras generan esfuerzos de flexión, algunas de las cuales terminan siendo tensiones en la superficie exterior. Esto entonces posee un riesgo potencial de fractura del vidrio durante la manufactura y, peor aún, durante servicio. Los productos de vidrio son por lo tanto, comunmente recalentados en la proximidad del rango de transición para permitir la relevación de cualquier esfuerzo interno que pueda haberse desarrollado, y después son enfriados a una velocidad muy baja que prevenga su regeneración. Este procedimiento es llamado *recocido*. Un objetivo adicional del recocido es homogenizar la historia térmica a través del cuerpo. El templado, por otra parte, implica el endurecimiento, y es llevado a cabo introduciendo esfuerzos altos de compresión en el vidrio. Dado que las grietas que causan la degradación de la resistencia del vidrio generalmente ocurren en la superficie y se propagan bajo esfuerzos de tensión, la introducción de esfuerzos de compresión fortalece el producto de vidrio.

### 3.1.1 Perfiles de esfuerzos en un una placa de vidrio simetricamente enfriada durante el recocido y templado

Si una placa de vidrio es enfriada simétricamente en ambos lados, entonces la distribución de temperaturas a través de la sección transversal es una parábola (para velocidades lentas de enfriamiento); ver figura 3.2. La magnitud de la diferencia de temperatura  $\Delta T$  entre las capas exterior e interior del vidrio está dada por  $\Delta T = d^2 R / 2k$ , donde  $d$  es la mitad del espesor de la sección,  $k$  es la difusividad térmica, y  $R$  es la velocidad de enfriamiento. (un típico valor de  $k$  para vidrio es  $0.0084 \text{ cm}^2 / \text{s}$ ). La compresión externa de la superficie  $\sigma_c$  es proporcional a  $2 \Delta T / 3$ , es aproximadamente dado por:

$$\sigma_c = \frac{E\alpha d^2 R}{k(1-\nu)}$$

Donde  $E$  es el módulo de Young y  $\nu$  es la razón de Poisson del vidrio. La ecuación anterior, puede usarse para calcular una velocidad de enfriamiento constante que puede dar como resultado una tensión central específica a temperatura ambiente.[5]

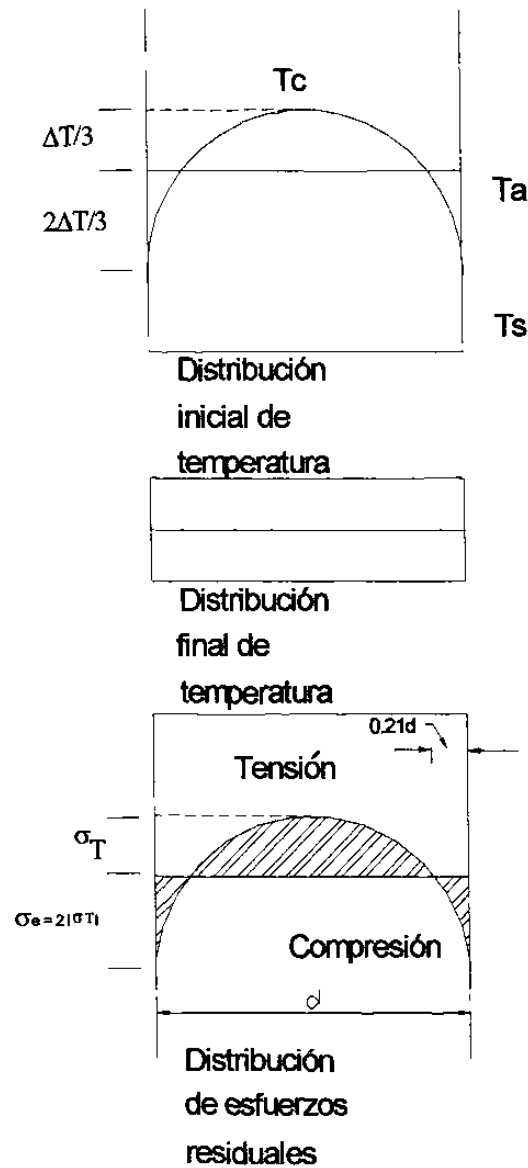


Fig 3.2 Un gradiente de temperatura parabólico produce una superficie de compresión que es dos veces la magnitud de la tensión;  $d$  es el espesor del vidrio.

## 4. Fractura

### 4.1 Mecánica de la fractura

La fractura es la separación o fragmentación de un cuerpo en dos ó más partes bajo la acción de esfuerzos, a esto cabe agregar que el proceso ocurre mediante la creación de nuevas superficies. Las principales causas de la fractura son: lenta aplicación de cargas externas, rápida aplicación de cargas externas (impacto), cargas cíclicas (fatiga) y deformación dependiente del tiempo (termofluencia). El proceso de fractura ocurre en tres pasos básicos: acumulación de daño, nucleación de grietas y por último la propagación de las mismas hasta que ocurre la falla [3].

Para todo fin práctico, se considera que la resistencia del vidrio a la compresión es infinita, mientras que a la tensión su resistencia es limitada.

Una fractura en un vidrio es el resultado de un esfuerzo de tensión y la dirección de propagación es perpendicular a los esfuerzos de tensión que la producen.

Uno de los hechos más importantes respecto a las fracturas en el vidrio, es que siempre tienen un punto de origen, es decir, un esfuerzo de tensión no produce fracturas en varios puntos sino en uno solo y desde allí avanza hacia otros puntos. No se forman todas las partes de la fractura simultáneamente.

Otro hecho importante es que la forma de las fracturas no es al azar, sino que tienen una forma definida, habiendo una relación entre su forma y el sistema de esfuerzos que la originó. En muchos casos los esfuerzos pueden ser muy complejos si pensamos en que por ejemplo un esfuerzo externo puede iniciar la fractura pero a medida que se propaga, se va encontrando con esfuerzos internos y externos cambiantes, pero en todo instante, el frente de propagación avanza en una dirección perpendicular al esfuerzo de tensión que se encuentra en el camino, mientras que estos esfuerzos no sean extremadamente grandes. Cuando la tensión es suficientemente grande, la fractura se abre en forma de abanico y se propaga hacia dos ó más direcciones que a su vez continúan propagándose. Entre más grande es el ángulo del “abanico” o dispersión de las fracturas, el esfuerzo fué mayor.

El punto donde se inicia una fractura puede localizarse porque allí se produce un despostillamiento que hace que no se vea a través de él, pues queda ese lugar como si fuera un espejo.

Por todo lo anterior, mediante el análisis minucioso de una fractura es posible determinar las causas de la misma: dónde se inició, en que dirección se propagó, la intensidad del esfuerzo que la causó y el tipo de la misma [2].

## 4.2 Hipótesis de las fracturas superficiales.

En 1920 el Sr. A. A. Griffith introdujo la hipótesis de que la superficie de los vidrios no es perfectamente lisa, sino que tiene multitud de pequeñas grietas o raspaduras superficiales. Otros estudios del vidrio han discutido si aparecen de por sí en los procesos de formación del vidrio o si se forma sin ellas, pero concuerdan en que todo el manejo del vidrio añade grietas.

Estas grietas actúan como concentradores de esfuerzos, esta concentración de esfuerzos es de suficiente magnitud para disminuir considerablemente la resistencia mecánica. Es importante conocer la distribución y magnitud de estos esfuerzos en la vecindad de estos defectos. Considérese una lámina que posee una grieta como la mostrada en la figura 4.1. ahora suponiendo que la fuerza externa aplicada se trasmite de lado a lado de la placa por medio de líneas de fuerza, es fácil deducir que en las proximidades de los bordes de la placa estas líneas están uniformemente distribuidas; mientras que conforme se aproximan al defecto se distorsionan de manera que en la punta de la grieta se encuentran lo más cercanamente posible, lo cual causa una concentración localizada de esfuerzos [3].

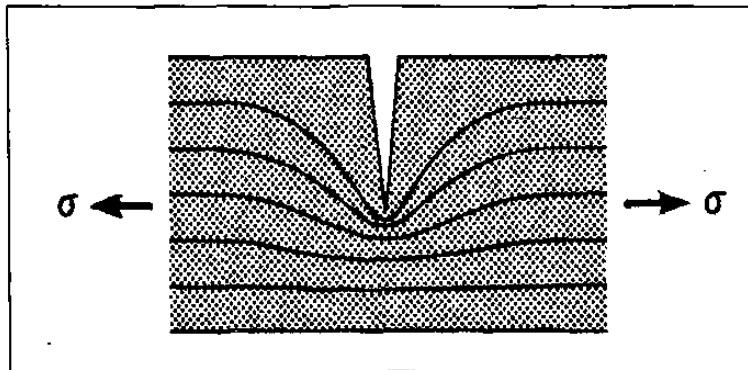


Figura 4.1 Distribución de las líneas de fuerza en un elemento con una grieta sometido a tensión.

Griffith estableció el siguiente criterio para la propagación de una grieta: "Una grieta se propagará cuando el decremento en la energía de deformación elástica es por lo menos igual a la energía requerida para crear una nueva grieta". Griffith estimó el cambio en la energía que resulta cuando una grieta elíptica (Ver fig 4.2) esta contenida en una placa de longitud infinita (condición de deformación planar).

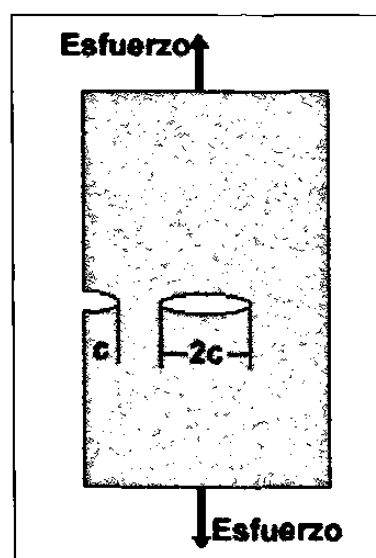


Figura 4.2 Modelo de Griffith de una placa conteniendo una grieta elíptica



Se han realizado experimentos que comprueban la hipótesis de Griffith:

- Si una varilla o fibra de vidrio se produce desde el vidrio fundido sin que la toque ningún objeto sólido, se obtendrán altísimos valores de resistencia a la tensión.
- Si esa misma varilla o fibra se toca con la mano o con cualquier objeto sólido, su resistencia disminuye enormemente.

Si la varilla o fibra que ha sido manipulada, se trata superficialmente con ácido hidrofúorhídrico, las fracturas se eliminan y vuelve a adquirir su alta resistencia, pero ésta es temporal ya que cualquier contacto abrasivo le hace perder su resistencia.

La tabla 4.1 muestra los valores de resistencia a la tensión. Estos datos son aproximados e indican solamente de qué orden son los valores.

Tabla 4.1 Valores de resistencia a la tensión de especímenes de vidrios y aceros comunes

	<b>lb/pulg<sup>2</sup></b>	<b>MPa</b>
Resistencia teórica del vidrio	2,000,000	13789.51
Fibras delgadas sin tocarse	1,000,000	6894.75
Varillas delgadas sin tocarse	100,000	689.47
Varillas delgadas manejadas con 1 hora en HF	100,000	689.47
Varillas delgadas manejadas y 15 min en HF	50,000	344.73
Varillas delgadas (con abrasión por manejo)	5,000-10,000	34-68.94
Vidrios soda – caliza (con abrasión por manejo)	6,500-8,000	44.8-55.15
Esfuerzo de diseño	1,000	6.89
Aceros comunes	65,000-75,000	448.1-517.1

### 4.3 Modos de aplicación de cargas

Los modos de aplicación de cargas indican la forma en que una carga actúa sobre una grieta para causar la propagación de ésta, estos modos son básicamente tres. El modo I (ver fig. 4.3 a) o de apertura es aquel donde una fuerza causa un esfuerzo de tensión que actúa en dirección normal a las superficies de la grieta. En el modo II (fig 4.3 b) o modo de corte, una fuerza causa un esfuerzo de corte que actúa en dirección paralela al borde de la grieta. Por último se encuentra el modo III o de corte paralelo (ver fig 4.3 c), se refiere al esfuerzo de corte aplicado en dirección paralela al borde de la grieta.

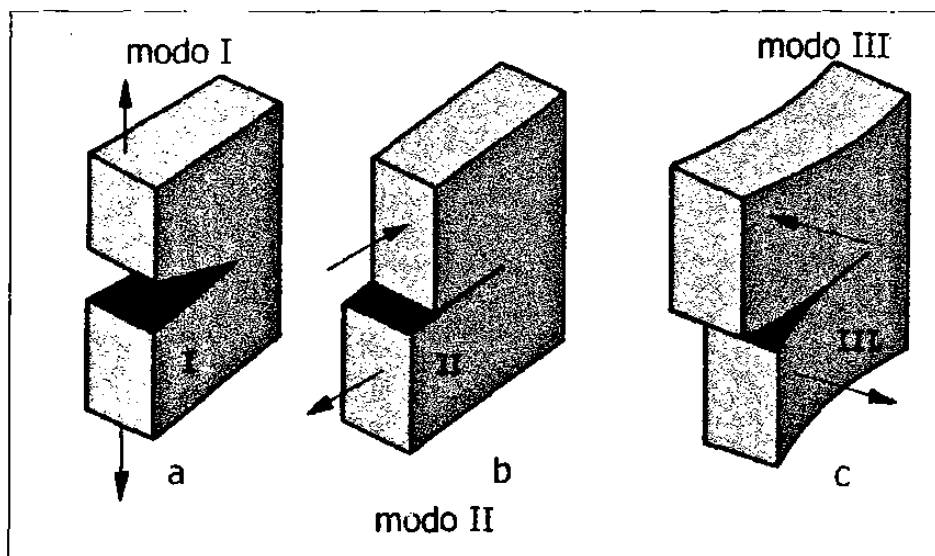


Figura 4.3 Los tres modos de aplicación de carga.

Cabe mencionar aquí que el vidrio falla en el modo I; es decir, el requisito fundamental para que se propague una grieta y ocurra la falla es que el esfuerzo de tensión en la punta de la grieta, que es donde existe unión del material, exceda las fuerzas cohesivas del material [3].

## 5. Medición de esfuerzos aplicados en los parabrisas usando la técnica de sensores de deformación

### 5.1 Introducción

El presente capítulo pretende proveer la base teórica de la medición de esfuerzos con sensores de deformación ó “strain gages” cuya técnica se aplicará en el análisis del problema de rotura de parabrisas en el empaque que se describe en el capítulo siguiente. En el apéndice A se válida este método de medición mediante una prueba de repetibilidad al equipo que se usará en la experimentación.

## 5.2 Medición de deformación con sensores

Deformación significa una muy ligera elongación ó contracción que ocurre en una estructura. Esta elongación o contracción es cuantitativamente determinada por la medición de deformación.

Hay varios métodos de medición de deformación: métodos mecánicos, métodos ópticos con una escala amplificada, así como métodos eléctricos entre otros. Debido a que los sensores de deformación ó "Strain Gages " pueden medir esfuerzos estáticos, dinámicos y de impacto efectivamente en cualquier estructura, mas del 90% de la medición de esfuerzos es efectuada en estos días con ellos.

Cuando una fuerza externa es aplicada a una estructura, ocurre una fuerza que resiste esta fuerza exterior dentro de la misma estructura. A ésta fuerza se le conoce como esfuerzo. Esos esfuerzos se incrementan de igual manera que se incremente la fuerza externa. Los materiales que componen las estructuras tienen límites de esfuerzos. En el diseño de un producto, es necesario saber los esfuerzos que se generaran en el interior.

No obstante, generalmente no es posible saber la magnitud del esfuerzo en un material o estructura directamente, sino solamente en función de la deformación que ocurrirá como resultado del esfuerzo. En el rango elástico, el esfuerzo de un sólido es directamente proporcional a la deformación aplicada a este (Ley de Hooke). El esfuerzo es determinado únicamente si la deformación es conocida. En este caso, la medición de esfuerzos es generalmente considerada sinónimo de medición de deformación. Sin embargo, dado que los sensores detectan únicamente el cambio en la longitud, un esfuerzo sin deformación no puede ser leído por ellos.

### 5.2.1 Principio de funcionamiento de los sensores de deformación

Los sensores de deformación miden la deformación vía un cambio en la resistencia eléctrica de un alambre fino de metal usado en ellos. Su base de funcionamiento esta basado en la fórmula:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Donde:

R es la resistencia

$\rho$  es la resistividad del material

A es el area de la sección transversal

L es la longitud del alambre

El sensor o "strain gage" (SG) proporcionará una lectura de deformación de tensión o compresión a través de un equipo que arroja los resultados impresos en papel en forma de gráfica en una escala. También imprime de forma numérica el valor máximo y mínimo de la deformación. El aparato a usarse es de la marca Soltec Modelo TA200-938, y tiene capacidad para tomar seis lecturas de deformación a la vez. A sus terminales se conectan cada uno de los SG. En el aparato se puede fijar la escala según la magnitud de la deformación y los intervalos de tiempo en los que se tomará la medición, entre otras funciones. El valor de la microdeformación que arroja el aparato de medición está en  $1 \times 10^{-6}$  in/in .

## 6. Caso de Estudio: Análisis de parabrisas rotos en el empaque y el transporte

### 6.1 Introducción

En la industria automotriz el empaque de las partes de equipo original para ensamble de vehículos representa uno de los factores importantes para las compañías ensambladoras de vehículos, ya que se espera que éste asegure la integridad del producto desde su origen en la planta manufacturera del proveedor hasta su destino en la planta de ensamble de vehículos. En el empaque también están definidas la densidad o cantidad de productos por contenedor para ayudar al flujo de piezas en la línea de ensamble. También se debe cumplir con especificaciones de etiquetado o identificación, dimensiones máximas y mínimas del contenedor, embalaje interior y regulaciones ecológicas para los materiales de empaque.

El empaque de partes automotrices como los parabrisas, laterales y medallones de vidrio, representa un reto para los diseñadores e ingenieros de empaque, que deben buscar el punto de equilibrio entre la robustez del empaque y el aspecto económico del mismo.

Los métodos de transporte que en general se consideran para el envío de parabrisas desde la planta de manufactura en la Cd. de Monterrey hasta su destino final en alguna de las plantas de ensamble en el Noreste de Estados Unidos, pueden ser:

- Por furgón de ferrocarril desde la planta de vidrio hasta la planta de ensamble.
- Por carretera en contenedor metálico cargado en un chasis de trailer hasta la frontera, donde el contenedor es subido a plataformas del ferrocarril en estibas de dos contenedores por cada una de ellas. Llevada hasta una estación cerca del destino, descargada y transportada por carretera en trailer hasta la planta. A este método se le conoce como doble estiba (DoubleStack).
- Por carretera en caja de trailer hasta la frontera, donde la caja es subida a una plataforma de ferrocarril, llevada hasta una estación cerca del destino, bajada del ferrocarril y llevada por carretera hasta la planta. A este método se le conoce como "Piggyback".
- Por carretera en trailer desde la planta de vidrio hasta el destino final.

El costo del transporte por cada uno de los métodos anteriores es diferente, siendo el más barato el primero mencionado y así en orden descendiente. Es obvio que se opte por alguno de los primeros dos o tres métodos como forma de transporte, aunque por su naturaleza, son más accidentados y rudos que el transporte por carretera. La carga y descarga del contenedor a la plataforma,

así como el viaje en ferrocarril, pueden someter al contenedor de parabrisas a impactos severos.

Como se mencionó anteriormente, durante el empaque y transporte de parabrisas para automóviles se ha experimentado rotura ocasional de algunas piezas. Los parabrisas rotos son descubiertos algunas veces en la planta ensambladora al desempacar estos, y en otras ocasiones durante la inspección en bodega antes de su embarque.

Los parabrisas al salir de la línea de producción de la planta de vidrio, son colocados en posición vertical en un contenedor metálico (fig 6.1) que cuenta con barras espaciadoras de hule como soporte inferior para las piezas. En la parte superior son separados por espaciadores o separadores de plástico como se muestra en la figura 6.2.

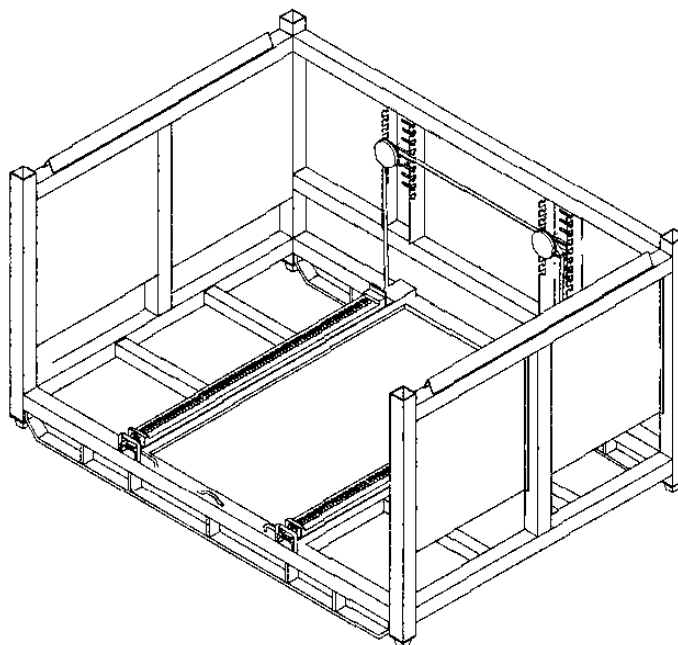


Figura 6.1 Contenedor metálico para empaque de parabrisas



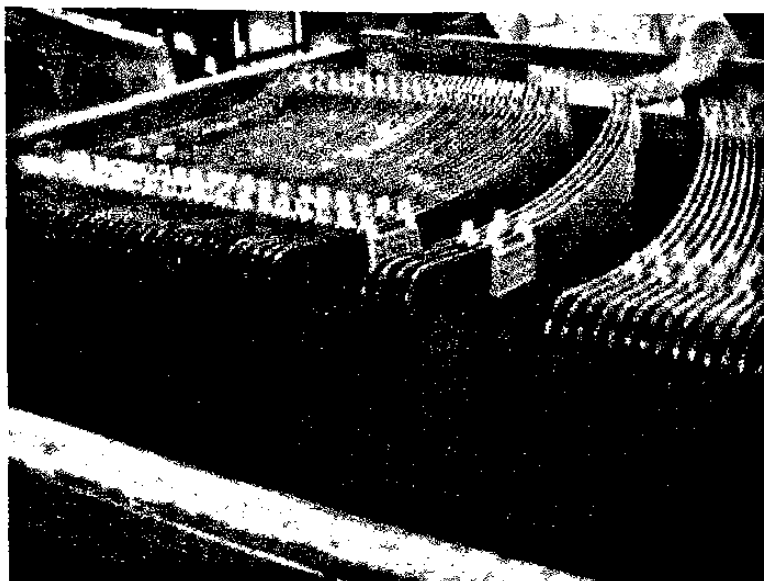


Figura 6.2. Contenedor de parabrisas con separadores de plástico

Antes de pasar a la bodega de embarque, los parabrisas son terminados de empaclar en un área de empaque donde el paquete es flejado a una tensión de  $63.5 \pm 6.3$  kgf ( $140 \pm 10$  lbf) con fleje metálico o de poliéster según el requerimiento del cliente, y cubierto para su posterior almacenaje y transporte.

La cantidad de parabrisas por contenedor es de 76 a 83 piezas dependiendo del modelo. El diseño de empaque es básicamente sencillo, ya que se colocan los parabrisas uno por uno en el contenedor de forma manual por un operario de la línea. El primer parabrisas se coloca de forma vertical contra el fondo del contenedor y se recarga contra dos respaldos metálicos con cubierta de hule de forma circular de 0.1 m (4 pulg.) de diámetro, espesor de 0.012 m (0.5 pulg.) y dureza de  $65 \pm 5$  Shore A. El vidrio queda colocado en una ranura específica del contenedor que asegure una inclinación contra la vertical de 3 a 5 grados. Después, se van colocando los parabrisas en las siguientes ranuras a la misma inclinación y siendo recargados en el anterior, separados por una pieza de plástico de diseño especial en cada dos parabrisas. Dado que las barras espaciadoras inferiores y los respaldos son

dos, se colocan también dos separadores en el parabrisas alineados con los apoyos.

Este diseño de empaque tiene muchos años de haberse creado y pretende aprovechar la alta resistencia a la compresión del vidrio para formar un paquete compacto que se mantiene unido por la fuerza de tensión del fleje, con una separación mínima entre piezas, un empaque sencillo y relativamente barato.

La cantidad de parabrisas que llegan rotos a su destino final está en el orden de los 2000 partes por millón. Dado que las expectativas de los clientes en cuanto a calidad de recibo de material han ido aumentando, el problema de parabrisas rotos en el empaque cobra una mayor importancia cada día.

Se ha encontrado que en la mayoría de los parabrisas rotos, las fracturas ocurren en la zona de los separadores superiores o “hairpins” como se les conoce. Esta fractura nace del canto en la zona de contacto con el separador con el vidrio, y se extiende en una o varias fracturas hacia la zona interna del parabrisas.

## 6.2 Metodología para el análisis del problema.

En esta sección se describe la metodología a emplearse para el análisis del problema de rotura de parabrisas en el empaque y transporte, desde el método de recopilación de información, hasta las conclusiones de la investigación.

- I. Recolección de la información y evidencia de la rotura de parabrisas en el empaque
- II. Análisis y clasificación de la información
- III. Planteamiento de la hipótesis de la rotura de parabrisas en el empaque
- IV. Estimación de los esfuerzos de rotura según el patrón de la fractura en los especímenes analizados.
- V. determinación de los esfuerzos de rotura analizando el origen de la fractura en algunas de las muestras
- VI. Determinación de los esfuerzos mecánicos aplicados a los parabrisas durante el empaque usando la técnica de los sensores de deformación.
- VII. Resumen de las conclusiones de los diferentes experimentos y técnicas de análisis con los que se abordó el problema.

## 7 Técnicas de análisis del problema y desarrollo experimental

### 7.1 Recolección de la evidencia de la rotura en el empaque

Existen dos fuentes de información para el ingeniero de empaque sobre parabrisas rotos y que servirán como base para el desarrollo experimental y análisis técnico del problema:

- reportes de visitas a clientes
- reportes de inspección en la bodega de embarque de la planta

Como parte del servicio al cliente por parte de la planta de manufactura de parabrisas, un representante visita mensualmente las plantas ensambladoras y revisa los acumulados de parabrisas rechazados en el mes, incluyendo los que llegaron rotos en el empaque. El representante hace una clasificación de los defectos y envía un reporte a la planta con el fin de aportar información que ayude a implementar acciones correctivas. Para el caso de parabrisas que llegaron rotos, se describe el área donde se encuentra la fractura. En base a los

reportes que se observa que un 80 a 90% de la rotura encontrada sucedió en el área de los separadores superiores.

Para el caso de las inspecciones en la bodega de embarques, se obtiene información más detallada donde se indica exactamente la zona de la falla, la posición en el contenedor, la fecha de producción del parabrisas, y un breve análisis de lo que pudo haber provocado la fractura según el inspector de calidad. Algunos parabrisas se pueden guardar como evidencia para un análisis posterior.

De los reportes de los auditores de calidad de la bodega de embarques, se clasificó la información de parabrisas rotos describiendo en que zona del parabrisas había sido encontrada la fractura, en que posición del contenedor estaba colocado, e información adicional que pudiera servir para determinar la causa de la falla,( tabla 7.1)

Tabla 7.1. Condensado de reportes de parabrisas rotos encontrados en la bodega de embarques por auditores de calidad.

REPORTE DE PARABRISAS ROTOS DETECTADOS EN ALMACEN DE EMBARQUES  
CONTROL DE CALIDAD

fecha	turno	posición en el rack	curvaturas altas	levantamiento periferico	descripción de la fractura	posible causa
15/07/02	1	5			falla en separador	respaldo mal colocado
16/07/02	3	2			falla en separador	exceso de tensión de fleje
17/07/02	1	1			falla en separador	respaldo mal colocado
22/07/02	1	2	x		falla en separador	
22/07/02	1	6	x		falla en separador, muchas fracturas	
23/07/02	3	78			falla en separador	exceso de tensión de fleje
23/07/02	2	1	x		falla en separador	
23/07/02	2	1			falla en separador	exceso de tensión del fleje
25/07/02	3	1			falla en separador	Respaldo mal colocado
27/07/02	1	1	x		falla en separador	
27/07/02	1	8	x		falla en separador	
27/07/02	2	3	x		falla en separador	
29/07/02	3	78			falla en separador	exceso de tensión del fleje
30/07/02	3	55	x		falla en separador	
30/07/02	3	78			falla en separador	exceso de tensión de fleje
30/07/02	3	16			falla en separador	exceso de tensión de fleje
30/07/02	3	1			falla en separador	movimiento brusco de manejo
31/07/02	3	61			falla en separador	exceso de tensión de fleje
31/07/02	2	80			falla en separador	exceso de tensión de fleje
01/08/02	3	8			falla en parte inferior	golpe del rack
01/08/02	3	50			falla en separador	exceso de tensión del fleje
01/08/02	3	24		x	falla en separador	
01/08/02	3	14	x		falla en ambos separadores	
01/08/02	2	1			falla en separador	respaldo mal colocado
03/08/02	2	1			falla en separador	respaldo mal colocado
04/08/02	2	7	x		falla en separador	
04/08/02	2	19	x		falla en separador	
04/08/02	2	2	x		falla en separador	
05/08/02	1	62			falla en separador	excesiva tensión del fleje
06/08/02	3	49	x		falla en separador	
06/08/02	3	78			falla en separador	exceso de tensión del fleje
06/08/02	2	78			falla en separador	exceso de tensión del fleje
07/08/02	2	10	x		falla en separador	
08/08/02	1	1	x		falla en separador	
08/08/02	2	10	x		falla en separador	
09/08/02	2	78			falla en separador	exceso de tensión del fleje
09/08/02	2	24	x		falla en separador	exceso de tensión del fleje
10/08/02	3	45	x		falla en separador	
11/08/02						
12/08/02						
13/08/02	1	3			falla en separador	exceso de tensión en el fleje
14/08/02						
15/08/02	3	1			falla en separador	respaldo mal colocado
15/08/02	1	1			falla en separador	respaldo mal colocado
15/08/02	2	78			falla en separador	exceso de tensión en el fleje
15/08/02	2	1			falla en separador	exceso de tensión en el fleje
16/08/02						
17/08/02						
18/08/02						
19/08/02	3	68			falla en separador	golpe por manejo
20/08/02	3	31			falla en separador, una fractura	
20/08/02	3	2			falla en separador, hoja larga	
20/08/02	2	1			falla en separador	mal acomodo de separadores
21/08/02	3	1			falla en separador	
21/08/02	3	4	x		falla en separador, muchas fracturas	
21/08/02	3	22		x	falla en separador, muchas fracturas	
21/08/02	3	60	x		falla en separador, muchas fracturas	
21/08/02	1	78			falla en separador	respaldo mal colocado
22/08/02	3	6	x		falla en separador	
22/08/02	3	68			falla en separador hoja larga	exceso de tensión del fleje
22/08/02	3	5	x		falla en separador hoja larga	
23/08/02	3	61			falla en separador	exceso de tensión del fleje
23/08/02	3	6	x		falla en separador	
23/08/02	1	6	x		falla en separador	
24/08/02						
25/08/02						
26/08/02	1	52			falla en separador	mal acomodo de separadores
26/08/02	1	4			falla en separador	mal acomodo de separadores
26/08/02	2	24		x	falla en separador	
26/08/02	2	76		x	falla en separador	

En la información de la tabla anterior se definió como “primera pieza” o pieza #1, aquella colocada contra el respaldo del contenedor.

Gap Alto significa parabrisas con curvaturas más altas que el resto de las piezas contiguas, esto es apreciable a simple vista y puede medirse.

Levantamiento significa un defecto de forma del parabrisas que se manifiesta como una ondulación en el canto.

Como “separador” se conoce la pieza de plástico que sirve para separar las piezas en la parte superior del parabrisas, va colocado en el canto de estos.

## 7.2 Análisis y clasificación de la información.

Con la información de la tabla anterior se puede organizar y crear el Pareto de las características de las piezas rotas (tabla 7.2)

Tabla 7.2 Pareto de las características de piezas rotas

<b>PARABRISAS ROTOS</b>	<b>75</b>	
FALLA EN SEPARADOR	74	98.7%
PARTE TRASERA RACK	44	58.7%
PARTE DELANTERA RACK	31	41.3%
GAP ALTO	25	33.3%
EXCESO DE TENSION DE FLEJE	19	25.3%
PRIMERA PIEZA	15	20.0%
ULTIMA PIEZA	13	17.3%
RESPALDO MAL COLOCADO	8	10.7%
MAL ACOMODO SEPARADORES	6	8.0%
LEVANTAMIENTO	4	5.3%
FALLA EN PEINE	1	1.3%

De los 40 días que se estuvo recabando información, hubo un total de 75 piezas rotas reportadas. Se tomó esta cantidad como una población significativa para analizar y de la cual podemos inferir conclusiones que nos acerquen a la causa del problema.

A continuación se presenta el análisis y algunas conclusiones de la información obtenida de los reportes:

La primera conclusión que se desprende de este análisis, es que casi un 100% de la rotura ocurre en los separadores superiores del parabrisas (Fig 7.1). Esta aseveración guía a enfocar el análisis en esta parte del sistema vidrio-empaque.

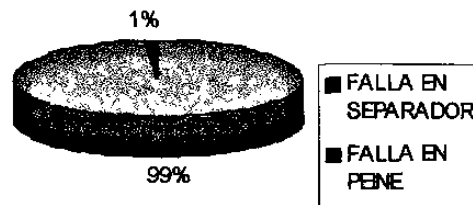


Figura 7.1 Pareto de la localización de la falla en el parabrisas

La posición de los parabrisas rotos es ligeramente mayor en la parte trasera del contenedor que en la parte delantera (fig. 7.2), se puede explicar esto debido que en esta posición es donde se encuentra la mayor parte de la carga. Sin embargo se puede concluir que este no es un factor determinante para rotura de piezas.

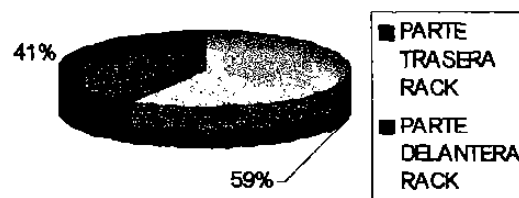


Figura 7.2 Pareto de la posición de los parabrisas rotos en el contenedor.



Como se muestra en la Fig 7.3, en la población de parabrisas rotos analizada, se encontró que una tercera parte de ellos tenían curvatura alta a diferencia del resto de los parabrisas del contenedor. Esta observación fue hecha con simple apreciación visual, es posible que hayan existido una mayor parte de parabrisas con alta curvatura en la muestra. El exceso de tensión en el fleje se presenta como un porcentaje alto de la causa de rotura según lo reportado por los auditores, sin embargo ésta no debiera ser causa de rotura si consideramos que el vidrio tiene una alta resistencia a la compresión y la tensión del fleje está actuando en este sentido. Es posible que las piezas rotas reportadas como "rotas por exceso de tensión en el fleje", hallan sufrido algún esfuerzo de flexión que no es apreciable a simple vista.

El respaldo mal colocado y los separadores mal acomodados sí son causas de rotura apreciables a simple vista, ya que generan esfuerzos de flexión en el vidrio, especialmente en las primeras piezas del contenedor.

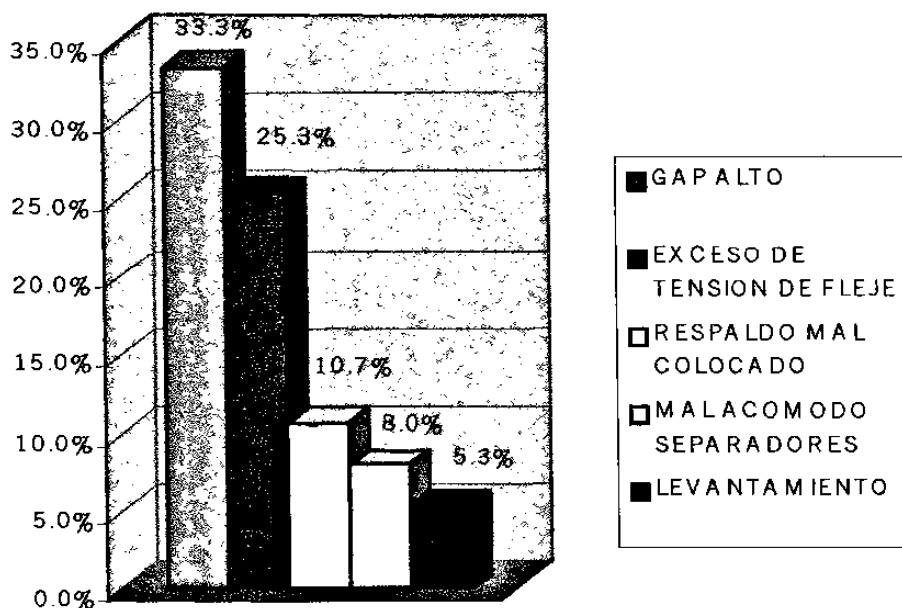


Fig. 7.3 Causa de rotura en parabrisas según reportes de auditor de calidad

Otra información importante obtenida de la evidencia recolectada en la planta con piezas que fallaron antes del embarque es el tipo de fractura que presentaban las muestras. Conociendo el tipo de fractura se puede tener una idea de la magnitud del esfuerzo al que fallaron las piezas. La figura 7.4 muestra los diferentes tipos de fractura y en que proporción se han encontrado. Esta información no ha sido posible cotejarla contra lo encontrado con el cliente ya que los parabrisas que han sido separados por este defecto, son manejados sin cuidado y se siguen fracturando cuando son puestos en el contenedor de piezas rechazadas. Al momento de ser inspeccionados por el representante de clientes, estos se encuentran bastante dañados.

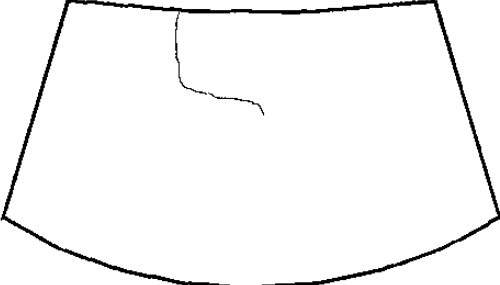
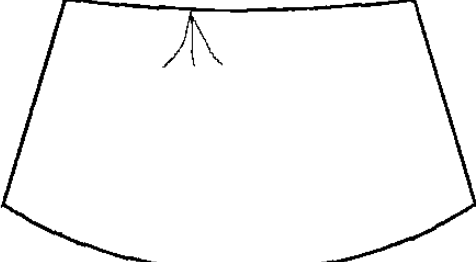
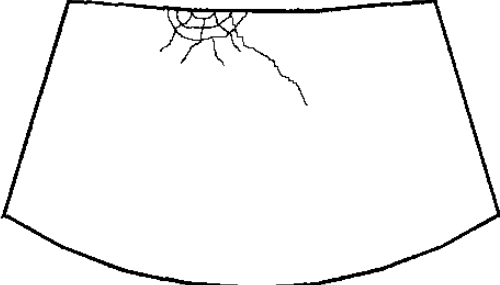
Tipo de fractura	Proporción del total encontrado
 <p data-bbox="391 1115 602 1140">Una sola fractura</p>	20%
 <p data-bbox="250 1442 740 1468">Tres fracturas partiendo del mismo punto</p>	60%
 <p data-bbox="250 1789 740 1815">Muchas fracturas alrededor del separador</p>	20%

Figura 7.4 Tipo de fractura de parabrisas reportada por control de calidad en auditorías antes de embarque.

### 7.3 Hipótesis de la rotura de parabrisas en el empaque y el transporte

Se tiene la hipótesis que las fracturas ocurren por esfuerzos de tensión o flexión altos en el vidrio en alguna de sus superficies. Dos fuentes de esfuerzos en el parabrisas son: los esfuerzos internos propios de la manufactura, y los esfuerzos mecánicos a los que está sometida la pieza durante el empaque y transporte.

Los esfuerzos internos propios de la manufactura del parabrisas son aquellos que provienen del proceso de doblado por gravedad del vidrio, para dar la forma al parabrisas. En este proceso de doblado, se curvan las dos hojas de cristal al mismo tiempo en un horno de resistencias que alcanza temperaturas de 600°C. El vidrio es colocado sobre un molde que corre sobre un transportador por el interior del horno, al terminar el proceso de doblado, el vidrio pasa a un recocedor que pretende relajar los esfuerzos residuales. Al terminar el proceso, el parabrisas tiene una curvatura o SAG dentro de una especificación, y unos niveles de esfuerzos no mayores de 500 psi a tensión típicamente. Para nuestro caso de estudio, el parabrisas Focus tiene una especificación de curvatura de 9 hasta 15 mm en su parte central.

Dentro de la determinación de la causa de rotura de los parabrisas, es sorprendente la información que se puede obtener del examen de muestras fracturadas. Existen técnicas que son útiles para este propósito y se discutirán más adelante.

Tanto los niveles de esfuerzos como la curvatura son monitoreados en la línea de producción de acuerdo a un plan de control y a una frecuencia definida. El muestreo es generalmente por lote. Existe una variación del proceso en cuanto a curvatura, sin embargo se mantiene una capacidad de proceso aceptable ( $CpK > 1.33$ ).

Los esfuerzos de tensión o flexión causantes de la rotura están relacionados con los esfuerzos mecánicos inducidos al vidrio en el empaque y transporte. Lo que no se tiene definido es como se ocasionan esos esfuerzos de tensión o flexión y de que magnitud son. El definir lo anterior puede dar la oportunidad de mejorar el diseño de empaque para asegurar la integridad de las piezas.

La figura 7.5 pretende mostrar gráficamente una descripción de las fuerzas a que esta sometido el parabrisas.

Existe una fuerza que actúa sobre los parabrisas originada por el peso de estos hacia el respaldo debido a la inclinación a que se acomodan en el contenedor. Cada parabrisas tiene un peso aproximado de 20 kg. Los parabrisas más cercanos al respaldo soportan el mayor peso por efecto del resto de ellos.

También existe una fuerza en la misma dirección del peso de los parabrisas que se ejerce por la tensión del fleje al cerrarse el contenedor. Esta tensión es de una magnitud de 63.5 Kgf (140 lbs) que también se ejerce en dirección vertical sobre el canto superior de los parabrisas hacia el piso.

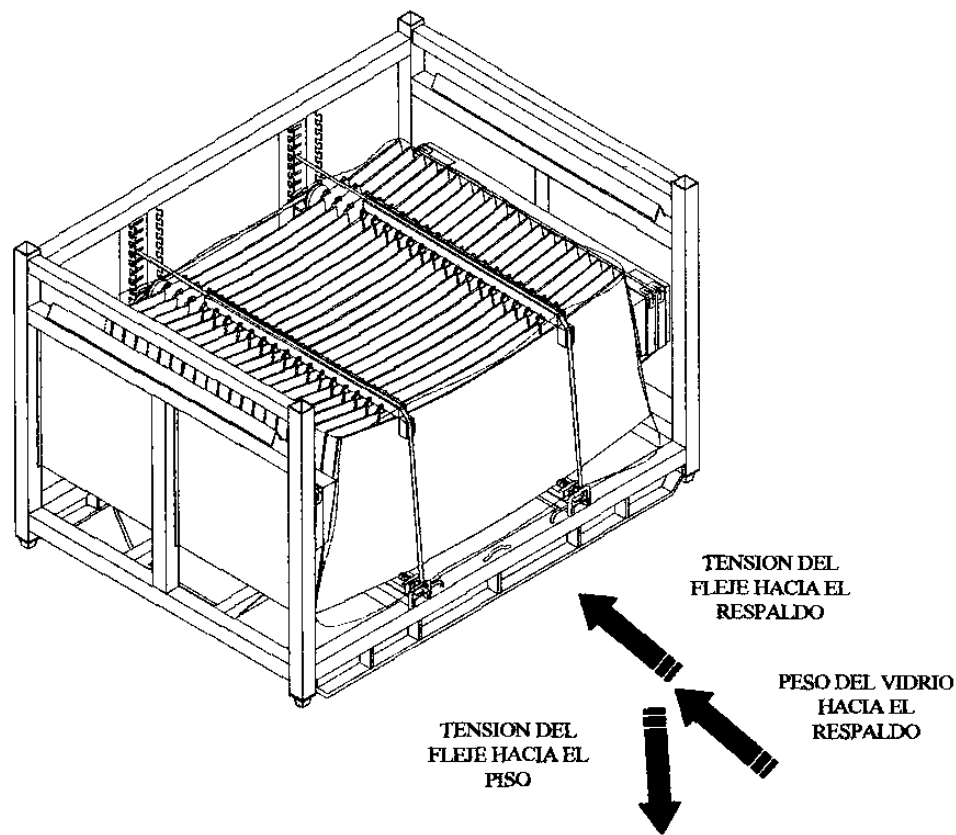


Figura 7.5 . Diagrama de fuerzas que actúan sobre el parabrisas al ser empacado

#### 7.4 Estimación de los esfuerzos de rotura según el patrón de la fractura

El número de fracturas y ramificaciones que presentan los parabrisas rotos permiten estimar el nivel de esfuerzo que causó la falla del vidrio [6].

Generalmente fracturas simples que se presentan como una sola línea resultan de esfuerzos por debajo de los 13.78 MPa (2000 psi) . (fig 7.6).

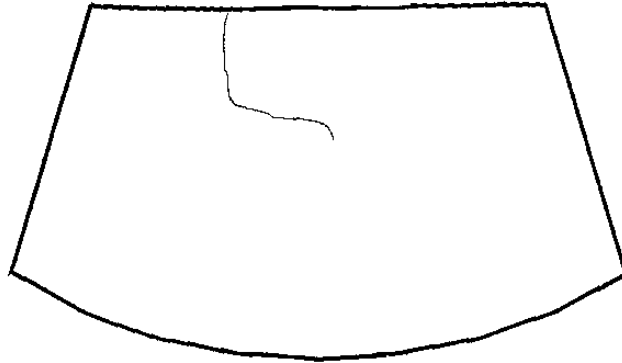
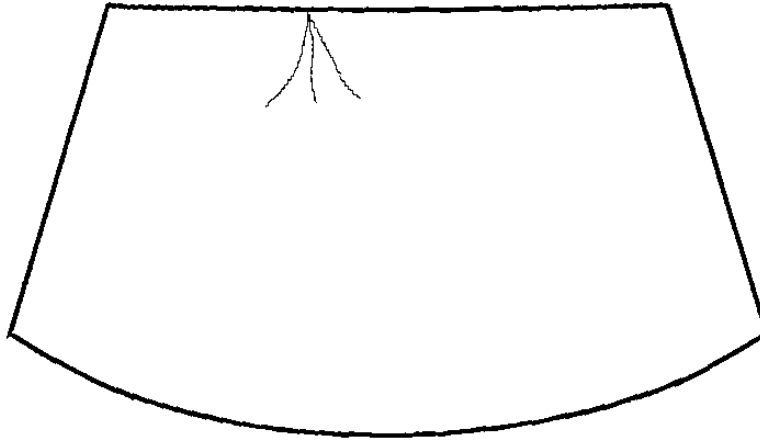


Figura 7.6 Fractura de una sola línea. Falla típica a niveles de esfuerzos bajos

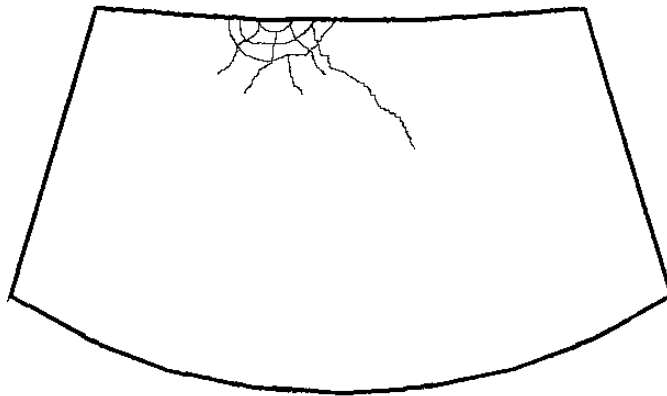
La razón de que los vidrios fallen a un nivel tan bajo de esfuerzos como este, se puede atribuir a defectos en el canto que actúan como multiplicadores del esfuerzo mecánico aplicado al parabrisas. Tales defectos pueden ser fisuras en el canto provocadas por el proceso de corte y desbaste, manejo entre procesos, proceso de doblado, etc. La estadística obtenida muestra que solo un 20% de los parabrisas encontrados con rotura, presentan este tipo de falla.

A continuación se muestra otro tipo de fractura que se representa como dos o tres líneas partiendo del mismo origen. (fig 7.7). Esto indica que se aplicaron esfuerzos cerca de los 20.68 MPa (3000 psi). Este tipo de falla es el más común encontrado en las auditorías de material antes de embarque.



**Figura 7.7** Fractura de dos o tres línea. Falla típica a niveles de esfuerzos medios

La última clasificación de las fallas según su fractura se representa en la figura 7.8. La fractura consiste de muchas líneas alrededor del área del separador donde se supone existió el esfuerzo de flexión alto, generalmente mayor de 5000 psi (34.47 MPa).



**Figura 7.8** Fractura de varias líneas. Falla típica a niveles de esfuerzos altos

Usando esta técnica de análisis para nuestro caso de estudio, observamos que la mayor parte de la fractura se origina a niveles de esfuerzos medios, según el tipo de falla que presentan. Aunque al canto de los parabrisas se les da un desbaste con lija grano medio después del proceso de corte, este presenta imperfecciones que guían a fallas del orden de esfuerzos intermedios de 20.68 MPa (3000 psi ).

## 7.5 Determinación de esfuerzos analizando el origen de la fractura

El primer paso para este tipo de análisis es localizar el origen de la fractura. Una fractura viajando a través de una hoja de vidrio deja un rastro de propagación de ondas tras ella. Las ondas son siempre convexas al sentido de la propagación, como se muestra en la figura 7.9 [6].

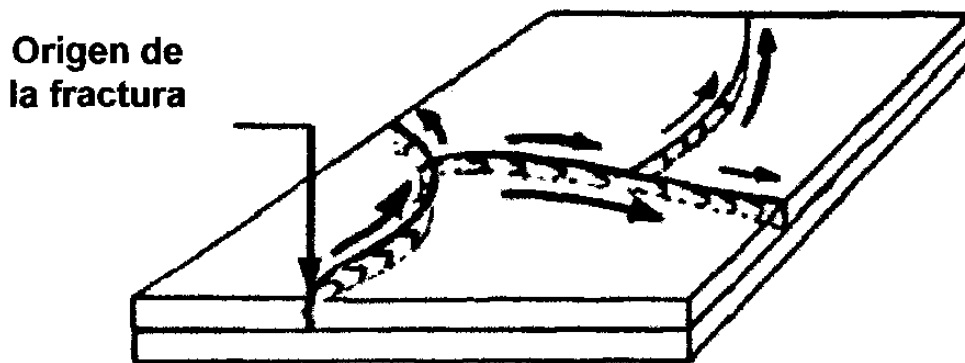


Figura 7.9 Propagación de ondas en una fractura que indican el origen de ésta.



La apariencia de la propagación de las ondas también ofrece una pista de la naturaleza de los esfuerzos que causaron la fractura y el nivel de esfuerzos residuales en el vidrio antes de la fractura. Como se muestra en la figura 7.10, las ondas son simétricas cuando la fractura se origina en un defecto dentro del cuerpo del vidrio y son asimétricas cuando se origina en la superficie. En especímenes de alta concentración de esfuerzos tales como los de vidrio templado, la propagación de las ondas frecuentemente ocurre en ambos lados de la zona de alta tensión del espécimen, que es normalmente el centro del espesor.

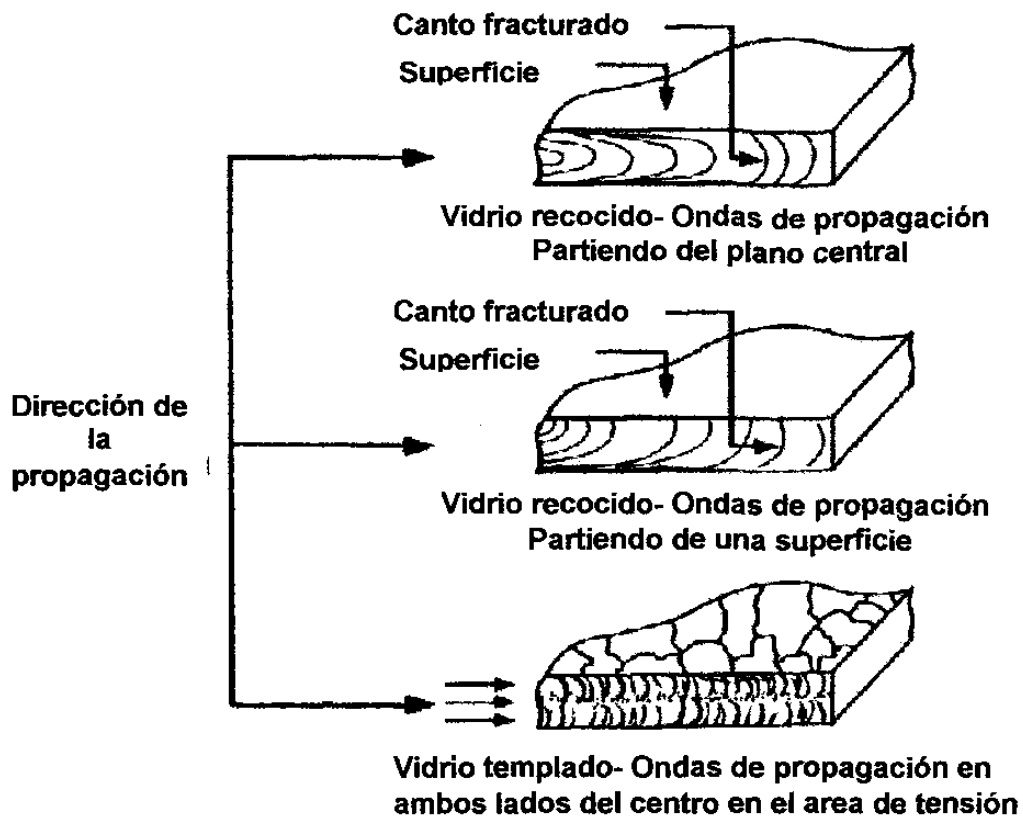


Fig 7.10 La ilustración superior muestra el origen de una fractura en el cuerpo del un vidrio recocido. La ilustración intermedia muestra el origen de la fractura en una de las superficies del vidrio. La última ilustración muestra el origen de una fractura en un vidrio templado

Usando esta técnica de análisis hemos podido definir que la falla de los parabrisas en el empaque se origina en el canto y en una de las cuatro superficies que componen el vidrio laminado.

Examinando cuidadosamente la cara de la fractura puede determinarse si la falla resultó de tensión pura o de esfuerzos de flexión. En la falla de tensión pura, la cara de la fractura presenta ondas simétricas y semicirculares, mientras que los esfuerzos de flexión causa que la cara de la fractura parezcan más una media elipse. La medición del radio de la cara de la fractura puede guiar a una estimación del nivel de esfuerzos a que el vidrio fue sujeto para causarle una fractura. Una fórmula empírica generalmente aceptada y usada para determinar el esfuerzo en la falla es: [6]

$$S = 1950 / \sqrt{R}$$

Donde:

**S** es el esfuerzo en PSI

**R** es el radio de la cara de la fractura en pulgadas

Cuando en los parabrisas las dos piezas de vidrio resultan rotas, la falla inicial puede ser determinada separando cuidadosamente el vidrio a lo largo de la línea de la fractura y examinando ambas caras de la fractura. Midiendo el radio de las dos fracturas puede concluirse que el origen con la cara de fractura más larga ocurrió primero porque se requirió menor esfuerzo (ver fig 7.11) para provocar la falla. En la práctica es frecuentemente observado que ambas hojas parecen romperse simultáneamente, pero es claro que el primer origen ocurrió en el punto más débil.

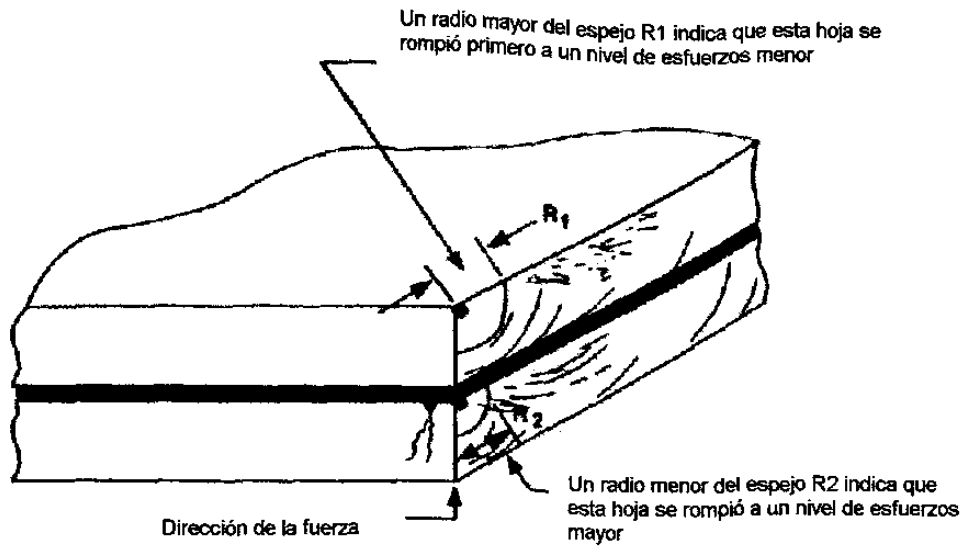


Figura 7.11 En piezas laminadas como los parabrisas, puede darse el caso de fractura en ambas hojas de vidrio. Por medio de este análisis se determina que falla ocurrió primero.

El análisis del origen de la fractura ha permitido determinar en piezas que han fallado, el nivel de esfuerzo a que fueron sometidos. A continuación se presenta una medición hecha en un parabrisas fracturado que presentaba una fractura de varias líneas.

**Análisis de fractura de parabrisas**

Fecha: 21 de Agosto 2002

Elaboró: J González / L. Smith

Laboratorio: Visteon Tulsa Glass Plant

<b>Equipo</b>	Microscopio Nikon con lentes de 30X
	Cámara digital panasonic
	Microscopio Con lentes de 40X
	Micrómetro tipo carátula para microscopio

**Ecuación matemática para cálculo de esfuerzo**

$$S = 1950 / \sqrt{R}$$

Donde:

**S** es el esfuerzo en PSI

**R** es el radio de la cara de la fractura en pulgadas

**Resultados:**

Radio del espejo medido en la muestra =  $132.501 \times 10E-3$  plg

Esfuerzo calculado a la falla = 5357 psi. (36.9 Mpa)

En la figura 7.12 se muestra la fotografía digital del espécimen analizado. Se observan varias fracturas partiendo de un mismo punto

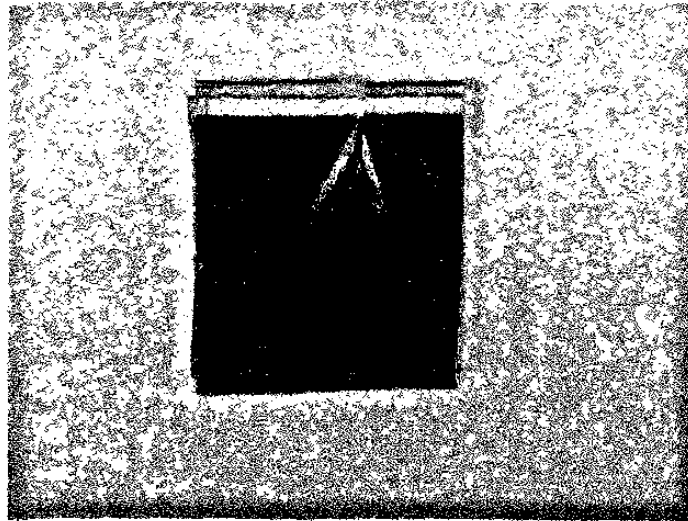


Figura 7.12 Fotografía digital de muestra analizada

El origen de la fractura se muestra en la esquina derecha inferior de la figura 7.13. Las marcas de torcedura en la parte superior indican que dicha superficie estuvo a compresión, lo que es consistente con el origen de la fractura en la superficie opuesta.

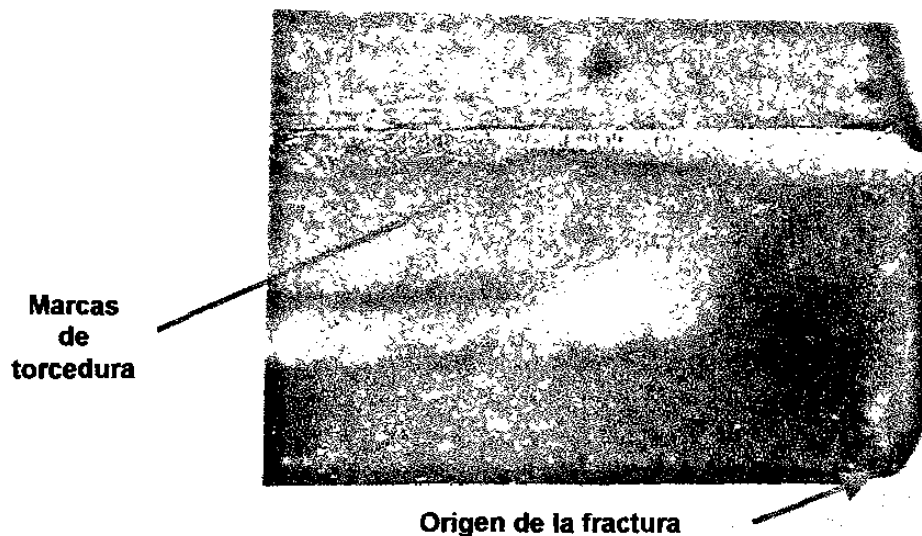


Figura 7.13 Origen de la fractura de la muestra

En la figura 7.14 se hace un acercamiento de las marcas de torcedura para confirmar que la superficie estuvo a compresión.

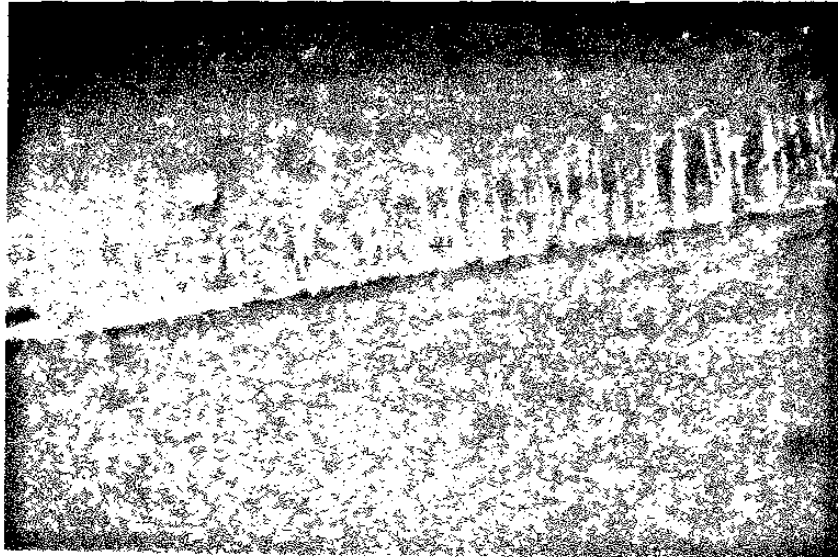


Figura 7.14 Acercamiento a las marcas de torceduras

En la figura 7.15 se muestra el inicio de las ondas semicirculares que indican una falla por flexión. La medición del radio del espejo se realiza desde el origen de la fractura hasta el inicio de las ondas de propagación.

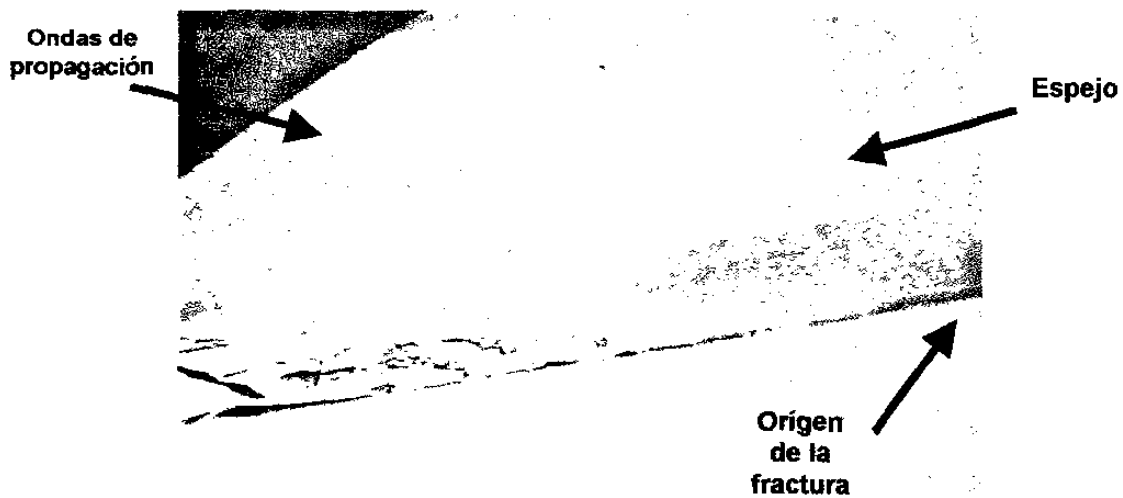


Figura 7.15 Fotografía del espejo y ondas de propagación en el origen de la fractura

## 7.6 Determinación de los esfuerzos mecánicos sufridos por los parabrisas en el empaque usando la técnica de los sensores de deformación

La figura 7.16 explica gráficamente el esfuerzo a flexión/ tensión al que puede estar sometido una de las superficies del vidrio en parabrisas con diferentes curvaturas y que son propensas a generar una fractura.

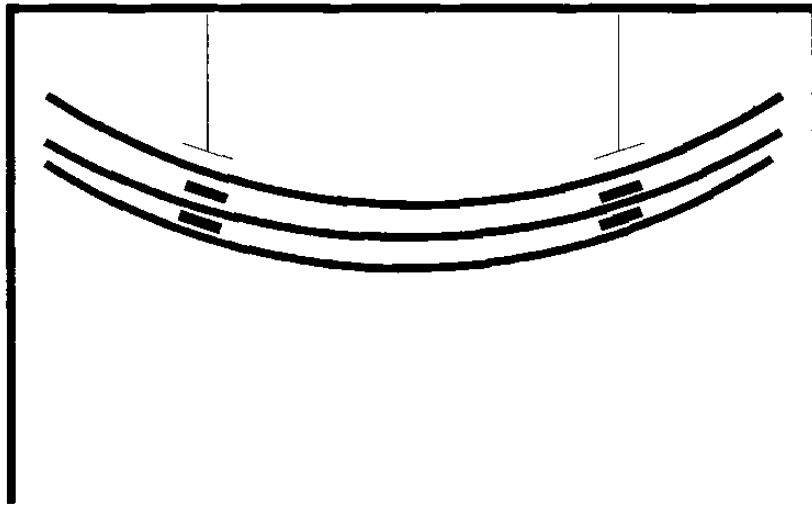


Figura 7.16. Creación de un esfuerzo de tensión o flexión en la zona de los separadores o "hairpins". El parabrisas colocado en medio tiene un radio de curvatura mayor que los parabrisas que están delante y atrás de él. Estos parabrisas se verán afectados ya que tenderán a "conformarse a la forma del contiguo debido al peso y tensión del fleje, provocando una deformación en sus superficies, y por lo tanto, un esfuerzo.

### 7.6.1 Objetivo del experimento de medición de esfuerzos por medio de sensores de deformación

El objetivo de este experimento es identificar los esfuerzos de flexión a que pueden estar sometidos los parabrisas en el empaque, comprobando así que el diseño actual del empaque no aísla a las piezas de los esfuerzos mecánicos a que puede estar sometido. Esta información puede ser usada para determinar controles para el empaque de los parabrisas así como para validar un nuevo diseño de separadores.

### 7.6.2 Descripción del experimento

Se pretende demostrar que existe un esfuerzo de flexión en el vidrio en la zona de los separadores o hairpins cuando dos parabrisas contiguos tiene diferentes curvaturas. El experimento consiste en colocar en un contenedor normal dos piezas de vidrio con diferente sag contiguas una a la otra, las cuales tiene adheridos sensores de deformación (SG) en cada una de sus superficies cerca del canto superior. Los SG están colocados en el área del separador donde se supone existe un esfuerzo aplicado debido al peso del resto de los parabrisas y la tensión de flejado.

Para uso en esta prueba, se usaron dos parabrisas con curvaturas ó sag altos y dos con sag bajo. Se trató de reproducir la condición en la que se pudieran fabricar los parabrisas en condiciones normales, es decir, en los extremos de la especificación de curvaturas. Se eligió para la prueba el parabrisas Focus dado que ha presentado una alta rotura en empaque y es uno de los productos de mayores dimensiones, además de ser de alto volumen de producción.



### Curvatura de parabrisas para la prueba (Tabla 7.3)

Especificación de SAG central:

Límite superior: 15 mm

Límite inferior: 9 mm

No existe especificación de SAG superior, sin embargo se tomo este dato como referencia.

El SAG central se mide colocando una escala de la parte superior del vidrio a la parte inferior soportándose de los cantos. La lectura a tomar es la distancia que hay de la escala a la superficie del vidrio medido la mitad de la distancia en línea recta entre el canto superior e inferior. El SAG superior se mide a la altura del botón o base del espejo retrovisor.

Tabla 7.3. Curvaturas de parabrisas para la prueba

	<b>SAG Central</b>	<b>SAG Superior</b>
Parabrisas 1 (PB1)	10 mm	12 mm
Parabrisas 2 (PB2)	14.5 mm	17.5 mm
Parabrisas 3 (PB3)	14 mm	17 mm
Parabrisas 4 (PB4)	10 mm	12 mm

#### 7.6.3 Procedimiento del experimento


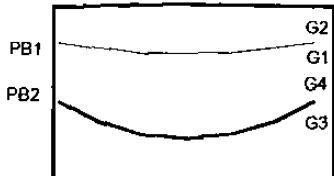

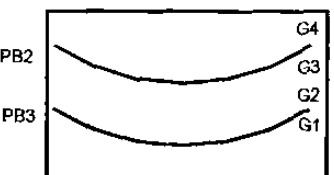
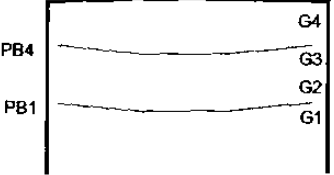
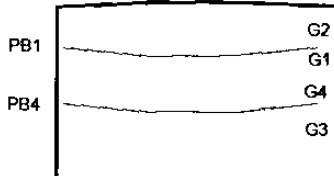
1. Se colocó una combinación de parabrisas de acuerdo a la tabla 7.4 junto con las primeras piezas del contenedor. Las piezas estaban contiguas. Las piezas adyacentes eran de la misma curvatura de las que se evalúan para minimizar el efecto de estas.

2. A cada parabrisas se le colocó un sensor de deformación (SG) por la parte interior y otro por la parte exterior, paralelo y junto al canto en la zona del separador, donde se supone actúan las fuerzas sobre el parabrisas por ser las zonas de contacto entre vidrio y separadores. Los sensores de deformación (SG) fueron colocados a la misma distancia del canto superior y del lateral de los parabrisas examinados.
3. Se inició la medición
4. Se fueron colocando uno a uno el resto de los parabrisas sobre los de prueba. Los parabrisas se encuentran alineados.
5. Al terminar de colocar todos los parabrisas, se flejó el paquete a una tensión predeterminada de 63.5 kgf (140 lbf.)
6. Al terminar de flejar, se esperó un segundo y se liberó la tensión del fleje.
7. Se retiró el fleje y se empezaron a retirar cada una de las piezas hasta dejar sin carga las piezas en cuestión
8. Se detiene la medición
9. Se registra la gráfica y se almacena
10. Se efectuaron cinco replicas de cada experimento

Antes de cada prueba se verificó el funcionamiento de los sensores de deformación. La temperatura ambiente en que se realizó la prueba fue de 30°C.

El procedimiento mencionado duplica el empaque en condiciones normales de operación al estar empacando y cerrando el contenedor. No se efectuó una prueba de medición dinámica que simularía las condiciones en el transporte por ser una experimentación que requiere se cuente con un equipo portátil, sin embargo las mediciones obtenidas dan información suficiente de lo que pudiera pasar en el transporte ya que el esfuerzo se vería incrementado varias veces por efecto del movimiento, aceleración y desaceleración del cuerpo.

Tabla 7.4 . Combinación de curvaturas y orden de los experimentos de medición con sensores de deformación

EXPERIMENTO	COMBINACION
1	
2	
3	
4	
5	
6	

#### 7.6.4 Resultados del experimento

De los experimentos se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 7.5. Los valores corresponden a la deformación máxima en cada réplica. Es importante mencionar que para cada sensor se tiene un valor de tensión y uno de compresión, siendo solamente uno de ellos el más importante que refleja la deformación mayor a la que estuvo expuesta la superficie. Esperaríamos que un sensor solo diera una lectura de tensión ó compresión pero no ambas, esto sucede debido a que al liberar la tensión del fleje al final del experimento el parabrisas recupera su forma original de una manera repentina y la inercia de la carga hace que oscile ligeramente entre valores de compresión y tensión.

El signo positivo (+) indica una deformación a tensión y el signo negativo (-) indica una deformación a compresión.

Tabla 7.5. Mediciones. Deformación en microstrain ( $1 \times 10^{-6}$  in/in).

		REPLICA					PROMEDIO	MAXIMO TENSION	MAXIMO COMPRESION	OBSERVACIONES
		1	2	3	4	5				
<b>EXPERIMENTO 1</b>										
Sensor 1	TENSION	11	24.5	16.5	15	0	13.4	24.5	-193	SUPERFICIE A COMPRESION
	COMPR	-181.5	-193	-180.5	-181.5	-180	-183.3			
Sensor 2	TENSION	125	131	120.5	106.5	110	118.6	131	-17.5	SUPERFICIE A TENSION
	COMPR	-3	-17.5	-11.5	-13.5	0	-9.1			
Sensor 3	TENSION	306.5	300.5	283.5	344	380	348.9	383.5	-8.5	SUPERFICIE A TENSION
	COMPR	-2.5	-6.5	-6.5	-8.5	0	-4.6			
Sensor 4	TENSION	14.5	105	8	5	0	6.9	14.5	-106.5	SUPERFICIE A COMPRESION REPLICA 2 FALLA EN LA MEDICION
	COMPR	-96.5	-46	-106.5	-106.5	-100	-102.4			
<b>EXPERIMENTO 2</b>										
Sensor 1	TENSION	11	13	10	12	6	10.4	13	-377	SUPERFICIE A COMPRESION
	COMPR	-377	-376	-377	-374	-376	-376			
Sensor 2	TENSION	235	237	243	242	240	239.4	243	-17	SUPERFICIE A TENSION
	COMPR	-12	-17	-11	-17	-4	-12.2			
Sensor 3	TENSION	439	438	460	463	464	452.8	464	-3	SUPERFICIE A TENSION
	COMPR	0	-2	-1	-3	-1	-1.4			
Sensor 4	TENSION	11	9	10	11	15	11.2	15	-151	SUPERFICIE A COMPRESION
	COMPR	-150	-149	-149	-151	-151	-150			
<b>EXPERIMENTO 3</b>										
Sensor 1	TENSION	-12	-12	-12	-11	-11	-11.6	-11	-209	SUPERFICIE A COMPRESION
	COMPR	-200	-208	-205	-207	-209	-205.8			
Sensor 2	TENSION	262	259	260	245	247	254.6	262	-41	SUPERFICIE A TENSION
	COMPR	-41	-33	-34	-32	-34	-34.8			
Sensor 3	TENSION	422	431	473	400	405	426.2	473	-51	SUPERFICIE A TENSION
	COMPR	-51	1	0	1	2	-9.4			
Sensor 4	TENSION	29	5	3	3	12	10.4	29	-228	SUPERFICIE A COMPRESION
	COMPR	-209	-228	-227	-226	-228	-223.6			
<b>EXPERIMENTO 4</b>										
Sensor 1	TENSION	16	22	89	644	128	63.75	128	-223	SUPERFICIE A COMPRESION REPLICA 4 FALLA EN LA MEDICION
	COMPR	-183	-185	-223	-204	-189	-196.8			
Sensor 2	TENSION	243	205	221	199	206	214.8	243	-52	SUPERFICIE A TENSION
	COMPR	-42	-62	-33	-20	-37	-36.8			
Sensor 3	TENSION	328	312	362	318	327	329.4	362	-1	SUPERFICIE A TENSION
	COMPR	0	2	-1	2	-1	0.4			
Sensor 4	TENSION	4	9	6	-1	1	3.8	9	-141	SUPERFICIE A COMPRESION
	COMPR	-119	-118	-118	-141	-139	-127			
<b>EXPERIMENTO 5</b>										
Sensor 1	TENSION	36	39	22	28	28	30.6	39	-204	SUPERFICIE A COMPRESION
	COMPR	-199	-197	-204	-201	-199	-200			
Sensor 2	TENSION	99	97	89	87	85	91.4	99	-41	SUPERFICIE A TENSION
	COMPR	-26	-38	-35	-41	-38	-35.6			
Sensor 3	TENSION	26	26	20	23	13	21.6	26	-165	SUPERFICIE A COMPRESION
	COMPR	-163	-164	-165	-165	-163	-164			
Sensor 4	TENSION	86	83	93	92	89	88.6	93	-44	SUPERFICIE A TENSION
	COMPR	-35	-44	-27	-30	-14	-30			
<b>EXPERIMENTO 6</b>										
Sensor 1	TENSION	11	15	12	0	16	10.8	16	-217	SUPERFICIE A COMPRESION
	COMPR	-216	-215	-215	-217	-215	-215.6			
Sensor 2	TENSION	182	184	183	186	184	183.8	186	-40	SUPERFICIE A TENSION
	COMPR	-38	-32	-34	-21	-40	-33			
Sensor 3	TENSION	33	23	26	28	36	29.2	36	-206	SUPERFICIE A COMPRESION
	COMPR	-204	-206	-204	-203	-202	-203.8			

## 7.6.5 Interpretación de los resultados

Tabla 7.6 Resultados. Valores máximos de deformación encontrados en cada experimento

EXPERIMENTO	COMBINACION	SUPERFICIE	ESFUERZO	VALOR (PSI)
<b>1</b>		G4	COMPRESION	1107.6
		G3	TENSION	<b>3988.4</b>
		G2	TENSION	1362.4
		G1	COMPRESION	2007.2
<b>2</b>		G2	TENSION	2527.2
		G1	COMPRESION	3920.8
		G4	COMPRESION	1570.4
		G3	TENSION	<b>4825.6</b>
<b>3</b>		G2	TENSION	2724.8
		G1	COMPRESION	2173.6
		G4	COMPRESION	2371.2
		G3	TENSION	<b>4919.2</b>
<b>4</b>		G4	COMPRESION	1466.4
		G3	TENSION	<b>3764.8</b>
		G2	TENSION	2527.2
		G1	COMPRESION	2319.2
<b>5</b>		G4	TENSION	967.2
		G3	COMPRESION	1716
		G2	TENSION	1029.6
		G1	COMPRESION	<b>2121.6</b>
<b>6</b>		G2	TENSION	1934.4
		G1	COMPRESION	<b>2256.8</b>
		G4	TENSION	1341.6
		G3	COMPRESION	2142.4

Dado que los parabrisas presentan un radio de curvatura muy grande, el esfuerzo fue calculado directamente con la fórmula:

$$\sigma = E \varepsilon$$

donde:

$\sigma$  es el esfuerzo en psi.

$E$  es el módulo de elasticidad del vidrio igual a 71,705 MPa (10.4 x 10E6 psi)

$\varepsilon$  es la deformación medida por el sensor de deformación en microdeformación ó "microstrain" igual a 1 x 10E-6 in/in

De la tabla 7.6 podemos observar que los parabrisas con curvaturas mayores estuvieron expuestos a esfuerzos de mayor magnitud en cualquiera de las combinaciones hechas. Igualmente en las combinaciones de parabrisas de menor curvatura con los de mayor curvatura, ambos presentaron esfuerzos de tensión en el orden de los 34.47 MPa (5000 psi) en alguna de las superficies.

La combinación que presentó menores esfuerzos fue la de parabrisas con baja curvatura, estando en el orden de las 13.78 MPa (2000 psi ) como máximo.

Es importante hacer notar que aunque se tomaron las precauciones es este experimento para colocar los sensores de deformación en la misma posición, el lugar elegido no necesariamente es el de mayor deformación, siendo esta una desventaja de este método de medición. Sin embargo los resultados son aceptables ya que arrojan información proporcional si no es que la máxima, de las deformaciones que se estuvieron dando en las superficies de los parabrisas.

## 8 Conclusiones y Recomendaciones

### 8.1 Conclusiones

El presente estudio aporta información importante sobre el desempeño del empaque con parabrisas que pueden tener diferencias en sus curvaturas dentro de los límites de una especificación dada. La variación en el proceso de curvado de parabrisas puede ser capaz estadísticamente, sin embargo, aquellos parabrisas de curvatura alta resultante de las variaciones en los inicios de corridas de producción por el control mismo del proceso, tendrán un mayor riesgo a fracturarse en el empaque, como se demostró en la sección 7.6.

El vidrio recocido como el que conforma los parabrisas, tiene una amplia escala de valores de resistencia a la fractura, generalmente se recomienda a los clientes de la compañía que no expongan el vidrio a esfuerzos mayores de 20.68 MPa (3000 psi ), aunque la mayoría de los parabrisas puede sobrevivir hasta los 68.94 MPa (10,000 psi). Una variable importante que permite que los parabrisas puedan fallar a valores pequeños de esfuerzos, son las imperfecciones que pueden existir en la superficie especialmente cerca del canto, como son los daños por manejo y por el mismo proceso de manufactura.



Otra conclusión relevante es que por medio de las técnicas de análisis de fractura se determinó que un 80% de los parabrisas que fallan en el empaque, fueron expuestos a esfuerzos mayores de 20.68 MPa (3000 psi), provocando así, el resultado de rotura en empaque en el orden de las 2000 partes por millón embarcadas.

Hay dos hechos que refuerzan los resultados obtenidos del experimento 7.6. el primero de ellos, es el 33% de parabrisas con curvaturas altas encontrados rotos antes de embarcarse, y el segundo es que, el parabrisas con curvatura más compleja que fabrica la planta, tiene niveles de rotura en el orden de las 6000 PPM.

En el experimento 7.6 se cuantificaron valores de esfuerzos 3 y 4 veces mayores en combinaciones de curvaturas de parabrisas y en parabrisas en "muy curvos", en comparación con parabrisas con curvaturas bajas. La hipótesis establecida al inicio, donde se plantea el pobre desempeño del diseño de empaque actual, queda cuantitativamente comprobada con los resultados de los experimentos hechos.

Este estudio se limitó a evaluar el desempeño del empaque en condiciones estáticas y de carga controlada de los parabrisas debido a las restricciones del equipo de medición. Sin embargo en el proceso real y durante el transporte, el parabrisas estará sujeto a impactos y vibraciones que amplificarán el esfuerzo aquí medido. Hay evidencia que el contenedor generalmente esta sujeto a impactos de 4 g's durante el transporte en ferrocarril.

## 8.2 Recomendaciones

La información obtenida muestra niveles de esfuerzos que ponen a los parabrisas en alto riesgo de fractura. Lo anterior guía al rediseño del empaque para reducir dichos niveles de esfuerzos mecánicos que provocan una flexión o tensión en la superficie del vidrio.

Dado los altos costos de los cambios de diseño en los contenedores, se buscará atacar aquellos puntos críticos en el empaque que generen un mayor potencial de fractura. Las estadísticas muestran un 99% de rotura en el separador superior, por lo que el rediseño se podrá enfocar a este elemento reduciendo así el costo de la solución.

En el diseño actual, el separador actúa solamente como división “pasiva” entre los vidrios. Se requiere una división o separador “activo” que absorba las diferencias de curvaturas de los parabrisas. Que absorba también en su estructura el peso del resto de los parabrisas, así como los impactos a que puede estar sujeto el paquete durante el transporte.

## Bibliografía

1. Trate, D.J.,Griffin J.A., "Windshield investigation-manufacturing and installation stresses", SAE paper 1999-01-3160
2. Villarreal Treviño, L., "Programa de asimilación de tecnología", Grupo Vitro 1986
3. Garza Méndez Francisco J. "Escalamiento en la fractura del vidrio reforzado mediante intercambio ionico", Tesis M.C. Centro de investigación y desarrollo de materiales cerámicos, FCQ UANL.
4. Cárdenas Alemán Eduardo. "Vidrio templado: Teoría y solución de un problema industrial". Tesis M.C. FIME UANL
5. Seward T.P, Varshneya A.K., "Inorganic glasses, Comercial glass families, applications and manufacturing methods". New York State College of Ceramics, Alfred University.
6. Nichols, R.T. "Determining the cause of windshield breakage" Glass Division Paper, Ford Motor Company.
7. Hanlon, J.F. , Kelsey, R.J., "Handbook of package engineering", 3er edition
8. Render A.S., Hoffman B.R., "Detection of tensile stresses near the edges of laminated and tempered glass",Glass processing Days, 18-21 Jun 2001
9. Varner, J.R.,La Course W.C., "Contact damage on glass surfaces caused by impact and abrasion", Glass Processing Days, 13-15 Sept 1997,
10. Doremus, R.H.,"Fracture and Fatigue of glass" Treatise on materials science and technology, Vol 22
11. Varner J.R., " Crack Initiation important to understanding glass strength", Glass researcher vol 9, No.2.
12. Lillie, H.R. "Principios básicos de recocido", Grupo Vitro, Agosto 1981.
13. Schwartz, T.A., " Analyzing the cause of fractures, after the fact", Glass Digest, April 15,1984.

## Listado de Tablas

Tabla	Descripción	Pág.
2.1	Valores importantes de viscosidad y temperatura en vidrios soda calcio	24
2.2	Escala de Mohs para dureza	25
2.3	Dureza de algunos vidrios en la escala de Knoop	26
2.4	Peso específico de diferentes materiales	32
2.5	Diferentes tipos de vidrio. Composición química	37
2.6	Reacciones producidas durante la formación de vidrios soda-calcio	39
4.1	Valores de resistencia a la tensión de especímenes de vidrio y aceros comunes	59
7.1	Condensado de reportes de parabrisas rotos.	72
7.2	Pareto de las características de piezas rotas	73
7.3	Curvaturas de parabrisas para la prueba	91
7.4	Orden de los experimentos de medición de esfuerzos	93
7.5	Mediciones de la deformación	95
7.6	Resultado. Valores máximos de deformación encontrados en los experimentos.	96

## Listado de Figuras

Fig	Descripción	Pág.
1	Contenedor metálico con parabrisas	10
2.1	Estructura tetraédrica de la sílice	20
2.2	Red vítrea de la sílice	20
2.3	Diagrama de flujo de fabricación de parabrisas	49
3.1	Esquema simplificado de la generación de esfuerzos permanentes en el vidrio	52
3.2	Gradiente de temperatura parabólico	54
4.1	Distribución de las líneas de fuerza en un elemento con una grieta sometido a tensión	58
4.2	Modelo de Griffith de una placa conteniendo una grieta elíptica	58
4.3	Los tres modos de aplicación de carga	61
6.1	Contenedor metálico para empaque de parabrisas	66
6.2	Contenedor de parabrisas con separadores de plástico	62
7.1	Pareto de la localización de la falla en parabrisas	74
7.2	Pareto de la posición de los parabrisas rotos en el contenedor	74
7.3	Causa de la rotura en parabrisas según reportes de auditorías de calidad	75

7.4	Tipo de fractura de parabrisas reportada por control de calidad en auditorías antes de embarques	76
7.5	Diagrama de fuerzas que actúan sobre el parabrisas al ser empacado	79
7.6	Fractura de una sola línea	80
7.7	Fractura de dos líneas	81
7.8	Fractura de varias líneas	81
7.9	Propagación de ondas en una fractura	82
7.10	Representación gráfica del origen de las fracturas	83
7.11	Fractura en una pieza laminada	85
7.12	Foto digital de una muestra analizada	87
7.13	Origen de la fractura de la muestra	87
7.14	Acercamiento de las marcas de torcedura	88
7.15	Fotografía del espejo y ondas de propagación en el origen de la fractura	88
7.16	Creación de un esfuerzo de tensión o flexión en la zona de separadores del contenedor de parabrisas	89

## Apéndice A

### Validación del método de medición con sensores de deformación

Se validó la repetibilidad de las mediciones de los sensores de deformación mediante el desarrollo de una prueba en una probeta y bajo condiciones controladas.

Se colocaron 4 medidores o SG en una probeta de vidrio de 12 x 12 in. Dos medidores al centro un canto, uno en cada superficie del vidrio. Los otros dos SG se colocaron en el canto opuesto (Figura A.1). La probeta se colocó sobre 4 puntos de apoyo a una altura de aproximadamente 1 in de la mesa. Los punto de apoyo estaban en cada una de la cuatro esquinas de la pieza. La probeta de colocó de manera horizontal sobre la mesa, apoyándose solamente en cuatro puntos. (ver figura A.2)

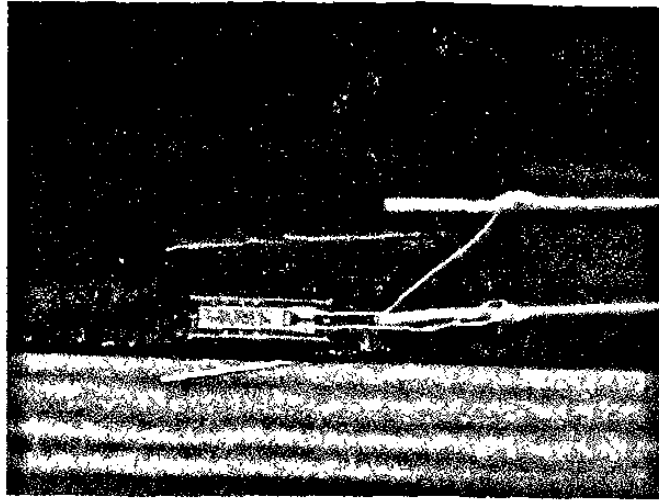


Figura. A.1 Localización de los Strain Gages

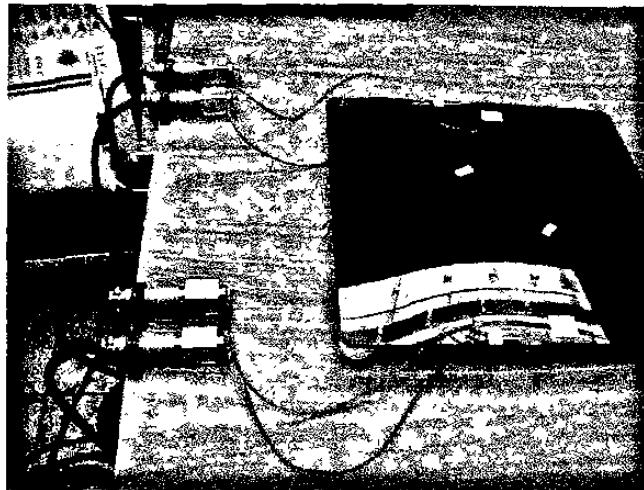


Figura A.2 . Probeta de 12 x 12 plg con "strain gages" conectados

Los SGs fueron adheridos a la superficie del vidrio con adhesivo especial y conectados a las terminales del aparato por medio de soldadura de estaño como lo marca el procedimiento del medidor.



La prueba consistió en colocar un peso de 15 Kgs en el centro de la probeta en repetidas ocasiones y tomar la lectura de deformación de las 2 superficies y cuatro medidores. Se efectuó un muestreo de 30 mediciones, quitando y colocando la pesa el mismo número de veces en el mismo lugar (fig A.3).



Figura A.3 . Probeta con pesa de 15 kg

A continuación se muestra la tabla con las lecturas de deformación obtenidas durante la prueba. (Tabla A.1)

Los valores obtenidos y reportados en la tabla están dados en microdeformación  $\mu\epsilon$  ó  $1 \times 10^{-6}$  in/in. Se puede observar que los valores de los SGs colocados en las caras inferiores (G2 y G4) mostraron lecturas mayores que (G1 y G3) en el orden de 25 y 30  $\mu\epsilon$ . la explicación de esto es que esas superficies se encontraron a tensión y fueron sometidos a una flexión por efecto del peso.

Tabla A.1 Reporte de prueba de repetibilidad de medición de deformación.

**Prueba de Repetibilidad**  
Medición de deformación

Lugar:	Laboratorio VFX
Fecha:	17-Jul-02
Elaboraron:	J. González J. Sanchez

Prueba	G1	G2	G3	G4
1	2	25	2	30
2	2	25	2	30
3	2	25	2	30
4	2	25	2	30
5	2	25	2	30
6	2	25	2	30
7	2	25	2	30
8	2	25	2	30
9	2	25	2	30
10	2	25	2	30
11	2	25	2	30
12	2	25	2	30
13	2	25	2	30
14	2	25	2	30
15	2	25	2	30
16	2	25	2	30
17	2	25	2	30
18	2	25	2	30
19	2	25	2	30
20	2	25	2	30
21	2	25	2	30
22	2	25	2	30
23	2	25	2	30
24	2	25	2	30
25	2	25	2	30
26	2	25	2	30
27	2	25	2	30
28	2	25	2	30
29	2	25	2	30
30	2	25	2	30

**G1** SG parte superior lado 1  
**G2** SG parte inferior lado 2  
**G3** SG parte superior lado 2  
**G4** SG parte inferior lado 2

El resultado de repetibilidad de la medición es aceptable dado que los valores obtenidos son consistentes en cada toma de lectura.. Con este resultado se puede considerar como confiable las lecturas de deformación obtenidas.

Como referencia se menciona que los parámetros del aparato fueron colocado de la siguiente manera:

Rango: 500  $\mu\epsilon$

Intervalo de medición: 2 segs

## Resumen Autobiográfico

El ingeniero Jesús González Rodríguez nació en Monterrey Nuevo León, cursó la carrera de Ingeniero Mecánico Electricista en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León en el período comprendido 1991 a 1996. Realizó su servicio social en el departamento de Mecánica de los Materiales de la misma. Desde febrero de 1997 a la fecha, ha desempeñado los puestos de ingeniero de procesos e ingeniero de manufactura en la planta Vitro Flex perteneciente al Grupo Vitro. Dentro de la empresa ha participado activamente en el desarrollo de nuevos productos y procesos en la fabricación de vidrio automotriz, así como en la solución de problemas industriales y proyectos de mejora.

Es miembro de la "Society of Manufacturing Engineers" (SME) y fue certificado por la misma como Tecnólogo en manufactura. Cursó el diplomado en Ingeniería de manufactura impartido por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey y la SME Sección Monterrey.

