



# UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

## TESIS DOCTORAL

Título
<b>Fractología industrial del vidrio templado. Caracterización y diagnóstico del estado tensional producido durante un tratamiento térmico de templado industrial en vidrio sodocálcico en función de los parámetros de fabricación y esfuerzos externos de uso, a partir del proceso de fractura</b>
Autor/es
<b>Óscar Domingo Sandín Romano</b>
Director/es
Ana González Marcos y Fernando Alba Elías
Facultad
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Titulación
Departamento
Ingeniería Mecánica
Curso Académico
2014-2015



**Fractología industrial del vidrio templado. Caracterización y diagnóstico del estado tensional producido durante un tratamiento térmico de templado industrial en vidrio sodocálcico en función de los parámetros de fabricación y esfuerzos externos de uso, a partir del proceso de fractura**, tesis doctoral de Óscar Domingo Sandín Romano, dirigida por Ana González Marcos y Fernando Alba Elías (publicada por la Universidad de La Rioja), se difunde bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported. Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los titulares del copyright.

- © El autor
- © Universidad de La Rioja, Servicio de Publicaciones, 2015  
publicaciones.unirioja.es  
E-mail: publicaciones@unirioja.es



UNIVERSIDAD DE LA RIOJA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Mayo 2015

PROGRAMA DE DOCTORADO INTERUNIVERSITARIO  
EN DIRECCIÓN DE PROYECTOS

TESIS DOCTORAL

## **FRACTOLOGÍA INDUSTRIAL**

### **DEL VIDRIO TEMPLADO**

*Caracterización y diagnóstico del estado tensional producido durante un  
tratamiento térmico de templado industrial en vidrio sodocálcico en función de los  
parámetros de fabricación y esfuerzos externos de uso,  
a partir del proceso de fractura*

Autor: D. Óscar D. Sandín Romano

Directores: Dra. Ana González Marcos  
Dr. Fernando Alba Elías

*A mi hijo Lucas,  
la mayor alegría de mi vida,  
y por quien estoy orgulloso de vivir y haber existido.*

*A mi esposa Valvanera,  
a quien debo la alegría de mis últimos años,  
y a quien espero poder recompensar el tiempo dedicado.*

*A mi madre Rosa M<sup>a</sup>,  
gracias a su tenaz cuidados y cariños,  
he aprendido a cuidar de los míos.*

*A mi padre Miguel,  
quien me inculcó el concepto del trabajo bien hecho  
y le debo gran parte del mérito de mi carrera profesional.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Starglass S.A. y su equipo humano,  
A quien debo agradecer toda la colaboración prestada desinteresadamente,  
habiendo permitido hacer realidad este sueño de muchos años*

*A los directores de Tesis,  
Por haberme convencido para documentar las investigaciones que de otro modo se hubieran  
quedado en meros ejercicios de conocimiento privado.*

*A la Universidad de La Rioja,  
por permitir el uso de sus instalaciones y equipos  
para el desarrollo de esta investigación.*

## RESUMEN

El vidrio es un material muy influyente en la vida actual y con gran proyección en el futuro. Su fabricación es bien controlada como materia prima, pero los procesos posteriores de manufactura son muy variados y cada vez más complejos, por lo que hay especificaciones más precisas y se requieren controles más eficaces.

Uno de los vidrios más utilizados es el vidrio templado, el cual sufre un tratamiento térmico para crear tensiones internas, para convertirse en vidrio de seguridad. Un conocimiento explícito de la **influencia de los parámetros de fabricación en estas tensiones** asegura un estado tensional adecuado al uso previsto. Además, un **análisis de la mecánica de la fractura del vidrio templado**, permite conocer con precisión el comportamiento frente a esfuerzos, para estudios previos a la fabricación o posteriores en casos de ingeniería forense. Esta investigación profundiza en ambos campos con el objetivo de establecer unos conceptos nuevos para determinar la calidad del vidrio templado, mediante el análisis de la fractura.

*Palabras clave: Vidrio templado, tensiones internas, parámetros fabricación, fractura vidrio, aseguramiento calidad, ingeniería forense.*

## ABSTRACT

Glass is a very influential material nowadays with a great impact in the future. Its production is well controlled as a raw material, nevertheless the subsequent manufacturing processes are very varied and increasingly complex, therefore more precise specifications have been defined and more effective controls are required.

One of the most commonly used glasses is tempered glass, which is subject of a heat treatment to create internal tensions; for that reason it is safety glass. An explicit knowledge of the **influence of the manufacturing parameters in these tensions** ensures an appropriate stress state to the intended use. In addition, an **analysis of the mechanics of the tempered glass fracture** allows knowing accurately the performance under stress in studies prior to the manufacture, or after it in cases of forensic engineering. This research delves into both fields with the aim of establishing new concepts for determining the quality of tempered glass, through the analysis of the fracture.

*Key words: tempered glass, residual stress, manufacturing parameters, fracture glass, quality, forensic engineering.*

# ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
1.1. EL VIDRIO .....	9
1.2. EL VIDRIO EN CIFRAS .....	10
1.3. EL VIDRIO TEMPLADO .....	14
1.4. MOTIVACIÓN A LA REALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	15
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
<b>3. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>19</b>
3.1. VIDRIO. MATERIAL Y PROPIEDADES .....	19
3.2. TIPOS DE VIDRIOS PLANO.....	22
3.3. VIDRIO TEMPLADO: PROCESO TÉRMICO Y TENSIONES RESIDUALES .....	23
3.4. FRACTOLOGÍA E INGENIERÍA FORENSE.....	25
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>27</b>
<b>5. VIDRIO TEMPLADO.....</b>	<b>30</b>
5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL .....	30
5.2. HISTORIA.....	31
5.3. APLICACIONES .....	31
5.4. PROCESO DE FABRICACIÓN .....	31
5.5. PRODUCTOS EN FUNCIÓN DE SU GEOMETRÍA .....	35
5.6. MECANISMOS ENERGÉTICOS DE CALENTAMIENTO. TIPOLOGÍA DE HORNOS	36
<b>6. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE TENSIONES .....</b>	<b>37</b>
6.1. CONCEPTOS FOTOELASTICIDAD.....	37
6.2. POLARIZACIÓN DE LA LUZ. CONCEPTO POLARISCOPIO .....	39
6.3. TIPOS DE POLARISCOPIO .....	44
<b>7. PARÁMETROS DE PROCESO DE FABRICACIÓN. RELACIÓN CON RESISTENCIA MECÁNICA .....</b>	<b>47</b>
7.1. INTRODUCCIÓN.....	47
7.2. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	47
7.2.1. <i>Material</i> .....	47
7.2.2. <i>Equipo utilizado</i> .....	47
7.2.3. <i>Procedimiento</i> .....	48
7.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS.....	49
7.4. EFECTOS DE LA TEMPERATURA.....	53
7.4.1. <i>Introducción</i> .....	53
7.4.2. <i>Análisis del efecto de la temperatura</i> .....	53
7.5. EFECTOS DE LA PRESIÓN.....	56
7.5.1. <i>Introducción</i> .....	56

7.5.2. <i>Análisis del efecto de la presión en el vidrio templado</i> .....	57
7.6. EFECTOS DE LA TEMPERATURA Y PRESIÓN COMBINADOS.....	59
7.7. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS, PARA IGUALDAD DE TENSIONES DE SUPERFICIE.....	61
7.8. CONCLUSIONES.....	63
<b>8. FRAGMENTACIÓN Y TENSIONES INTERNAS .....</b>	<b>64</b>
8.1. INTRODUCCIÓN.....	64
8.2. ANÁLISIS DE LA FRAGMENTACIÓN Y TENSIONES.....	64
8.3. CONCLUSIONES.....	67
<b>9. DISTRIBUCIÓN E INFLUENCIA DE LAS TENSIONES INTERNAS .....</b>	<b>68</b>
9.1. INTRODUCCIÓN.....	68
9.2. DESEQUILIBRIO TENSIONES EN LA MISMA SECCIÓN. DIFERENCIA ENTRE AMBAS SUPERFICIES .....	68
9.3. DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES EN LA PROPIA SUPERFICIE .....	71
9.4. CONCLUSIONES.....	73
<b>10. ANÁLISIS DE LA NORMATIVA VIGENTE Y SU EFICACIA .....</b>	<b>74</b>
10.1. INTRODUCCIÓN.....	74
10.2. CASO AUTOMOCIÓN .....	74
10.3. CASO CONSTRUCCIÓN .....	77
10.4. CASO FERROCARRIL.....	78
10.5. CONCLUSIONES.....	78
<b>11. CONCEPTO DE FRACTURA .....</b>	<b>80</b>
11.1.1. <i>Análisis tensional en el entorno del fondo de una grieta</i> .....	83
11.1.2. <i>Tenacidad a la fractura</i> .....	84
11.2. FRACTOGRAFIA DEL VIDRIO .....	86
11.2.1. <i>Marcas de la superficie de fractura</i> .....	86
11.2.2. <i>Propagación de la rotura</i> .....	93
11.2.3. <i>Causas frecuentes de rotura en vidrio plano</i> .....	94
11.3. FRACTOGRAFÍA PARTICULAR DEL VIDRIO TEMPLADO.....	95
<b>12. ANÁLISIS DEL ESTADO TENSIONAL EN LOS FRAGMENTOS .....</b>	<b>99</b>
12.1. INTRODUCCIÓN.....	99
12.2. METODOLOGÍA Y PROCESO ANÁLISIS .....	99
12.3. RELACIÓN TENSIÓN INTERNA FRAGMENTOS EN RELACIÓN CON PARÁMETROS.....	100
12.4. ESTUDIO VARIACIONES TENSIONES EN FRAGMENTOS ANTES Y DESPUÉS .	103
12.5. DISCUSIÓN SOBRE EL ESTADO TENSIONAL DE LOS FRAGMENTOS .....	107
12.6. RELACIÓN CON OTROS AUTORES.....	108
12.7. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS TENSIONAL .....	111
<b>13. ANÁLISIS ENERGÉTICO .....</b>	<b>112</b>

13.1.	INTRODUCCIÓN.....	112
13.2.	FORMULACIÓN BÁSICA Y DESARROLLO .....	112
13.3.	PROCEDIMIENTO DE MEDIDA .....	114
13.4.	RESULTADOS OBTENIDOS .....	115
13.5.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	116
<b>14.</b>	<b>APLICACIÓN DEL ESTUDIO DE LA FRACTURA EN LA INGENIERIA FORENSE.....</b>	<b>117</b>
14.1.	INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA FORENSE EN EL VIDRIO .....	117
14.2.	APORTE DE LA MEDICIÓN DE FRAGMENTOS AL PROCESO.....	118
14.3.	PROCEDIMIENTO DE MEDIDA DE FRAGMENTOS .....	119
14.4.	SELECCIÓN DE FRAGMENTOS .....	123
14.5.	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS FORENSE .....	124
<b>15.</b>	<b>CASOS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN.....</b>	<b>126</b>
<b>16.</b>	<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>133</b>
<b>17.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>135</b>
17.1.	PARÁMETROS DE PROCESO.....	135
17.2.	FRAGMENTACIÓN Y TENSIONES INTERNAS. NORMATIVA.....	135
17.3.	DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES.....	135
17.4.	FRACTOGRAFÍA DEL VIDRIO TEMPLADO.....	136
17.5.	ANÁLISIS Y ESTADO TENSIONAL DE LOS FRAGMENTOS .....	136
<b>18.</b>	<b>VÍAS DE INVESTIGACIÓN ABIERTAS .....</b>	<b>137</b>
<b>19.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>139</b>
<b>20.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>144</b>
20.1.	ANEXO A: TABLAS DATOS PROBETAS 4 MM.....	147
20.2.	ANEXO B: TABLAS DATOS PROBETAS 6 MM.....	152
<b>21.</b>	<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS.....</b>	<b>162</b>
<b>22.</b>	<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....</b>	<b>165</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

El vidrio es un material muy antiguo que en la actualidad es uno de los de mayor auge en uso y comercialización. Las aplicaciones y usos del mismo se encuentran en todos los sectores fundamentales de la economía, como son la construcción, industrial (automoción fundamentalmente), energía y tecnología de comunicaciones.

Actualmente cada sector dispone de normativa muy específica y ampliamente desarrollada para establecer los criterios de control que determinen la seguridad del vidrio.

Sin embargo, la tecnología actual del vidrio va más allá, diseñando utilidades hasta ahora no previstas de estos productos. Ejemplo claro son la aplicación de pisables de vidrio como elemento resistente que aporta su propiedad más característica: La transparencia, como en el caso del Skywalk, pasillo con forma de herradura que vuela sobre el Gran Cañón del Colorado, como atracción turística.



Figura 1.1. Imágenes del Skywalk sobre el Gran Cañon (USA). El suelo de vidrio para poder observar el barranco requiere de requisitos especiales de seguridad, tanto en diseño como en fabricación.

Para este tipo de diseños la resistencia mecánica es un parámetro fundamental. Habitualmente para los cálculos necesarios se utilizan parámetros estándar de tensión admisible que se encuentra en bibliografía especializada. Estos coeficientes son especialmente seguros, manteniendo índices de seguridad de hasta 3 veces tensión nominal. Sin embargo en muchos casos, especialmente en automoción y ferrocarril, el peso es un factor determinante. Por tanto es preciso reducir dichos coeficientes de seguridad a valores más razonables, que no desperdicien material.

Múltiples empresas de vidrio, especialmente las pertenecientes a zonas desarrolladas tecnológicamente, disponen de equipos de control de tensiones en producción. Dichos equipos, fundamentalmente polariscopios, son caros y complejos de utilizar, requiriendo personal cualificado para la medición. Esto repercute en que las mediciones no son frecuentes, remitiéndose a controles esporádicos y con resultados

estadísticos. Además, en la mayoría de ocasiones, el diseño no se encuentra vinculado a la fabricación, por lo que los valores de tensión son meramente ensayos necesarios durante la homologación.

Esta situación sería perfectamente válida ante una estabilidad de la producción. Sin embargo, el proceso de templado de vidrio industrial no siempre es constante en cuanto a tensiones. Multitud de parámetros afectan al proceso de templado, siendo especialmente difícil el control de todos para conseguir resultados iguales entre dos producciones diferentes debido a la suma de efectos de las diferentes variables. El ajuste entonces se completa con los ensayos de seguridad pertinentes que aseguren el cumplimiento de la normativa. Los últimos estudios hacen referencia a la importancia de controlar las tensiones en todas las producciones cuyos valores de tensión sean determinantes en el cálculo.

El mercado del vidrio es muy activo, crece considerablemente año tras año. Está presente en las principales tecnologías y trata de facilitar y mejorar las condiciones de vida de la sociedad. En todo ello la seguridad es crítica, especialmente desde el punto de confianza del consumidor. Un adecuado control de la calidad del producto y una información fundamental de tensiones para el diseño son esenciales para este objetivo. Y es de este razonamiento donde surge la motivación de la tesis, buscando nuevos métodos más simples y económicos de control tensional, relacionándolo con los parámetros de fabricación y los métodos existentes.

## 1.1. EL VIDRIO

El vidrio es uno de los materiales actuales con más proyección de futuro. Es difícil buscar un entorno en el cuál no haya presente alguna pieza de vidrio: Una ventana, una lámpara, un coche, botella, vaso o incluso algún display electrónico. Realmente es un material que convive con nosotros desde hace mucho tiempo y que en el futuro se presenta aún más influyente.

Se descubrió hacia el 3500 a.C. y su uso fue fundamentalmente para collares y abalorios. Ya hacia el siglo I a.C. se comenzó a utilizar para vasijas y recipientes por los fenicios. En la Edad Media su uso aumentó, además de elementos ornamentales y vasijas, se añadió un uso que le dio importancia: Las vidrieras y mosaicos de las grandes construcciones mediterráneas. Posteriormente se desarrolló mucho su fabricación, especialmente en el norte de Italia para usos domésticos. Ya en la era moderna, en el siglo XIX se inventó la fabricación del vidrio por extrusión, lo que permitió fabricar láminas de vidrio de forma industrial, favoreciendo así las aplicaciones de este producto, esencialmente las ventanas. Este producto, que aún hoy es muy posible verlo en antiguas construcciones, tiene peculiaridades como un espesor irregular y suele contener burbujas de aire visibles. Sin embargo esta técnica se abandonó prácticamente por

completo una vez que una empresa inglesa comercializó por primera vez el vidrio flotado, un método de fabricación que consiste en verter el vidrio fundido sobre un baño de estaño, permitiendo así obtener una lámina de espesor constante y sin defectos. Esta tecnología es realmente la que ha permitido disponer de vidrio plano de calidad, favoreciendo todas las aplicaciones posteriores que han ido surgiendo en los últimos años.

Hoy en día, el vidrio representa uno de los grandes mercados del mundo. Su presencia en prácticamente todos los sectores influyentes augura un crecimiento en su comercio de forma notable. Sus propiedades excepcionales para soportar condiciones ambientales, su dureza, resistencias químicas y características transparentes y un tacto limpio y agradable son cualidades muy apreciadas para el modo de vida futuro. La construcción, automoción, tecnología digital de comunicación (displays y pantallas táctiles), conexiones digitales, contenedores altamente higiénicos, sector doméstico, aplicaciones en electrodomésticos y mobiliario así como en las principales expresiones de arte (arquitectura, escultura, etc.) hacen del vidrio un material único.

## 1.2. EL VIDRIO EN CIFRAS

Se espera que el sector del vidrio alcance un nivel de transacciones de 102 billones de euros en el 2018.

Aproximadamente el 60% se destina a vidrio contenedor (botellas y recipientes) y un 40% a fabricar vidrio plano.

El vidrio plano en el mundo, en el año 2013, supuso 52 millones de toneladas. De los 52 millones, unos 18 son de baja calidad, destinados prácticamente al mercado chino (tanto en fabricación como en consumo). Hay unos 3 millones destinados a vidrio de fusión y unos 2 a vidrio impreso. El resto, alrededor de 29 millones de toneladas, es destinado a vidrio plano de alta calidad.

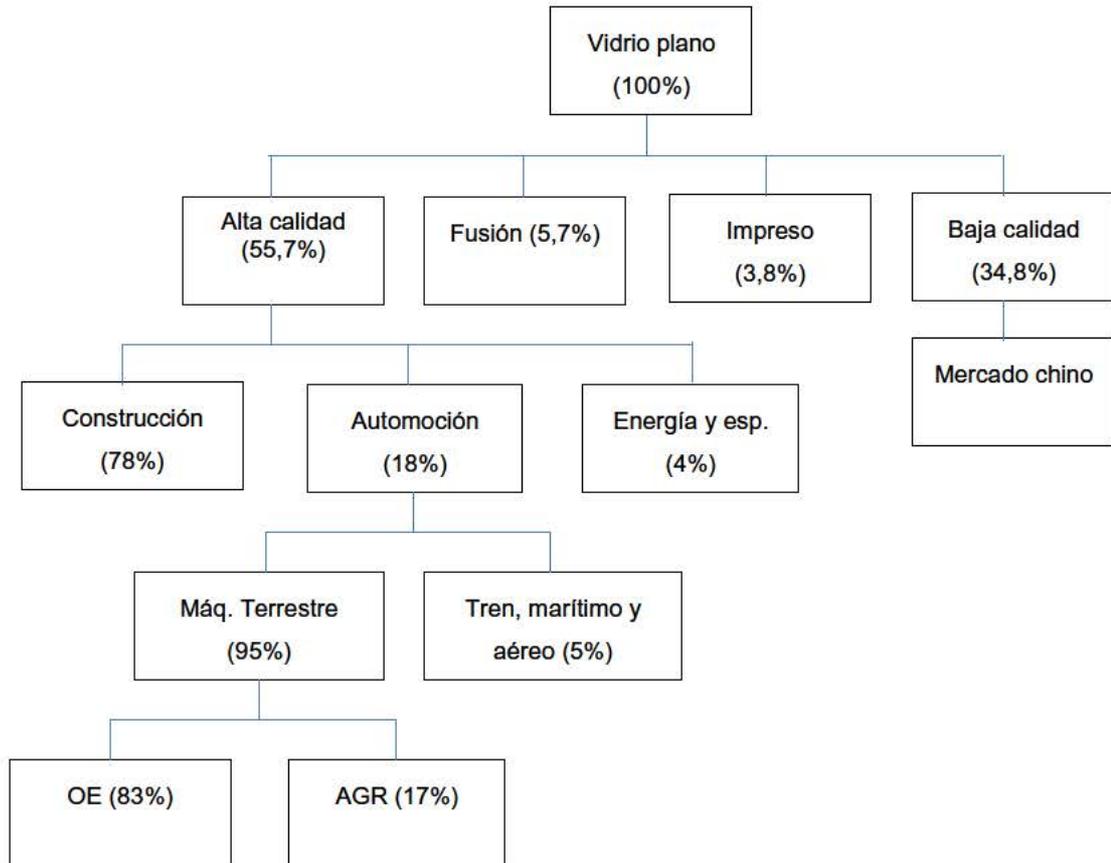


Figura 1.2. Organigrama de usos del vidrio plano. Porcentajes respecto al nivel superior.

De éstos 29 millones de toneladas, el 78% se dedica a la construcción (aproximadamente la mitad a nuevos edificios y la otra mitad a rehabilitaciones) y el 18% al sector de automoción. El restante 4% es dedicado a aplicaciones energéticas y otras especiales. En el caso de la automoción (unos 5,5 millones de toneladas) el 95% es dedicado a máquinas terrestres como coches, autobuses, camiones, maquinaria industrial y agrícola, etc. mientras que el restante 5% se dedica a otros medios de transporte, como el tren, los medios marítimos y aéreos. Del correspondiente a máquinas terrestres, aproximadamente el 83% es destinado a nuevos modelos (OE: Original equipment) y el resto (17%) al vidrio de recambio (AGR: Automotive glass Replacement).

Los principales mercados en el mundo del vidrio plano son: China (un 50%), Europa (un 16%), América del Norte (un 8%), Sudeste Asiático (7%), Japón, (un 5%), Rusia y América del Sur (4% cada uno). El denominado vidrio de calidad es consumido en su gran mayoría en Europa, Japón y América del Norte.

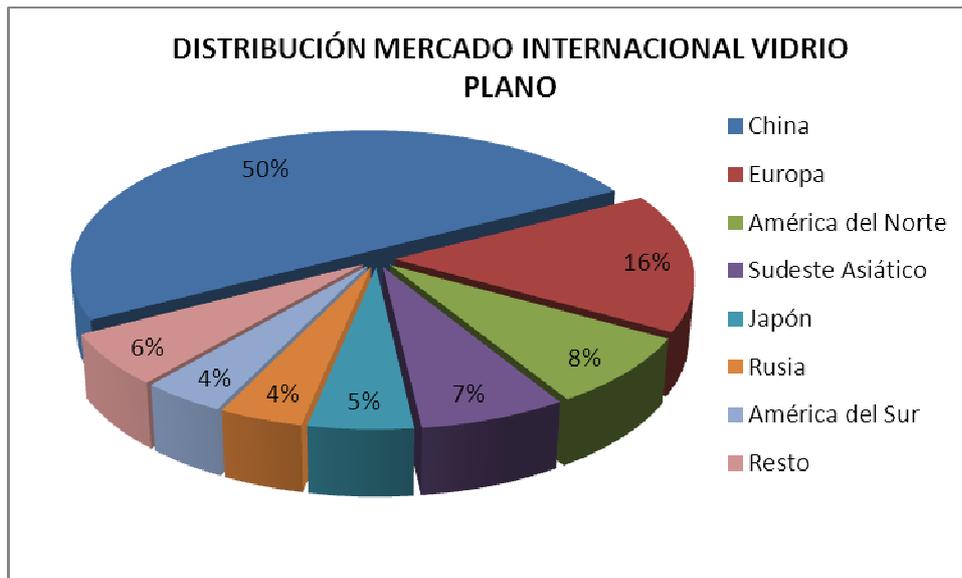


Figura 1.3. Distribución del mercado internacional de vidrio plano.

En Europa se emplean en el sector unas 180.000 personas. En España la cifra es de 6700 empleos directos. La mayoría del empleo europeo se centra en menos de 6 empresas con más de 1000 empleados. El resto se distribuye en pequeñas empresas especializadas.

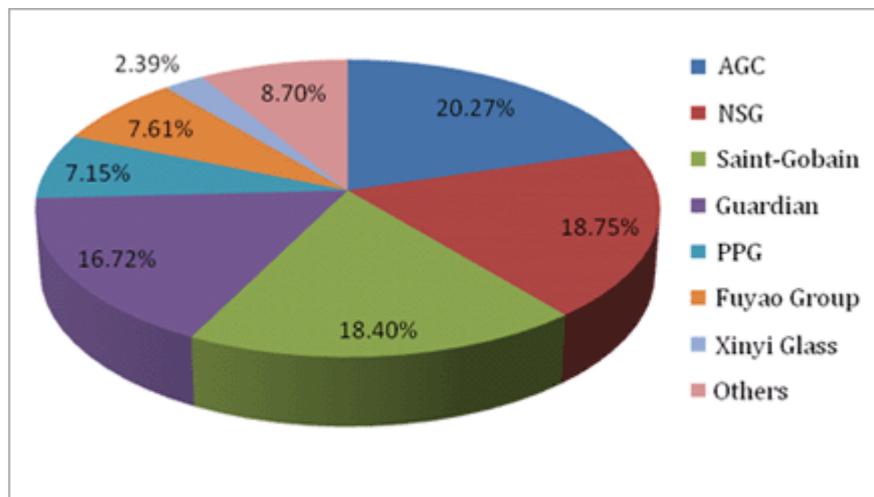


Figura 1.4. Distribución del mercado de vidrio plano según los fabricantes mundiales.

La producción Europea es de unos 35 billones de €, siendo los principales fabricantes (por orden de volumen y negocio) Alemania, Francia, Italia, Bélgica, España y Reino Unido.

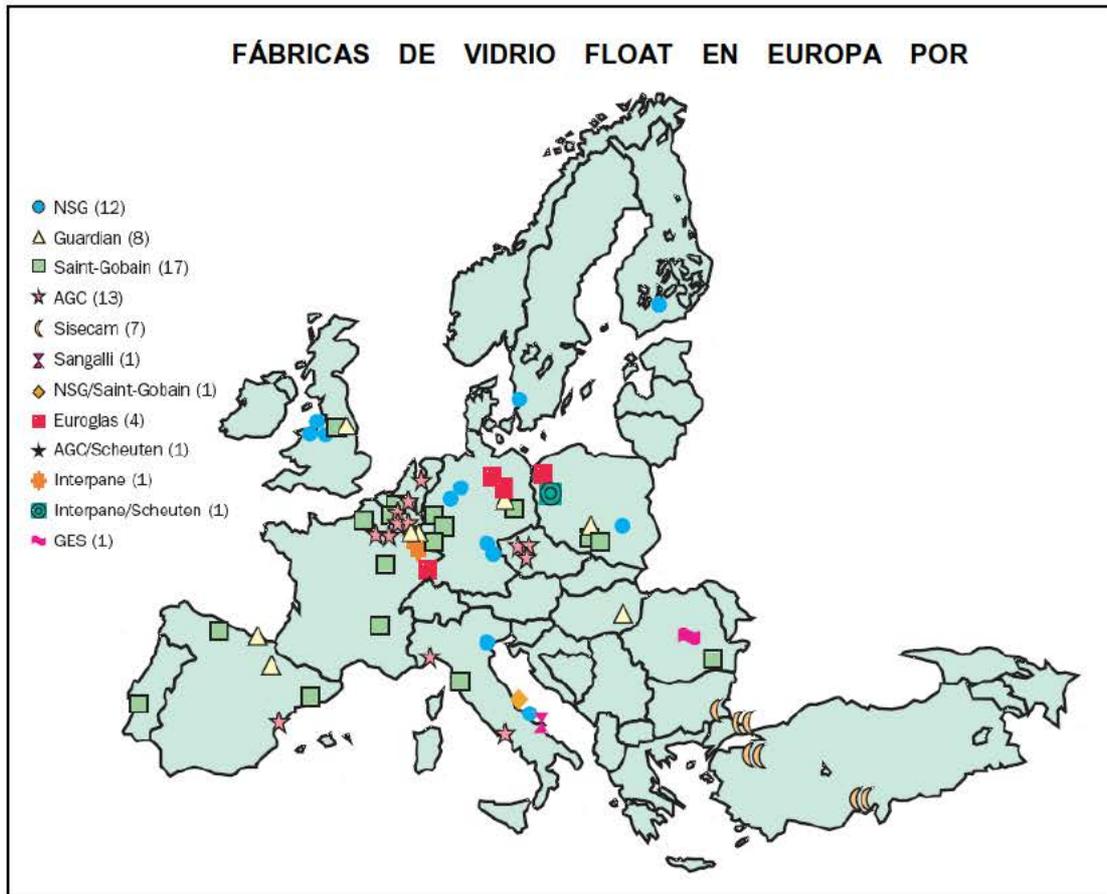


Figura 1.5. Fábricas de vidrio float en Europa según fabricantes.

Existen 4 principales empresas en el sector a nivel mundial AGC (Japón), NSG (Japón), Saint Gobain (Francia) y Guardian (USA). Entre las 4 comercializan más del 70% del vidrio plano mundial, subiendo el porcentaje a cifras muy altas si se considera el de alta calidad. La distribución en Europa de las plantas de fabricación de vidrio flotado muestra la potencia de estas cuatro compañías.

### 1.3. EL VIDRIO TEMPLADO

Prácticamente la totalidad del vidrio plano de alta calidad se convierte en vidrio de seguridad tras el proceso de manufactura de las hojas procedentes del proceso de flotado. Por vidrio de seguridad se entiende aquel que cumple una serie de normas y características que permiten aplicarlo en los usos previstos, esencialmente de cara a los usuarios, como pueden ser los vidrios de un automóvil, las ventanas de un edificio, los paneles fotovoltaicos.

En cada caso la prioridad de uso exige diferentes características, así por ejemplo en la automoción es primordial la seguridad, en la construcción, además de la seguridad, influye de forma muy importante la estabilidad en el tiempo y para los paneles fotovoltaicos influye primordialmente la resistencia mecánica y resistencias químicas.

Todos estos casos de ejemplo de vidrio de seguridad, se fabrican fundamentalmente en dos productos: Vidrio laminado y vidrio templado. El laminado consiste en unir dos láminas de vidrio mediante un plástico intercalario, de forma que se obtiene un sándwich que permite, en caso de rotura, mantener los trozos de vidrio unidos al plástico. El vidrio templado consiste en un proceso térmico durante el proceso que confiere dos propiedades fundamentales: Mayor resistencia mecánica y mayor seguridad, pues en caso de rotura, el vidrio se fragmenta en trozos muy pequeños (del orden de 0,5 cm<sup>2</sup>) evitando así cortes de gravedad a los usuarios.

A tenor de los datos aportados en el apartado anterior, se estima (es difícil obtener resultados precisos) que el 40% del vidrio plano de alta calidad fabricado en el mundo es templado, esto supone aproximadamente 11,5 millones de toneladas del vidrio al año. En volumen de negocio el porcentaje supera el 50%, ya que el vidrio de automoción fundamentalmente es más caro comparativamente al de construcción, lo que supone un volumen de negocio de aproximadamente 17,5 billones de euros anual, a nivel de Europa exclusivamente.

**El vidrio templado es el material objeto de este estudio.** Se inventó a mediados del siglo XVII, pero los descubrimientos no pasan de ser algo meramente interesante, sin aplicaciones específicas. Sin embargo a finales del siglo XIX se comenzó su investigación industrial en perspectiva de las posibilidades del material, y no fue hasta ya bien entrado el siglo XX cuando se produjeron las primeras patentes y su desarrollo comercial.

Consiste en calentar un vidrio plano a temperaturas superiores a la temperatura de transición vítrea, de forma que se encuentre en estado plástico. En estas condiciones se puede conformar en la geometría espacial determinada o mantener plano. Una vez conformado, se procede a un enfriamiento rápido de las superficies frente al núcleo de vidrio, lo que le confiere las propiedades de templado, al mantener la capa exterior del vidrio sometida a esfuerzos de compresión y el centro o núcleo a esfuerzos de tracción.

Estas propiedades en el grano del material confieren las propiedades de resistencia y fragmentación descritas anteriormente.

Sin embargo, este proceso descrito no es sencillo, y la cantidad de variables y parámetros que afectan al proceso hace que requiera instalaciones complejas de producción. De hecho, la diferente normativa existente contempla ensayos de control en el producto final, más que una especificación de los parámetros de producción.

Si bien es cierto que existen gran cantidad de estudios sobre las propiedades del material, son muchos menos los que atienden a la relación con los parámetros de producción. Y muy pocos los que estudian las propiedades a partir de la rotura.

Estos dos aspectos representan gran relevancia en las aplicaciones actuales del vidrio templado, donde ya los diseñadores no se limitan a asegurar una estabilidad del producto desde el punto de vista de seguridad, sino que se aprovechan todas sus propiedades resistentes para optimizar el producto. Una correcta parametrización de la fabricación permite asegurar con antelación las propiedades exactas del producto, información indispensable para la especificación y uso finales. Así mismo, un análisis exhaustivo de los fragmentos en caso de rotura y su relación con las condiciones iniciales del producto permiten en un proceso de ingeniería forense, determinar las propiedades con las que fue fabricado y depurar responsabilidades para una corrección y mejora del sistema. **Estos son los objetivos fundamentales del presente estudio**, que permitirá ir más allá de lo establecido en la normativa vigente y que representa un avance en la especificación y diseño del vidrio templado, además de aportar herramientas para su análisis.

#### 1.4. MOTIVACIÓN A LA REALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Este equipo investigador trabaja en el sector privado, en empresas de manufactura de vidrio, especialmente para la automoción. Habitualmente se observan métodos productivos controlados mediante procedimientos establecidos hace tiempo, ya que la adaptación a nuevos procesos/criterios no es tan flexible como cabría esperar. El conocimiento permanece en las personas y es difícil cambiar criterios o conocimientos fundamentales establecidos a lo largo de los años.

La evolución en la investigación académica, más avanzada que la industria, hace que exista una diferencia de conocimiento importante entre la Universidad Investigadora y la Industria Aplicada, siendo la primera mucho más innovadora, mientras que la segunda es mucho más práctica.

Partiendo de esta base, se hace obvio que la unión de ambos conocimientos permitiría un gran avance en la adaptación de procesos y productos, consiguiendo

resultados más controlados y específicos (gracias al mejor conocimiento y por tanto ajuste) y a su vez serían más prácticos y utilizables (al estar enfocados al mercado real).

Así, pues la motivación de esta investigación surge al comprobar las carencias de conocimiento y control del proceso existente y las posibilidades de mercado que tiene el conocimiento extraordinario del proceso.

Respecto al análisis fractológico, en el sector del vidrio la fragmentación del vidrio es práctica habitual. Además existen múltiples problemas conocidos de roturas espontáneas u ocurridas como consecuencia de solicitaciones inferiores a las previstas. Todos estos casos aportan poca información al origen del problema, y habitualmente hay que buscar explicaciones en el resto de la serie si se puede o en fundamentos teóricos. En esta situación, un conocimiento básico en fractografía y, si fuera posible, en medición forense de fragmentos, aportaría una base científica de investigación que permitiría resolver multitud de problemas directamente, con un grado de resolución de problemas y conflictos muy elevado.

Así que este interés en encontrar vías de explicación a roturas no explicables, además de establecer los criterios productivos con base científica, para conseguir los resultados especificados, y poder aplicarlos en la industria, es la motivación fundamental de esta investigación.

## 2. OBJETIVOS

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, el vidrio es un material muy común y de gran interés, que dispone de múltiples estudios investigadores que tratan de determinar sus características físicas, resistencia mecánica y propiedades particulares del material, como son las capas y sus usos.

Sin embargo, el control de la producción y la relación de los parámetros más característicos en el proceso productivo, y cómo influyen en el comportamiento, son aspectos muy poco difundidos. La gran variedad de estudios parten de grupos de probetas fabricadas en función de un objetivo dimensional o tensional. Sin embargo, aun manteniendo un mismo estado tensional, el comportamiento puede ser diferente en función de los parámetros utilizados en el proceso. Así, por tanto, se establece como primer objetivo definir los parámetros más influyentes en el proceso y estudiar pormenorizadamente la influencia en el proceso de templado del vidrio.

En segundo lugar, una vez conocidos los parámetros y el estado tensional resultante en un vidrio templado, se pretende conocer el estado tensional de los fragmentos una vez dicho vidrio ha sido fragmentado. Cuando un vidrio templado se rompe, éste se hace añicos al liberar la tensión interna. Sin embargo experimentalmente se ha comprobado que dichos fragmentos contienen aún algo de energía. La cuestión es si dicha energía tiene relación con el estado tensional inicial y qué información puede aportar desde el punto de vista forense. Este aspecto no ha sido encontrado en ningún artículo de los investigados, por lo que nos mueve a pensar que es algo novedoso. Su aporte a la ingeniería en el sector puede ser de gran interés, ya que no solo tiene aplicación forense, sino que puede tener aplicaciones de control de producto, ya que una característica común en todas las normativas y ensayos es fragmentar el vidrio como control de su estado tensional. Dicho ensayo podría aportar mucha más información con un estudio de los fragmentos.

La búsqueda de estos dos objetivos permite definir otros objetivos menores que conllevan asociados. A continuación se enumeran brevemente el conjunto de objetivos planteados:

1. Establecer la **relación directa entre los parámetros de producción del vidrio templado y la resistencia mecánica** posterior de la pieza.

- i. Influencia del parámetro temperatura.
- ii. Influencia del parámetro presión de aire.
- iii. Combinación de ambos.

2. Estudio si la **medición de fragmentos de vidrio templado**, posterior a la fragmentación, aporta conocimiento del estado tensional original y las causas de la rotura.

- i. Conocimiento del estado tensional resultante y establecimiento de leyes para la determinación del estado tensional original.
- ii. Metodología de análisis.
- iii. Conocimiento mecánica de la fractura.
- iv. Conocimiento de la fractografía particular.

### 3. ESTADO DEL ARTE

#### 3.1. VIDRIO. MATERIAL Y PROPIEDADES

El vidrio es uno de los materiales más antiguos que existen. A diferencia de otros muchos, hoy en día sigue en uso e incluso en crecimiento. Sus aplicaciones y posibilidades son extensas y su futuro prometedor.

Pero exactamente, ¿Qué es el vidrio? es un material amorfo producido por la fusión de sílice y otros aditivos a muy altas temperaturas. Al enfriar se convierte en un material duro y brillante sin estructura de grano (característica que determina alguna de sus propiedades).

Frecuentemente se denomina cristal, término mal utilizado ya que el vidrio no forma cristal alguno, siendo su estructura amorfa. El término vidrio tampoco es el más adecuado, ya que define un estado de la materia como sólido no cristalino, sin embargo el material "vidrio" no es sólido ni líquido, sino que permanece en un estado vitro constante. Es una sustancia dura y brillante con la principal característica de transparencia. Está compuesto principalmente de sílice, cal y carbonato de sodio. Los materiales secundarios son usados para dar propiedades especiales o para facilitar el proceso de fabricación.

Desde el punto de vista de su composición, se puede plantear la siguiente clasificación de vidrios:

- **Vidrio sodo-cálcico:** Es el vidrio más común y comercial. Es el más frecuente en envases y todo tipo de vidrio hueco. También es el más común en la fabricación de vidrio plano, para las aplicaciones de automoción y construcción. Para su fabricación se funden la sílice a 1700°C ( $\text{SiO}_2$  71 a 75%), entonces se añade la soda (óxido de sodio de la materia prima carbonato de sodio, 12-16%) para que resulte más manejable. Posteriormente se le añade cal (óxido de calcio de la materia prima carbonato de calcio, 10-15%) para aumentar dureza y durabilidad química. Otros elementos secundarios pueden ser añadidos para características particulares, como el aluminio para aumentar durabilidad y viscosidad a bajas temperaturas u óxido de plomo para bajar punto de fusión y disminuir dureza. Además modifica su índice de refracción y aumenta el brillo. Otro aditivo frecuente es el boro, que aumenta la resistencia a la corrosión química y a los cambios de temperatura. Sus principales limitaciones son la elevada dilatación térmica y la baja resistencia a químicos corrosivos.
- **Vidrio Plomado:** se añade óxido de plomo en lugar de óxido de calcio y óxido de potasio en lugar de óxido de sodio. El plomo baja la temperatura de fusión y la dureza, además de elevar el índice de refracción. Las proporciones cambian

respecto al sodocálcico, siendo ahora las siguientes: Sílice (54-65%), óxido de plomo (PbO 18-38%) y soda (13-15%) y otros elementos secundarios. Sus propiedades fundamentales son buen aislante eléctrico y resistencia a altas temperaturas. Su uso es fundamentalmente en vidrio artístico, ópticas y para aplicaciones eléctricas.

- **Vidrio borosilicato:** se trata de un vidrio sodocálcico que contiene al menos del 5% de óxido bórico. Este compuesto confiere mayor resistencia a los cambios térmicos y a la corrosión química. La composición resulta de un 70-80% de sílice (SiO<sub>2</sub>), un 7-13% de ácido bórico (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), un 4-8% de óxido de sodio (Na<sub>2</sub>O) y óxido de potasio (K<sub>2</sub>O), y un 2 a 7% de óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Debido a sus propiedades es adecuado para su uso en la industria química, laboratorios, farmacia y usos de cocina.
- **Vidrios especiales:** Las posibilidades son muy amplias, en función del uso al que vaya destinado. Se pueden añadir diversos compuestos y elementos diferentes. Un ejemplo son los vidrios alúmino-silicato (con óxido de aluminio en su composición) potencian las propiedades del borosilicato de resistencia a choque térmico y químico, sin embargo su fabricación es más compleja.

Las propiedades del vidrio sodocálcico (el más frecuente) son particulares y muy apreciadas, haciendo de él un material de mucho interés en los usos actuales. A continuación se describen aquellas propiedades de más interés:

- **Elasticidad:** El vidrio tiene una capacidad de deformación elástica considerable. Ante un esfuerzo continuado el vidrio se deforma y cuando cesa dicha carga, recupera su geometría inicial. Prácticamente no tiene deformación plástica, por lo que toda su deformación antes de la rotura es elástica. Casi se podría describir como "perfectamente elástico". Sin embargo es frágil, una vez llegado al límite elástico no hay aviso de la rotura. Su valor de referencia es  $E=70$  GPa.
- **Límites de resistencia:** El vidrio común tiene una elevada resistencia a la compresión, (superior a los 1.000 MPa). A tracción se comporta de forma mucho más débil, debido a su fragilidad. Su límite elástico se sitúa entonces en 40 MPa. Por esta razón su uso a flexión está limitado a este valor. Si la carga es permanente, la resistencia se reduce un 40%. Varía también en función de la temperatura (más alta, menos resistencia) y el canteado de los bordes.
- **Densidad:** Se establece un valor de 2,5 Kg/m<sup>3</sup>. Para un cálculo rápido se suele tomar 2,5 Kg/m<sup>2</sup> multiplicado por el espesor del vidrio.

- Coeficiente de Poisson: 0,22
- Punto de ablandamiento: 650°C, aunque varía considerablemente en función de los compuestos que lo integren.
- Conductividad térmica: 1,05 W/mK
- Coeficiente de dilatación lineal:  $9 \times 10^{-6}$  /°C, para un rango de temperaturas de 20 a 220°C.
- Dureza: En las escala Mohs tiene un valor comprendido entre 6 y 7. Para la escala Knoop (Kg/mm<sup>2</sup>) es de 575.
- Resistencia condiciones atmosféricas: Elevada, no presenta cambios
- Resistencia química: Soporta bien los ácidos, salvo el fluorhídrico y a alta temperatura el fosfórico. Sin embargo los álcalis atacan la superficie, causando abrasión.
- Límites admisibles: Para vidrio recocido en carga permanente: 6 MPa, carga de corta duración: 17 MPa. Para vidrio templado 40 MPa. Un vidrio con superficie arenada se reduce un 30% la tracción. Un vidrio laminado presenta un 10% menos resistencia que un monolítico del mismo espesor.
- Resistencia a la temperatura: Por término medio, el vidrio recocido soporta una diferencia térmica de 40°C. Un vidrio templado uno 150°C.
- Índice de refracción: 1,52
- Transmisión térmica: 5,8 W/m<sup>2</sup>°C
- Transmisión de luz visible: Vidrio de 6 mm entre un 75 y 85% para vidrio claro. Los parámetros de color modifican sustancialmente este factor.
- Transmisión del infrarrojo: El vidrio común el relativamente transparente a los rayos infrarrojos de onda corta, pero más o menos opaco a lo de londa larga. Esto favorece el efecto invernadero.
- Transmisión ultravioleta: Fundamentalmente el vidrio monolítico es transparente al ultravioleta. El laminado (por efecto del plástico intercalario) es opaco, por lo que su uso se aconseja para aquellas aplicaciones que sea de interés.

### 3.2. TIPOS DE VIDRIOS PLANO

El vidrio plano se clasifica en diferentes productos, en función de su composición y método de fabricación. Entre los principales se destacan:

- **Vidrio recocido:** Corresponde al vidrio flotado que no ha sido tratado térmicamente ni laminado. El recocido consiste en un tratamiento que el mismo fabricante del float realiza al final de su proceso, donde se calienta y enfría de forma controlada para evitar las tensiones internas en el material. Este producto se puede cortar, cantear, taladrar y pulir de forma sencilla. No es un vidrio de seguridad, por lo que sus aplicaciones pasan por ser muy limitadas.
- **Vidrio termoendurecido:** Este producto ha sufrido un tratamiento térmico leve, calentando el vidrio inicialmente para sufrir un enfriamiento rápido que le confiere una ligera tensión interna. Para el caso de construcción en España, debe cumplir con la norma EN 1863, partes 1 y 2. Presenta una mayor resistencia a las cargas térmicas que el vidrio recocido y cuando se rompe, una vez instalado, los fragmentos son más grandes que en un vidrio templado. Este producto no se puede mecanizar después del tratamiento.
- **Vidrio templado:** Para construcción debe cumplir la norma EN12150 Partes 1 y 2. Consiste en un tratamiento térmico donde después de un calentamiento por encima de la temperatura de transición vítrea, se enfría muy rápidamente provocando una tensión interna considerable. Esto favorece la rotura en partes pequeñas (no cortantes) y a su vez una mayor resistencia mecánica y al choque térmico. Es un vidrio de seguridad porque cumple con la especificación europea que define éste término. No se puede mecanizar tras su tratamiento térmico.
- **Vidrio laminado:** Es otro vidrio de seguridad. En este caso se unen dos vidrios monolíticos con un plástico intercalario (generalmente polivinibutiral o PVB) mediante calor y presión. En caso de rotura, los fragmentos de vidrio permanecen adheridos al plástico, evitando su riesgo por proyección a los usuarios. Existen multitud de posibilidades de color y configuraciones con vidrios recocidos, termoendurecidos o templados.
- **Vidrio doble acristalado:** Consiste en dos hojas o más de vidrio sellados por el perímetro con un espaciador de forma que crean una cámara entre ellos. Es muy eficaz en la reducción de la transmisión térmica aire-aire a través del mismo. Las posibilidades de usar productos con capa u otros tratamientos favorece las prestaciones del producto.
- **Vidrios serigrafiados:** Realmente consiste en una aplicación de una capa de serigrafía a cualquiera de los productos anteriores. La opacidad de estos

vidrios permite múltiples aplicaciones, desde la rotulación o impresión de imágenes, hasta la ocultación de tuberías y fachada en construcción o la protección de adhesivos y decoración en la automoción.

### 3.3. VIDRIO TEMPLADO: PROCESO TÉRMICO y TENSIONES RESIDUALES

Debido a su particularidad, y su importancia para este documento, el vidrio templado será tratado con detenimiento en el capítulo 3. Sin embargo se ha incluido algún comentario sobre las tensiones residuales que se generan, que ayudará a la comprensión de los fundamentos técnicos explicados en el resto del documento.

El temple en el vidrio (proceso térmico) es el último proceso de fabricación, ya que posteriormente no es posible trabajar sobre él debido a que las tensiones internas se liberarían en caso de mecanizado.

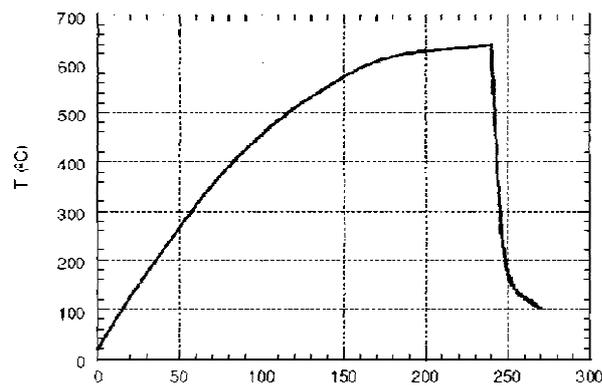


Figura 3.3.1: Gráfica de temperatura del vidrio durante el ciclo de templado.

El proceso consiste, básicamente, en calentar despacio a temperaturas próximas a los 700°C en un horno (los más habituales son hornos con tracción de rodillos cerámicos) y enfriar bruscamente, generalmente mediante una corriente de aire a presión.

Debido a la mala conductividad térmica del vidrio, durante el enfriamiento se generan diferentes velocidades de enfriamiento entre las superficies del vidrio y el núcleo, que origina unas tensiones residuales que van variando durante todo el proceso hasta que finalmente resultan de compresión en el exterior y de tracción en un interior.

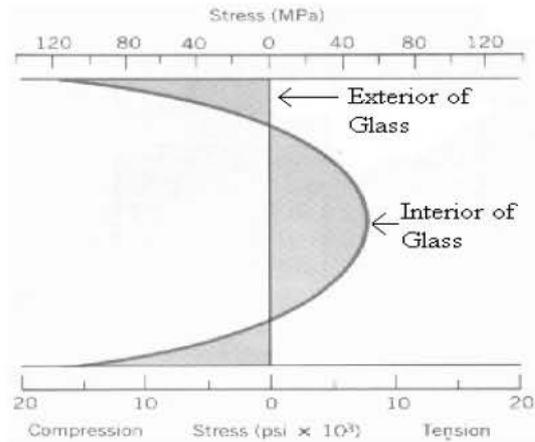


Figura 3.3.2: Tensiones residuales en el interior del vidrio..

En este proceso es crítico, como se puede suponer, la temperatura de calentamiento y la velocidad de enfriamiento. Sin embargo no son los únicos parámetros que afectan. En la situación real existen otras muchas variables de gran influencia, muchas de ellas de difícil medición durante el proceso, que modifican sustancialmente las propiedades del producto final. Así, por ejemplo, el tipo de calentamiento es muy importante. Conseguir un calentamiento homogéneo en toda la masa de vidrio facilita el templado posterior. Existen hornos de radiación, convección y mixtos, que en función del tipo de vidrio (más o menos reflexivo) precisa de una u otras circunstancias. Igualmente la propia geometría y construcción del horno tienen elevada influencia (distancia entre rodillos, materiales, aislamiento, corrientes de aire, etc.). La velocidad de calentamiento influye en igual medida que los parámetros anteriores, pudiendo facilitar el calentamiento homogéneo o lo contrario. El propio material influye, reflectividad, rugosidad, espesor, transmisión luminosa y/o energética, serigrafía, taladros o entrantes, tipo de cantado, etc. determinan diferencias de temperatura que no favorecen el calentamiento idóneo. El tipo de curvado, si fuera necesario, es crítico para las condiciones de templado. La existencia de molde, equipos de prensa, anillos caliente o fríos, mantas de protección, aislamientos, calentamiento de utillajes, movimientos en el horno etc. vuelven a modificar las condiciones térmicas del vidrio en el momento de templado. A su vez, las propias condiciones de presión, temperatura, rapidez de los equipos (cierre de válvulas para vaciado de aire), geometría de las soplantes, cercanía al vidrio de las mismas, equilibrio entre las distancias, etc. influyen críticamente en la refrigeración de las superficies, y por tanto sobre las tensiones residuales. Existen muchos otros parámetros, que en si requieren de un estudio muy extenso. Pero toda esta descripción nos da idea de la complejidad de definir y controlar todas las variables que pueden influir durante el proceso de templado.

### 3.4. FRACTOLOGÍA E INGENIERÍA FORENSE

La fractología es la parte de la ciencia que estudia la fractura de un componente para averiguar las causas y propiedades de la rotura.

La fractura en el vidrio es de características particulares. Permite analizar con relativa facilidad la causa de la rotura, dirección de la acción, propagación de la misma a lo largo del vidrio, su velocidad, intensidad de la causa de rotura (si es un impacto o flexión) y otros aspectos relevantes.

Así, por explicar algunos de estos aspectos, es posible determinar el origen de la rotura analizando los fragmentos (si éstos son accesibles) y configurando la posición original de cada uno (en el vidrio laminado se consigue por el propio principio de funcionamiento del producto). El patrón de rotura indica con claridad cuál es el centro de la rotura. Si se observa la figura 2.6.1, se observan dos tipos de grietas: Las radiales, cuyo origen es común y divergen hacia los extremos del vidrio, y las radiales, que forman círculos concéntricos entorno al origen. De esta forma es sencilla determinar el centro del impacto o inicio de rotura.

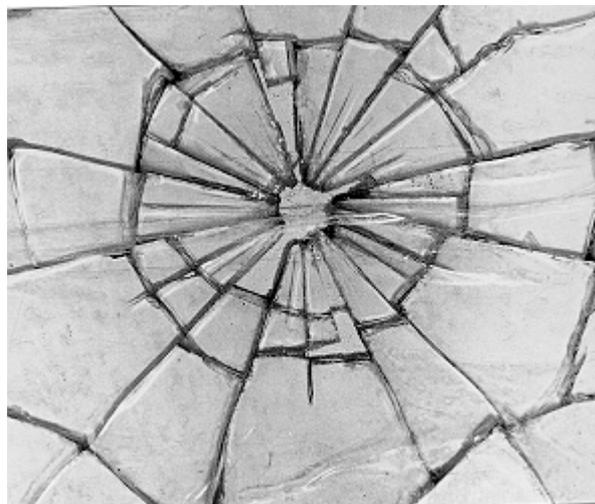


Figura 3.4.1: Fractura vidrio recocido por impacto

En el caso de vidrios templados la rotura es más difícil de analizar, aunque ojos expertos pueden determinarla con facilidad si el vidrio permanece en su posición o está laminado.

El patrón de rotura también puede ser indicador de otras causas, como el choque térmico, donde la rotura se inicia perpendicular al borde (90°) para bifurcarse más adentro (ver figura 2.6.2).



Figura 3.4.2: Rotura vidrio por choque térmico

Los propios fragmentos contienen información muy relevante para el análisis. Las denominadas líneas de wallner indican la dirección de la propagación y su forma indica si el vidrio tenía en el momento de la rotura tensiones o esfuerzos externos. Con esta información (se detallará con más precisión en apartados posteriores) se puede determinar por ejemplo la cara donde se realizó el impacto, algo importante para el estudio forense de un disparo, determinando si la bala entró o salió del recinto acristalado.

Análisis más exhaustivos con microscopio revelan otra información, como microfisuras, problemas de fabricación del vidrio float o incluso la determinación de la energía que inició la rotura, delimitando así las causas posibles.

En caso del vidrio templado adquiere importancia sustancial, debido a que la fractura se incluye como ensayo en gran parte de las normas de construcción y automoción. Consiste fundamentalmente en asegurar que el vidrio cumple con los requisitos de vidrio de seguridad. Para ello se realiza una rotura de un vidrio de cada serie (mismas condiciones de proceso y mismo producto). En función de la densidad de fragmentos se determina la idoneidad del proceso térmico o no.

Sin embargo, como se verá a lo largo del estudio, este ensayo por si solo no explica todas las propiedades del vidrio en función de su proceso, lo que puede llevar a desviaciones importantes con el diseño para el cual fue creado.

Por esta razón, una investigación más profunda sobre la fractura permite conseguir datos de especial relevancia en aplicaciones de importancia y precisión.

## 4. METODOLOGÍA

El proceso fundamental de investigación es el coherente con cualquier investigación. Se divide en tres partes claramente diferenciadas:

- Definición, alcance y estudio previo
- Producción, ensayos y medición
- Análisis y conclusiones

Este proceso metodológico coherente con cualquier proceso investigador, se ha aplicado de forma particular de la siguiente forma (ver figura 4.1). Se ha tratado de ser coherente con el proceso productivo del producto.

Así, en primer lugar, se realiza un planteamiento general del proyecto, limitando fundamentalmente el campo de aplicación y los objetivos principales.

Un segundo paso es investigar la bibliografía y estudios técnicos existentes para comprobar el grado de desarrollo de estos aspectos en la comunidad científica. Se consideran tanto los parámetros como la fractografía e ingeniería forense.

Tercer paso es, una vez comprobadas las vías de investigación, establecer los criterios y procesos de fabricación, ensayos y mediciones a realizar que permitan obtener las conclusiones oportunas encaminadas a resolver los objetivos planteados. Generación de procedimientos de trabajo.

Cuarto paso es la producción de las probetas propiamente dichas, realización de ensayos y todas las mediciones previstas.

Posteriormente se realiza el análisis de los parámetros de proceso, correspondientes al objetivo número uno. Consiste fundamentalmente en realizar las agrupaciones correspondientes y determinar la influencia en los parámetros, fundamentalmente mediante aplicaciones en Excel de tablas dinámicas, con el fin de encontrar las influencias correspondientes de los parámetros en los resultados medidos.

Como sexto paso, se realiza la medición de los fragmentos, como hito fundamental para el desarrollo del segundo objetivo, estableciendo diferentes medidas por fragmento, tanto físicos como tensionales, acompañadas de un reportaje gráfico individualizado, tanto de tensiones como fractográfico. Se realiza también el análisis de los resultados, etapa fundamental de toda la investigación, tratando de establecer las leyes oportunas que relacionan el estado tensional antes y después de la fractura.

La séptima etapa trata de comprobar numéricamente las explicaciones encontradas, realizando un estudio energético del sistema, demostrando así la coherencia de los resultados. Se obtienen las conclusiones.

Por último, se trata de generar la documentación técnica específica y el documento investigador propiamente dicho para la divulgación del conocimiento adquirido.

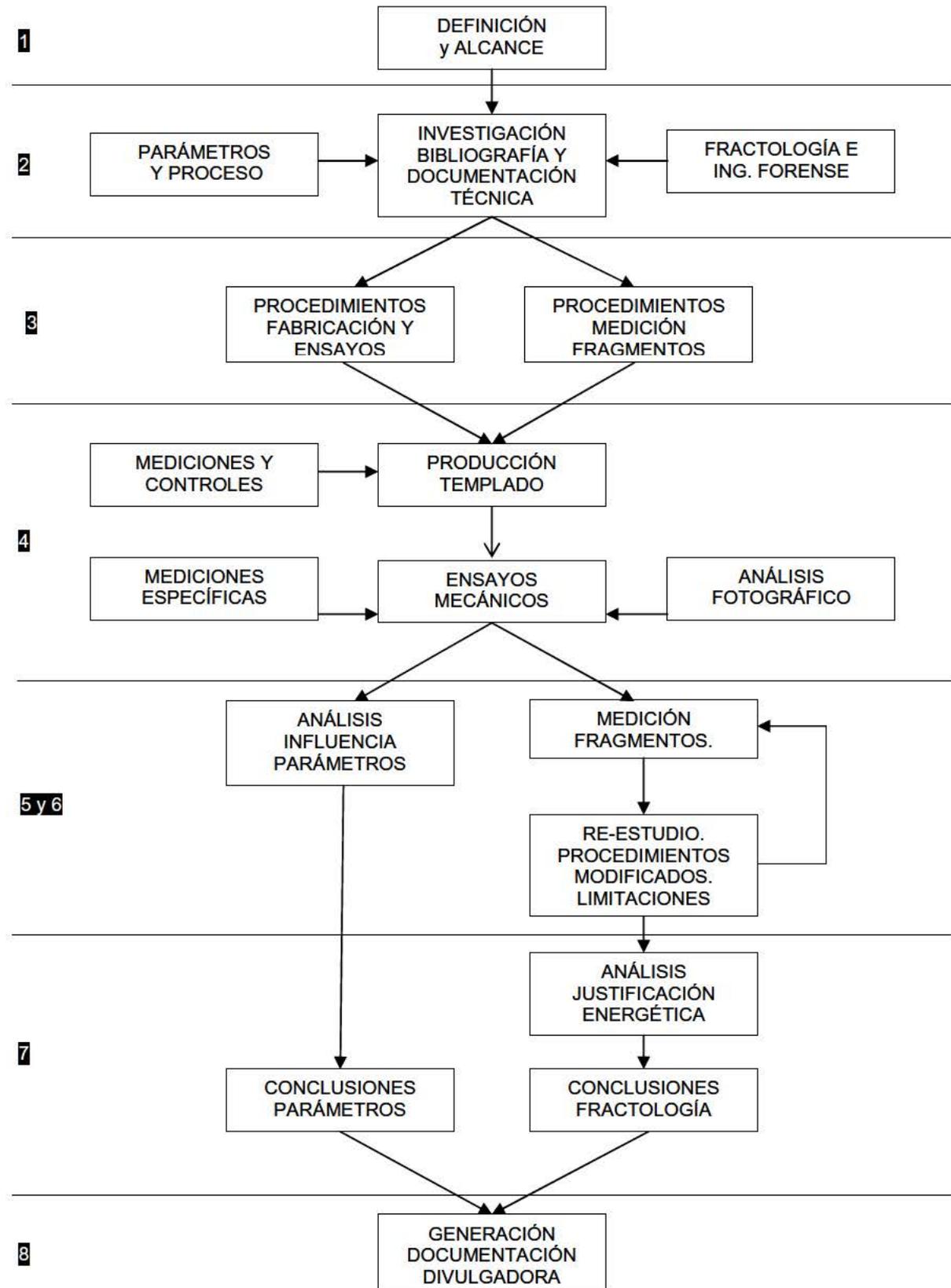


Figura 4.1. Metodología realizada para la investigación

## 5. VIDRIO TEMPLADO

### 5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

El vidrio sodocálcico como materia prima, es el habitual en las aplicaciones comunes del vidrio, como son el uso de construcción y automoción, aplicaciones que consumen el 60% aproximadamente del consumo mundial de vidrio. El resto se destina a la fabricación de vidrio hueco, como son los envases, botellas y material de cocina.

El vidrio para automoción fundamentalmente es de alta calidad, esto implica que los criterios de selección y fabricación son muy estrictos, asegurando una homogeneidad adecuada para los procesos productivos posteriores y que el resultado final sea de la máxima igualdad entre diferentes lotes de fabricación.

Se denomina vidrio templado a aquella pieza de vidrio que ha sufrido un tratamiento posterior de templado. Se considera un vidrio de seguridad porque consigue más resistencia mecánica y asegura, en caso de rotura, que su fractura será en fragmentos pequeños que no pueden resultar daños de importancia al ser humano, salvo ligeros cortes y arañazos, a diferencia de un vidrio float (sin tratar térmicamente) que puede resultar mortal (si se produce un corte peligroso).

El templado consiste en conseguir que las superficies estén tensionadas a compresión, mientras que el núcleo se mantiene a tracción. Éste fenómeno se puede conseguir de dos formas: Templado Químico y Templado Térmico. El primero consiste en sumergir la pieza en una solución salina con gran concentración de iones de potasio. Este proceso, que se realiza a alta temperatura, provoca que los iones de potasio reaccionen con los de sodio y ocupen su lugar. Debido al mayor tamaño de los primeros, se genera una compresión en superficie bañada. Se consiguen grandes resistencias mecánicas (del orden de 20 veces más que un vidrio ordinario) pero la rotura es similar a un vidrio recocido, lo que no lo convierte en vidrio de seguridad. Su uso queda prácticamente restringido a probetas de laboratorio, donde la alta resistencia mecánica y la fractura en partes grandes (favorece la limpieza y evita riesgos de contaminación en otras soluciones) son características de utilidad.

El segundo proceso, tratamiento térmico, es el más habitual para las aplicaciones industriales. Consiste en calentar el vidrio a unas temperaturas de 650-700°C y someterlo inmediatamente a un enfriamiento rápido de sus superficies. Esto se consigue mediante un soplado con aire a presión.

## 5.2. HISTORIA

Se cree que el vidrio templado fue descubierto por casualidad, cuando unas gotas de vidrio fundido durante su proceso de fabricación, cayeron sobre nieve, formándose unas gotas en forma de lágrima de gran resistencia mecánica. Éste producto fue popular durante el reinado en Carlos II (Inglaterra, Siglo XVII), denominándose “Lágrimas del Príncipe Rupert”.

Posteriores estudios más científicos acaban desarrollando el producto para uso industrial, otorgando la patente de vidrio templado al químico austriaco Rodolph A. Seiden, a principios del siglo XX.

## 5.3. APLICACIONES

El vidrio templado térmicamente es de gran uso en la sociedad. Tanto para el uso en construcción como para el uso en automoción.

En el primer caso, vidrio para construcción, todo vidrio que requiera taladros para su fijación o movimiento, así como algún tipo de resistencia mecánica (barandillas, techos, pisables, etc.) suele ser templado. Este proceso le confiere la resistencia mecánica suficiente para soportar las cargas externas solicitadas.

En la automoción, todos los vidrios deben ser de seguridad. El parabrisas, por término general, debe ser laminado recocido, para evitar la pérdida de visión ante un impacto además de impedir que los fragmentos, en caso de rotura durante el movimiento, golpeen al conductor. Sin embargo, el resto de vidrios del automóvil son templados, con la finalidad de que ante una rotura durante un accidente, los fragmentos desprendidos puedan cortar y dañar en consecuencia gravemente a los pasajeros.

## 5.4. PROCESO DE FABRICACIÓN

El proceso de fabricación consiste en introducir el vidrio en un horno, de forma que se produzca un calentamiento lento con el objeto de que sea uniforme en toda la masa del mismo. Una vez que todo el material excede de la temperatura de transición vítrea (límite de plasticidad del material), se produce un enfriamiento rápido, consiguiendo la diferencia de tensiones entre la superficie y el núcleo.

Constructivamente, el horno consiste en un tren de rodillos cerámicos, donde descansa el vidrio a tratar, que avanza a lo largo de un horno (o bien por vaivén) hasta que el material está listo para ser templado. En ese momento es preciso desplazar el material caliente a la zona de templado (pues ser mediante transporte de rodillos como

hasta ahora o bien succionando el vidrio con vacío para ser depositado posteriormente en un molde, que se desplaza a la zona de templado, para el caso de vidrios curvados). Dicha zona dispone de unas soplantes, alimentadas por instalaciones aire de gran tamaño que aseguran un caudal de aire a alta presión. Esta presión de aire de constante renovación sobre la superficie asegura un enfriamiento rápido de la misma, frente al núcleo, aún caliente.

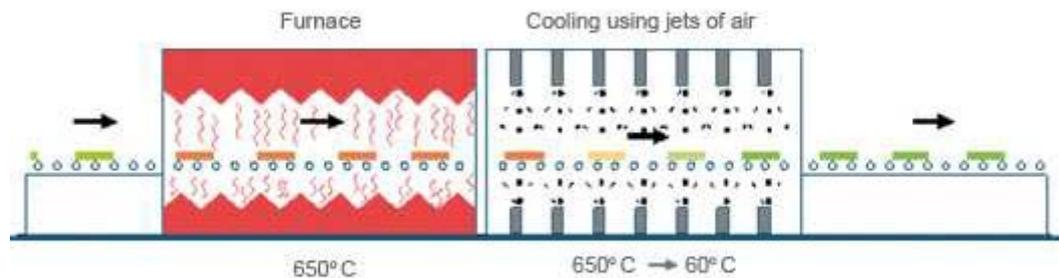


Figura 5.4.1 Esquema de un horno de templado térmico de vidrio plano. Se divide en cuatro partes: Carga de vidrio, horno de calentamiento, zona de templado y zona de descarga. (Imagen Lisec Website).

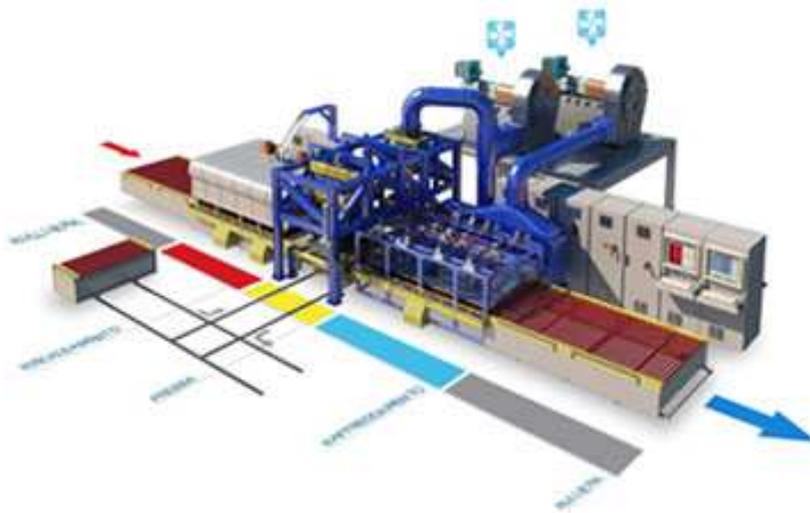


Figura 5.4.2. Esquema de un horno de templado térmico de vidrio curvado. Las zonas son análogas con las de vidrio plano, pero la instalación de curvado es especialmente compleja, requiriendo una instalación particular. (Img. Kerglass Website).

Este concepto, así resumido, realmente implica una serie de procesos más complejos en el material, que se pasan a detallar a continuación con la ayuda de la figura 5.4.3, donde se detallan las temperaturas y tensiones generadas en el vidrio durante todo el proceso de templado:

En la primera estación, el vidrio está fuera del horno, manteniendo toda su estructura a temperatura ambiente. Durante el calentamiento, recién entrado el vidrio en el horno, se produce un calentamiento más rápido de las superficies exteriores, mientras que el centro se mantiene a temperatura ambiente. Esto es debido a que el vidrio es mal conductor térmico. En esta situación el material resulta altamente resistente, como si fuera templado, ya que la gráfica de tensiones en la sección es similar al producto final. La estación 3 es la misma situación, pero las diferencias entre núcleo y superficies se van disminuyendo, debido al lento calentamiento. En la estación 4, el vidrio ha superado por completo la temperatura de transición vítrea (unos 550°C) y prácticamente se han homogeneizado sus temperaturas internas, lo que determina las condiciones idóneas para ser templado.

A partir de este momento, comienza el templado del vidrio, oscilando el mismo entre las soplantes para la presión de aire sea lo más uniforme posible en toda la superficie. Rápidamente el vidrio comienza a enfriar por la superficies (5), llegando al caso contrario a situaciones anteriores. Ahora el vidrio está traccionado en la superficie exterior y comprimido en la interior, debido a que la superficie se ha contraído más que el núcleo. Es el momento más delicado del proceso ya que el material es muy inestable y cualquier desequilibrio puede hacer que estalle (7). Sin embargo, con el enfriamiento, las tensiones se invierten, debido a que el núcleo sigue comprimiéndose cuando la superficie ya está enfriada. Este efecto provoca un progresivo equilibrio de las tensiones para volver a convertirse en compresión en el exterior y tracción en el interior, estado que quedará ya permanente una vez enfriado completamente el vidrio.

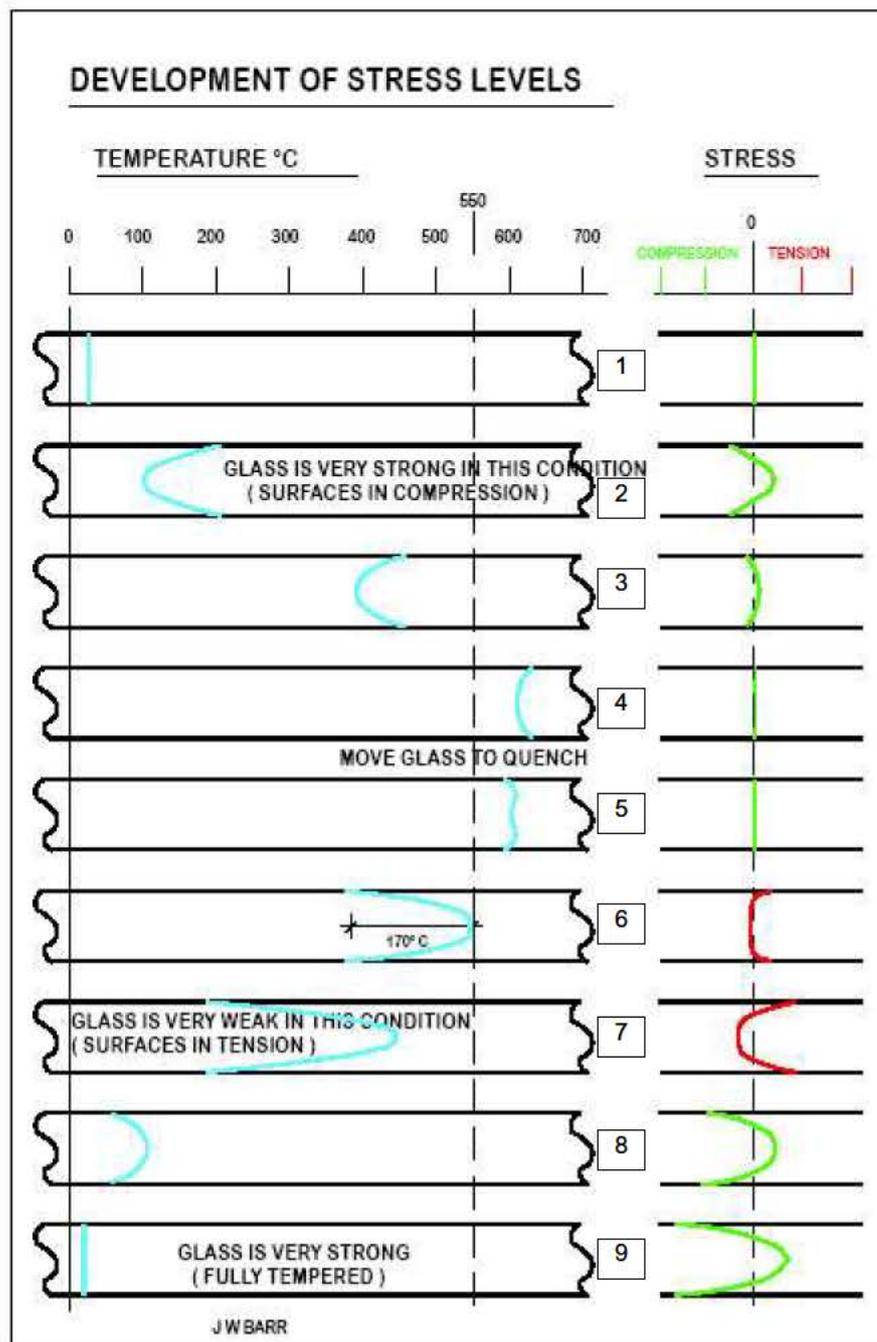


Figura 5.4.3. Esquema de las temperaturas y tensiones generadas durante el proceso de templado de vidrio mediante procesos térmicos. (Img. Glass Tempering by Numbers, by Jonathan Barr. Glassonweb website)

Gráficamente se puede representar la curva de temperatura del vidrio durante todo el proceso. En la figura 5.4.4 se muestra dicha evolución. Se puede observar como el calentamiento es suave hasta alcanzar la temperatura de transición, para entonces recibir la presión de aire que provoca un enfriamiento rápido, generando el templado del vidrio.

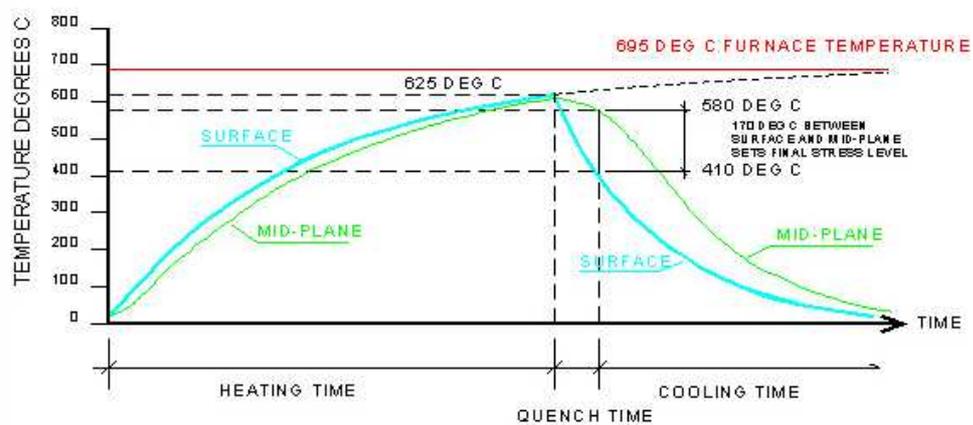


Figura 5.4.4 Gráfica de temperatura del vidrio a lo largo de todo el proceso. La rampa de calentamiento es suave frente al rápido enfriamiento producido en la etapa de templado (Quench time). (Img. Glass Tempering by Numbers, by Jonathan Barr. Glassonweb website).

## 5.5. PRODUCTOS EN FUNCIÓN DE SU GEOMETRÍA

Los vidrios templados se pueden clasificar en función de la geometría final, clasificándolos en vidrio templado plano, cilíndrico o curvado:

- a) Vidrio plano: Generalmente los hornos son máquinas mucho más sencillas, debido a que la zona de templado es similar a la de calentamiento. El movimiento es mediante rodillos a través de la soplante, lo que asegura una adecuada distribución del aire y en consecuencia una ordenada distribución de las tensiones.
- b) Vidrio Cilíndrico: Para este producto existen múltiples tecnologías. Las más habituales consisten en máquinas que se introducen en el horno, cuyo mecanismo permite introducir el vidrio en formato plano y una vez dentro curvarse para conformarlo al radio deseado. Este sistema es similar al anterior, asegurando una uniforme distribución de las soplantes en todo el vidrio, y en consecuencia de las tensiones. Otra tecnología utiliza moldes de producción, sistema análogo al vidrio curvado en general.
- c) Vidrio curvado: La geometría del mismo es ya compleja, siendo curvado en las tres dimensiones, lo que impide una uniformidad en las soplantes. Existen varios métodos de fabricación para este proceso (por gravedad, mediante prensado, etc.). La dificultad radica en asegurar que todo el vidrio recibe la misma presión y caudal de aire. Para ello se tiende a fabricar utillajes

específicos por cada modelo, lo que implica unos gastos de desarrollo elevados que solamente son rentables en series muy largas de producción. Es por esta razón, que los vidrios curvados templados son los que más relevancia adquiere el estudio de las tensiones y donde, como se verá más adelante, su estudio y determinación son clave para asegurar un producto estable y de seguridad.

## 5.6. MECANISMOS ENERGÉTICOS DE CALENTAMIENTO. TIPOLOGÍA DE HORNOS

La forma de calentamiento influye de forma muy significativa en el resultado final del vidrio. Esto es debido a las propiedades intrínsecas del material a producir. El color, grado de transparencia, espesor y reflejo de la superficie generan diferencias importantes en el calentamiento de los vidrios, haciendo obligatorio la selección del método adecuado en función del grado de templado que se desee.

Para conseguir el proceso de templado, el vidrio se puede calentar de dos formas diferentes:

- a) Calentamiento por radiación: Consiste en hornos eléctricos que mediante resistencias en la zona de calentamiento van aportando al vidrio la temperatura necesaria. Dichas resistencias actúan directamente sobre el vidrio, aportando así mediante radiación la mayor parte de la transmisión energética. Dicho proceso es más rentable que otros, por lo que su uso es el más extendido. Sin embargo tiene limitaciones, puesto que los vidrios con alto grado de reflejo en sus superficies, pueden ser difícilmente calentados por éste procedimiento.
- b) Calentamiento por convección: Para estos casos, existen otros tipos de hornos cuyo proceso de calentamiento es mediante convección de aire. Generalmente disponen de quemadores de gas, que conducen y proyectan los gases calientes sobre el vidrio, haciendo de este proceso de transmisión el más efectivo en esta tecnología. Esto asegura un calentamiento más homogéneo en el vidrio, sea de las propiedades que sea en cuanto a color o reflejo de su superficie. Sin embargo la instalación es más compleja y los métodos de control no permiten el mismo grado de operación que los hornos eléctricos.

## 6. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE TENSIONES

El proceso de templado realiza un tratamiento térmico en el vidrio con el objeto de generar unas tensiones internas (también denominadas residuales) que favorecen la resistencia mecánica y el proceso de fractura, según se ha descrito con antelación. Por esta razón, es razonable pensar que el control de dichas tensiones es uno de los factores más importantes en el proceso. De hecho, para la realización del estudio posterior, es parte fundamental.

A continuación se describe brevemente los fundamentos teóricos que permite realizar la medición de tensiones en el vidrio.

### 6.1. CONCEPTOS FOTOELASTICIDAD

La luz se propaga a una velocidad que depende del medio que atraviesa. Habitualmente se toma como referencia el vacío para referenciar el resto de medios. El índice de refracción es la relación entre las velocidades en ambos medios y que sirve para comparar la propagación en diferentes materiales o sustancias.

Un material es homogéneo ópticamente (isótropo) si su índice de refracción no cambia en cualquier punto del mismo. Sin embargo existen materiales que en ciertas circunstancias modifican este índice al variar su refracción. A esta propiedad se denomina doble refracción o birrefringencia. En estos materiales, al encontrarse sometidos a un estado tensional, se vuelven anisótropos, modificando su índice de refracción en función de la dirección considerada.

Desde el punto de vista matemático [6], si se considera un elemento puntual dentro de un sólido elástico, según las leyes de Maxwell, y considerando exclusivamente tensiones principales ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ) se puede definir:

$$n_1 - n_0 = p \sigma_1 + q (\sigma_2 + \sigma_3)$$

$$n_2 - n_0 = p \sigma_2 + q (\sigma_1 + \sigma_3)$$

$$n_3 - n_0 = p \sigma_3 + q (\sigma_2 + \sigma_1)$$

Convertido a un caso plano donde  $\sigma_3=0$ :

$$n_1 - n_2 = C (\sigma_1 - \sigma_2)$$

Esta ecuación, denominada ley de Brewster. La constante C resultante es La constante fotoelástica del medio, y depende de la longitud de onda incidente y de la temperatura.

Siguiendo con la teoría de Maxwell, las ondas electromagnéticas consisten en dos perturbaciones, un campo eléctrico y otro magnético perpendiculares entre si de forma que sus vectores representativos son a su vez perpendiculares a la dirección de propagación. Para el campo eléctrico:

$$E = A \cos (kx - \omega t)$$

Donde A es la amplitud

$\omega$  es la pulsación de la onda ( $2\pi f$ )

k es el número de ondas ( $2\pi/\lambda$ , siendo  $\lambda$  la longitud de onda)

Para la luz en general la dirección del vector E cambia para cada momento considerado. Sin embargo, si la luz fuera polarizada el vector E estaría siempre con un patrón de comportamiento, dependiendo de si es polarizada linealmente (dentro del mismo plano), circular (describe una circunferencia a medida que avanza) o elíptica (describe una elipse).

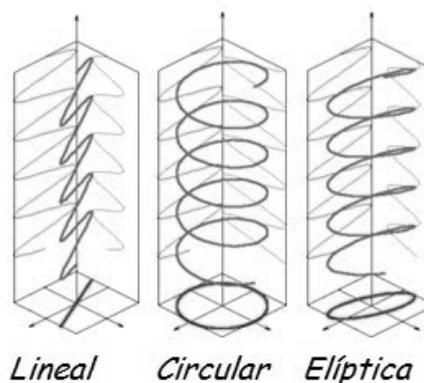


Figura 6.1.1. Clases de polarización de luz

## 6.2. POLARIZACIÓN DE LA LUZ. CONCEPTO POLARISCOPIO

Los instrumentos que se utilizan para analizar tensiones con las teorías fotoelásticas se denominan polariscopios. Aunque físicamente existen muchos tipos, a nivel óptico se dividen en dos fundamentalmente: Polariscopio plano y circular.

Los polariscopios se deben al descubrimiento del material polarizador, que es un material con transmitancia selectiva a una determinada dirección de oscilación del campo eléctrico de una onda electromagnética como la luz.

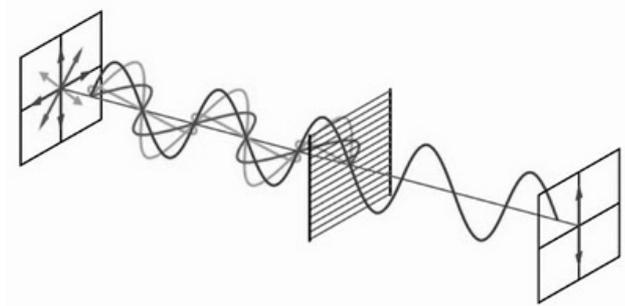


Figura 6.2.1. Esquema de polarización lineal de ondas electromagnéticas.

El instrumento se basa en la aplicación de dos filtros de manera que la luz incide sobre el primero, filtrándola en un cierto plano. El segundo, colocado en serie con el primero y girado  $90^\circ$ , en condiciones normales bloquea completamente la luz. Sin embargo, al colocar un material birrefringente entre ambos, éste modificará el plano de la luz en función de las tensiones, lo que provoca que el segundo filtro no anule por completo la onda, permitiendo ver parte del espectro. El primer filtro se denomina polarizador y el segundo analizador.

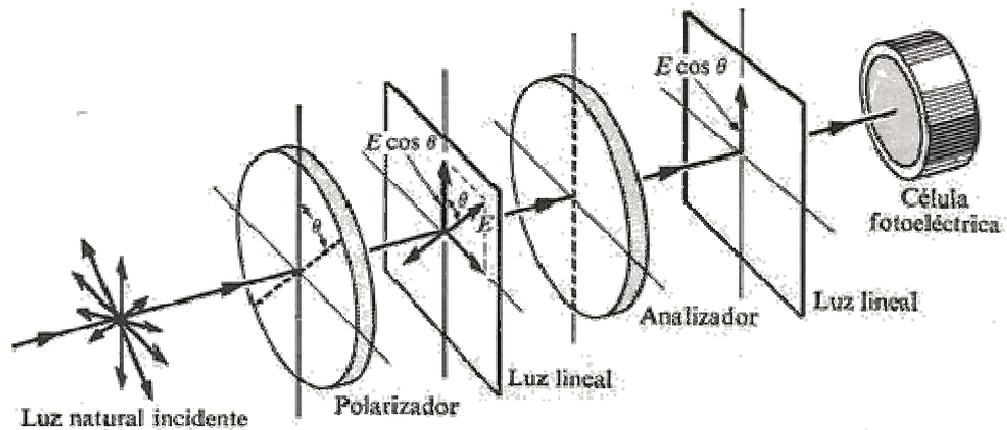


Figura 6.2.2. Esquema de funcionamiento del polariscopio lineal

Numéricamente, y volviendo a las ecuaciones de Maxwell, [6] el vector electromagnético que atraviesa el polarizador:

$$E = A \cos \omega t$$

Descomponiendo en las dos direcciones (mayor y menor) del filtro, tenemos:

$$E_1 = A \cos \theta \cos \omega t$$

$$E_2 = A \sin \theta \cos \omega t$$

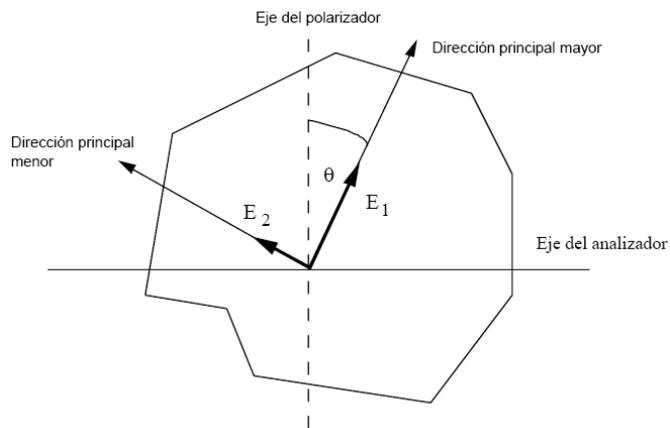


Figura 6.2.3. Descomposición de la luz polarizada en ejes mayor y menor.

Al atravesar el material birrefringente posteriormente, aparece un retardo entre ellas que es función del espesor del material. Suponiendo que la velocidad es constante ( $v_1$  y  $v_2$  respectivamente):

$$t_1 = \frac{e}{v_1}$$

Y de forma análoga:

$$t_2 = \frac{e}{v_2}$$

El desfase entre ambas será:

$$\omega (t_1 - t_2)$$

Una vez que ha atravesado el material birrefringente. Las componentes quedan de la siguiente manera:

$$E_1' = A \cos \omega (t - t_1) \cos \theta$$

$$E_2' = A \cos \omega (t - t_2) \sin \theta$$

Proyectando estas componentes sobre el eje del analizador (que se supone ortogonal al del polarizador) se obtienen las siguientes componentes sobre dicho eje:

$$E_1'' = E_1' \sin \theta = \frac{A}{2} \cos \omega (t - t_1) \sin 2\theta$$

$$E_2'' = E_2' \cos \theta = \frac{A}{2} \cos \omega (t - t_2) \sin 2\theta$$

Refiriendo ambas respecto al eje del analizador:

$$\frac{A}{2} \sin 2\theta [\cos \omega (t - t_1) - \cos \omega (t - t_2)] = A \sin 2\theta \cdot \sin \omega \frac{t_1 - t_2}{2} \cdot \sin \omega (t - \frac{t_1 + t_2}{2})$$

Representa una perturbación de la misma pulsación (frecuencia) que la del rayo incidente. La amplitud B tiene el valor:

$$B = A \sin 2\theta \cdot \sin \omega \frac{t_1 - t_2}{2}$$

Y resulta máximo cuando  $n$  es un número entero:

$$\omega \frac{t_1 - t_2}{2} = \frac{2n+1}{2} \pi$$

A su vez se anula cuando:

$$\omega \frac{t_1 - t_2}{2} = n\pi$$

Siendo, en este caso,  $c$  la velocidad de la luz en el aire. Utilizando la ley de Brewster:

$$\omega \frac{t_1 - t_2}{2} = \frac{\pi e}{\lambda} C(\sigma_1 - \sigma_2)$$

Para el caso de interferencias constructivas (aparición de franja negra):

$$\frac{eC}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{2n+1}{2}$$

Y para el caso de interferencias destructivas (aparición también de franja negra):

$$\frac{eC}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) = n$$

Si se considera

$$F = \frac{\lambda}{C}$$

La interferencia destructiva se produce cuando:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{nF}{e}$$

Esta ecuación es la fórmula fundamental de la fotoelasticidad. El valor de n es el total de franjas que se aprecian en el material. Si se toma:

$$\text{sen}2\theta = 0$$

siendo

$$\theta = n \frac{\pi}{2} \quad n=0,1,2,3\dots$$

Representan aquellos puntos en los que las direcciones principales son coincidentes con los ejes de polarización del polarizador y del analizador.

En un polariscopio circular el planteamiento es similar, salvo que se introducen láminas de cuarto de onda después del polarizador, formando  $45^\circ$  con el eje del mismo y antes del analizador, con el mismo ángulo. Estas láminas, al ser incididas por un rayo de luz, provocan la proyección de dos en su salida (ordinario y extraordinario), paralelos ambos al rayo incidente y superpuestos, de manera que el lento lleva un desfase con el otro de  $\lambda/4$ , lo que equivale a un desfase angular de  $\pi/2$ . Es decir, si el rayo correspondiente al eje rápido fuera:

$$E = A \cos \omega t$$

El rayo correspondiente al eje lento sería:

$$E' = A' \cos (\omega t - \pi/2)$$

Procediendo al resto de cálculo de forma análoga a la polarización lineal. Desde el punto de vista gráfico, a continuación se presenta un esquema de polarización circular.

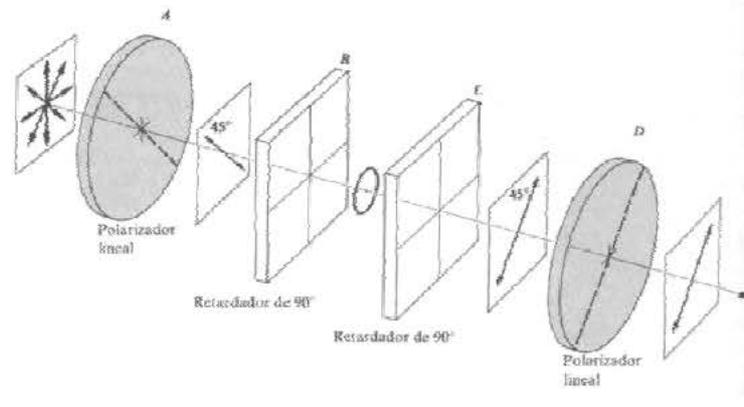


Figura 6.2.4. Esquema de polariscopio circular

### 6.3. TIPOS DE POLARISCOPIO

En el mercado existen multitud de equipos fotoelásticos para analizar tensiones en materiales birrefringentes. La mayoría de ellos son equipos de laboratorio con carácter didáctico. Sin embargo existen varias empresas que presentan equipos especializados en vidrio. De ellos destacamos 3 tipos de aparatos fundamentalmente:

- Equipos para medir tensiones internas en superficie o distribución completa: Destinados a conocer las tensiones obtenidas con el proceso de templado, conociendo las tensiones de las capas de compresión e incluso en algunos equipos, la distribución interna.

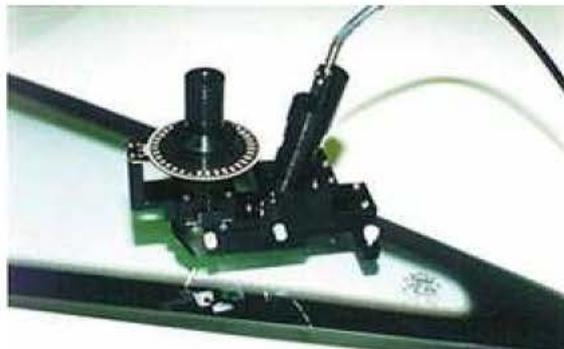


Figura 6.3.1: Gasp® Polarimeter de Strainoptics mide la tensión de superficie de la cara estaño del vidrio flotado.



Figura 6.3.2: Scalp - 04 de Glassstress mide la distribución de tensiones completa en cualquier sección del vidrio.

- Equipos para medir tensiones de borde: Destinados a cuantificar las tensiones residuales por procesos de térmicos de curvado, sin proceso de templado.



Figura 6.3.3: Polariscopio GES-100 Edge meter de Straioptics. Permite la medición de tensiones de borde para el análisis de vidrios laminados o templados.

- Equipos para medir tensiones absolutas a través del vidrio: Destinados a conocer el desequilibrio de tensiones en el espesor del vidrio como consecuencia de la utilización de utillajes como son los moldes.

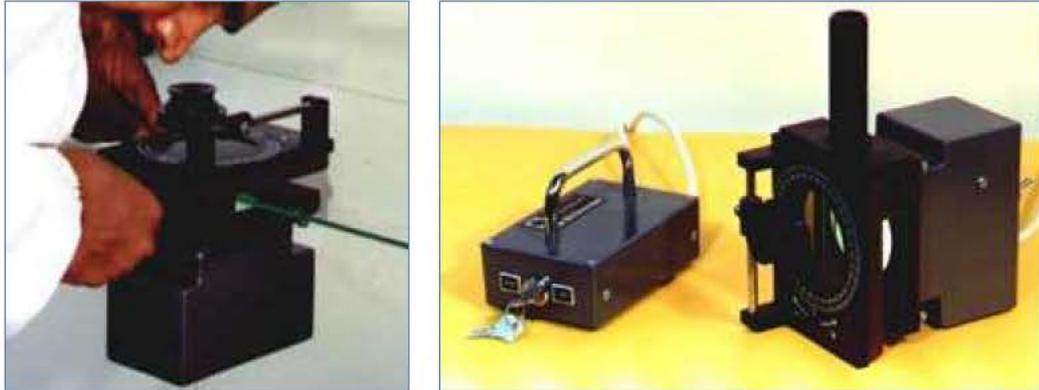


Figura 6.3.4: Polariscopio S-67 de Sharples Stress. Permite la medición de tensiones absolutas en el vidrio, para valorar el equilibrio tensional tras el templado.



Figura 6.3.5: Polariscopio S-69 de Sharples Stress. Permite la medición de tensiones absolutas en el vidrio, para zonas con serigrafía. Se basa en el mismo concepto pero en lugar de aprovechar la luz transmitida a través del vidrio, utiliza la luz reflejada en la cara opuesta a la serigrafía.

Desde el punto de ingeniería forense, no existen equipos explícitos para este uso, si bien la base tecnológica es similar a los utilizados para otras aplicaciones.

## **7. PARÁMETROS DE PROCESO DE FABRICACIÓN. RELACIÓN CON RESISTENCIA MECÁNICA**

### **7.1. INTRODUCCIÓN**

Existen dos aspectos fundamentales que es preciso determinar con precisión para fabricar un vidrio templado, y son: Las características del material y los parámetros de proceso (calentamiento y presión de templado). En este ejercicio se ha tratado de establecer esta relación directa, entre ambos aspectos y los resultados obtenidos. El sistema de medida será mediante ensayos mecánicos de resistencia, ya sea frente a impacto o flexión, además de los métodos normalizados de control.

### **7.2. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO**

#### **7.2.1. Material**

Se han diseñado unas probetas específicas para este ejercicio. Las dimensiones son de 300x300 mm de color claro (CL, vidrio común) y planas.

El proceso de fabricación previo al horno ha sido común, siendo el canteado redondo con muela perimetral, para evitar posibles defectos de canteado. No disponen de serigrafía y han sido fabricadas en un único lote de producción, evitando cambios de configuración entre ellas.

Se han dispuesto dos espesores de trabajo, en **3,85 mm** (comúnmente denominado 4 mm) y en **5,85 mm** (comúnmente denominado 6 mm). Se han procesado más de 40 probetas para cada espesor, más las de referencia y control, en total han sido templadas 96 unidades, en diferentes configuraciones.

#### **7.2.2. Equipo utilizado**

Se ha usado un horno continuo de temple por radiación, con tracción de rodillos cerámicos y dos salidas: Plana y esférica (vidrio curvado por gravedad). Es fabricado por Glasstech Inc. en los años 90.

Para la medición de tensiones se han utilizado los polariscopios descritos en el apartado 4.3, polariscopio de superficie GASP, polariscopio de borde GES-100 y polariscopio S-69 para tensiones de contorno.

### 7.2.3. Procedimiento

El procedimiento de ensayo ha consistido en templar probetas con diferentes configuraciones de parámetros. Se han templado dos espesores diferentes, y en cada uno de ellos se han modificado los parámetros de temperatura y presión, considerando tres valores para cada uno, valor normal de proceso, un valor muy por encima del proceso y uno inferior. La tabla siguiente muestra las diferentes opciones plantadas:

Espesor vidrio (mm)	Temperatura de proceso (°C)	Presión de proceso (mm.c.a)	Nº	Descripción
3,85	Normal (630°C)	Normal (25)	1-10	Parámetros normales de proceso para dicho color y espesor
		Alta (31)	11-20	Parámetro normal de temperatura. Aplicación de mayor presión en el templado
		Baja (15)	21-30	Parámetro normal de temperatura. Baja presión (límite de rotura) en el templado.
	Alta (640°C)	Normal (25)	31-40	Parámetro elevado de temperatura, y normal de presión
		Alta (31)	41-50	Parámetro elevado de temperatura, y elevada presión, por encima de la normal.
		Baja (15)	51-60	Parámetro de temperatura baja y mismo límite de presión bajo que antes. (límite rotura)
	Baja (620°C)	Normal (25)	61-70	Parámetro de temperatura bajo. Presión normal, según establecido en ensayos. (Límite rotura)
		Alta (31)	71-80	Parámetro de temperatura bajo. Presión alta, según establecido en ensayos. (Límite rotura)
		Baja (1)	81-90	Parámetro de temperatura bajo. Presión baja, según establecido en ensayos. (Límite rotura)
	Normal (630°C)	Normal (Desequilibra 28 arriba-22 abajo)	91-99	Parámetros de trabajo normal para 4 mm. En soplado se disequilibra presión superior e inferior

Figura 7.2.1.a (vidrio 4 mm) Clasificación de probetas para ensayos. Los datos particulares de cada probeta están detallados en los apéndices.

Esesor vidrio (mm)	Temperatura de proceso (°C)	Presión de proceso (mm.c.a)	Nº	Descripción
5,85	Normal (630°C)	Normal (10)	1-10	Parámetros normales de proceso para dicho color y espesor
		Alta (15)	11-20	Parámetro normal de temperatura. Aplicación de mayor presión en el templado
		Baja (6)	21-30	Parámetro normal de temperatura. Baja presión (límite de rotura) en el templado.
	Alta (640°C)	Normal (10)	31-40	Parámetro elevado de temperatura, y normal de presión
		Alta (15)	41-50	Parámetro elevado de temperatura, y elevada presión, por encima de la normal.
		Baja (6)	51-60	Parámetro de temperatura baja y mismo límite de presión bajo que antes. (límite rotura)
	Baja (620°C)	Normal (10)	61-70	Parámetro de temperatura bajo. Presión normal, según establecido en ensayos. (Límite rotura)
		Alta (15)	71-80	Parámetro de temperatura bajo. Presión alta, según establecido en ensayos. (Límite rotura)
		Baja (6)	81-90	Parámetro de temperatura bajo. Presión baja, según establecido en ensayos. (Límite rotura)
	Normal (630°C)	Normal (Desequilibrada 15 arriba-6 abajo)	91-99	Parámetros de trabajo normal para 4 mm. En soplado se desequilibra presión superior e inferior

Figura 7.2.1.b. (Vidrio 6 mm) Clasificación de probetas para ensayos. Los datos particulares de cada probeta están detallados en los apéndices

### 7.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS

Para comparar los resultados, se ha realizado varios ensayos mecánicos, consistentes en rotura mediante ensayo de fragmentación normalizado, impacto o flexión.

#### a) Ensayo fragmentación

Normalizado por el Reglamento R43 (Reglamento N°. 43 ECE/ONU /// Directiva 92/22/CEE. Materiales de acristalamiento de seguridad y su montaje en los vehículos.)

El ensayo tiene por objetivo verificar la adecuada fragmentación y el control de las agujas producidas en la fractura del vidrio de cara a minimizar el riesgo de corte. El procedimiento consiste golpear la pieza con un elemento punzante (75 gr. Con una punta redondeada de  $0.2 \pm 0.05$  mm) de forma que se haga estallar el vidrio. En

la preparación se debe mantener la muestra libre de fijación, pero sí se debe colocar una cinta en todo el perímetro para evitar que los fragmentos salgan despedidos. Una vez fracturado se debe buscar la zona de máxima y mínima cantidad de fragmentos. Encima se coloca una cuadrícula de 45x45 mm y se hace el recuento de fragmentos. De igual forma se buscan las agujas de más longitud y se miden. Todo ello en un tiempo comprendido entre 10 segundos y 3 minutos después del impacto. La zona central de impacto no se tiene en cuenta en un radio de 50 mm (se suele tapar con un círculo).



Figura 7.3.1: Ensayo de fragmentación en probeta. La imagen de la izquierda muestra el tamaño de la probeta, un patrón de rotura y la selección de la zona de mínima cantidad de fragmentos. La imagen de la derecha muestra el recuento y la medida de la aguja más larga.

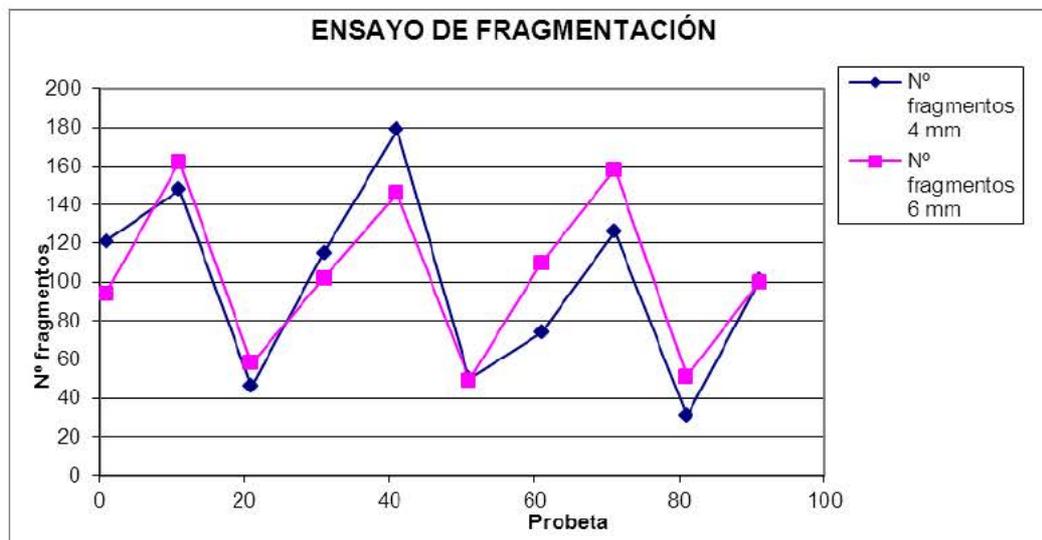


Figura 7.3.2: resultados de fragmentación de las probetas ensayadas, tanto para 4 como para 6 mm. Se verifica que el comportamiento de ambos espesores responde igual para cada grupo de parámetros, así las probetas con el mismo número (tanto en 4 como en 6 mm) realizan la misma gráfica..

### b) Ensayo de impacto

El propósito es analizar la uniformidad de la tensión en los vidrios templados térmicamente y se basa también en el reglamento 43.



Figura 7.3.3: Ensayo de impacto. En la imagen de la izquierda se aprecia la configuración básica del ensayo: En vidrio es apoyado en un contorno rígido y sobre él se coloca una bola de acero que se dejará caer a diferentes alturas. La imagen de la derecha muestra el detalle de la colocación del vidrio en el soporte. Cortesía Starglass S.A.

El ensayo consiste fundamentalmente en dejar caer desde una altura determinada una bola de acero de 227 gr.  $\pm$  2 gr. Y de un diámetro aproximado de 38 mm. El soporte es fijo con unos borde de apoyo de 15 mm. La probeta es de 300x300 mm y se debe realizar el ensayo en condiciones ambientales controladas. El impacto debe producirse en un entorno de los 25 mm del centro de la pieza. La bola debería hacer un solo patrón de impacto en el resultado final.

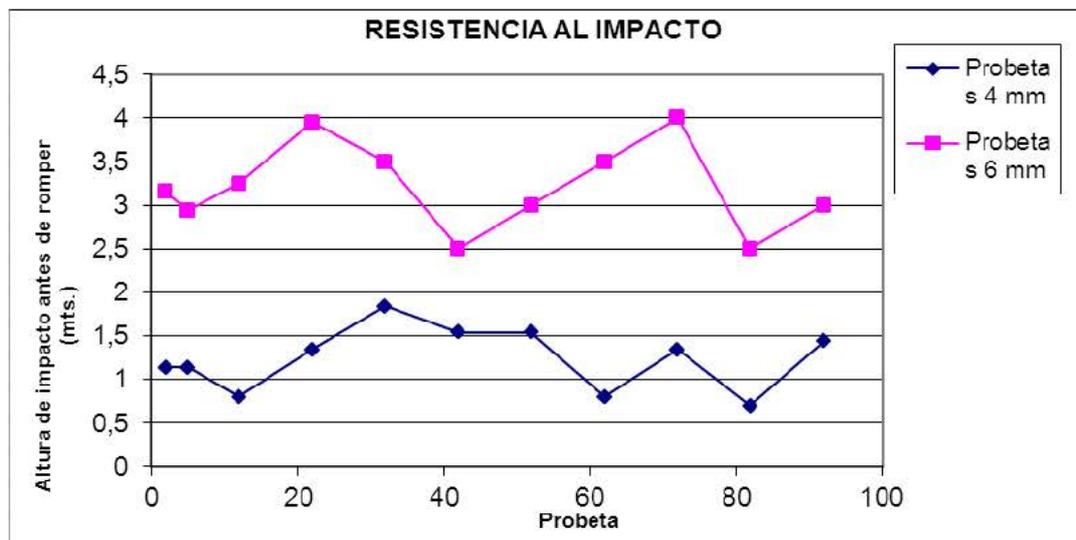


Figura 7.3.4: Resultados del test de impacto para todas las probetas ensayadas según este ensayo. Los resultados para 4 y 6 mm son ligeramente diferentes en las probetas del grupo 60's y 70's. El resto mantiene coherencia entre ambos espesores.

### c) Ensayo de flexión

El ensayo de flexión planteado no corresponde a normativa alguna. Corresponde a un equipo de diseño propio de un fabricante que ha utilizado para análisis y diseños particulares.

Fundamentalmente consiste en colocar la probeta de 300x300 mm apoyada en todo su contorno sobre un marco elástico de dureza considerable (shore 60 – 70), con el fin de facilitar la deformación en sus extremos. Sobre él, se instala un tornillo de presión que mediante el accionamiento del volante irá aplicando presión en el vidrio mediante un punzón (ver figura 5.3.5). Un equipo de medida valora la carga aplicada.

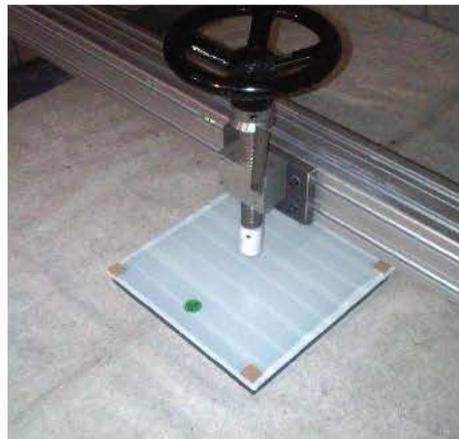


Figura 7.3.5: Ensayo de resistencia a la flexión. La probeta es apoyada en un marco rígido con un elemento elástico en su parte superior. La aplicación de la carga se realiza mediante el accionamiento del volante superior.

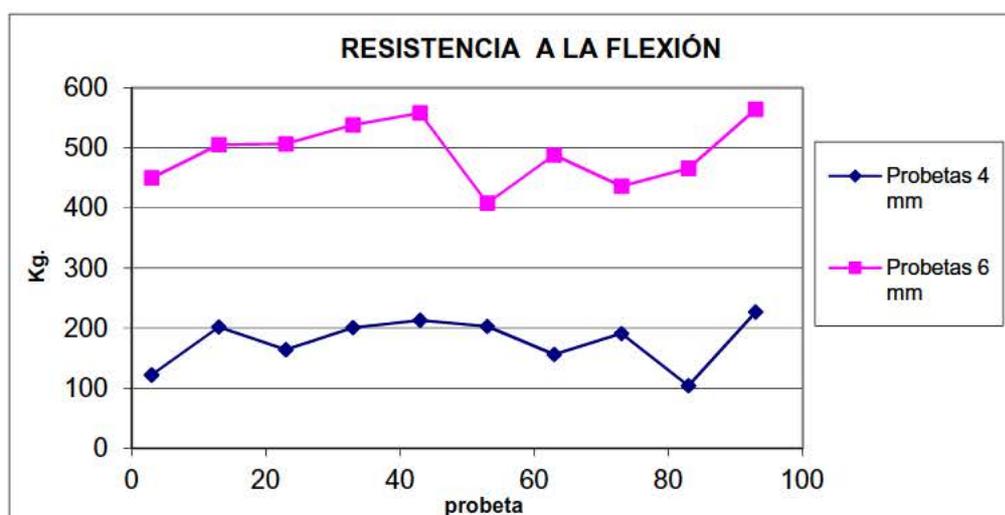


Figura 7.3.6: Resultados del ensayo a flexión. En este caso no hay una relación directa entre los resultados de los ensayos entre ambos espesores.

## 7.4. EFECTOS DE LA TEMPERATURA

### 7.4.1. Introducción

La temperatura es uno de los principales parámetros en el proceso de un vidrio templado. Por temperatura se entiende la obtenida en el vidrio durante el calentamiento, y es medida mediante un pirómetro colocado al final de la zona de calentamiento.

En los procesos productivos reales, la temperatura, se puede conseguir de dos formas diferentes: Subiendo la temperatura del horno y variando la velocidad de traslación del vidrio dentro del horno, es decir, modificar el tiempo de calentamiento. Éste último procedimiento es el más habitual en el sector, ya que es mucho más rápido y económico que la modificación constante de las resistencias del horno. En cualquier caso, se obtienen resultados análogos.

Los efectos de la variación de temperatura en el material son evidentes: A mayor temperatura (se entiende uniforme en toda la masa) el templado del vidrio resultará más sencillo, consiguiendo fácilmente con menor presión de aire, una diferencia de enfriamiento entre la superficie exterior y la masa central. Sin embargo un exceso de temperatura puede provocar infinidad de defectos cosméticos y de geometría, en los que es recomendable obtener un vidrio frío para su conformación óptima. Es, por tanto, la búsqueda de éste equilibrio el ejercicio de los oficiales horneros, expertos en el proceso del vidrio y conocedores de los requisitos de calidad establecidos.

### 7.4.2. Análisis del efecto de la temperatura

A continuación se muestran varias gráficas, relacionando los parámetros de temperatura (como normal, alta o baja  $T^a$ ) con los diferentes resultados de los ensayos realizados. Los valores pertenecen siempre a los promedios de todas las probetas ensayadas con las mismas condiciones.

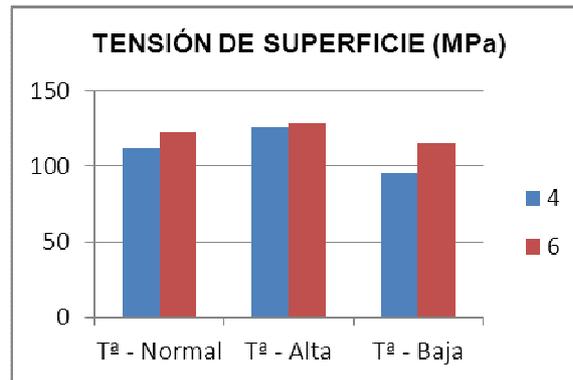


Figura 7.4.1. Influencia de la temperatura en la tensión de superficie.

En ésta primera gráfica se relacionan las temperaturas con las tensiones de superficie. La conclusión es evidente, se observa que hay una relación directa entre temperatura y tensión de superficie, observándose que a mayor temperatura se obtiene mayor tensión y viceversa. Las variaciones que se observan son de 14% en el caso del 4 mm y del 6% en el caso de 6 mm, tomando como referencias la media entre todas, que tiende a coincidir con los valores normales.

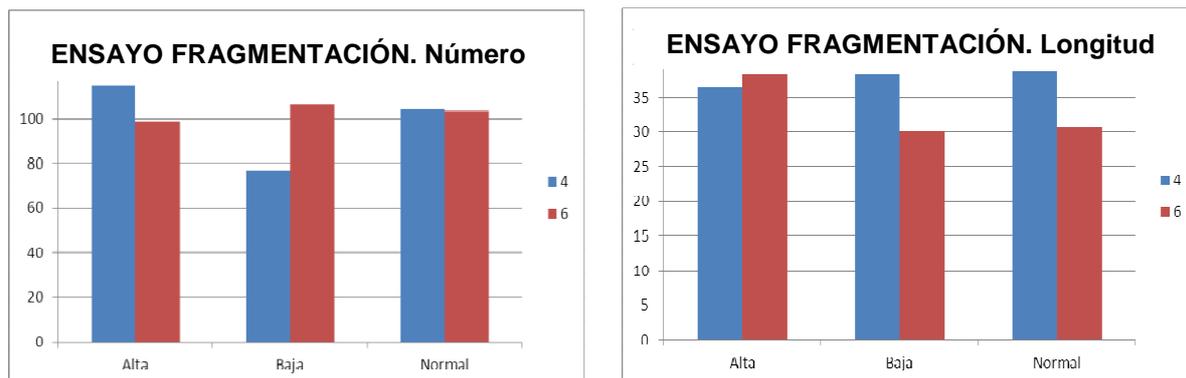


Figura 7.4.2. Influencia de la temperatura en el ensayo de fragmentación, considerando el número de fragmentos (imagen de la izquierda) e influencia de la temperatura en el ensayo de fragmentación, considerando las agujas (derecha).

Las dos siguientes gráficos corresponden al ensayo de fragmentación, intentando relacionar los resultados de número de fragmentos y longitud de las agujas con las condiciones de temperatura. En este caso no se aprecia ninguna relación directa. Es importante destacar que las condiciones límite que se impusieron durante el ensayo es que siempre fueran probetas aceptadas según reglamento R43, es decir, que aún en las condiciones límite de alta o baja temperatura ( y lo mismo con la presión) siempre la fragmentación fuera acorde con la legalidad. Sin embargo, una vez asegurado los resultados, no se aprecia un comportamiento lineal de la fragmentación. Estos datos corroboran los obtenidos por Matteo Schiavonato en "Stress Measurement, Fragmentation and Mechanical Strength" (Glass Processing Days 2005), donde confirma que "la existencia de un mínimo valor de tensión de compresión asegura una buena fragmentación", coincidiendo con la opinión de Hillan Aben en "On non-destructive residual stress

measurement in glass panles” (Estonian Journal of Engineering 2010) donde indica “los test de fragmentación solo pueden ser usados como meros indicadores de que el vidrio ha sido templado térmicamente, pero no sirven para obtener conclusiones sobre su grado de tensión.

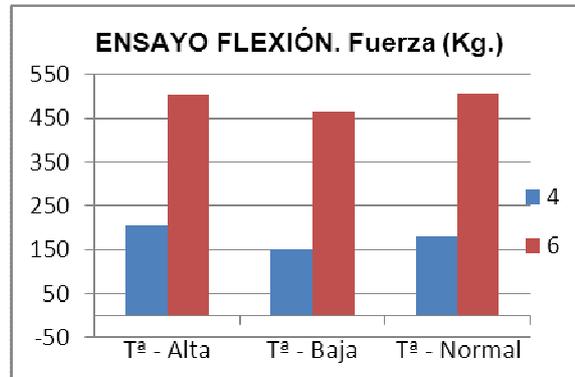


Figura 7.4.3. Influencia de la temperatura en el ensayo de flexión.

La próxima gráfica, relaciona la temperatura con la resistencia a la flexión. La relación es directa entre ambas variables, siendo superior la resistencia cuanto mayor es la temperatura en ambos espesores. Si bien es cierto que la gráfica para el caso de 6 mm prácticamente iguala los resultados para alta y normal, analizando los datos pormenorizadamente se comprueba que la mayor resistencia del ensayo corresponde a la probeta de tensiones desequilibradas, favoreciendo en este caso la resistencia a flexión, y falseando el resultado de la gráfica, que cumple perfectamente con el comportamiento esperado aislando el valor señalado. Las variaciones son entre 4 y el 15% por espesor respecto a los valores medios.

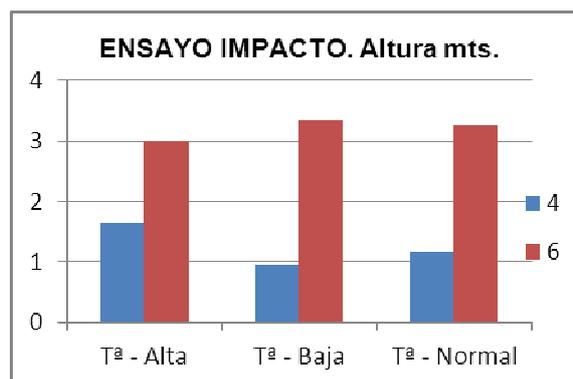


Figura 7.4.4. Influencia de la temperatura en el ensayo de impacto.

En cuanto a la resistencia al impacto, para el caso de 4 mm la relación es igualmente directa, pero no se aprecian resultados análogos en 6 mm, siendo estos resultados incongruentes con los anteriores. Se estima que es debido a la especial resistencia del grupo de probetas de baja temperatura, pero con alta presión, también influyente en los resultados, lo que impide determinar con precisión la causa origen de su resistencia al

mezclarse las dos variables. En este caso las variaciones son, por espesor, entre un 25 y un 5% respecto al valor medio.

## **7.5. EFECTOS DE LA PRESIÓN**

### **7.5.1. Introducción**

La presión es el otro factor fundamental en el proceso de templado. Ésta se produce mediante una instalación anexa al horno que dispone de potentes ventiladores que conducen aire a presión por unos conductos de gran diámetro (mayores de 1 metro) hasta las soplantes. Esta corriente de aire, como ya se ha dicho, debe ser constante durante todo el proceso de templado, para asegurar una adecuada distribución de tensiones en toda la superficie.

La regulación de la presión se realiza mediante la apertura o cierre de las entradas de aire a la instalación, regulando así la presión acumulada en la tubería. Otros sistemas más modernos pueden permitir regulaciones de los motores eléctricos, para variar las revoluciones de giro.

La medición de la presión se puede hacer de múltiples formas: Con sensores electrónicos o mediante sistemas físicos como sistemas manométricos de columna de agua. El aspecto importante es dónde puede ser medida, ya que el ideal es medir sobre la propia superficie del vidrio, pero en ningún caso se puede realizar esta medición. Es por esta razón que la comparación entre instalaciones, a diferencia de los casos de temperatura, no es directa, y se debe conocer el proceso de templado para su correcto análisis.

### 7.5.2. Análisis del efecto de la presión en el vidrio templado

En primer lugar, al igual que en el caso de la temperatura, se trata de determinar la relación entre el parámetro presión y la tensión de superficie conseguida. La gráfica adjunta representa dicha relación.

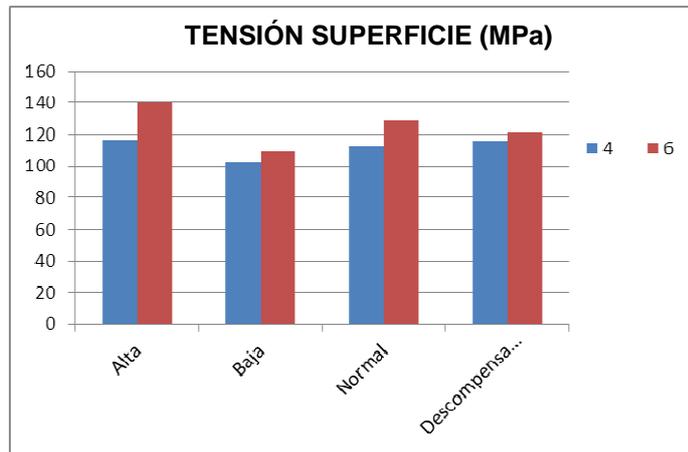


Figura 7.5.1. Influencia de la presión en la tensión de superficie.

En los resultados se aprecia una relación directa, a mayor presión de aire hay más tensión. En el caso de 4 mm la variación corresponde a un 7% y para el caso de 6 mm corresponde a un 11%, tomando como referencia el promedio, que coincide aproximadamente con el caso del parámetro normal, lo que indica cierta linealidad de la relación.

A continuación se presentan las gráficas que relacionan la presión con los resultados del ensayo de fragmentación, indicados por número de fragmentos y longitud de las agujas.

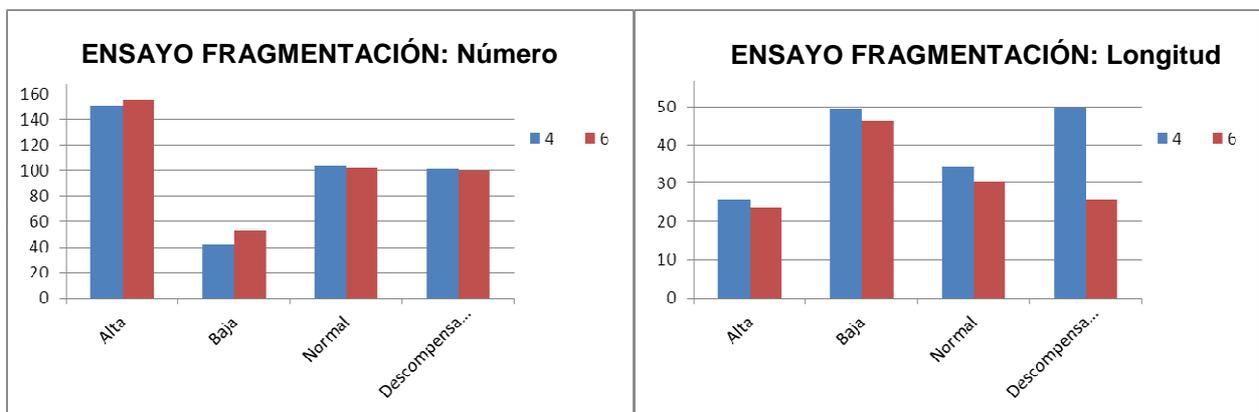


Figura 7.5.2. Influencia de la presión en el ensayo de fragmentación. La imagen de la izquierda presenta el número de fragmentos, mientras que la imagen de la derecha representa la longitud de las agujas.

La relación es más que evidente. Se aprecia con claridad que las probetas con alta presión consiguen mayor número de fragmentos además de las longitudes de aguja más pequeñas, ambos hechos deseables según la R43 (aunque tiene sus límites en número máximo de fragmentos también).

En los ensayos de flexión e impacto, se observa una suave tendencia a que las probetas de alta presión son más resistentes que las de baja y normal, aunque la relación es muy débil. Esto se desprende de que siempre mantienen la proporcionalidad (mayor, más resistente) aunque las diferencias son prácticamente inexistentes entre varios de los "escalones" establecidos entre alta-normal-baja presión, para cada espesor. Por tanto, la presión no es especialmente influyente en los resultados de los ensayos, frente a la representada por la temperatura. Las variaciones se presentan en valores cercanos al 2% de variación en todos los casos, ya sea en flexión o impacto y para los dos espesores.

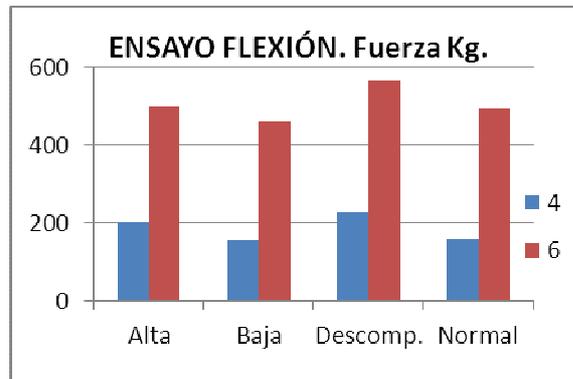


Figura 7.5.3. Influencia de la presión en el ensayo de flexión.

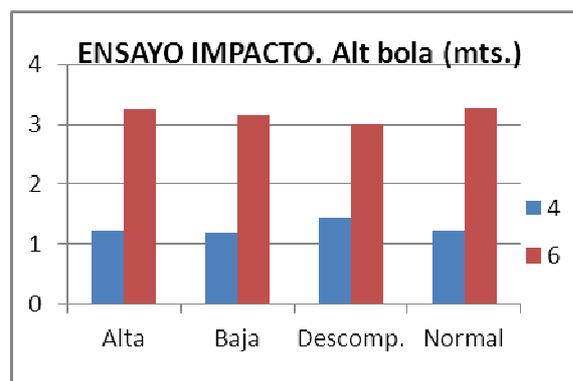


Figura 7.5.4. Influencia de la presión en el ensayo de impacto.

### 7.6. EFECTOS DE LA TEMPERATURA Y PRESIÓN COMBINADOS

Queda patente que la combinación de ambos parámetros dan resultados complejos de analizar, pero que muestran tendencias de comportamiento. Por esta razón se presentan las gráficas comparativas a modo de información, dejando una vía abierta de investigación que establezca las oportunas relaciones numéricas entre ellas. Para este fin sería necesario nuevas baterías de ensayos específicos.

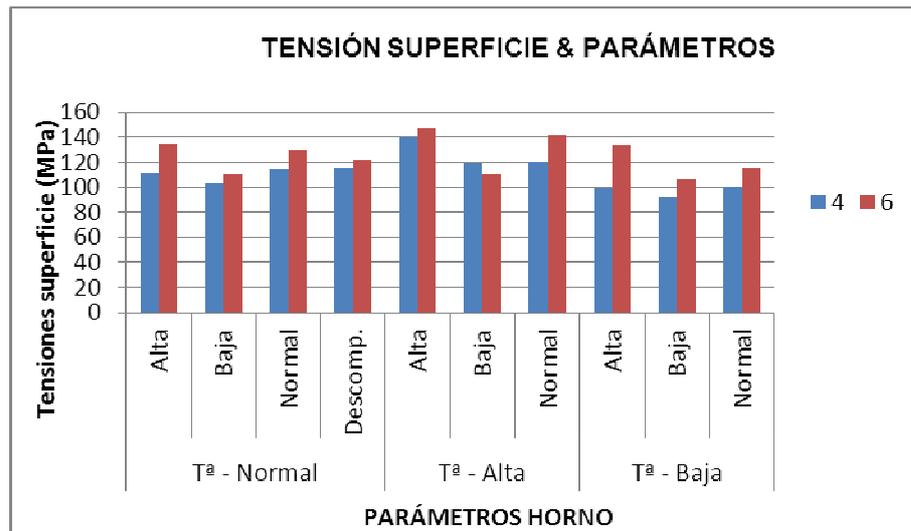


Figura 7.6.1. Influencia de la temperatura y presión combinados en la tensión de superficie..

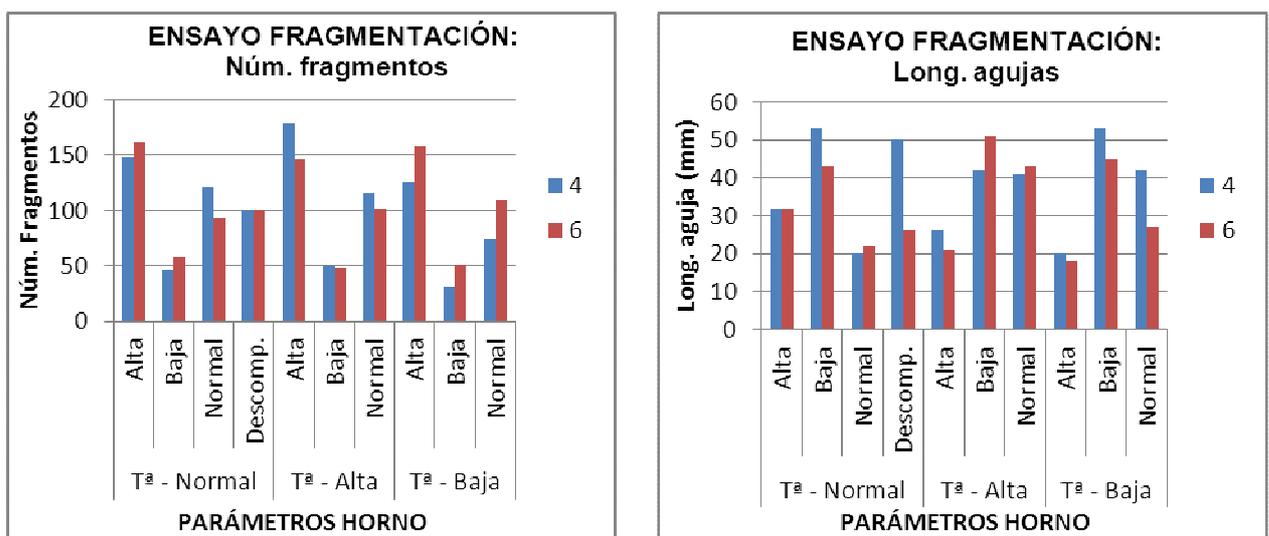


Figura 7.6.2. Influencia de la temperatura y presión combinados en el ensayo de fragmentación. La imagen de la izquierda representa números de fragmentos y la de la derecha longitud de las agujas.

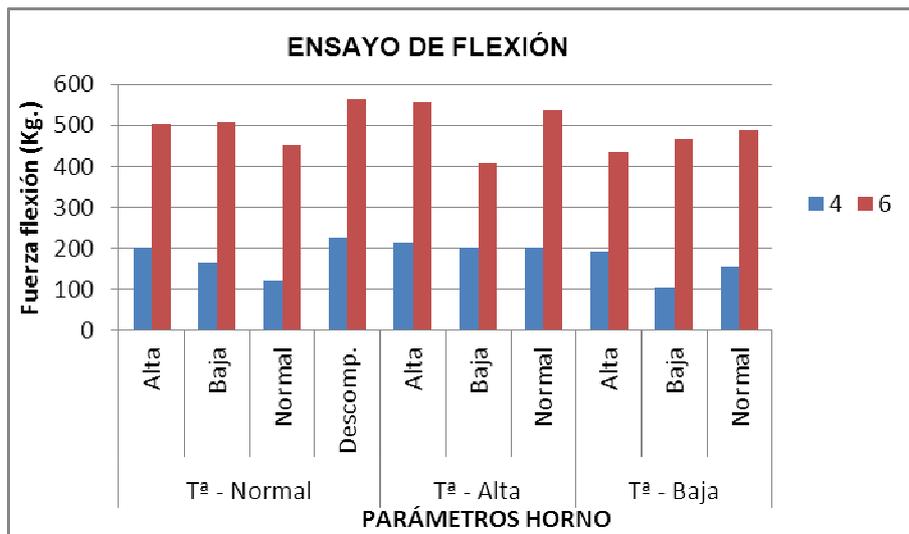


Figura 7.6.3. Influencia de la temperatura y presión combinados sobre el ensayo de flexión.

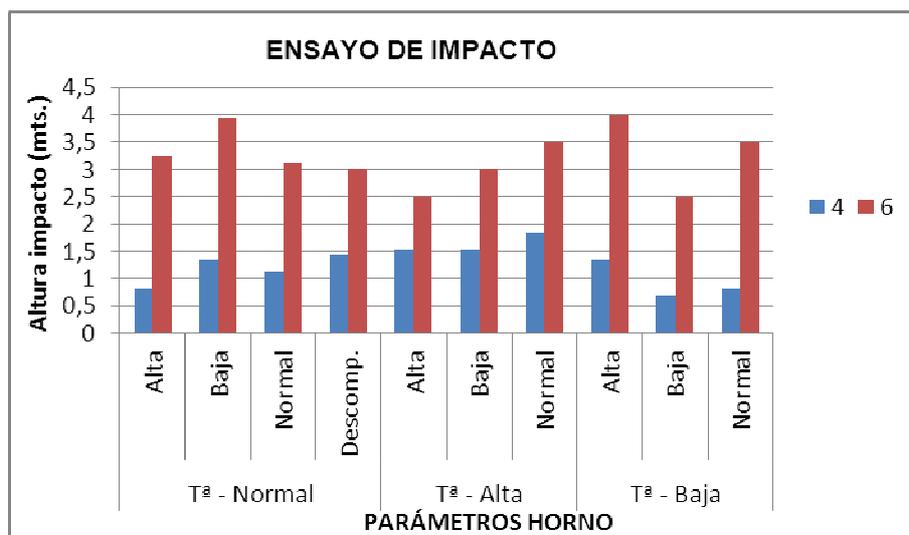


Figura 7.6.4. Influencia de la temperatura y presión combinados sobre el ensayo de impacto.

## 7.7. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS, PARA IGUALDAD DE TENSIONES DE SUPERFICIE

Se ha comprobado y corroborado con la bibliografía, que existe una relación directa entre tensiones de superficie y resistencia mecánica, ya sea en ensayos de flexión o impacto. Sin embargo, con los resultados obtenidos del presente trabajo se pretende comprobar si la simple medición de tensiones de superficie equivale a asegurar una cierta resistencia mecánica en los ensayos. Este aspecto es de especial relevancia, pues plantea aspectos no regulados y fuera de las especificaciones habituales en el sector.

A continuación se presenta una gráfica que muestra diferentes agrupaciones de probetas (se presentan los valores medios por grupos) que muestra una relación lineal entre las resistencias mecánicas (ensayo a flexión en este caso) y las tensiones de superficie en MPa. Las líneas de regresión presentan valores  $R^2$  elevados, confirmando pues la elevada relación lineal entre ambos factores. Sin embargo, la importancia de la gráfica no está en estas líneas de regresión, sino la falta de paralelismo entre ellas. Es decir, todas aquellas probetas fabricadas con las mismas condiciones, presentarán un comportamiento lineal entre la resistencia mecánica y las tensiones de superficie. Pero si los parámetros cambiasen, ya no habría linealidad entre ambos grupos.

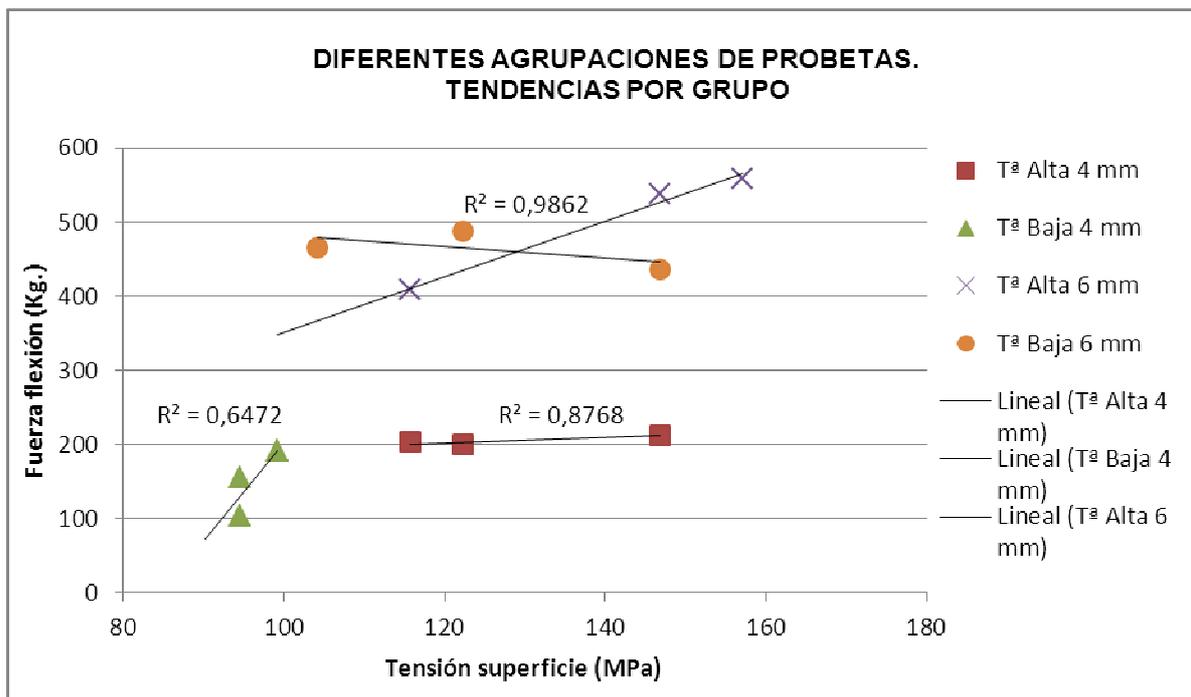


Figura 7.7.1. La gráfica muestra la relación entre las tensiones superficiales y resistencia a flexión. Aunque todas las agrupaciones muestran valores altos de  $R^2$ , la pendiente de las líneas de regresión no es la misma. Esto quiere decir que la proporcionalidad entre tensión de superficie y resistencia mecánica depende del tipo de parámetros de fabricación, y no exclusivamente de las tensiones.

Las pendientes entre todas las curvas nos claramente diferentes, lo que da idea de la falta de linealidad entre todas ellas.

En ésta otra gráfica se presenta las agrupaciones de probetas, separando por espesor, para un mismo ensayo, que se ha vuelto a tomar el de flexión.

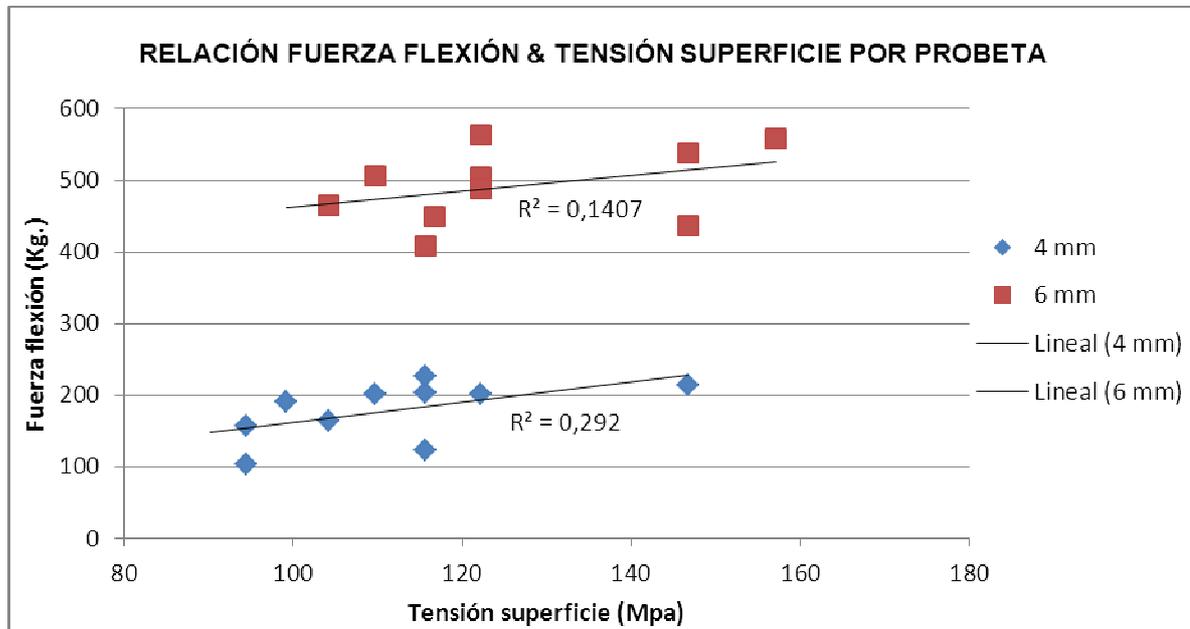


Figura 7.7.2. La gráfica presenta la relación entre tensión de superficie y resistencia a la flexión. En este caso la agrupación no es tan adecuada como la gráfica anterior (valores de  $R^2$  bajos) sin embargo la pendiente de ambas líneas de regresión es la misma. Esto confirma que, para mismos parámetros, la proporcionalidad se mantiene, corroborando así múltiples estudios que indican que para unos mismos parámetros, la tensión es proporcional a la

Los resultados, al igual que antes, presentan una disparidad importante entre tensión de superficie y resistencia a la flexión, ya que los números  $R^2$  en este caso es muy bajo. Se demuestra entonces que diferentes parámetros de producción, para mismas tensiones en un mismo espesor, no permite predecir el resultado mecánico de un ensayo. Es importante observar, sin embargo, que la pendiente general de la línea de regresión es prácticamente la misma. Es decir, que para diferentes espesores, considerando los mismos cambios de parámetros (han sido producciones análogas para 4 y 6 mm) el comportamiento es predecible.

Esta falta de coherencia entre tensiones y resultados esperados se verá aclarada en próximos apartados, analizando el estado tensional de los fragmentos y dándole importancia, por tanto, a los análisis posteriores para determinar el grado de fiabilidad de un vidrio.

## 7.8. CONCLUSIONES

A partir de los ensayos descritos, se han obtenido importantes conclusiones desde el punto de vista de interpretación de las tensiones y los parámetros de producción. A continuación se resumen los aspectos más destacados de los resultados obtenidos:

- Efectos de temperatura:
  - A mayor temperatura se consigue mayor tensión de superficie (entre el 6 y el 14% para las variaciones estudiadas)
  - No hay relación directa entre temperatura y fragmentación (ni en número ni longitud de fragmentos). Siempre y cuando se esté ya en resultados válidos para R43.
  - A mayor temperatura se consigue mayor resistencia a flexión (valores entre el 10 – 15% para las variaciones ensayadas)
  - A mayor temperatura se consigue mayor resistencia al impacto (entre el 10 – 15%, aunque este aspecto no se ha podido confirmar con 6 mm)
  
- Efectos de la presión:
  - A mayor presión de aire se consigue mayor tensión de superficie (con valores entre 7 – 11%)
  - Hay relación directa y muy influyente entre la presión de aire y el número de fragmentos y longitud de agujas. La presión es el parámetro fundamental para asegurar la fragmentación.
  - A mayor presión de aire se consiguen ligeros aumentos en las resistencias tanto a flexión como a impacto (variaciones del 2%)
  
- Existe una relación directa entre tensiones de superficie y resistencia mecánica, ya sea de flexión o impacto. Siempre que se mantengan los parámetros de producción.
  
- Diferentes parámetros de producción, para mismas tensiones, pueden dar lugar a diferentes resultados en los ensayos mecánicos.

## 8. FRAGMENTACIÓN Y TENSIONES INTERNAS

### 8.1. INTRODUCCIÓN

Es habitual confundir en el sector el grado de tensión en un vidrio a partir de la fragmentación presentada. Evitar caer en este error es de especial importancia en un análisis técnico de una rotura y/o producción, ya que determinar el estado tensional directamente es fundamental para la previsión de resistencia en los cálculos de diseño.

### 8.2. ANÁLISIS DE LA FRAGMENTACIÓN Y TENSIONES

En las siguientes gráficas se muestran las relaciones obtenidas en los ensayos realizados en el apartado 5 entre los resultados de la fragmentación y las tensiones internas obtenidas durante el proceso de templado, atendiendo a las probetas individualmente (identificación probeta, número desde 1 hasta el 100).

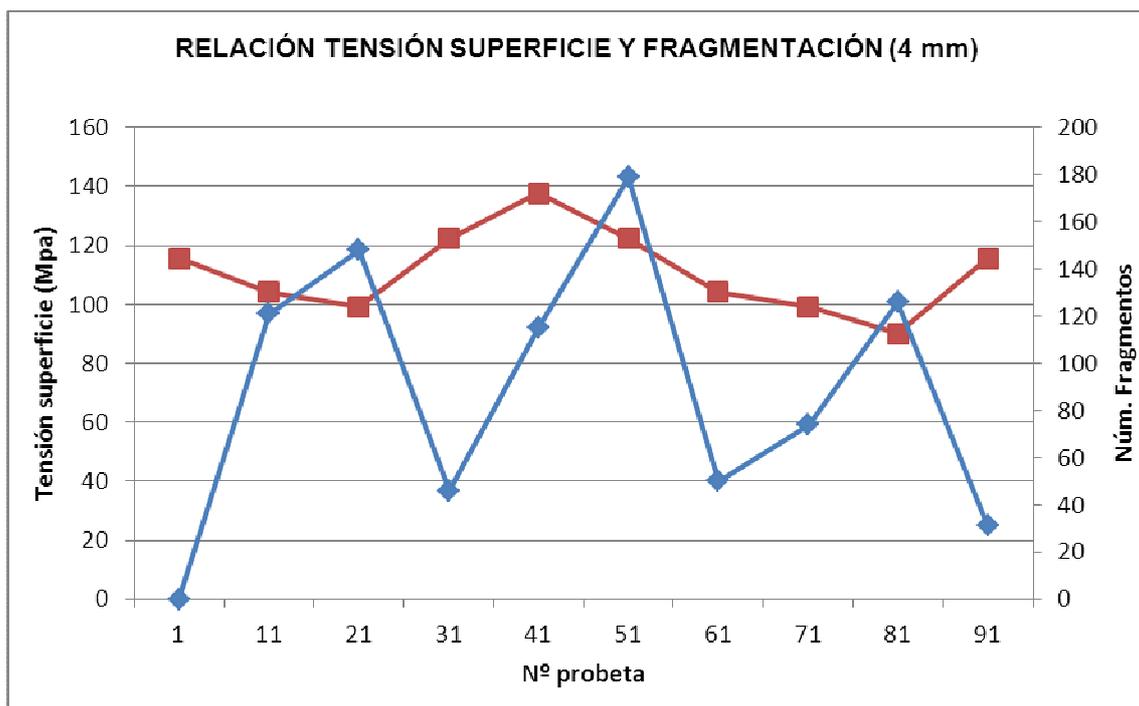


Figura 8.2.1. Relación entre la tensión de superficie y el número de fragmentos en el test de fragmentación para las probetas de 4 mm. La gráfica roja muestra la tensión, mientras que la azul muestra el número de fragmentos. No hay coherencia directa entre más tensión de superficie y número de fragmentos.

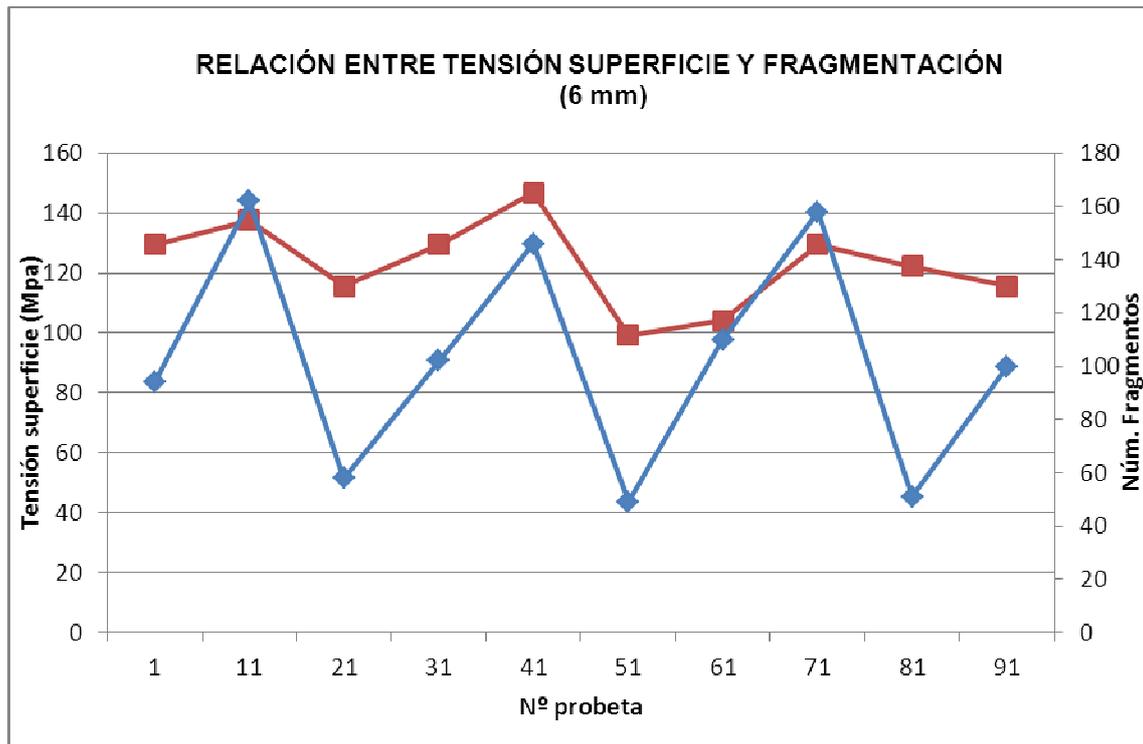


Figura 8.2.2. Relación entre la tensión de superficie y el número de fragmentos en el test de fragmentación, para las probetas de 6 mm. En este caso la relación es más evidente, aunque no es directamente proporcional ni mucho menos.

Los resultados, especialmente para el caso de 6 mm, presentan una cierta coherencia entre las probetas con más tensión como las de mayor número de fragmentos. Si bien es cierto que éste efecto se da, no pasa de ser una relación pobre, ya que no se demuestra igual para el caso de 4 mm. Además, las tendencias no están confirmadas.

Este tipo de ensayo, que es el frecuente a pie de máquina, da lugar a esta falsa sensación de relación directa, que es importante analizar con mayor detenimiento.

Por esta razón, se precisa de un análisis más profundo, relacionando directamente los números de fragmentos y las tensiones de superficie, por espesor. Para ello se plantea la siguiente gráfica:

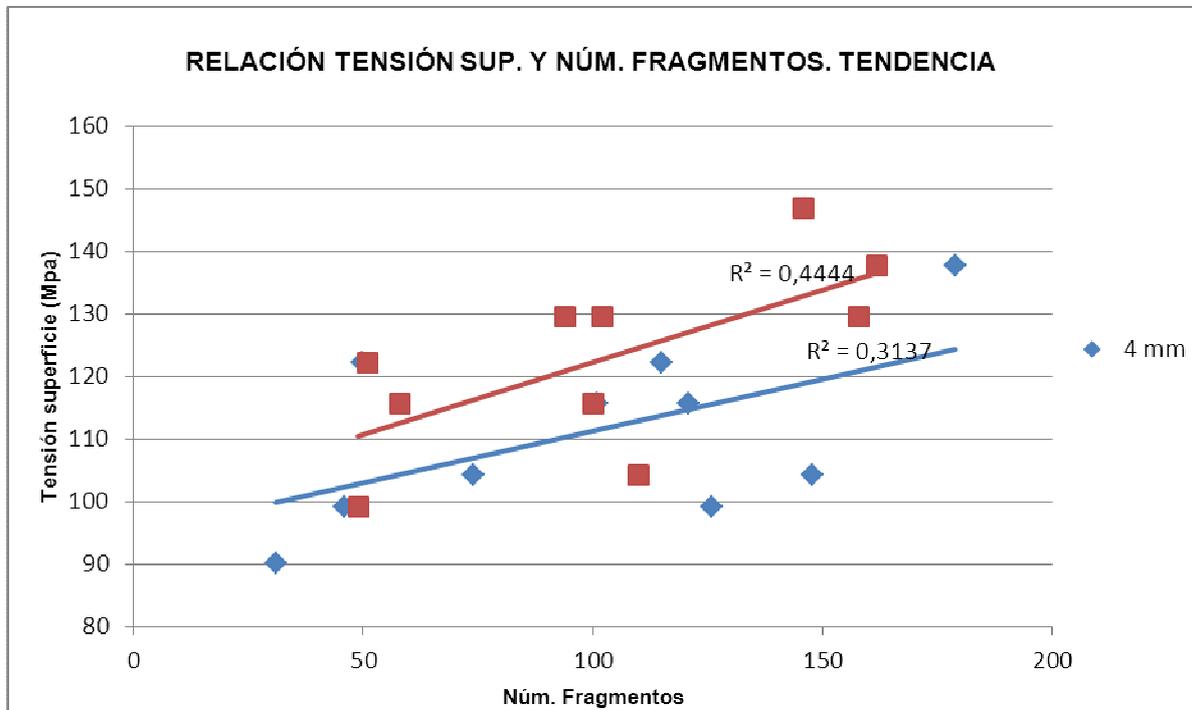


Figura 8.2.3. Tendencia en la relación entre número de fragmentos y tensión de superficie, analizado por espesor de vidrio. En efecto hay una tendencia que a mayor tensión mayor número de fragmentos. Sin embargo el coeficiente de correlación  $R^2$  es bajo. Esto es debido a que en esta agrupación se encuentran diferentes parámetros de fabricación.

Se comprueba que existe una pobre relación entre tensión de superficie y número de fragmentos. En efecto, cuanto mayor es la tensión mayor es el número de fragmentos, pero la agrupación y linealidad son especialmente pobres.

Estos resultados coinciden plenamente con los obtenidos por Hillar Aben y Johan Anton (del Institute of Cybernetics, Tallinn University of Technology, Estonia) donde indican “casi no hay correlación existente entre la tensión residual y el número de fragmentos....En consecuencia, los test de fragmentación solamente pueden ser usados como un mero indicador de que el panel ha sido tratado térmicamente. No permite sacar conclusiones sobre el valor de tensión de templado en el vidrio”.

### **8.3. CONCLUSIONES**

Queda, por tanto demostrado, y constatado por otros autores, que la valoración de la fragmentación no es muestra de la resistencia mecánica de un vidrio templado. Es puramente una demostración del propio tratamiento. Si es cierto que asegura la clasificación como vidrio de seguridad, frente a cortes debido al pequeño tamaño de los fragmentos obtenidos.

## **9. DISTRIBUCIÓN E INFLUENCIA DE LAS TENSIONES INTERNAS**

### **9.1. INTRODUCCIÓN**

Las tensiones residuales que quedan en el vidrio tras el proceso de fabricación, son las que aseguran una mayor resistencia mecánica posterior, ya que mantienen al vidrio tensionado en su núcleo y comprimido en su superficie. Esta configuración presenta un mejor comportamiento va la flexión, dado que el esfuerzo de deformación tiene que superar dicha compresión del borde además de la propia tensión cohesiva del material (unos 40 MPa).

Sin embargo es de relevante importancia el conocimiento de la influencia de la distribución de tensiones en el material.

Se pueden producir dos diferentes desequilibrios, atendiendo a la localización del mismo. Por un lado se puede interpretar diferencias en el espesor y por otro en la distribución de superficie. Ambos casos no tienen la misma causa de generación del problema. Pero ambos están directamente relacionados con parámetros y geometría de los utillajes, implicados en producción.

A continuación, a mero nivel informativo, se describen los dos aspectos, para su consideración en los análisis forenses de vidrios.

### **9.2. DESEQUILIBRIO TENSIONES EN LA MISMA SECCIÓN. DIFERENCIA ENTRE AMBAS SUPERFICIES**

En el apartado 5 se presentaron probetas con diferencia de presión entre la parte superior y la inferior. Esta diferencia genera diferencia de tensiones en ambas secciones. Una distribución de tensiones equilibrada da lugar a una parábola de tensión a lo largo de todo el espesor, tal y como representa la figura.

Sin embargo, un desequilibrio en las condiciones de presión o temperatura presenta gráficas de tensión modificadas entre ambas caras:

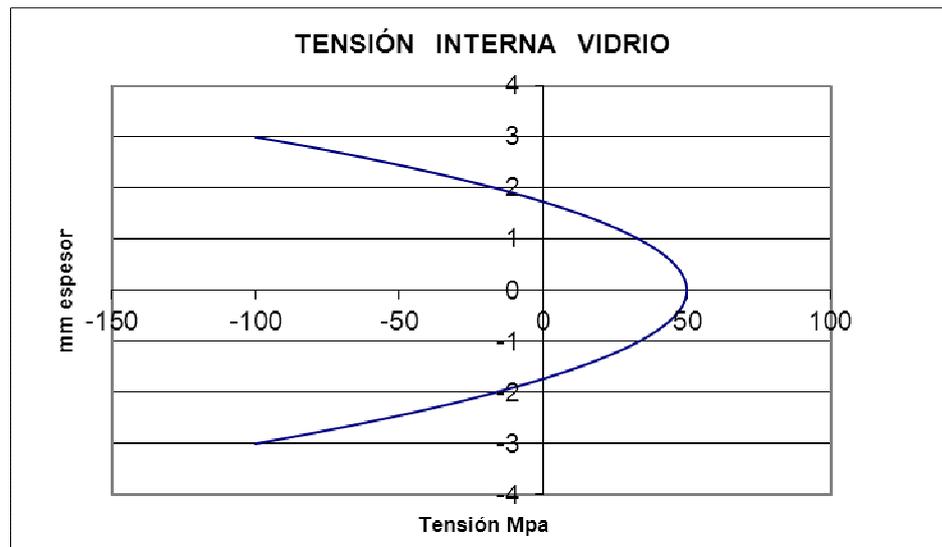


Figura 9.2.1. Gráfica de tensiones internas en un vidrio templado de 6 mm de espesor. La parte central (0 mm) se encuentra a tracción, mientras que los extremos (+3 y -3 mm) se encuentran a compresión.

Generando mayor tensión en la cara donde se ha conseguido mayor presión o diferencia de temperatura durante el momento del paso de la temperatura de transición vítrea.

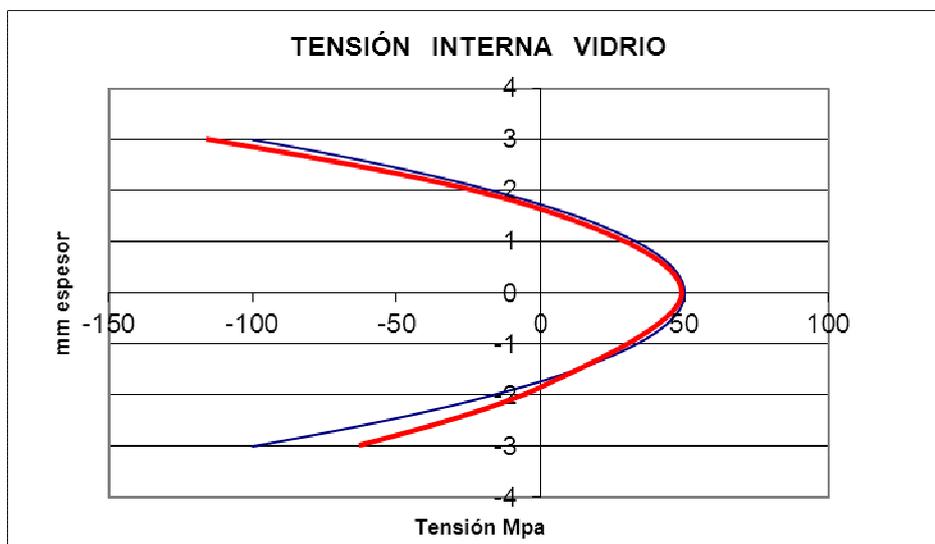


Figura 9.2.2. Curva de tensiones internas desequilibrada. Para un vidrio de 6 mm cuyo proceso no ha sido adecuadamente controlado se genera un desequilibrio de la parábola de tensión, presentando diferente valor entre la cara superior e inferior.

Estos efectos son un problema para la estabilidad del vidrio, ya que este desequilibrio puede generar problemas de roturas espontáneas o, cuando menos, provocar fallos a esfuerzos exteriores inferiores a los previstos, debido a que se llega a la tensión de rotura con mayor facilidad, debido a que no está compensada la presión interna del centro (a tracción).

En casos particulares, los resultados pueden ser favorables, como se vió en el apartado 5, cuando un ensayo a flexión sobre una probeta desequilibrada, pero colocada de forma que la máxima compresión interna esté en la parte de tracción de la flexión, fue la que mayor resistencia mecánica soportó en todo el estudio.

Los problemas de este tipo son localizados en puntos particulares del vidrio, debido principalmente a que la disipación de calor no es uniforme en ambas caras al mismo tiempo, provocando diferente esfuerzo respecto al centro de la masa, lo que genera la diferencia de tensión.

La medición es posible con simples polariscopios de uso frecuente en la industria, pero cuyo manejo requiere de unos conocimientos técnicos mínimos para que las mediciones sean de fiabilidad.

### 9.3. DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES EN LA PROPIA SUPERFICIE

Un aspecto de vital importancia en el resultado mecánico de un vidrio templado es la distribución de tensiones a lo largo de toda la superficie.

Cuando un vidrio entra en las soplantes, hay un movimiento relativo entre éstas y el propio vidrio que cuyo objetivo es mantener una distribución uniforme. Este movimiento, si bien en concepto es sencillo, supone una instalación especialmente compleja y requiere de múltiples parámetros de trabajo en máquina para su control



*Figura 9.3.1. Distribución de tensiones en la superficie del vidrio. Las líneas negras indican los puntos de tensión cero, donde la luz no se ve polarizada y se anula. Sin embargo en el resto de zonas la luz atraviesa, indicando un cambio en el plano de polarización. Se observa que el patrón es irregular, lo que denota una falta de uniformidad en la acción del aire sobre el vidrio en el momento del templado.*

Como todo proceso complejo, el control absoluto no existe, presentándose variaciones que pueden influir muy negativamente en el comportamiento final del producto.

El conocimiento y estudio de esta distribución es síntoma de un eficaz control de calidad y proceso en la industria del sector.

Como ya se describió en el capítulo 4, la birrefringencia del vidrio provoca cambios en la luz que lo atraviesa, medibles si dicha luz es polarizada. Estudiar estos vidrios con polariscopio es posible. Un análisis exhaustivo de esta distribución presenta especiales

efectos. Tomando una probeta de las estudiadas, se puede apreciar una distribución como la siguiente:

Analizando concienzudamente una sección del vidrio, la gráfica de tensiones resultante puede ser la presentada en la gráfica inferior.

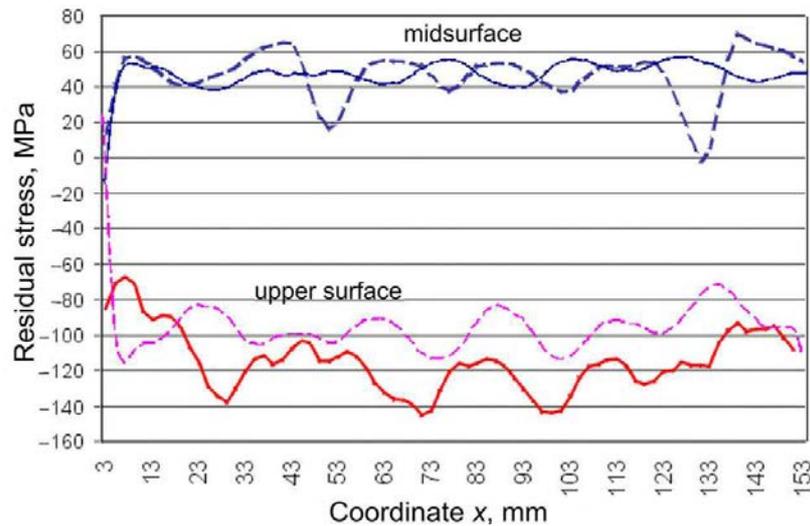


Figura 9.3.2. Tensiones internas de vidrio en ambas caras. Se observa que la variación es significativa al pasar la sección de estudio por la zona cerca de cada soplante. (Johan Anton, "On the inhomogeneity of residual stresses in tempered glass panels" *Estonian Journal of Engineering* 2012).

Diferencias de hasta 20 MPa son frecuentes entre los puntos consecutivos de las soplantes. Esto provoca diferente comportamiento en los ensayos, especialmente en los de impacto, dependiendo el punto exacto de aplicación del esfuerzo.

Además de la distribución y valores, es importante la diferencia entre la orientación de las mismas. La dirección de las tensiones principales puede provocar diferencias en las resistencias mecánicas durante un ensayo. El ejemplo práctico es el ensayo a flexión de la norma EN 1288-3, punto 7, donde se presenta un ensayo a flexión de 4 puntos, en condiciones controladas de temperatura y humedad.

En este ensayo además de la distribución, la orientación de las tensiones principales puede provocar diferentes resultados.

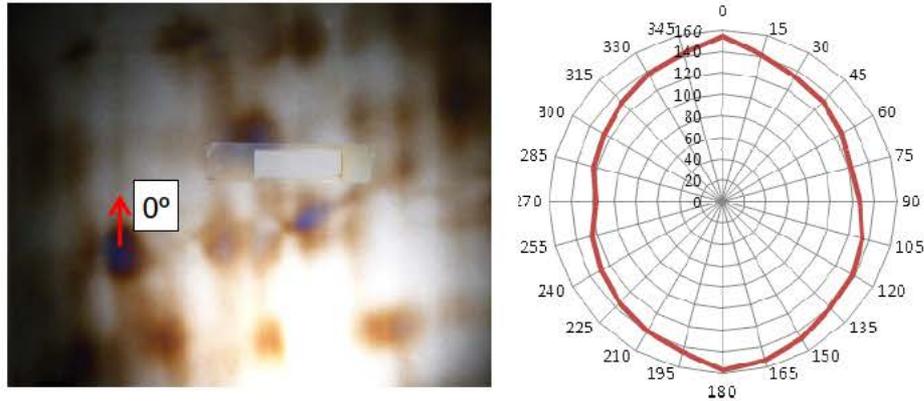


Figura 9.3.3. Figura 7.2. Para un mismo punto dado de la superficie, existen diferentes valores de tensión, en función de la dirección que se considere, encontrando diferencias de hasta 20 MPa.

#### 9.4. CONCLUSIONES

La simple medición de tensiones y conocimiento de parámetros de fabricación, comentados hasta éste apartado, no aseguran el correcto comportamiento de los vidrios. Si bien es cierto que estos aspectos de distribución son menos influyentes que los anteriores, su importancia es patente en aquellos usos específicos o incluso para explicar roturas no controladas en los ensayos pertinentes de cada proyecto.

Su conocimiento, y si fuera el caso, determinación, son importantes de cara a poder realizar análisis forenses de confianza.

## **10. ANÁLISIS DE LA NORMATIVA VIGENTE Y SU EFICACIA**

### **10.1. INTRODUCCIÓN**

Existe múltiple normativa regulatoria para cada tipo de aplicación de vidrio. Automóvil, ferrocarril y construcción son las más frecuentes, existiendo otras posteriores que en general se basan en éstas.

Cada país ha adoptado ensayos particulares, pero asociaciones de los mismos han dado lugar a documentos más generales, ampliamente aceptados. Así, por ejemplo, en automoción se utiliza la homologación correspondiente al Reglamento R43 de la UNECE, principalmente para Europa. Para América existe la FMVSS 205 del DOT (Department of Transportation) y para China la CCC (China Compulsory Certification).

En todos ellos se exige fundamentalmente ensayos de fragmentación durante las producciones y ensayos de impacto o flexión. En la legislación inglesa BS (British Standard) hace mención a valores tensión, pero dentro del contexto de ensayos como valores aconsejables, pero no es de obligado cumplimiento.

En la construcción ocurre lo mismo. Cada país adopta sus especificaciones particulares, resultando posteriormente asociaciones en reglamentos comunes. La EN12150 es la de referencia en España. Hace mención a la fragmentación y resistencia al impacto, y también valores de tensión, pero como estudio comparativo. La norma EN1288 especifica un ensayo a flexión apoyado en 4 puntos, pero igualmente no referencia a valores de tensión. De forma parecida ocurre con el ensayo especificado en EN12600.

Estudios profundos sobre este asunto muestran claramente la importancia de controlar las tensiones como parámetro fundamental para asegurar el cumplimiento de las normas y asegurar la calidad y seguridad de los productos.

### **10.2. CASO AUTOMOCIÓN**

El Reglamento N<sup>o</sup>. 43 UN/ECE, correspondiente a la directiva 92/22/CEE establece unos ensayos de fragmentación determinados para calificar el producto estudiado como "vidrio de seguridad".

Además de varios ensayos (ver figura 8.2.1), se establecen como únicos requisitos de templado de seguridad un ensayo de fragmentación y uno de impacto. El primero consiste en golpear en el centro de la pieza con un útil establecido de punta fina, de modo

que se provoque la rotura espontánea de todo el panel. Manteniendo el mismo sujeto adecuadamente, se consigue disponer del patrón entero de rotura, para su análisis posterior.

Tests	Windscreens						Glasspanes			
	Toughened glass		Ordinary laminated glass		Treated laminated glass		Glass-plastics	Toughened glass	Laminated glass	Glass-plastics
	I	I-P	II	II-P	III	III-P	IV			
Fragmentation:	A4/2	A4/2	-	-	A8/4	A8/4	-	A5/2	-	-
Mechanical strength										
- 227 g ball	-	-	A6/4.3	A6/4.3	A6/4.3	A6/4.3	A6/4.3	A5/3.1	A7/4	A7/4
- 2,260 g ball	-	-	A6/4.2	A6/4.2	A6/4.2	A6/4.2	A6/4.2	-	-	-
Headform test <sup>1</sup>	A4/3	A4/3	A6/3	A6/3	A6/3	A6/3	A10/3	-	A7/3	A11/3
Abrasion										
Outer face	-	-	A6/5.1	A6/5.1	A6/5.1	A6/5.1	A6/5.1	-	A6/5.1	A6/5.1
Inner face	-	A9/2	-	A9/2	-	A9/2	A9/2	A9/2 <sup>2</sup>	A9/2 <sup>2</sup>	A9/2
High temperature	-	-	A3/5	A3/5	A3/5	A3/5	A3/5	-	A3/5	A3/5
Radiation	-	A3/6	A3/6	A3/6	A3/6	A3/6	A3/6	-	A3/6	A3/6
Humidity	-	A3/7	A3/7	A3/7	A3/7	A3/7	A3/7	A3/7 <sup>2</sup>	A3/7	A3/7
Light transmission	A3/9.1	A3/9.1	A3/9.1	A3/9.1	A3/9.1	A3/9.1	A3/9.1	A3/9.1	A3/9.1	A3/9.1
Optional distortion	A3/9.2	A3/9.2	A3/9.2	A3/9.2	A3/9.2	A3/9.2	A3/9.2	A3/9.2 <sup>3</sup>	-	-
Secondary image	A3/9.3	A3/9.3	A3/9.3	A3/9.3	A3/9.3	A3/9.3	A3/9.3	A3/9.3 <sup>3</sup>	-	-
Resistance to temperature changes	-	A3/8	-	A3/8	-	A3/8	A3/8	A3/8 <sup>2</sup>	A3/8 <sup>2</sup>	A3/8
Fire resistance	-	A3/10	-	A3/10	-	A3/10	A3/10	A3/10 <sup>2</sup>	A3/10 <sup>2</sup>	A3/10
Resistance to chemicals	-	A3/11.2.1	-	A3/11.2.1	-	A3/11.2.1	A3/11.2.1	A3/11.2.1 <sup>2</sup>	A3/11.2.1 <sup>2</sup>	A3/11.2.1

Figura 10.2.1: Tabla de ensayos del Reglamento R43 de la UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). No se aprecia ningún ensayo de medición de tensiones en el vidrio.

En este ensayo se debe determinar el punto con más y con menos fragmentos, para hacer el recuento pertinente. De igual modo, se analizan las agujas, seleccionando aquella que presente mayor longitud.



Figura 10.2.2: Ensayo de fragmentación en un vidrio templado. Fotografía de análisis de producción (Cortesía Starglass S.A.)

Como ya se ha demostrado en este estudio, este ensayo asegura una fractura en parte pequeñas, que corresponde con un vidrio de seguridad, pero no asegura un

comportamiento mecánico del vidrio. En ningún momento se solicitan estudios de tensión que ayuden al diseño del vidrio y confirmen su resistencia mecánica.

La norma americana FMVSS 205 (basada en la ANSI/SAE Z26.1 96) válida para Estados Unidos y Canadá, establece los mismos ensayos de fragmentación, impacto y añade el impacto de cuerpo blando, consistente en un ensayo de impacto de un saco de arena sobre el vidrio, simulando un impacto de un cuerpo. Al igual que la normativa europea, carece de ensayos de tensiones.

La norma China (CCC GB 9656 – 2003 Safety Glazing Materials for Road Vehicles) está basada íntegramente en el Reglamento nº43. Lo mismo ocurre con la norma rusa GOST R41.43.2005, que hace referencia al mismo reglamento para la homologación de los vidrios en Rusia.

Existen, aun así, varias normas de países individuales que hacen referencia a medias de tensiones, como es el caso de la British Standard 857, apartado D Uniformed Tension, página 13. En ella habla de un ensayo con un equipo de polarizadores (figura 8.2.3), haciendo referencia a una valoración de la distribución de tensiones, y comparando los vidrios de una misma serie, con el objeto de asegurar que todos son cualitativamente similares. No se hace referencia a valores específicos ni límites.

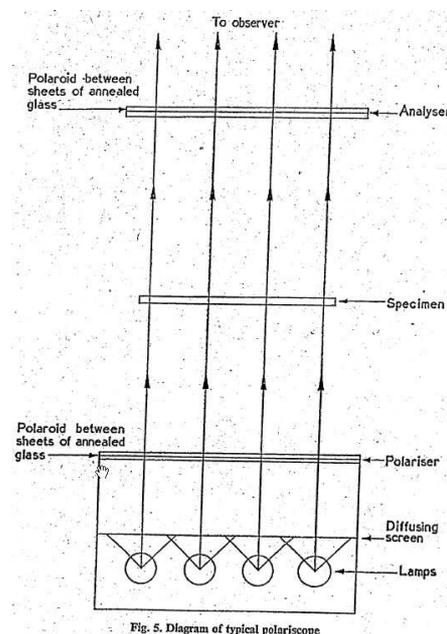


Figura 10.2.3: Ensayo de uniformidad de tensión, BS 857/D. La figura muestra la imagen de la norma donde se indica la composición del equipo de medida.

Además de todas estas normas, lo más frecuente es que los fabricantes establezcan sus propias normas de requisitos. Así, los grandes fabricantes disponen de normativa específica donde, en términos generales, sí establecen ensayos y límites específicos, en

función de su experiencia y estudios. Por término general estas normas sí son avanzadas y precisas, estableciendo límites reales a la producción y asegurando que el producto sea el necesario para su aplicación.

Sin embargo, en el sector de automoción, existen multitud de otros fabricantes que no son los grandes de referencia. Hay que tener en cuenta que dicho sector está formado también por todo tipo de vehículo automotriz, no solamente los automóviles y utilitarios. Así, por ejemplo, maquinaria industrial de construcción o agrícola, vehículos de aeropuerto o puertos marítimos, vehículos de transporte especiales, etc. Además de ello, existen multitud de fabricantes de vehículos de series cortas, como son micro-coches, deportivos y vehículos de carreras o exhibición. Todos ellos no contemplan más de la normativa vigente establecida por ley, por consiguiente no realizando los estudios tensionales adecuados.

### 10.3. CASO CONSTRUCCIÓN

La normativa sobre construcción es muy amplia a nivel internacional. En España son de obligado cumplimiento las normas UNE. Para el vidrio templado está establecida la UNE 12150. En dicha norma, parte 1, apartado 9.4 Resistencia Mecánica, se hace referencia a una tabla de límites de tensiones en el vidrio, para medición de tensiones exclusivamente de superficie (ya se ha demostrado que resulta una medición insuficiente para asegurar la estabilidad del vidrio). Además, se indica, textualmente: "El valor de resistencia mecánica (haciendo referencia a los límites de tensiones de superficie) sólo podrá darse como valor estadístico en conexión con la probabilidad de rotura y con un tipo particular de carga". La misma norma, en su parte 2, apartado 5.22.4, hace referencia a la medida de superficie pretensionada, pero al igual que la British Standard de automoción, solamente como comparativa entre antes y después del ensayo de fragmentación y/o ensayo.

La norma EN 1863-1 y 2 establece las condiciones de fabricación de vidrios templados y termoendurecidos para construcción. Al igual que el caso anterior, hace referencia a ensayos de pretensión de la superficie, como control comparativo de la producción.

#### 10.4. CASO FERROCARRIL

La normativa de ferrocarril más difundida es la francesa, con las NF como referencia. La NF 31129 establece los criterios fundamentales para la seguridad en los vidrios a instalar en el ferrocarril, y al igual que el caso de la normativa de automoción, no hay referencia directa a las tensiones. El mismo caso ocurre con la normativa belga L48, donde los ensayos de fragmentación, impacto de bola y cuerpo blando son los ensayos de control de la resistencia mecánica y de seguridad.

Sin embargo, igual que los grandes fabricantes de automóviles, cada fabricante de trenes europeo dispone de normas particulares donde sí se establecen criterios de seguridad desde el punto de vista tensional, asegurando que la producción es coherente con las aplicaciones establecidas. En el caso del ferrocarril, son muy frecuentes las especificaciones referentes a la resistencia mecánica en cruce con otros trenes o entradas y salidas de túneles, donde las presiones en los vidrios que forman las ventanillas son de consideración.

#### 10.5. CONCLUSIONES

En términos generales, la normativa vigente no hace referencia a la medición de tensiones de forma explícita.

En la normativa de automoción y ferrocarril, por término general, ni siquiera se mencionan ensayos básicos de medida. En la normativa de construcción sí hay referencia ellos, pero en ocasiones no son de obligado cumplimiento y en otras son a modo de control estadístico de uniformidad de la producción.

La realidad es que las tensiones en los vidrios es algo perfectamente conocido especialmente en automoción y ferrocarril, pero solamente aplicable a grandes fabricantes, en la vanguardia del diseño y seguridad. Las normas aseguran un cumplimiento básico de seguridad, sin exigir condiciones de uso particulares. Se entiende que los fabricantes establecerán su normativa específica. En conclusión, el cumplimiento con la legalidad estrictamente, no asegura un diseño adecuado para el uso destinado.

En el caso de construcción, las especificaciones de las grandes constructoras no entran en detalles técnicos sobre el vidrio, por lo que normativa legal es la más frecuente desde el punto de vista de seguridad. Aunque sí se hace mención a la tensiones, éstas son menos restrictivas que las normas particulares de automoción.

Como conclusión final, se confirma que la normativa cumple con los criterios básicos de seguridad, tratando de permitir la producción y fabricación de vidrio para los usos establecidos. Sin embargo, el cumplimiento de dicha reglamentación no asegura un producto de calidad para aplicaciones más exigentes, donde las tensiones internas puedan marcar la diferencia entre un buen o mal diseño. Para ello, cada fabricante o constructor deberá establecer sus propios criterios de seguridad o límites tensionales, en función de sus necesidades. Lo que conlleva un equipo técnico y el conocimiento necesario para definir dicha especificación, aunque estos recursos solamente están al alcance de pocos fabricantes.

## 11. CONCEPTO DE FRACTURA

### 11.1. TEORÍA DE LA FRACTURA

La teoría de la fractura se ha desarrollado hace muchos años, a partir de estudios que tratan de localizar y analizar las causas que generan el inicio de la rotura y su propagación para diferentes materiales. Los conocimientos adquiridos por diferentes investigadores permiten relacionar el nivel de esfuerzo externo, estado del material (cohesión y defectos), así como la tensión interna con los límites del material, de manera que se pueda determinar los criterios válidos para un diseño seguro de los sistemas.

En principio, la resistencia de un material a la rotura es consecuencia de las fuerzas cohesivas que existen entre sus átomos (caso del vidrio, roturas de los enlaces Si-O). Algunos investigadores estiman un valor de  $E/10$ , siendo  $E$  el módulo de elasticidad ( $E_{\text{vidrio}} = 70.000 \text{ MPa}$ ). Sin embargo, al menos en el caso del vidrio, esta rotura se encuentra muy por debajo de este valor, esfuerzos de 50 ó 70 MPa (en el vidrio, dependiendo del esfuerzo aplicado) pueden causar roturas en los vidrios comunes.

Basado en el documento escrito por Salvador Ortolá (Principios de la mecánica de la fractura), a continuación se describe básicamente la mecánica de la fractura y sus fundamentos. Este hito es fundamental para entender los aspectos posteriores en el análisis de la fractura desde el punto de vista tensional y energético.

Existen varias teorías para justificar esta diferencia, siendo la más aceptada la que planteó A.A. Griffith ya al principio del siglo XX; indicando que la causa es la existencia de micro defectos en la masa del material que por concentración de tensiones causan la rotura con mucho menos esfuerzo que el teórico según los enlaces atómicos. Para ello realizó varios ensayos con vidrio, generando ligeras mellas en las probetas y relacionando éstas con la tensión aplicada.

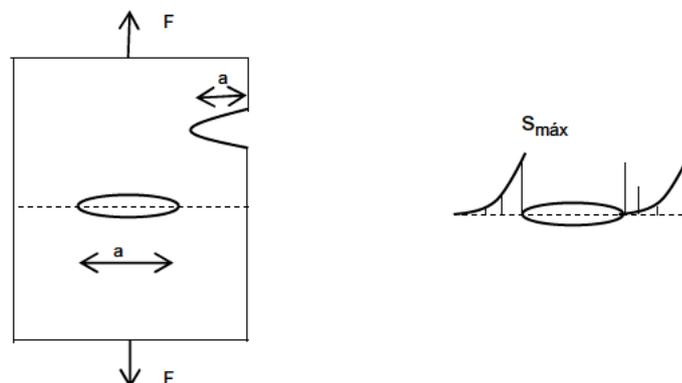


Figura 11.1.1. La imagen de la izquierda representa una placa de vidrio con dos posibles defectos microscópicos. En la representación de la derecha se muestra la concentración de tensiones en los radios de la grieta.

Según se aprecia en la imagen, la tensión aumenta según se acerca a la esquina de la falla, lo que ocasiona el origen de la rotura, incluyendo entonces el concepto de "Concentración de tensiones". Griffith supuso en un inicio una grieta en forma elíptica, con su eje mayor perpendicular al sentido de la carga aplicada, obteniendo la ecuación:

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho_t}\right)^{1/2} \quad (\text{Ec.1})$$

Dónde:

$\sigma_0$  es la magnitud de la tensión nominal aplicada,

$\rho_t$  es el radio de curvatura de la punta de la grieta,

$a$  representa la longitud de una grieta superficial o la mitad de una grieta interna.

En definitiva, mediante pruebas experimentales, averiguó que la tensión en la grieta y la longitud de la falla tenían relación constante en sus experimentos. Por tanto, al cociente  $\sigma_m/\sigma_0$  se denomina **factor de concentración de tensiones  $K_t$**  y se puede representar como:

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2 \left(\frac{a}{\rho_t}\right)^{1/2} \quad (\text{Ec.2})$$

Este factor  $K_t$  es un indicador de la amplificación que sufre una carga pequeña aplicada en el sólido, que con la concentración de tensiones en una grieta pequeña, llega a ser muy elevada. Aunque en el caso del vidrio muy especialmente, estos defectos no se deben exclusivamente a casos microscópicos, también efectos como taladros o geometrías particulares pueden presentar puntos de concentración que provoquen rotura en la pieza.

Este fenómeno de concentración es crítico en materiales frágiles, donde la ausencia de plasticidad provoca la rotura inmediata de la pieza en caso de superar los valores límite. Griffith desarrolló una teoría energética para explicar el fenómeno, calculado la energía interna disponible en una placa sometida a tensión, y la misma placa con una grieta, según los siguientes esquemas:

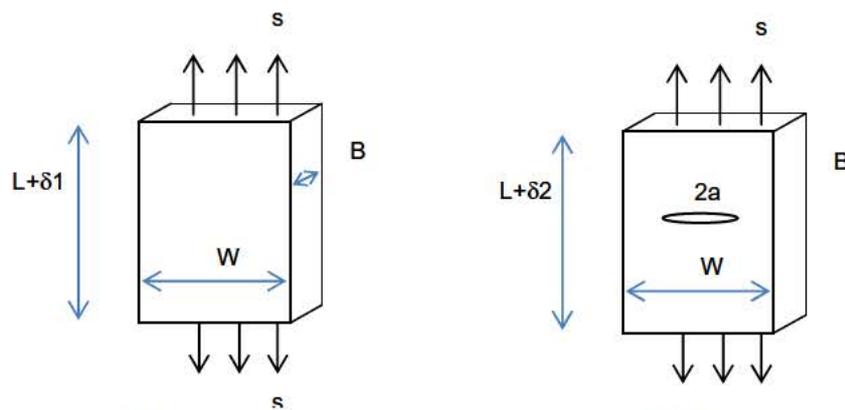


Figura 11.1.2. La placa de la izquierda no tiene grieta que la debilite, mientras que la placa de la derecha presenta una grieta e medio que provoca una deformación mayor debido a la menor rigidez.

Durante la propagación de una grieta se produce lo que se denomina liberación de energía de deformación elástica, o sea, parte de la energía que es almacenada en el material (Teoría de Clapeyron) cuando es deformado elásticamente. También se forman nuevas superficies en las caras de la grieta cuando ésta se extiende, lo cual origina un incremento en la energía superficial del sistema. Griffith desarrolló un criterio para la propagación de una grieta elíptica realizando un balance energético entre estas dos energías. Demostró que la tensión crítica que se requiere para propagar una grieta en un material frágil viene dada por la siguiente expresión:

$$\sigma_c = \left( \frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (Ec.3)$$

Dónde:

$E$  Es el módulo de elasticidad

$\gamma_s$  Energía superficial específica

$a$  Mitad de la longitud de una grieta interna

En esta expresión no aparece el radio de curvatura de la punta de la grieta,  $r_t$ , al contrario de la ecuación de concentración de tensiones (Ec.1); sin embargo, se supone que el radio es suficientemente pequeño para aumentar la tensión local en el extremo de la grieta por encima de la resistencia cohesiva del material.

El desarrollo previo se **aplica a materiales completamente frágiles** para los cuales no hay deformación plástica. La mayoría de los metales y muchos polímeros experimentan alguna deformación plástica antes de la fractura, esto produce una deformación del extremo de la grieta, o sea, un aumento en el radio del fondo de la grieta y, por consiguiente, aumenta

la resistencia a la fractura. Matemáticamente, esto puede tenerse en cuenta reemplazando  $\gamma_s$  en la ecuación anterior por  $\gamma_s + \gamma_p$ , donde  $\gamma_p$  representa la energía de deformación plástica asociada con la extensión de la grieta. Para materiales muy dúctiles, puede ocurrir que  $\gamma_p$  sea muy superior a  $\gamma_s$ . Posteriormente G.R. Irwin propuso incorporar ambos términos en una única ecuación, resultando  $B = 2(\gamma_s + \gamma_p)$ . A este término se conoce como energía disponible para la fractura. Ésta se produce cuando  $B$  excede de un valor límite, denominado  $B_c$ .

### 11.1.1. Análisis tensional en el entorno del fondo de una grieta

Al continuar explorando el desarrollo de la mecánica de la fractura, es importante examinar la distribución de tensiones en la vecindad del fondo de la grieta. Existen tres maneras fundamentales, o modos, mediante los cuales una carga puede actuar sobre una grieta, y cada uno produce desplazamientos diferentes en la superficie de la misma; estos modos están ilustrados en la siguiente figura:

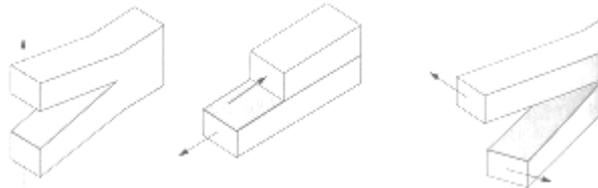


Figura 11.1.3. Modos de carga de una grieta. (Imagen de Salvador Ortolá).

El modo I es una carga de apertura ó de tracción, mientras los modos II y III son modos de deslizamiento y de desgarre, respectivamente. El modo I es el que ocurre con mayor frecuencia y el único que será tratado en este módulo teórico de mecánica de la fractura.

Para este caso, las tensiones resultantes en el fondo de la grieta son:

$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_x(\theta) \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_y(\theta) \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\tau_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{xy}(\theta) \quad (\text{Ec. 6})$$

Estas ecuaciones se obtienen a partir de la teoría de elasticidad, y son funciones de la distancia  $r$  y el ángulo  $\theta$  de la grieta.

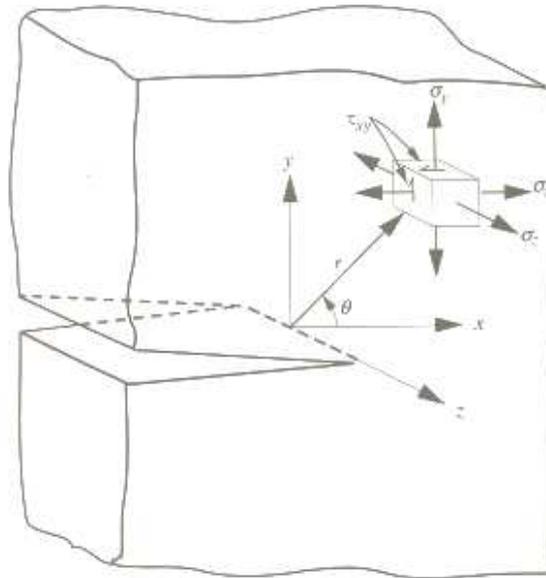


Figura 11.1.4. Estado tensional en el entorno del fondo de una grieta. (Imagen de Salvador Ortolá).

En las ecuaciones anteriores,  $K$  se denomina factor de intensidad de tensiones; determina la magnitud de la distribución de tensiones alrededor del fondo de la grieta. Debe notarse que ese factor de intensidad de tensiones y el factor de concentración de tensiones  $K_t$ , aunque similares, no son equivalentes. El valor del factor de intensidad de tensiones es una función de la tensión aplicada, el tamaño y la posición de la grieta, así como de la geometría de la pieza sólida en la cual esta localizada la grieta.

### 11.1.2. Tenacidad a la fractura

En la exposición anterior se desarrolló un criterio para la propagación de una grieta en un material frágil que contiene un defecto; la fractura ocurre cuando el nivel de tensión aplicada excede un valor crítico  $\sigma_c$  (Ec.3). Análogamente, puesto que las tensiones en el entorno del fondo de la grieta quedan definidas en términos del factor de intensidad de tensiones, debe existir un valor crítico también de este parámetro, el cual puede utilizarse para especificar las condiciones de fractura frágil; este valor crítico se denomina **tenacidad a la fractura**,  $K_c$ . Se expresa:

$$K_c = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (\text{Ec.7})$$

Dónde:

*Y es un parámetro sin dimensiones que depende de la geometría de la pieza y de la grieta.*

Por definición, la tenacidad a la fractura es una propiedad que es una medida de la resistencia del material a la fractura frágil cuando una grieta está presente. Debe notarse que la tenacidad de fractura tiene las unidades inusuales de  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

Para probetas relativamente delgadas, el valor  $K_c$  dependerá del espesor de las probetas,  $B$ , y disminuirá al aumentar éste, tal como está indicado en la figura de abajo. Eventualmente,  $K_c$  se hace independiente de  $B$ , cuando existen condiciones de deformación plana. El valor de la constante  $K_c$  para probetas más gruesas se denomina tenacidad a la fractura en deformación plana  $K_{1c}$ , la cual también se define mediante:

$$K_{1c} = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (\text{Ec. 8})$$

Esta es la tenacidad a la fractura normalmente citada puesto que su valor es siempre inferior a  $K_c$ . El subíndice 1 de  $K_{1c}$  indica que este valor crítico de  $K$  es para el modo I de desplazamiento de la grieta. Los materiales frágiles, para los cuales no es posible que ocurra apreciable deformación plástica en frente de la grieta, tienen valores pequeños de  $K_{1c}$  y son vulnerables a la rotura catastrófica. Además, los valores de  $K_{1c}$  son relativamente grandes para materiales dúctiles.

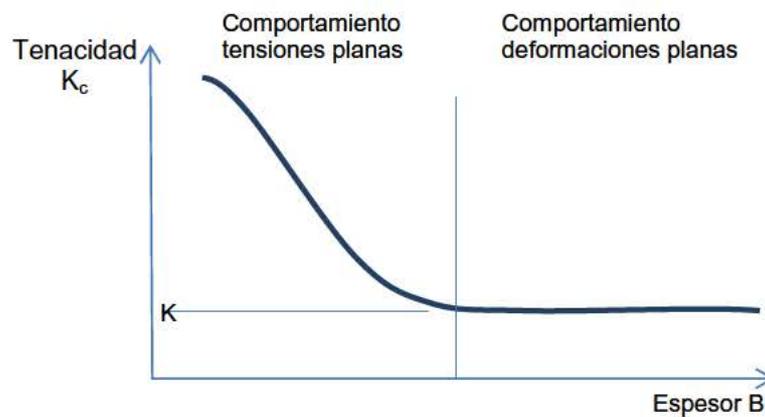


Figura 11.1.5. Influencia del espesor en la tenacidad a la fractura.

El factor de intensidad de tensiones  $K$  en las ecuaciones 4, 5 y 6 y la tenacidad a la fractura en deformación plana  $K_{1c}$  están relacionados de una forma similar a como lo están las tensiones y el límite elástico. Un material puede estar sometido a muchos valores distintos de tensión; sin embargo, existe un nivel de tensión, es decir el límite elástico, bajo el cual el material se deforma plásticamente. De la misma manera,  $K$  puede tomar muchos valores, mientras que  $K_{1c}$  es único para un material determinado.

## 11.2. FRACTOGRAFIA DEL VIDRIO

Se denomina fractología a la ciencia que estudia la causa, comportamiento, forma y tipo de rotura de un material. Por fractografía se entiende la parte de dicha ciencia que utiliza la imagen de la fractura para el análisis. En el caso del vidrio, se denomina superficie de fractura a la nueva superficie creada una vez el vidrio se ha dividido en pedazos. El análisis del origen de la fractura desvela importantes conclusiones respecto a la causa y tensión de la rotura. Para ello, se analizará a continuación brevemente las partes del origen de la fractura.

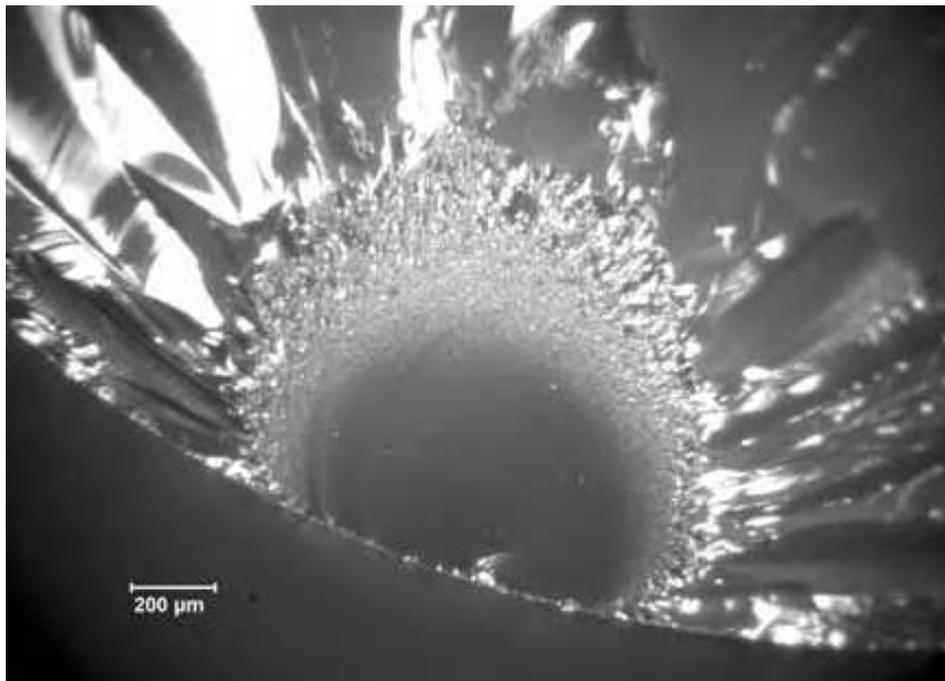


Figura 11.2.1. Ejemplo al microscopio del origen de una rotura.(Img. *Fractography of Ceramics and Glasses* by George D. Quinn).

### 11.2.1. Marcas de la superficie de fractura

La imagen 9.2.2 muestra las zonas que se pueden distinguir en el origen de una rotura. Se divide fundamentalmente en tres partes, distinguibles a la vista por su rugosidad:

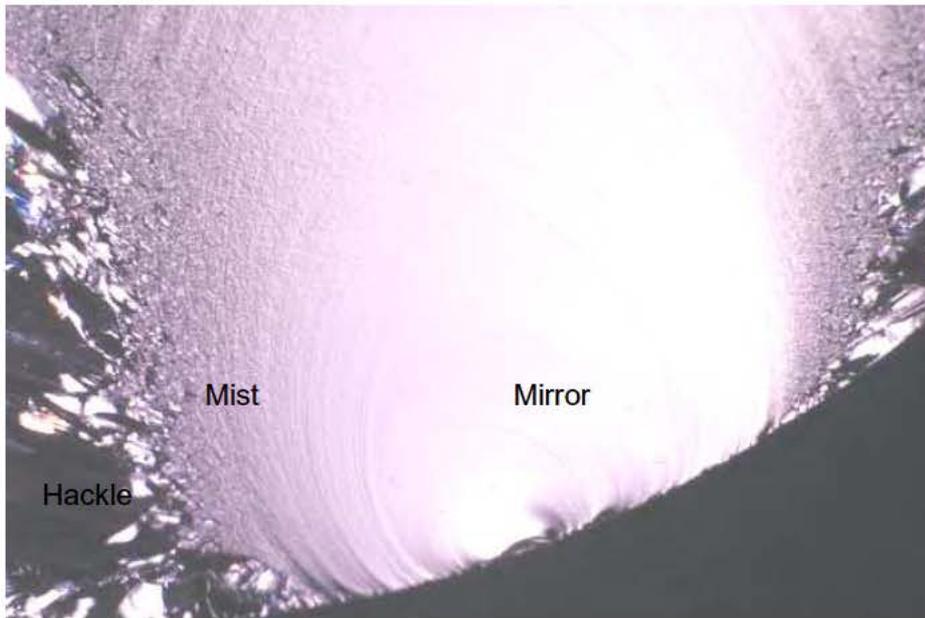


Figura 11.2.2 Zonas apreciables en el origen de la rotura. Se distingue el Mirror, mist y hancle atendiendo al grado de rugosidad que presenta (diferente reflexión de la luz). (Imagen George D. Quinn).

- a) Zona espejo (Mirror): Corresponde a la zona que rodea el punto de origen, Tiene una rugosidad muy fina, lo que al observarla por el microscopio representa una similitud con un espejo. La dimensión de la misma tiene relación con la tensión generada en la rotura, mediante la ecuación:

$$\sigma\sqrt{R} = A \quad (\text{Ec. 9})$$

Dónde:

$\sigma$  Es la tensión que en el origen en el momento de la rotura

$R$  Es el radio de la zona espejo

$A$  Es la constante del material, ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ). Tiene las mismas características que  $K_{Ic}$ , pero existen diferentes constantes en función de la zona de aplicación, ya sea espejo o superficie de rotura.

- b) Zona de niebla (mist): Rodea el mirror, formando un arco con una rugosidad mayor que la del espejo, por lo que a vista del microscopio no refleja la luz como éste.
- c) Zona de estrías (hackle): También denominado por otros autores como zona de fractura. Es el resto de área de la superficie de fractura, por lo que abarca gran parte de ésta. En la zona de estrías aparecen multitud de marcas en función de la velocidad, dirección, tensiones internas, irregularidades del material y esfuerzos exteriores a las que estuviera sometida la pieza.

A continuación se resumen las marcas más frecuentes en esta zona:

- I. Tipo 1: Wake hackle: Marcas en la zona hackle que se extienden en la dirección de rotura a partir de una irregularidad del material

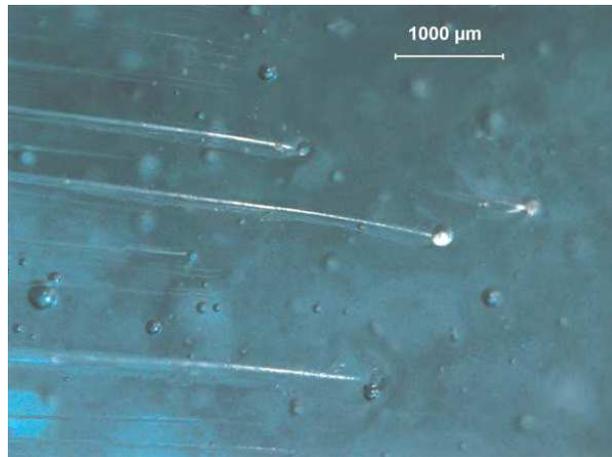


Figura 11.2.3. Zona de estrías (hackle) con marcas Wake hackle (tipo 1). Corresponde a marcas en la superficie de fractura a partir de imperfecciones del material. Indican la dirección de la fractura. (Imagen George D. Quinn).

- II. Tipo 2: Twist hackle: Zona del hackle que separa porciones de la superficie de fractura, rotando desde la rotura inicial como consecuencia de un giro o rotación de la tensión principal en la zona. La dirección de rotura en este caso está alineada con las marcas, pero es perpendicular generalmente al avance general de la superficie de fractura.

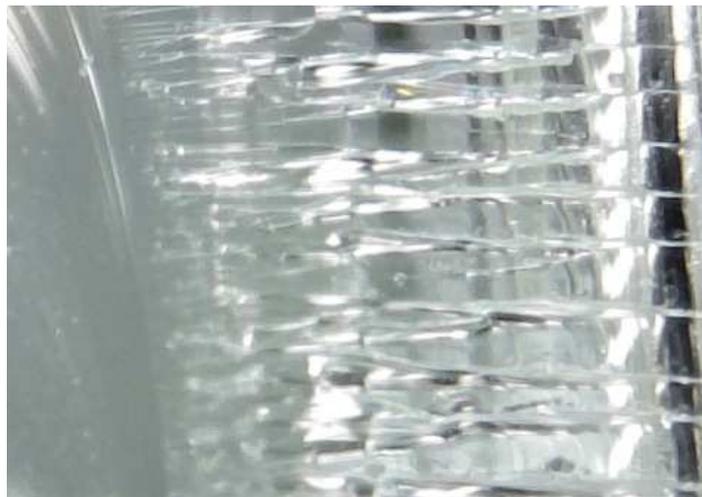


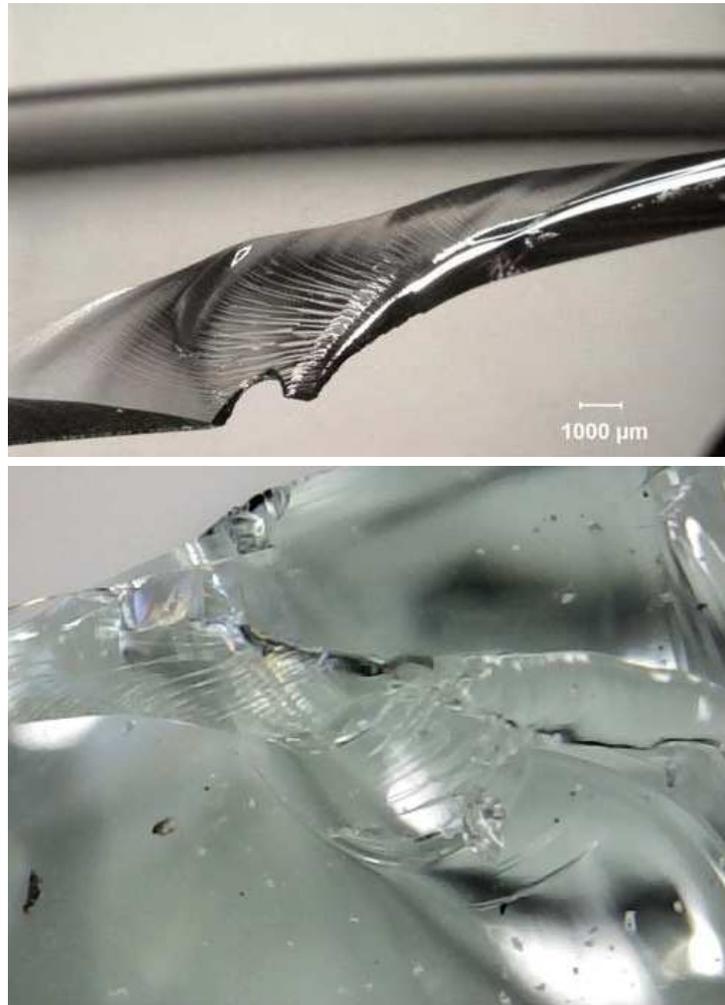
Figura 11.2.4. Marcas tipo 2: Twist hackle. Son marcas producidas como consecuencia de un cambio tensional del vidrio en esa zona. La fractura se torsiona siguiendo las tensiones y genera esta rotura microscópica en forma de "escalones" torsionados.



*Figura 11.2.5. Marcas tipo 2 Twist hackle. Un caso frecuente de este tipo de rotura se encuentra en los vidrios templados. Es debido a que en esta zona la tensión interna cambia a compresión, viéndose alterado el estado tensional del vidrio. La rotura, entonces, se propaga perpendicular a la superficie a la vez que avanza a lo largo del vidrio, generando una rotura diferente al resto de la sección, donde solamente avanza en dirección de propagación a lo largo del vidrio.*

- III. Tipo 3: Shear hackle: Una forma particular del Twist Hackle que ocurre en las partes finales de la rotura. La rotura que está incluida en una superficie perpendicular a la superficie del vidrio, se gira colocándose paralela a la misma, de forma que el plano de rotura se ha “torsionado”. Este fenómeno, de no mucha importancia desde el punto de vista forense, se debe a pequeñas tensiones o imperfecciones en el material, que provocan el cambio del plano. Las marcas de

rotura tipo 2 corroboran el cambio tensional y el esfuerzo que presenta la rotura en esta propagación.



*Figura 11.2.6. Tipo 3: Shear hackle. Marcas debido a un cambio en el estado tensional del vidrio, produciendo un giro en la fractura. La propagación de la fractura es en un plano perpendicular a la superficie, pero en determinado momento se gira el plano colocándose paralelo a la misma, para finalmente pasar de una superficie (la superior) a la otra (inferior en este caso), para acabar rompiendo en el extremo del vidrio, dejando unas marcas tipo 2 a lo largo de toda la zona de "torsión".*

- IV. Tipo 4: Wallner lines: Son marcas en forma de onda causadas por el avance del frente de rotura y que suele responder a una inclinación del plano de la tensión principal. Puede ser formada también por una tensión puntual, una inclusión, poro o discontinuidad en la superficie. Indica la dirección de propagación, además la geometría de la onda indica que la parte más curvada presenta un esfuerzo interno de tracción (mayor velocidad de propagación), mientras que la parte más recta de la onda presenta esfuerzos de compresión (menor velocidad). Este análisis permite conocer, por ejemplo si un vidrio ha roto con esfuerzos de flexión en una de sus caras además de identificarla. También sirve para conocer en caso de rotura puntual (una bala por ejemplo) la dirección de la misma ya que

las roturas radiales y concéntricas deben tener unos esfuerzos de tracción coherentes con estas marcas. Existen varios casos de líneas de Wallner:

- a. Primary Wallner lines: Comúnmente generadas como consecuencia de irregularidades en la superficie, como incisiones, chips o rayas.



*Figura 11.2.7. Tipo 4a: Primary Wallner line. La onda es claramente visible. Cuando son aisladas son causa generalmente de irregularidades de la superficie).*

- b. Secondary Wallner lines: Generada por un impulso liberado por una discontinuidad en el progreso de la fractura. Normalmente presenta una zona rugosa cuando se acerca a la velocidad terminal de fractura. Son más “curvadas” e indican la dirección de propagación de la fractura. El ejemplo más frecuente es el vidrio templado, donde la propagación de la rotura por la zona de tracción es la energía de inicio interna. A partir de esta fractura central, la rotura se propaga hacia las superficies, pero ralentizando la velocidad debido a que la tensión va decreciendo, lo que genera la onda de rotura.

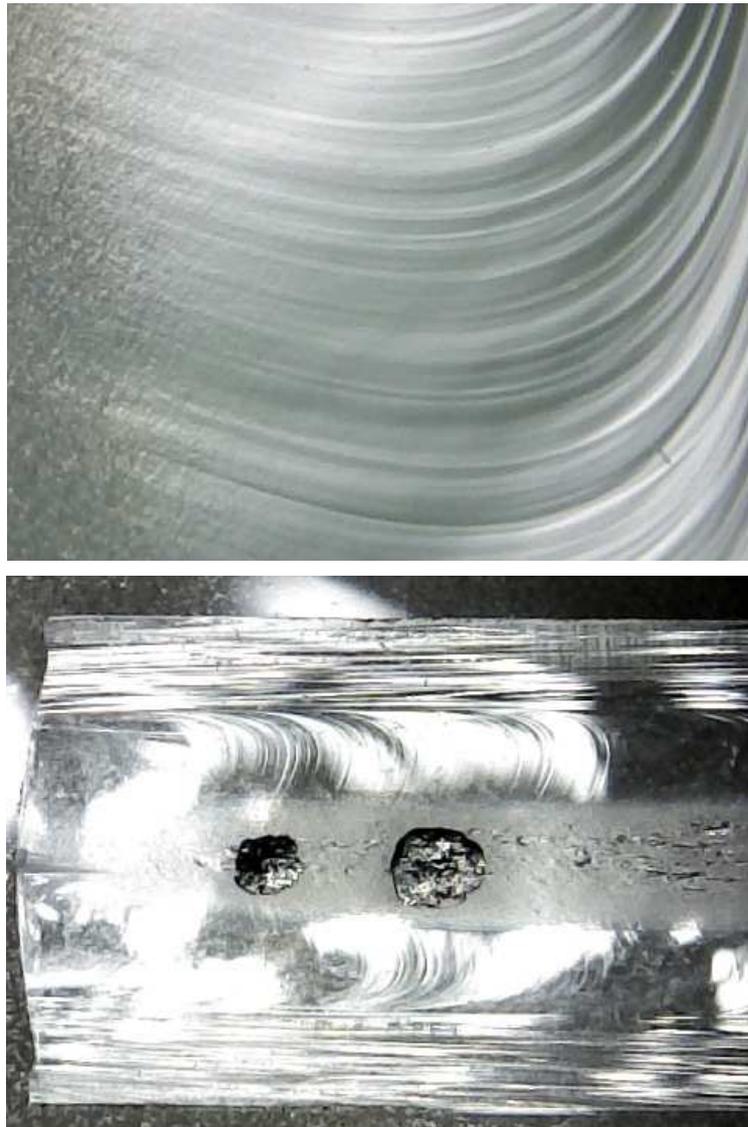


Figura 11.2.8 Tipo 4b: Secondary Wallner line. Las marcas son más curvadas y son originadas por un impulso constante (imagen superior). Muy frecuentes en vidrios templados (imagen inferior).

- c. Tertiary Wallner lines: Son líneas generadas por el impulso elástico generado desde la parte exterior del frente de rotura, como puede ser un impacto o una vibración de alta frecuencia. La geometría es diferente, ya que no se encuentran en toda la superficie de fractura, sino suelen presentarse más en las zonas finales de la misma, y forman ondas que tratan de ser concéntricas con el origen de la rotura.

### 11.2.2. Propagación de la rotura

La propagación de la fractura a lo largo del vidrio responde a unas características particulares, en función de la geometría, tratamiento térmico, espesor, etc. Como aspectos más importantes, se pueden enumerar:

- La rotura es perpendicular al esfuerzo de tracción que la produce
- Si no hay imperfecciones ni tensiones internas, la fractura es recta
- Si hay tensiones internas, la fractura se curva hacia las áreas con tracción (tensión positiva) debido a que la fractura “evita” las zonas de compresión
- A altas velocidades la fractura tiende a ser recta (impactos)
- A bajas velocidades otros factores (como tensiones internas) se hacen más influyentes
- En ausencia de imperfecciones, la fractura es recta. Si la energía es elevada (por encima de los 10 MPa según Fréchette and Orr) se bifurca de forma simétrica.
- La distancia desde el origen a la bifurcación no depende de la velocidad de propagación, sino de la tensión inicial en la fractura.
- Si el ángulo de fractura no está en el plano del vidrio, se pueden producir fracturas concoidales.
- Puede haber ciertas inclusiones en el vidrio que producen tensiones internas debido a la dilatación de estas partículas diferente a la masa de vidrio circundante. El caso más frecuente es el sulfuro de níquel, cuyas inclusiones en vidrio templados frecuentemente los hacen estallar.

### 11.2.3. Causas frecuentes de rotura en vidrio plano

Para vidrios planos (producto base de manufactura es vidrio plano flotado, no implica que tras el proceso de manufactura éste presente curvaturas) las causas más frecuentes son:

- Choque térmico: Más frecuente en vidrios recocidos que en vidrios templados, ya que estos últimos presentan mayor resistencia a los cambios de temperatura. La rotura es perpendicular al borde desde la que se inicia.
- Impacto: Impactos leves con materiales afilados y duros pueden iniciar la rotura con facilidad. En el caso de vidrios templados, la energía del impacto se aprecia en la zona circundante del origen, formando un círculo de rotura diferente al resto, donde predomina la energía del impacto frente a las tensiones internas que harán explotar al vidrio.
- Cálculo incorrecto para el uso destinado: Un análisis inadecuado de la aplicación o bien una especificación pobre en el diseño, pueden provocar que el vidrio se vea tensionado por encima de su límite.
- Montaje inadecuado: Relacionado con el punto anterior, es imprescindible definir un correcto procedimiento de montaje que evite tensionar al vidrio durante esta fase. En ocasiones ocurre que un montaje inadecuado, aunque no genere la rotura, mantiene tensionado el vidrio para el resto de su vida útil, lo que favorece la rotura espontánea por factores que inicialmente no serían tan agresivos.
- Inclusiones metálicas: Como el caso del sulfuro de níquel, fundamentalmente en vidrios templados.

### 11.3. FRACTOGRAFÍA PARTICULAR DEL VIDRIO TEMPLADO

El vidrio templado tiene un patrón de rotura particular debido a las tensiones internas que presenta. Una vez iniciada la rotura, ésta se propaga inmediatamente por toda la superficie debido a que la energía interna genera nuevos fragmentos constantemente, pues no puede ser equilibrada una vez roto el desequilibrio en el punto de inicio. La figura 9.3.1 muestra una de las probetas rotas durante los ensayos. El patrón muestra una clara zona de impacto (zona central) desde se bifurcan las múltiples roturas hacia el exterior del vidrio. La cantidad de fragmentos depende, entre otros, de la temperatura y presión del proceso de templado.



*Figura 11.3.1. Patrón de rotura del vidrio templado. La imagen corresponde a una de las probetas ensayadas de 6 mm, para el ensayo de fragmentación.*

Los fragmentos son de una superficie pequeña que impide el riesgo de corte. Esta característica es la que permite atribuir el término de vidrio de seguridad. Su geometría resulta irregular, siendo frecuentes los prismas con un extremo en forma de pico, procedente del origen de la fractura al bifurcarse la grieta.



Figura 11.3.2. La geometría de los fragmentos es irregular, presentando caras no paralelas debido a la bifurcación de la grieta al propagarse.

El análisis del plano de fractura revela las marcas descritas en el apartado 9.2. El inicio se suele producir en un extremo del fragmento, y el origen se encuentra en la zona central, debido a que es en esa zona donde se encuentran las tensiones de tracción. A partir de ese momento, la fractura se propaga por el centro del vidrio hacia el extremo opuesto. A partir de la franja central, la fractura se propaga hacia las superficies del vidrio, pero al ir descendiendo las tensiones de tracción, hasta convertirse incluso en compresión, la velocidad se ralentiza. Esta peculiaridad determina el aspecto del plano de fractura. La zona central, siempre a tracción, presenta con claridad tres zonas bien diferenciadas: El espejo en el inicio (apenas hay rugosidad y el vidrio a simple vista se presenta transparente), posteriormente se observa una zona de niebla (mist) claramente identificable por su mayor rugosidad, presentando un aspecto a simple vista mate. Por último, se encuentra la zona hackle, donde se alcanza la velocidad de fractura en el vidrio (próxima a los 1480 m/s). Las zonas de menor tensión de tracción presentan un freno al avance de la grieta, por lo que no alcanzan a tener zona de niebla ni hackle. Sin embargo se presentan con claridad las líneas de Wallner, debido a la propagación de la onda de rotura y su ralentización debido al cambio de tensión. Por último, la zona de compresión es un freno a la propagación, donde las estrías o marcas se convierten en asíntotas. En teoría no debería romper, pero en la práctica, la unión no se puede mantener por otros fenómenos físicos (movimiento al liberar energía, espacio intersticial entre fragmentos, etc.) que terminan provocando la rotura. Sin embargo en esta zona, la causa es diferente, cambiando entonces el patrón de rotura presentando entonces marcas tipo twist hackle.

Los mejores fragmentos para apreciar estos detalles son aquellos que presentan longitudes superiores a 10 mm y cuyas caras de fractura son lo más paralelas posibles. Las imágenes de las figuras 9.3.3 y siguientes presentan este tipo de fragmentos donde se pueden apreciar las marcas descritas con facilidad.

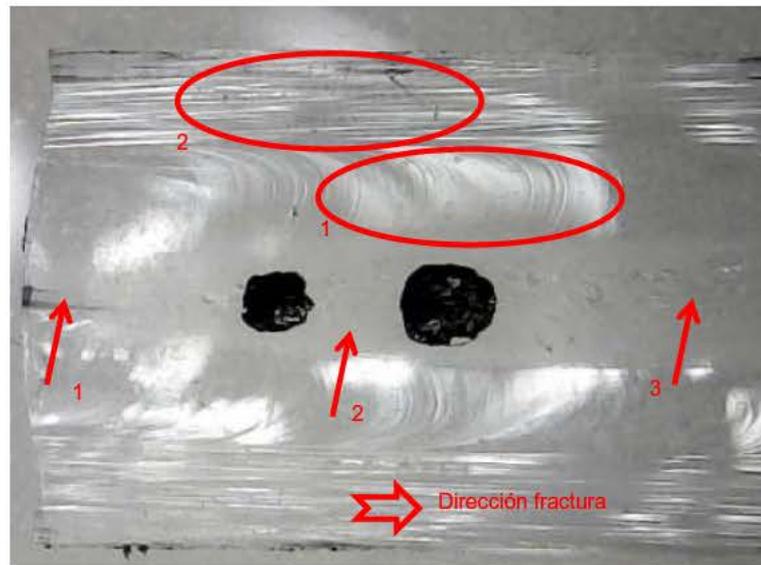


Figura 9.3.3. La imagen muestra un fragmento con caras de fractura paralelas y una longitud superior a 10 mm. En él se pueden apreciar las zonas mirror (flecha 1), mist (flecha 2) y hackle (flecha 3). Las líneas de Wallner (área 1) y la rotura twist hackle (área 2), que apenas se aprecia, observando fundamentalmente las estrías asintóticas debido al freno de la rotura por la compresión de las tensiones internas..



Figura 11.3.4. La imagen representa un fragmento similar a la figura 9.3.3. En este caso la rotura parte del lado derecho y se dirige hacia el lado izquierdo, como se puede deducir de la observación de las líneas de Wallner y la zona hackle, muy evidente en la zona central del lado izquierdo..



*Figura 11.3.5. Imagen de un fragmento irregular, cuyos lados no son paralelos, presentando ángulo debido a la bifurcación de la grieta. Las zonas de mirror, mist y hackle no son tan evidentes, y en muchos casos no se llega a la velocidad máxima dentro del fragmento, por lo que no se presentan. En este caso se observan con claridad las marcas de rotura en la zona de compresión, presentando estrías twist hackle evidentes en ambos lados.*



*Figura 11.3.6. Los fragmentos muy irregulares presentan otros tipo de marcas debido a la unión de varias causas de la rotura, y comienzos de rotura simultáneos por dos zonas de lo que será posteriormente el fragmento. Se aprecia que el lado derecho de la imagen presenta el patrón esperado, mientras que el izquierdo tiene roturas por medio de la zona habitual de líneas Wallner.*

## **12. ANÁLISIS DEL ESTADO TENSIONAL EN LOS FRAGMENTOS**

### **12.1. INTRODUCCIÓN**

El estudio de los fragmentos tras la rotura demuestra que éstos disponen aún de tensión residual. Dicha tensión puede ser relevante de cara a un análisis del origen de la rotura y estado tensional del vidrio con anterioridad. Desde el punto de vista forense, esta información puede ser de gran relevancia.

Estudiar los fragmentos apenas ha sido un proceso documentado. De hecho, exclusivamente en una ocasión han sido medidos los fragmentos, en el estudio de Hoikwan Lee, Seoyeong Cho, Kyungmin y Jaeho Lee, en su estudio "Glass Thickness and Fragmentation Behavior in Stressed Glasses" hacen referencia a una medición de los fragmentos, que se utiliza para conocer la energía disipada.

En este caso el análisis es más profundo, tratando de conocer la evolución de las diferentes tensiones (tracción y compresión) y el comportamiento que presentan después de la rotura.

### **12.2. METODOLOGÍA Y PROCESO ANÁLISIS**

La metodología adoptada ha sido medir las tensiones antes y después de los ensayos. De esta forma se puede realizar una comparativa, que ha servido para el análisis que se presenta a continuación.

Para cada probeta, se han medido tensiones de superficie antes de la rotura, en varios puntos y en varias direcciones, tomando como valor de referencia la media de todas las medidas. Este trabajo se realizó con un polariscopio de superficie GASP Polarimeter® (del fabricante Strainoptics). Posterior a la rotura, y tras la selección de los fragmentos adecuados, se ha procedido a la medida de las tensiones en los fragmentos mediante el uso de un polariscopio modelo GES-100-MWA Edge-StressMeter® (del fabricante Strainoptics), utilizado habitualmente para medir tensiones de borde.

Los fragmentos seleccionados deben cumplir con una serie de requisitos que serán comentados más adelante en el apartado 12.

Este ejercicio se ha realizado para el 100% de las probetas ensayadas, lo que permite un espectro de datos suficiente para el análisis, en el que se presentan los datos a partir de los promedios y agrupaciones para cada tipo de variable.

### 12.3. RELACIÓN TENSIÓN INTERNA FRAGMENTOS EN RELACIÓN CON PARÁMETROS

En este apartado se tratan de relacionar los parámetros de fabricación (temperatura y presión) con los resultados de las tensiones residuales en los fragmentos.

En la gráfica inferior se estudia la relación entre temperatura y tensión de superficie de los fragmentos. Los resultados presentan una coherencia lógica entre parámetros y tensiones residuales, presentando más valor en los fragmentos obtenidos en las probetas con tensión de superficie (obtenida con temperatura alta), y al contrario con las de temperatura baja, siendo la normal con valores intermedios. Las variaciones presentadas son del orden de 5 - 12%, comparables a las obtenidas en el estudio del apartado 5, considerando las probetas sin romper.

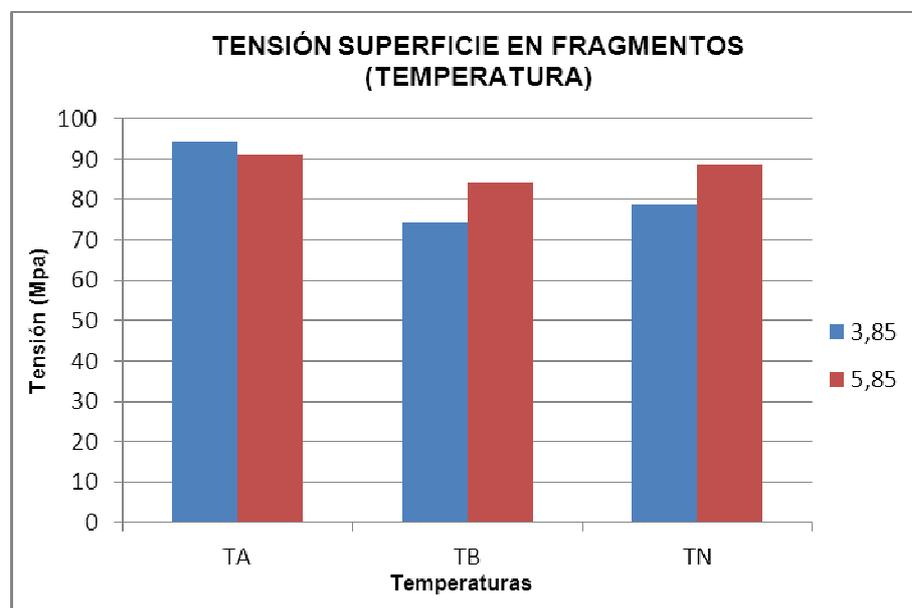


Figura 12.3.1. Tensiones de superficie en fragmentos a partir de la temperatura.

De este análisis se desprende que las tensiones de superficie de los fragmentos son proporcionales a las tensiones originales, y por comparativa, se podría saber que un vidrio tenía más o menos tensión inicial que otro, a partir de los fragmentos.

Del mismo modo, se analizan las tensiones de superficie en función de la presión de aire. Los resultados, al igual que antes, presentan coherencia física, siendo los fragmentos con más tensión aquellos que pertenecen a las probetas con mayor tensión inicial, correspondientes a las de mayor presión, y más baja con las de menor presión. En este caso las variaciones presentadas son entre 4 y 6%, similares de nuevo a los resultados obtenidos en las mediciones antes de romper.

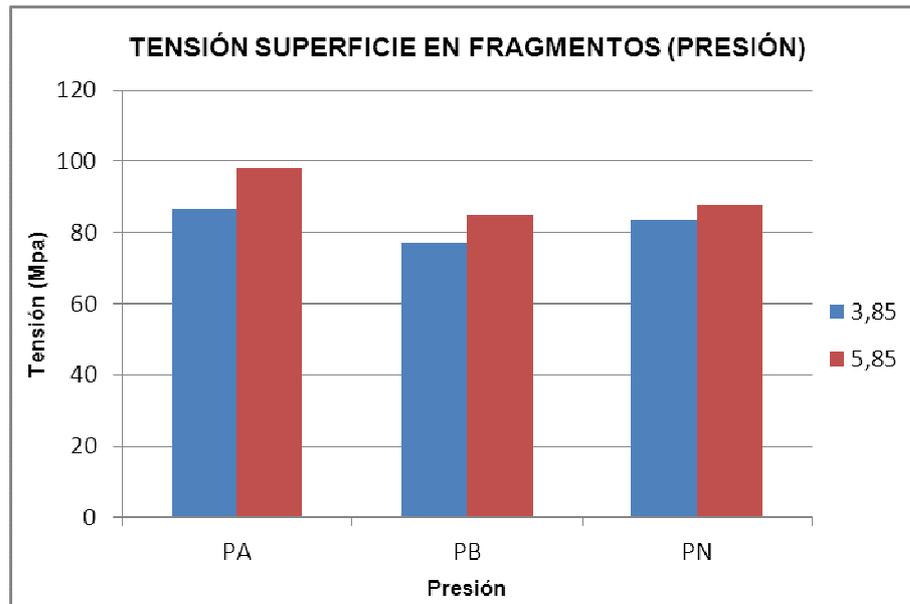


Figura 12.3.2. Tensiones de superficie en fragmentos en función de la presión de templado.

A continuación se hace el mismo estudio, pero para determinar la relación de los parámetros con las tensiones centrales de los fragmentos. En la siguiente gráfica se relaciona con la temperatura.

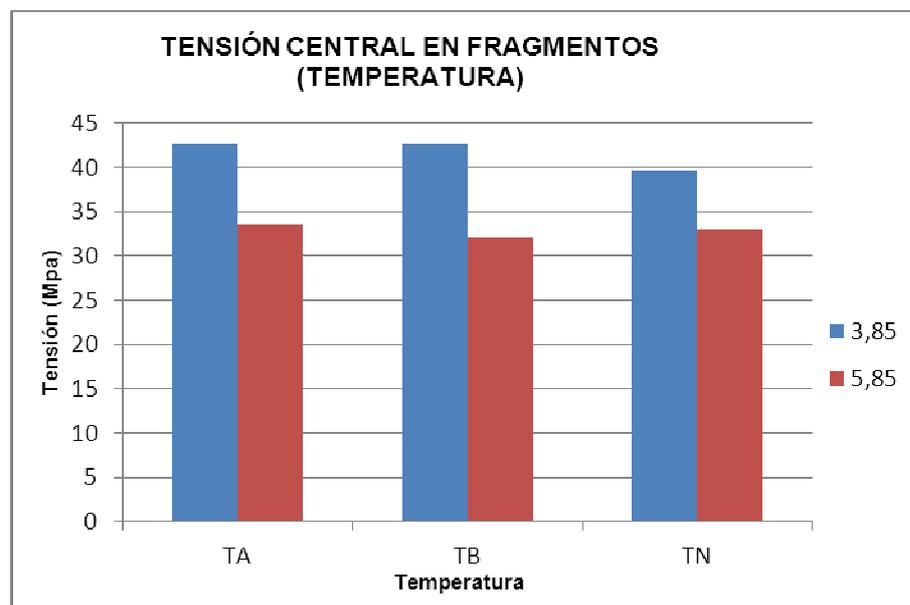


Figura 12.3.3. Tensión central en los fragmentos en función de la temperatura.

En este caso los resultados no presenta coherencia con los ensayos anteriores, no siendo los mayores los de mayor tensión antes de la fractura. Además, las variaciones son mínimas, no superando el 3%.

Los mismos resultados se han obtenido con la presión de aire, en la gráfica 10.4.

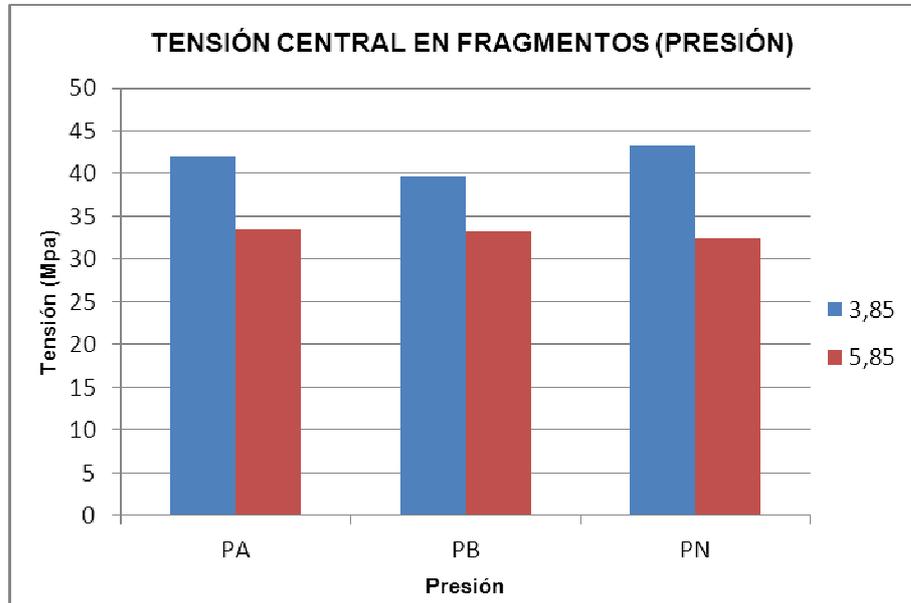


Figura 12.3.4. Tensión central en los fragmentos en función de la presión de aire durante el proceso de templado.

Los resultados no son coherentes con los parámetros de fabricación. Las variaciones obtenidas en este caso son aún menores, no superando el 2%.

Estos resultados nos llevan a creer que el comportamiento de tensiones de superficie y centrales en los fragmentos no se corresponde. Mientras que las tensiones de superficie presentan cierta coherencia con los parámetros de fabricación, y en consecuencia, con las tensiones internas antes de la rotura, parece que el resultado para las tensiones centrales es el mismo, independientemente del proceso de fabricación. En el punto posterior se analiza esta circunstancia.

#### 12.4. ESTUDIO VARIACIONES TENSIONES EN FRAGMENTOS ANTES Y DESPUÉS

Ya que el comportamiento de ambas tensiones (superficie y central) en los fragmentos no es coherente entre sí, se pretende analizar pormenorizadamente estos valores, tratando de establecer qué afecta a cada caso. Para ello se ha resumido en la tabla siguiente los valores medios de cada grupo de probetas, separando por espesor y parámetros de proceso.

Zona medida	4			6			4			6		
	PA	PB	PN	PA	PB	PN	TA	TB	TN	TA	TB	TN
<b>Valores con probetas enteras (MPa)</b>												
Central	58,40	51,30	56,21	69,91	54,58	64,49	63,09	47,91	55,96	64,56	57,73	61,23
Superficie	116,80	102,60	112,42	139,82	109,15	128,97	126,18	95,82	111,92	129,12	115,45	122,46
<b>Resultados fragmentos (MPa)</b>												
Central	41,39	38,57	43,33	32,64	32,90	31,99	42,40	41,73	40,21	33,29	32,42	33,48
Superficie	85,53	74,64	83,58	96,51	83,93	87,24	93,72	72,47	79,67	90,67	84,59	89,50
<b>Diferencia antes y después (MPa)</b>												
Central	17,01	12,73	12,88	37,27	21,68	32,50	20,69	6,18	15,75	31,27	25,31	27,75
Superficie	31,27	27,96	28,84	43,31	25,22	41,73	32,46	23,35	32,25	38,45	30,86	32,96
<b>% de pérdida en Mpa</b>												
Central	29,13%	24,81%	22,91%	53,31%	39,73%	50,40%	32,79%	12,90%	28,15%	48,44%	43,85%	45,32%
Superficie	26,77%	27,25%	25,65%	30,98%	23,11%	32,36%	25,73%	24,37%	28,82%	29,78%	26,73%	26,91%

Figura 12.4.1. Tabla comparativa de los valores de tensión antes (tensión de superficie) y después (tensión interna de los fragmentos).

Los resultados obtenidos son de especial relevancia, ya que presentan conclusiones que explican las diferencias anteriores. Para empezar, se comprueba que efectivamente los datos de tensión de superficie son proporcionales a los anteriores a la rotura. Sin embargo estos resultados no se ratifican para el caso de la tensión central. Las gráficas siguientes reflejan con mayor claridad las diferencias.

En la figura 10.4.2 se muestran las diferencias obtenidas entre los fragmentos, antes y después de romper. En primer lugar, se ve una relación directa entre tensión de superficie y central, lo que es evidente, ya que el fragmentos está en equilibrio. Esto quiere decir que la pérdida de energía es proporcional entre superficie y centro. También se aprecia que las probetas de 4 mm tienen más diferencia que las de 6 mm (en valores).

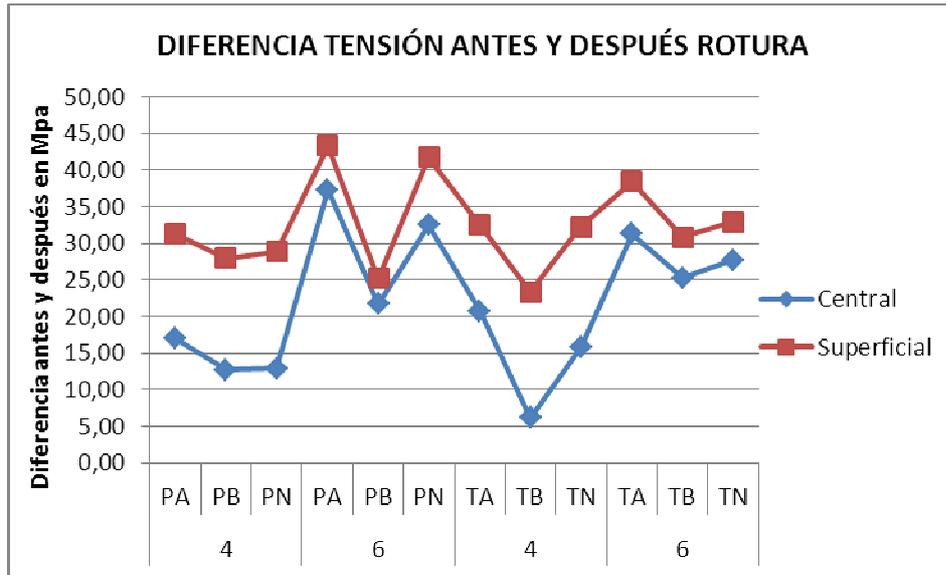


Figura 12.4.2. La gráfica muestra las diferencias de tensión entre antes y después de la rotura, relacionado con los parámetros de proceso.

En la figura 10.4.3 se presentan las tensiones obtenidas en los fragmentos después de la rotura. Se aprecia que mientras las tensiones de superficie son coherentes con los ensayos, no ocurre igual para las centrales, que se mantiene en el entorno de los 40 MPa constantemente. Si se comparan ambas gráficas (fig. 10.4.2 y fig. 10.4.3) se comprueba que las tensiones de superficie son coherentes con la tensiones originales, la curva de la diferencia tiene un comportamiento análogo a la curva de tensión en los fragmentos resultantes. Esto quiere decir, que es coherente con los parámetros de fabricación y las tensiones anteriores a la fractura. Sin embargo, haciendo la misma comparativa, se comprueba que las tensiones centrales no siguen el mismo comportamiento, viéndose casi exclusivamente influenciadas por el espesor.

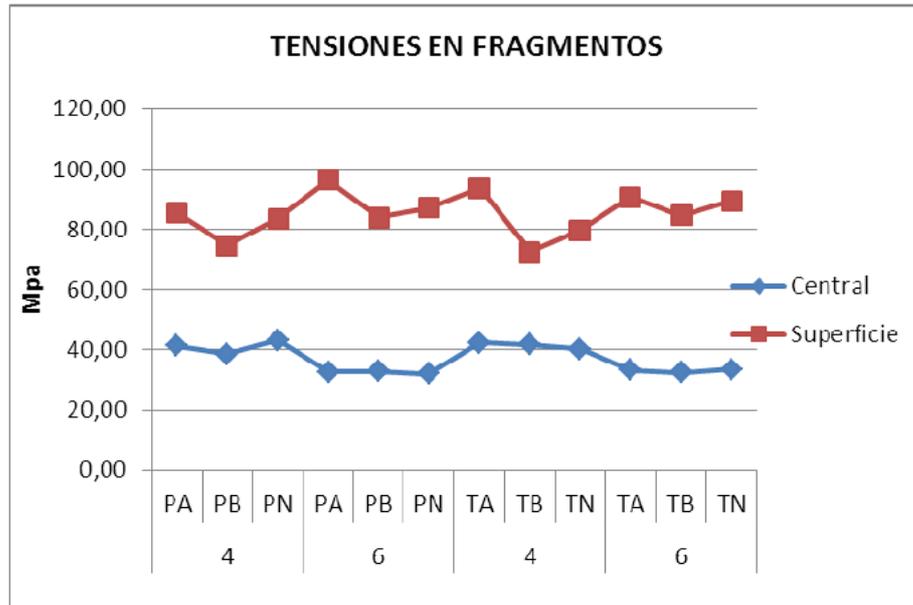


Figura 12.4.3. Relación entre las tensiones en los fragmentos y los parámetros de proceso.

Realizando una tabla resumen de la primera, pero clasificando por espesor, se obtiene los siguientes resultados para desviación estándar y medias de los valores:

Zona medida	TOTAL		4		6	
	Desv. Típica	Promedio	Desv. Típica	Promedio	Desv. Típica	Promedio
<b>Valores con probetas enteras (MPa)</b>						
Central	6,19	58,78	5,33	55,48	5,46	62,08
Superficie	12,39	117,56	10,66	110,96	10,93	124,16
<b>Resultados fragmentos (MPa)</b>						
Central	4,59	37,03	1,68	41,27	0,56	32,78
Superficie	7,15	85,17	7,77	81,60	4,63	88,74
<b>Diferencia antes y después (MPa)</b>						
Central	9,33	21,75	4,91	14,21	5,55	29,30
Superficie	6,12	32,39	3,46	29,36	6,96	35,42
<b>% de pérdida en Mpa</b>						
Central	12,70%	35,98%	6,91%	25,12%	4,88%	46,84%
Superficie	2,69%	27,37%	1,54%	26,43%	3,38%	28,31%

Figura 12.4.4. Tabla comparativa de tensiones antes y después agrupadas por espesor.

En esta tabla se comprueba definitivamente que la variación en las tensiones de superficie parece proporcional con los resultados de las mediciones antes de la fractura

(porcentaje de pérdida del 2,69% de variación estándar, que representa un 27%, que resultan 32 MPa). Sin embargo, dicha coherencia no se presenta en las tensiones centrales, donde la variación estándar es mucho mayor (12,7%).

Analizando por espesor se descubre que la tensión central se ha reducido a un valor fijo para cada espesor. En el caso de 4 mm la tensión se ha quedado en 41,27MPa., con una desviación estándar del 1,68MPa, y para el caso de 6 mm es aún más clara, con un valor de 32,78MPa. y una desviación estándar de 0,56 MPa.

## 12.5. DISCUSIÓN SOBRE EL ESTADO TENSIONAL DE LOS FRAGMENTOS

Los resultados anteriormente obtenidos se pueden explicar de la siguiente forma: En un vidrio templado, tras el inicio de la fractura por un agente externo, la propagación de la misma se debe a las tensiones internas. Concretamente las tensiones centrales de tracción son las que favorecen que la fractura se desarrolle por toda la superficie. Dicha tensión provoca que se vaya abriendo nuevas bifurcaciones. El límite es la propia tensión cohesiva del vidrio comentada en el apartado 9, y que presenta un valor de aproximadamente 40 MPa. Se confirma, por tanto que la tensión central se utiliza para propagar la fractura hasta un valor a partir del cual la resistencia propia del material impide la propagación, de ahí los valores próximos a 40 MPa en los resultados de las mediciones posteriores en los fragmentos.

Por otro lado, la tensión de superficie no colabora a la propagación de la fractura, utilizando esta energía en disipación de calor, movimiento y ruido, además de otros factores intramoleculares que pudieran verse afectados (cambios de estructura). Esto explica que la diferencia sea la constante, siempre proporcional a la medida inicial, presentando exclusivamente relación con las tensiones iniciales, que a su vez es coherente con el número de fragmentos y los efectos físicos durante la rotura (mayor tensión interna, mayor movimiento de los fragmentos durante la fragmentación).

En resumen, la tensión central propaga la rotura y tiende a reducirse hasta un valor del entorno de 40 MPa, mientras que la tensión de superficie se mantiene proporcional a la tensión inicial, tendiendo a perder unos 30 MPa en efectos físicos de la fractura.

## 12.6. RELACIÓN CON OTROS AUTORES

Los resultados anteriores presentan además un dato de importancia: La diferencia entre la tensión central de 4 mm y 6 mm. Mientras que para el caso de 4 mm la tensión central tiende a quedarse en los 41,27 MPa (ver tabla 10.8) para los fragmentos de 6 mm el valor medio es de 32,78 MPa. Ambos tienen desviaciones estándar muy pequeñas, lo que corrobora esta diferencia. Como ya se indicó en la introducción, solamente un estudio se ha encontrado que mida los fragmentos de un vidrio templado. Hoikwan Lee, Seoyeong Cho, Kyungmin y Jaeho Lee, en su estudio “Glass Thickness and Fragmentation Behavior in Stressed Glasses” (Samsung Corning Precision Materials, Korea) destacan la pérdida de energía en los fragmentos durante la fractura. Los datos que obtienen son:

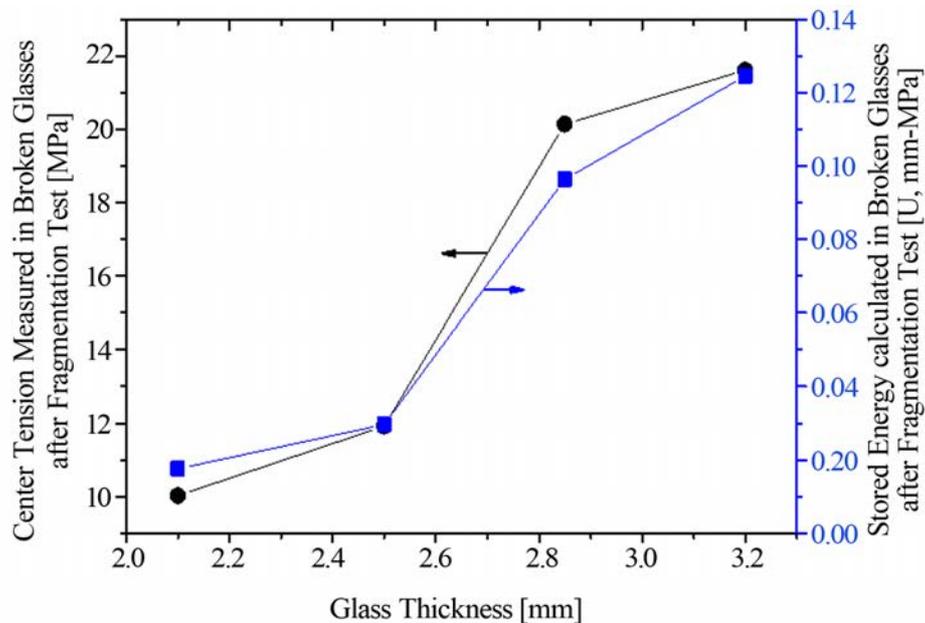


Figura 12.6.1. Resultados obtenidos por Samsung que relacionan espesor con tensión central.

Continuando con este mismo estudio, y completando la gráfica con los nuevos espesores, el resultado es el siguiente:

Espesor (mm)	Tensión central (MPa)
2,1	10
2,5	12
2,8	20,5
3,2	21,5
3,85	41,27
5,85	32,78

Figura 12.6.2. Tensión central en función del espesor.

Que de forma gráfica, resultan:

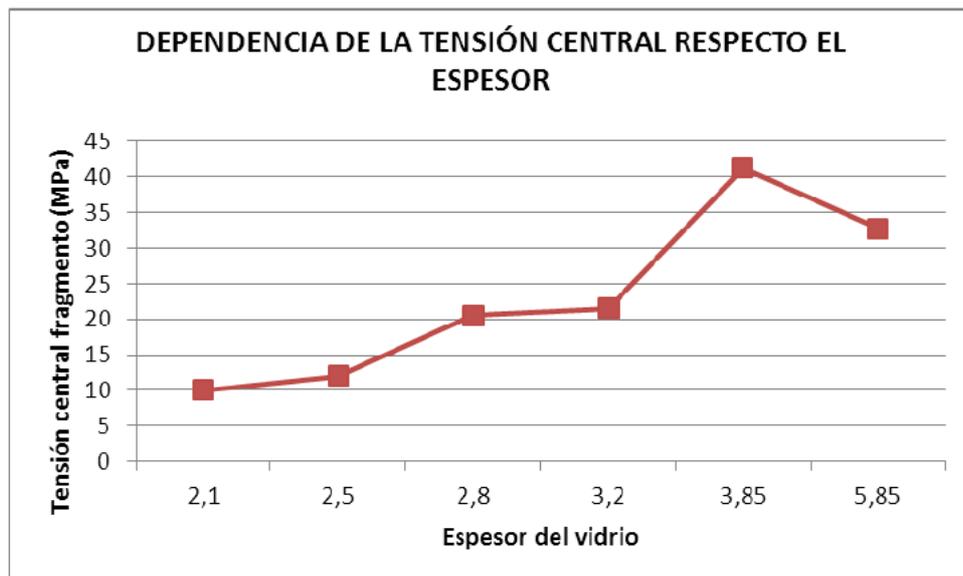


Figura 12.6.3. Representación gráfica de los resultados mostrados en la tabla 10.6.2. Se comprueba la dependencia de la tensión central en los fragmentos en función del espesor del vidrio de muestra.

La discusión de los resultados por parte de Samsung describe una relación directa entre espesor y tensión central, determinando que para mayor espesor la pérdida de energía durante la fractura es menor.

El resultado de 4 mm confirma dicha tendencia, pero no así el de 6 mm, que supone menos acumulación de energía que el caso de 4 mm. Si nos basamos en el principio de que

no es asumible tensiones residuales mayores del entorno de 40 MPa, como se describió en el apartado 12.5, los resultados presentan que el vidrio de 4 mm es el que representa mayor capacidad de acumulación de energía.

Este aspecto de mucho interés desde el punto de vista energético, no ha sido analizado en este estudio, planteándolo para un estudio posterior como una vía de investigación abierta, ya que la determinación del espesor de mayor mantenimiento de energía aporta un concepto nuevo a la fractología del vidrio templado, hasta ahora no analizado por nadie, a tenor de la bibliografía y referencias investigadas.

## 12.7. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS TENSIONAL

El estudio de los fragmentos desprendidos durante la rotura de un vidrio templado ha aportado interesantes conclusiones, que pueden ser de importancia para el análisis forense de este tipo de vidrios.

En primer lugar se ha descubierto que las tensiones internas de los fragmentos tienen un comportamiento específico, ya se trate de la tensión superficial o la tensión central. Así mismo, se ha presentado la relación entre tensión central y espesor del vidrio, con un factor nuevo que presenta un máximo en el vidrio de 4 mm.

A continuación se presenta un listado de las principales conclusiones (con valores numéricos) obtenidas:

- La tensión central en los fragmentos tiende a ser constante en un valor aproximadamente de 40 MPa
- La tensión central se utiliza para propagar la fractura a lo largo del vidrio
- La tensión de superficie se reduce proporcionalmente a la tensión original, reduciéndose aproximadamente unos 30 MPa
- La tensión de superficie se reduce como consecuencia de los efectos físicos que se dan lugar durante la fractura, como son el ruido, movimiento y otros factores intermoleculares.
- Existe una relación entre espesor del vidrio y tensión central que puede acumular. Presenta mayor tensión el vidrio de 4mm que el de 6mm proporcionalmente a la acumulada inicialmente.
- Esta relación se ha unido añadido a los resultados obtenidos por un estudio de Samsung, ampliando el espectro a más espesores.
- Se ha planteado una línea de investigación nueva, que puede ser de importancia para determinar el espesor de vidrio óptimo desde el punto de vista energético para el proceso de templado

## **13. ANÁLISIS ENERGÉTICO**

### **13.1. INTRODUCCIÓN**

El análisis tensional del apartado anterior revela que el vidrio utiliza la energía acumulada principalmente como consecuencia de la tensión central para realizar la fractura y propagarla por todo el vidrio templado, a partir de un impacto inicial (durante un ensayo de fragmentación, por ejemplo).

A continuación se pretende comprobar el balance energético del vidrio, antes y después de la rotura, para comprobar si este fenómeno descubierto empíricamente tiene base energética que lo avale.

### **13.2. FORMULACIÓN BÁSICA Y DESARROLLO**

En 1997, Suresh T. Gulati (Science and Technology División, Corning Incorporated. Glass processing Days 13-15 Sept.'97) definió un modelo matemático para predecir la fragilidad de un vidrio templado a partir de sus dimensiones, tensión central, esfuerzos y condiciones de contorno.

Este método hace una serie de suposiciones, que se describen a continuación:

- Se presupone que la profundidad de la capa de compresión es del 21% del espesor.
- Se supone una distribución de tensiones con la clásica parábola durante el templado por aire.
- La fragmentación depende exclusivamente de la tensión central (hecho que corrobora el resultado del análisis tensional del apartado 10).
- Se suponen los fragmentos de igual dimensión
- Se ignoran efectos de cantedo e incorrectas distribuciones de tensiones, tanto en el espesor como en la superficie.

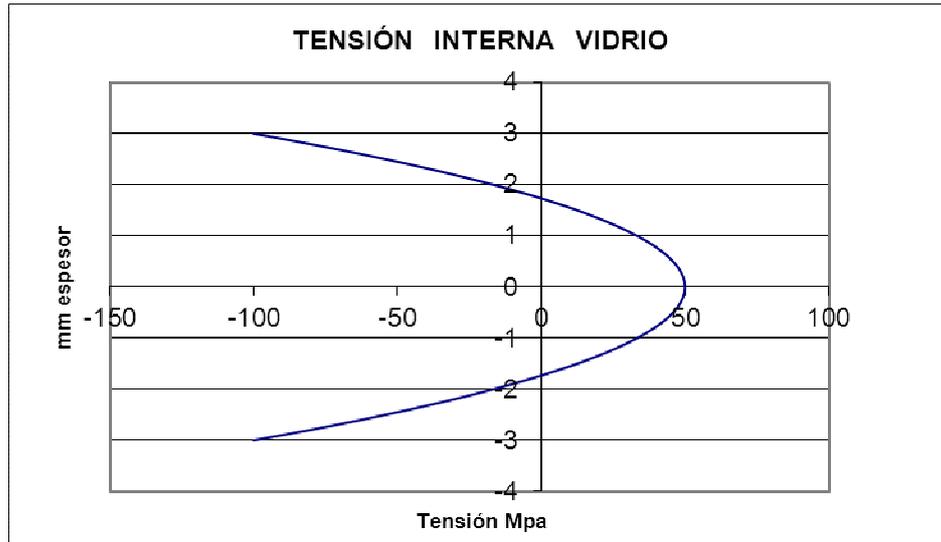


Figura 13.2.1 (Igual que la imagen 7.2.1.) Gráfica de tensiones internas en un vidrio templado de 6 mm de espesor. La parte central (0 mm) se encuentra a tracción, mientras que los extremos (+3 y -3 mm) se encuentran a compresión.

La figura 13.2.1 representa la distribución de tensiones habitual para el vidrio templado térmicamente. Tomando esta referencia, se establece:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_c \left[ 1 - 12 \left( \frac{z}{t} \right)^2 \right]$$

Donde  $\sigma_c$  es la tensión central del espesor.

Con el mismo criterio de considerar la parábola de tensiones, se puede establecer:

$$\sigma_s = -2\sigma_c$$

Donde  $\sigma_s$  es la tensión de superficie del vidrio. La profundidad de la fibra neutra es:

$$\delta = \left( \frac{\sqrt{3} - 1}{2\sqrt{3}} \right) t = 0,211t$$

Para obtener la energía elástica acumulada se puede integrar la tensión por unidad de área:

$$\Sigma_0 = \frac{1 - \nu}{2E} \int_{-z}^z (\sigma_x^2 + \sigma_y^2) dz$$

Donde E es el módulo de elasticidad y  $\nu$  el coeficiente de Poisson.

Tomando la profundidad de la fibra neutra y sustituyendo en la ecuación,

$$\Sigma_0 = 0,309 \frac{1 - \nu}{2E} \sigma_c^2 t$$

Obsérvese que varía linealmente con el espesor y de forma cuadrática con la tensión central.

### 13.3. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

Con esta formulación, se realiza la medición de fragmentos en todas las probetas de estudio, clasificando aspectos de relevancia en la geometría de los mismos, como son longitud y espesor del propio fragmento.

El procedimiento de medida de tensiones en los fragmentos ha sido el mismo que se realizó en el apartado 12.2 (descrito en el capítulo 14 con más precisión).

### 13.4. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla resumen:

ANÁLISIS ENERGÉTICO VIDRIO ( $U$ , $\text{mm}^2$ )					
	ENERGÍA ANTES		ENERGÍA DESPUÉS		% pérdida energía
	Promedio	Desv. Típica	Promedio	Desv. Típica	
4 mm	38.21	9.33	13.64	10.77	62.11 %
6 mm	71.78	17.65	17.13	10.85	74.52 %

Figura 13.4.1. Tabla comparativa de la energía acumulada antes y después, por unidad de superficie

En el caso de 4 mm la energía perdida por la rotura supone un 62,1% de la inicial, mientras que en el vidrio de 6 mm supone un 74,5%. Las altas variaciones dependen de la variedad de probetas estudiadas. Un análisis por grupo concreto de parámetros de proceso ( $T^a$  y presión) revela agrupaciones con desviaciones inferiores a 2.

Estos resultados de pérdida de energía son coherentes con los obtenidos por Hoikwan Lee, Seoyeong Cho, Kyungmin y Jaeho Lee, en su estudio "Glass Thickness and Fragmentation Behavior in Stressed Glasses" (Samsung Corning Precision Materials, Korea). En su caso se determinó que la energía perdida se reducía al aumentar el espesor, considerando diferentes espesores de vidrios desde 2,1 hasta 3,2 mm. La tabla siguiente muestra la agrupación de pérdida de energía por espesor obtenida por Hoikman y por el presente estudio.

PÉRDIDA ENERGÍA (%)						
Espesor vidrio (mm)	2,1	2,5	2,8	3,2	3,85	5,85
%	97.89	96.78	86.33	76.91	62.11	74.52

Figura 13.4.2. Tabla que indica las pérdidas de energía en % en función del espesor del vidrio.

En el caso del vidrio de 4 mm (3,85) se observa que proporcionalmente es el que menos energía pierde respecto al origen, corroborando así los resultados obtenidos en el apartado 10 con el análisis tensional.

### 13.5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Como ya se estimó en el apartado 10 a partir del análisis de tensiones, se comprueba que el vidrio al fragmentarse consume la energía interna de las tensiones. Ya se observó que la tensión central es la responsable de la fractura, mientras que la tensión de superficie genera otros efectos como ruido, movimiento y marcas en la sección.

Estos resultados han sido corroborados por el análisis energético realizado. Se observa que ambos espesores de vidrio presentan comportamiento análogo al esperado, perdiendo gran parte de su energía interna en la rotura, y en consonancia con espesores análogos.

Se confirma igualmente que la tensión central residual en el fragmento se estabiliza en el entorno de los 40 MPa, lo que provoca que el vidrio de 4 mm sea el que menos energía pierda, debido a que su tensión central antes de la rotura se encuentra en los valores próximos a este resultado (promedio de 41,7 MPa). En el caso de 6 mm las pérdidas son mayores, debido a la mayor cantidad de energía acumulada y a la mayor diferencia con el valor de referencia de 40 MPa. Un análisis análogo de otros espesores entre 3,2 y 4 es probable demuestre que existe un espesor que acumule mayor energía, tanto en cuanto su tensión central se aproxime más a 40 MPa.

Se puede concluir, entonces, que tanto la medición tensional como la energética demuestran lo siguiente:

- Las tensiones residuales en los fragmentos pueden predecir la tensión inicial a partir de su tensión de superficie (asumiendo cierto error proporcional)
- La tensión central permanece en el entorno de los 40MPa
- El espesor que presenta menor pérdida de energía (de los analizados) es 4 mm.

## **14. APLICACIÓN DEL ESTUDIO DE LA FRACTURA EN LA INGENIERIA FORENSE**

### **14.1. INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA FORENSE EN EL VIDRIO**

La ingeniería forense es una ciencia dentro de la ingeniería técnica, que trata de analizar las causas que generan los fallos en los sistemas, con la intención de depurar responsabilidades y proponer medios de solución para futuras aplicaciones. El campo de aplicación es muy amplio, desde estudios de calidad, control de calidad, colaboración en el diseño, mejora prototipos, análisis de fallos, rediseños, mediciones, peritaciones y solución de conflictos técnicos.

La evolución industrial se dirige hacia productos más sofisticados y tecnológicos de lo que cabe esperar a simple vista. Hasta ahora, se aceptaba que un vidrio cubra un espacio de una carrocería o edificio y que fuera transparente. Sin embargo la evolución de los diferentes métodos de fabricación, la diversidad de fabricantes y la competitividad en prestaciones da lugar a una evolución mucho más rica que lo que cabría esperar.

En este entorno, el conocimiento técnico del producto se presenta como una ventaja competitiva de los diseñadores y montadores o carroceros. Sin embargo, dicho conocimiento, que facilita la evolución sigue centrándose en los fabricantes del vidrio, que en función de su tecnología de fabricación perfeccionan los productos, pero raras veces se comparan entre ellos. El consumidor apenas conoce las diferencias de calidad, y esto hace que la decisión de compra sea fundamentalmente por precio y por calidad cosmética.

Actualmente los grandes constructores de vehículos han dado un paso de gigante en cuanto a la selección de vidrio, incorporando en sus estándares control de tensiones, tratando de asegurar una vida acorde con el diseño realizado. Sin embargo este avance no llega a todos los fabricantes, siguiendo con procedimientos de control acordes con la normativa, que se mantiene en los criterios estrictos de seguridad, por el momento (ya se están debatiendo normativas más severas al respecto).

En esta situación, el análisis de las roturas y desviaciones frente al diseño previsto, además de ayudar en la solución de conflictos, ayuda a la mejora del producto y a la confianza en el material para diseños más arriesgados y optimizados.

En los próximos años esta tendencia, expuesta en múltiples seminarios y congresos, se irá materializando hasta suponer una nueva área de desarrollo de la ingeniería en el sector del vidrio.

## 14.2. APOORTE DE LA MEDICIÓN DE FRAGMENTOS AL PROCESO

Como una herramienta más dentro de la ingeniería forense, la medición de fragmentos aporta un abanico de posibilidades de análisis que hasta ahora no eran posibles.

Como ya se ha ido describiendo a lo largo del estudio, el estudio de los fragmentos aporta una serie de datos que puede ayudar a dilucidar la causa origen de la falla o rotura. A modo de ejemplo, se describen a continuación una serie de aspectos de potencial interés:

- Colaborar en el establecimiento de los parámetros de fabricación más adecuados en función del diseño y el uso del vidrio: Una batería de ensayos permite determinar las mejores condiciones de trabajo para cada uso específico.
- Conocer las tensiones internas antes de la rotura: Una medición de los fragmentos puede dar idea de las tensiones que acumulaba un vidrio templado antes del estallido de rotura. Este aspecto puede ser vital para conocer si el producto cumplía o no con las expectativas de diseño.
- Conocer la energía consumida en rotura: su determinación permitiría conocer si la rotura ha sido espontánea o provocada por un agente exterior.
- Conocer la energía consumida en ruido y movimiento: justificaría la posición de fragmentos o el reconocimiento o no del ruido.
- Conocer si había o no flexión en el momento de la rotura: Ayudando al análisis de si un vidrio está o no adecuadamente montado, pudiendo generar tensiones durante el uso.
- Conocer si ha ocurrido un impacto y su intensidad: El equilibrio de tensiones de compresión en las capas da idea del impacto, al igual que la posición del fragmento dentro de la rotura (analizando varios en distintas posiciones), permite determinar el grado de energía durante el choque.
- Conocer las direcciones y velocidad de las diferentes líneas de rotura: Con un análisis de la fractura, se pueden determinar direcciones y velocidad de la misma, lo que permite conocer el origen y el lado de rotura.
- Conocer defectos de tensiones en los vidrios originales: Un análisis pormenorizado de diferentes fragmentos en diferentes posiciones, permite establecer un mapa de tensiones que analiza el grado de calidad del vidrio con antelación.

Para el análisis siempre es interesante disponer de piezas de la misma fabricación, antes de la rotura. La comparativa entre ambos valores es mucho más eficaz para la obtención de resultados más concretos que permite conclusiones más certeras.

En el capítulo 15 se describen algunos ejemplos de estas posibilidades.

### 14.3. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA DE FRAGMENTOS

A continuación se describe de forma resumida los pasos a seguir realizados para la medición de los fragmentos durante este estudio.

1. Selección de fragmentos: Se deber hacer en función de dos aspectos:

i. Posición en el vidrio: Atendiendo al objetivo de análisis que se quiera buscar, pero en términos generales es necesario varias muestras diferentes de diferentes posiciones. Esto permitirá confirmar las medidas y a la vez hacer estudio de esfuerzos en el momento de la rotura en diferentes posiciones, lo que nos lleva a conocer origen del impacto, flexión en el momento, lado del origen e intensidad.

ii. Selección de fragmentos adecuados para la medición, ya que la propia geometría de los mismos puede imposibilitar su adecuada lectura.



*Figura 14.3.1. Comparativa de diferentes fragmentos. La selección del fragmento adecuado es fundamental para una correcta inspección.*

2. Identificación del fragmento y posición de medida: Cada fragmento seleccionado debe ser identificado y colocado adecuadamente. Los fragmentos se miden a través de su espesor, esto es perpendicular al propio espesor del vidrio. De esta forma la medición permite valorar toda la profundidad del vidrio.

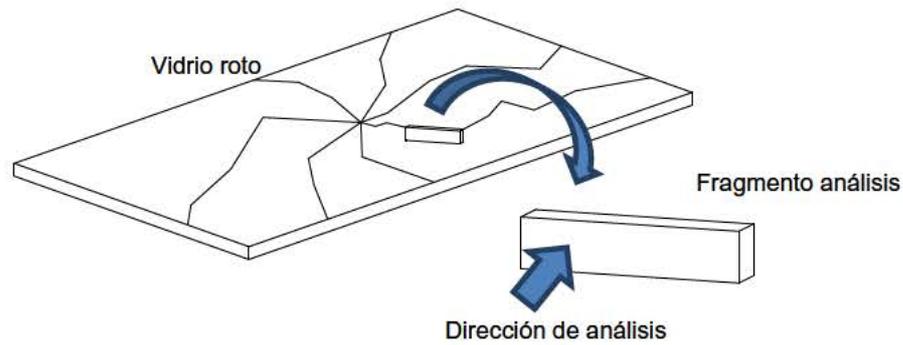


Figura 14.3.2. Dirección de análisis en el fragmento seleccionado. La luz del polariscopio debe atravesar las caras paralelas de fractura. De este modo se podrá analizar la tensión residual interna que mantiene el fragmento.

3. Marcado sección de estudio: Una vez establecida la posición de medida, se identifica bien con dos rayas o dos puntos la sección, que será la comprendida entre ambas trazas. En las fotografías adjuntas se identifica con dos líneas paralelas.



Figura 14.3.3. Marcado de la sección del fragmento. La identificación del punto de medida es fundamental, ya que diferentes puntos darán diferentes resultados, como ya se demostró en el capítulo 10..

4. Medición de los fragmentos: Con el polariscopio GES-100 Edge Stress Meter de Strainoptics® se realiza la medición. La correcta colocación dentro del visor es fundamental. En las imágenes se aprecian dos fragmentos de 4 mm y 6 mm. Se puede observar claramente la esperada parábola de tensiones en color negro.

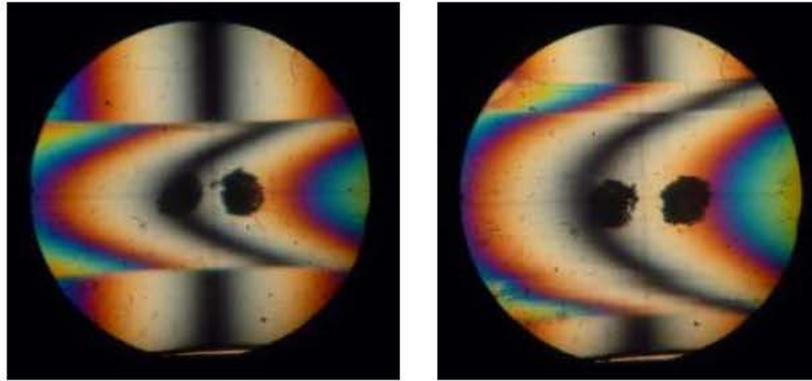


Figura 14.3.4. La medición con el polariscopio permite conocer la tensión de cada fragmento en cada punto. La curva negra representa la curva parábola esperada de tensiones en la sección del fragmento.

5. Se toman medidas tres medidas fundamentales (tensión de compresión en la parte superior, en la inferior y la central). Además se realiza la fotografía correspondiente para un análisis posterior de la curva.

6. Posteriormente se realiza una fotografía del propio fragmento para el análisis de las estrías y marcas del mismo (líneas de Wallner y otras marcas). Esta información aporta conocimiento extra de dirección y velocidad de rotura.

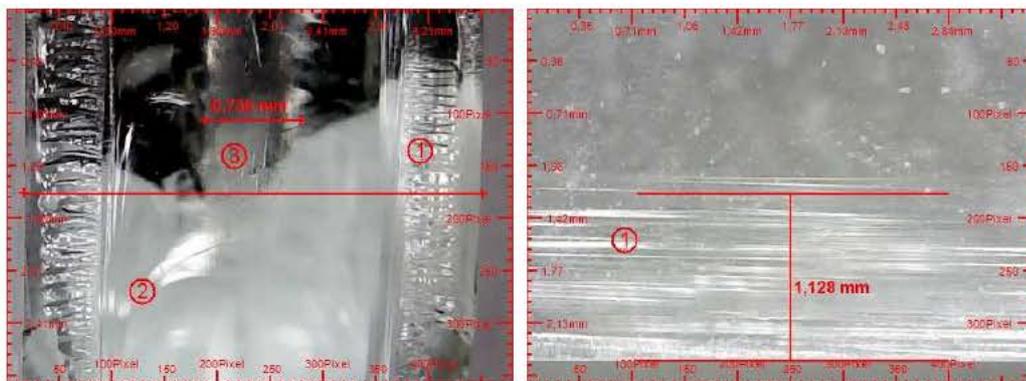
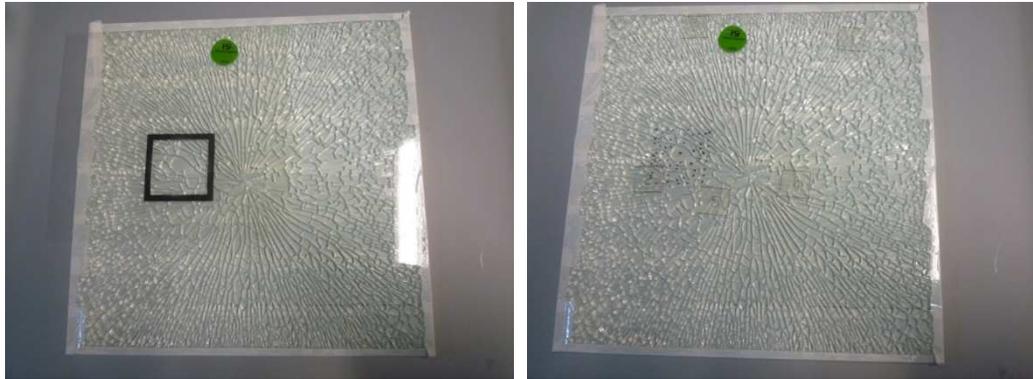


Figura 14.3.5. La medición precisa de las marcas de los fragmentos permite conocer las características de su rotura, y comparar con las mediciones de tensión.

7. Terminada la fase de medición, es momento de análisis de datos. Un esquema de la posición de los fragmentos en el vidrio, con los datos fundamentales ayuda al análisis.



*Figura 14.3.6. La toma de datos sobre la pieza en el momento del ensayo es fundamental. Conocer la posición de los fragmentos permite relacionar sus tensiones con el esfuerzo original de la rotura.*

#### 14.4. SELECCIÓN DE FRAGMENTOS

Los fragmentos seleccionados, como se indicaba en el apartado 12.3 1.ii deben cumplir una serie de requisitos. Se ha comprobado experimentalmente que la geometría y dimensiones son fundamentales para la correcta medición. Los aspectos fundamentales son:

- Espesor: Debe ser superior a 1 mm e inferior a 3, ya que por debajo y encima de estos valores las medidas no son representativas de la tensión.
- Longitud: Debe permitir que la sección de medida no esté cerca de los bordes del fragmento, lo que provocaría una medida irregular. La recomendación es no admitir fragmentos con longitudes inferiores a 10 mm.
- Geometría: Debe ser fundamentalmente un prisma. Las dos caras de la dirección de medida deben ser paralelas y sin defectos aparentes que deformen las curvas de tensión.

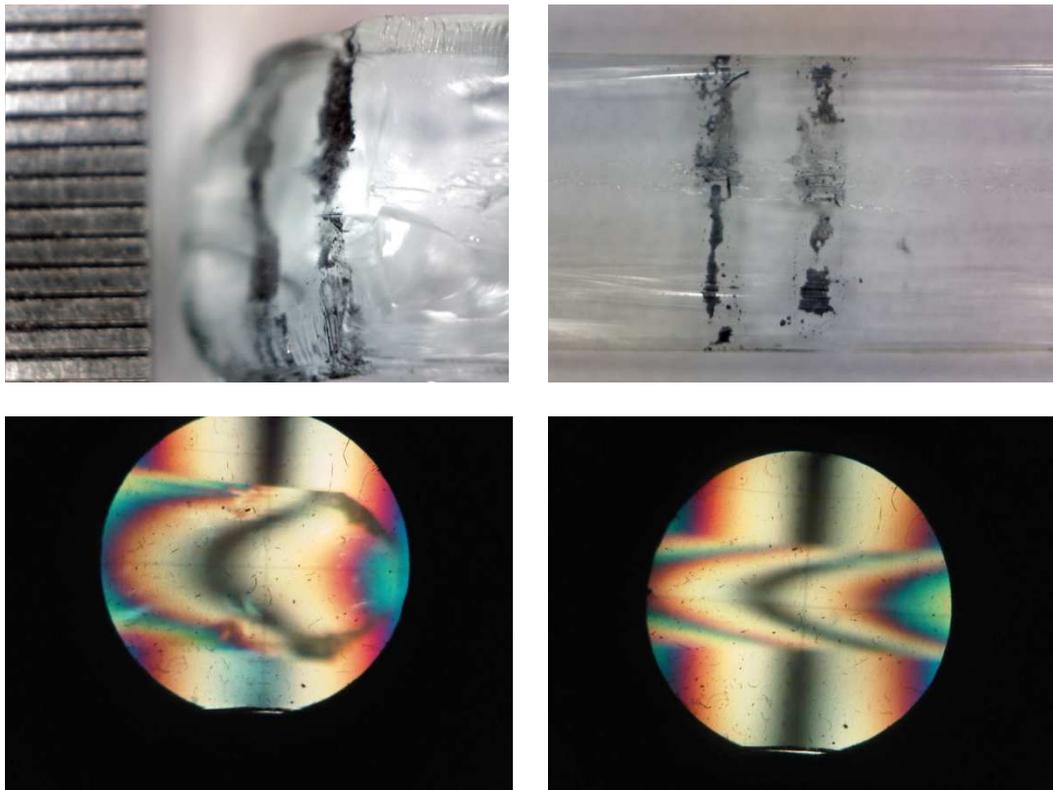


Figura 14.4.1. En las dos figuras superiores se aprecia una inadecuada selección de la sección de inspección (arriba izquierda) frente a un fragmento adecuado para su estudio (figura arriba a la derecha). Las tensiones de ambos casos están representadas debajo de cada fragmento. Se observa que la parábola de la derecha es claramente más definida que la de la izquierda, cuya irregularidad del fragmento impide una correcta medición.

## 14.5. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS FORENSE

De cara a realizar un análisis forense completo, es preciso realizar más medidas que las indicadas con los fragmentos. Como ya se ha indicado, es fundamental disponer de piezas originales con las que comparar los resultados, para así comparar el antes y después y poder obtener resultados concretos que permitan determinar las causas del fallo.

A modo de indicación, se enumeran a continuación los pasos a seguir en un análisis forense de un vidrio:

1. Estudio del entorno: Cuándo ocurrió la rotura, personas cercanas, maquinaria, etc.
2. Estudio de las condiciones de contorno: Condiciones ambientales y modo de fijación del vidrio.
3. Estudio de vidrios equivalente, si los hubiera: Determinar distribución de tensiones en espesor o superficie y/o problemas específicos como problemas con la soplante.
4. Conocer, si es posible, parámetros de fabricación.
5. Estudio del patrón general de rotura: En la medida de lo posible, es muy importante disponer visualmente el patrón, ya que facilita la localización del origen y se pueden obtener indicaciones fundamentales de la causa de rotura. Este aspecto se puede conseguir bien juntando fragmentos (en casos de vidrio recocido) o mediante un vidrio lamiando, donde el plástico intermedio permite mantener todos los fragmentos unidos. En ocasiones, si un vidrio templado monolítico está encapsulado o completamente sujeto por su entorno, se mantiene en su posición de montaje tras la rotura. Antes de proceder a tomar fragmentos conviene realizar fotografías del patrón de rotura.
6. Selección de fragmentos: Tomando varias muestras por cada posición en función de la distancia al origen.
7. Análisis de fragmentos, marcas y direcciones: Permite determinar el origen de la fractura.
8. Determinación del origen de la fractura. Estudio del mismo.

9. Medición cuantitativa del origen (tensión inicial): Existen técnicas ya demostradas por otros autores para determinar la energía inicial de la fractura. Esto puede ser determinante para conocer la fuerza del impacto, si lo hubiera.
10. Análisis de fragmentos. Medición de tensiones
11. Conclusiones del estado tensional, Predicción de rotura.

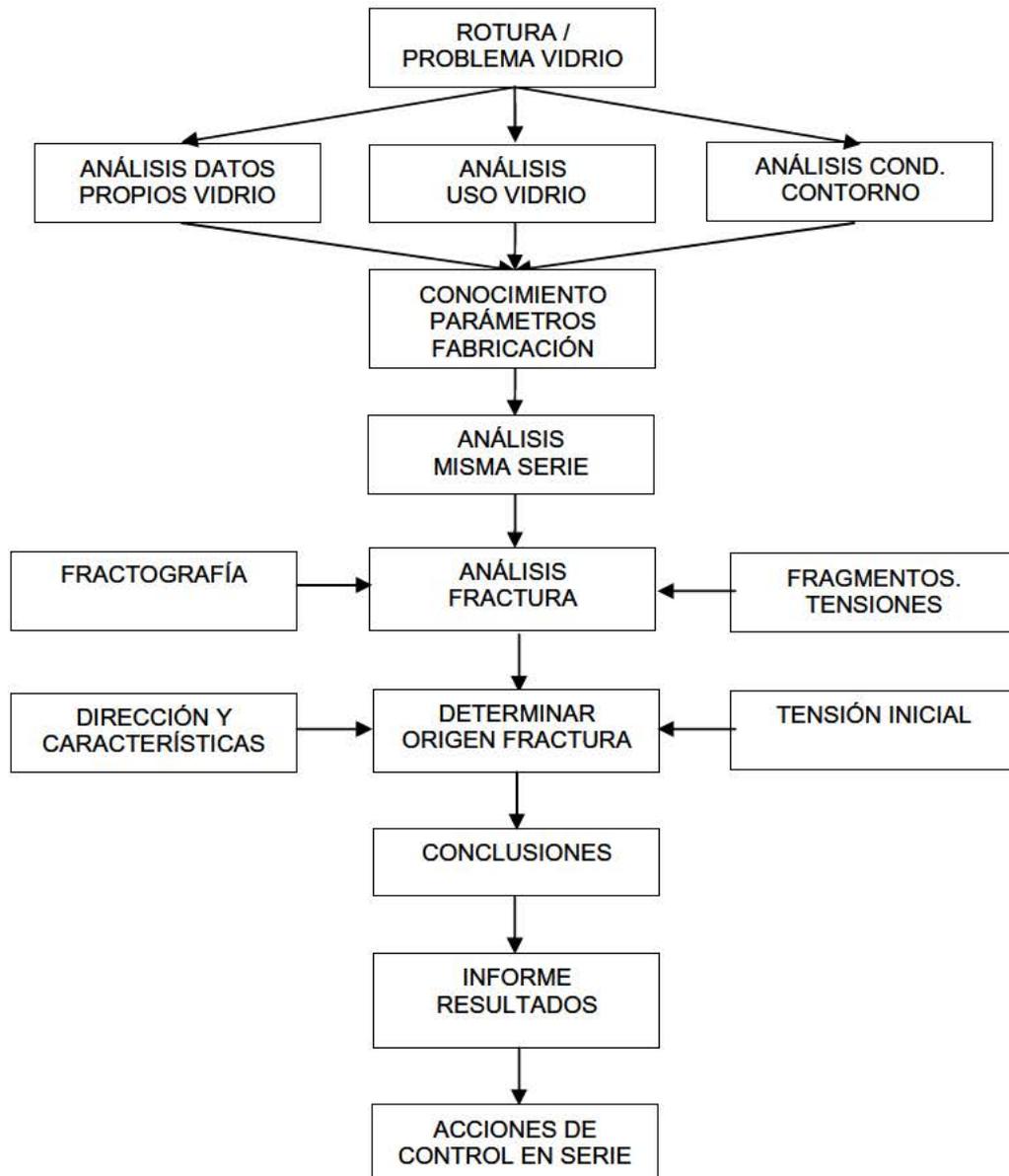


Figura 14.5.1. Propuesta de procedimiento forense de análisis de roturas en vidrio

## 15. CASOS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN

A continuación se resumen algunos casos de medición que muestran con más claridad las aplicaciones descritas en el apartado 12.

1. MUESTRA VALORES NORMALES: Medición de un fragmento obtenido por fragmentación en una probeta de 6 mm en condiciones normales de temperatura y presión.

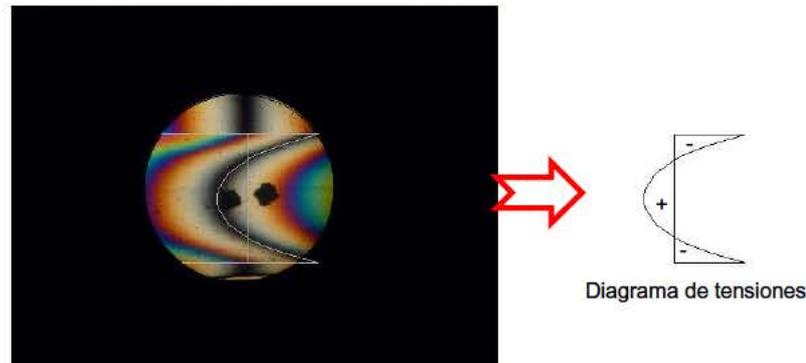


Figura 15.1. Diagrama de tensiones de un vidrio con parámetros de producción normal. Equilibrio en el diagrama de tensiones.

VALORES DE MEDICIÓN		
Posición	Tensiones (MPa)	Áreas parábola (und. cad)
Superior	-99	0.0034
Centro	41	0.0068
Inferior	-99	0.0034

Esta medición representa la situación normal de un vidrio bien templado. La curva es una parábola equilibrada, que presenta tensiones iguales en ambas caras y está equilibrado igualmente entre tensión y compresión.

2. MUESTRA CON PARÁMETROS DE FABRICACIÓN INADECUADOS: Medición de un fragmento de 6 mm de un ensayo de fragmentación con parámetros de temperatura muy baja y presión alta.

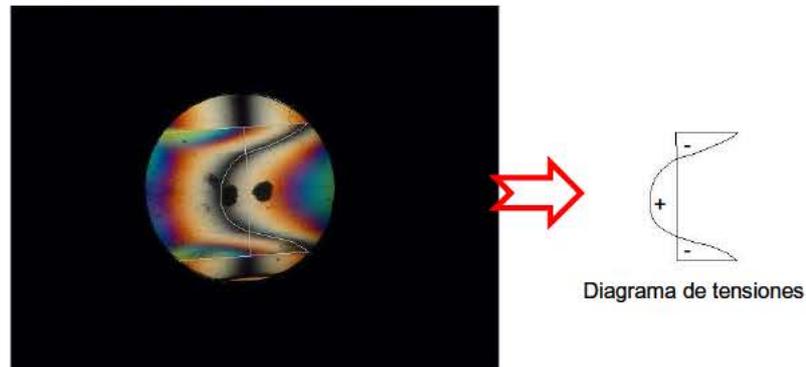


Figura 15.2. Diagrama de tensiones de un vidrio con parámetros de producción desequilibrados, con baja temperatura y presión alta.

VALORES DE MEDICIÓN		
Posición	Tensiones (MPa)	Áreas parábola (und. cad)
Superior	-89	0.0040
Centro	32	0.0065
Inferior	-83	0.0038

Se observa que las tensiones de compresión son inferiores a las esperadas. Además hay desequilibrio entre las tensiones superior e inferior y también entre total compresión ( $0,0040+0,0038 = 0,0078$  frente a los  $0,0065$  medidos).

La diferencia de tracción frente a compresión (un 20% aprox.) es consecuencia de unos inadecuados parámetros de templado. La probeta ha sido templada con baja temperatura, acumulando poco calor y en el momento del templado apenas queda tensión central. Esto repercute en peor resistencia a flexión que la esperada.

La diferencia de compresión entre caras solamente se debe a una diferencia en la presión de aire durante el proceso.

3. MUESTRA CON EFECTO DE IMPACTO: Medición de una fragmento de 4 mm de un ensayo de impacto, fragmento cercano al centro (40 mm). Parámetros de temperatura y presión altos.

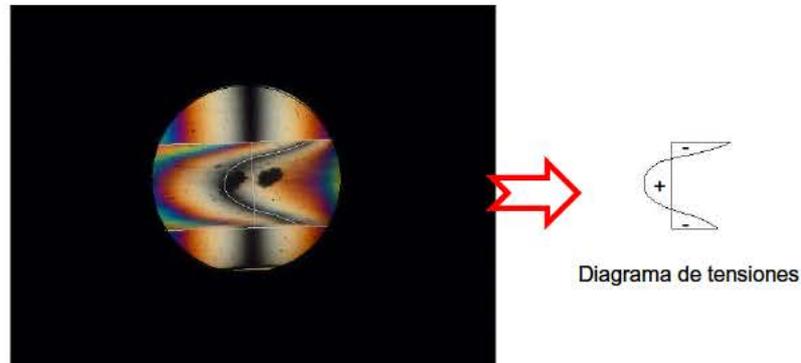


Figura 15.3. Diagrama de tensiones de un vidrio sometido a un impacto. Las tensiones muestran una diferencia importante entre ambas caras debido al impacto.

VALORES DE MEDICIÓN		
Posición	Tensiones (MPa)	Áreas parábola (und. cad)
Superior	-101	0.0023
Centro	49	0.0044
Inferior	-92	0.0021

En este caso se observa que hay una evidente diferencia de presión entre las capas de compresión. Conociendo que la probeta ha sido templada con condiciones iguales de presión en las dos caras (se comprueba al medir otras piezas de la misma serie), la única explicación es que la diferencia de compresión ha sido provocada durante la fractura.

Efectivamente, esta probeta ha sido ensayada a impacto, localizándose el fragmento relativamente cercano al centro del mismo, lo que flexiona la pieza y genera tensión adicional de flexión.

4. MUESTRA CON EFECTO DE IMPACTO, MÁS ALEJADA DEL CENTRO: Medición de un fragmento de un vidrio de 4mm tras un ensayo de impacto. Fragmento situado lejos del impacto (180mm). Temperatura y presión normal.

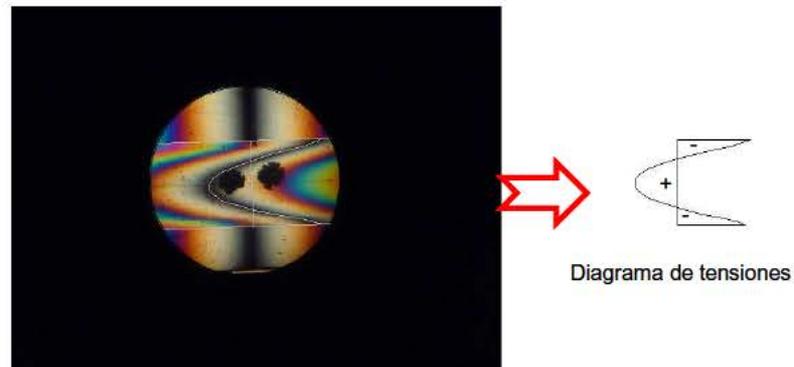


Figura 15.4. Diagrama de tensiones de un vidrio sometido a impacto. La distancia respecto a la pieza de la figura 13.3 que las tensiones se han equilibrado, no presentando ya el efecto del impacto. La energía del mismo se ha disipado en la zona cercana al centro del impacto.

VALORES DE MEDICIÓN		
Posición	Tensiones (MPa)	Áreas parábola (und. cad)
Superior	-74	0.0032
Centro	46	0.0058
Inferior	-73	0.0026

Se observa que a diferencia del caso anterior, apenas hay diferencia de valor de tensión, aunque sí hay diferencia de área, como es de esperar consecuencia de la flexión.

Efectivamente, este fragmento se encuentra a 180 mm de distancia del centro del impacto.

## 5. DISTRIBUCIÓN DE LAS TENSIONES EN UN VIDRIO COMERCIAL. EJEMPLO DE AUTOMOCIÓN.

A continuación se presentan algunas imágenes de vidrios comerciales donde se aprecia la distribución de tensiones. En si mismo no representa un defecto la detección de estas diferencias, pero son indicadores de los puntos de medida necesarios para comenzar el análisis.

En la mayoría de los casos, al ser vidrios muy comerciales, no presentan defectos importantes debido a que las soplantes son muy ajustadas a la geometría del vidrio. Sin embargo se pueden apreciar puntos de falta de homogeneidad:



*Figura 15.5.1. Luneta trasera vehículo comercial de 2004. Se aprecia una correcta distribución de la soplante. Esto indica que es una máquina a medida de la pieza. La falta de lagunos puntos indica problemas puntuales en la máquina. Aunque no son de importancia, un control de los mismos asegura una producción según los parámetros de diseño.*

En otros modelos más antiguos, la distribución es uniforme pero la calidad del templado es más irregular. Esto es debido a que las soplantes están más alejadas y la producción es más inestable:



*Figura 15.5.2. Luneta trasera vehículo comercial de 1996. Aunque la distribución es adecuada, la difusión de las marcas indica un soplado más alejado del vidrio, lo que podría indicar el uso de una soplante universal. Esto es frecuente en modelos cuya curvatura resulta sencilla.*



*Figura 15.5.3. Luneta trasera vehículo comercial de 2005. Aunque también presenta difusión en las marcas, la distribución es más homogénea, denotando una máquina particular para este modelo.*

En vehículos de alta gama, la distribución es completamente uniforme. Esto se consigue con una adecuada geometría de soplante, lo que encarece el proceso de fabricación. Además la uniformidad de los puntos indica un adecuado equilibrio de tensiones entre ellos.



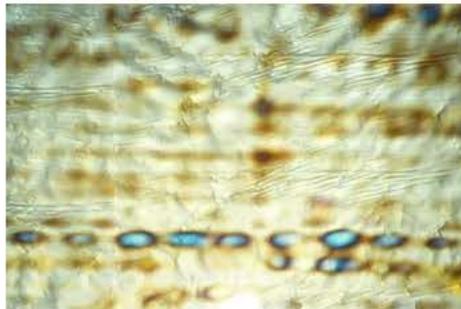
*Figura 15.5.4. Luneta trasera de un vehículo de alta gama comercial de 2001. La distribución es homogénea y en la posición y uniforme en la tensión. Aunque es un modelo de serie baja de unidades, se aprecia la fabricación de una máquina particular para su fabricación.*



*Figura 15.5.5. Al igual que la figura 13.5.4, la luneta es de un vehículo de alta gama, pero más moderno, de 2013. Las marcas, además de homogeneidad y uniformidad, presentan un patrón de diferentes geometrías (círculos y rectángulos). Esto indica una soplante con una geometría más moderna que asegura un correcto equilibrado del vidrio.*

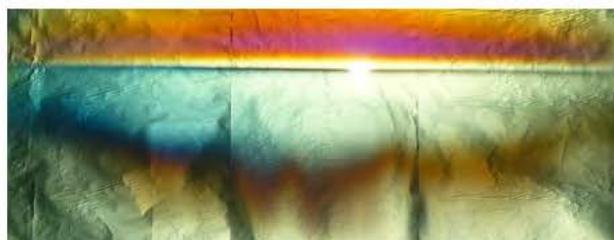
La Verificación de estas distribuciones con el polariscopio da información más precisa que permite hacer análisis cuantitativos del potencial riesgo de rotura antes esfuerzos inferiores o incluso espontánea sin aplicar carga alguna.

En este caso se analiza la superficie de un vidrio pequeño de automoción, que ha sido fabricado con un utillaje universal. Al no adaptarse a la geometría definitiva de la pieza, se generan tensiones mal distribuidas que pueden provocar desviaciones al comportamiento esperado, incluso la propia rotura espontánea del vidrio.



*Figura 15.6.1. Vidrio comercial sometido a la imagen de un polariscopio de mayor dimensión (UR). Se aprecia la falta de homogeneidad en la presión de las soplantes, dejando algunos puntos con más tensión que otros.*

Las tensiones internas no deseadas se pueden dar en otros casos además del vidrio templado. Por ejemplo en vidrios decorativos, cuya geometría y curvatura exige de moldes especiales donde apoya toda la superficie, puede generar tensiones internas aún en casos en que el vidrio no se ve sometido al tratamiento térmico.



*Figura 15.6.2 . Vidrio curvado sin templar. En aplicaciones de vidrio decorativo (como es el caso) se utilizan moldes metálicos para dar forma al vidrio. Además de las marcas en la superficie, se pueden generar tensiones internas que provoquen, en casos de pequeños esfuerzos, roturas espontáneas de difícil explicación.*

## 16. DISCUSIÓN

Al inicio de esta investigación se plantearon dos objetivos primordiales:

- Establecimiento de la relación directa entre los parámetros del proceso y los resultados a la resistencia mecánica materializada en diferentes ensayos
- Metodología de medición de tensión en fragmentos de vidrio templado, de cara a conocer mejor la mecánica de la fractura en el vidrio templado y servir de base para futuras aplicaciones forenses.

En lo referente al primer objetivo se ha demostrado que la influencia de los parámetros de proceso es determinante para el conocimiento del producto final. En primer lugar, cabe destacar la falsa creencia de que el ensayo de fragmentación en un vidrio templado es un fiel reflejo de la tensión interna acumulada. Este concepto es erróneo, ya que, aunque sí mantiene una cierta coherencia, no es una relación matemática que permita establecer el grado de tensión con precisión. Se podría indicar que el cumplimiento del ensayo de fragmentación asegura que el vidrio es de seguridad, ya que un mínimo grado de tensión asegura la fragmentación, pero no asegura la resistencia mecánica.

Otro aspecto a destacar, también descrito por múltiples autores, es que las tensiones internas tienen relación directa con la resistencia mecánica. Sin embargo, se ha demostrado que esta relación se mantiene para unos mismos parámetros. Si éstos son cambiados, la relación cambia de pendiente, estableciendo otra línea de proporcionalidad entre ambas variables. Este aspecto es de gran interés de cara a las aplicaciones finales del vidrio, pues está estableciendo el principio de fijar los parámetros en función de la finalidad de uso, algo a lo que la industria, al menos de forma general, no está habituado a seguir, ya que prevalece el cumplimiento de la geometría y aspecto cosmético que la importancia de la resistencia mecánica.

En cualquier caso, aun controlando adecuadamente los parámetros del proceso, existen múltiples aspectos influyentes en el resultado final. Las máquinas implicadas en la producción, su diseño y sus posibilidades, generan variaciones en el estado tensional. La distribución de tensiones uniforme geométricamente y homogénea en magnitud es un aspecto fundamental para asegurar un producto acorde con lo diseñado. Esto lleva a considerar que toda medición de tensiones debe contemplar estos aspectos, pues una sola medición no es representativa de las propiedades de la pieza. Aunque este aspecto daría para otra investigación completa, es importante mantener presente la importancia de la distribución de las tensiones, especialmente en los bordes y próximos a taladros o puntos de concentración de tensiones en los vidrios templados.

Respecto al segundo objetivo planteado inicialmente, referente a la medición de los fragmentos, se ha descubierto que éstos mantienen una cantidad de energía acumulada aún después de romper. Pero lo más importante es el conocimiento adquirido respecto a cómo se produce esta rotura y qué significado tiene. Se ha comprobado que la energía interna de tracción sirve para realizar la generación de nuevas grietas, y su energía se consume con el fin de propagar la fractura a todo el vidrio, debido a que no puede contener el desequilibrio de tensiones. Por esta razón el valor residual tiende a un valor mínimo de tensión, coincidente con el valor mínimo necesario para la rotura del vidrio (coherente con su factor de elasticidad).

Sin embargo la energía de compresión no desciende en proporción, sino que desciende un cierto valor respecto la tensión original. Esto es debido a que ésta energía no propaga la grieta, sino que se consume en otros factores físicos como son el ruido y movimiento. Aunque la relación es poco estable y requeriría de más ensayos, se cree puede tener relación con la tensión original del vidrio, esto es, que la tensión de compresión tiende a una reducción estable de su energía, pero proporcional al original.

Este aspecto es relevante desde el punto de vista forense, permitiendo establecer el grado de tensión de un vidrio original aún después de haber sido estallado. El desarrollo de esta técnica permitiría averiguar en múltiples ocasiones la causa de rotura de vidrios, determinando su origen y causa de rotura.

Por todo ello, se considera que ambos objetivos han sido abordados y desarrollados, consiguiendo en ambos casos información relevante para la fabricación, control y análisis de fallas en el vidrio templado.

## **17. CONCLUSIONES**

A continuación se enumeran una serie de puntos que resumen los aspectos más importantes de la investigación.

### **17.1. PARÁMETROS DE PROCESO**

A mayor temperatura se consigue mayor tensión de superficie, mayor resistencia a la flexión y al impacto. No hay una relación clara con la fragmentación, una vez superado el límite básico exigido para ser vidrio de seguridad.

A mayor presión se consigue mayor tensión de superficie, ensayo de flexión e impacto (aunque estos dos últimos ligeramente). Existe una relación directa con la fragmentación, consiguiendo mayor número de fragmentos y menos longitud de agujas cuanto mayor es la presión.

Los parámetros de proceso influyen en conjunto en la resistencia mecánica, y si los parámetros se mantienen, existe relación lineal. Sin embargo para la misma tensión, conseguida con diferentes parámetros, la resistencia mecánica no es proporcional.

### **17.2. FRAGMENTACIÓN Y TENSIONES INTERNAS. NORMATIVA**

El resultado de la fragmentación con es un aspecto que permita concluir las tensiones internas que presenta un vidrio templado. Una vez asegurado un valor de tensión, el vidrio fragmentará de forma que permita catalogarlo como vidrio de seguridad, pero ya no mantiene la relación con las tensiones.

Este aspecto es fundamental en la aplicación de las diferentes normativas, cuyo fin es establecer criterios de seguridad, pero no establecer principios de resistencia mecánica. Por esta razón, el cumplimiento de una normativa no asegura una resistencia mecánica durante el uso posterior.

### **17.3. DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES**

La medición de los vidrios es una labor compleja y que requiere de cierta formación. El conocimiento de las posibles faltas de homogeneidad en la superficie y la relación que tiene esto con la resistencia mecánica permite establecer controles o análisis de confianza. En sentido contrario, mediciones simples, aisladas y sin fundamento puede llevar a errores

en el control, permitiendo la fabricación de unidades fuera de especificación del uso previsto, aun estando correctos según la normativa, como ya se ha comentado.

#### **17.4. FRACTOGRAFÍA DEL VIDRIO TEMPLADO**

El conocimiento de las marcas existentes en las superficies de fractura y su análisis resultan de gran importancia para el análisis forense de vidrios. El origen, las estrías y otros aspectos permiten conocer la dirección y velocidad de la fractura, el origen, la tensión del impacto o deformación original, el sentido del golpe (lado del vidrio) y otros aspectos de alto interés para el análisis forense.

Un conocimiento básico de estos aspectos puede también resultar interesante para la propia fabricación del vidrio, ya que saber determinar su estado de equilibrio y causas de rotura, permitirá ajustar los parámetros oportunamente para el uso destinado.

#### **17.5. ANÁLISIS Y ESTADO TENSIONAL DE LOS FRAGMENTOS**

Uno de los aspectos de mayor interés en la investigación. Se ha comprobado que la medición de los fragmentos es posible, y que puede aportar información relevante. La tensión central es la causante de la propagación de la fractura, mientras que las tensiones de compresión de las superficies son las encargadas de otros aspectos físicos. La medición de los valores de tensión de compresión permiten establecer un valor de referencia de la tensión original del vidrio. Sendos análisis de la mecánica de la fractura y energía intercambiada corroboran los resultados obtenidos empíricamente.

## 18. VÍAS DE INVESTIGACIÓN ABIERTAS

El desarrollo de esta investigación deja, como no puede ser de otra forma, una lista de tareas descubiertas durante el proceso de estudio, que, según se han ido abriendo, se observa que en sí mismas suponen una nueva investigación. Este apasionante aspecto es lo que hace difícil centrar una investigación y es importante regirse firmemente a los objetivos marcados inicialmente para no salirse del rumbo.

A continuación, de forma simple, se enumeran algunas de las más importantes vías de investigación abiertas, para que, en un futuro, alguien, o incluso éste mismo equipo investigador, pueda desarrollarlas con el único fin de mejorar el conocimiento profundo de los fenómenos que se dan en la naturaleza y tratamos de conocer como seres humanos.

1. Parámetros de proceso: Sería de gran interés poder cuantificar la relación entre los diferentes parámetros y la relación con las tensiones. Esto requeriría de gran cantidad de probetas, fabricadas con los diferentes parámetros, obteniendo leyes de comportamiento que permitirían con mayor facilidad el ajuste de modelos y su aseguramiento para usos de resistencia mecánica.
2. Obtener relación empírica de la influencia de la distancia al origen de rotura respecto a las tensiones internas y la propagación de la rotura.
3. Determinación de factores de control en las distribuciones de tensiones. El cumplimiento de las mismas aseguraría la resistencia mecánica esperada.
4. Profundizar en los criterios que influyen para que dos probetas con la misma tensión, pero provenientes de fabricaciones con distintos parámetros, obtengan resultados diferentes en los ensayos mecánicos.

Todos estos puntos, que de por sí cada uno requeriría de una profunda investigación, podrían componer conjuntamente un criterio de diseño del vidrio templado. Estableciendo un “**índice de confiabilidad en el vidrio**” que permita, en función de los parámetros, mediciones realizadas, uso al que va destinado y condiciones de contorno del mismo, establecer un valor numérico del riesgo de rotura real que potencialmente podría tener.

Este “**índice de rotura**” (que podría ser otro término válido), permitiría catalogar los vidrio templados en escalas, aspecto que actualmente no existe y podría clasificar tanto incluso los fabricantes en niveles y categorías, a tenor de la clasificación de los productos que pudieran fabricar.

5. Desarrollar una metodología profunda y cuantitativa para la medición de los fragmentos de un vidrio templado, tras la rotura.

Dicha metodología es de gran interés para la ingeniería forense de vidrio, permitiendo abordar análisis hasta ahora imposibles debido a que la muestra causa de discusión ha estallado en mil pedazos.

## 19. REFERENCIAS

1. Suresh T. Gulati. "Frangibility of tempered soda-lime glass sheet". Science and technology division, corning Incorporated. Glass Processing days, 13-15 September 1997.
2. Michel Dubru, Jean Clement Nugue, Guy Van Marcke de Lummen, "Toughenes Glass: Mechanical Properties and EN12600 Behaviour". Glass processing days 2005. *www.gpd.fi*
3. Hillar Aben, Johan Anton, Andrei Errapart, Siim Hödemann, Jaak Kikas, Helina Klaaassen, Marko Lamp. "On non-destructive residual stress measurement in glass panels". Estonian Journal of Enginnering 2010, 2, 150-156.
4. Jens Henrik Nielsen, John Forbes Olesen, Henrik Stang. "Characterization of the residual stress state in commercially fully toughened glass". Journal of material in civil engineering ASCE, 2010.
5. Carlos Navarro. "Fotoelasticidad". Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras 2009.
6. Jens Henrik Nielsen. "Tempered Glass-bolted connections and related problems". DTU Civil Engineering Report R-204 (UK) September 2009.
7. George D. Quinn." Fractography of Ceramics and Glasses". National Institute of Standards and Technology Special Publication 960-16. 2007.
8. A. I. Shutov, I. A. Shchetinina, N. A. Gerasimova, K. A. Medvedev, and V. V. Gubareva. "A refined method for predicting the type of destruction in hardened glass". Glass and Ceramic. Vol. 60, Nos. 7 – 8, 2003.
9. A. I. Shutov, P. B. Popov, A. B. Bubeev. "prediction of the character of tempered glass fracture". Glass and Ceramic. Vol. 55, Nos. 1- 2, 1998.
10. A. I. Shutov, x P. V. Popov, V. L. Todorov and V. G. Strukov. "Reducing the breakage rate in glass tempering". Glass and Ceramic. Vol. 54, Nos. 9- 10. 1997.
11. Vincenzo M. Sglavo, Andrea Prezzi, Thomas Zandonella. "Engineered Stress-Profile Silicate Glass: High Strength Material Insensitive to Surface Defects and Fatigue". Advanced Engineering Materials 2004, 6, n<sup>o</sup>5.

12. Naimeh Khorasani. "Design Principles For Glass Used Structurally". Rapport TABK-04/1025 Lund 2004 Department of Building Science. Building Science Department Lund University Box 118 221 00 Lund.
13. Matteo Schiavonato, Ennio Mognato, Alex S. Redner. "Stress Measurement, Fragmentation and Mechanical Strength. a Review of Test Results According to EN 12150:2000 and EN 1863:2000". Glass procesing days 2005.
14. A.S. Redner, B.R. Hoffman. "Measuring stresses and optical distorsion for QC of automovile glass". Strain Optics. Glass Processing days, 13-15 September 1997.
15. A.S. Redner. "Automated Measurement os Edge Stress in Automotive Glass". Strain Optics. Glass Processing Days 2003.
16. D. Callewaert, J. Belis, M. Vandebroek, R. Van Impe. "spontaneous failure of a passable laminated glass floor element". Laboratory for Research on Structural Models, Ghent University. Engineering failure analysis (2011).
17. Andrew Kwok wai So, Siu Lai chan. "Nonlinear finite element analysis of glass panels". Deparment od civil and Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic University. Engineering Structures, Vol.18. Pp645-652. 1996.
18. R.A. Tomlinson, G.C. Calvert, A.R. Conway. "A photoelastic investigation into spontaneous glass fracture". Department of Mechanical Engineering, Sheffield University. Proceedings of XIth International Congress and Exposition.
19. Hoikwan Lee, Seoyeong Cho, Kyungmin Yoon, Jaeho Lee. "Glass thickness and fragmentation behaviour in stressed glasses". Glass Tech Research Center, Samsung Corning Precision Materials. New Journal of Glass and Ceramics, 2012.
20. J.H. Nielsen, J.F. Olesen, H.Stang. "The fracture process of tempered sola-lime-silica glass". Department of Civil engineering, Technical Universitiy of Denmark. Experimental Mechanics 2008.
21. Vincenzo M. Sglavo, Andrea Prezzi, Thomas Zandonella. "Engineered stress-profile silicate glass: High strength material insensitive to surface defects and fatigue". Advanced engineering materials, 2004.
22. Mauro Overend, Sergio De Gaetano, Matthias Haldimann. "Diagnostic interpretation of glass failure". Structural Engineering International, 2007.
23. Salvador Ortolá. "Principios de la Mecánica de la Fractura". <http://ingenieriademateriales.wordpress.com/author/ingenieriademateriales/>

24. William D. Callister Jr. "Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Materiales". Ed. Reverté S.A.
25. Federico París. Vladislav Mantic. "Mecánica de la Fractura". Depto. de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla.
26. Francisco Capel. "La fractura del vidrio". Instituto de Cerámica y Vidrio. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. <http://www.gef.es/Congresos/26/pdf/6.pdf>
27. CITAV- Saint-Gobain Cristalería, S.A 2001
28. Jonathan Barr. "Glass tempering by numbers". Glass processing days 2006
29. Naimeh Khorasani. "Design Principles For Glass Used Structurally". Rapport TABK-04/1025 Lund 2004 Department of Building Science
30. Salvatore Alexander Ruggero. "Quantitative fracture analysis of etched soda-lime silica glass: evaluation of the blunt crack hypothesis". A thesis presented to the graduate school of the University of Florida. 2003.
31. Jens Henrik Nielsen. "Tempered Glass". DTU Civil Engineering Report R-204 (UK), September 2009.
32. S. Jill Glass, Matthew Abrams, Rudolph V. Matalucci. "New Glass Technologies for Enhanced Architectural Surety Engineered Stress Profiles (ESP) in Soda-Lime-Silica Glass". Sandia National Laboratories P.O. Box 5800 Albuquerque, NM 87185-0782
33. J. J. Mecholsky, r. W. Rice, s. W. Freiman. "Prediction of Fracture Energy and Flaw Size in Glasses from Measurements of Mirror Size". Engineering Materials Division, Naval Research Laboratory, Washington, DC 1974.
34. Yiwang Bao, Jian Yang, Yan Qiu, Yile Song. "Space and time effects of stress on cracking of glass". Materials Science and Engineering A. 512. 2009.
35. James W. Phillips. "Photoelasticity". TAM 326—Experimental Stress Analysis
36. Carlos Navarro. "FOTOELASTICIDAD". Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. universidad Carlos III de Madrid.
37. J. Fineberg, E. Sharon, G. Cohen, "Crack Front Waves in Dynamic Fracture". International Journal of Fracture 119: 247–261, 2003

38. Suresh Gulati<sup>1\*</sup> and Timothy Roe. "Importance of Edge Finish on Thermal Tempering". Glass Processing Days, 18–21 June 2001
39. Joaquín Diéguez Novoa. "Estudio del templado químico por intercambio iónico de vidrios sódico-cálcicos comerciales". Universidade de Santiago de Compostela, Instituto de Cerámica de Galicia. 2010.
40. Guardian SunGuard. "Información técnica – Build with light". GUARDIAN Europe Código de referencia: SG TG/09.
41. "Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del Sector de la Fabricación del Vidrio" Ministerio Medio Ambiente. 2007.
42. Carlos Pearson. "Manual del Vidrio Plano". CAVIPLAN. Cámara del Vidrio Plano y sus Manufacturas de la República Argentina.
43. Oscar Domingo Sandín, Félix Áinz. "STRUCTURAL GLASS SYSTEM" Patent application number: 20090110866. Glass XXI.
44. J. Fineberg, e. Sharon, g. Cohen. "Crack Front Waves in Dynamic Fracture". International Journal of Fracture 119: 247–261, 2003.
45. Suresh Gulati, Timothy Roe. "Importance of Edge Finish on Thermal Tempering". Glass Processing Days, 18–21 June 2001.
46. Johan Anton, Andrei Errapart, Mart Paemurru, Dominique Locheignies, Siim Hödemann and Hillar Aben. "On the inhomogeneity of residual stresses in tempered glass panels". Estonian Journal of Engineering, 2012, 18, 1, 3–11
47. P. Castellini, L. Stroppa, N. Paone. "Laser sheet scattered light method for industrial measurement of thickness residual stress distribution in flat tempered glass". Optics and Lasers in Engineering 50 (2012) 787–795.
48. "The Appearance of Quench Marks in Heat Strengthened and Tempered Glass". Pilkington Technical Information ATS -157 2007-07-25.
49. Satoshi Yoshida, Sohtaro Iwata, Toru Sugawara, Yoshinari Miura, Jun Matsuoka, Andrei Errapart, Charles R. Kurkjian. "Elastic and residual stresses around ball indentations on glasses using a micro-photoelastic technique". Journal of Non-Crystalline Solids 2012. NOC-15963; N° of Pages 8.

50. Glaverbel, guardian, Pilkington, Saint-Gobain glass. "Evaluation of conformity of "thermally toughened soda lime silicate safety glass" to hEN 12150-2". GEPVP, the European Association of flat Glass Manufacturers, July 2005.
51. Luis Ortiz Berrocal. "Resistencia de Materiales". Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. Ed. Mc.Graw-Hill.
52. Francisco Capel. "La fractura del vidrio". Instituto de Cerámica y Vidrio. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Anales de Mecánica de la Fractura 26, Vol. 1 (2009).
53. José Luis Arana, Javier Jesús González. "Mecánica de la fractura". Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. ISBN: 84-8373-455-9

## 20. ANEXOS

A continuación se presentan las tablas de datos obtenidas durante el análisis de proceso, probetas y ensayos.

Se han clasificado en varios grupos, para su mejor seguimiento:

- Anexo A: Tablas datos para probetas de 4 mm. La producción fue realizadas el 15/09/2012 a las 4:56 A.M. en las instalaciones Starglass S.A.
- Anexo B: Tablas datos para probetas 6 mm. La producción fue realizada el 16/10/2012 a las 4:00 A.M. en las instalaciones Starglass S.A.

A continuación se explican brevemente cada uno de los apartados de las tablas, indicando unidades o importancia del parámetro mostrado.

- Parámetros de probeta:
  - Temperatura: Indica la temperatura de proceso. Se referencia respecto a la temperatura habitual del proceso para cada espesor, indicando si es más alta, más baja o la habitual. Es una referencia cualitativa.
  - Presión: Al igual que la temperatura anterior, es una comparación con el proceso normal.
  - Espesor: Espesor de las probetas. Solamente se han ensayado dos: 4 mm (realmente son 3,85 mm) y 6 mm (realmente son 5,85 mm).
- Parámetros de producción:
  - Orden templado: Indica el orden de entrada en el horno. En teoría no es un parámetro influyente, pero podría generar algunas variaciones sobre todo en las primeras piezas.
  - T<sup>a</sup>: temperatura real del proceso, tomado con el pirómetro
  - Velocidad línea (LS): indica velocidad de la línea en mm/seg. En un parámetro de control del horno, para regular la temperatura que alcanzan las probetas.
  - Presión superior: Presión de aire en la soplante superior en mmHg
  - Presión inferior: Presión del aire en la soplante inferior mmHg.
- Tensión superficie:
  - Grados: Unidad de medida del polariscopio. En muchos casos se toma como referencia, más que la conversión a MPa.

- MPa: traducción de los grados del polariscopio a unidades S.I.
- Cara estaño: Indica si la cara estaño, que es donde se realiza la medición, era cara superior al pasar por el horno.
- Ensayo: Indica simplemente el destino de ensayo de cada probeta.
- Fragmentación:
  - Número fragmentos: Número de fragmentos en un rectángulo de 45x45 mm, según Reglamento N°43.
  - Longitud aguja: Longitud de la máxima aguja según Reglamento N43
- Flexión:
  - Fuerza: En Kg. máxima previa a la rotura
  - Deformación para distintas fuerzas: Como medida de deformación lineal. Deformaciones para diferentes fuerzas.
- Impacto:
  - Máxima altura sin romper: Altura en la que la probeta superó el último impacto. Intervalos de altura de 10 cm en 4 mm y de 25cm en 6 mm.
  - Número de ensayos sin romper: El total de impactos recibidos sin romper.
- Características del fragmento:
  - Espesor: Espesor del fragmento en mm. Considérese que la altura del fragmento es realmente el espesor del vidrio original. Es decir, una vez fracturado el vidrio en posición horizontal (apoyado sobre una mesa), se toma un fragmento y se bascula hasta depositarlo sobre la propia mesa, dejando por tanto es espesor como altura del fragmento. Parámetro fundamental para la medición.
  - Longitud: Longitud máxima del fragmento en mm. Resulta un parámetro fundamental para la selección de los fragmentos.
  - Distancia al centro de impacto: De importancia en aquellos casos de estudio analizando la evolución de la tensión desde el origen. Distancia en mm.
- Tensiones Medición horizontal: Considerando el fragmento en horizontal respecto al polariscopio.
  - Medidas en posición 1,3,5: Son las medidas en grados. La posición 1 corresponde a la parte superior de la sección (superficie de impacto, o generación de la fragmentación). La parte 3 corresponde a la fibra neutra y la parte 5 corresponde a la superficie inferior.
  - Tensiones en posición 1,3,5: Conversión a MPa del S.I.

- Tensiones medición vertical: considerando el fragmento en vertical respecto al polariscopio.
  - Medidas en posición 1,3,5: Son las medidas en grados. Misma disposición de los puntos 1, 3 y 5 que el caso de medidas horizontales.
  - Tensiones en posición 1,3,5: Conversión a MPa del S.I.

## 20.1. ANEXO A: TABLAS DATOS PROBETAS 4 mm

PROBETAS 4 mm								
Parámetros de la probeta				Parámetros producción				
Nº Probeta	Temperatura	Presión aire	Espesor (mm)	Orden de templado	Tª	Velocidad línea (LS)	Presión Arriba	Presión Abajo
1	Tª - Normal	Normal	4	17	635		25	25
1 - 1	Tª - Normal	Normal	4	17	635		25	25
1 - 2	Tª - Normal	Normal	4	17	635		25	25
1 - 3	Tª - Normal	Normal	4	17	635		25	25
1 - 4	Tª - Normal	Normal	4	17	635		25	25
2	Tª - Normal	Normal	4	18	638		25	25
3	Tª - Normal	Normal	4	19	631		25	25
4	Tª - Normal	Normal	4	20	630		25	25
5	Tª - Normal	Normal	4	21	635		25	25
6	Tª - Normal	Normal	4	22	628		25	25
11	Tª - Normal	Alta	4	23	638		31	31
12	Tª - Normal	Alta	4	24	635		31	31
13	Tª - Normal	Alta	4	25	632		31	31
14	Tª - Normal	Alta	4	26	630		31	31
21	Tª - Normal	Baja	4	13	623		15	15
22	Tª - Normal	Baja	4	14	632		15	15
23	Tª - Normal	Baja	4	15	636		15	15
24	Tª - Normal	Baja	4	16	636		15	15
31	Tª - Alta	Normal	4	35	651		25	25
32	Tª - Alta	Normal	4	36	651		25	25
33	Tª - Alta	Normal	4	37	650		25	25
34	Tª - Alta	Normal	4	38	641		25	25
41	Tª - Alta	Alta	4	39	649		31	31
42	Tª - Alta	Alta	4	40	648		31	31
43	Tª - Alta	Alta	4	41	646		31	31
44	Tª - Alta	Alta	4	42	647		31	31
51	Tª - Alta	Baja	4	31	646		15	15
51 - 1	Tª - Alta	Baja	4	31	646		15	15
52	Tª - Alta	Baja	4	32	651		15	15
53	Tª - Alta	Baja	4	33	643		15	15
54	Tª - Alta	Baja	4	34	645		15	15
61	Tª - Baja	Normal	4	5	615		25	25
62	Tª - Baja	Normal	4	6	619		25	25
63	Tª - Baja	Normal	4	7	607		25	25
64	Tª - Baja	Normal	4	8	617		25	25
71	Tª - Baja	Alta	4	9	612		31	31
72	Tª - Baja	Alta	4	10	609		31	31
73	Tª - Baja	Alta	4	11	619		31	31
74	Tª - Baja	Alta	4	12	625		31	31
81	Tª - Baja	Baja	4	1	610		19	19
81 - 1	Tª - Baja	Baja	4	1	610		19	19
81 - 2	Tª - Baja	Baja	4	1	610		19	19
81 - 3	Tª - Baja	Baja	4	1	610		19	19
81 - 4	Tª - Baja	Baja	4	1	610		19	19
82	Tª - Baja	Baja	4	2	607		19	19
83	Tª - Baja	Baja	4	3	624		19	19
84	Tª - Baja	Baja	4	4	621		19	19
91	Tª - Normal	Descomp.	4	27	635		28	22
91 - 1	Tª - Normal	Descomp.	4	27	635		28	22
92	Tª - Normal	Descomp.	4	28	626		28	22
93	Tª - Normal	Descomp.	4	29	636		28	22
94	Tª - Normal	Descomp.	4	30	625		28	22

PROBETAS 4 mm						
Nº Probeta	Tensión superficie			Ensayos	Fragmentación	
	Medición grados	Tensión Mpa	Inspección cara estaño	Tipo ensayo	Nº fragmentos	Long aguja
1	70	115,65	Sí	Fragmentación	121	20
1 - 1	70	115,65	Si	Fragmentación		
1 - 2	70	115,65	Sí	Fragmentación		
1 - 3	70	115,65	Sí	Fragmentación		
1 - 4	70	115,65	Sí	Fragmentación		
2	70	115,65	Sí	Impacto		
3	70	115,65	No	Flexión		
4	70	115,65	Sí			
5	69	109,66	No	Impacto		
6	68	104,19	No			
11	68	104,19	No	Fragmentación	148	32
12	70	115,65	No	Impacto		
13	69	109,66	No	Flexión		
14	70	115,65	No			
21	67	99,17	No	Fragmentación	46	53
22	68	104,19	No	Impacto		
23	68	104,19	No	Flexión		
24	68	104,19	No			
31	71	122,25	Sí	Fragmentación	115	41
32	71	122,25	Sí	Impacto		
33	71	122,25	No	Flexión		
34	70	115,65	No			
41	73	137,68	No	Fragmentación	179	26
42	73	137,68	No	Impacto		
43	74	146,8	Sí	Flexión		
44	73	137,68	Sí			
51	71	122,25	No	Fragmentación	50	42
51 - 1	71	122,25	No			
52	70	115,65	Sí	Impacto		
53	70	115,65	Sí	Flexión		
54	71	122,25	Sí			
61	68	104,19	No	Fragmentación	74	42
62	68	104,19	No	Impacto		
63	66	94,54	No	Flexión		
64	67	99,17	No			
71	67	99,17	No	Fragmentación	126	20
72	67	99,17	Sí	Impacto		
73	67	99,17	Sí	Flexión		
74	67	99,17	Sí			
81	65	90,17	Sí	Fragmentación	31	53
81 - 1	65	90,17	Sí	Fragmentación		
81 - 2	65	90,17	Sí	Fragmentación		
81 - 3	65	90,17	Sí	Fragmentación		
81 - 4	65	90,17	Sí	Fragmentación		
82	66	94,54	No	Impacto		
83	66	94,54	No	Flexión		
84	66	94,54	No			
91	70	115,65	Sí	Fragmentación	101	50
91 - 1	70	115,65	Sí	Fragmentación		
92	70	115,65	Sí	Impacto		
93	70	115,65	No	Flexión		
94	70	115,65	No			

PROBETAS 4 mm							
Nº Probeta	Resultados ensayo a Flexión				Result. Impacto		
	Fuerza (Kg.)	Deformación (100Kg)	Deformación (150Kg)	Deformación (200Kg)	Deformación (450Kg)	Altura (mts) sin romper	nº ensayos antes de romper
1							
1 - 1							
1 - 2							
1 - 3							
1 - 4							
2						1,14	1
3	122	8					
4							
5						1,14	1
6							
11							
12						0,8	0
13	202	6	8,5	11			
14							
21							
22						1,34	2
23	164	6,5	9				
24							
31							
32						1,84	6
33	201	6,5	8,5				
34							
41							
42						1,54	4
43	213	6	9	11			
44							
51							
51 - 1							
52						1,54	4
53	203	6,5	8,5				
54							
61							
62						0,8	4
63	156	6,5	8,5				
64							
71							
72						1,34	2
73	191	6					
74							
81							
81 - 1							
81 - 2							
81 - 3							
81 - 4							
82						0,7	3
83	104						
84							
91							
91 - 1							
92						1,44	3
93	227	6,5	9				
94							

PROBETAS 4 mm										
Nº Probeta	Características fragmento				Tensiones fragmentos (MPa) MEDICIÓN HORIZONTAL					
	Espesor frag.	Longitud frag.	Dist. Centro impacto	Cara 1 topo	Med1 (°)	Med3 (°)	Med5 (°)	Tension es 1	Tension es 3	Tension es 5
1	1,7			si	931	30	931	-91	40	-91
1 - 1	1,7			si	931	31	931			
1 - 2	1,7			si	930	35	930			
1 - 3	1,7			si	932	30	932			
1 - 4	1,7			si	955	6	955			
2	1,73	16		si	936	35	936	-83	45	-83
3	1,63	21		no	939	28	944	-84	38	-77
4										
5										
6										
11	2,05			no	913	37	922	-95	40	-85
12	1,49	11		no	939	30	939	-92	45	-92
13	1,97	16		no	936	29	936	-73	33	-73
14										
21	1,95			no	924	29	928	-87	33	-83
22	1,9	20		no	936	33	936	-75	39	-75
23	1,99	23		no	940	34	940	-68	38	-68
24										
31	2,4			si	885	50	902	-107	47	-91
32	1,49	10		si	927	28	940	-110	42	-90
33	1,3	11		no	948	27	943	-90	47	-98
34				no						
41	1,6			no	922	35	932	-109	49	-92
42	1,88	12		no	915	41	923	-101	49	-92
43	1,48	10		si	935	25	935	-98	38	-98
44				si						
51	2,25			no	919	27	924	-81	27	-76
51 - 1	3,8			no	836	69	836	-97	41	-97
52	2,12	27		si	916	36	916	-89	38	-89
53	1,71	17		si	933	32	933	-88	42	-88
54										
61	2,5			no	923	43	928	-69	39	-64
62	2,68	18		no	911	55	911	-74	46	-74
63	1,69	42		no	947	32	947	-70	42	-70
64				no						
71	2,6			no	910	49	908	-78	42	-79
72	2,17	17		si	922	44	922	-80	45	-80
73	1,86	15		si	933	35	933	-81	42	-81
74				si						
81	2,45			si	923	42	929	-70	38	-65
81 - 1	4,3			si	846	83	853	-80	43	-77
81 - 2	3,45			si	898	56	889	-69	38	-75
81 - 3	3,55			si	894	59	891	-79	44	-81
81 - 4	3,3			si	828	10	828	-117	7	-117
82	1,6	29		no	946	32	946	-76	45	-76
83	2,67	19		no	922	43	922	-65	36	-65
84										
91	2,35			si	951	4	951	-47	4	-47
91 - 1	2,75			si	899	35	914	-82	28	-70
92	1,51	24		si	946	29	942	-80	43	-86
93	1,31	20		no	955	26	955	-77	44	-77
94				no						

PROBETAS 4 mm										
Nº Probeta	Características fragmento				Tensiones fragmentos MEDICIÓN VERTICAL					
	Espesor frag.	Long. frag.	Dist. Centro impacto	Cara 1 topo	Med1	Med3	Med5	Tension es 1	Tension es 3	Tension es 5
1	1,7			si						
1 - 1	1,7			si						
1 - 2	1,7			si						
1 - 3	1,7			si						
1 - 4	1,7			si						
2	1,73	16		si						
3	1,63	21		no	52	973	48	71	-37	66
4										
5										
6										
11	2,05			no						
12	1,49	11		no						
13	1,97	16		no	59	974	84	67	-30	84
14										
21	1,95			no						
22	1,9	20		no						
23	1,99	23		no	53	965	59	60	-39	66
24										
31	2,4			si						
32	1,49	10		si						
33	1,3	11		no	45	976	57	78	-41	98
34				no						
41	1,6			no						
42	1,88	12		no						
43	1,48	10		si	56	974	59	85	-39	89
44				si						
51	2,25			no						
51 - 1	3,8			no						
52	2,12	27		si						
53	1,71	17		si	57	976	60	75	-31	79
54										
61	2,5			no						
62	2,68	18		no						
63	1,69	42		no	48	971	58	64	-38	77
64				no						
71	2,6			no						
72	2,17	17		si						
73	1,86	15		si	50	967	62	60	-40	75
74				si						
81	2,45			si						
81 - 1	4,3			si						
81 - 2	3,45			si						
81 - 3	3,55			si						
81 - 4	3,3			si						
82	1,6	29		no						
83	2,67	19		no	67	957	71	56	-36	60
84										
91	2,35			si						
91 - 1	2,75			si						
92	1,51	24		si						
93	1,31	20		no	47	979	48	80	-36	82
94				no						

## 20.2. ANEXO B: TABLAS DATOS PROBETAS 6 mm

PROBETAS 6 mm								
Parámetros de la probeta				Parámetros producción				
Nº Probeta	Temperatura	Presión aire	Espesor (mm)	Orden de templado	Tª	Velocidad línea (LS)	Presión Arriba	Presión Abajo
1	Tª - Normal	Normal	6		630	80	10	10
2	Tª - Normal	Normal	6		630	80	10	10
2 - 1	Tª - Normal	Normal	6		630	80	10	10
2 - 2	Tª - Normal	Normal	6		630	80	10	10
2 - 3	Tª - Normal	Normal	6		630	80	10	10
2 - 4	Tª - Normal	Normal	6		630	80	10	10
3 - 5	Tª - Normal	Normal	6		630	80	10	10
2 - 6	Tª - Normal	Normal	6		630	80	10	10
3	Tª - Normal	Normal	6		630	80	10	10
4	Tª - Normal	Normal	6		630	80	10	10
5	Tª - Normal	Normal	6		630	80	10	10
6	Tª - Normal	Normal	6		630	80	10	10
11	Tª - Normal	Alta	6		630	80	15	15
12	Tª - Normal	Alta	6		630	80	15	15
12 - 1	Tª - Normal	Alta	6		630	80	15	15
13	Tª - Normal	Alta	6		630	80	15	15
14	Tª - Normal	Alta	6		630	80	15	15
21	Tª - Normal	Baja	6		630	80	6	6
22	Tª - Normal	Baja	6		630	80	6	6
22 - 1	Tª - Normal	Baja	6		630	80	6	6
22 - 1 - 1	Tª - Normal	Baja	6		630	80	6	6
22 - 2	Tª - Normal	Baja	6		630	80	6	6
22 - 3	Tª - Normal	Baja	6		630	80	6	6
22 - 4	Tª - Normal	Baja	6		630	80	6	6
22 - 5	Tª - Normal	Baja	6		630	80	6	6
23	Tª - Normal	Baja	6		630	80	6	6
23 - 1	Tª - Normal	Baja	6		630	80	6	6
24	Tª - Normal	Baja	6		630	80	6	6
31	Tª - Alta	Normal	6		640	80	10	10
32 - 1	Tª - Alta	Normal	6		640	80	10	10
32 - 2	Tª - Alta	Normal	6		640	80	10	10
32 - 3	Tª - Alta	Normal	6		640	80	10	10
32 - 4	Tª - Alta	Normal	6		640	80	10	10
32 - 5	Tª - Alta	Normal	6		640	80	10	10
33	Tª - Alta	Normal	6		640	80	10	10
34	Tª - Alta	Normal	6		640	80	10	10
41	Tª - Alta	Alta	6		640	80	15	15
42 - 1	Tª - Alta	Alta	6		640	80	15	15
42 - 2	Tª - Alta	Alta	6		640	80	15	15
42 - 3	Tª - Alta	Alta	6		640	80	15	15
42 - 4	Tª - Alta	Alta	6		640	80	15	15

PROBETAS 6 mm								
Parámetros de la probeta				Parámetros producción				
Nº Probeta	Temperatura	Presión aire	Espesor (mm)	Orden de templado	Tª	Velocidad línea (LS)	Presión Arriba	Presión Abajo
43	Tª - Alta	Alta	6		640	80	15	15
44	Tª - Alta	Alta	6		640	80	15	15
51	Tª - Alta	Baja	6		640	80	6	6
52 - 1	Tª - Alta	Baja	6		640	80	6	6
52 - 2	Tª - Alta	Baja	6		640	80	6	6
52 - 3	Tª - Alta	Baja	6		640	80	6	6
52 - 4	Tª - Alta	Baja	6		640	80	6	6
52 - 5	Tª - Alta	Baja	6		640	80	6	6
53	Tª - Alta	Baja	6		640	80	6	6
53 - 1	Tª - Alta	Baja	6		640	80	6	6
53 - 3	Tª - Alta	Baja	6		640	80	6	6
53 - 4	Tª - Alta	Baja	6		640	80	6	6
53 - 5	Tª - Alta	Baja	6		640	80	6	6
54	Tª - Alta	Baja	6		640	80	6	6
61	Tª - Baja	Normal	6		620	80	10	10
62 - 1	Tª - Baja	Normal	6		620	80	10	10
62 - 2	Tª - Baja	Normal	6		620	80	10	10
62 - 3	Tª - Baja	Normal	6		620	80	10	10
62 - 4	Tª - Baja	Normal	6		620	80	10	10
62 - 5	Tª - Baja	Normal	6		620	80	10	10
63	Tª - Baja	Normal	6		620	80	10	10
64	Tª - Baja	Normal	6		620	80	10	10
71	Tª - Baja	Alta	6		620	80	15	15
72	Tª - Baja	Alta	6		620	80	15	15
73	Tª - Baja	Alta	6		620	80	15	15
74	Tª - Baja	Alta	6		620	80	15	15
81	Tª - Baja	Baja	6		620	80	6	6
82 - 1	Tª - Baja	Baja	6		620	80	6	6
82 - 2	Tª - Baja	Baja	6		620	80	6	6
82 - 3	Tª - Baja	Baja	6		620	80	6	6
82 - 4	Tª - Baja	Baja	6		620	80	6	6
82 - 5	Tª - Baja	Baja	6		620	80	6	6
83	Tª - Baja	Baja	6		620	80	6	6
84	Tª - Baja	Baja	6		620	80	6	6
91	Tª - Normal	Descomp.	6		630	80	15	6
92 - 1	Tª - Normal	Descomp.	6		630	80	15	6
92 - 3	Tª - Normal	Descomp.	6		630	80	15	6
92 - 5	Tª - Normal	Descomp.	6		630	80	15	6
93	Tª - Normal	Descomp.	6		630	80	15	6
94	Tª - Normal	Descomp.	6		630	80	15	6

PROBETAS 6 mm						
Nº Probeta	Medición tensión de superficie (ref.)			ENSAYO	Fragmentación	
	Medición grados	Tensión Mpa	Inspección cara estaño	Ti po ensayo	Nº fragmentos	Long aguja
1	72	129,55	Sí	Fragmentación	94	22
2	72	129,55	Sí	Impacto		
2 - 1	72	129,55	Sí	Impacto		
2 - 2	72	129,55	Sí	Impacto		
2 - 3	72	129,55	Sí	Impacto		
2 - 4	72	129,55	Sí	Impacto		
3 - 5	72	129,55	Sí	Impacto		
2 - 6	72	129,55	Sí	Impacto		
3	70	116,65	Sí	Flexión		
4	74	146,8	Sí			
5	72	129,55	Sí	Impacto		
6	71	122,25	No			
11	73	137,68	No	Fragmentación	162	32
12	73	137,68	No	Impacto		
12 - 1	73	137,68	No	Impacto		
13	71	122,25	No	Flexión		
14	73	137,68	No			
21	70	115,65	No	Fragmentación	58	43
22	69	109,66	No	Impacto		
22 - 1	69	109,66	No	Impacto		
22 - 1 - 1	69	109,66	No	Impacto		
22 - 2	69	109,66	No	Impacto		
22 - 3	69	109,66	No	Impacto		
22 - 4	69	109,66	No	Impacto		
22 - 5	69	109,66	No	Impacto		
23	69	109,66	?	Flexión		
23 - 1	69	109,66	?	Flexión		
24	69	109,66	Sí			
31	72	129,55	No	Fragmentación	102	43
32 - 1	74	146,8	?	Impacto		
32 - 2	74	146,8	?	Impacto		
32 - 3	74	146,8	?	Impacto		
32 - 4	74	146,8	?	Impacto		
32 - 5	74	146,8	?	Impacto		
33	74	146,8	?	Flexión		
34	71	122,25	?			
41	74	146,8	Sí	Fragmentación	146	21
42 - 1	74	146,8	No	Impacto		
42 - 2	74	146,8	No	Impacto		
42 - 3	74	146,8	No	Impacto		
42 - 4	74	146,8	No	Impacto		

PROBETAS 6 mm						
Nº Probeta	Medición tensión de superficie (ref.)			ENSAYO	Fragmentación	
	Medición grados	Tensión Mpa	Inspección cara estaño	Ti po ensayo	Nº fragmentos	Long aguja
43	75	157,1	?	Flexión		
44	73	137,68	No			
51	67	99,17	No	Fragmentación	49	51
52 - 1	69	109,66	No	Impacto		
52 - 2	69	109,66	No	Impacto		
52 - 3	69	109,66	No	Impacto		
52 - 4	69	109,66	No	Impacto		
52 - 5	69	109,66	No	Impacto		
53	70	115,65	?	Flexión		
53 - 1	70	115,65	?	Flexión		
53 - 3	70	115,65	?	Flexión		
53 - 4	70	115,65	?	Flexión		
53 - 5	70	115,65	?	Flexión		
54	67	99,17	No			
61	68	104,19	Sí	Fragmentación	110	27
62 - 1	70	115,65	Sí	Impacto		
62 - 2	70	115,65	Sí	Impacto		
62 - 3	70	115,65	Sí	Impacto		
62 - 4	70	115,65	Sí	Impacto		
62 - 5	70	115,65	Sí	Impacto		
63	71	122,25	?	Flexión		
64	71	122,25	No			
71	72	129,55	No	Fragmentación	158	18
72	72	129,55	Sí	Impacto		
73	74	146,8	?	Flexión		
74	72	129,55	No			
81	71	122,25	Sí	Fragmentación	51	45
82 - 1	68	104,19	No	Impacto		
82 - 2	68	104,19	No	Impacto		
82 - 3	68	104,19	No	Impacto		
82 - 4	68	104,19	No	Impacto		
82 - 5	68	104,19	No	Impacto		
83	68	104,19	?	Flexión		
84	67	99,17	No			
91	70	115,65	No	Fragmentación	100	26
92 - 1	71	122,25	No	Impacto		
92 - 3	71	122,25	No	Impacto		
92 - 5	71	122,25	No	Impacto		
93	71	122,25	?	Flexión		
94	71	122,25	Sí			

PROBETAS 6 mm							
Nº Probeta	Flexión (Lado topo arriba)				Impacto bola 500 gr. (Impacto lado topo)		
	Fuerza	Deformación (100Kg)	Deformación (150Kg)	Deformación (200Kg)	Deformación (450Kg)	Máx altura (mts) sin romper	nº ensayos antes de romper
1							
2						3,15	8
2 - 1							8
2 - 2							8
2 - 3							8
2 - 4							8
3 - 5							8
2 - 6							8
3	450	3,5	5	6	15		
4							
5						2,94	18
6							
11							
12						3,25	14
12 - 1							14
13	505	3,5		6,5	16		
14							
21							
22						3,95	11
22 - 1							11
22 - 1 - 1							11
22 - 2							11
22 - 3							11
22 - 4							11
22 - 5							11
23	507						
23 - 1							
24							
31							
32 - 1						3,5	3
32 - 2							3
32 - 3							3
32 - 4							3
32 - 5							3
33	538						
34							
41							
42 - 1						2,5	0
42 - 2							0
42 - 3							0
42 - 4							0

PROBETAS 6 mm							
Nº Probeta	Flexión (Lado topo arriba)				Impacto bola 500 gr. (Impacto lado topo)		
	Fuerza	Deformación (100Kg)	Deformación (150Kg)	Deformación (200Kg)	Deformación (450Kg)	Máx altura (mts) sin romper	nº ensayos antes de romper
43	558						
44							
51							
52 - 1						3	1
52 - 2							1
52 - 3							1
52 - 4							1
52 - 5							1
53	408						
53 - 1							
53 - 3							
53 - 4							
53 - 5							
54							
61							
62 - 1						3,5	3
62 - 2							3
62 - 3							3
62 - 4							3
62 - 5							3
63	488						
64							
71							
72						4	No Rompe
73	436						
74							
81							
82 - 1						2,5	0
82 - 2							0
82 - 3							0
82 - 4							0
82 - 5							0
83	466						
84							
91							
92 - 1						3	1
92 - 3							1
92 - 5							1
93	564						
94							

PROBETAS 6 mm										
Características del fragmento					Tensiones en fragmentos MEDICIÓN HORIZONTAL					
Nº Probeta	Espesor frag.	Long fragmento	Dist. Centro impact	Cara 1 topo	Med1	Med3	Med5	Tensiones 1	Tensiones 3	Tensiones 5
1	2,15	15		si	902	41	915	-102	43	-89
2	1,83	23		si	945	27	934	-67	33	-81
2 - 1	2,34	11		si	904	33	904	-92	32	-92
2 - 2	2,8	6		si	928	9	928	-58	7	-58
2 - 3	1,95	9,86		si	929	21	929	-82	24	-82
2 - 4	2,1	10,36		si	928	22	922	-77	23	-83
3 - 5	2,18	10,49		si	917	27	917	-85	28	-85
2 - 6	2,18	9,58		si	914	22	914	-88	23	-88
3	1,57	14,52		desconocid	936	29	936	-91	41	-91
4										
5										
6										
11	2,36	9		no	910	22	920	-85	21	-76
12	2,68	10		no	893	34	893	-89	28	-89
12 - 1	1,91	15,35		no	924	35	909	-89	41	-107
13	1,87	22,13		desconocid	908	35	908	-110	42	-110
14										
21	2,77	21		no	889	41	889	-90	33	-90
22	2,9	31		no	885	43	885	-89	33	-89
22 - 1	2,47	19		no	911	38	911	-81	34	-81
22 - 1 - 1	3,02	15,74	20	no	869	52	899	-97	39	-75
22 - 2	2,34	21,65	50	no	912	38	928	-84	36	-69
22 - 3	3,69	13,85	75	no	845	58	848	-94	35	-92
22 - 4	2,31	18,27	100	no	907	37	899	-90	36	-98
22 - 5	2,5	15,16	150	no	905	40	905	-85	36	-85
23	2,24	11		desconocid	909	33	921	-91	33	-79
23 - 1	2,32	11,36		desconocid	896	33	896	-100	32	-100
24										
31	2,11	13		no	908	35	908	-98	37	-98
32 - 1	2,91	14,1	20	no	886	40	886	-88	31	-88
32 - 2	2,65	17,5	50	no	878	47	878	-103	40	-103
32 - 3	2,63	9,59	75	no	897	32	897	-88	27	-88
32 - 4	2,42	13,37	100	no	900	41	900	-93	38	-93
32 - 5	2,2	10,68	150	no	905	29	905	-97	30	-97
33	3,07	21,64		desconocid	883	46	883	-85	34	-85
34										
41	1,91	15		si	892	39	902	-127	46	-115
42 - 1	1,8	10,88	20	si	924	21	924	-95	26	-95
42 - 2	2,21	5,8	50	si	921		921	-80		-80
42 - 3	1,94	8,87	75	si	914	23	914	-99	27	-99
42 - 4	1,93	13,73	100	si	907	35	907	-108	41	-108

PROBETAS 6 mm										
Características fragmento					Tensiones en fragmentos (Mpa) MEDICIÓN HORIZONTAL					
Nº Probeta	Espesor frag.	Long fragmento	Dist. Centro impact	Cara 1 topo	Med1	Med3	Med5	Tensiones 1	Tensiones 3	Tensiones 5
43	2,38	10,13		desconocid	897	30	914	-97	28	-81
44										
51	3,95	34		no	837	60	837	-92	34	-92
52 - 1	2,57	16,7	20	no	910	35	910	-78	30	-78
52 - 2	2,79	11,23	50	no	885	41	885	-92	33	-92
52 - 3	1,77	15,48	75	no	927	29	927	-92	37	-92
52 - 4	1,79	24,28	100	no	932	29	932	-85	36	-85
52 - 5	1,78	12,35	150	no	933	25	930	-84	31	-88
53	2,29	16		desconocid	923	31	923	-75	30	-75
53 - 1	2,03	14,99	20	desconocid	928	30	928	-79	33	-79
53 - 3	2,82	28,66	75	desconocid	906	41	906	-75	33	-75
53 - 4	2,33	12,12	100	desconocid	912	33	912	-85	32	-85
53 - 5	2,3	14,78	150	desconocid	904	38	904	-93	37	-93
54										
61	2,85	14		si	888	50	888	-88	39	-88
62 - 1	2,62	14,65	20	si	913	32	913	-74	27	-74
62 - 2	2,27	16,22	50	si	909	41	909	-90	40	-90
62 - 3	2,37	10,64	75	si	907	29	907	-88	27	-88
62 - 4	2,41	12,12	100	si	901	36	901	-92	33	-92
62 - 5	1,53	16,29	150	si	921	32	933	-116	47	-98
63	2,52	16,13		desconocid	916	33	905	-75	29	-75
64										
71	2,75	11		no	898	39	891	-83	32	-89
72										
73	2,53	11,73		desconocid	883	41	892	-104	36	-104
74										
81	3,02	19		si	883	45	892	-83	33	-80
82 - 1	2,74	16,91	20	si	911	32	911	-73	26	-73
82 - 2	2,63	26,25	50	si	898	42	898	-87	36	-87
82 - 3	2,91	10,24	75	si	898	29	898	-78	22	-78
82 - 4	2,62	6,94	100	si	922		922	-67		-67
82 - 5	1,98	14,5	150	si	931	31	931	-78	35	-78
83	2,1	13,13		desconocid	923	33	923	-82	35	-82
84										
91	2,18	20		no	904	40	904	-99	41	-99
92 - 1	2,47	25,85	20	no	901	44	901	-90	40	-90
92 - 3	2,58	13,07	75	no	889	40	889	-96	35	-96
92 - 5	2,28	7,58	150	no	906	14	906	-92	14	-92
93	2,52	11,22		desconocid	891	38	907	-97	34	-83
94										

PROBETAS 6 mm										
Características del fragmento					Tensiones en fragmentos MED. VERTICAL					
Nº Probeta	Espesor frag.	Long fragmento	Dist. Centro impacto	Cara 1 topo	Med1	Med3	Med5	Tensiones 1	Tensiones 3	Tensiones 5
1	2,15	15		si						
2	1,83	23		si						
2 - 1	2,34	11		si						
2 - 2	2,8	6		si						
2 - 3	1,95	9,86		si	65	981	65			
2 - 4	2,1	10,36		si	63	986	63			
3 - 5	2,18	10,49		si						
2 - 6	2,18	9,58		si						
3	1,57	14,52		descono						
4										
5										
6										
11	2,36	9		no						
12	2,68	10		no						
12 - 1	1,91	15,35		no						
13	1,87	22,13		descono						
14										
21	2,77	21		no						
22	2,9	31		no						
22 - 1	2,47	19		no						
22 - 1 -	3,02	15,74	20	no						
22 - 2	2,34	21,65	50	no						
22 - 3	3,69	13,85	75	no						
22 - 4	2,31	18,27	100	no						
22 - 5	2,5	15,16	150	no						
23	2,24	11		descono	84	976	78	84	-24	78
23 - 1	2,32	11,36		descono						
24										
31	2,11	13		no						
32 - 1	2,91	14,1	20	no						
32 - 2	2,65	17,5	50	no						
32 - 3	2,63	9,59	75	no						
32 - 4	2,42	13,37	100	no						
32 - 5	2,2	10,68	150	no						
33	3,07	21,64		descono						
34										
41	1,91	15		si						
42 - 1	1,8	10,88	20	si						
42 - 2	2,21	5,8	50	si						
42 - 3	1,94	8,87	75	si						
42 - 4	1,93	13,73	100	si						

PROBETAS 6 mm										
Características fragmento					Tensiones en fragmentos (Mpa) MED. VERTICAL					
Nº Probeta	Espesor frag.	Long fragmento	Dist. Centro impact	Cara 1 topo	Med1	Med3	Med5	Tensiones 1	Tensiones 3	Tensiones 5
43	2,38	10,13		desconocid						
44										
51	3,95	34		no						
52 - 1	2,57	16,7	20	no						
52 - 2	2,79	11,23	50	no						
52 - 3	1,77	15,48	75	no						
52 - 4	1,79	24,28	100	no						
52 - 5	1,78	12,35	150	no						
53	2,29	16		desconocid	66	973	74	65	-26	72
53 - 1	2,03	14,99	20	desconocid						
53 - 3	2,82	28,66	75	desconocid						
53 - 4	2,33	12,12	100	desconocid						
53 - 5	2,3	14,78	150	desconocid						
54										
61	2,85	14		si						
62 - 1	2,62	14,65	20	si						
62 - 2	2,27	16,22	50	si						
62 - 3	2,37	10,64	75	si						
62 - 4	2,41	12,12	100	si						
62 - 5	1,53	16,29	150	si						
63	2,52	16,13		desconocid						
64										
71	2,75	11		no						
72										
73	2,53	11,73		desconocid						
74										
81	3,02	19		si						
82 - 1	2,74	16,91	20	si						
82 - 2	2,63	26,25	50	si						
82 - 3	2,91	10,24	75	si						
82 - 4	2,62	6,94	100	si						
82 - 5	1,98	14,5	150	si						
83	2,1	13,13		desconocid						
84										
91	2,18	20		no						
92 - 1	2,47	25,85	20	no						
92 - 3	2,58	13,07	75	no						
92 - 5	2,28	7,58	150	no						
93	2,52	11,22		desconocid						
94										

## 21. GLOSARIO DE TÉRMINOS

<b>A</b>	
<i>Análisis tensional</i> , .....	6, 7, 81, 106
<i>Automoción</i> , .....	6, 72
<b>B</b>	
<i>Birrefringente</i> , .....	36, 38
<b>D</b>	
<i>Distribución de tensiones</i> , .....	6, 69
<b>E</b>	
<i>Ensayo de flexión</i> , .....	49
<i>Ensayo de impacto</i> , .....	48, 147
<i>Ensayo fragmentación</i> , .....	47
<i>Ensayos mecánicos</i> , .....	5, 47
<i>Espejo</i> , .....	85
<i>Estado tensional</i> , .....	6, 7, 95, 103
<i>Estrías</i> , .....	85, 114, 148
<b>F</b>	
<i>Factor de concentración de tensiones</i> , .....	79, 82
<i>Filtros</i> , .....	36
<i>Float</i> , .....	21, 26, 27
<i>Fmvss 205</i> .....	, 72, 74
<i>Fotoelasticidad</i> , .....	5, 34
<i>Fotoelásticos</i> , .....	41
<i>Fractografía del vidrio</i> , .....	6, 84
<i>Fractología</i> , .....	1, 5, 6, 24, 92
<i>Fragmentación</i> , .....	6, 64
<i>Fragmentos</i> , .....	6, 7, 95, 96, 100, 103, 112, 113, 115
<b>H</b>	
<i>Hackle</i> , .....	85, 86, 87, 92, 93, 94, 148
<i>Horno de templado</i> , .....	29, 30, 147
<b>I</b>	
<i>Ingeniería forense</i> , .....	5, 7, 24, 111

**M**

Mirror, .....	85, 148
Mist, .....	85, 92, 93, 94, 148

**N**

Niebla, .....	85
---------------	----

**P**

Patrón de rotura, .....	24, 25, 116, 147
Polariscopio, .....	5, 36, 41
Polariscopio circular, .....	40
Polarización de la luz, .....	5, 36
Polivinibutiral, .....	22
Presión, .....	6, 56, 59
Proceso térmico, .....	5, 22
Pvb, .....	22

**R**

Reflectividad, .....	24
Refracción, .....	19, 21, 34
Reglamento nº. 43 un/ece, .....	73
Residuales, .....	22, 23, 24, 34, 42, 67, 92, 96, 105, 110
Resistencia mecánica, .....	10, 16, 22, 27, 28, 34, 61, 63, 66, 67, 68, 74, 75, 76

**S**

Soplantes, .....	24, 29, 30, 32, 56, 69, 70, 121
Superficie de fractura, .....	6, 84

**T**

Templado térmico, .....	27
Tenacidad a la fractura, .....	82, 83
Tensión central, .....	100, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 110, 118
Tensión de superficie, .....	53, 56, 62, 63, 66, 96, 100, 103, 106, 108, 110, 138, 139, 147
Tensiones internas, .....	4, 21, 22, 34, 41, 64, 77, 85, 89, 90, 92, 99, 103, 106, 112

**V**

Vidrio borosilicato, .....	20
Vidrio de seguridad, .....	4, 16, 21, 26, 27, 66
Vidrio laminado, .....	16, 22
Vidrio plano, .....	12, 19, 30, 147
Vidrio plano, .....	32
Vidrio plomado, .....	19

*Vidrio sodo-cálcico*, ..... 19  
*Vidrio templado*, ..... 4, 16, 17, 21, 107, 116

**W**

*Wake hackle*, ..... 148  
*Wallner lines*, ..... 88, 89

## 22. ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1.1. Imágenes del Skywalk sobre el Gran Cañon (USA). El suelo de vidrio para poder observar el barranco requiere de requisitos especiales de seguridad, tanto en diseño como en fabricación. ....	8
Figura 1.2. Organigrama de usos del vidrio plano. Porcentajes respecto al nivel superior.....	11
Figura 1.3. Distribución del mercado internacional de vidrio plano.....	12
Figura 1.4. Distribución del mercado de vidrio plano según los fabricantes mundiales.....	12
Figura 1.5. Fábricas de vidrio float en Europa según fabricantes.....	13
Figura 3.3.1: Gráfica de temperatura del vidrio durante el ciclo de templado.....	23
Figura 3.3.2: Tensiones residuales en el interior del vidrio.....	24
Figura 3.4.1: Factura vidrio recocido por impacto.....	25
Figura 3.4.2: Rotura vidrio por choque térmico.....	26
Figura 5.4.1 Esquema de un horno de templado térmico de vidrio plano. Se divide en cuatro partes: Carga de vidrio, horno de calentamiento, zona de templado y zona de descarga. (Imagen Lisec Website).....	32
Figura 5.4.2. Esquema de un horno de templado térmico de vidrio curvado. Las zonas son análogas con las de vidrio plano, pero la instalación de curvado es especialmente compleja, requiriendo una instalación particular. .(Img. Kerglass Website).....	32
Figura 5.4.3. Esquema de las temperaturas y tensiones generadas durante el proceso de templado de vidrio mediante procesos térmicos. (Img. Glass Tempering by Numbers, by Jonathan Barr. Glassonweb website).....	34
Figura 5.4.4 Gráfica de temperatura del vidrio a lo largo de todo el proceso. La rampa de calentamiento es suave frente al rápido enfriamiento producido en la etapa de templado (Quench time). (Img. Glass Tempering by Numbers, by Jonathan Barr. Glassonweb website).....	35
Figura 6.1.1. Clases de polarización de luz.....	38
Figura 6.2.1. Esquema de polarización lineal de ondas electromagnéticas.....	39
Figura 6.2.2. Esquema de funcionamiento del polariscopio lineal.....	40
Figura 6.2.3. Descomposición de la luz polarizada en ejes mayor y menor.....	40
Figura 6.2.4. Esquema de polariscopio circular.....	44
Figura 6.3.1: Gasp® Polarimeter de Strainoptics mide la tensión de superficie de la cara estaño del vidrio flotado.....	44
Figura 6.3.2: Scalp - 04 de Glassstress mide la distribución de tensiones completa en cualquier sección del vidrio.....	45

<i>Figura 6.3.3: Polariscopio GES-100 Edge meter de Straioptics. Permite la medición de tensiones de borde para el análisis de vidrios laminados o templados.</i>	45
<i>Figura 6.3.5: Polariscopio S-69 de Sharples Stress. Permite la medición de tensiones absolutas en el vidrio, para zonas con serigrafía. Se basa en el mismo concepto pero en lugar de aprovechar la luz transmitida a través del vidrio, utiliza la luz reflejada en la cara opuesta a la serigrafía.</i>	46
<i>Figura 6.3.4: Polariscopio S-67 de Sharples Stress. Permite la medición de tensiones absolutas en el vidrio, para valorar el equilibrio tensional tras el templado.</i>	46
<i>Figura 7.2.1.a (vidrio 4 mm) Clasificación de probetas para ensayos. Los datos particulares de cada probeta están detallados en los apéndices.</i>	48
<i>Figura 7.2.1.b. (Vidrio 6 mm) Clasificación de probetas para ensayos. Los datos particulares de cada probeta están detallados en los apéndices.</i>	49
<i>Figura 7.3.2: resultados de fragmentación de las probetas ensayadas, tanto para 4 como para 6 mm. Se verifica que el comportamiento de ambos espesores responde igual para cada grupo de parámetros, así las probetas con el mismo número (tanto en 4 como en 6 mm) realizan la misa gráfica.</i>	50
<i>Figura 7.3.1: Ensayo de fragmentación en probeta. La imagen de la izquierda muestra el tamaño de la probeta, un patrón de rotura y la selección de la zona de mínima cantidad de fragmentos. La imagen de la derecha muestra el recuento y la medida de la aguja más larga.</i>	50
<i>Figura 7.3.3: Ensayo de impacto. En la imagen de la izquierda se aprecia la configuración básica del ensayo: En vidrio es paoyado en un contorno rígido y sobre él se coloca una bola de acero que se dejará caer a diferentes alturas. La imagen de la derecha muestra el detalle de la colocación del vidrio en el soporte. Cortesía Starglass S.A.</i>	51
<i>Figura 7.3.4: Resultados del test de impacto para todas las probetas ensayadas según este ensayo. Los resultados para 4 y 6 mm son ligeramente diferentes en las probetas del grupo 60's y 70's.El resto mantiene coherencia entre ambos espesores.</i>	51
<i>Figura 7.3.6: Resultados del ensayo a flexión. En este caso no hay una relación directa entre los resultados de los ensayos entre ambos espesores.</i>	52
<i>Figura 7.3.5: Ensayo de resistencia a la flexión. La probeta es apoyada en un marco rígido con un elemento elástico en su parte superior. La aplicación de la carga se realiza mediante el accionamiento del volante superior.</i>	52
<i>Figura 7.4.1. Influencia de la temperatura en la tensión de superficie.</i>	54
<i>Figura 7.4.2. Influencia de la temperatura en el ensayo de fragmentación, considerando el número de fragmentos (imagen de la izquierda) e influencia de la temperatura en el ensayo de fragmentación, considerando las agujas (derecha).</i>	54
<i>Figura 7.4.3. Influencia de la temperatura en el ensayo de flexión.</i>	55
<i>Figura 7.4.4. Influencia de la temperatura en el ensayo de impacto.</i>	55
<i>Figura 7.5.1. Influencia de la presión en la tensión de superficie.</i>	57

<i>Figura 7.5.2. Influencia de la presión en el ensayo de fragmentación. La imagen de la izquierda presenta el número de fragmentos, mientras que la imagen de la derecha representa la longitud de las agujas.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 7.5.4. Influencia de la presión en el ensayo de impacto.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 7.5.3. Influencia de la presión en el ensayo de flexión.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 7.6.1. Influencia de la temperatura y presión combinados en la tensión de superficie.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 7.6.2. Influencia de la temperatura y presión combinados en el ensayo de fragmentación. La imagen de la izquierda representa números de fragmentos y la de la derecha longitud de las agujas.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 7.6.3. Influencia de la temperatura y presión combinados sobre el ensayo de flexión.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 7.6.4. Influencia de la temperatura y presión combinados sobre el ensayo de impacto.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 7.7.1. La gráfica muestra la relación entre las tensiones superficiales y resistencia a flexión. Aunque todas las agrupaciones muestran valores altos de <math>R^2</math>, la pendiente de las líneas de regresión no es la misma. Esto quiere decir que la proporcionalidad entre tensión de superficie y resistencia mecánica depende del tipo de parámetros de fabricación, y no exclusivamente de las tensiones. ....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 7.7.2. La gráfica presenta la relación entre tensión de superficie y resistencia a la flexión. En este caso la agrupación no es tan adecuada como la gráfica anterior (valores de <math>R^2</math> bajos) sin embargo la pendiente de ambas líneas de regresión es la misma. Esto confirma que, para mismos parámetros, la proporcionalidad se mantiene, corroborando así múltiples estudios que indican que para unos mismos parámetros, la tensión es proporcional a la resistencia. ....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 8.2.1. Relación entre la tensión de superficie y el número de fragmentos en el test de fragmentación para las probetas de 4 mm. La gráfica roja muestra la tensión, mientras que la azul muestra el número de fragmentos. No hay coherencia directa entre más tensión de superficie y número de fragmentos.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 8.2.2. Relación entre la tensión de superficie y el número de fragmentos en el test de fragmentación, para las probetas de 6 mm. En este caso la relación es más evidente, aunque no es directamente proporcional ni mucho menos. ....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 8.2.3. Tendencia en la relación entre número de fragmentos y tensión de superficie, analizado por espesor de vidrio. En efecto hay una tendencia que a mayor tensión mayor número de fragmentos. Sin embargo el coeficiente de correlación <math>R^2</math> es bajo. Esto es debido a que en esta agrupación se encuentran diferentes parámetros de fabricación.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 9.2.1. Gráfica de tensiones internas en un vidrio templado de 6 mm de espesor. La parte central (0 mm) se encuentra a tracción, mientras que los extremos (+3 y -3 mm) se encuentran a compresión.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 9.2.2. Curva de tensiones internas desequilibrada. Para un vidrio de 6 mm cuyo proceso no ha sido adecuadamente controlado se genera un desequilibrio de la parábola de tensión, presentando diferente valor entre la cara superior e inferior.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 9.3.1. Distribución de tensiones en la superficie del vidrio. Las líneas negras indican los puntos de tensión cero, donde la luz no se ve polarizada y se anula. Sin embargo en el resto de zonas la luz atraviesa, indicando un cambio en el plano de polarización. Se</i>	

<i>observa que el patrón es irregular, lo que denota una falta de uniformidad en la acción del aire sobre el vidrio en el momento del templado.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 9.3.2. Tensiones internas de vidrio en ambas caras. Se observa que la variación es significativa al pasar la sección de estudio por la zona cerca de cada soplante.(Johan Anton, “On the inhomogeneity of residual stresses in tempered glass panels” Estonian Journal of Engineering 2012).....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 9.3.3. Figura 7.2. Para un mismo punto dado de la superficie, existen diferentes valores de tensión, en función de la dirección que se considere, encontrando diferencias de hasta 20 MPa.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 10.2.1: Tabla de ensayos del Reglamento R43 de la UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). No se aprecia ningún ensayo de medición de tensiones en el vidrio. ....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 10.2.2: Ensayo de fragmentación en un vidrio templado. Fotografía de análisis de producción (Cortesía Starglass S.A.).....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 10.2.3: Ensayo de uniformidad de tensión, BS 857/D. La figura muestra la imagen de la norma donde se indica la composición del equipo de medida.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 11.1.1. La imagen de la izquierda representa una placa de vidrio con dos posibles defectos microscópicos. En la representación de la derecha se muestra la concentración de tensiones en los radios de la grieta.....</i>	<i>80</i>
<i>. 80</i>	
<i>Figura 11.1.2. La placa de la izquierda no tiene grieta que la debilite, mientras que la placa de la derecha presenta una grieta e medio que provoca una deformación mayor debido a la menor rigidez.....</i>	<i>82</i>
<i>. 82</i>	
<i>Figura 11.1.3. Modos de carga de una grieta. (Imagen de Salvador Ortolá).....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 11.1.4.Estado tensional en el entorno del fondo de una grieta. (Imagen de Salvador Ortolá).....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 11.1.5. Influencia del espesor en la tenacidad a la fractura.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 11.2.1. Ejemplo al microscopio del origen de una rotura.(Img. Fractography of Ceramics and Glasses by George D. Quinn).....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 11.2.2 .Zonas apreciables en el origen de la rotura. Se distingue el Mirror, mist y hackle atendiendo al grado de rugosidad que presenta (diferente reflexión de la luz). (Imagen George D. Quinn).....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 11.2.3. Zona de estrías (hackle) con marcas Wake hackle (tipo 1). Corresponde a marcas en la superficie de fractura a partir de imperfecciones del material. Indican la dirección de la fractura.(Imagen George D. Quinn).....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 11.2.4. Marcas tipo 2: Twist hackle. Son marcas producidas como consecuencia de un cambio tensional del vidrio en esa zona. La fractura se torsiona siguiendo las tensiones y genera esta rotura microscópica en forma de “escalones” torsionados. ....</i>	<i>88</i>

- Figura 11.2.5. Marcas tipo 2 Twist hankle. Un caso frecuente de este tipo de rotura se encuentra en los vidrios templados. Es debido a que en esta zona la tensión interna cambia a compresión, viéndose alterado el estado tensional del vidrio. La rotura, entonces, se propaga perpendicular a la superficie a la vez que avanza a lo largo del vidrio, generando una rotura diferente al resto de la sección, donde solamente avanza en dirección de propagación a lo largo del vidrio..... 89
- Figura 11.2.6. Tipo 3: Shear hackle. Marcas debido a un cambio en el estado tensional del vidrio, produciendo un giro en la fractura. La propagación de la fractura es en un plano perpendicular a la superficie, pero en determinado momento se gira el plano colocándose paralelo a la misma, para finalmente pasar de una superficie (la superior) a la otra (inferior en este caso), para acabar rompiendo en el extremo del vidrio, dejando unas marcas tipo 2 a lo largo de toda la zona de "torsión"..... 90
- Figura 11.2.7. Tipo 4a: Primary Wallner line. La onda es claramente visible. Cuando son aisladas son causa generalmente de irregularidades de la superficie). ..... 91
- Figura 11.2.8 Tipo 4b: Secondary Wallner line. Las marcas son más curvadas y son originadas por un impulso constante (imagen superior). Muy frecuentes en vidrios templados (imagen inferior). ..... 92
- Figura 11.3.1. Patrón de rotura del vidrio templado. La imagen corresponde a una de las probetas ensayadas de 6 mm, para el ensayo de fragmentación. .... 95
- Figura 11.3.2. La geometría de los fragmentos es irregular, presentando caras no paralelas debido a la bifurcación de la grieta al propagarse..... 96
- Figura 9.3.3. La imagen muestra un fragmento con caras de fractura paralelas y una longitud superior a 10 mm. En él se pueden apreciar las zonas mirror (flecha 1), mist (flecha 2) y hackle (flecha 3). Las líneas de Wallner (área 1) y la rotura twist hackle (área 2), que apenas se aprecia, observando fundamentalmente las estrías asintóticas debido al freno de la rotura por la compresión de las tensiones internas..... 97
- Figura 11.3.4. La imagen representa un fragmento similar a la figura 9.3.3. En este caso la rotura parte del lado derecho y se dirige hacia el lado izquierdo, como se puede deducir de la observación de las líneas de Wallner y la zona hackle, muy evidente en la zona central del lado izquierdo. .... 97
- Figura 11.3.6. Los fragmentos muy irregulares presentan otros tipo de marcas debido a la unión de varias causas de la rotura, y comienzos de rotura simultáneos por dos zonas de lo que será posteriormente el fragmento. Se aprecia que el lado derecho de la imagen presenta el patrón esperado, mientras que el izquierdo tiene roturas por medio de la zona habitual de líneas Wallner. .... 98
- Figura 11.3.5. Imagen de un fragmento irregular, cuyos lados no son paralelos, presentando ángulo debido a la bifurcación de la grieta. Las zonas de mirror, mist y hackle no son tan evidentes, y en muchos casos no se llega la velocidad máxima dentro del fragmento, por lo que no se presentan. En este caso se observan con claridad las marcas de rotura en la zona de compresión, presentando estrías twist hackle evidentes en ambos lados..... 98
- Figura 12.3.1. Tensiones de superficie en fragmentos a partir de la temperatura. .... 100
- Figura 12.3.2. Tensiones de superficie en fragmentos en función de la presión de templado..... 101
- Figura 12.3.3. Tensión central en los fragmentos en función de la temperatura..... 101

<i>Figura 12.3.4. Tensión central en los fragmentos en función de la presión de aire durante el proceso de templado.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 12.4.1. Tabla comparativa de los valores de tensión antes (tensión de superficie) y después (tensión interna de los fragmentos).....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 12.4.2. La gráfica muestra las diferencias de tensión entre antes y después de la rotura, relacionado con los parámetros de proceso.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 12.4.3. Relación entre las tensiones en los fragmentos y los parámetros de proceso.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 12.4.4. Tabla comparativa de tensiones antes y después agrupadas por espesor.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 12.6.1. Resultados obtenidos por Samsung que relacionan espesor con tensión central.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 12.6.2. Tensión central en función del espesor.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 12.6.3. Representación gráfica de los resultados mostrados en la tabla 10.6.2. Se comprueba la dependencia de la tensión central en los fragmentos en función del espesor del vidrio de muestra.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 13.2.1 (Igual que la imagen 7.2.1.) Gráfica de tensiones internas en un vidrio templado de 6 mm de espesor. La parte central (0 mm) se encuentra a tracción, mientras que los extremos (+3 y -3 mm) se encuentran a compresión.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 13.4.1. Tabla comparativa de la energía acumulada antes y después, por unidad de superficie.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 13.4.2. Tabla que indica las pérdidas de energía en % en función del espesor del vidrio.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 14.3.1. Comparativa de diferentes fragmentos. La selección del fragmento adecuado es fundamental para una correcta inspección.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 14.3.2. Dirección de análisis en el fragmento seleccionado. La luz del polariscopio debe atravesar las caras paralelas de fractura. De este modo se podrá analizar la tensión residual interna que mantiene el fragmento.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 14.3.3. Marcado de la sección del fragmento. La identificación del punto de medida es fundamental, ya que diferentes puntos darán diferentes resultados, como ya se demostró en el capítulo 10.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 14.3.4. La medición con el polariscopio permite conocer la tensión de cada fragmento en cada punto. La curva negra representa la curva parábola esperada de tensiones en la sección del fragmento.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 14.3.5. La medición precisa de las marcas de los fragmentos permite conocer las características de su rotura, y comparar con las mediciones de tensión.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 14.3.6. La toma de datos sobre la pieza en el momento del ensayo es fundamental. Conocer la posición de los fragmentos permite relacionar sus tensiones con el esfuerzo original de la rotura.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 14.4.1. En las dos figuras superiores se aprecia una inadecuada selección de la sección de inspección (arriba izquierda) frente a un fragmento adecuado para su estudio (figura arriba a la derecha). Las tensiones de ambos casos están representadas debajo</i>	

- de cada fragmento. Se observa que la parábola de la derecha es claramente más definida que la de la izquierda, cuya irregularidad del fragmento impide una correcta medición..... 123
- Figura 14.5.1. Propuesta de procedimiento forense de análisis de roturas en vidrio..... 125
- Figura 15.1. Diagrama de tensiones de un vidrio con parámetros de producción normal. Equilibrio en el diagrama de tensiones. .... 126
- Figura 15.2. Diagrama de tensiones de un vidrio con parámetros de producción desequilibrados, con baja temperatura y presión alta. .... 127
- Figura 15.3. Diagrama de tensiones de un vidrio sometido a un impacto. Las tensiones muestran una diferencia importante entre ambas caras debido al impacto..... 128
- Figura 15.4. Diagrama de tensiones de un vidrio sometido a impacto. La distancia respecto a la pieza de la figura 13.3 que las tensiones se han equilibrado, no presentando ya el efecto del impacto. La energía del mismo se ha disipado en la zona cercana al centro del impacto..... 129
- Figura 15.5.1. Luneta trasera vehículo comercial de 2004. Se aprecia una correcta distribución de la soplante. Esto indica que es una máquina a medida de la pieza. La falta de lagunos puntos indica problemas puntuales en la máquina. Aunque no son de importancia, un control de los mismos asegura una producción según los parámetros de diseño..... 130
- Figura 15.5.2. Luneta trasera vehículo comercial de 1996. Aunque la distribución es adecuada, la difusión de las marcas indica un soplado más alejado del vidrio, lo que podría indicar el uso de una soplante universal. Esto es frecuente en modelos cuya curvatura resulta sencilla..... 130
- Figura 15.5.3. Luneta trasera vehículo comercial de 2005. Aunque también presenta difusión en las marcas, la distribución es más homogénea, denotando una máquina particular para este modelo..... 131
- Figura 15.5.4. Luneta trasera de un vehículo de alta gama comercial de 2001. La distribución es homogénea y en la posición y uniforme en la tensión. Aunque es un modelo de serie baja de unidades, se aprecia la fabricación de una máquina particular para su fabricación. .... 131
- Figura 15.5.5. Al igual que la figura 13.5.4, la luneta es de un vehículo de alta gama, pero más moderno, de 2013. Las marcas, además de homogeneidad y uniformidad, presentan un patrón de diferentes geometrías (círculos y rectángulos). Esto indica una soplante con una geometría más moderna que asegura un correcto equilibrado del vidrio..... 131
- Figura 15.6.1. Vidrio comercial sometido a la imagen de un polariscopio de mayor dimensión (UR). Se aprecia la falta de homogeneidad en la presión de las soplantes, dejando algunos puntos con más tensión que otros..... 132
- Figura 15.6.2. Vidrio curvado sin templar. En aplicaciones de vidrio decorativo (como es el caso) se utilizan moldes metálicos para dar forma al vidrio. Además de las marcas en la superficie, se pueden generar tensiones internas que provoquen, en casos de pequeños esfuerzos, roturas espontáneas de difícil explicación..... 132

