



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

GRAU EN ARQUITECTURA TÈCNICA I EDIFICACIÓ
TREBALL FI DE GRAU

**EL VIDRIO EN LA EDIFICACIÓN. PROPIEDADES,
APLICACIONES Y ESTUDIOS DE FRACTURAS EN
CASOS REALES.**

Projectista: Laura Morales Ortega
Director/s: Laia Haurie y Joaquín Montón
Convocatòria: Septiembre 2017

ABSTRACT

Esta tesis pretende realizar un estudio extenso del vidrio y su relación con el mundo de la edificación actual. En un primera parte del documento se estudiarán las propiedades del vidrio y sus características, siempre aplicadas al mundo de la edificación.

La intención de este primer apartado pretende ser un pequeño resumen, claro y conciso del concepto de vidrio actual en el ámbito de la construcción, de sus prestaciones, las técnicas de fabricación y los tipos de vidrio que existen hoy en día a nivel comercial. Se estudiarán en profundidad los defectos más habituales en el vidrio aplicado a la edificación.

Una vez realizado este primer estudio, la segunda parte del proyecto consiste en el análisis de casos prácticos reales, que pueden ser de ayuda a la hora de plantear nuevas cuestiones como técnicos. A su vez, la intención del estudio de estos casos, es que el resultado nos pueda servir para aprender de los errores e intentar preverlos para que no vuelvan a ocurrir.

Se estudiará un caso de una rotura de un vidrio debido a un posible choque térmico, planteando otros posibles motivos por el que se ha roto, estudiando los tipos de fisuras y esbozando posibles hipótesis que nos ayuden a determinar el motivo real de la fractura.

Por otro lado, analizaremos el concepto de Heat Soak Test (HST) en vidrios templados, viendo si realmente es efectivo o necesario la utilización de este y estudiando las consecuencias que puede tener el no realizarlo.

Examinaremos también el “defecto” estético conocido como anisotropía o irisación; Primero de todo se planteará si este se puede considerar como defecto y se estudiarán posibles vías para solucionar este problema.

En el penúltimo caso podremos ver la rotura de una puerta de un modo un tanto singular y analizaremos hasta qué punto una fractura de estas características puede poner en peligro la seguridad de los usuarios, partiendo de que este tipo de vidrio podría haber estado salvando una diferencia de altura.

Por último, se estudiará el caso de los visores de piscina de vidrio. Veremos las restricciones que nos plantean las normativas, como estas se ajustan a la realidad y estudiaremos la viabilidad de realizar este tipo de elementos con otros materiales más seguros.

ÍNDICE

ABSTRACT	1
INTRODUCCIÓN	6
BLOQUE 1 - EL VIDRIO.....	7
1.1 INFORMACIÓN BÁSICA.....	7
1.1.1 DEFINICIÓN.....	7
1.1.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS.....	8
1.2 LA HISTORIA DEL VIDRIO.....	10
1.2.1 EVOLUCIÓN DEL VIDRIO	10
1.2.2 MANUFACTURA DE VIDRIO.....	13
1.2.3 EL VIDRIO Y LA EDIFICACIÓN.....	15
1.3 COMPONENTES QUE CONFORMAN EL VIDRIO	29
1.3.1 VITRIFICANTES	29
1.3.2 FUNDENTES.....	30
1.3.3 BASES O ÓXIDOS	30
1.3.4 ESTABILIZANTES.....	31
1.3.5 COMPONENTES SECUNDARIOS.....	32
1.4 FABRICACIÓN.....	35
1.4.1 PREPARACIÓN DE LA MEZCLA	35
1.4.2 PROCESO DE FUNDICIÓN	36
1.4.3 ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO.....	37
1.4.4 CONFORMACIÓN Y MOLDEADO	37
1.4.5 ENFRIAMIENTO Y RECOCIDO DEL VIDRIO.....	43
1.4.6 LA MANUFACTURA DEL VIDRIO	43
1.5 EL VIDRIO Y EL MEDIO AMBIENTE.....	45
1.5.1 IMPACTO AMBIENTAL.....	45
1.5.2 EL RECICLAJE DEL VIDRIO.....	46
1.6 VIDRIOS COMERCIALES	48
1.6.1 VIDRIO LAMINADO.....	48
1.6.2 VIDRIO TEMPLADO.....	49
1.6.3 VIDRIO TERMO ENDURECIDO.....	50
1.6.4 VIDRIO TEMPLADO QUÍMICAMENTE	50
1.6.5 VIDRIO TEMPLADO Y LAMINADO	51

1.6.6	VIDRIO COLOREADO EN MASA.....	51
1.6.7	VIDRIO CAPA.....	51
1.6.8	VIDRIO LACADO.....	53
1.6.9	VIDRIO SATINADO.....	53
1.6.10	ESPEJO.....	55
1.6.11	VIDRIO CÁMARA (DOBLE ACRISTALAMIENTO).....	56
1.6.12	VIDRIO CÁMARA TPS.....	56
1.6.13	VIDRIO CURVADO.....	57
1.6.14	VIDRIO MOLDEADO.....	57
1.6.15	VIDRIO IMPRESO.....	58
1.6.16	VIDRIO ARMADO.....	58
1.7	SISTEMAS DE FACHADA.....	60
1.7.1	MURO CORTINA.....	60
1.7.2	FACHADA ENTRE FORJADOS.....	61
1.7.3	SISTEMA SPIDER.....	61
1.7.4	FACHADAS VENTILADAS.....	62
1.8	PROPIEDADES DEL VIDRIO.....	63
1.8.1	VISCOSIDAD.....	63
1.8.2	TENSIÓN SUPERFICIAL.....	64
1.8.3	DENSIDAD.....	64
1.8.4	DUREZA.....	65
1.8.5	DILATACIÓN TÉRMICA.....	65
1.8.6	PROPIEDADES TÉRMICAS.....	65
1.8.7	PROPIEDADES MECÁNICAS.....	71
1.8.8	PROPIEDADES ÓPTICAS.....	76
1.8.9	PROPIEDADES ACÚSTICAS.....	79
1.8.10	PROPIEDADES ELÉCTRICAS.....	80
1.8.11	PROPIEDADES QUÍMICAS.....	80
1.8.12	PRESTACIONES DEL VIDRIO.....	82
1.9	DEFECTOS EN EL VIDRIO.....	88
BLOQUE 2 - CASOS A ESTUDIAR.....		89
2.1	POSIBLE ROTURA POR CHOQUE TÉRMICO.....	89
2.1.1	OBJETIVO DEL ESTUDIO.....	89
2.1.2	EXPOSICIÓN DEL CASO.....	89

2.1.3	PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	92
2.1.4	ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	93
2.1.5	CONCLUSIONES DEL ESTUDIO.....	106
2.1.6	CONSIDERACIONES.....	107
2.2	HEAT SOAK TEST.....	108
2.2.1	OBJETIVO DEL ESTUDIO.....	108
2.2.2	ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	108
2.2.3	CONCLUSIONES DEL ESTUDIO.....	113
2.3	IRISACIONES EN VIDRIO	114
2.3.1	OBJETIVO DEL ESTUDIO.....	114
2.3.2	ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	114
2.3.3	CONCLUSIONES DEL ESTUDIO.....	117
2.4	ROTURA DE PUERTA LAMINADA	119
2.4.1	OBJETIVO DEL ESTUDIO.....	119
2.4.2	ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	120
2.4.3	CONCLUSIONES DEL ESTUDIO.....	123
2.5	VIDRIOS PARA PISCINAS	124
2.5.1	OBJETIVO DEL ESTUDIO.....	124
2.5.2	ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	124
2.5.3	CONCLUSIONES DEL ESTUDIO.....	127
	CONCLUSIONES DEL TRABAJO.....	129
	TABLA DE ILUSTRACIONES	130
	BIBLIOGRAFÍA	133
	LIBROS (Ordenados alfabéticamente por el apellido de autor)	133
	APUNTES, NORMAS Y MONOGRAFÍAS (Orden alfabético).....	134
	PAGINAS WEB (Orden cronológico según consulta)	136
	ANEXOS	139
	ANEXOS BLOQUE 1.....	139
A.	COLORACIÓN DE LOS VIDRIOS.....	139
B.	TIPOS DE CANTOS.....	140
C.	ALGUNAS TIPOLOGÍAS DE VIDRIO LAMINAR.....	141
D.	RADIACIÓN. TEORÍA DE BOLZMANN	142
E.	RESISTENCIA AL CHOQUE TÉRMICO.....	142
F.	MECÁNICA DE FRACTURA ELÁSTICA LINEAL.....	143

G. MAPA DE ZONAS EÓLICAS	145
H. CARGA TOTAL DE VIENTO (Q).....	145
I. TABLA RECTIFICACIÓN ESPESORES.....	146
J. DEFECTOS.....	146
ANEXOS BLOQUE 2.....	164
K. POSIBLE CHOQUE TÉRMICO	164
L. ROTURA DE PUERTA LAMINADA.....	170
M. VIDRIOS PARA PISCINAS	172

INTRODUCCIÓN

El vidrio plano que utilizamos hoy en día en el sector de la construcción es un silicato (sílice o arena) sodocálcico (soda + cal) que se obtiene fundiendo los elementos anteriormente descritos a altas temperaturas.

Durante las últimas décadas la producción en masa de vidrio plano, el desarrollo de nuevas técnicas para post-procesar el vidrio manufacturado y el uso de análisis estructurales computacionales por medio del método de elementos finitos han permitido un mayor uso del vidrio como material estructural. En comparación con otros materiales estructurales, por ejemplo el hormigón, el conocimiento sobre las propiedades mecánicas y el comportamiento estructural del vidrio es considerablemente menor.

La evolución del vidrio se ve reflejada en la aparición constante de nuevos productos y soluciones que nos hacen olvidar el concepto tradicional de vidrio y nos traen nuevas aplicaciones que años atrás hubieran sido impensables para nosotros. Escaleras de vidrio, pasarelas, vidrios táctiles, piscinas... Aplicaciones que día tras día nos demuestran que el vidrio es un material que está en constante evolución, que ha conseguido adaptarse a un método de construcción en constante evolución que cada vez exige más de los materiales

Este proyecto pretende hacer un estudio del vidrio en el sector de la edificación. A lo largo del trabajo se estudiarán las características, aplicaciones y propiedades, tanto del vidrio que conocemos tradicionalmente como los vidrios de última generación. La mayoría de manuales de vidrio que existen en la actualidad, pertenecen a casas comerciales, por lo que generalmente se esfuerzan más en vender un producto que en explicar las características del material como tal, a su vez, a cada tipo de vidrio le han dado un nombre comercial, por lo que a veces es realmente complejo saber de qué tipo de material estamos hablando. La idea de este documento es plantear esta información de manera simple, sin nombres comerciales, para que en caso de consulta cualquier usuario no tenga dudas sobre las propiedades y características de cada vidrio.

Este proyecto tiene dos objetivos: Por una parte, enumerar y estudiar de manera clara y concisa las características del vidrio: sus orígenes, las propiedades, sus defectos... Con tal de conocer profundamente el material y sus posibilidades. Por otro lado, invita a reflexionar hasta donde tiene sentido construir con este material y cuando, como técnicos, deberíamos plantear la combinación de otros materiales con tal de ofrecer buenas soluciones constructivas.

Con tal de conseguir los dos objetivos anteriormente descritos, a lo largo del siguiente documento encontraremos dos bloques claramente diferenciados. En un primer lugar encontramos el bloque teórico, donde se hace un recorrido a las características del material, con tal de conocerlo en profundidad.

El segundo bloque, algo más complejo, estudia casos reales de fracturas o defectos en el vidrio, que han ido apareciendo a lo largo de la experiencia profesional de la autora y que plantean cuestiones interesantes para los profesionales de la edificación. La metodología principal con la que se plantean los casos es, primero de todo, realizando estudios en profundidad de cada caso, primero centrándonos en el ámbito teórico estudiado en el bloque anterior y extrapolándolo a cada caso concreto, con tal de poder dar una explicación del motivo de la fractura o defecto y, consecuentemente, intentar prever estos posibles defectos en futuros proyectos.

BLOQUE 1 - EL VIDRIO

1.1 INFORMACIÓN BÁSICA

1.1.1 DEFINICIÓN

No es fácil dar una definición para la palabra Vidrio, varios autores coinciden en que la complejidad de ésta definición viene dada por la constante evolución de éste material y la gran cantidad de elementos que se engloban con la misma nomenclatura.

La palabra vidrio puede llegar a tener tres significados distintos: como vidrio se puede conocer al objeto, al material del que está hecho un elemento y también suele haber la costumbre de llamar “vidrios” a ciertas sustancias químicas amorfas que nada tienen que ver con el material que todos conocemos como tal.

Eduardo E. Mari¹, en su libro “Los vidrios” nos da la siguiente definición:

“Los vidrios son materiales sólidos que se obtienen por enfriamiento rápido de una masa fundida, impidiendo su cristalización”.

El problema de ésta definición es que para poder dar la consideración de vidrio a un material deberíamos conocer cómo se obtuvo el material, cosa que no siempre es posible.

Una definición algo más aceptada pero más general sería, según el mismo autor que en la cita anterior:

“Los vidrios son sólidos amorfos”

Ésta definición también crea cierta controversia, dado que el vidrio no es un elemento absolutamente amorfo y no hace ninguna referencia al proceso de fabricación del material.

Una peculiaridad en referente a la fuente anteriormente citada es que se refiere al vidrio en todo momento en plural, los vidrios, según el autor, se ha generalizado el nombre en plural debido a la gran diversidad de elementos vítreos que existen.

En cambio, en el libro de José María Fernández Navarro² “El vidrio”, algo más reciente, encontramos otras definiciones que nos pueden ayudar a definir.

“Producto inorgánico amorfo, constituido predominantemente por sílice, duro, frágil y transparente, de elevada resistencia química y deformable a alta temperatura”.

Según la normativa ATSM C 162-80 “Definición of terms relating to glass and glass products”:

“Producto inorgánico fundido que se ha enfriado hasta un estado rígido sin experimentar cristalización”

Según la comisión de terminología de la Academia Rusa de las Ciencias:

“El vidrio es el nombre que reciben todos los cuerpos amorfos que se obtienen mediante la reducción de la temperatura

¹ [8] página 132

² [2] página 140

de una masa fundida independientemente de su composición química y el rango de temperatura de solidificación, que como resultado del aumento gradual de la viscosidad adopta las cualidades mecánicas de un cuerpo sólido.”

La complejidad de la mayoría de elementos vítreos y la diferente naturaleza química de éstos en función de su composición, dificulta mucho el hecho de dar una definición concreta al material.

El propio vocablo de vidrio también induce a la confusión. El término cristal se suele utilizar muy frecuentemente como sinónimo de vidrio, pero es incorrecto. El vidrio es un material compuesto de arena de sílice, carbonato de sodio y caliza y se obtiene por fusión de estos elementos a unos 1.500° C. Por otra parte, el cristal contiene óxido de plomo. Existen algunos vidrios que se conocen como cristales, de ahí viene la confusión, y es que la legislación española admite llamar cristales a los vidrios que incorporan en su composición al menos el 24% de óxido de plomo, aunque en rigor siguen siendo vidrios, se denominan cristales.

1.1.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, en el grupo de vidrios o cuerpos vítreos encontramos un gran número de materiales. Éstos, aunque a temperatura ambiente tienen la apariencia de cuerpos sólidos, no pueden considerarse como tales dado que carecen de una estructura cristalina que caracteriza y define al estado sólido. Aunque por la estabilidad de su forma los pudiéramos considerar como sólidos, por lo que a su desorden estructural se refiere, se parecen más a los líquidos.

Encontramos el vidrio en el grupo de las cerámicas. Las cualidades esenciales que podríamos enumerar son su transparencia, la resistencia, el aislamiento y la relativa facilidad con la que se puede fabricar y manufacturar.

Según José María Fernández Navarro³, lo anteriormente descrito implica que haya una gran dificultad para situar a los vidrios en uno de los tres estados de la materia, por lo que en un primer momento se llegó incluso a pensar en crear un cuarto estado: El estado vítreo. Aunque ésta sugerencia nunca llegó a aceptarse.

Si partimos de que el vidrio es un cuerpo sólido, basándonos simplemente en sus propiedades físicas, podríamos llamarlos sólidos amorfos. Pero ésta denominación no sería del todo cierta, dado que esta nomenclatura no se podría utilizar en el momento en que se elevara la temperatura y el elemento se volviera plástico.

CRISTALES Y SÓLIDOS AMORFOS

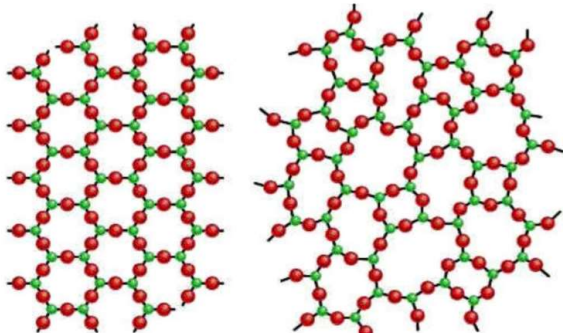


FIG. 1 - REPRESENTACIÓN PLANA ESQUEMÁTICA DE LA ESTRUCTURA DE SiO_2 , COMPARATIVA ENTRE CRISTAL Y VIDRIO. FUENTE: UNIVERSIDADPOPULARC3C.

A su vez, según el profesor Fernández Navarro, se ha comprobado que los vidrios presentan un mayor grado de ordenación estructural que los cuerpos amorfos. Un sólido cristalino (cristal) es un conjunto de unidades constituyentes (iones, átomos y moléculas) ordenados geoméricamente y periódicamente en las tres dimensiones. El vidrio, en cambio, no cuenta con una ordenación reticular, sus iones están irregularmente dispuestos formando una estructura distorsionada. Por eso, para

³ [2] página 113

establecer ésta diferencia, se conoce a los vidrios también como sólidos no cristalinos. La estructura que compone a los elementos vítreos no es única, ésta puede variar en función de la composición química o el proceso de fabricación.

Una de las peculiaridades de los vidrios es carecer de un verdadero punto de fusión, aunque podemos afirmar que el vidrio se funde a una temperatura de entre 1000 y 2000 °C.

Debemos tener presente que el modo más común de fabricar vidrios consiste en elevar su temperatura hasta lograr que reaccionen sus componentes, de esta manera obtenemos una masa homogénea. Una vez esta tiene la forma definitiva, se enfría hasta temperatura ambiente, será el método de enfriamiento de la masa del vidrio el que nos determinará en gran parte las características y propiedades del elemento resultante.

En el caso de que se enfríe rápidamente el vidrio tendrá su rigidez con una estructura más abierta, esto es debido a que los agregados que constituyen la fundición se encuentran limitados en su movilidad dado al brusco aumento de viscosidad.

En el caso de que se enfríe poco a poco, habrá un aumento de viscosidad gradual y las unidades reticulares dispondrán de más tiempo para agruparse de una manera más compacta y cerrada.

Lo anteriormente descrito según F. Navarro⁴ es conocido como relajación estructural.

El hecho de que los vidrios no se sometan a leyes termodinámicas ni cristalográficas hace muy difícil su estudio e impide el establecimiento de generalizaciones a la hora de definir unas características básicas para éste material.

⁴ [2] página 133

1.2 LA HISTORIA DEL VIDRIO

1.2.1 EVOLUCIÓN DEL VIDRIO

1.2.1.1 PREHISTORIA

Sin lugar a dudas, el elemento más importante en la aparición del vidrio es el fuego. El descubrimiento del fuego le da al hombre la capacidad de conseguir altas temperaturas, necesarias para llevar a cabo el proceso de fusión de los componentes que conforman el vidrio.

El elemento de vidrio más antiguo del que se tiene noticia data de unos 12000 años a.c. y se halló en Egipto, aunque se cree que puede proceder de alguna región asiática. Se trata de un recubrimiento vítreo verdoso, aplicado sobre piedras de pequeño tamaño. El objeto más antiguo que se conoce es un amuleto de vidrio oscuro que data del año 7000 a. c.

Evidentemente es muy complejo poder llegar a determinar una fecha y un lugar de descubrimiento del vidrio como tal, pero la mayoría de las fuentes determinan a la zona de Mesopotamia como el posible lugar de origen por su cultura y artesanía mucho más avanzada que la egipcia.

1.2.1.2 EDAD ANTIGUA

Las primeras manufacturas de las que se tiene conocimiento estaban situadas en Siria, aproximadamente sobre el año 2500 a. c. Hacia el año 1500 a. c. se inicia la fabricación regular de vidrio en Egipto.

El vidrio en sus orígenes era meramente ornamental y solía imitar piedras preciosas (en realidad, en un primer momento llegó a superarlas en valor). Dado que en esa época no se tenían medios para conseguir altas temperaturas, el vidrio era una pasta oscura y moldeable.

En el año 1200 a. c. se tienen indicios de que se empezaron a fabricar recipientes de vidrio hueco con colores (decoración) a base de hilos de vidrio coloreados.

Egipto exportó sus objetos a los vecinos: Siria y Palestina, y de ahí se extendieron por el mediterráneo oriental (Grecia, Micenas, Creta y Chipre).

En el año 591 a. c. encontramos un acontecimiento muy importante por lo que al vidrio se refiere, aparecen los primeros objetos fabricados a partir de la técnica de soplado con caña en el Líbano.

La técnica de soplado a caña consistió en toda una revolución por lo que al vidrio se refiere. Las piezas resultantes de éste proceso eran de mayor calidad, no solo de mayor tamaño si no de espesores más esbeltos. A su vez, la rapidez de fabricación de ésta técnica consiguió que se pudiera llegar a fabricar piezas de vidrio a mayor escala, por lo que se logró reducir el coste económico del material y popularizarse.

Por lo que se refiere el Imperio Romano, hasta el año 20 dC no empiezan a fabricar por el método del soplado. A mediados del siglo I dC en Pompeya (63 dC) y Herculano (79 dC) encontramos revestimientos en pareces similares al vidrio plano actual, de dimensiones máximas 100x70 cm y espesores entre 2 y 15 mm.



FIG. 2 - TÉCNICA DE SOLPADO.
FUENTE: ENCICLOPÉDIE POR
DIDEROT Y D'ALEMBERT, 1773

En la época Romana podríamos definir tres periodos por lo que a fabricación de vidrio se refiere:

S. I – II. Vidrio de coloración verdosa.

S. III. Vidrio con más pureza y más calidad, se perfeccionan las técnicas de fabricación. Hacia el año 220 dC, en Roma encontramos una cantidad de hornos de manufacturación de vidrio muy elevada, es tanto, que el emperador pide que las manufacturas pasen a las afueras con tal de evitar incendios. El vidrio de los romanos incoloro y se utiliza sobre todo para copas y cálices para las iglesias. El precio inicial de los objetos realizados con éste material era muy superior incluso que el de los metales nobles, pero cuando la utilización de éstos se generalizó su precio también disminuyó. Hacia los años 214-270 dC ya encontramos copas de vidrio en las tabernas más modestas.

Finales S. IV. Menos calidad y monotonía de formas, es en el momento en el que empieza a caer el imperio romano, decadencia de la artesanía.

Roma logró expandir, gracias al gran alcance del Imperio Romano, las técnicas vidrieras a lo largo de Europa.

Hacia el siglo IV en Constantinopla aparece el Imperio Bizantino. En éste caso hay menos producción, pero más calidad. La mayor innovación por su parte es la construcción de Mosaicos. El procedimiento habitual era expandir una capa de cemento y vidrio (normalmente con forma cúbica) con pintura en su parte posterior (la pintura sobre vidrio apareció entre los siglos III y IV).

A partir del desmoronamiento del imperio de occidente, debido a la caída del imperio romano, hay un período de crisis de actividades artísticas, por lo que la producción de vidrio se ve menguado.

1.2.1.3 *EDAD MEDIA*

Tal y como se ha comentado anteriormente, al principio de la edad media (coincidiendo con la caída del imperio romano) nos encontramos en un período de poca actividad artística. La técnica de soplado de vidrio subsiste en focos aislados, por la zona del Rhin, el rio Sena y Normandía. Los objetos fabricados en ésta época recuerdan mucho a los del primer período del imperio romano, son más toscos.

En el año 969-988 aparecen los primeros vitrales en la catedral de Reims. A partir de aquí empieza a fabricarse el vidrio plano, por medio del soplado. Los vitrales serán una incorporación muy importante en la arquitectura, y estarán muy presentes en la arquitectura románica y más tarde en la gótica.

Entre los siglos VII - X, por influencia del imperio bizantino, se revisten gran parte de las paredes con mosaicos. Sobre el año 1000 (inicios del siglo XI) el vidrio vuelve a tener una gran importancia en Italia, concretamente en Venecia, ésta consigue elevar la expresión artística del material.

Tal era la importancia de los objetos que nacieron en la ciudad que una flota marítima los repartía a lo largo de las ciudades Mediterráneas orientales más importantes. En el año 1224 se funda en la ciudad de Venecia el primer gremio de vidrieros, bajo control estatal. Los vidrieros se consideraban nobles, tenían privilegios.



FIG. 3 - FUNDIENDO VIDRIO; GRABADO DE RE METALLICA, 12 LIBROS SOBRE MINERÍA Y METALURGIA, GEORGIUS ACRICOLA (1494-1555, BASEL, 1557)

Llegaron a haber muchísimos hornos de fundición, tantos, que por motivo de riesgo de incendio el consejo de la república en el 1291 decreta que todos los hornos se instalen en la isla de Murano.

A partir del 1200 deja de haber la influencia de los mosaicos bizantinos y aparecen las decoraciones esmaltadas. Las piezas cada vez son más ligeras y especializadas.

En el siglo XIV aparecen los espejos: sobre el vidrio plano se aplica una capa de plomo fundido. En el 1569 aparece el gremio de los “Spechiai” que son los especialistas en fabricación de espejos. A finales del siglo XVI aparece el famoso vidrio de Bohemia, dado que en la zona (República checa actualmente) no disponen de SoSa, utilizan cenizas vegetales, esto produce un vidrio de naturaleza más potásica.

Por lo que se refiere a España, hacia el 1324 Barcelona se considera la ciudad más importante vidriera, tal es su importancia, que igual que en Venecia años atrás, por decreto se sitúan los hornos fuera de la ciudad. A finales del 1500 el vidrio en Catalunya llega a tener tanta importancia que llega a competir con los vidrios venecianos.

1.2.1.4 EDAD MODERNA

A mediados del siglo XVII hay una gran decadencia del vidrio en Catalunya, las piezas pasan a ser más simples.

En el siglo XVII, el vidrio tiene una gran influencia en el mundo de la óptica, a partir del año 1590 aparecen las lentes y los microscopios.

En el año 1611 se empieza a utilizar carbón como combustible para los hornos de fusión, esto ayuda a conseguir una mayor temperatura de fusión, cosa que produce vidrios más homogéneos. Hacia el año 1675 se inicia la fabricación de vidrio al plomo en Inglaterra, que llega a ser un gran rival del vidrio veneciano.

A principios de 1687 aparece el vidrio armado, es un vidrio plano colado sobre una malla metálica que después se lamina. Esto consigue láminas de mayores superficies, es el precursor de la laminación tal y como la conocemos actualmente.

En Normandía, Francia, hacia el año 1692 se unen dos vidrieros muy importantes y se instalan en el Castillo de Saint Gobain, éstos son los orígenes de la conocida empresa.

En la segunda mitad del siglo XVII se inicia la Revolución Industrial. A partir del siglo XVIII hay mucha expansión de las técnicas vidrieras, tal que llega hasta el continente Americano.

1.2.1.5 EDAD CONTEMPORÁNEA

A partir de la Revolución Industrial, cómo en la mayoría de sectores de la época la técnica de fabricación empieza a vivir importantes cambios. En el año 1867, Friedrich Siemens inventa el horno de Balsa, éste es el primer paso para la producción masiva de vidrio y la fabricación de elementos de grandes dimensiones.

El proceso de hoja de cilindro soplado experimentó grandes desarrollos; en 1839 los hermanos Chance tuvieron éxito en adaptar el corte, lijado y pulido del cilindro soplado para reducir las roturas y mejorar la terminación de la superficie. Con éste método se desarrollaron todos los paneles del Crystal Palace.

Sobre el 1899 aparecen los bloques de vidrio, llamados “prism glass” y desarrollados por la Luxfer-Prismen Company, éste tenía unas dimensiones de 100x100 mm y estaban enmarcados con metal.

Más adelante apareció “El ladrillo de Nevada”, similar al anterior pero con dimensiones de 200x200x40 mm, producido por Saint Gobain llegó a tener gran fama por aparecer en edificios de Le Corbusier y Pierre Chareau.

Hacia el año 1900 John H. Lubbers, desarrolló un proceso mecánico para combinar el soplado y el estirado, con éste proceso se conseguían piezas de hasta 12 metros de longitud.

Entre los años 1915-1930 se desarrolla y perfeccionan los sistemas de laminación continua, que como se ha comentado anteriormente derivaban del vidrio armado.

En 1919 Max Bicheroyx tuvo éxito en llevar a cabo un paso vital en la producción de vidrio fundido. El proceso estaba concentrado en un laminado continuo.

A partir de 1930 la Owen Illinois Glass corporation tuvo éxito en producir un ladrillo hueco de vidrio consistente de dos partes presionadas entre sí bajo fuego y presión, éste es el bloque de vidrio al que estamos acostumbrados.

A principios de 1952, Pilkington Brothers inventan la fabricación de vidrio float, técnica que hoy en día se sigue utilizando.

En el año 1957 ya encontramos los primeros productos vitrocerámicos.

Junto al inicio del siglo XXI aparecen los muros cortina, que dieron infinitas posibilidades de juegos de luces en los edificios. Aunque el concepto de fachada ligera, ya estaba creado al finalizar el siglo XIX, se asociaba exclusivamente al el vidrio. Debieron pasar décadas hasta que se llegó a clarificar la idea de la moderna construcción reticular que es hoy en día el muro cortina.

1.2.2 MANUFACTURA DE VIDRIO

A continuación se enumeran los procesos relacionados con la manufactura de los vidrios más importantes a lo largo de la historia, en éste apartado solo aparecen los procesos que ya están extintos o prácticamente no se utilizan. Más adelante, en el apartado 1.4.4 de la página 37 se explicarán los métodos que se utilizan en la actualidad.

1.2.1.6 PROCESO DE CROWN (S. IV)

El resultante de éste proceso es un vidrio translúcido, no transparente. Fueron los artesanos de la zona de Siria quienes desarrollaron éste proceso y lo expandieron hacia el norte. El procedimiento se iniciaba extrayendo el vidrio e un cubilete donde reposaba el vidrio fundido. Se extraía la masa caliente y se unía a una caña agujereada. Con la ayuda de un rodillo de vidrio (también conocido como “pontil” se le daba forma a la masa de vidrio. El procedimiento se inicia extrayendo el vidrio de un cubilete donde reposa el vidrio ya fundido.

Se iba soplando, dando forma y calentando la masa constantemente (para así mantener el vidrio dúctil). Estos tres pasos se realizaban en varias ocasiones hasta que conseguían que el vidrio tuviera forma de campana, que se consideraba la adecuada.

En ese instante se procedía a girar el vidrio muy rápidamente hasta que resultaba un disco plano de vidrio con un ojo de buey en el centro.

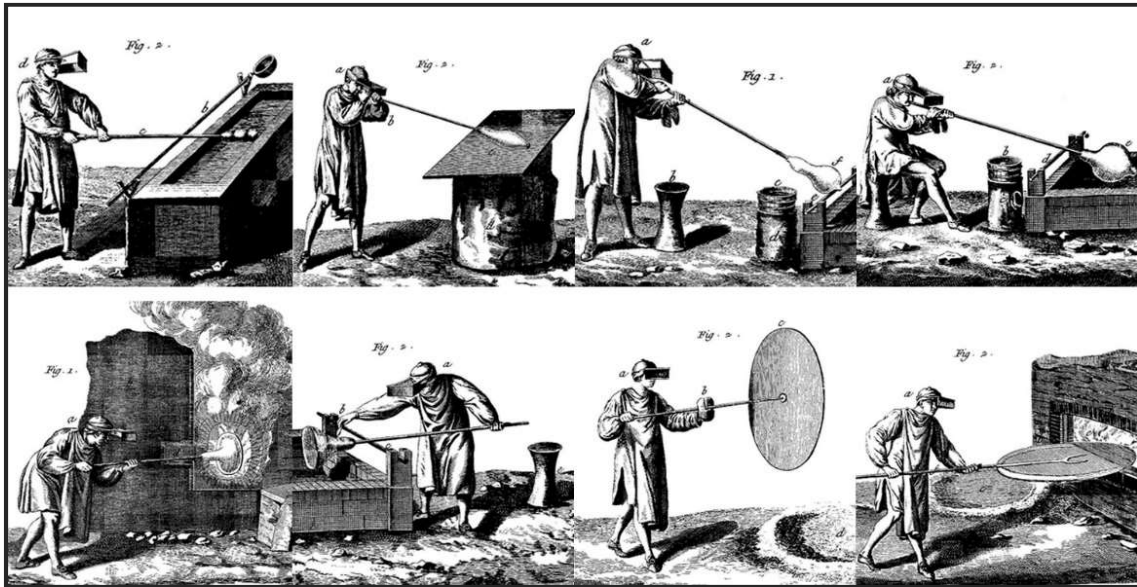


FIG. 4 - LA PRODUCCIÓN DE VIDRIO CROWN. GRABADO DE LA ENCYCLOPÉDIE POR DIDEROT Y D'ALEMBERT, 1773

Los discos se apilaban y se procedía al recocido. Dado que el vidrio era desparejo, el vidriero cortaba la lámina en forma de corona (*Crown* en inglés, de ahí su nombre) y las partes de éstas piezas resultantes que eran uniformes y tenían la superficie más plana se cortaban en rectángulos.

Éste proceso se utilizó hasta mediados del siglo XIX, principalmente en Normandía, por ésta razón el vidrio Crown recibe el sobrenombre de *verre de France*.

1.2.1.7 PROCESO DE CILINDRO (S. XII)

Éste proceso de fabricación se empezó a utilizar en el siglo XII y se tiene constancia que se fabricó hasta 1929 a nivel industrial, momento en el que cerró la última fabrica conocida. En México todavía hoy en día se encuentran pequeños talleres de artesanos que utilizan éste método. El proceso es muy similar al anterior, los primeros pasos son idénticos.

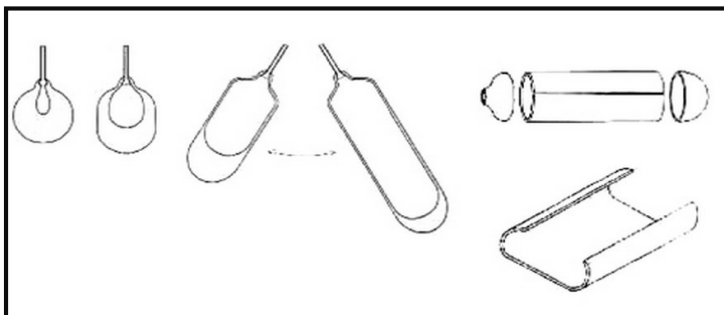


FIG. 5 - PROCESO DE FABRICACIÓN DE VIDRIO PLANO POR MEDIO DE UN CILINDRO. FUENTE: APUNTES DE LA FACOLTÀ DI ARCHITETTURA. LUIGI VANVITELLI

Una pelota de vidrio fundido se extraía con la caña de hierro de soplar, se le daba forma redondeada y se soplabá formando un “globo”, que se recalentaba continuamente para mantenerlo dúctil y así poder darle forma. Cuando conseguían la forma cilíndrica y sus paredes tenían el mínimo espesor posible (todavía en caliente) se abría longitudinalmente con una punta de fundición de hierro, y posteriormente se pasaba un diamante. Con éste proceso se conseguía seccionar y separar ambos extremos del cilindro. Posteriormente se disponía sobre una superficie plana y pasaba al horno. El cilindro llegaba a tener hasta 1.80 m de longitud y un diámetro de 0.30.

Una pelota de vidrio fundido se extraía con la caña de hierro de soplar, se le daba forma redondeada y se soplabá formando un “globo”, que se recalentaba continuamente para mantenerlo dúctil y así poder darle forma.

Cuando conseguían la forma cilíndrica y sus paredes tenían el mínimo espesor posible (todavía

1.2.1.8 PROCESO DE SOPLADO Y ESTIRADO (S. XX)

Hacia el año 1903 se mecanizó el proceso de cilindro cuando John H. Lubbers, desarrolló un proceso mecánico para combinar el soplado y el estirado. En el tanque de fundición, la parte superior de un cilindro se conectaba a un suministro de aire comprimido y lentamente el vidrio se expandía hacia abajo verticalmente.

Con este proceso se llegaron a obtener vidrios de hasta 12 metros y diámetros de 0.8 m. Sin embargo, antes de que el panel pudiera ser producido, era necesario abrir el cilindro por medio del corte y el formado. Girar el cilindro a posición horizontal era realmente complejo. El vidrio resultante era transparente pero tenía muchas imperfecciones y no era uniforme, ni en espesor ni en planicidad.

1.2.1.9 PROCESO DE LAMINADO CONTINUO (S. XX)

Éste proceso fue un paso vital para la producción de vidrio fundido. El proceso de producción, previamente dividido en varias etapas, estaba ahora concentrado en un laminado continuo.

El vidrio fundido salía del crisol en porciones y pasaba a través de dos rodillos enfriados para formar una cinta de vidrio.

El vidrio, todavía en caliente, era cortado en paneles y transportado a hornos de enfriamiento sobre tablas rodantes. Los paneles podían llegar a conseguir dimensiones de 3x6 m.

1.2.3 EL VIDRIO Y LA EDIFICACIÓN

En los apartados anteriores hemos visto la evolución del vidrio a nivel industrial a lo largo de los años. A su vez y en paralelo a las mejoras de producción, el vidrio ha influenciado mucho en la evolución de la arquitectura y los procesos constructivos.

A lo largo de la historia, los arquitectos y profesionales del sector han buscado soluciones para permitir la entrada de luz, protegiendo de las inclemencias climáticas al usuario y buscando un buen acondicionamiento acústico. Los materiales que se han utilizado para poder dar solución a estos problemas han variado muchísimo en función de las regiones o del tipo de arquitectura. Dentro de los materiales más importantes encontraríamos el pergamino, la tela recubierta de cera, el cuero, las conchas, el alabastro la mica y el vidrio; Éste último se ha acabado imponiendo a sus anteriores debido a sus prestaciones.

El vidrio, respecto los demás materiales utilizados en la construcción, tiene la ventaja que nos aporta transparencia, aislamiento térmico y acústico, un bajo coste de fabricación y un amplio abanico de acabados estéticos. Aun así, es un material frágil que tiende a romperse con una mayor facilidad que la mayoría de elementos constructivos.

Podríamos considerar dos momentos clave de la evolución de la arquitectura ligada al vidrio. El primero sería la transición del ventanal de la arquitectura románica a la arquitectura gótica, que consiguió por primera vez, la creación de muros translúcidos.

Por otro lado, la evolución técnica a partir de la revolución industrial, hicieron posible la fabricación de láminas de vidrio de mayores dimensiones, con una mayor producción y, por consiguiente con precios más bajos. Esto dio pie a las grandes fachadas de vidrio que conocemos actualmente y a la arquitectura del vidrio.

1.2.1.10 LOS ORÍGENES

El uso de pequeñas láminas de vidrio como cerramiento de las viviendas era una práctica común en la época romana y posteriormente en la cristiana islámica.

Podríamos establecer el inicio de éste uso a lo largo del siglo Id.C⁵. Este tipo de ventanas recibían el nombre de claustra o trasennae en la época romana, pero se consideraba un material lujoso y no era muy común encontrarlo en las edificaciones. Otra utilidad que se le confiere al vidrio en aquella época es el revestimiento de paredes y pavimentos, de hecho podríamos citar a Séneca donde podemos llegar a ver lo común que fue el uso de este material en la época

“Puede considerarse muy pobre quien no tiene su habitación cubierta con placas de vidrio”.

El uso del vidrio como material de cerramiento de ventanales en los edificios se impone de forma definitiva a partir de la evolución técnica y artística que supuso el desarrollo del método de fabricación por medio del soplado a caña. Tal y como ya se ha comentado en apartados anteriores, esta nueva técnica permitió la fabricación de láminas de vidrio de mayor tamaño y facilitó su fabricación, por lo que se convirtió en un elemento más común y económico.

Finalmente, otro de los usos más comunes en la época es el de los mosaicos. Estos se iniciaron en la antigua Mesopotamia y se transmitió a Egipto, Grecia, Roma y finalmente llegó a su máximo esplendor en Constantinopla a lo largo del imperio bizantino.

1.2.1.11 LOS MOSAICOS

El mosaico llegó a su máximo esplendor a lo largo del imperio bizantino. El imperio bizantino se extiende a lo largo de los más de mil años que transcurren entre el siglo IV hasta la caída de Constantinopla en 1456. Podríamos definir el origen del imperio bizantino a partir del 300aC, cuando Constantino fija una nueva sede cristiana del Imperio romano en una antigua colonia griega llamada Bizancio (se bautiza Constantinopla en su honor).

Aun así, se denomina arte bizantino no solo aquel que se desarrolla dentro de los límites del imperio, sino también el de aquellos países que por proximidad geográfica recibieron influencia cultural en aquella época. El pequeño diccionario visual de términos arquitectónicos define al mosaico como:

“Decoración basada en la yuxtaposición ordenada de piezas, generalmente de distintos materiales y colores, para organizar motivos geométricos y figurativos”.

A diferencia del arte Romano (que colocaba el mosaico en los pavimentos), el arte bizantino recubre muros y bóvedas llenos de mosaicos. Los mosaicos que representaban figuras de emperadores y escenas cristianas en las basílicas e iglesias, solían representar las figuras con un carácter rígido e inmaterial, buscando siempre representar lo sobrenatural.

Los mosaicos están formados por teselas de mármol combinadas con piezas de vidrio. Las segundas se colocaban sobre fondos dorados o de colores para dar mayor efecto hacia el espectador.

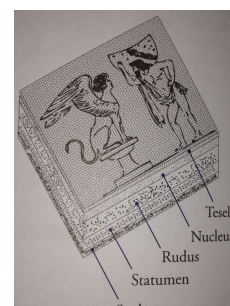


FIG. 6 - CROQUIS EN SECCIÓN DE UN MOSAICO A SUELO. AUTOR: JOSÉ MARÍA MARTÍNEZ MURILLO

⁵ [3] página 133

En la primera edad de oro del arte bizantino podríamos considerar un claro ejemplo los mosaicos de la catedral de Rávena (Situada en Italia). Los mosaicos más importantes (que hoy en día todavía se conservan) fueron realizados hacia el año 537, y están considerados algunos de los más importantes del arte bizantino. Las teselas doradas y la luz irreal contribuían a crear una atmósfera irreal, que perseguía destacar la divinidad.

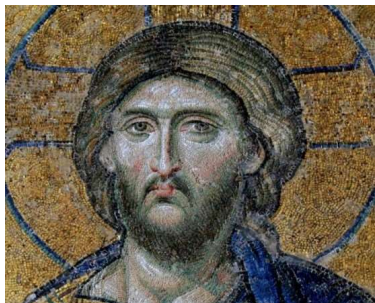


FIG. 7 - CRISTO PANTOCRÁTOR EN LA IGLESIA DE SANTA SOFÍA DE ESTAMBUL.
FUENTE: SOMOS VIAJEROS.

Sin embargo, el trabajo de los vidrieros no estaba muy desarrollado y se basaba sólo en formas geométricas.

El mosaico más importante del arte bizantino lo encontramos en Estambul, concretamente en la iglesia de la Sagrada Sabiduría (conocida popularmente como Santa Sofía). Este mosaico es el del Cristo Pantocrátor

Santa Sofía es uno de los edificios más importantes, y pese a que durante su primera construcción (Entre los años 532 y 537) se encontraba pavimentado con mosaicos, hoy desaparecidos debido a posteriores saqueos. El mosaico del Cristo Pantocrátor es más tardío, data aproximadamente del 1261⁶.

A diferencia del anterior las formas son mucho más elaboradas. El artista, logró efectos cromáticos y de profundidad que nunca antes se habían realizado con la técnica del mosaico.

1.2.1.12 LAS VIDRIERÍAS

La técnica clásica de la vidriería parte de tres elementos esenciales: el vidrio, el emplomado y la pintura. Estos tres elementos establecen un paralelismo, por el que el vidrio es el elemento básico (por su aspecto funcional, por su aislamiento y por que deja pasar la luz), el emplomado es la parte más técnica, mientras que la pintura nos aporta los aspectos formales.

El desarrollo del arte del vitral se inicia con el cristianismo y adquiere su máxima importancia en el periodo del arte románico y el gótico. La luz se convierte en el elemento principal en la lectura de las escenas iconográficas, que simboliza la presencia divina en la tierra.

Aun así, en 1932, unas excavaciones arqueológicas realizadas en la abadía de Lorsch (Alemania), descubrieron los fragmentos de un vitral que se estima del siglo IX o X. A pesar de que le faltan muchas piezas, la unión de los restos da a entender un rostro que según los expertos sería el de Cristo. Este es probablemente el vitral más antiguo con una representación pictórica.

Según dice Verónica Muñoz⁷, en su introducción histórico artística del vitral, la pintura decorativa más antigua aplicada al vidrio se le conoce como Grisalla, éste tipo de pintura se utilizaba ya en el periodo romano. Está compuesta por polvo de vidrio verde y azul más óxidos metálicos, todo ello mezclado con un aglutinante. La mezcla se aplica mediante un pincel sobre los vidrios y después se funde en el horno. El dibujo se compone de trazos gruesos, opacos y finas veladuras para el sombreado.

⁶ [63] página 135

⁷ [59] página 114

1.2.1.12.1 VIDRIERÍAS DEL ROMÁNICO

En Augsburgo (Alemania) se encuentran unos de los vitrales intactos y completos más antiguos del mundo. Están fechados a finales del siglo XI y representan a cinco profetas.

En el libro “El arte de las Vidrieras” de Teófilo, escrito en el siglo XII, explicaba que los elementos necesarios para pintar los vidrios eran arena, sal y cenizas; los colores se conseguían con ayuda de óxidos de diferentes metales (Hierro y plata para el amarillo, Cobre para el rojo y para el azul, Cobalto).

El procedimiento era simple, se recortaban los vidrios según un molde de cartón y se unían los vidrios entre ellos con miel de abeja. Con las varillas de plomo se formaban los paneles que posteriormente formaban los cerramientos.

La arquitectura románica, que se caracteriza por tener un sistema constructivo de muros compactos y continuos, solo partía de las aperturas para cumplir con la función de iluminar la estancia para posibilitar la lectura de los programas y la buena visualización de las pinturas. La vidriera románica hubo de adaptarse a los estrechos ventanales impuestos por la arquitectura y la escultura de la época.

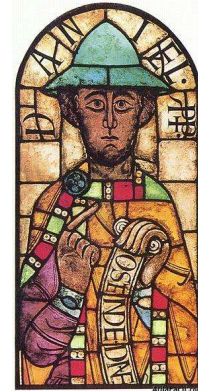


FIG. 8 - DETALLE DE UNO DE LOS VITRALES DE LA CATEDRAL DE AUSBURGO. AUTOR: HANS BERNHARD

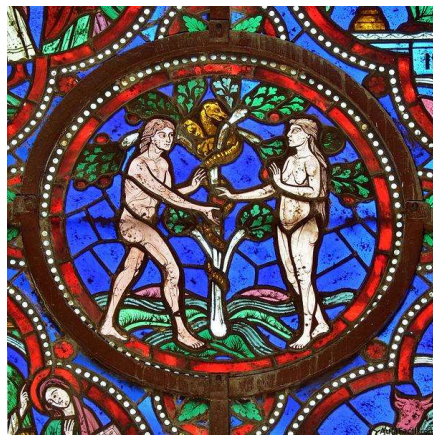


FIG. 9 - DETALLE DE VIDRIERA. CAPILLA DE LA VIRGEN DE LE MANS (S.XII). AUTOR: SELBIMAY

El vitral románico se caracteriza principalmente por tener solo una figura o personaje, que normalmente tiene los rasgos muy marcados. Otra tendencia de la época era hacer vitrales con forma circular (medallones) en la que habitualmente se reproducían escenas de la biblia.

Podríamos definir como las más importantes, la catedral de Le Mans (Francia), la catedral de Augsburgo (Alemania) y la catedral de York (Inglaterra).

Las técnicas especificadas por Teófilo fueron utilizadas, prácticamente sin variación, hasta el siglo XIX; el auge de la vidriería desplazará casi totalmente a los otros tipos de cerramientos con vidrio, siendo hasta éste siglo el principal medio de acristalamiento utilizado.

1.2.1.12.2 VIDRIERAS GÓTICAS (XIII-XV)

Podríamos definir el inicio de éste período dentro de la vidriería en la segunda mitad del siglo XIII, y su final hacia finales del siglo XV y principios del XVI.

Si en el arte románico las vidrieras tuvieron gran importancia, durante el período gótico alcanza su mayor expresión. La distribución de las aperturas en los muros de la arquitectura Románica se caracterizan por establecer un sistema de iluminación más simbólico completamente inédito.

En ésta época se desarrolla la técnica conocida como “El amarillo de plata”, que daba la opción de conseguir muchos más tonos de amarillos. En ésta época también se incorporó el vidrio doblado o plaqué, que daba mayor luminosidad a las catedrales.

Las soluciones arquitectónicas que aparecen en el período gótico (como el arco apuntado, la bóveda de crucería o el arbotante) dan como resultado la evolución de la arquitectura muy importante. Los maestros arquitectos disminuyen el espesor de los muros, facilitando la apertura de grandes ventanales en varias alturas del edificio.

Los vitrales más importantes de ésta época los encontraríamos en Francia en la Sainte-Chapelle, éste edificio es probablemente el más representativo de la arquitectura gótica. En total, en la Sainte-Chapelle hay unos 600 m² de vitrales, de los que 2/3 partes son los originales.

La tipología de los vitrales góticos varía considerablemente en función de la localización y el período. Los medallones iniciales que encontrábamos en el período románico serán substituidos por bastidores de mayores dimensiones a partir del siglo XIII.

Es importante también destacar la evolución del tipo de vidrio, debido a los avances tecnológicos y la evolución del concepto de vitral (Cada vez más elaborado).

La técnica utilizada continuó siendo el soplado a boca; aun así, los vidrios en general son más oscuros que los del periodo Románico y predominaban los colores rojizos, azules, verdes y púrpuras, coloreados todos ellos en masa. Es por este motivo que los primeros vitrales (Mitad siglo XIII) que nos encontramos se conocen como “vitrales a pleno color”.

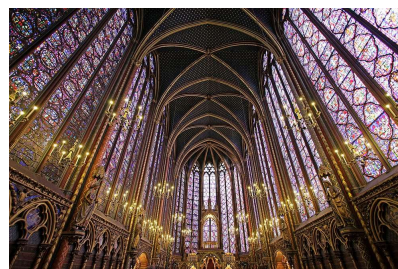


FIG. 10 - IMAGEN DE LA SANTA CHAPELLE.
FUENTE: WEB SAINTE CHAPELLE



FIG. 11 - DETALLE DE LA VIDRIERA DE LA CATEDRAL DE EVREUX, FRANCIA. EJEMPLO DE LA EVOLUCIÓN DE LAS FIGURAS. FUENTE: VASSIL.

A partir de la segunda mitad del siglo XIII, se produjo un incremento de los tonos cromáticos, generalmente eran tonos más luminosos. A su vez, los vidrios empezaron a ser más esbeltos y de mayores dimensiones.

A lo largo del siglo XIV, el corte de los vidrios tendió a hacerse cada vez más complejo (recordamos que la técnica cada vez persigue asimilarse más a las técnicas pictóricas), por lo que la obtención de las piezas necesitaba de gran maestría técnica.

Por lo que se refiere a la calidad de los vidrios, es importante remarcar que los vidrios producidos a lo largo de los siglos XIII, XIV y XV en el centro y norte de Europa, son normalmente de menos calidad que los utilizados en el período Románico y renacimiento. Eso es debido a que utilizaban potasa en vez de SoSa como fundente principal, ese es el motivo por el que se encuentran hoy en día en peor estado de conservación.

1.2.1.12.3 LA VIDRIERA CISTERCIENSE (XII – XIV)

En paralelo al arte gótico y ante los excesos decorativos en los templos cristianos de la época, la orden Cisterciense desarrolla unas vidrieras carentes de decoración figurativa y de color.

Éstas se caracterizaban por ser vidrieras muy sobrias, que utilizaba exclusivamente vidrio incoloro y la red de plomo como únicos elementos decorativos. Mediante estas restricciones decorativas se pretendía que la luz que atravesaba las vidrieras no distrajera de la oración y el recogimiento a los monjes.

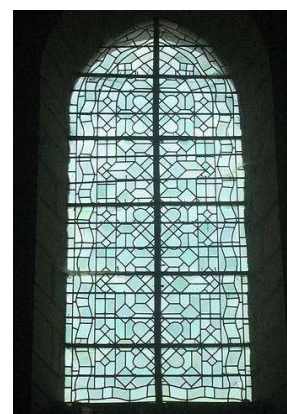


FIG. 12 - EJEMPLO DE VITRAL CISTERCIENSE. ABADÍA DE PONTIGNY, YONNE, FRANCIA. IMAGEN DE WIKIPEDIA

Algunas de las vidrieras más importantes Cistercienses las encontramos en Francia, concretamente en Orbais y en la abadía de Noirlac. En España, encontramos el Monasterio de Santes Creus (Tarragona).

1.2.1.12.4 LA VIDRIERA DEL RENACIMIENTO (XV-XVI)

El renacimiento se caracteriza por ser un período de transición. A diferencia del gótico, la creación de vidrieras fue en decadencia debido a la importancia que ganó la pintura y el estudio por la figura humana. Una de las características principales del Renacimiento y el Humanismo en el norte de Europa, en contraposición a Italia, es el rechazo por todo tipo de abstracciones e idealizaciones, siendo más realista, personal y accesible.

Entre el siglo XVI y el siglo XV aumentan los encargos de vidrieras en edificios no religiosos, como en facultades o viviendas privadas. Se suelen representar escenas de la vida doméstica y los oficios de la población de la Edad Media.

Por otro lado, cabe destacar la Catedral de Milán (S. XV), que alberga el mayor conjunto de vitrales de toda Europa.

En Francia, los talleres flamencos impulsan el arte del vitral durante el siglo XVI. Dentro de las obras que influyen en el arte del vitral del siglo XVI, destacan los vitrales de la Catedral de Bourges.

Por lo que a la técnica se refiere, los vitrales de ésta época se realizaban en su mayoría por pintores, que conseguían tonalidades que mejoraban la iluminación de las iglesias. A su vez, también se empezó a desarrollar la perspectiva, dando mayor profundidad a los diseños. Como ejemplo de esta evolución estilística destacan los vitrales de San Francisco, en Asís, y los de Santa Croce, en Florencia.

Por lo que a los colores se refiere, según explica Fernando Cortés⁸ en el artículo del Renacimiento del vidrio, durante el Renacimiento, las grisallas⁹, comenzaron a ser aplicadas con profusión en ambos lados del vidrio mediante modelado en trazos delicados, menos gruesos y más aguados, en busca de efectos de profundidad y tridimensionalidad. Por su parte, el amarillo de plata¹⁰ perdió parte del protagonismo que tuvo en siglo anterior, siendo generalmente aplicado de forma más discreta y puntual.

La técnica decorativa del grabado al ácido, que comenzó a utilizarse en la segunda mitad del siglo XV, experimenta en el renacimiento un gran desarrollo. El ácido fluorhídrico se utilizaba para eliminar una fina capa de vidrio de color en los vidrios, creando dos tonalidades en una misma pieza de vidrio, era un trabajo muy laborioso y delicado.

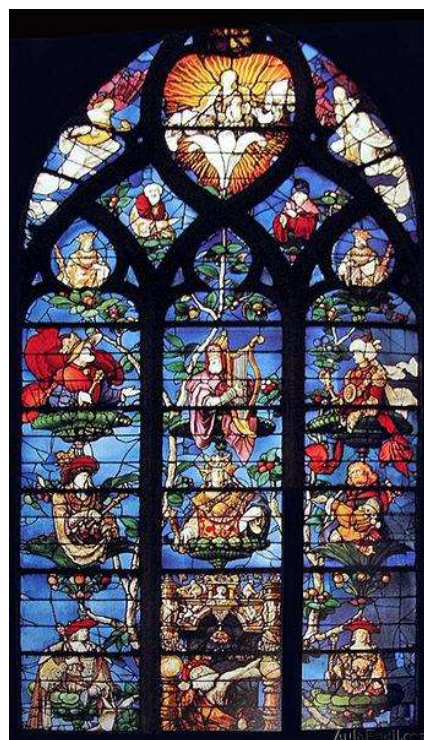


FIG. 13 - HERMANOS LE PRINCE, VIDRIERA. REPRESENTACIÓN DEL ÁRBOL DE JESÉ, EN LA IGLESIA DE SAINT ETIENNE DE BEAUVAIS (S.XVI)

⁸ [29] página 113

⁹ Grisallas: óxidos metálicos que diluidos en un fundente y un aglutinante, se fundían sobre los vidrios mediante cocción en el horno, creando los contornos y sombras del dibujo principal en tonos negros o marrones opacos.

¹⁰ Amarillo de plata: sales o nitratos de plata aplicados sobre el vidrio igual que las grisallas pero de coloración amarilla anaranjada translúcida.

La arquitectura del renacimiento favorecía los interiores iluminados con luz clara, diáfana y natural. Esto era totalmente contrario a los efectos y juegos de luz de los que se caracterizaban las vidrieras del gótico. Es por este motivo que en los edificios renacentistas nos encontramos vidrios incoloros, donde la red de plomo forma motivos geométricos.

1.2.1.12.5 PERÍODO DE DECADENCIA (XVII-XIX)

En el siglo XVII y XVIII el arte de las vidrieras comienza a decaer, debido a los diferentes conflictos religiosos de la época. Esto es debido a las grandes revoluciones que darán lugar a la reforma protestante de la iglesia Católica.

A su vez, es un período de fuertes conflictos bélicos a lo largo de Europa, las guerras que se sucedieron a lo largo de estos años destruyeron gran parte de los vitrales existentes. Como en ésta época no había una gran cantidad de talleres especializados en vitrales, no se llegaron a restaurar nunca.

Durante ésta época el vitral pasa a asentarse en edificios civiles y viviendas. Sin embargo, en el siglo XIX, con la llegada del romanticismo, el arte del vitral experimentará un resurgimiento.

1.2.1.12.6 EL RESURGIMIENTO DE LA VIDRIERA (S. XIX)

En el siglo XIX, tal y como hemos comentado anteriormente, después de un periodo de decadencia importante, el arte del vitral vuelve a resurgir debido al espíritu del Romanticismo y a los cambios sociales, políticos y tecnológicos de la época.

Se estudia con gran interés los componentes de la fabricación de vidrio de la época medieval, que conferirían al vidrio mayor calidad. William Edgar Chance, fabricante de vidrio, tras varios años de experimentación, logró superar la calidad del vidrio metalizado de la época medieval.

1.2.1.12.7 LA VIDRIERA EN EL S. XX

Con la llegada del modernismo el resurgimiento de las vidrieras se consolida, llegando incluso a crearse talleres de autor.

Los movimientos de las artes aplicadas y decorativas (por los que destaca la época modernista), la vidriera pasa a ser un elemento arquitectónico esencial. La arquitectura de la época incorpora materiales como el cemento, hierro y acero, abriendo nuevos espacios para incorporar vitrales, tanto en edificios públicos como en viviendas.

A parte de utilizarse como parte de los ventanales de los edificios, empiezan a aparecer vitrales integrados en las balaustradas de los edificios, en puertas, biombos y accesorios decorativos de la época. Incluso podemos encontrar algún ejemplo de cúpula acabada con metal y vidrio

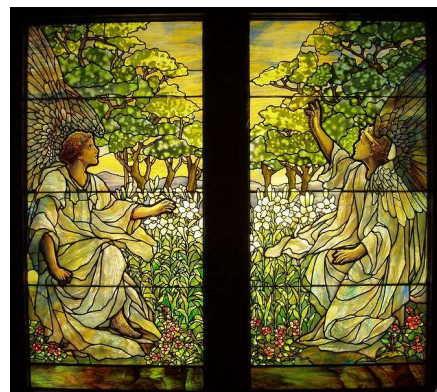


FIG. 14 - TIFFANY & CO. TWO ANGELS (1910).
AUTOR: DADEROT

En Inglaterra, a mediados de siglo XIX, destaca el movimiento Arts & Crafts, dirigido en un principio por William Morris, Marshall, Faulkner & Co.

A finales del siglo XIX, Tiffany y John La Farge desarrollan una nueva técnica de vitral, ésta es la primera técnica aparece después de la tradicional vidriera emplomada, la cual había dominado el arte del vitral hasta el momento.

Ésta técnica se basa en la sustitución del plomo por cinta de cobre para unir las piezas de vidrio, esto provoca que las piezas de vidrio puedan llegar a ser de menor dimensión y tengan mejor detalle y definición. A su vez, el vidrio que se utiliza es vidrio opalescente, que tiene menor capacidad de ser translúcido, pero es más rico en variedad de colores.

En España, el modernismo adquiere gran importancia a principios del siglo XX. Antoni Gaudí es el principal artista y arquitecto catalán representante del modernismo.

Se desarrolla principalmente a nivel arquitectónico, vinculado directamente con las artes aplicadas. En ésta época se rechazan los estilos sobrios e impersonales que destacaban en el siglo XIX, derivados de la revolución industrial.

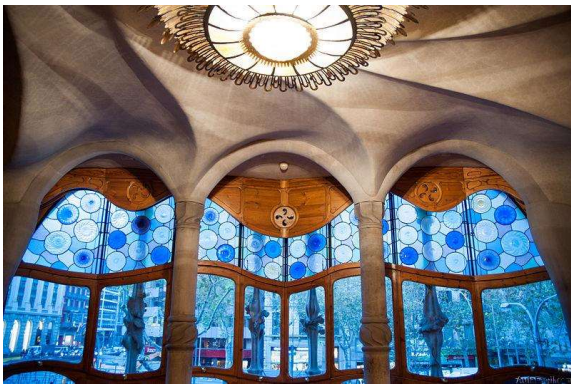


FIG. 15 - DETALLE INTERIOR CASA BATLLÓ DE BARCELONA, ANTONI GAUDÍ. AAUTOR: MSTYLAV CHERNOV.

El vidrio a color adquiere una importancia significativa, debido a su capacidad de transformar la luz natural que se proyecta en el espacio; Recordamos que el modernismo se basa en la decoración con formas imaginativas o fantásticas.

A partir del siglo XX se introduce el metal y el hormigón para crear las estructuras y disponer las vidrieras en la arquitectura. La introducción de nuevos materiales hace que se enriquezca la expresividad y el lenguaje visual de las obras.

Es importante destacar, que durante el siglo XX, los maestros vidrieros de Alemania y Holanda, forjan un estilo abstracto, formando vitrales de formas rectas y figurativas. Esta tendencia se expande después de la segunda Guerra Mundial.

1.2.1.13 LA ARQUITECTURA DEL VIDRIO

Aunque la revolución industrial se empezó a desarrollar en el siglo XVIII, no fue hasta la segunda mitad del siglo XIX donde la influencia de esta llega a la arquitectura. La revolución industrial derivó una época de grandes transformaciones, entre otros, en el ámbito de la arquitectura. Encontramos importantes cambios en las formas de los edificios, las estructuras, los materiales (hierro, hormigón y vidrio) y en las nuevas técnicas constructivas.

Este tipo de arquitectura se caracteriza por estar formada por acristalamientos incoloros soportados por una estructura de hierro.

En sus inicios, la arquitectura con vidrio empezó con la creación de invernaderos. The Palm House es uno de los primeros ejemplos que encontramos, sorprende por tener un diseño curvado. Se usaron 18000 paneles pequeños de vidrio, unidos entre ellos por medio de barras de acero. Esta tipología de edificaciones fueron diseñados para recrear el entorno natural de las plantas en sus distintos continentes de origen. Los tradicionales invernaderos de los jardines de la aristocracia del norte de Europa de los siglos XVII y XVIII se convierten durante la segunda mitad del siglo XIX en el mejor exponente de la experimentación sobre las nuevas posibilidades técnicas de la combinación del vidrio con los metales.

Siguiendo con edificios relacionados con la jardinería, hacia el 1836, el jardinero Joseph Paxton construyó un gran invernadero para la Chatseorth House y un conservatorio. Dos de los trabajos

previos a la realización del Crystal Palace, del que se hablará más adelante.

Inspirados en Chatsworth, Decimus Burton y Richard diseñaron la Palm House en los Jardines botánicos de Kew (Londres).

Si tuviéramos que marcar un referente del inicio de ésta nueva arquitectura, tendríamos que hablar del Crystal Palace de Josef Praxton (1851), edificio que se construyó para la Exposición Universal de Londres. Las exposiciones universales serán elementos de difusión de la nueva arquitectura, ya que son creadas para exaltar los adelantos de la industria, el comercio y las artes.

Éste era un edificio de fácil y rápido montaje (dado que todas las piezas estaban seriadas, prefabricadas y estandarizadas), su estructura era de hierro y el cerramiento enteramente de vidrio. La planta tenía forma de crucero con cinco naves, era modular y las naves laterales podían reducirse o ampliarse. El techo era de bóvedas de cañón en vidrio unido por hierro.

Lamentablemente el edificio desapareció en el año 1936 en un incendio y hoy tan solo nos quedan de él los grabados de la época.

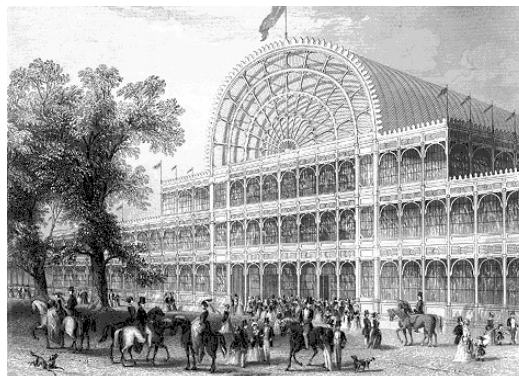


FIG. 16 - THE CRYSTAL PALACE DE JOSEF PRAXTON, GRABADO DE LA ÉPOCA

También encontramos espacios dedicados al comercio, como es la Galleria de Víctor Manuel II de Milán; es un edificio formado por dos arcadas perpendiculares con bóveda de vidrio que se cruzan formando un octágono. La galería fue diseñada en 1861 y construida por Giuseppe Mengone entre 1865 y 1877.



FIG. 17 - GALLERIA VICTOR MANUEL II (MILAN), FOTOGRAFIA DE GIACOMO BROGI

En España también se desarrolla una arquitectura de hierro que imita los estilos proyectados por arquitectos tales como Eiffel y Horeau. El retiro Madrileño de Velázquez Bosco, realizada en 1886 y la estación de Atocha de 1894 también en Madrid son claros ejemplos de la evolución arquitectónica.

A finales del siglo XIX y principios del XX se empieza a generalizar el uso de Hormigón combinado con acero para edificaciones residenciales e industriales. Es a partir de ese momento en el que el vidrio coge delantera a otros materiales para realizar cerramientos sin carga estructural en los huecos diáfanos. En sus inicios se utilizaban carpinterías de madera, pero este material

no podía competir con la perfilaría metálica en referencia a la resistencia, rigidez, estanqueidad y durabilidad; Por ese motivo se extendió la utilización de perfiles metálicos combinados con vidrio.

El almacén Tietz en Berlín de Sehring y Lachmann, construido en el año 1899, es un edificio destinado a ser unos grandes almacenes comerciales. Éstos son un gran escaparate propicio al uso y difusión de la arquitectura del vidrio aun cuando presenten un gran contraste estético entre un mundo ornamental que desaparece y la nueva arquitectura industrializada que emerge.



FIG. 18 - FAGUSWERK. FABRICA FAGUS, ALFED AN DER LEINE, 1911. WALTER GROPIUS/ ADOLF MEYER

Finalmente será la propia edificación industrial la que rompa moldes y presente las primeras fachadas realizadas íntegramente con metal y vidrio. Un ejemplo de ello sería la factoría Eisenwerk Manchen AG. (1903).

En el año 1911 se inician las obras de la fábrica Fagus, uno de los primeros referentes de arquitectura moderna, a cargo del arquitecto Gropius.

Los prismas rectangulares y la carencia de decoración contrastan notablemente con los edificios proyectados anteriormente. El edificio sorprendía con una estructura de hormigón armado, con los pilares desplazados ligeramente hacia el interior, liberando las esquinas del edificio de su

función portante. La fachada del edificio principal se construyó a partir de cuadrículas de metal cubiertas de vidrio, siendo uno de los primeros ejemplos de muro cortina que existen. El edificio se construyó en diversas fases, finalizándose las obras en el año 1925.

Walter Gropius también sorprendió con la construcción de las Oficinas de la Exposición de Wekrbund, Colonia, en el año 1914. La fachada está flanqueada por cajas de escalera de caracol de dos pisos envueltos en paredes de cristal, aplicando el mismo concepto que en la Fábrica Fagus de muro cortina.

Van Der Rohe en el año 1919 proyectó un rascacielos conocido como Friedrichstrasse, para un proyecto con la finalidad de construir rascacielos en la ciudad de Berlín. En el año 1920 proyectó también el rascacielos de fachada alabeada. Ambos tenían las fachadas de vidrio, pero no se llegaron a construir nunca.

Walter Gropius fue el creador de la famosa escuela de diseño Bauhaus en el año 1919, en Weimar. En la escuela se enseñaba a los alumnos a utilizar materiales innovadores y modernos para crear edificios y muebles originales y funcionales; fomentando una nueva forma de diseño, con la metodología de “aprender trabajando”. Configurando prototipos para desarrollar un sistema de producción industrial.

En el año 1925 la escuela se tuvo que trasladar a Weimar (Dessau), por el resentimiento político de la época. Gropius entendió el traslado como una oportunidad para construir un edificio que reflejara las pretensiones de aquello que esperaba que llegara a ser su escuela.



FIG. 19 - EL EDIFICIO QUE WALTER GROPIUS DISEÑÓ PARA LA BAUHAUS DE DESSAU (1926). FUENTE: 20 MINUTOS

Este edificio se considera la obra maestra del racionalismo europeo. Un elemento que caracteriza al edificio vuelve a ser la tipología de esquinas vacías y transparentes (el cerramiento de vidrio pasa por delante del borde del forjado, quedando los pilares remetidos y dando lugar a un voladizo que permite eliminar el machón de la esquina), que ya encontrábamos en la Fabrica Fagus.

Siguiendo con el estilo arquitectónico racionalista, en 1928, mientras estaba realizando el proyecto del famoso pabellón alemán de Barcelona, Mies Van Der Rohe realiza el proyecto de la villa Tugendhat, que se construiría en el año 1929 en Brno. Donde incorpora vidrios de grandes dimensiones en su fachada.

En 1929 se realiza el Pabellón de Barcelona, diseñado por Mies Van der Rohe para representar a Alemania en la Exposición internacional de Barcelona, celebrada el mismo año.

Éste, es uno de los edificios más importantes en la historia de la arquitectura moderna, ya que en éste se muestran las ideas del movimiento moderno que en ese momento nació.

Los paramentos verticales, independizados de la estructura portante, son de mármol o de vidrio, en el caso de los cerramientos acristalados, estos emplean vidrio verde, negro, gris y blanco transparente.

El edificio de la fábrica Van Nelle es considerado uno de los monumentos industriales más importantes de Holanda. Situado en Rotterdam se realizó por los arquitectos LC van der Vlugt y Mart Stam entre 1927 y 1929.

Todos los edificios de este complejo están contruidos con estructuras de hormigón armado, mientras que las fachadas se envuelven en un muro cortina de acero y vidrio. Los diferentes edificios y niveles están unidos por puentes aéreos de vidrio que cruzan diagonalmente la calle de la fábrica y conectan con los edificios de expedición y almacenaje.

La “Maison de Verre” se construye entre 1928 y 1932 por Pierre Chareau , Bijvoet Bernard y Louis Dalbet. Es una vivienda unifamiliar construida según el estilo internacional. A destacar la fachada conformada por bloques de vidrio translúcido combinado con áreas de vidrio liso transparente.

En 1930, y siendo uno de los primeros ejemplos del estilo arquitectónico Bauhaus, encontramos el edificio conocido como Kant-Garage de Berlín, diseñado por el arquitecto Hermann Zweigenthal. Es una edificación de seis plantas que incorpora un muro cortina.

Entre los años 1950 y 1952 se construye el rascacielos conocido como Lever Brothers Company, en Nueva York, diseñado por Gordon Bunshaft del gabinete Skidmore, Owings and Merrill (SOM). Es uno de los primeros rascacielos en los que la fachada se resuelve con una subestructura de perfiles de acero y paneles de vidrio.

La fachada de metal y vidrio ya es un logro sin vuelta atrás. No tan solo por la normalidad que adquiere su visión, sino por su economía, prestaciones, fiabilidad y rapidez de ejecución

La fachada del edificio está constituida por un vidrio verde-azulado y de acero inoxidable sobre los muros. El edificio tiene 21 plantas y aunque nos pueda parecer uno de tantos rascacielos en la ciudad de Nueva York, éste fue el primer edificio con una fachada de vidrio en mitad de las estructuras de mampostería de Park Avenue.

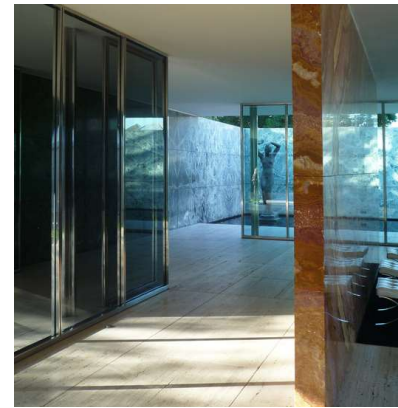


FIG. 20 - DETALLE DE LOS CERRAMIENTOS DE VIDRIO EN EL PABELLÓN ALEMÁN DE VAN DER ROHE. FUENTE: FLICKR, PROFZUCKER



FIG. 21 - DETALLE DE LAS FACHADAS Y PASARELAS DE VAN NEELE. FUENTE: WIKIPEDIA.

A partir del desarrollo, en el año 1952, del método de fabricación de vidrio flotado por la empresa Pilkington Brothers, junto a los avances tecnológicos de la época, surgirá una arquitectura civil donde el hierro y el vidrio ganarán espacio en muros y cubiertas.

Siguiendo en Park Avenue, entre 1956 y 1958 el arquitecto alemán Ludwig Mies van der Rohe, en colaboración con Philip Johnson realiza la sede central de la corporación Seagram.

Símbolo del mundo industrial contemporáneo, ilustra el lema del arquitecto *Menos es más*. De planta rectangular, con 38 pisos y con su espectacular diseño, se convirtió también en el primer edificio que importaba los ideales modernistas Europeos a los Estados Unidos por medio de la Bauhaus. Como peculiaridad, diremos que el edificio solo se erigió en el 40% del espacio del solar disponible, dejando espacio para poder observar al edificio desde la parte inferior. Igual que en el caso anterior, los vidrios tintados disminuían la radiación hacia el interior debido a su elevado coeficiente de absorción.



FIG. 22 - THE LEVER HOUSE, DEL EDIFICIO UNA VEZ CONSTRUIDO, FOTO DE 1953. FUENTE: WIRED NEW YORK

Su fachada está compuesta por vigas de acero y columnas de bronce, que enmarcan las grandes cristalerías que constituyen la parte más visible de la obra.



FIG. 23 - CUBIERTA Y CERRAMIENTO DE VIDRIO DE LA NUEVA GALERÍA NACIONAL DE BERLÍN. FUENTE: CORNERS OF THE 20TH CENTURY

La Neue National Gallery es la última obra del arquitecto Mies van der Rohe, el cual falleció antes de su inauguración. La construcción de éste edificio se realizó entre los años 1962 y 1967, es una caja de acero y vidrio que se levanta sobre un zócalo de piedra, generado por la diferencia de niveles de la calle.

Uno de los principales inconvenientes que presentaba la utilización de vidrio en las fachadas era su falta de resistencia y su fragilidad ante movimientos de dilatación de los demás materiales.

Las fachadas del segundo tercio del siglo XX, de estilo arquitectónico funcionalista, siguiendo la estética del Movimiento Moderno y la segunda escuela de Chicago (Mies van der Rohe), se caracterizan por la utilización masiva del acero tanto para las estructuras como para elementos visibles y revestimientos exteriores de vidrio (muro cortina).

A partir de éste momento, los sistemas de cerramiento exterior más utilizados, tal y como podremos comprobar, serán los de fachada ventilada. Por ese motivo se recurre al tratamiento de

templado, que no solo adquirió al vidrio de más resistencia, sino que también permitió que se realizaran perforaciones para sistemas de fachada con anclajes más sofisticados.

Uno de los primeros ejemplos de utilización de vidrio templado en fachadas, es curiosamente también uno de los primeros edificios de Norman Foster, es el edificio de oficinas Willis Faber & Dumas, construido entre los años 1971 y 1975. Foster se convirtió el heredero directo de la búsqueda de Mies con sus primeros proyectos de rascacielos.



FIG. 24 - OFICINAS DE WILLIS FABER & DUMAS. IPSWICH, REINO UNIDO, 1975. FUENTE: TECTÓNICA

La fachada del edificio tiene una gran continuidad, dado que el vidrio es colocado sin carpintería. A destacar la forma del edificio, que huye de las formas rectas y racionales, conformando una fachada curvada, acentuada por unos vidrios de tonalidades grisáceas con control solar. El edificio, concebido antes de la crisis de petróleo de mediados de los 70, y calentado por gas natural, fue un edificio pionero en el diseño energéticamente eficiente.

En 1980 Rice Francis Ritchie construyó una fachada bioclimática para la Ciudad de las Ciencias y de la Industria de París. Ésta pretendía ser una fachada sin cartabones de chapa vista, sin embargo, y pese a su ligera estructura, el resultado no es el esperado y el efecto final no tiene la claridad y la transparencia que se esperaba.

Bentham & Crowel desarrollan en el año 1983 un muro de vidrio que sostiene la cubierta de la Casa Bentham aprovechando la resistencia a compresión que nos aporta el vidrio templado.

No hay material diferente al propio vidrio de fachada; unas costillas de vidrio templado soportan las vigas de acero y la chapa grecada de la cubierta.

Fueron los conocimientos de esta casa los que dotaron a los arquitectos de las capacidades suficientes para crear el Pabellón de esculturas en Sonsbeek, en el año 1986.

En este edificio se utiliza el vidrio como principal elemento constructivo. Los pilares de vidrio de 12 mm soportan unas vigas metálicas que hacen a su vez de soporte de la cubierta, también de vidrio.

En 1988 se inician las obras del Business Promotion Centre en Duisburg a cargo de Norman Foster.

El control climático integrado nos aparece en el Hotel Industrial, Jean Baptiste Berlier de Dominique Perrault realizado entre los años 1986-1990, donde se incorporan lamas horizontales, bandejas de instalaciones eléctricas y conductos de aire acondicionado para aminorar la incidencia lumínica.

La arquitectura contemporánea nos brinda muchísimos ejemplos de construcción con vidrio, todos somos partícipes a diario de éste fenómeno, dado que tan solo hace falta observar las fachadas de la mayoría de edificios de oficinas de nueva construcción. Es por ese motivo que los ejemplos que se explicarán a continuación serán aquellos que nos aporten alguna novedad respecto el concepto de fachada de vidrio.

Siguiendo con los edificios con sistemas de protección solar, también encontramos a la Fundación Cartier en París, del arquitecto Jean Nouvel y realizado entre 1991 y 1994, donde en la fachada acristalada se incorporaron unos toldos enrollables exteriores para filtrar la luz.

En el año 2000 se convocó un concurso de arquitectura que buscaba ideas innovadoras para una vivienda que se debía construir totalmente con vidrio; de ahí aparece la Casa Laminata, situada en Leerdam (Holanda) y proyectada por Kruundenberg Van der Ere Architects en el año 2001.

Se trata de una edificación formada por (aproximadamente) 13.000 láminas de vidrio siliconadas entre ellas y formando los muros de la vivienda, siendo éstas el soporte del tejado.



FIG. 25 - INTERIOR DE LA CASA LAMINATA, CONSTRUIDA ENTERAMENTE DE VIDRIO. AUTOR: LUUK KRAMER

La particularidad de las macizas paredes de vidrio da una transparencia muy peculiar, en función del grosor del vidrio y de la incidencia lumínica. A su vez, los compactos paramentos protegen de la radiación solar directa y resultan un buen aislante térmico y acústico.

Como ejemplo de la utilización del vidrio dentro de la arquitectura vanguardista a nivel de Catalunya podríamos citar la construcción de la conocidísima torre Agbar en la ciudad de Barcelona el año 2005 por Jean Nouvel (b720 Arquitectos).

El edificio se conforma como la unión de dos conceptos opuestos: la ligereza del vidrio, que recubre el edificio en forma de lamas de 120 x 30 cm, formando un gran brise-soleil y la masa del hormigón de su estructura.

La fachada está conformada por módulos de chapa de aluminio lacada en 25 colores diferentes y una segunda piel de lamas de vidrio con diferentes grados de transparencia que difuminan la torre. La superficie de la fachada ocupa unos 16.000 m. Las lamas presentan distintas inclinaciones y opacidades, que unidos a las distintas tonalidades del aluminio alteran el equilibrio cromático de la torre en función del momento del día y la estación del año correspondiente.



FIG. 26 - FACHADA DE LA CASA MIMÉTICA DE DOMINIC STEVENS, MOSTRANDO LA REFLEXIÓN DEL PAISAJE EN SUS PAREDES. FUENTE: MIMOA; AUTOR: EMMETT SCANLON

La casa Mimética de Dominic Stevens, construida en 2006 en Dromahair (Irlanda), es un ejemplo del uso que se le puede dar a los vidrios tipo espejo. Toda la edificación está revestida por vidrios reflectantes a una cara, de tal manera que desde la interior de la edificación se ve perfectamente lo que ocurre en el exterior y en el exterior se refleja el paisaje del entorno.

La obra arquitectónica, fue diseñada por el estudio de ingeniería Coll-Barreu, y como característica principal enumeraremos que el edificio está dotado de un doble recubrimiento acristalado y de una fachada exterior con forma quebrada. El cerramiento del edificio está formado por un sistema de doble fachada acristalada, con una cámara de aire en la parte central. La fachada exterior se compone de un cerramiento formado por planos poligonales de vidrio laminar con control solar y la fachada interior, de doble acristalamiento, tiene una capa de baja emisividad en la parte interior. La doble piel de los edificios proporciona, en invierno, la disminución de las pérdidas de calor y, en verano, un enfriamiento de la fachada interior; que disminuye la demanda de aire acondicionado.

1.3 COMPONENTES QUE CONFORMAN EL VIDRIO

Las materias primas que se utilizan a lo largo del proceso de fabricación de los vidrios son de gran importancia para conseguir un resultado adecuado. En función de la tipología de vidrio final, de la disponibilidad de materia o del proceso de fabricación, se escogerán unos u otros materiales. Son un conjunto de sustancias naturales, productos químicos y materiales reciclados que formarán la mezcla vitrificable.

Tal y como organizan ésta lista la mayoría de autores a los que se ha consultado, clasificaremos las materias primas del vidrio basándonos en el orden y papel que desempeñan durante el proceso de fusión.

1.3.1 VITRIFICANTES

Se consideran vitrificantes los materiales formadores de vidrio. Constituyen gran parte de la masa total del vidrio, por lo que estos son los que forman el esqueleto estructural de los vidrios. Le otorgarán sus características principales y le darán su nombre genérico (vidrios de silicatos, de fosfatos, de boro silicatos...). A continuación veremos un listado de los vitrificantes (o óxidos formadores) utilizados más frecuentemente en la fabricación del vidrio.

1.3.1.1 *SÍLICE (SiO_2)*

De todos los vitrificantes, el dióxido de silicio (SiO_2) es el que se utiliza más comúnmente. Es el elemento principal en la fabricación de vidrio, constituye aproximadamente $\frac{3}{4}$ partes de su composición (varía entre un 50 y un 80%).

Es importante remarcar que su presencia puede influenciar considerablemente en las propiedades del vidrio. Como mayor sea la proporción de SiO_2 mayor será la cohesión de su retículo, aumentará la resistencia química, su resistencia a choque térmico y la transparencia a radiación ultravioleta. Si se disminuye su porcentaje puede provocar cristalización o desvitrificación. Por lo anteriormente explicado, hay que tener un gran control sobre el porcentaje de contenido de sílice.

1.3.1.2 *TRIOXIDO DE BORO (B_2O_3)*

El Trióxido de Boro (B_2O_3) es un excelente formador de vidrio, pero no se suele utilizar nunca, debido a su alta solubilidad. Los vidrios de borosilicato son muy diferentes estructuralmente a los vidrios de sílice, asociándose a vidrios de SiO_2 suelen producir vidrios neutros de laboratorio, vidrios termo resistentes (que resisten a cambios bruscos de temperatura), fibras de vidrio y otros elementos especiales.

Es un excelente aditivo para vidrios de SiO_2 en proporciones muy discretas acelera la fusión, disminuye la viscosidad y disminuye la tensión superficial. Esto deriva en una facilidad en el proceso de afinado y una mejora en el rendimiento de trabajo.

1.3.1.3 *PENTOXIDO DE FÓSFORO (P_2O_5)*

Normalmente no se utiliza, solo lo encontramos presente en vidrios con características ópticas especiales (dado que tiene una gran transparencia en el intervalo ultravioleta). No se suelen utilizar por su elevado nivel de solubilidad. Aun así, en ausencia de sílice y convenientemente estabilizados tienen la característica de ser resistentes al ácido fluorhídrico.

1.3.2 FUNDENTES

Favorecen la formación de vidrio, disminuyendo la temperatura de fusión y facilitando su elaboración. Los óxidos que así actúan son conocidos como modificadores de red y dentro de ellos los alcalinos (o álcalis) son los que cumplen éste cometido.

1.3.2.1 ÓXIDO DE SODIO (Na_2O)

Después de la sílice, es el elemento con mayor presencia en la masa total de los vidrios convencionales (entre un 12 y un 15%). Los álcalis son indispensables en la fabricación industrial de vidrio y de todos los vidrios comerciales no hay ninguno que esté exento de ellos, de todos ellos el Óxido de sodio es el más común, por motivos funcionales y económicos.

Aunque hay una gran cantidad de elementos que nos pueden aportar óxido de sodio a la masa del vidrio, hay dos materiales que son los más utilizados, estos son el Carbonato Sódico y el Sulfato Sódico.

Al Carbonato Sódico se le suele llamar comúnmente como sosa. En Estados Unidos existen grandes yacimientos de esta materia, pero en Europa al no tener gran cantidad de yacimientos, el carbonato cálcico de suele producir por el método de Solvay. Éste consiste en un tratamiento del cloruro sódico con bicarbonato amónico para formar bicarbonato sódico, después pasa a descarbonatarse. El vidrio rico en sosa tiene un coeficiente de dilatación muy alto, rompe fácilmente al calentarlo y es blando, siendo fácilmente atacado por el agua. Sus propiedades mecánicas se modifican muy poco.

El Sulfato Sódico, en cambio, siempre implica una adición indirecta de óxido de sodio a la masa del vidrio. En general no se suele utilizar dado que acaba generando muchos inconvenientes, es muy agresivo con los materiales refractarios y esto puede inducir muchos defectos. En las pocas situaciones en las que se utiliza suele ser por motivos económicos.

1.3.2.2 ÓXIDO DE POTASIO (K_2O)

Actualmente aparecen en la composición de prácticamente todos los vidrios comerciales, pero tan solo con una presencia de un 1%. Originariamente la mayoría de vidrios se hacían con éste componente (los vidrieros lo extraían a partir de la calcinación de madera). Por norma general, el vidrio que deriva de éste óxido suele tener más calidad, en ellos se producen menos fisuras, se pueden recocer con mayor facilidad y el vidrio resultante suele ser más brillante. Es un vidrio más noble, siendo utilizado en vidrios ópticos, ornamentales o de aplicaciones especiales.

1.3.2.3 ÓXIDO DE LITIO (Li_2O)

De los tres óxidos alcalinos principales, el de litio es el que se emplea con menos frecuencia en la industria del vidrio porque es más caro que los dos anteriores. Entre otras, las ventajas que presenta frente los anteriores fundentes es acortar notablemente el tiempo de fusión y de afinado, disminuir el coeficiente de dilatación térmica y mejorar la resistencia hidrolítica de los vidrios.

1.3.3 BASES O ÓXIDOS

Son elementos estabilizantes que cuando se introducen en la composición del vidrio, permiten modificar en uno u otro sentido las propiedades de éstos. Existen una gran cantidad de óxidos y bases, a continuación solo se enumeraran los que su uso suele ser más extendido.

1.3.3.1 ÓXIDO DE CALCIO (CaO)

Es el tercer elemento con mayor presencia en la masa del vidrio común, juntamente con la Sílice y el óxido de sodio. Su utilización aumenta la estabilidad química y mecánica, actúa, en realidad, como si fuera un estabilizante, aunque estructuralmente tiene la forma de un formador de red. En exceso facilita su desvitrificación.

El óxido de calcio se suele introducir por medio de la caliza natural, ésta es muy abundante en la naturaleza. Se suele encontrar en sedimentaciones, y el principal inconveniente que presentan es que al ser arrastradas pueden contener otros elementos que son indeseables para la fabricación del vidrio (un ejemplo es el óxido de hierro).

1.3.3.2 ÓXIDO DE MAGNESIO (MgO)

Es muy parecido al caso anterior, pero mejora la estabilidad del vidrio y en pocas proporciones, en un 3% - 4% de presencia aumenta la viscosidad y alarga el intervalo térmico moldeable.

Hace que el coeficiente de dilatación lineal sea menor, con lo que aumenta la resistencia a cambios bruscos de temperatura (por choque térmico). También mejora las propiedades mecánicas y los vidrios derivados de éste material son menos densos. La materia prima con la que se introduce el óxido de magnesio es la dolomita.

1.3.3.3 ÓXIDO DE BARIO (BaO)

Químicamente es muy parecido a los dos anteriores, pero las propiedades que aporta al vidrio se parecen más a las del óxido de plomo. Aumenta la densidad del vidrio, el índice de refracción y su brillantez. Mejora la sonoridad, aumenta la viscosidad, lo hace más moldeable y amplía el margen de tiempo de trabajo. Se utiliza menos que los dos anteriores por motivos económicos (es considerablemente más caro) y disminuye la resistencia del vidrio.

1.3.4 ESTABILIZANTES

Los tres anteriores (bases o óxidos) también podrían estar en éste apartado, por que actúan como estabilizantes, pero se han englobado en el anterior apartado debido a que sus funciones como fundentes son más importantes. Se los conoce como óxidos indiferentes, dado que pueden actuar tanto como formadores de red (vitrificantes) que como óxidos modificadores (fundentes).

1.3.4.1 ÓXIDO DE ALUMINIO (Al₂O₃)

El uso de este material le da al vidrio un aumento de la resistencia mecánica, mejora su estabilidad química, disminuye su coeficiente de dilatación térmica y por lo tanto los vidrios derivados tienen una mayor resistencia al choque térmico.

Por lo que se refiere a la fabricación, éste material nos da más viscosidad, cosa que incrementa el tiempo para moldear el vidrio. Como inconveniente principal, suele aumentar la tensión superficial y que aumenta la temperatura de fusión, cosa que provoca que tengamos más dificultades a la hora de afinar.

Entre otros, los elementos más utilizados derivados del Óxido de Aluminio suelen ser los Feldspatos, el Hidróxido de Aluminio y los Caolines.

Los Feldspatos son los elementos más utilizados para aportar alúmina a vidrio. Se funden a baja temperatura y se incorporan al vidrio sin producir alteraciones.

Por lo que se refiere al Hidróxido de Aluminio, su elevada proporción de óxido de hierro conlleva que su uso esté limitado a la fabricación de algunos vidrios de tonos verdosos.

Por último, los caolines Son de los elementos más importantes en la industria cerámica, sin embargo en el vidrio no tienen gran interés. El principal inconveniente que nos presentan es que éstos están formados por partículas demasiado pequeñas que pueden llegar a producir segregación a la mezcla.

1.3.4.2 ÓXIDO DE PLOMO (PbO)

Este material se caracteriza por mejorar la calidad del vidrio. Aumenta la refracción, la brillantez, la densidad y la sonoridad. Como inconveniente hay que destacar que los vidrios que incorporan este material suelen ser más blandos.

1.3.4.3 ÓXIDO DE ZINC (ZnO)

En bajas proporciones (hasta un 5%) su aparición es favorable. Aumentan la resistencia química, el índice de refracción, la dureza y disminuyen el coeficiente de dilatación térmica Como inconveniente, a altas temperaturas nos disminuye la viscosidad.

1.3.4.4 ÓXIDO DE HIERRO (FeO)

A lo largo de mucho tiempo se ha considerado una impureza de las arenas, éste se usaba para poder lograr el color oscuro deseado para algunos envases (como es el caso de las botellas de champagne). Su uso se dictaminaba por el color deseado, sin tener en cuenta la proporción, su presencia ha llegado a aparecer hasta en un 4% en vidrios oscuros, sin tener presente que éste componente actúa como fundente y, por tanto, reduce la presencia de álcalis.

1.3.5 COMPONENTES SECUNDARIOS

Además de los componentes que se han mencionado a lo largo de los apartados anteriores, en la fabricación del vidrio nos encontramos con otros elementos que no afectan a su estructura pero le aportan las características de textura y aspecto. Estos son los afinantes, decolorantes, colorantes, opacificantes, fluidificantes, etc.

1.3.5.1 AFINANTES

Se utilizan sobre todo para homogeneizar la mezcla de vidrio fundido, que suele contener imperfecciones, como es el caso de burbujas. Los afinantes consisten en elementos que se adhieren a la mezcla, que se vaporizan una vez la masa de vidrio está fundida, produciendo agitación homogénea de la masa.

De todos los afinantes que se suelen utilizar, en primer lugar encontramos **el sulfato sódico (Na_2SO_4)**, es el elemento más importante en el afinado de los vidrios sódico-cálcicos. Tiene la ventaja que solo se descompone ante temperaturas elevadas de afinado, con lo que la vaporización es muy limitada y está controlada. Los resultados a la hora de utilizar este componente pueden variar en función de la temperatura y la velocidad de calentamiento de la masa.

Por otro lado, también suele ser común encontrar el **Óxido de Arsenio (As_2O_3)** como los afinantes más utilizados. Popularmente se le conoce con el nombre de arsénico. A temperatura elevada y en presencia de carbono, se desprende arsénico metálico y monóxido de carbono, es este desprendimiento el que homogeniza la masa fundida. También lo podemos usar como colorante y opacificante. El arsénico metálico funciona como reductor, tomando el oxígeno de los cuerpos presentes, es muy venenoso.

Por último, otro de los afinantes que solemos encontrar en los vidrios comerciales es el **Óxido de Antimonio (Sb_2O_3)**. Este tiene la característica de que a partir de los 580°C se oxida, absorbiendo las burbujas de O_2 , esto produce burbujas más volátiles y ligeras que revuelven la masa del vidrio al desprenderse.

1.3.5.2 **DECOLORANTES**

Evitan la coloración del vidrio, ya sea por medio de oxidación reducción o aportando al vidrio un color distinto al que hubiera adquirido.

Uno de los decolorantes más conocido es el **Óxido de Manganeso (MnO_2)**, también conocido históricamente como el “Jabón de vidrieros”. La temperatura y la atmósfera del horno pueden variar considerablemente el resultado final de su utilización (éste es uno de los grandes inconvenientes). El funcionamiento de éste se basa en los colores complementarios; El tinte rosa que aporta el Óxido de Manganeso asegura la compensación de los tintes verdes del hierro, lo que deriva en ausencia total de tinte. Cada vez se emplea menos, debido a su complejidad a la hora de utilizarlo correctamente. Se han dado casos en que, a temperatura ambiente y por culpa de la acción de la luz durante el proceso de fabricación, el vidrio incoloro se vuelve rosáceo.

El **Óxido de Níquel (NiO_2)** actúa muy similar al manganeso, aunque su efecto es más simple. Da coloración parda, que compensa la coloración verdosa del óxido de hierro. En este caso, su efecto es independiente a la atmósfera del horno, por ese motivo suele substituir al anterior. El único inconveniente es que pueden llegar a originar inclusiones sólidas en la masa, cosa que puede provocar la ruptura en vidrios templados.

El **Óxido de Cobalto (CoO)** conferirá un color azul intenso que puede corregir los vidrios amarillentos originados también por el óxido de hierro. La atmósfera del horno no tiene influencia.

Por último, el **Selenio (Se)** se utiliza tanto como decolorante como colorante (colores rojos o rosados). La acción de decoloración se basa en compensar el rosa sobre el verde del hierro.

1.3.5.3 **COLORANTES**

Los colorantes son sustancias que se emplean para dar coloración al vidrio. Por norma general actúan coloreando toda la masa, aunque también se puede colorear el vidrio por medio de tratamientos superficiales, como es el caso de los esmaltes.

Hay tres factores que nos influyen considerablemente con los colorantes:

- El grado de oxidación de las sustancias. Diversos óxidos pueden dar lugar a colores diferentes.
- La atmósfera del horno (oxidante o reductor).
- La naturaleza del vidrio.

A partir de los apuntes del profesor F. Blanco ¹¹ de la Universidad de Oviedo, conocemos los compuestos químicos más utilizados para dar coloración. Los encontramos en el Anexo¹² de este documento.

1.3.5.4 OPACIFICANTES

Tal y como su nombre indica, de la utilización de éstos derivan los vidrios opacos. Como opacificantes más importantes tenemos: Feldespato, fluoruro de calcio y ácido fosfórico.

1.3.5.5 FLUIDIFICANTES (FLUORUROS)

Como se ha comentado en el apartado anterior, los fluoruros también actúan como opacificantes. Actúan también como fluidificantes ya que disminuyen considerablemente la viscosidad de la masa del vidrio. Si queremos utilizar el fluoruro como fluidificante no se debe exceder de un 4%, ya que en proporciones superiores actuará como opacificante. El principal inconveniente que nos producen estos elementos es que la volatilidad de éstos ejercen una fuerte acción corrosiva sobre los materiales refractarios del horno y son un peligroso contaminante atmosférico.

1.3.5.6 OTROS COMPONENTES

Aunque no se consideren materias primas propiamente dichas, también aparecen éstos dos materiales en la fabricación del vidrio.

Uno de los componentes más obviados y no por ello menos importantes es el **agua**, por una parte actúa como aglomerante de los granos de la mezcla, evitando que nos aparezca la disgregación durante el almacenamiento y transporte. Por otra, actúa como disolvente de los componentes más solubles, como es el caso del carbonato sódico, dando lugar a una solución que se distribuye por capilaridad en la mezcla.

El porcentaje óptimo de agua en un vidrio es entre un 4-5%, en mayor cantidad serían contraproducentes para la homogeneización de la masa y, a su vez, necesitaríamos más recursos energéticos innecesarios para su evaporación.

Otro de los elementos con los que nos solemos encontrar en la masa de vidrio es el casco (también conocido como calcín), estos son fragmentos de vidrio de la misma composición, que suelen proceder de elementos que se han roto o desechos industriales. Acelera las reacciones de formación de vidrio y sirve como medio de reacción y disolvente de los otros componentes. Se introduce inmediatamente después de que el vidrio entre en fase líquida en el horno.

¹¹ [25] página 112

¹² AA - COLORACIÓN DE LOS VIDRIOS. Página 138

1.4 FABRICACIÓN

A nivel de resumen, las fases por las que pasa el vidrio durante el proceso de fabricación serían las siguientes:

- ❖ Reacción de los componentes y formación del vidrio.
- ❖ Disolución del excedente de sílice que no ha reaccionado.
- ❖ Afinado y homogeneización de la mezcla.
- ❖ Reposo y acondicionamiento térmico.
- ❖ Conformación.
- ❖ Enfriamiento y recocido.

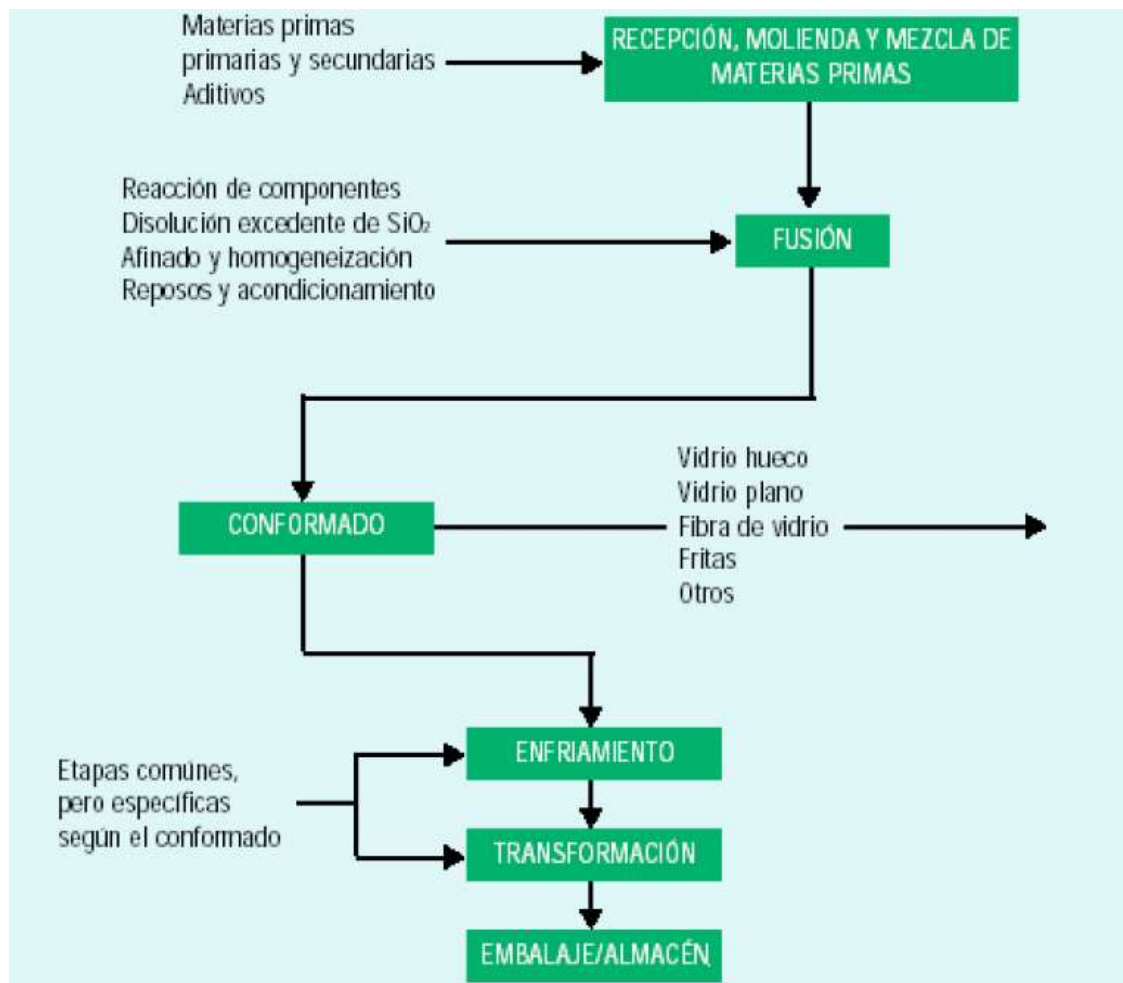


FIG. 27 - ETAPAS BÁSICAS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL VIDRIO. FUENTE: APUNTES DE F. BLANCO, UNIVERSIDAD DE OVIEDO.

1.4.1 PREPARACIÓN DE LA MEZCLA

La correcta preparación y dosificación de la mezcla será clave para que el vidrio tenga las propiedades y características esperadas. En todos los casos la preparación de la mezcla se hará en un recinto separado de la sala de fundido conocido como planta de composición.

1.4.1.1 RECEPCIÓN Y ACOPIO DE LAS MATERIAS PRIMAS

En cuanto llegan los materiales, el primer paso es hacer un control de calidad de éstos (un mero control visual inicial puede servir). Los materiales se suelen almacenar en silos (en el caso de plantas de fabricación de gran envergadura) o apilados en sacos (para empresas más modestas).

El principal inconveniente con el que nos encontramos al almacenar los materiales es la segregación. Los materiales de granulometría menor quedan en la parte baja del depósito y sin embargo restan sedimentos de mayor grano en la parte superior. Esto puede derivar en heterogeneidades en la mezcla si no se prevé.

1.4.1.2 PLANTA DE COMPOSICIÓN

La planta de composición se considera aquel espacio en el que entran en contacto las materias antes de pasar al horno de fusión. Como ya se ha comentado con anterioridad, ésta estará lo más alejada posible a los hornos de fusión.

La dosificación de los materiales se efectúa por pesada (ya sea manual o automáticamente). En los sistemas automáticos los materiales se distribuyen mediante cintas transportadoras.

El casco son pequeños fragmentos de vidrio desechado, que se reciclan formando parte de nuevo de la mezcla que conforma el vidrio. Estas piezas se deben purificar previamente y retirar los restos de metal o plástico que puedan llevar incorporados.

Hay dos tipos de mezcladoras: las abiertas y las cerradas. Las abiertas se utilizan en plantas de fabricación muy pequeñas y su calidad no es muy buena, además de que conllevan graves problemas de contaminación al desprender una gran cantidad de partículas en el aire. Por ese motivo es preferible utilizar las cerradas.

1.4.2 PROCESO DE FUNDICIÓN

Ésta etapa se sucede dentro del horno, en el que se da un aumento progresivo de la temperatura hasta un **máximo de 1550°C** (la temperatura variará en función de los componentes).

Popularmente se conoce éste proceso como fusión del vidrio. En realidad ésta terminología es incorrecta, ya que no es una fusión, sino un conjunto de reacciones que tras diversas transformaciones conducen a un cambio de estado. La palabra más correcta para éste proceso podría ser fundición o vitrificación.

A alta temperatura nos encontramos con una gran cantidad de transformaciones físicas. Las fases por las que pasa el vidrio durante el proceso son las siguientes:

- ❖ Transformaciones cristalinas
- ❖ Evaporación del agua
- ❖ Deshidratación de las sales hidratadas
- ❖ Disociación de los carbonatos y sulfatos
- ❖ Fusión de los elementos por reacción
- ❖ Disolución del material que se está fundiendo.

Aunque las reacciones químicas se inician a bajas temperaturas (mientras todavía están los materiales en estado sólido) las reacciones transcurren con lentitud hasta que llegan al estado líquido. La reacción siempre se inicia en la parte superficial de los granos, por lo tanto la mezcla es más eficaz como mayor sea la superficie específica de los materiales. Podríamos utilizar en la dosificación una granulometría de arena menor, pero esto conllevaría problemas en el proceso de fundido, dado que habría un prematuro aumento de la viscosidad. Esto reduciría el tiempo para eliminar los gases y consecuentemente dificultaría el afinado.

Veremos los cambios más fundamentales que aparecen en el proceso de fusión:

130°C: Se elimina el agua del conjunto.

400-600°C: Es en éste período cuando las reacciones químicas se inician entre las materiales que todavía se encuentran en estado sólido.

700-900°C: Primer fenómeno de fusión (reaccionan la mezcla carbonato sódico-caliza).

900-1450°C: Segunda fase líquida, donde comienza la fusión del feldespato y se disuelve la sílice en el silicato. Cuando llega a 1400-1500°C la masa está totalmente fundida y todas las reacciones químicas se han completado.

Una de las características del vidrio es que durante la disolución de la sílice se forman un gran número de burbujas, producidas por el aumento de acidez que presenta el fundido. Se conoce como afinado al proceso de homogeneización de la masa vítrea y eliminación de los gases, éste se suele realizar en la zona final del horno.

En el periodo de afinado se deben eliminar todas las burbujas, así como la mayor parte de los gases disueltos en la masa del vidrio, en el caso de que éstas no se eliminen en este punto de la fabricación, podrían producir burbujas secundarias a lo largo del proceso de conformación que pasarían a ser defectos irreparables.

Es importante remarcar que gran parte de las burbujas se eliminan a lo largo del proceso, ascendiendo a la superficie y estallando por si solas. Pero hay una minoría que ya sea porque están situadas a mayor profundidad, o porque tienen menor tamaño, no han tenido tiempo a ascender a la superficie.

1.4.3 ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO

Una vez se ha realizado el proceso de afinado, nos encontraremos con una masa homogénea, a partir de éste punto el vidrio pasará por una etapa de reposo que lo que busca es homogeneidad en la temperatura de toda la masa fundida. Con esta homogeneidad de temperatura conseguiremos una viscosidad uniforme y, por lo tanto, un reparto equitativo de materia. Ello producirá espesores uniformes y una disminución de defectos.

En éste proceso el vidrio pasará desde los 1500°C (temperatura a la que se ha ascendido con tal de eliminar los gases, tal y como se ha explicado en el apartado anterior) hasta los 1000°C aproximadamente (ésta temperatura varía en función del proceso de conformado al que vaya a ser sometido).

1.4.4 CONFORMACIÓN Y MOLDEADO

En éste apartado se estudiarán los diferentes tipos de procedimientos para el proceso de fabricación del vidrio plano, profundizaremos sobre todo en el proceso de flotado (dado que es el más utilizado en la actualidad).

Dado que el presente documento pretende centrarse en la aplicación del vidrio en construcción, en este apartado tan solo se tendrán en cuenta la fabricación de vidrio plano y bloques de vidrio (pavés).

1.4.4.1 SOPLADO A BOCA

Éste proceso actualmente merece simplemente mención por su importante valor histórico, dado que hasta épocas relativamente recientes fue el único sistema de producción de éste tipo de vidrio. El proceso más antiguo de soplado es el de soplado de discos o coronas, también conocido como “crown glass”, que tuvo su máxima importancia en la edad media (ver apartados anteriores¹³ para más información). De éste apareció más tarde el proceso de vidrio por medio de cilindros o manchones, cuyos orígenes se remontan al siglo X y mediante el cual se han logrado hojas de hasta 2 x 0.75 m.

1.4.4.2 SOPLADO MECÁNICO

A principios del siglo XX evolucionó el sistema anterior, de manera que pasó a ser un proceso mecanizado y semi-continuo, pero muy similar al proceso original. Los originadores de ésta técnica fueron Lubber en Estados Unidos y Sievert en Alemania. Se situaban grandes crisoles llenos de vidrio fundido y con una caña se procedía a inyectar aire a presión. Con este procedimiento se llegaron a alcanzar cilindros de más de 10 m de altura y hasta 0.80 m de diámetro.

1.4.4.3 PROCEDIMIENTOS DE ESTIRADO MECÁNICO

Este procedimiento se originó prácticamente paralelamente en Bélgica con Foucault (1902) como en Estados Unidos por Colburn (1903). Ambos procesos se basaba en extraer verticalmente, a partir de un baño de vidrio fundido contenido en un horno de balsa, una lámina rectangular continua de vidrio, que inmediatamente ésta emergiera fuera enfriada para no perder su forma.

1.4.4.3.1 EL SISTEMA COLBURN

Es el proceso que desarrolló Colburn y que la empresa Liwbbey-Owen explotó industrialmente.

Este proceso consiste en que la hoja nace directamente de la superficie del vidrio fundido y con la ayuda de dos pequeños rodillos dentados, refrigerados por agua, sujetan la lámina por los bordes y ejercen un movimiento ascendente de ésta.

El vidrio hace un breve recorrido de unos 60 cm donde disipa parte de su calor, dado que pasa entre dos pantallas metálicas refrigeradas y después de esto se dobla en ángulo recto sobre un rodillo de acero pulido.

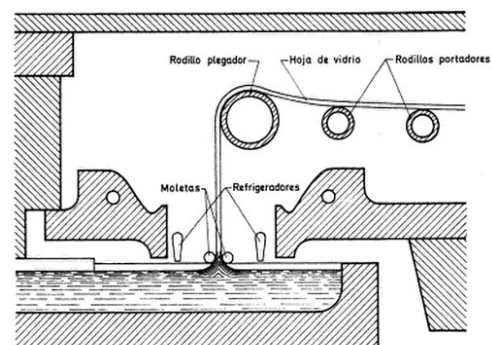


FIG. 28 - EL SISTEMA COLBURN. FUENTE: JOSÉ MARÍA FERNÁNDEZ NAVARRO, LOS VIDRIOS.

¹³ 1.2.1.6 página 12

A partir de ese punto se inicia otro recorrido, con la ayuda de unos pequeños rodillos en su parte inferior, por un túnel o canal de enfriamiento que tiene una longitud de 60 m. La velocidad del proceso es la que hace que el espesor del vidrio varíe, es por éste motivo que éste tipo de proceso permite fabricar una amplia gama de espesores que pueden llegar a ser inferiores a 1 mm.

Este procedimiento es prácticamente obsoleto, debido a costes de mantenimiento y las periódicas y frecuentes renovaciones de los rodillos.

1.4.4.3.2 EL SISTEMA FOURCAULT

En este proceso la hoja emerge de forma ascendente a través de la rendija de una pieza alargada de refractario, conocida como distribuidor, que se encuentra en el interior del vidrio fundido. Por el efecto de presión hidrostática que ejerce el vidrio fundido, éste penetra por la rendija formando una cresta y siendo el inicio de la lámina. Ésta pasa por unos rodillos refrigerantes a lo largo de todo su recorrido que es ascendente, a lo largo de este recorrido se produce el recocido del vidrio por enfriamiento del vidrio lento y gradual.

Igual que en el caso anterior, el espesor del vidrio variará en función de la velocidad del proceso y será de vital importancia mantener constante su viscosidad. Uno de los defectos más habituales derivados de éste proceso es la aparición de cuerdas o estrías debidas al estirado.

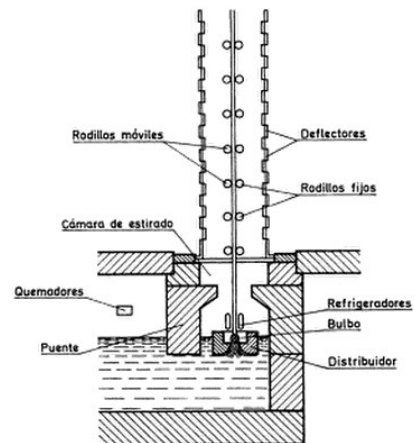


FIG. 29 - EL SISTEMA FOURCAULT. FUENTE: JOSÉ MARÍA FERNÁNDEZ NAVARRO, LOS VIDRIOS.

1.4.4.3.3 EL SISTEMA PITTSBURGH

Se empezó a utilizar poco después de la primera guerra mundial y su nombre proviene de la ciudad donde se desarrolló. Es muy parecido al anterior, la diferencia fundamental es que en éste proceso no hay distribuidor, si no que en su lugar hay una pieza de material refractario (conocida como barra de estirado) que actúa como pantalla térmica y protege la hoja, reduciendo el riesgo de desvitrificaciones.

Al salir del baño fundido la hoja de vidrio pasa por unos refrigerantes metálicos y alcanza su rigidez antes de que pueda iniciar su retracción.

De los tres procedimientos de estirados explicados en éste apartado éste es el que origina vidrios de mejor calidad, un mayor rendimiento de trabajo, vidrios más homogéneos, con baja tendencia a desvitrificar y estables químicos y mecánicamente debido a la proporción de álcalis en su composición.

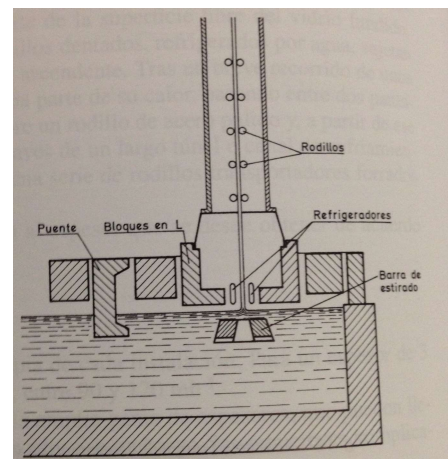


FIG. 30 - EL SISTEMA PITTSBURGH. FUENTE: JOSÉ MARÍA FERNÁNDEZ NAVARRO, LOS VIDRIOS.

1.4.4.4

PROCEDIMIENTO DE COLADO DISCONTINUO

Este procedimiento es muy distinto a los anteriormente descritos. Su metodología consistía en lo siguiente: Se colaba el vidrio contenido en un crisol en una superficie plana con la ayuda de un rodillo pulidor. El resultante de este proceso era una gruesa lámina de vidrio que se debía pulir y desbastar.

Más tarde, al final de la segunda guerra mundial, éste proceso evolucionó de tal manera que el material fundido del crisol se colaba con la ayuda de dos cilindros laminadores. La ventaja de éste proceso es que se podían obtener láminas de vidrio de espesores menores y más uniformes.

1.4.4.5 PROCEDIMIENTO DE LAMINADO CONTINUO

Es importante diferenciar entre el proceso de fabricación conocido como laminado y la laminación de dos vidrios (que veremos en apartados posteriores).

El concepto del proceso deriva del anterior, pero igual que en el caso anterior estaba limitado a la capacidad de un crisol de tres toneladas de vidrio, en este caso el proceso era continuado. Esto se debe a la evolución de los grandes hornos de balsa en la década de los años 20. El vidrio fundido es contenido en una balsa, y este, una vez afinado, pasa por una zona de acondicionamiento térmico (se la conoce como anticuerpo).

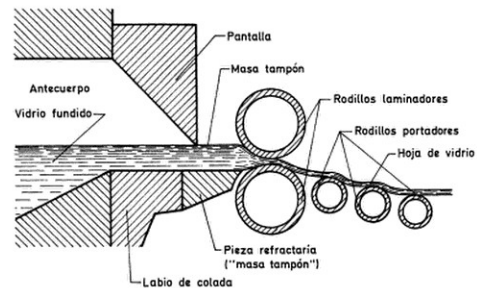


FIG. 31 - PROCEDIMIENTO BOUDIN COLADO CONTÍNUO. FUENTE: JOSÉ MARÍA FERNÁNDEZ NAVARRO, LOS VIDRIOS.

De ahí sale al exterior rebosando por el labio de colada y continua sobre la pieza refractaria. A partir de ahí pasa por dos rodillos laminadores y prosigue desplazándose por los rodillos portadores mientras se procede a su recocido y a su enfriamiento.

1.4.4.5.1 PROCEDIMIENTO LAMINADO IMPRESO

El proceso de fabricación de éste tipo de vidrio es idéntica a lo explicado en el apartado anterior, lo único que difiere es que el rodillo laminador inferior lleva grabado sobre su superficie un grabado que se imprime sobre la hoja de vidrio.

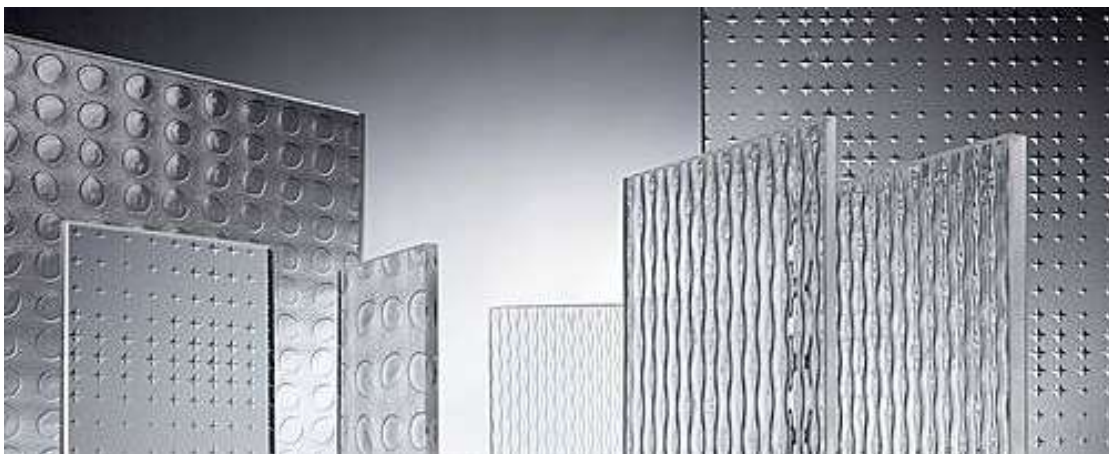


FIG. 32 - EJEMPLOS DE VIDRIO IMPRESO. FUENTE AGC, DISEÑO DE MICHELE DE LUCCHI

Se suele utilizar tanto en vidrios templados, doble acristalamiento y en laminados de seguridad. En el caso de los laminados, las dos caras se unen por medio de un butiral de polivinilo. La manufactura de este tipo de vidrios suele ser realmente compleja. En el caso del templado, al tener un espesor tan pequeño, cuando está a altas temperaturas tiende a deformarse y al enfriarse el

defecto perdura. En el caso de la laminación, los vidrios impresos de modelos antiguos, no tienen una planimetría perfecta en la cara lisa, por lo que al laminarlo suelen aparecer burbujas. Los vidrios impresos de última generación (como los de la imagen) suelen estar preparados para evitar estos problemas.

Los espesores más comunes son 4 y 6 mm, la dimensión de plancha habitual es de 132x252 cm y la máxima es de 180x252 cm, aunque se puede llegar a fabricar una plancha de dimensiones superiores bajo pedido.

1.4.4.5.2 PROCEDIMIENTO LAMINADO ARMADO

Sigue el mismo proceso de fabricación que el vidrio impreso, pero antes de que la lámina de vidrio pase entre los rodillos, se introduce una lámina metálica con el objetivo de que en caso de rotura del vidrio los fragmentos queden adheridos a la malla y no se desprendan.

Los espesores más comunes son 4 y 6 mm, la dimensión de plancha habitual es de 132x252 cm y la máxima es de 180x252 cm, aunque se puede llegar a fabricar una plancha de dimensiones superiores bajo pedido.

1.4.4.5.3 PROCEDIMIENTO LAMINADO PULIDO

El vidrio resultante del proceso de colada y laminación es una hoja translúcida con numerosas imperfecciones en ambas caras, es por ese motivo que tiene que pasar por un proceso de desbaste y pulido.

Antiguamente este proceso se hacía manualmente, pero a partir de la segunda guerra mundial se implantó el sistema “twin”. Este consiste en unos elementos situados continuamente a ambas caras del vidrio que se encargan de desbastarlo, la pieza resultante tiene un espesor uniforme pero presenta un acabado mate debido a la gran cantidad de fisuras. Por ese motivo posteriormente pasa al proceso de pulido, en el que se aplica al vidrio una suspensión acuosa de óxido férrico (conocido como potea). Con el tiempo este proceso pasó a ser doble, aplicándose a ambas caras simultáneamente, conociéndose como sistema Dúplex.

1.4.4.6 PROCEDIMIENTO FLOTADO

Este procedimiento aparece el año 1959 de la mano de la empresa británica Pilkington Brothers. La novedad del sistema de flotado respecto los anteriores procedimientos radica en que la lámina de vidrio ya sale pulida, sin necesitar ningún tipo de proceso de desbastado y pulido posterior.

Este proceso consiste en verter el vidrio fundido sobre un baño de estaño fundido, sobre el que flota. El estaño tiene una alta tensión superficial, lo que provoca que este material tenga una superficie plana y sin irregularidades, dado que el vidrio está en contacto directo con la superficie del estaño, su planicidad se reproducirá en la cara del vidrio, resultando muy plana.

El espesor del vidrio se puede modificar mecánicamente, pero en este proceso, viene influenciado por dos factores: por un lado la fuerza gravitatoria tenderá a ensanchar la lámina y disminuir el espesor, y por otro lado la tensión superficial que tenderá a reducir la anchura y aumentar el espesor.

El vidrio flotado no necesita ningún tratamiento posterior, a no ser que se trate de los tratamientos térmicos. Los espesores más convencionales fabricados oscilan entre los 2 y 25 mm.

Éste es el método de fabricación más empleado para el vidrio aplicado a la edificación.

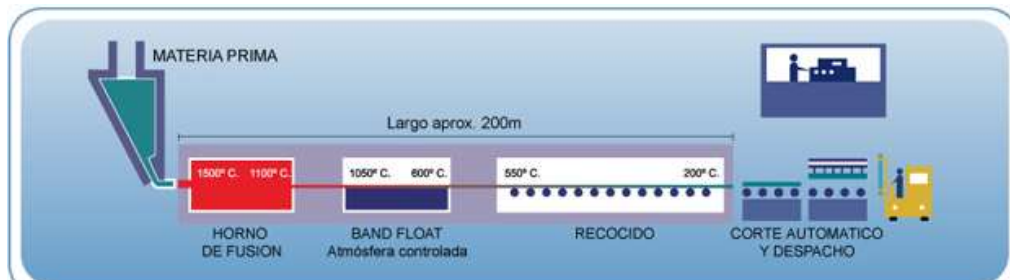


FIG. 33 - ETAPAS BÁSICAS DEL PROCESO DE PRODUCCION DE VIDRIO FLOTADO. FUENTE: CORPORACIÓN FURUKAWA

Tal y como vemos en la imagen anterior, se introducen las materias primas y en el horno de fusión consiguen la textura adecuada a partir de los 1500°C, a partir de aquí se forma la hoja de vidrio por flotación sobre el baño de estaño, que tiene unos 30 cm de profundidad.

Se emplea el estaño dado que está en estado líquido en el intervalo de 600-1000°C, tiene una densidad mayor que el vidrio y además es un material económicamente factible. Pese a todos los beneficios que nos aporta el estaño, esto no significa que la aparición de defectos sea nula. Cualquier escoria sólida que aparezca en la superficie del estaño dañará a la superficie del vidrio resultante. Para que esto no ocurra hay que mantener una atmósfera hermética dentro de la cámara libre de oxígeno, por eso se suelen introducir en el baño gases tales como hidrógeno y nitrógeno.

El vidrio pues, se vierte sobre el estaño a unos 1000°C, y sometido solamente a las fuerzas naturales, se extiende hasta que alcanza el espesor de equilibrio, a su vez que lentamente se va desplazando hacia la salida del baño. El espesor es función de las tensiones superficiales y las densidades de los fluidos.

La lámina va progresando a lo largo del baño, mientras su temperatura desciende hasta los 900° y entre los rodillos pasa a estar a unos 600°C. La salida del baño es uno de los puntos más importantes, se colocan unos rodillos, a mayor altura que el nivel de estaño y a modo ascendente, de tal manera que la curvatura de la hoja final sea mínima.

En este punto la temperatura es muy importante, dado que si el vidrio está frío se romperá al obligarlo a pasar por los rodillos y si está demasiado caliente los rodillos dejarán sus marcas. El intervalo de temperatura en el que es óptimo trabajar es entre los 585 i 620°C.

En un primer momento solo se podían fabricar vidrios entre 5 y 7 mm de espesor, dado que por tensiones y equilibrios de fuerza, el espesor óptimo de la hoja a lo largo de este proceso es de 7 mm. Para poder fabricar vidrios de mayores espesores se han incorporado en el proceso de fabricación lo que se conocen como maquinas Top-Rolls, que consiste en una barra que gira y en cuyo extremo tiene una rueda dentada que se clava en la superficie libre del vidrio, obligando a la masa del vidrio a avanzar a la velocidad marcada, esto nos consigue vidrios entre 1.7 y 12 mm de grosor.

Para grosores mayores, hasta los 19 mm, hay otro proceso, que consiste en colocar barras refrigeradas de grafito a lo largo del recorrido que hace el vidrio. El espesor vendrá definido en función de la velocidad con la que avanzara la hoja dentro del baño por medio de las barras.

A partir de aquí pasará al recocido y posteriormente al enfriamiento / corte (que se verá en el siguiente apartado).

Ésta tipología de vidrios, de base de silicato sodocálcico se fabrica habitualmente en espesores de 3, 4, 5, 6, 8, 10 y 12 mm. Las medidas de plancha estándar suelen ser de 255x325 cm y la medida máxima de éstas es de 600 x 325 cm.

Por el procedimiento de float es factible conseguir cualquier color, fundiendo en el horno las materias primas convenientes junto con los demás materiales.

1.4.5 ENFRIAMIENTO Y RECOCIDO DEL VIDRIO

Una vez la hoja de vidrio tiene el espesor y dimensión definitivo, pasaran por el proceso de enfriamiento y recocado. Éste proceso es también muy importante, dado que si el enfriamiento es inadecuado, se producirán tensiones mecánicas que en su superficie, que no solo alteraran su homogeneidad física sino que también podrían conllevar la fractura.

1.4.5.1 GENERACIÓN DE TENSIONES

Cuando el vidrio se encuentra en un estado viscoso se puede enfriar a la velocidad que se quiera, pero a partir de la temperatura de reblandecimiento (concretamente dentro del intervalo de relajación), se debe enfriar gradualmente.

Si realizamos un enfriamiento rápido, dado que el vidrio tiene una baja conductividad térmica, no conseguirá la misma temperatura en toda su masa. Las capas exteriores se enfriarán y alcanzarán su rigidez rápidamente mientras que en la masa interior del vidrio todavía estará en estado plástico-viscoso. La superficie rígida tirará de las interiores impidiendo que éstas alcancen al enfriarse el equilibrio dimensional que exige su coeficiente de dilatación.

Las capas interiores estarán sometidas a esfuerzos de compresión mientras en las exteriores nos aparecerán fuerzas de tracción. Una vez el vidrio se enfríe, permanecerán tales esfuerzos en la masa del vidrio.

Estas tensiones solo se podrán eliminar con un nuevo calentamiento del vidrio, por encima de su temperatura superior de recocado, seguido por un lento enfriamiento.

1.4.5.2 EL PROCESO DE ENFRIAMIENTO

La temperatura óptima de relajación varía de unos vidrios a otros con su composición, por eso no podemos determinar un valor concreto.

En la práctica industrial, se somete al vidrio a un proceso de enfriamiento que, en el menor intervalo de tiempo, permita reducir las tensiones a un valor tolerable.

La solución para alcanzar estos valores suele ser exponiendo al vidrio por encima de la temperatura superior de recocado, seguido por un prolongado periodo de enfriamiento o, mantener durante un largo tiempo la temperatura inferior de recocado y enfriar rápidamente. En el primer caso existe el riesgo que, debido a las altas temperaturas, la pieza se deforme. En el segundo, se requiere de un largo periodo de tiempo.

Cada tipo de pieza requerirá de un ciclo de recocado determinado, cuya duración y condiciones térmicas dependerán de las características del vidrio, de su forma y su espesor.

1.4.6 LA MANUFACTURA DEL VIDRIO

Una vez tenemos la plancha de vidrio, ésta tiene que pasar por varios procesos de manufactura con tal de poder ajustarse al máximo para el uso al que está destinado.

Los acabados superficiales (tales como colores, deposición de capas y grabados) se estudiarán en el apartado de vidrios comerciales más importantes.

En éste apartado se enunciarán aquellos procesos de manufactura necesarios para cortar los vidrios a las dimensiones necesarias y los canteados más comunes.

1.4.6.1 *CORTE DEL VIDRIO*

Antes de enumerar las tipologías de cantos más comunes, se debería profundizar en el proceso de corte de la pieza.

Por norma general el corte del vidrio se realiza con maquinaria adecuada, éstas suelen ser las conocidas como “mesas de corte”, hay de muchísimas tipologías y no es nuestro objetivo estudiarlas en profundidad. Por norma general, y en empresas de un volumen de producción medio, éstas vienen con un programa de control numérico y donde se introducen los valores del vidrio deseado. En el caso de vidrios con formas especiales se necesita maquinaria más especializada.

Para realizar el corte de una pieza de pequeñas dimensiones se utiliza una pequeña ruedecita de acero (Ruleta o rulina) con la que se hace una incisión en la superficie del vidrio y se rompe flexionando en los extremos.

Después de efectuar el corte, se deben extremar las precauciones. Los bordes de la pieza de vidrio son elementos muy afilados, por ese motivo se suele pasar al paso siguiente inmediatamente.

1.4.6.2 *MANUFACTURA DE LOS CANTOS*

El tipo de canto del vidrio terminado puede afectar al rendimiento estructural a largo plazo del sistema de acristalamiento; esto es debido a que los bordes externos y las esquinas, tanto externas como internas, suelen tener grandes concentraciones de esfuerzos. Si biselamos o curvamos las esquinas, reduciremos la cantidad de esfuerzos concentrados.

El vidrio presenta una dureza y al mismo tiempo una fragilidad que hace que su manufactura sea especialmente difícil y laboriosa. Las partes que se deben pulir son la arista superior, la inferior y el canto de la pieza. En el Anexo¹⁴ de este documento se pueden ver los tipos de cantos más utilizados actualmente.

¹⁴ B - TIPOS DE CANTOS. Página 139

1.5 EL VIDRIO Y EL MEDIO AMBIENTE

1.5.1 IMPACTO AMBIENTAL

Los hornos que se utilizan para fundir la materia prima del vidrio y obtener el producto final, consumen una cantidad significativa de energía. La capacidad de producción de las distintas empresas que fabrican vidrio varía mucho. Los hornos de crisol (para metal fundido) presentan un rendimiento de 3-8 t/día, mientras que la producción de las cubetas para vidrios planos alcanza capacidades de entre 600 y 1000 t/día.

Las temperaturas de fusión del vidrio oscilan generalmente entre 1200°C y 1500°C, dependiendo en gran parte de la mezcla y del producto a elaborar. La energía necesaria para la fusión de 1 kg de vidrio varía entre 3700 y 6000 kJ¹⁵. A parte del gran consumo energético, la fabricación del vidrio también contamina medioambientalmente en otros ámbitos, a continuación se enumeran los más importantes:

En una fábrica de vidrio se generarán gases residuales a partir de la quema de los combustibles necesarios para proceder a la fundición, esto conllevará la contaminación del **aire**. Los gases de humo contienen, en su gran mayoría residuos de la combustión (dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno) y algunos de los componentes de la mezcla (sustancias alcalinas, cloruros, fluoruros y sulfatos).

Debido a las altas temperaturas y a la evaporación de algunos de los componentes de la mezcla, nos encontraremos con una gran de **partículas de polvo** expandidas a lo largo de los hornos de fundición. La eliminación de estas sustancias se suele hacer por medio de los filtros para polvo. Dentro de las emisiones en forma de polvo más comunes en el proceso de fabricación de vidrio, son especialmente nocivas para salud los siguientes componentes: Plomo, Cadmio, Selenio, Arsenio, Antimonio, Vanadio y Níquel. Aun así, es importante remarcar que la presencia de los elementos anteriormente es mínima, dado que no son elementos que compongan, por norma general, los vidrios comunes.

La **contaminación acústica** a lo largo del proceso de fabricación del vidrio es importante, sobre todo en las fases de fundido, moldeado y enfriamiento de éste.

A lo largo del proceso de fusión del vidrio, pueden obtenerse valores de hasta 110 dB, originados por las elevadas velocidades de aire (ventiladores y compresores). Aunque hay que tener en cuenta que cerca de las cubetas no suelen haber muchos puestos de trabajo, y en las plantas modernas estos están provistos de instalaciones estáticas de protección acústica.

A lo largo del proceso de conformado, los valores máximos suelen rondar los 90 dB, pero esto solo se da en la fabricación de vidrio hueco (Botellas), dado que utilizan máquinas de aire comprimido para moldear las piezas.

Durante el proceso de enfriamiento, el ruido viene dado por los ventiladores y éste se puede atenuar preparando los puestos de trabajo con construcciones provistas de aislamiento acústico.

Las fábricas de vidrio deben construirse alejadas de zonas habitadas, a una distancia mínima de 500 m. La distancia debería ser tal que durante el día los valores acústicos en las viviendas no superaran los 50 dB y durante la noche los 35 dB.

¹⁵ [68] página 136

El consumo de **agua** varía considerablemente en función del tipo de vidrio a fabricar y del método de conformación. Por norma general no es necesario una gran cantidad de agua limpia, en realidad lo más óptimo sería que la planta de fabricación contara con un sistema de recuperación de agua, para poder reutilizarla constantemente.

La mayor demanda de agua en el proceso de fabricación de vidrio se produce en los procesos siguientes:

- ❖ Refrigeración de los grupos diésel utilizados para generar electricidad.
- ❖ Tanques de enfriamiento del vidrio sobrante.
- ❖ Transformación del vidrio (conformado).

A grandes términos, el consumo de agua en una fábrica de vidrio suele ser inferior a 1 m³/t de vidrio producido.

Del 70 al 80%¹⁶ del material transformado en vidrierías son materias primas naturales (arena, feldespato, dolomita, cal). La mayoría de estas materias no son extraídas en las inmediaciones de la fábrica, por lo que también nos afectarán indirectamente la contaminación generada por el transporte de éstas (emisiones de CO₂). Para la fundición de una tonelada de vidrio se necesitan aprox. 1,2 - 1,3 t de materias primas. A la hora de elegir el emplazamiento de una planta de producción de vidrio deben tenerse en cuenta los aspectos ambientales. Además del cumplimiento de las normas legales referentes a los gases residuales, al polvo, al ruido y al agua, deben examinarse las condiciones del suelo, la integración en el paisaje y la infraestructura local.

Mediante la organización de un sistema de reciclaje de vidrio usado se puede reducir, por un lado, la demanda energética de la producción y, por otro, se alivian considerablemente los vertederos de residuos.

1.5.2 EL RECICLAJE DEL VIDRIO

El vidrio industrial puede proceder de fuentes muy distintas. Una vez el vidrio llega a la planta de reciclaje, es clasificado, limpiado y acondicionado por medio de maquinaria de última tecnología. La selección del material y el tratamiento se suele realizar de manera muy rigurosa, haciendo controles de calidad constantes partiendo del análisis de muestras.

1.5.2.1 VIDRIO INDUSTRIAL VS. VIDRIO DOMÉSTICO

El vidrio industrial no se usa para productos alimentarios, si no que se utiliza para el sector de la construcción y la industria automovilística. En cambio, el vidrio doméstico es aquel que se utiliza para almacenar productos alimentarios y otros tipos de contenedores destinados a este fin.

A pesar de que las condiciones de reciclaje de vidrio son muy favorables para el medio ambiente, solo podemos considerar que se recicla, en gran volumen, el vidrio doméstico

El vidrio industrial no siempre es devuelto al ciclo, ya que, a veces, los tratamientos a los que ha sido sometido, invalidan éste proceso (deposición de otros materiales, adhesión de láminas, serigrafías, etc.).

Todo aquel vidrio industrial que no ha estado sometido a estos procesos podría volver al ciclo sin ningún problema.

¹⁶ [70] página 135

1.5.2.2 *BENEFICIOS AMBIENTALES*

Según el profesor F. Blanco ¹⁷ de la universidad de Oviedo, por cada tonelada de envases de vidrio reciclado, ahorra 1200 kg de materias primas y 130 de fuel.

El reciclaje del vidrio comporta los siguientes beneficios ambientales:

- ❖ El reciclaje de vidrio necesita un 26% menos de energía que la producción del original.
- ❖ Disminuye el volumen de residuos municipales.
- ❖ Disminuye la contaminación atmosférica un 20% y en las aguas un 40%.
- ❖ Ahorro de recursos naturales.
- ❖ El coste de reciclaje de vidrio es inferior al de cualquier otro material.

El vidrio es un material que por sus características es fácilmente recuperable. Concretamente, un vidrio es 100% reciclable, es decir, puede fabricarse uno nuevo que puede las mismas características que el primero.

1.5.2.3 *EL PROCESO DE RECICLADO*

El primer paso consiste en limpiar el vidrio. Aunque se encuentre mezclado en distintos colores, no influye para la producción, dado que se trata con decolorante.

Primero se retiran los materiales externos que puedan llevar adheridos los vidrios (siliconas, restos de carpinterías, plásticos, etc.). Una vez limpio de impurezas pasa por un conjunto de tamices y martillos, en los que se va moliendo hasta alcanzar la granulometría necesaria.

Posteriormente pasa por un recipiente especial imantado para retirar los restos de metales férricos que pudieran haber quedado en el primer lavado.

Una vez pasado por los imanes, el vidrio ya se considera casco, que se fundirá con una proporción del 50% de la composición de vidrio.

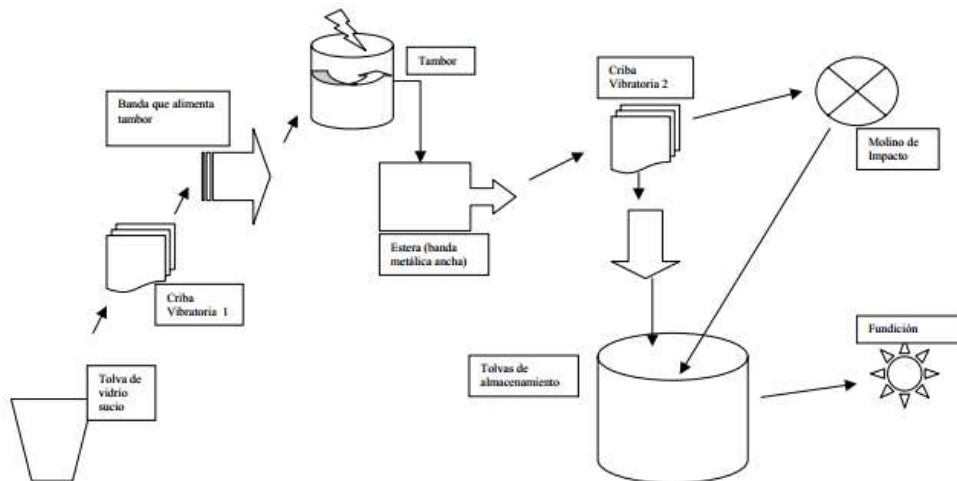


FIG. 34 -

DIAGRAMA DE RECICLAJE DE ENVASES DE VIDRIO. FUENTE: GENESIS.UAG.MX

1.6 VIDRIOS COMERCIALES

Podríamos clasificar el vidrio de muchísimas formas, dado que tal y como hemos visto hasta ahora la tipología de vidrios es muy extensa. Una primera clasificación la encontraríamos en el apartado 1.4, donde se explican los procesos de conformado de los vidrios comerciales más utilizados.

A partir de la plancha de vidrio incolora, se realizan tratamientos a ésta para mejorar sus propiedades, ya sea por motivos estéticos o para mejorar sus propiedades físicas.

A continuación veremos los vidrios resultantes de tratamientos que más se utilizan en la actualidad y, por consiguiente, son los vidrios comerciales más comunes:

1.6.1 VIDRIO LAMINADO

Es probablemente una de las transformaciones que se le realizan al vidrio más comunes, se le conoce también como vidrio laminado de seguridad. La nomenclatura de este conjunto de vidrios puede inducir a la confusión, es importante diferenciar entre los vidrios laminados de seguridad (dos vidrios unidos mediante una lámina de butiral) y vidrios realizados a partir del proceso de fabricación con “rodillos laminadores” que da como resultado un vidrio monolítico (ver 1.2.1.9).

Gracias a la lámina de unión entre las hojas de vidrio, en caso de rotura los fragmentos de vidrio quedan adheridos a la lámina, evitando su desprendimiento y, por lo tanto, disminuyendo el riesgo de lesiones.

La característica más importante de ésta tipología de vidrios es la resistencia a la penetración, ofrece también buenas cualidades ópticas, mejora la atenuación acústica y protege contra la radiación ultravioleta.

Se fabrica mediante la adición de 2 o más hojas de vidrio ensambladas con una lámina de unión entre ellas. Esta lámina de unión puede estar compuesta por uno o más films de material plástico, resina, silicato o gel, siendo el más habitual el butiral de polivinilo (PVB). Las láminas de unión suelen tener diferentes acabados, podemos encontrar láminas incoloras, extra-claras, de color opacas, de color transparente, translúcidas, etc. El abanico de opciones es muy extenso y se suele jugar con diferentes butirales y vidrios para conseguir vidrios especiales.

Las fases de fabricación de un vidrio laminar estándar son las siguientes:

Colocación del butiral. Se coloca el butiral sobre la primera hoja de vidrio y posteriormente se aplica la segunda lámina de vidrio.

Eliminación de las burbujas. Calandrado del vidrio con rodillos a alta temperatura con tal de poder expulsar las burbujas de aire que puedan haber quedado ocluidas en el interior. A su vez, este proceso sirve para asegurar la adherencia entre los dos vidrios y la lámina.

Almacenaje. Colocación del vidrio ya laminado sobre caballetes especiales, bajo presión y a altas temperaturas, para asegurar la adherencia entre las capas.

En el caso anterior solo se ha ejemplificado la unión de dos vidrios, dado que es el más común, pero el proceso de laminación es el mismo para composiciones de más de dos vidrios. En el

anexo¹⁸ de este documento podemos encontrar los usos que pueden tener un vidrio laminado en función de la cantidad de láminas de vidrio que lo formen.

1.6.2 VIDRIO TEMPLADO

El proceso de templar el vidrio se basa en elevar a 620°C la hoja de vidrio para proceder a enfriarlo rápidamente. Este tratamiento térmico genera unas tensiones en el vidrio que le confieren propiedades de alta resistencia al impacto y a posibles roturas térmicas.

El vidrio templado se suele utilizar en aplicaciones en las que el vidrio va a soportar un alto esfuerzo mecánico, un ejemplo serían las puertas de paso o las divisiones horizontales. También se suele utilizar en el caso de vidrios que estén expuestos a grandes cambios de temperatura en su superficie.

Lo que más caracteriza al vidrio templado es su forma de fractura, en caso de fractura éste se parte en pequeños fragmentos que disminuyen los daños que pueden llegar a ocasionar.

En algunas ocasiones, el vidrio templado puede llegar a romperse espontáneamente, esto se debe a las inclusiones de sulfatos de níquel que pueden haber quedado en el interior de la plancha de vidrio. Para prevenirlas, se realiza el “Heat Soak Test”, este test simula las condiciones de temperatura a la que el vidrio rompería espontáneamente. Para más información ver apartado 2.2.

A continuación se enumeran los pasos más importantes en el proceso de templado de un vidrio:

Corte de las piezas. La plancha de vidrio tiene unas dimensiones de fabricación muy grandes, dado que el proceso de templado es irreversible, lo primero que haremos es cortar la pieza según las dimensiones requeridas.

Manufactura. Como se ha comentado anteriormente, el proceso de templado es irreversible. Por ese motivo antes de templar se harán todas las manufacturas previamente, como serían los cantos, los taladros, las muescas, etc.

Limpieza. Cada panel se limpia para asegurar que ninguna impureza altera la superficie del vidrio.

Calentamiento del vidrio. El vidrio se calienta en el horno hasta una temperatura de 620°C, justo por encima del punto de fusión de este material.

Enfriado. El vidrio se enfría bruscamente por medio de unas turbinas de aire que acondicionan el vidrio a temperatura ambiente.

Los vidrios templados presentan un notable aumento de la resistencia mecánica, una mayor resistencia al choque térmico y, por tanto, en general una mayor seguridad al uso.

¹⁸ C - ALGUNAS TIPOLOGÍAS DE VIDRIO LAMINAR. Página 140

1.6.3 VIDRIO TERMO ENDURECIDO

Igual que en el vidrio templado (ver apartado anterior), el proceso al que se somete el vidrio termo endurecido consiste en calentar el vidrio hasta una temperatura próxima a la de reblandecimiento, pero a diferencia del anterior el enfriamiento de este tipo de vidrio es más lento. El proceso de fabricación de un vidrio termo

endurecido es muy similar al del vidrio templado, pero el vidrio resultante no posee el patrón de rotura del vidrio templado, si no que los trozos resultantes de su fractura

tienen un tamaño grande.

Esto es debido a que el proceso de enfriamiento es

mucho más lento, por lo que las tensiones superficiales inducidas son inferiores y, por lo tanto, tiene una resistencia mecánica inferior a la de los vidrios templados. Éste no se considera un vidrio de seguridad.



FIG. 35 - DIFERENCIA ENTRE LOS PATRONES DE RUPTURA DE UN VIDRIO CONVENCIONAL, TERMOENDURECIDO Y TEMPLADO. FUENTE: ITEC

Así se consigue un material con tensiones internas menores, con mayor resistencia térmica y mecánica que la que presenta un vidrio recocido y con un patrón de rotura muy parecido al de los vidrios sin tratamiento térmico. El vidrio termo endurecido no se considera un vidrio de seguridad por el código térmico ni las normas europeas, debido a que al romper este lo hace en grandes fragmentos.

1.6.4 VIDRIO TEMPLADO QUÍMICAMENTE

En este caso la generación de las tensiones adicionales se produce por una modificación superficial de la composición química del vidrio.

Este proceso de templado consiste en sumergir al vidrio en un baño de sales de fusión a una temperatura aproximada de 450°C. Por medio de este proceso se consigue un intercambio iónico: Los iones contenidos en el vidrio (Na⁺), más pequeños, se cambian por los iones contenidos en las sales (K⁺), más grandes. Al tener un mayor volumen los nuevos iones comprimen la capa superficial del vidrio, esto incrementa su resistencia considerablemente.

Este es un tipo de tratamiento térmico que no se suele utilizar, aun así, se ha considerado importante indicar las ventajas/desventajas que presenta este tratamiento frente el proceso de templado convencional.

VENTAJAS:

- ❖ Ausencia de distorsiones ópticas.
- ❖ No hay riesgo de roturas espontáneas.
- ❖ Se pueden templar vidrios de espesores muy inferiores a lo que es normal en el templado convencional (se puede templar hasta 2 mm de espesor).
- ❖ Se puede realizar el mismo proceso simultáneamente con vidrios de distintos colores, formas y grosores.
- ❖ Se puede retocar (cortes, pulidos, etc.) después del proceso.

INCONVENIENTES:

- ❖ Contrariamente a lo que ocurre con el vidrio templado, este se rompe en grandes fragmentos, que pueden resultar peligrosos.

1.6.5 VIDRIO TEMPLADO Y LAMINADO

Es la unión del vidrio templado térmicamente y el proceso de laminar dos vidrios por medio de una lámina de butiral. Primero se hace la manufactura a los vidrios (taladros y cortes) y se templan, posteriormente se laminan entre ellos.

Esta combinación nos aporta lo mejor de los dos procesos, el vidrio tiene mayor resistencia mecánica, mayor seguridad, y es la manera más recomendable de hacer manufacturas en un vidrio laminado.

Este tipo de tratamiento combinado ofrece más resistencia mecánica y, por lo tanto, resulta más seguro.

1.6.6 VIDRIO COLOREADO EN MASA

Es un vidrio al cual durante el proceso de fabricación, se le han añadido óxidos metálicos para oscurecerlos. El vidrio coloreado se utiliza fundamentalmente como luna de protección solar. Debido a su gran absorción de energía solar es necesario su templado para evitar la rotura por choque térmico.

1.6.7 VIDRIO CAPA

Los vidrios de capa (también popularmente conocidos como vidrios reflectantes) parten como base el vidrio flotado estudiado anteriormente, pero en este caso se le aplica una capa de deposiciones metálicas para modificar sus propiedades físicas. Existen dos tipos de sistemas:



FIG. 36 - PROCESO DE FABRICACIÓN DE UN VIDRIO PIROLÍTICO. FUENTE: GRUPO CORBALÁN

El **sistema pirolítico** se basa en revestir al vidrio por una cara con una capa de óxidos metálicos, depositados per medio de pirolisis a la salida del horno de flotado y mientras el vidrio está todavía en caliente.

Son capas “Duras” que no requieren ningún tipo de trabajo posterior, su superficie no se araña y no le afecta la humedad. Lo encontramos tanto en vidrios monolíticos como en dobles acristalamiento.

Por otro lado, el **sistema magnetrónico** se basa en la deposición sobre un vidrio flotado varias capas de diferentes metales extraordinariamente finas mediante pulverización catódica al vacío.

Esta es la técnica que consigue, por ejemplo, para que los vidrios sean semi-reflectantes, consiste en la aplicación por deposición de una delgada película de silicio sobre la superficie superior del vidrio mientras ésta está al vacío. Ésta lámina se consigue aplicando en la atmósfera de la cámara gas silano, a un caudal y concentración adecuado, así el gas se descompone formando el recubrimiento sobre el vidrio.

A parte de diferenciar los dos sistemas de fabricación del vidrio de capa, también podríamos diferenciar dos usos distintos de los vidrios reflectantes.

Por un lado encontramos los de **control solar**, estos Impiden el paso del calor radiante del sol, reflejando las radiaciones de longitud de onda corta (sol). Las ondas son dirigidas hacia el exterior de la vivienda. Suelen estar fabricados con vidrio monolítico coloreado en masa.

Éste tipo de vidrio absorbe un porcentaje importante de luz visible, debido a que en su superficie tiene un efecto espejo y, a su vez, la masa del vidrio suele ser de color.



FIG. 37 - VIDRIO REFLECTIVO Y BAJO EMISIVO. FUENTE: MANUAL DEL VIDRIO PLANO.

De vidrios de control solar, encontraremos dos casos distintos, en

función de la situación en la que se encuentren las deposiciones metálicas.

En el primer caso, primera imagen, encontramos las deposiciones metálicas en la cara #1, este tipo de vidrios tienen un aspecto plateado brillante y su color aparente depende del entorno y/o del cielo reflejado en su superficie.

Por otro lado, segunda imagen, encontramos los vidrios con la capa situada en la cara #2, en los que se evidencia el color del vidrio base y su aspecto reflexivo es menos intenso y brillante.

Éste tipo de vidrios presentan un efecto espejo que impiden la visión hacia el lado menos iluminado. De día no es posible ver desde el exterior hacia el interior y durante la noche no es posible ver hacia el exterior (en locales iluminados interiormente).

Por otro lado tenemos los de **baja emisividad (low-e)**, estos impiden la salida del calor radiante de los cuerpos calientes del interior de las viviendas (radiaciones de onda larga). Las ondas son reflejadas hacia el interior de la vivienda. Son prácticamente transparentes, por ese motivo no se ve afectada la transmisión de luz visible a través de éstos.

En la tercera imagen, vemos cómo funciona éste sistema, en el que el calor radiante de los cuerpos calientes se refleja hacia el interior.

En la tabla siguiente vemos los diferentes comportamientos de los vidrios, en relación a la reflexión, la absorción y la transmisión. Fuente: Acondicionamiento climático de edificios.

Los vidrios coloreados absorben mucha más energía que los vidrios incoloros (esto es debido a los

Tipo de Vidrio	Reflexión	Absorción	Transmisión
Incoloro	7%	15%	78%
Color	5%	46%	49%
Reflectivo (#1)	30%	39%	31%
Reflectivo (#2)	12%	57%	31%

pigmentos contiene éste en su masa), por este motivo, éste tipo de vidrios son mucho más susceptibles a sufrir stress térmico que no en el caso de los vidrios transparentes.

Se deberán tener en cuenta los vidrios coloreados y los vidrios reflectivos en los que su capa este situada en la posición #2). El proceso de templado o termo endurecido otorgará una resistencia adicional al vidrio que lo hará capaz de soportar las tensiones originadas por stress térmico.

La colocación de la lámina de control solar es un factor de incremento del riesgo de aparición de stress térmico. Éste tipo de láminas se suele ubicar en la cara #2, al reflejar hacia la cara exterior los rayos solares, hacen que éstos atraviesen dos veces la masa del vidrio, contribuyendo a aumentar las tensiones.

En el caso de un vidrio cámara, debemos tener en cuenta el incremento de temperatura que se produce en el interior de la cámara de aire, lo que significa una causa adicional de stress térmico.

El estado de los bordes del vidrio también será un factor importante a tener presente. La fractura térmica, por norma general, se produce por la acción de una tensión de tracción en el borde de la pieza de vidrio. La posibilidad de que ocurra rotura, depende de la presencia y del tamaño de imperfecciones en los bordes, a través de las cuales se liberarán las tensiones acumuladas.

Estos tipos de vidrios brindan la posibilidad de tener un gran control sobre la transmisión de luz y de energía, y al mismo tiempo consiguen nuevos aspectos estéticos.

1.6.8 VIDRIO LACADO

Es un vidrio al que se le aplica una capa de pintura (pintura al horno) en una de sus caras para conseguir vidrios opacos de color. Como es evidente, la cara posterior (pintura) no puede estar en contacto directo con el ambiente, dado que podría recibir ralladas que dañaran su acabado.

Debido a su opacidad, estos vidrios se suelen utilizar para aplacar superficies ciegas (paramentos verticales, antepechos, muebles), en el caso de que el vidrio nos haga de divisoria y se esté en contacto directo al usuario por ambas caras, este vidrio se debe laminar, quedando la pintura en el interior.

Hay casas comerciales que distribuyen vidrios lacados con RAL específicos, muchos fabricantes también dan la opción al cliente de lacar el vidrio con el RAL que deseen, aunque esta segunda opción suele ser más cara.

1.6.9 VIDRIO SATINADO

El vidrio satinado es aquel que deja pasar la luz a través de él, pero no deja ver el paso de la imagen con plena nitidez. Es decir, es translúcido, no incoloro.

La variedad de diseños que se pueden lograr con el vidrio satinado es muy extensa, no tan solo se puede conseguir que una lámina entera de vidrio sea satinada, si no que podemos hacer dibujos geométricos simples y, incluso, grabados elaborados.

Hay diferentes procesos para conseguir que un vidrio sea satinado (o mate) a continuación enumeramos los métodos más utilizados:

1.6.9.1 GRABADO AL ÁCIDO

Este proceso se utiliza tanto para matear toda una pieza de vidrio como para grabar dibujos o diseños sobre la pieza de vidrio, consiguiendo que en algunas partes el vidrio sea incoloro y en otras mate. Históricamente, el proceso de grabado al ácido se ha realizado con ácido fluorhídrico (combinación entre hidrógeno y flúor). Este material es muy corrosivo y peligroso, ya sea al entrar en contacto físicamente o por inhalación de sus gases.

Una de las características del vidrio es su elevada resistencia química, pero a pesar de sus buenas cualidades, en un medio el ácido no es inerte al ataque.

La reacción con ácido fluorhídrico aparece al eliminar parte de la sílice de la superficie de la plancha de vidrio de la matriz de óxido. Lo que caracteriza más objetivamente un vidrio grabado al ácido es la pérdida de transparencia y el mateado resultante. Para asegurar que el grabado se realiza únicamente donde se desea, se colocan sustancias no reactivas donde no se quiere el grabado (suelen ser ceras o vinilos).

La sal ácida bifloruro de amonio ha sido utilizada para grabar como sustancia más segura. Éste compuesto está acompañado por ingredientes inertes que, aunque su efecto no es tan fuerte como con el ácido fluorhídrico puro, también puede causar daños importantes.



FIG. 38 - EJEMPLO DE GRABADO AL ÁCIDO. FUENTE: CROCETEX.

1.6.9.2 GRABADO AL CHORRO DE ARENA

Igual que en el caso anterior, este proceso se utiliza tanto para matear toda una pieza de vidrio como para hacer un diseño específico.



FIG. 39 - GRABADO UNIFORME AL CHORRO DE ARENA. HOSPITAL DE FRANKFURT. DISEÑO DE HEINER BLUM

Estéticamente, la diferencia principal está en que el resultante de éste proceso es más blanquecino que el anterior y que al pasar la mano por su superficie éste es algo más rugoso. Para realizar el grabado con chorro de arena, se utiliza un compresor de aire y arena. El proceso es muy simple, básicamente se lanzan los granos de arena a gran velocidad contra el vidrio. Para proteger las partes de vidrio que no se quieren matear, estas se cubren con papel adhesivo (o vinilo) de espesor 0.1 mm, donde previamente se han marcado los patrones del diseño a realizar.

Hay la opción de que el mateado sea más profundo o menos, en función del tiempo de exposición al chorro que se deje la plancha de vidrio. Como es evidente, a mayor exposición más blanquecino será el grabado y menos transparente será la pieza de vidrio.

1.6.9.3 OTROS SISTEMAS PARA VIDRIO SATINADO

Dentro de los más convencionales, existen otros métodos menos abrasivos para conseguir que estéticamente un vidrio sea translúcido. Uno de los más utilizados es por medio de un vidrio laminado, compuesto por dos o más vidrios y en el que se incorpora un butiral mate en la parte central. Estéticamente es muy parecido a los anteriores (aunque no da posibilidad a diseños demasiado elaborados) y las dos superficies de los vidrios son totalmente lisas, ninguna de ellas es rugosa como en los casos anteriores.

Otro método también muy utilizado es la adhesión a la superficie del vidrio de un vinilo mate. No es un proceso permanente, si no que este tiene la ventaja de que puede desprenderse cuando el usuario lo desee quedando un vidrio totalmente incoloro. A su vez acepta diseños elaborados que en el caso del butiral. Como inconveniente diríamos que, al ser una lámina adherida, el uso diario y el paso del tiempo pueden ocasionar desprendimientos de la lámina de vinilo.

1.6.10 ESPEJO

El proceso de fabricación de espejos se compone de una serie de pasos o fases que se realizan en una máquina especial, a continuación se detalla el proceso de fabricación de la empresa Bovone.

Lavado y pulido del vidrio. El proceso de fabricación se inicia a partir de una rigurosa limpieza del vidrio. Esto no solo evita posibles defectos producto de impurezas, sino que permite una mayor adherencia.

Sensibilización de la superficie del vidrio: Aplicación cloruro de estaño. El proceso continua con la aplicación de un baño de cloruro de estaño sobre la superficie de la lámina con el propósito de aumentar la porosidad y de esta manera aumentar su capacidad de adherencia.

Lavado con agua desmineralizada. De nuevo la lámina será meticulosamente lavada a fin de eliminar de ella cualquier residuo de cloruro de estaño y/o impurezas, cualquier impureza puede producir defectos en el producto terminado.

Depósito de plata. En este punto del proceso se procede a depositar sobre la superficie de la lámina, una película de plata que es la que cumple la función refractaría o de espejo.

Lavado con agua desmineralizada. De nuevo la lámina será meticulosamente lavada a fin de eliminar de ella cualquier residuo o impurezas que se le puedan haber adherido.

Protección de la plata con película de Cobre. Para lograr una mayor calidad en el espejo a la capa de plata que se ha puesto sobre la lámina se le rociara encima una película de cobre que la protegerá y le ayudara con el sellado y a evitar transparencia.

Lavado con agua desmineralizada. De nuevo la lámina será meticulosamente lavada a fin de eliminar de ella cualquier residuo o impurezas que se le puedan haber adherido.

Secado de aire. Una vez aplicados la plata y el cobre la lámina será cubierta con una capa de pintura que ayuda a sellar por completo la transparencia, permitiendo que el espejo trabaje aún mejor. Para lograr una adherencia óptima de la pintura la superficie sobre la que se aplicará debe estar perfectamente limpia y seca, por lo que la lámina es pasada por una cortina de aire que eliminara cualquier residuo.

Pre calentamiento. Una vez que la lámina ha sido secada por completo, esta se someterá a un proceso de pre calentamiento con la finalidad de optimizar la adherencia de la pintura. Este proceso de pre calentamiento no solo mejorara la capacidad de adherencia de la pintura, sino que ayudará a eliminar rastros de humedad que puedan haber quedado después del secado con aire.

Pintado. La lámina recibe una última capa de pintura que cumple con dos finalidades principales: sellado y protección.

Horneado. Una vez que la lámina ha sido pintada pasará a un horno especial que es el que se encarga de darle el toque final a la pintura, sometiéndola a una temperatura que le da su

punto óptimo de adherencia.

Limpieza final. En este paso la lámina pasa por un último lavado para posteriormente ser revisada y de no presentar ningún defecto.

Control de calidad. El control de calidad se realiza de dos formas, una en manos de personal calificado que se encarga de revisar posibles defectos visibles en la superficie del espejo, la otra es en cuanto a la calidad de los materiales, adherencias, resistencias, etc. y para esto se cuenta con un laboratorio especializado en el que se realizan estas pruebas.

1.6.11 VIDRIO CÁMARA (DOBLE ACRISTALAMIENTO)

El vidrio cámara se basa en un conjunto formado por dos o más lunas, separadas entre sí por una cámara de aire o algún otro gas deshidratado. Entre la separación de las lunas se incorpora un perfil de aluminio en cuyo interior se incorpora el producto deshidratante.

Hay diversas composiciones, pueden ser dos vidrios simples o estar formado por vidrios laminados. A más grosor de vidrio más confort acústico se conseguirá en la estancia.

El conjunto de vidrios y cámara presenta un bajo coeficiente de transmisión y es totalmente estanco, dado que en su perímetro lleva un sellado que actúa como barrera contra la humedad.

Se suele utilizar para aislar térmicamente, dado que tiene muy buenos resultados ante pérdidas de calor en comparación con los demás vidrios. Una de sus características es que la superficie de la parte interior del vidrio se mantiene a la misma temperatura que la de la estancia, esto aporta confort al usuario y disminuye el riesgo de condensaciones.



FIG. 40 - SECCIÓN DE UN VIDRIO CÁMARA.
FUENTE: GRATOL

1.6.12 VIDRIO CÁMARA TPS

Es un doble acristalamiento de nueva tecnología que mejora las prestaciones del doble acristalamiento convencional, reemplazando el perfil de aluminio separador por un perfil de material termoplástico (TPS), el único que permite actualmente realizar el relleno de la cámara deshidratada con gases de alto peso molecular en combinación con sellados mediante silicona estructural.

La formulación del TPS está basada en la combinación de poli-isobutileno, desecantes e inhibidores de ultravioleta.

Como gran ventaja añadida se puede destacar que elimina el puente térmico al sustituir el separador metálico. El plástico TPS permite una mayor retención de los gases pesados y el sistema se caracteriza por una distribución más uniforme de la temperatura en toda la superficie de la ventana. Asimismo, mejora el aislamiento acústico y el material es completamente reciclable.

1.6.13 VIDRIO CURVADO

El vidrio curvado se obtiene mediante el calentamiento del vidrio plano hasta su punto de plasticidad, alcanzando una temperatura de reblandecimiento próxima a los 600° C, dándole la forma deseada mediante moldes.

La metodología de conformado más utilizada consiste en colocar el vidrio plano horizontalmente sobre el molde. En cuanto éste alcance su plasticidad, por su peso propio se ajustará a la forma del molde. El proceso finaliza realizando un enfriamiento lento del vidrio, a fin de evitar las tensiones internas de las que se ha hablado en el apartado del vidrio templado.

A: ALTURA Distancia entre los dos extremos del canto recto.
C: CUERDA Segmento de recta que une los extremos del arco (distancia entre los dos cantos rectos).
D: DESARROLLO Longitud que comprende los segmentos curvos y los, eventualmente, rectos.

F: FLECHA Parte del diámetro perpendicular a una cuerda, comprendida entre ésta y la circunferencia.
E: ESPESOR Distancia entre ambas caras del vidrio.
R: RADIO Recta que une el centro de un círculo con cualquiera de los puntos de su circunferencia.

α : **ÁNGULO** Mayor o menor abertura que forman entre sí dos líneas o planos que se cortan

Todos estos datos pueden ir referidos a la parte interior o exterior del vidrio, según convenga.

Fórmulas

$$C = 2 \div F(2R - F)$$

$$R = (C^2 + 4F^2) / 8F$$

$$F = R - 1/2 \div 4R^2 - C^2$$

$$D = 0,01745 Ra$$

$$\alpha = 57,296 D/R$$

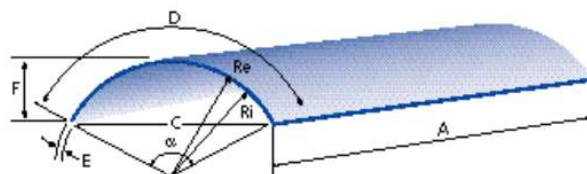


FIG. 41 - TERMINOLOGÍA BÁSICA DEL VIDRIO CURVADO. FUENTE: CRICURSA

mayoría de los vidrios que se han enumerado en apartados anteriores se pueden curvar; Un vidrio curvo puede ser suministrado como vidrio monolítico, templado, laminado (con dos o más hojas), en unidades de doble acristalamiento, con vidrios de control solar, serigrafados... y toda una larga lista de posibilidades. El único de ellos que puede conllevar algún que otro inconveniente son los vidrios capa, dado que tan solo se pueden curvar aquellos que tienen una capa pirolítica.

Las dimensiones son variables en función de los parámetros: radio, flechas, espesor, arco, formas... Hoy, prácticamente, se pueden conseguir todas las formas posibles de curvatura, incluso de dobles curvaturas (sobre dos ejes distintos). Como mayor es la superficie del vidrio mayor es también su espesor; en cambio, como más cerrada sea la curva, menor espesor tendremos.

Por norma general, a ser posible, el vidrio curvado debe instalarse siempre por la parte exterior del galce, de ésta manera se evitan roturas que podrían derivar de los esfuerzos debidos a los diferentes coeficientes de dilatación del vidrio y los materiales que lo enmarcan.

1.6.14 VIDRIO MOLDEADO

Al vidrio moldeado también se conoce como pavés (marca comercial), bloques de vidrio o ladrillos de vidrio.

Éstos consisten en piezas de vidrio translúcido, macizas o huecas, que se obtienen por el prensado de una masa fundida de vidrio en unos moldes especiales de los que toman su forma.

Su gran utilidad son las divisiones verticales y los suelos de vidrio transitables, sobre todo en espacios donde hay poca luz. Estos bloques son bastante resistentes y aptos para emplearlos en estructuras



FIG. 42 - EJEMPLO DE VIDRIO MOLDEADO DOBLE. FUENTE: LEROY MERLIN

verticales, no obstante, hay que tener en cuenta que las paredes construidas con este material no pueden soportar cargas estructurales.

Podríamos definir dos tipos de vidrio moldeado, el doble y el simple. Tal y como su nombre indica, en el caso de los bloques de vidrio doble son aquellos formados por dos elementos independientes que, soldados entre sí en el proceso de fabricación, originan una sola pieza, con una cámara de aire a baja presión. Estos suelen ser los más comunes.

Los tabiques no podrán ser en ninguna de sus dimensiones superiores a 5 m ni exceder 20 m² de superficie. En el caso de excederse de estas dimensiones deberán fraccionarse en varios paneles, introduciendo entre ellos juntas de dilatación y estanquidad.

A su vez, con tal de proceder a su colocación, estos se adherirán entre ellos con nervios de mortero, manteniendo juntas entre piezas mínimo de 1 cm y entre las piezas perimetrales 3.5 cm.



FIG. 43 - UN EJEMPLO DE APLICACIÓN DE MOLDEADO DOBLE. EN ESTE CASO SE HAN REALIZADO UNOS PARAMENTOS VERTICALES CURVADOS. FUENTE: CARPIN TECNIC

Los acabados de los bloques de vidrio son prácticamente ilimitados, dado que tienen una amplia variedad de acabados, colores, diseños, peso, tamaño y textura. A su vez, dada su gran cantidad de dimensiones disponibles, dan la oportunidad de crear paramentos verticales curvados sin la necesidad de utilizar vidrios especiales.

Tal y como comentábamos anteriormente, también existe el moldeado sencillo (Sin cámara y de una sola pieza, sin soldado).

1.6.15 VIDRIO IMPRESO

Se conoce como vidrio impreso aquél que en una de sus caras tiene un dibujo grabado.

Su proceso de fabricación consiste en que la masa del vidrio fundido se lamina obteniendo un vidrio plano por una de sus caras y la otra un dibujo grabado que estará marcado con relieve en un rodillo.

Su espesor suele ir de 4 a 6 mm de grosor. Ésta tipología de vidrios se suele transformar en vidrios templados y laminados de seguridad con tal de cumplir con la normativa vigente.

El vidrio impreso también puede incorporar una malla de alambre en su interior, en ese caso se considera vidrio armado y se estudia en el siguiente apartado.

1.6.16 VIDRIO ARMADO

Se conoce como vidrio armado aquel que se obtiene por el proceso de colado y que tiene integrado en su interior una retícula metálica soldada. En el caso de que el vidrio se rompa, los trozos de éste quedan adheridos al alambre evitando su caída, es por eso que se le conocen como vidrios de seguridad.

No se trata de un vidrio que proteja contra la entrada forzada ni, lejos de lo que se cree erróneamente, es un vidrio que tenga mayor resistencia al impacto por tener la malla metálica incorporada. Simplemente nos ayuda a que los fragmentos de vidrio no se esparzan.

Se desaconseja utilizar el vidrio armado en zonas donde éste esté expuesto a temperaturas extremos; esto es debido a que la diferencia de comportamiento ante el calor o el frío de los dos materiales (vidrio y metal) dan lugar a tensiones provocadas por la dilatación de ambos materiales que suelen derivar en la ruptura del vidrio.

Ésta tipología de vidrio se empezó a fabricar en 1886 por el alemán August F. Siemens.

1.7 SISTEMAS DE FACHADA

Según la norma europea EN 13830¹⁹, podemos definir la fachada acristalada como retícula de elementos constructivos verticales y horizontales, conectados conjuntamente, y anclados en la estructura del edificio, lista para ser rellenada finalmente con paneles ligeros de cerramiento, hasta formar así una superficie continua y ligera que delimita completamente el espacio interior respecto del exterior del edificio.

Esta fachada aporta, por sí misma o conjuntamente con algún elemento de la estructura del edificio, todas las funciones normales que corresponden a un muro exterior, pero no asume ninguna de las características de soporte de cargas de la estructura principal del edificio”.

1.7.1 MURO CORTINA

Un muro cortina es un sistema de entramado (montantes y travesaños) que comportan un conjunto de vidrio. Éste sistema queda colgado de la estructura sin tener capacidad portante. Está diseñado para resistir la fuerza del viento, así como su propio peso, y transmitirla a los forjados.

Los muros cortina están típicamente diseñados con perfiles de aluminio extruido, aunque los primeros muros cortina fueron hechos en acero.

La utilización de vidrio en este sistema de cerramiento de fachada nos provoca un inconveniente, y es que se tienen que prever sistemas conformados por vidrios que garanticen un confort térmico y visual.

Para utilizar esta tipología de fachada se requiere de un planteamiento exhaustivo para tener la modularidad controlada que encaje con los espacios de fachada.

Por lo que al proceso constructivo de éste tipo de fachada se refiere, Inicialmente se instalará la estructura portante y posteriormente se instalan los vidrios, sellándolos a la estructura portante.

Como inconvenientes, podríamos decir que el muro cortina tiene menos capacidades aislantes, dada la elevada transmitancia de los elementos (como es el caso del vidrio) y el elevado riesgo de sobrecalentamiento por incidencia solar directa).

En el momento de proyectar ésta tipología de envolvente de fachada, se debe estudiar muy bien el clima del emplazamiento, para así poder determinar un vidrio con características adecuadas y garantizar la comodidad térmica en el interior.

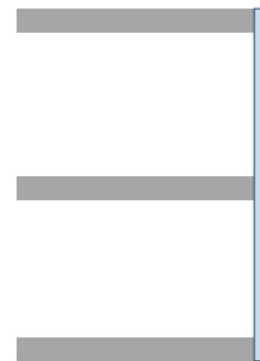


FIG. 44 - MURO CORTINA.
FUENTE: GLASSTECH

¹⁹ [52] página 135

1.7.2 FACHADA ENTRE FORJADOS

Sistema similar al anterior, aunque en este caso no ocupa enteramente la fachada, si no que en este caso el cerramiento se sitúa entre forjados. Como ventaja podríamos determinar que permite una rápida instalación y una fabricación en serie de todas las piezas.

El sistema, se instala entre forjados, normalmente en módulos con la estructura de aluminio y el vidrio previamente unidos. Se puede prescindir de la aplicación de cortafuegos entre forjados, porque no hay contacto directo entre los pisos (por fachada).

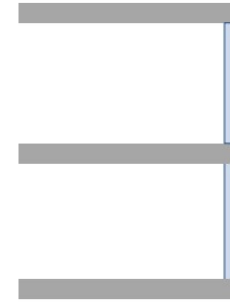


FIG. 45 - ENTRE FORJADOS. FUENTE: GLASSTECH

Este sistema se suele aplicar a edificios de gran envergadura, dado que la posibilidad de fabricar en serie las piezas agiliza la instalación y la puesta en obra. El sistema modular permite que ante cualquier carga externa cada elemento trabaje independiente del otro.

1.7.3 SISTEMA SPIDER

Sistema en donde el soporte es provisto por conectores de estabilización como tensores, costillas de vidrio o pilares de acero, que se ubican adosados a la superficie de vidrio mediante herrajes estructurales llamados arañas, este sistema se conoce también como vidrio estructural abotonado.

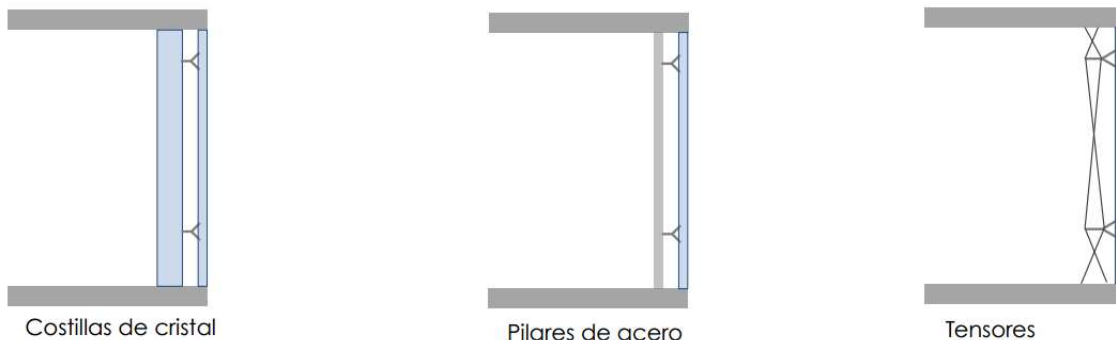


FIG. 46 - TIPOS DE SISTEMAS SPIDER. FUENTE: GLASSTECH

La ventaja que nos aporta éste sistema frente a los dos anteriores es que podemos tratar al vidrio como si fuera auto portante, es decir, sin la concurrencia necesaria de un sistema auxiliar de perfilaría que lo enmarque y le otorgue rigidez. Otras ventajas que nos aporta son:

- ❖ Garantizar el buen sellado de los vidrios, puesto que las condiciones de estanqueidad al aire y al agua se garantizan en los encuentros a testa de los perímetros de cada vidrio, aristas donde se aplican los materiales de sellado.
- ❖ Otorgar al conjunto un monolitismo, que permita que las acciones locales sobre un vidrio se repartan lo mejor posible entre los adyacentes. Para ello se utilizan unas piezas de anclaje articuladas, denominadas arañas por su forma recurrente, que unen entre sí cuatro lunas de vidrio por sus extremos.

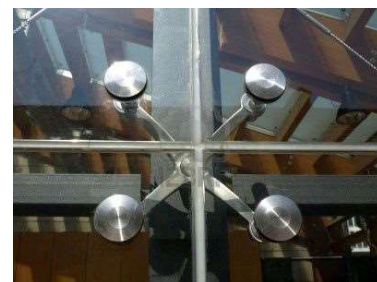


FIG. 47 - SISTEMA DE SUJECIÓN TIPO ARAÑA (O SPIDER). FUENTE: VITRALBA

- ❖ Transmitir las acciones mecánicas incidentes sobre la lámina de vidrio a las arañas y de éstas a una estructura posterior convencional, la cual permanece a menudo oculta a la primera mirada del observador, que otorga al conjunto la rigidez necesaria.

1.7.4 FACHADAS VENTILADAS

Ésta tipología de sistema tiene la finalidad de constituir una fachada de cámara ventilada, renovando el aspecto de un edificio sin renunciar a la visión de su aspecto original.

El sistema de fachadas ventiladas ligeras está formado por dos muros cortina o bien un muro cortina en el exterior y otro tipo de cerramiento en el interior. La fachada ventilada proporciona al mismo tiempo una mayor protección a la intemperie y una mejora del confort térmico interior, gracias a la cámara de aire que queda entre los dos muros.

Cuando se ventila el aire de dicha cámara se reduce la cantidad de energía térmica que llega al interior del edificio.

El sistema es muy versátil puesto que permite efectuar diferentes tipos de ventilación, y utilizar diversos tipos de materiales en la fachada interior, manteniendo siempre la parte exterior con un aspecto independiente.

Algunas de las ventajas que presenta la utilización de éste sistema sería el control de temperatura del edificio, Modernizar la fachada, proteger la piel interior del edificio de agentes externos, y la posibilidad de hacer fachadas decorativas con cristal templado impreso.

La ventilación de este tipo de fachadas se efectúa por convección natural o forzada.

La convección natural se produce por “efecto chimenea” a causa del calentamiento del aire de la cámara, evacuando así, parte de la energía absorbida por los vidrios de la hoja exterior.

La ventilación forzada hace referencia a que se actúa voluntariamente sobre la velocidad de convección del aire dentro de la cámara, controlando al mismo tiempo el flujo de aire que entra y que sale de la cámara.

A menudo se instala dentro de la cámara de aire ventilada una persiana u otro elemento de protección solar, que permita variar sensiblemente el factor solar, la transmisión luminosa, la temperatura superficial y el coeficiente de transmisión térmica a voluntad, sin tener que variar el vidrio exterior.

La parte interior de la fachada ventilada debe estar constituida por materiales térmicamente aislantes y materiales acústicamente absorbentes. En el caso de fachadas ventiladas doblemente vidriadas es conveniente también colocar cortinas de protección en el interior de la cámara para reducir el máximo posible la cantidad de energía solar incidente en la segunda fachada.

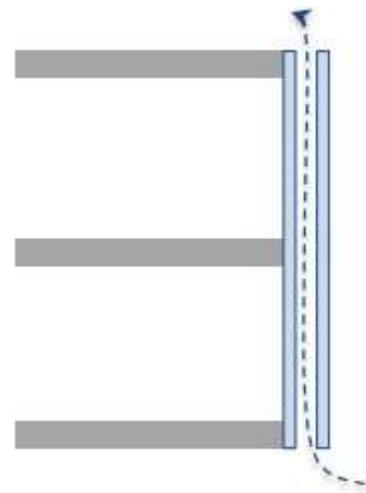


FIG. 48 - FACHADA VENTILADA. FUENTE: GLASSTECH.

1.8 PROPIEDADES DEL VIDRIO

El problema básico con el que nos encontramos al analizar las características de los vidrios es que éstos no tienen ninguna composición ni estructura única, por ello sus propiedades varían mucho de un tipo de vidrio a otro. Las propiedades que se enumerarán a continuación son datos teóricos, dado que las características del vidrio dependen muchísimo del estado de la superficie.

La presencia de imperfecciones, ya se trate de átomos diferentes (impurezas) o irregularidades en la red cristalina (defectos) harán variar las propiedades del vidrio a nivel macroscópico: Resistencia mecánica, resistencia al agua, a los ácidos...

1.8.1 VISCOSIDAD

La viscosidad es una propiedad que, igual que la anterior, influye mucho en el proceso de fabricación del vidrio, sobre todo cuando éste proceso es automático. Los valores de viscosidad dependen de la temperatura, de la composición y la historia térmica del vidrio. La viscosidad del vidrio en estado fundido es de alrededor 100 Pa, y en estado rígido (temperatura ambiente) 10^{17} Pa.

Algunos expertos consideran a los vidrios como líquidos con viscosidades muy altas a bajas temperaturas, tanto que se comportaban como sólidos. Otros, en cambio, opinan que no tiene sentido hablar de fluidez del vidrio (que es la inversa a viscosidad) en temperaturas inferiores a 400 o 500 °C.

La viscosidad a 0°C del hielo y el acero es 10^{14} Pa, por lo tanto vemos que es erróneo considerar un vidrio como líquido, dado que los valores de éste a temperatura ambiente son mucho mayores. Su estructura es similar a un líquido, pero solo se comporta como tal a partir de los 500-600°C.

1.8.1.1 VISCOSIDAD Y LA TEMPERATURA

Fases por las que pasa la viscosidad de un vidrio:

500-600°C, Intervalo de transformación: A partir de éste punto deja de ser un sólido y pasa gradualmente al estado líquido.

600-700°C, El material se deforma por su propio peso y empieza a presentar propiedades plásticas. Si aumenta la temperatura sigue bajando la viscosidad pero no tan rápidamente.

700-900°C, Se puede conformar por soplado o prensado.

1000-1200°C, Puede colarse y estirarse.

1500-1400°C, Temperatura máxima a la que se somete el vidrio, la viscosidad es tan baja como para eliminar todas las burbujas que han aparecido a partir de los procesos químicos de la fusión.

Si el proceso es a la inversa, es decir, enfriamos el vidrio rápidamente, éste pasará también por las fases anteriormente citadas.

1.8.1.2 LA VISCOSIDAD EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN

En la etapa de fusión la viscosidad debe ser lo suficientemente baja para permitir que rápidamente se produzcan las reacciones químicas, el desprendimiento de burbujas y la homogeneización de la

masa. En los casos que necesitamos más homogeneidad (vidrios ópticos) en este momento de viscosidad baja es cuando se agita la masa.

A la salida de la cuba la temperatura desciende hasta 1200-800°C (según el proceso de fabricación), es probable que en algún momento del conformado se tenga que volver a aumentar la temperatura puntualmente.

Al salir de la etapa de conformado el vidrio ya tiene la forma definitiva, pero tiene **tensiones internas**, éstas hacen que el vidrio sea muy débil mecánicamente y tenga una alta probabilidad de rotura.

El enfriamiento del vidrio monolítico (conocido como recocido) consiste, una vez el vidrio ya tiene su forma definitiva, en disminuir la temperatura del vidrio gradualmente. Si lo enfriamos con la suficiente lentitud, conseguimos que el vidrio pase de estar de un estado plástico a rígido, consiguiendo que su estructura sea lo más uniforme posible.

Debemos ser extremadamente delicados a lo largo del proceso de recocido del vidrio óptico (también conocido como extra claro). Esto se debe a que, debido a las tensiones residuales, hay diferencias en el índice de refracción entre distintos puntos de la lámina de vidrio. Aunque se mantenga la pieza homogénea, el índice de refracción puede variar con la velocidad de enfriamiento.

1.8.2 TENSION SUPERFICIAL

Esta propiedad desempeña un papel fundamental durante la conformación del vidrio. Durante el proceso de moldeado el vidrio, este adquiere unos valores de tensión superficial relativamente elevados.

Estos valores elevados nos son favorables para algunos procesos de fabricación, como es el caso del estirado en forma de tubo (o varilla), el redondeado de cantos, aristas, etc.

Sin embargo, en otros procesos, como es el caso del estirado del vidrio plano, las grandes magnitudes que adquiere la tensión superficial son adversas, ésta tiende a producir una contracción transversal sobre de la hoja de vidrio. Por este motivo se enfría rápidamente la hoja de vidrio por sus bordes al emerger del vidrio fundido.

1.8.3 DENSIDAD

La densidad del vidrio, igual que en todos los cuerpos, disminuye en aumentar la temperatura. Ello se debe a que, mientras la masa está constante, al incrementar la temperatura, su volumen aumenta por dilatación. En el intervalo de transformación, la curva densidad/temperatura sufre un cambio brusco y su pendiente se acentúa, de manera que la densidad del vidrio fundido es menor que en estado sólido. La densidad del vidrio común es de 2.5, lo cual representa una masa de 2,5 kg/dm³ de espesor en el vidrio plano.

Los tratamientos también afectan a la densidad. Si la velocidad de enfriamiento desde el estado líquido es muy rápida, la estructura del vidrio se “congela” en la que tenía a alta temperatura y por lo tanto a temperatura ambiente presenta una estructura desordenada y más abierta de lo normal (menor densidad). Cuánto más lento se procede al enfriamiento, y más perfecto es el recocido, más elevada será la densidad de un vidrio.

1.8.4 DUREZA

Por norma general, se define a la dureza como lo opuesto a un elemento frágil, pero si observamos con detenimiento la definición de dureza veremos que en términos generales, se denomina dureza a la capacidad de un material a resistir el desgaste o a la producción de marcas o fisuras en su superficie cuando se lo somete a una carga mecánica concentrada.

Hay varios tipos de dureza:

Dureza al rayado: Se utiliza la escala de MOSS, pero conlleva ciertos problemas, la aplicación de éste método es muy impreciso. Un vidrio siempre ralla a otro, tengan o no la misma composición.

Dureza a la indentación: Se hace presión con una esfera de hierro o una punta de diamante para que penetre en el material.

Dureza a la abrasión: Define la mayor o menor facilidad que tienen los vidrios a tallarse.

La influencia de la temperatura sobre la dureza es similar a la de la viscosidad; a más temperatura menos dureza.

1.8.5 DILATACIÓN TÉRMICA

Igual que todos los materiales, el vidrio se dilata con el calor y se contrae con el frío. Esto tiene especial importancia en el proceso de conformado y recocido del vidrio, además del uso final que le demos a éste, dado que no debe estar expuesto a choques térmicos. El vidrio común tiene un coeficiente de dilatación lineal del orden de 9×10^{-6} ²⁰

Las dilataciones en el vidrio pueden llegar a tener una gran importancia. El vidrio es un mal conductor, esto implica que ante cambios bruscos de temperatura, éste no consigue tener la misma temperatura en toda su superficie y esto produce tensiones superficiales. Estas tensiones, que derivan de las dilataciones y contracciones que se están produciendo en un mismo momento, podrían llegar a provocar roturas en el vidrio.

Saint-Gobain Glass²¹ nos ejemplifica el anterior caso con la explicación siguiente, partiendo del coeficiente de dilatación lineal es de 9×10^{-6} Un vidrio de 2 metros (2000 mm) de longitud, que se calienta a 30°C tendrá un alargamiento de: $2000 \times (9 \times 10^{-6}) \times 30 = 0.54 \text{ mm}$

Continuando con el ejemplo anterior, a temperaturas de fusión (1400-1500°C), cada 100°C que aumentamos de temperatura, el vidrio aumentará aproximadamente un 1% su volumen.

1.8.6 PROPIEDADES TÉRMICAS

Cómo es de suponer, en el proceso de fabricación del vidrio la temperatura es un elemento clave y siempre implicará que trabajamos con temperaturas elevadas.

1.8.6.1 CALOR ESPECÍFICO

Es la cantidad de calor, en Joules, que necesitaría aumentar 1K la temperatura de 1Kg. Éste índice varía en función de la composición y aumentará su valor en función de los elementos que lo conformen. A más elementos, mayor será el índice.

²⁰ [74] página 135

²¹ [58] página 134

Cuando la curva de la temperatura pasa por el intervalo de transformación, se observa una discontinuidad en el calor específico. Esto es el conocido como calor latente. Los vidrios no tienen un punto de fusión definido y las discontinuidades anteriormente citadas son el resultado de los cambios estructurales que se dan en éste intervalo de tiempo. Estas variaciones se transforman en función del tratamiento térmico, es mayor para los vidrios bien recocidos que para los recocidos con enfriamiento brusco.

1.8.6.2 TRANSFERENCIA DE CALOR

El vidrio en estado sólido tiene un bajo índice de conductividad térmica. Esto nos haría pensar que a temperatura ambiente el vidrio es un buen aislante, pero nada más alejado de la realidad, cuando los rayos de sol inciden en una superficie de vidrio, la transmisión de calor por radiación es muy elevada.

La transmisión de calor por radiación a altas temperaturas es muy importante, sobre todo en el proceso de fusión. El calor de las llamas de los quemadores es absorbido por las capas superficiales y se expande hacia las capas más profundas. El proceso es éste sucesivamente hasta que obtenemos temperaturas de hasta 1500-1400°C en la masa fundida de vidrio.

Cuando el vidrio se somete a altas temperaturas (por el proceso de fusión) sí que nos aparece una conducción de calor importante. La conductividad térmica del vidrio fundido es del mismo orden que el hierro fundido, esto permite, junto los movimientos de convección, conseguir que toda la masa de vidrio fundido consiga tener la misma temperatura de manera uniforme.

1.8.6.2.1 RADIACIÓN

Mientras que a temperaturas bajas la transmisión calorífica tiene lugar prácticamente exclusivamente por conducción, a partir de las temperaturas en las que empieza a producirse emisión luminosa, se establece la transmisión por radiación.

Podríamos definir la radiación como la relación entre dos elementos, que en un momento dado tienen temperaturas distintas y que entre ellos no existe contacto ni conexión con otro sólido conductor. Podemos encontrar la energía térmica radiante a partir de la teoría de Boltzmann. En el anexo²² se detalla.

1.8.6.2.1.1 LA RADIACIÓN SOLAR

La radiación es transferencia de energía por ondas electromagnéticas y se produce directamente desde la fuente hacia fuera en todas las direcciones. Estas ondas no necesitan un medio material para propagarse, pueden atravesar el espacio interplanetario y llegar a la Tierra desde el Sol.

La Radiación solar se define como el flujo de energía que recibimos del Sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (luz visible, infrarroja y ultravioleta). Aproximadamente la mitad de las que recibimos (comprendidas entre 0.4µm y 0.7µm), pueden ser detectadas por el ojo humano, constituyendo lo que conocemos como luz visible. De la otra mitad, la mayoría se sitúa en la parte infrarroja del espectro y una pequeña parte en la ultravioleta.

²² D - RADIACIÓN. TEORÍA DE BOLZMANN. Página 140

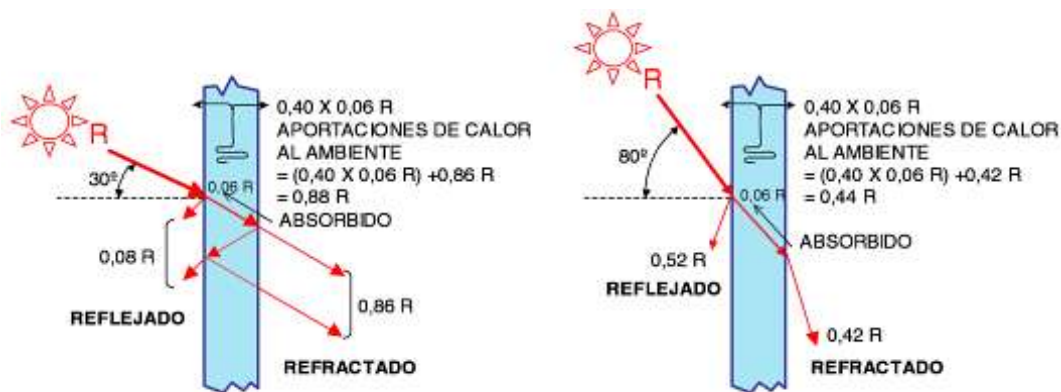


FIG. 49 - RADIACIÓN SOLAR (R) INCIENDO SOBRE UNA SUPERFICIE DE VIDRIO CON DOS ÁNGULOS DE INCIDENCIA DIFERENTES (30 Y 80°). FUENTE: ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS.

La longitud de onda y la frecuencia de las ondas electromagnéticas, son importantes para determinar su energía, su visibilidad y su poder de penetración. Todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad de 299.792 Km/s

Las ondas electromagnéticas pueden tener diferentes longitudes de onda. El conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético y el conjunto de las longitudes de onda emitidas por el Sol recibe el nombre de espectro solar.

La energía que llega al exterior de la atmósfera es una cantidad fija, conocida como constante solar. El valor de esta energía es de 1.367 W/m².

Suponiendo condiciones óptimas, con un día claro y con los rayos cayendo perpendicular a la superficie terrestre, alcanzarían ésta como máximo 3/4 partes de la energía solar incidente.

1.8.6.2.2 LA GANANCIA DE CALOR POR RADIACIÓN SOLAR EN EL VIDRIO

La manera de calcular las ganancias de calor por conducción se basa en la diferencia de temperatura de proyecto exterior e interior. Cuando el sol incide directamente sobre una superficie, ésta se calienta. Si dicha superficie es parte del edificio, un porcentaje de calor, resultado de la incidencia solar, se refleja y el otro es transmitido al interior del mismo. La cantidad de calor por radiación solar puede llegar al 50% de las ganancias totales de calor.

Cuando los rayos del sol inciden sobre la superficie de un edificio, la cantidad de calor que se transmite a la superficie depende, básicamente de los dos factores siguientes:

- ❖ **Grado de opacidad, color y rugosidad del material.** Una superficie de color oscuro, absorbe más calor radiante a comparación con una superficie de color claro. De la misma manera, una superficie con mayor rugosidad favorece la absorción de calor.
- ❖ **Ángulo de incidencia.** El ángulo de incidencia depende de la latitud, de la época del año y de la hora del día, Las mayores temperaturas solares se producen para las paredes orientadas al este y al oeste a las 8 y 16 horas, respectivamente.

El vidrio común absorbe una débil proporción de la radiación solar (5 a 6%) y refleja o transmite el resto. La magnitud de calor reflejada y transmitida depende del ángulo de incidencia de los rayos del sol a la superficie del vidrio. Por ejemplo, para pequeños ángulos de incidencia se transmite de un 86 a un 87% y se refleja de un 8% a un 9%.

Cuando aumenta el ángulo de incidencia se incrementa también el calor reflejado y disminuye el transmitido. La ganancia total por insolación comprenderá el calor transmitido más un 40% aproximadamente del calor transmitido por el vidrio.

El vidrio permite que accedan al interior ondas de pequeña longitud y de alta frecuencia de la radiación solar, además, impide casi completamente que la radiación de baja frecuencia y longitud de onda grande de las fuentes internas (muebles o personas situados en el interior del edificio), se refracten hacia el exterior. Éste fenómeno se le conoce como efecto invernadero, es desfavorable en verano, pero muy conveniente en invierno.

La ganancia de calor solar a través de los vidrios puede ser reducida considerablemente usando vidrios con protección térmica, éste tipo de vidrios reflejan la mayor parte de los rayos solares, con lo cual gran parte del calor no es absorbido por el edificio. En cambio, las carpinterías con vidrios cámara (cámara de aire intermedia), no reducen apreciablemente el calor por radiación pero tienen un gran poder reductor de la transmisión (factor K).

1.8.6.2.3 SOMBRAS PROYECTADAS POR LOS SALIENTES

El análisis de las sombras que se proyectan sobre los vidrios de los edificios producidas por cornisas, balcones o edificios contiguos, nos permitirá reducir la carga radiante. La reducción de las ganancias de calor por incidencia lumínica directa son particularmente sensibles en aquellos edificios en los que la zona donde se sitúa el vidrio está en un plano muy retrasado respecto la fachada.

Con tal de determinar la importancia de las sombras horizontales y verticales, se procederá, según el libro de acondicionamiento climático de edificios con los siguientes puntos:

1. Se determinará el ángulo acimutal (δ) y el ángulo de altitud solar (α) utilizando la tabla n°7.
2. Acotar el azimut del sol en el eje de ordenadas de la parte superior del gráfico.
3. Trazar una horizontal que pase por la ordenada acotada. Esta recta corta a la curva correspondiente a la orientación considerada.
4. Determinar la abscisa en este punto.
5. Multiplicar esta abscisa por la profundidad saliente (vista en planta)
6. Acotar la altura del sol en la escala de ordenadas en la parte inferior del gráfico n°7
7. Trazar la horizontal que pase por esa ordenada. Esta recta corta la recta inclinada a 45°, que corresponde a la abscisa obtenida anteriormente en el apartado 4.
8. Determinar la abscisa de esta intersección.
9. Multiplicar esta abscisa por la profundidad del saliente (vista en alzado).



FIG. 50 - FORMAS DE SOMBREADO EXTERIOR Y SU INFLUENCIA EN EL STRESS TÉRMICO. FUENTE: ACONDICIONAMIENTO CLIMÁTICO DE EDIFICIOS.

Las sombras exteriores que se producen sobre una superficie de vidrio, pueden generar tensiones térmicas al producir zonas de diferentes temperaturas.

La máxima tensión térmica se produce cuando una superficie igual o menor al 25% de una pieza de vidrio, está afectada por una sombra estática o permanente y/o el sector sombreado ocupa más de un 25% del perímetro de la pieza. Una sombra es considerada permanente cuando su duración es

igual o mayor a 4 horas; si es menor, se considera sombra móvil.

1.8.6.2.4 MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD CALORÍFICA

Podríamos definir la conductividad calorífica, como la suma de las conductividades por conducción y por radiación. Si la medida de éste valor se lleva a cabo a temperaturas inferiores a la de transformación del vidrio, se calcula mediante probetas. El proceso consiste en someter una cara de la probeta a una temperatura determinada, mientras la otra se halle en contacto con un cuerpo frío. Conociendo la temperatura en ambas caras y el gradiente térmico, se obtendrá la conductividad calorífica.

1.8.6.2.5 EL CHOQUE TÉRMICO

Una de las principales roturas que se vienen produciendo en el vidrio plano está relacionadas con el choque térmico. Por norma general, cuando ocurre la rotura de un vidrio por choque térmico, esto es debido a que el vidrio ha estado expuesto a la luz solar y calefacción interior. Si el vidrio se calienta de manera uniforme, todo el panel se expande. Si el vidrio se calienta de manera no uniforme, se producen gradientes de temperatura dentro del vidrio, creando tensiones de tracción.

El choque térmico es un fenómeno que aparece como combinación de:

- ❖ Restricciones a la dilatación o contracción
- ❖ Gradientes de temperatura del material
- ❖ Cambios bruscos de fase
- ❖ Baja ductilidad del material

Hace muchos años que el efecto del choque térmico en el vidrio térmico ha sido reconocida y de ello se han hecho muchos estudios, uno de los primeros fue Duhamel (1838). El comportamiento del vidrio frente a los cambios de temperatura bruscos es uno de los principales inconvenientes de éste material y por eso se limita su uso a muchas aplicaciones

1.8.6.2.5.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SEGURIDAD TÉRMICA

Como se ha estudiado en anteriores apartados, la utilización de un vidrio con las características adecuadas puede ser fundamental para que éste tenga un buen comportamiento una vez instalado. No solo la prescripción del vidrio es importante, sino que también la calidad de sus acabados

Debemos tener presente que como mayores dimensiones, más grueso y formas más complejas, más difícil será de manipular éste vidrio. Esto conllevará a lo largo de los trabajos de corte, pulido y colocación sea más probable que aparezcan daños (aunque no sean visibles al ojo humano) que puedan derivar en fractura.

La fractura térmica normalmente se suele producir por la acción de una tensión de tracción en el borde del vidrio y paralela a éste. La posibilidad de que ocurra la rotura, depende de la presencia y del tamaño de imperfecciones en los bordes a través de las cuales se liberarán las tensiones acumuladas por estrés térmico. Se debería asegurar que todos los vidrios, antes de colocarlos, tengan un corte neto y limpio en sus bordes.

1.8.6.2.6 LA GENERACIÓN DE LAS TENSIONES

Cuando el vidrio está en estado plástico-viscoso se puede enfriar con toda la rapidez que se desee. Pero en el punto de reblandecimiento, sobre todo en el intervalo de relajación, se debe enfriar la masa muy lentamente para evitar la aparición de tensiones.

Si se deja enfriar rápidamente el vidrio dentro del intervalo térmico comprendido entre el punto superior e inferior de recocido, una vez enfriado el vidrio, las tensiones serán permanentes. Éste hecho tan solo se podrá revertir sometiendo al vidrio a una temperatura superior a la de recocido y enfriándolo lentamente (Éste proceso se conoce como templado).

Sin embargo, si se enfría rápidamente una vez el vidrio está situado en una temperatura inferior a la de recocido, aunque aparecerán las tensiones, éstas desaparecerán una vez se iguale la temperatura en todos sus puntos.

Cuando se enfría una pieza de vidrio bruscamente, estando ésta a temperatura inferior a la de recocido, dado el vidrio tiene una baja conductividad térmica, la diferencia de temperatura no se expandirá uniformemente.

Éste suceso provocará tensiones, entre las capas superficiales que se enfriarán antes (y se contraerán más deprisa) y las del interior, que mantendrán la temperatura inicial. La magnitud de estas tensiones variará en función de la diferencia de temperatura del coeficiente de dilatación térmica de la tipología de vidrio. Estas tensiones se conocen como stress térmico y podrían provocar la rotura del vidrio.

Según el manual del vidrio plano de Carlos Pearson, es muy probable que aparezca una rotura por choque térmico cuando la diferencia de temperatura entre la zona fría y la más cálida de la masa del vidrio supera los 40°C (con un vidrio monolítico sin tratamientos térmicos).

En la imagen de la izquierda, podemos ver el punto “A” que es la zona más caliente y trata de expandirse. Por otro lado, perimetralmente, encontramos la zona “B” que es la que está rodeada por el marco perimetral. La zona indicada “C” es la tensión de tracción.

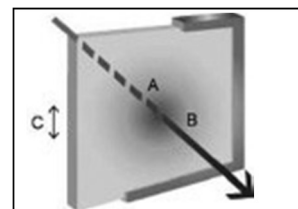


FIG. 51 - GENERACIÓN DE TENSIONE TÉRMICA. FUENTE: MANUAL DEL VIDRIO.

1.8.6.2.7 LA RESISTENCIA AL CHOQUE TÉRMICO

El comportamiento de los vidrios frente a los cambios bruscos de temperatura limita su uso para muchas aplicaciones. Los factores que más influyen al choque térmico en función de la tipología de vidrio son el coeficiente de dilatación y el factor de forma.

Aunque la resistencia al choque térmico podemos encontrarla con las fórmulas indicadas en el anexo²³, en la práctica, se suele comprobar con otros métodos más prácticos. Una vez estabilizadas las piezas a ensayar, se sumergen en un baño de agua a temperatura inferior que la del vidrio, así se determina la diferencia máxima de temperatura que puede llegar a soportar.

Los vidrios resistentes al choque térmico (Vycor, Pyrex) presentan coeficientes de dilatación a inferiores a 20×10^{-8} cm/cm·K y pueden incluso colocarse directamente al fuego. Otros tipos de vidrios más comunes, como el que podríamos encontrar en una ventana, presenta valores de a por encima de 80×10^{-8} cm/cm·K y se fractura rápidamente al someterlo a enfriamientos y calentamientos bruscos en agua a 100°C.

La resistencia al choque térmico varía enormemente en función del vidrio que utilizamos, para hacernos a la idea gráficamente de lo que representa, en las tipologías de vidrio más utilizadas:

²³ E - RESISTENCIA AL CHOQUE TÉRMICO. Página 141

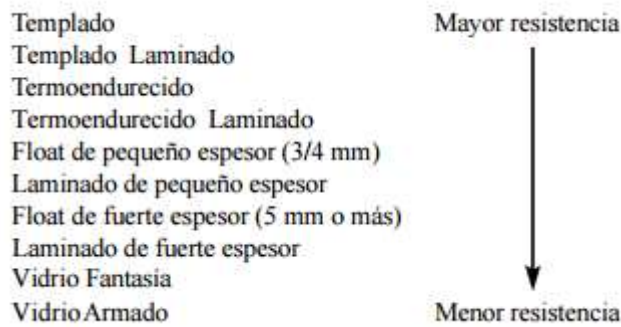


FIG. 52 - RESISTENCIA SEGÚN EL TIPO DE VIDRIO. FUENTE: ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS.

1.8.7 PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas son características relacionadas con el comportamiento de un material frente a sollicitaciones mecánicas: Tracción, compresión, impacto, vibraciones...

1.8.7.1 CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS

Un elemento elástico es aquel que tras la aplicación de una fuerza este vuelve a su forma original. En cambio un elemento plástico es aquel que tras la aplicación de dicha fuerza queda irreversiblemente deformado.

El vidrio se considera un **material elástico casi ideal**, aunque la deformación elástica que sufre por aplicación de una tensión sea muy pequeña y se fracture al llegar al punto límite.

En el gráfico siguiente, el vidrio sería considerado un material no dúctil y el dúctil por ejemplo sería un material metálico. Tal y como vemos, el vidrio se mantiene constante en la proporción de tensión/deformación, en cambio, en llegar a límite último, se provoca la ruptura sin previo aviso.

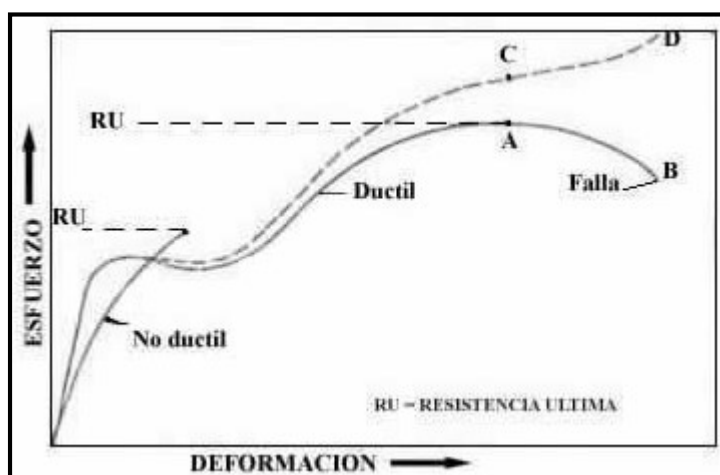


FIG. 53 - GRÁFICO TENSIÓN DEFORMACIÓN.

En cambio, el metal es elástico a lo largo de un periodo, hasta que llega al límite elástico. A partir de éste punto es cuando la deformación se vuelve plástica, es decir, que el material no recupera su forma original, si se continúa aplicando un esfuerzo, éste llega al punto B, donde falla y se rompe.

Todas estas aproximaciones tienen una base teórica, pero en la realidad es realmente complejo establecer cuál es el límite elástico de un vidrio y su módulo de elasticidad, dado que éste varía en

función de la composición.

El **Módulo de Young** expresa la fuerza de tracción a la que debería aplicarse teóricamente a una muestra de vidrio para que el alargamiento sea idéntico a la longitud inicial. Se expresa en fuerza por unidad de superficie, y el valor para el vidrio sería de $E = 70 \text{ Gpa}$.

Cuando una muestra es sometida a un alargamiento por efecto de una tensión mecánica, se observa que disminuye su sección.

El **Coefficiente de Poisson** relaciona la disminución unitaria en la dirección perpendicular a la del esfuerzo y el alargamiento en el sentido del esfuerzo. Para vidrios planos destinados a construcción el valor del módulo de Poisson es de 0.22

1.8.7.2 RESISTENCIA MECÁNICA EN LOS VIDRIOS

La resistencia mecánica del vidrio (teórica) es elevadísima, aproximadamente de 10^{10} Nm^2 , éste valor es mucho mayor que el de la mayoría de aceros. Aun así, la resistencia mecánica del vidrio es tres veces inferior que el valor teórico.

Es imposible llegar a dar un valor de la resistencia mecánica en el vidrio. Según Eduardo A. Mari, en su libro de “Los vidrios” los resultados experimentales de los ensayos más comunes muestran siempre las siguientes características:

- ❖ El vidrio rompe siempre por tracción, y la fractura tiene siempre su origen en un punto de la superficie.
- ❖ Los valores obtenidos no guardan ninguna relación aparente con la composición de los vidrios ensayados ni con sus módulos de elasticidad.
- ❖ Los valores de resistencia mecánica medidos son siempre dos o tres órdenes de magnitud inferiores a la resistencia teórica del vidrio.
- ❖ Los resultados presentan una gran dispersión y baja repetitividad.
- ❖ El estado de su superficie tiene una enorme influencia sobre las mediciones.

El último punto es el que explica la gran diferencia entre los valores teóricos a los reales, estudiaremos los defectos de los vidrios más adelante.

1.8.7.2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La resistencia del vidrio a la compresión es muy elevada, es de unos 1000 N/mm^2 . En general, las tensiones de compresión en un vidrio templado oscilan entre 80 y 150 N/mm^2 . Para ser considerado un vidrio de seguridad no debe ser menor a 100 N/mm^2 .

1.8.7.2.2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Un vidrio sometido a flexión tiene una de sus caras en compresión y la otra en tracción. La resistencia a ruptura a flexión de un vidrio es:

- ❖ 40 N/mm^2 en un vidrio pulido recocido.
- ❖ 120 a 200 N/mm^2 para un vidrio templado. Éste valor variará en función del espesor del vidrio y de la manufactura de los cantos.

La elevada resistencia de un vidrio templado (securizado) se debe a que, durante el proceso de templado, a lo largo de los tratamientos a los que se somete el vidrio, éste está constantemente sometido a compresión.

1.8.7.2.3 RESISTENCIA A TRACCIÓN

Los tratamientos térmicos posteriores del vidrio inciden notablemente sobre esta propiedad:

- ❖ Vidrio recocido: 400 daN/cm²
- ❖ Vidrio templado: 1.000 daN/cm²

1.8.7.2.4 TENSIONES DE TRABAJO ADMISIBLES

	Posición vertical	Posición inclinada	Posición horizontal	Posición horizontal
	Vidrio no sometido a tensiones permanentes	Vidrio sometido parcialmente a tensiones permanentes	Vidrio sometido a tensiones permanentes [Ambiente no húmedo]	Vidrio sometido a tensiones permanentes [Ambiente húmedo-Piscinas]
Recocido	200	150	100	60
Templado	500	375	250	250
Semi-templado	350	260	175	175
Templado-Serigrafiado	350	260	175	-
Laminado	200	150	100	100
Colado recocido	180	135	90	90
Colado templado	400	300	200	200
Armado	160	120	80	-

FIG. 54 - LAS TENSIONES DE TRABAJO ADMISIBLES, EXPRESADAS EN DAN/CM². FUENTE: ARIÑO

1.8.7.3 LA FRACTURA DEL VIDRIO

Según la teoría de la fractura frágil, encontramos los siguientes parámetros como puntos básicos a destacar:

- ❖ Un cuerpo frágil se fractura cuando el esfuerzo que se le aplica es mayor que la parte más débil del material.
- ❖ La resistencia a un esfuerzo homogéneo no depende de ninguna constante material, si no del defecto máximo del material.
- ❖ Como más superficie de vidrio, más probabilidad de que aparezcan defectos críticos que conlleven a la fractura.

1.8.7.3.1 MORFOLOGÍA DE LA GRIETA

El estudio, análisis, la forma y el tipo de fractura de un material se conoce como Fractografía. En la zona de origen de la fractura en una superficie de vidrio es posible, aún a simple vista, distinguir tres zonas.

Los fractógrafos las llaman zona “espejo”, zona “difusa” y zona “fibrosa”. En la figura siguiente se muestran dichas zonas tal como se observan en la fractura de un vidrio común vista al MEB.

A partir del análisis de estas zonas se pueden hacer inferencias sobre los niveles de esfuerzo y las condiciones cinéticas de propagación.

En la imagen podemos observar el punto observado como “A”, este es el punto en el que se origina la fractura de la pieza de vidrio que estamos estudiando.

Todas las fracturas de vidrio debido a un esfuerzo de tracción, tienen las mismas características estéticas. Las zonas con las que nos encontramos son las siguientes:

Zona de espejo (mirror). Ésta se caracteriza por ser lisa y brillante, aunque si la tensión de rotura es muy grande, puede llegar a ser algo borrosa. Se ha observado que el radio de la zona espejo (r) y la tensión de fractura (σ_f) están relacionadas por la siguiente expresión:

$$A = \sigma_f r^{1/2}$$

La posición de la zona espejo nos dará información acerca del inicio de la fractura, su forma nos indicará la distribución de las tensiones y su dimensión nos ayudará a cuantificar la tensión que generó la fractura.

Zona de niebla (mist). Es un arco estrecho que rodea la zona espejo, su superficie es lisa pero tiene un aspecto rugoso.

Zona de estrías (hackle). Es la zona de fractura, está formada por dos tipos de líneas: Hay unas líneas radiales que parten de la zona espejo y siguen paralelamente la dirección de propagación; Por otro lado, se observan una sucesión de ondas de fractura.

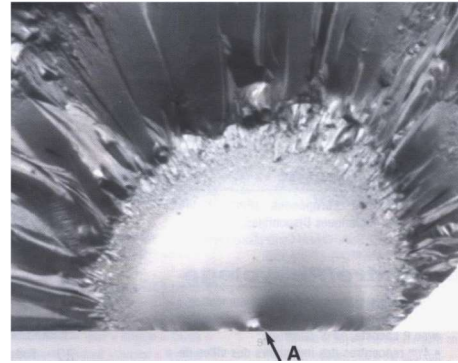


FIG. 55 - FRACTURA DE UN VIDRIO DEBIDO A UN ESFUERZO DE TRACCIÓN. FUENTE: LA FRACTURA DEL VIDRIO (FRANCISCO CAPEL)

1.8.7.3.2 LA FRAGILIDAD

La fragilidad de un vidrio viene dada por la escasa velocidad con la que se relajan las tensiones mecánicas al aplicarse un esfuerzo determinado. No hay una definición exacta para describir la fragilidad, aunque podríamos definirla como la negación de la plasticidad. Preston definió los siguientes puntos para determinar qué es un elemento frágil:

- ✓ Debe fallar a tracción, pero no a cortadura.
- ✓ Deberá tener un módulo de elasticidad elevado.
- ✓ Deberá tener una gran resistencia mecánica a tracción.
- ✓ El material deberá ser capaz de desarrollar fracturas bifurcadas por tensiones internas.

Podríamos considerar la fragilidad como la susceptibilidad de la estructura de un material a la destrucción sin deformación plástica.

El vidrio se considera un elemento elástico casi ideal. Recordemos que según la ley de Hooke la deformación que sufre un material es proporcional a la tensión aplicada. La constante de proporcionalidad se conoce como módulo elástico.

En general los elementos vítreos se consideran como materiales frágiles, aunque alguna vez se haya cuestionado si puede existir algo de **fractura dúctil** en los mismos.

1.8.7.3.2.1

MECÁNICA DE FRACTURA ELÁSTICA LINEAL

Cuando se ejerce una determinada presión o trabajo sobre un material que se encuentra en equilibrio se producirán, en su interior, una serie de tensiones con tal de alcanzar de nuevo el estado equilibrio. Debido a estas tensiones internas, es probable que el material se rompa, provocando en su superficie una fractura. Podríamos determinar el concepto de fractura por el hecho de que en el momento en el que un material se rompe, pierde su unidad o cohesión, para convertirse en dos o más unidades.

En la fractura de un material no influye sólo su microestructura, sino también el historial energético a que se ha sometido previamente el mismo y el tipo de esfuerzo a que ha sido sometido para provocar la fractura: flexión, tracción, impacto, etc.

En el anexo²⁴ de este documento se estudian las tres teorías de mecánica de fractura más importantes hoy en día.

1.8.7.3.2.2

LA PROPAGACIÓN DE LA ROTURA

La propagación de la fractura sigue una serie de reglas características dependiendo de la dirección y la magnitud del esfuerzo de tracción que ha provocado la rotura. Las más comunes se observan en la figura siguiente:

- La dirección en la que se propaga la fractura es perpendicular al esfuerzo de tracción que la produjo (Ver imagen siguiente - A)
- Si no existen heterogeneidades o tensiones en el vidrio, la propagación de la fractura es recta. En caso contrario seguirá una trayectoria curva.

La trayectoria curva viene definida por las siguientes características:

- o La parte convexa de la curva se corresponde a las zonas sometidas a tensiones de compresión.
- o La parte cóncava pertenece a las zonas sometidas a tensiones a tracción.

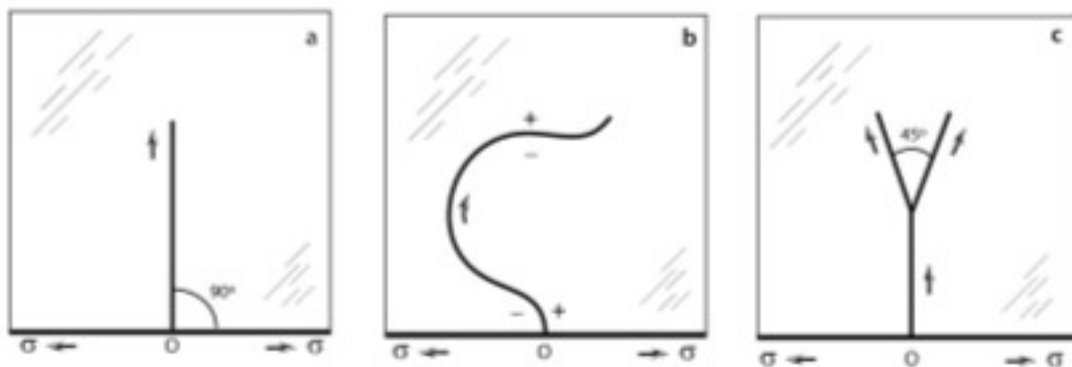


FIG. 56 - TIPOS DE PROPAGACIÓN DE LA FRACTURA EN EL VIDRIO. FUENTE: LOS VIDRIOS,

A altas velocidades de propagación, más recta será la fractura (en un impacto, por ejemplo). A bajas velocidades de propagación, la grieta en el vidrio tenderá a curvarse. Esto es lo que suele suceder en las fracturas por choque térmico

- En ausencia de tensiones y heterogeneidades en el vidrio, y si el esfuerzo aplicado es elevado, la fractura se bifurcará de forma simétrica. La distancia del punto de origen a la cual aparece la bifurcación de la grieta, es inversamente proporcional al cuadrado de la tensión de fractura inicial y no depende de la velocidad de propagación. El ángulo de una bifurcación simple, en ausencia de tensiones, será de 45°.

Por lo que se refiere a las roturas por stress térmico, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones adicionales:

- ❖ El origen de la fractura por stress térmico se sitúa en el borde del vidrio o muy cerca de él y se inicia de forma perpendicular al mismo.
- ❖ Cuando la tensión o estrés térmico tiene poca energía y se propaga a baja velocidad, por ese motivo la fractura se propaga en una forma de línea curva, que normalmente sale por un borde opuesto al contiguo.
- ❖ Cuando la energía tiene mayor potencial, la velocidad de propagación es mayor y la línea curva de fractura suele multiplicarse en dos o más líneas de fractura, hasta que una o más lleguen a un borde opuesto o continuo.

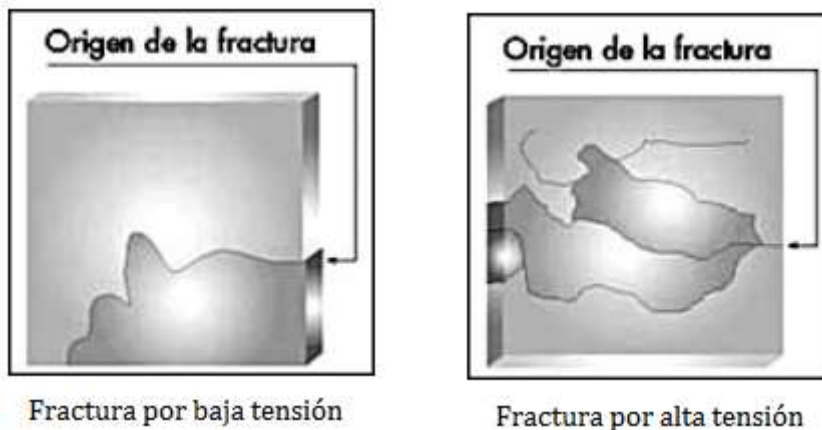


FIG. 57 - FRACTURAS POR ESTRÉS TÉRMICO POR BAJA Y ALTA TENSIÓN. FUENTE: MANUAL DEL VIDRIO PLANO.

1.8.8 PROPIEDADES ÓPTICAS

El estudio de las propiedades ópticas no sólo comprende la luz visible (que es la que va de los 400 a 750 nm) sino que también deberemos tener en cuenta la luz que no es apreciable para el ojo humano, que son las longitudes de onda menores (Ultravioleta o UV) y las mayores (Infrarrojos o IR).

Tal y como vemos en la figura X (en la página anterior), la luz visible es aquella que está marcada con un sombreado coloreado, mientras que la luz no visible para el ojo humano está sombreada de color gris.

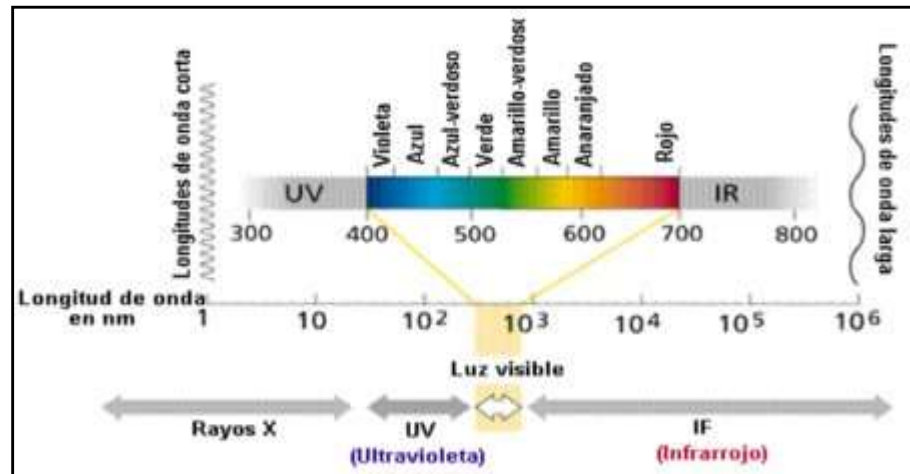


FIG. 58 - EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO. FUENTE: GRUPO LED

Todas ellas nos afectarán en las propiedades del vidrio, sean visibles o no.

1.8.8.1 REFRACCIÓN

El **índice de refracción** de una sustancia es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en ése medio. Como más grande sea el índice de refracción más baja será la velocidad de la luz. En un vidrio incoloro la pérdida de luz por refracción es de un 8%.

Si la luz incide perpendicularmente sobre la superficie del vidrio no hay desviación de ésta, sin embargo, si la luz incide de manera oblicua sí que habrá una desviación.

En la figura 6, vemos la trayectoria de la luz en un ambiente aire-vidrio-aire. Tal y como vemos en la imagen, el ángulo de incidencia del haz de luz es el mismo que el ángulo de la luz que sale.

En cambio en el interior del vidrio, la luz va perpendicular a la superficie del vidrio.

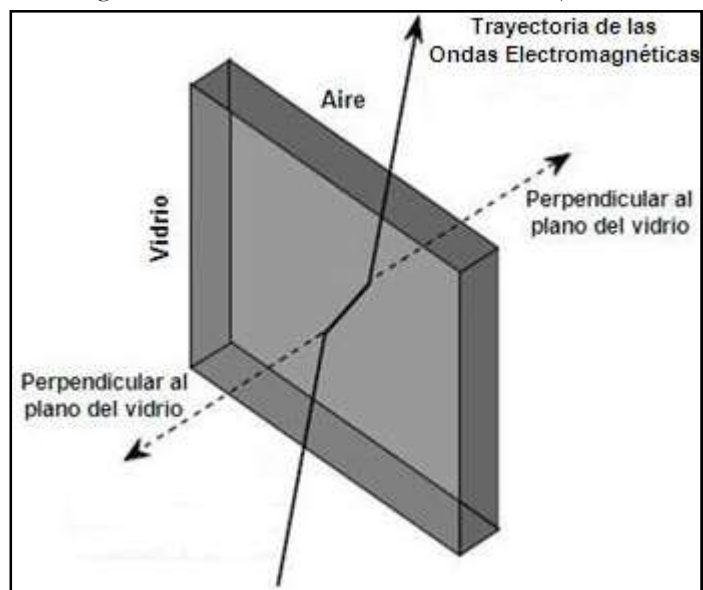


FIG. 59 - REFRACCIÓN OBLICUA EN UN VIDRIO INCOLORO. FUENTE: SETI.CL

Es importante remarcar que hay relación entre el índice de refracción de un vidrio y su composición y densidad. A más índice de refracción más densidad.

También influirá la historia térmica del vidrio, en realidad, esto está estrechamente relacionado con la variación de densidad. A temperatura ambiente un vidrio bien recocido tiende a tener más índice de refracción que por cualquier otro tratamiento térmico (templado, mal recocido...).

1.8.8.2 **BIRREFRINGENCIA (O DOBLE REFRACCIÓN)**

Aparece cuando la luz atraviesa un cuerpo transparente **anisótropo**²⁵ (su índice de refracción y propiedades varían con la dirección).

Por norma general, la doble refracción nos suele aparecer cuando un vidrio está tensionado, a más tensiones más probabilidad de la aparición de la doble refracción. Las tensiones nos aparecerán en dos casos:

- ❖ **Tensiones mecánicas:** En todos los vidrios, ya sea en menor o mayor grado, aparecen las tensiones mecánicas. Es una característica común en todos los vidrios.
- ❖ Diferentes **coeficientes de dilatación** en medios diferentes: Cuando calentamos los extremos de dos vidrios y cuando éstos todavía están calientes los soldamos, al enfriarse la soldadura, los vidrios se contraerán diferente, originando más tensiones mecánicas.

1.8.8.3 **Absorción y transmisión de luz y color**

Podríamos clasificar a los vidrios en tres tipos básicos si nos basamos en la transmisión de luz:

- ❖ **Vidrios incoloros:** Dejan pasar la luz sin transformarla.
- ❖ **Vidrios translúcidos:** Contienen heterogeneidades muy grandes en comparación a la longitud de onda de luz, estos tipos de vidrio suelen ser blancos o coloreados. Dejan pasar luz pero no tanta como en el caso anterior.
- ❖ **Vidrios opacos:** No permiten que pase la luz a través de su masa.

En un material, si no hay electrones libres (como es el caso de los vidrios), la luz pasa a través de éstos pero no totalmente, ya que interaccionará con los electrones que están más débilmente unidos.

Si la radiación es lo suficientemente grande, los electrones se excitarán absorbiendo parte de la energía y, por lo tanto, disminuyendo la transmitancia lumínica. Esto se produce, sobretodo, en la zona ultravioleta.

Veamos cómo se comporta el vidrio en función del espectro (recordamos que en la figura 5 se puede ver el esquema de los espectros de luz):

- ❖ **Zona ultravioleta (Long. Onda corta):** Como menos unidos estén los átomos más luz absorberá la masa de vidrio. Esto dependerá de la aparición de electrones más o menos excitables.
- ❖ **Espectro visible:** En un vidrio incoloro convencional el paso de luz es, aproximadamente, de un 90%. En los vidrios a color, los iones de los metales de transición (que son los que les dan el color característico) tienen electrones excitables y, por lo tanto, dejarán pasar menos luz. La cantidad de luz variará en función del color.
- ❖ **Zona infrarrojo:** Los vidrios comunes, exentos de impurezas, son transparentes hasta 4.5 nm.

²⁵ Anisotropía según la RAE: Cualidad de un medio, generalmente cristalino, en el que alguna propiedad física depende de la dirección de un agente.

Por lo que se refiere al **color** de un vidrio, es importante remarcar que el color de un cuerpo no es una propiedad del mismo, sino que es la resultante de sus propiedades ópticas y la respuesta a la retina humana.

Es decir, si un vidrio lo vemos de color azul es por que absorbe las bandas verde y blanco. En cambio, si lo vemos verde es por que absorbe el azul y rojo.

Es realmente complejo determinar el color de un vidrio debido al efecto que producen las diferentes longitudes de onda y la sensibilidad del ojo humano ante éstas.

1.8.8.4 REFLEXIÓN

Cuando un haz de luz incide sobre la superficie del vidrio, parte de ésta se refleja hacia el exterior.

Cuando la luz pasa de un medio menos denso (como es el aire) a uno más denso (vidrio) la trayectoria se alejará de la normal (la normal es la dirección perpendicular a la superficie del vidrio). Cuando el rayo emergente difiera del normal más de 90°, se producirá reflexión total.

La cantidad de luz reflejada depende de dos factores:

- ❖ **Índice de refracción:** En un vidrio incoloro normal, tal y como se ha explicado en el apartado 2.7.9.1, la pérdida de luz por refracción es de un 8%. La refracción varía con la longitud de onda, y por lo tanto la reflexión también. A más longitud de onda menos reflexión.
- ❖ Estado de la superficie:
 - La reflectancia de un vidrio normal es mayor de un 8%. Los espejos y vidrios reflectantes (que tienen tratamientos superficiales químicos, como es el caso de la deposición de metal en los espejos) pueden llegar a tener una reflectancia del 90%.
 - En el caso de los vidrios anti-reflectantes la reflexión es menor al 8%.

Nos aparecerá más reflectancia como mayor sea el ángulo de incidencia de la luz en el vidrio y como más diferencia haya entre el índice de refracción de los dos medios.

Es importante explicar en éste apartado que es el efecto de **polarización por reflexión**. En vidrios templados aparecen algunas tensiones superficiales que por birrefringencia provocan “manchas” en la superficie del vidrio dependiendo del ángulo de incidencia.

Esto es debido a que la luz de primera hora de la mañana y de la tarde es especialmente polarizada, al incidir en el vidrio se produce polarización por reflexión en las dos superficies, de modo que las dos actúan a la vez como polarizador y se visualizan las dos tensiones.

1.8.9 PROPIEDADES ACÚSTICAS

La velocidad de transmisión de las ondas sonoras en el vidrio es muy elevada. Para que nos hagamos una idea, por aire la velocidad de transmisión del sonido es de 333m/s, en cambio en el vidrio es de 4995 m/s. Evidentemente, este valor cambia con las características de cada vidrio y su composición.

Las vibraciones mecánicas que se propagan por un medio vítreo suelen tener perturbaciones, debido a las imperfecciones que incorporan en su masa la mayoría de vidrios (burbujas, fisuras...)

Aunque, como se ha comentado anteriormente, la velocidad de propagación del sonido es muy elevada, el vidrio (plano) puede llegar a dar valores de aislamiento acústico razonablemente buenos. Esto se debe a la reflexión del sonido en su superficie.

Actualmente existen vidrios acústicos, que mejoran sus valores de aislamiento gracias a la incorporación de láminas de plástico (PVB) en los vidrios laminados con propiedades acústicas.

1.8.10 PROPIEDADES ELÉCTRICAS

A temperatura ambiente el vidrio no es un buen conductor de electricidad. En cambio, a altas temperaturas, el vidrio se convierte en un buen conductor.

1.8.10.1 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Es muy complejo poder llegar a determinar un valor de conductividad eléctrica de un vidrio. Por norma general, la superficie hidratada provoca que la electricidad pase por la capa superficial del vidrio y no por la masa. Para poder dar un valor de conductividad eléctrica se deberían hacer estudios eliminando la capa superficial y estando en el vacío.

La conductividad eléctrica de los vidrios, igual que la mayoría de las propiedades que se han estudiado anteriormente, varía con su composición. Esto es debido a que los iones más débilmente unidos son los que transportan la corriente.

1.8.10.2 DIELECTRICA

Un elemento dieléctrico (o aislante eléctrico) es una sustancia altamente resistente al flujo de corriente eléctrica. A partir de lo que se ha explicado en el apartado anterior, es evidente que el vidrio es un buen dieléctrico a temperatura ambiente.

A partir de los 100°C, la constante dieléctrica de un vidrio es de un 10-20% a comparación con los valores de temperatura ambiente. Es decir, que los valores de aislamiento eléctrico disminuyen.

1.8.11 PROPIEDADES QUÍMICAS

Una de las características más importantes de los vidrios, es la resistencia al ataque del agua o sustancias acuosas.

Influirá, en el ataque:

- ❖ Composición del vidrio
- ❖ Sustancia química con la que está en contacto
- ❖ Temperatura a la que se encuentran ambas sustancias
- ❖ Duración del contacto
- ❖ Tratamientos térmicos
- ❖ Estado de la superficie

Por medio de tratamientos superficiales se puede conseguir que un elemento con gran riesgo a ser atacado por agentes químicos le pueda hacer frente a los ataques de elementos químicos.

1.8.11.1 MECANISMOS DE ATAQUE

1.8.11.1.1 ÁCIDO FLUORHÍDRICO

Se usa para el grabado del vidrio, y en cantidades pequeñas para eliminar capas superficiales alteradas del vidrio.

Como más concentración del ácido, más violento es el ataque y más rugosa queda la superficie. Al aumentar la temperatura también aumenta la intensidad del ataque.

Hay algunos vidrios resistentes al ácido fluorhídrico, son los que no contienen en su composición ni dióxido de sílice ni óxido bórico.

1.8.11.1.2 ÁCIDO FOSFÓRICO

Diluido y en frío, no afecta al vidrio. En cambio, si está en caliente y concentrado sí que llega a afectarle.

El ataque a temperatura ambiente es muy lento y no es apreciable a simple vista. En cambio, a partir de los 200°C es apreciable.

Si se sumerge un vidrio en ácido fosfórico unos días a temperatura ambiente, se formará una capa que conseguirá que el vidrio sea resistente al ataque del ácido fluorhídrico.

1.8.11.1.3 ÁLCALIS

Los álcalis son sales iónicas básicas de un metal alcalino, los que afectan al vidrio son, principalmente, los hidróxidos y carbonatos de sodio y potasio. Su efecto, igual que en los anteriores apartados, será más intenso en soluciones concentradas y a altas temperaturas.

Como más álcalis tengan el vidrio en su composición, más graves serán las consecuencias del ataque.

Un ejemplo de éste ataque sería el deterioro de una vajilla al lavarse en el lavavajillas con detergente que contenga álcalis.

1.8.11.1.4 SOLUCIONES ÁCIDAS

El mecanismo de ataque de éstas es muy diferente a los ácidos estudiados anteriormente. La intensidad de ataque de estos es mucho menor.

El ácido sulfúrico concentrado y a 200°C prácticamente no afecta al vidrio. Como está concentrado no contiene agua en su composición. Es esencial la presencia de agua para que tenga lugar un ataque por mecanismo de intercambio iónico.

Por lo que se refiere a ácidos débiles, como están poco ionizados, no llegan a afectar al vidrio.

Por norma general, el vidrio resiste mejor al ataque de los ácidos que al de los álcalis. Pero no siempre es así, todo depende de la composición del vidrio en cuestión.

1.8.12 PRESTACIONES DEL VIDRIO

Por lo que se refiere al mundo industrial del vidrio, una vez un fabricante nos suministra un vidrio que ha manufacturado, este viene acompañado de un certificado de prestaciones declaradas, en el que se indican los parámetros por los cuales el elemento suministrado cumple con la normativa actual.

A la autora de este estudio le ha parecido interesante analizar cada una de las prestaciones que en un certificado de un vidrio se otorgan, para así verificar los aspectos que se tienen en cuenta en el sector del vidrio. Este estudio también nos servirá para el primero de los casos prácticos que se estudiarán en el Bloque 2 de este documento.

En la imagen **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** vemos las prestaciones del vidrio. En este caso se trata de un vidrio cámara formado por dos vidrios laminados. La composición de los vidrios es la siguiente (6+6/16/5+5):

- ❖ Vidrio laminar de seguridad 6+6 transparente con una capa de control solar. Cantos pulidos.
- ❖ Cámara de gas Argón de 16 mm
- ❖ Vidrio laminar de seguridad 5+5 transparente con cantos pulidos.

6. Prestaciones declaradas

Unidad de Vidrio Aislante EN 1279-5:2005+A2:2010		
LamiGlass 66.1 Guardian Sun // 16 argón // LamiGlass 55SC		
Resistencia al fuego		NPD
Reacción al fuego		F
Prestación al fuego exterior		NPD
Resistencia a la bala		NPD
Resistencia a la explosión		NPD
Resistencia a la efracción		NPD/P2A
Resistencia al impacto de cuerpo pendular		1(B)1/1(B)1
Resistencia a variaciones bruscas de temperatura y diferenciales de temperatura	K	40K/40K
Resistencia al viento, nieve, carga en m/m	mm	66.1/16/55.2
Atenuación acústica al ruido aéreo directo	dbA	NPD
Emisividad	e _d	NPD
Propiedades térmicas (valor U) W/(m².K)	W/(m².K)	1,0
Transmitancia luminosa τ _v		0,65
Reflexión luminosa ρ _v		0.18/0.16
Transmitancia de energía solar τ _e		0,33
Reflexión de energía solar ρ _e		0.28/0.25
Factor solar g		0,39

NPD: Prestación no declarada

Cámara argón 90%

FIG. 60 - CERTIFICADO CONFORME LOS VIDRIOS CUMPLEN CON LA NORMA EUROPEA QUE EXPIDEN LAS EMPRESAS UNA VEZ ENTREGADOS LOS VIDRIOS. FUENTE: VIDRES BERNI.

1.8.12.1 RESISTENCIA AL IMPACTO DE CUERPO PENDULAR

En el Documento de Apoyo al Documento Básico DB-SUA Seguridad de utilización y accesibilidad Código Técnico de la Edificación (DA DB-SUA / 1), se indican las prestaciones que debe cumplir un vidrio frente a un impacto y los ensayos a realizar para corroborar que cumple con la norma.

En esta norma se indica el método de ensayo para vidrio plano que se utiliza actualmente en el sector de la edificación de España, según lo que indica la norma de Seguridad en Uso. Los

productos se clasifican en tres clases principales, esta clasificación se basa en las prestaciones que presentan los vidrios después del impacto de un cuerpo pendular sobre ellos.

Obtenemos la clasificación a partir de las diferentes alturas de caída de un péndulo de 50 Kg de masa, que representa la energía transmitida por el impacto de una persona. Está relacionado la energía transmitida y la forma de rotura del vidrio con el nivel de seguridad que un vidrio presenta.

El ensayo consiste en impactar desde diferentes alturas un núcleo metálico forrado con dos neumáticos sobre una probeta de tamaño similar a una puerta de paso. Se obtienen así tres parámetros que clasifican al vidrio: altura de caída (valores 1=1200mm, 2= 450mm o 3=190mm), fragmentación o forma de rotura (A= recocido, B= laminar, C=templado), altura máxima sin rotura o con una rotura especial.

Según el documento anterior, el valor que nos da el fabricante es **1(B)1**. Esto querrá decir:

- ❖ Impacto con caída desde 1200mm.
- ❖ Rompe como vidrio laminar
- ❖ No rompe o rompe según norma impactando desde 1200 mm

1.8.12.2 RESISTENCIA DIF. TEMPERATURA

En la imagen podemos comprobar que se indica que el máximo diferencial de temperatura que puede llegar a soportar un vidrio sin romperse es de 40K.

Esto implica que la ruptura se da en el caso de que haya una diferencia de 40 unidades de kelvin. La temperatura se da en kelvin con tal de cumplir con lo que dicta el sistema internacional. Aun así, y partiendo de que pese a que la posición del cero absoluto difiere en las escalas de kelvin y de grados Celsius, podemos afirmar que éste diferencial también podría definirse como 40^a centígrados.

En este caso, debido a que es un vidrio laminado (sin ningún tratamiento térmico) la diferencia de temperatura que soporta sin llegar a fracturarse es bastante baja, pero si estudiamos, por ejemplo, el comportamiento de un vidrio templado de 12 mm, este tendrá una resistencia a diferencias de temperatura de 200°K.

Es por ese motivo que para evitar la rotura espontánea del vidrio por choque térmico se suelen utilizar vidrios templados.

1.8.12.3 RESISTENCIA AL VIENTO, NIEVE, CARGA EN MM.

El valor que el fabricante indica, no es más que la composición del vidrio. Para tener en cuenta si la prescripción ha sido la correcta, deberemos seguir las directrices que nos marca el manual del vidrio.

1.8.12.3.1 ÁMBITO DE APLICACIÓN

Es importante indicar que éste cálculo solo es válido para edificios de hasta 60 metros de altura.

1.8.12.3.2 ZONA EÓLICA

Determinamos las coordenadas geográficas del emplazamiento en el mapa adjunto en el anexo²⁶. En función del emplazamiento en el que se encuentre la obra las condiciones climáticas cambiarán.

²⁶ GG - MAPA DE ZONAS EÓLICAS. Página 143

Es importante conocer este dato para poder determinar las cargas de viento y nieve a la que será sometido el vidrio a colocar.

1.8.12.3.3 CARGA TOTAL DE VIENTO SOBRE LOS EDIFICIOS

Para edificios de planta rectangular o combinación de rectángulos, se considerará una presión (**P**) a barlovento y una succión (**S**) a sotavento, sobre cada metro cuadrado de la fachada del edificio, cuya suma (**Q**) se obtiene en función de la altura (**H**) sobre el nivel de suelo, de la zona eólica y de la situación topográfica del emplazamiento del edificio.

Se considera una situación topográfica expuesta: Las costas, las cumbres de montaña, desfiladeros, bordes de meseta y aquellos lugares en que pueden preverse vientos locales de intensidad excepcional.

Para el cálculo de la carga sobre acristalamiento y otras superficies en que pueda haber huecos abiertos se tomará el valor (**Q**) de la tabla que encontraremos en el anexo²⁷.

Con tal de encontrar el valor de la carga total de viento (**Q**), necesitaremos conocer los siguientes valores:

- ❖ Zona eólica
- ❖ Situación topográfica.
- ❖ Altura (**h**) sobre nivel del suelo.

1.8.12.3.4 ESPESOR DE LOS VIDRIOS

Existe una tabla resumen en el manual del vidrio²⁸ en la que se indican los espesores, longitud y ancho de los vidrios para las diferentes presiones debidas a la acción del viento, según la zona eólica y situación topográfica del edificio. Ésta tabla solo contempla vidrios de hasta 280 cm de base y de altura. Dado que el objeto de estudio se excede considerablemente de las dimensiones anteriormente indicadas, no se ha considerado oportuno tener presente la tabla, por ese motivo realizaremos el estudio a partir de las fórmulas que aparecen en el manual del vidrio.

Partiendo del ejemplo anterior y de que el acristalamiento está enmarcado a 4 lados, encontramos los siguientes valores:

$$\frac{L}{l} = \frac{5,6157}{2,6755} = 2,098$$

Partiendo del valor que nos aparece, y dado que $L/l \leq 3$, utilizaremos la siguiente fórmula:

$$e = \sqrt{\frac{S \cdot P}{72}}$$

Siendo:

e = Espesor nominal de fabricación del vidrio. (mm)

S = Superficie total del acristalamiento (m²)

P = Presión carga total de viento (Pa)

²⁷ H - CARGA TOTAL DE VIENTO (Q). Página 144

²⁸ [31] página 134

Dado que en apartados anteriores se han encontrado los valores anteriores, encontramos que:

$$e = \sqrt{\frac{(10,87) \cdot (820)}{72}} = 11,126 \text{ mm}$$

1.8.12.3.5 OTROS TIPOS DE VIDRIO

En el caso de los vidrios armados, templados, laminados y cámara, se obtiene el espesor (**Et**) mínimo teórico, multiplicando el espesor (**e**) hallado en la tabla que encontraremos en el anexo²⁹ por un coeficiente de equivalencia, según el archivo que encontraremos en el anexo.

$$E_t = \varepsilon \cdot e$$

En el caso de los vidrios laminados y aislantes (cámara climalit) el espesor (**Et**) es la suma de los espesores de los vidrios que los componen (Cuando la diferencia de espesores de sus componentes es como máxima de 2mm).

Los coeficientes (**ε**) de los vidrios laminados y aislantes son aplicables tanto si sus componentes son templados o no.

Dado que nos encontramos con un vidrio de doble cámara, deberemos aplicar un coeficiente de corrección $\square = 1.5$

$$e_t = \square \cdot e = 1,5 \cdot 11,126 = 16,68 \text{ mm}$$

La suma de los espesores que componen el vidrio utilizado (5+5/16/6+6) es de 22 mm.

Podemos afirmar que el espesor del vidrio seleccionado es el correcto.

1.8.12.3.6 PROPIEDADES TÉRMICAS (VALOR U)

La transmitancia térmica U (anteriormente K) se define como la cantidad de calor que atraviesa el acristalamiento en estado estable, por unidad de superficie, para lograr una diferencia de temperatura de 1°C entre las dos atmósferas a cada lado de la hoja de vidrio.

- Cuanto mayor sea la transmitancia térmica, menor es el efecto de aislamiento térmico del elemento.

- Cuanto menor sea el valor U, mejor es la aislación térmica y menor es la pérdida de calor a través del elemento.

Por ejemplo, en nuestro caso, que nos encontramos con un valor **U = 1 W/ (m²·K)** pierde por hora, por cada metro cuadrado de superficie y por cada grado de diferencia de temperatura entre el interior y el exterior una cantidad de calor de 1 Watt. Por ejemplo, en el caso de este muro y con una temperatura exterior de ±0 °C, se necesita por cada m² de muro una fuente de calor de 20 W para mantener la temperatura del interior en 20 °C.

1.8.12.3.7 FACTORES LUMINOSOS:

²⁹ I - TABLA RECTIFICACIÓN ESPESORES. Página 161

Los factores luminosos se definen solo sobre la base de la parte visible del espectro solar (entre 380nm y 780 nm).

Los factores de transmisión τ_v (o TL) y la reflexión de la luz ρ_v (o RL) se definen respectivamente como las partes de la luz visible transmitida y reflejada por el vidrio.

La radiación absorbida por el vidrio no es visible, y por ese motivo no se suele tener en cuenta.

A continuación (Fig. 61) podemos ver una imagen en la que se indican que son los elementos anteriormente citados.

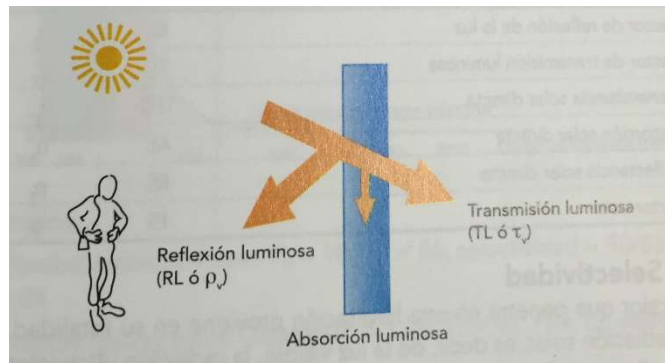


FIG. 61 - FACTORES LUMINOSOS DEL VIDRIO. FUENTE: AGC YOURGLASS POCKET

La transmisión luminosa (TL) es el porcentaje de luz transmitida por un vidrio al interior de un local.

En consecuencia, cuanto mayor TL, más grande será la cantidad de luz que penetra en el edificio, y menos iluminación eléctrica será necesaria durante el día.

Con tal de comparar, veremos valores de transmitancia luminosa que tienen diferentes tipos de vidrio:

- ❖ Los vidrios claros son conocidos por su alta capacidad para dejar pasar la luz. Vidrio simple claro: TL = 0,90. (En el caso de un vidrio claro, el 90 % de la intensidad luminosa es transmitida mientras que el 8 % es reflejada y el 2 % degradada a calor en el seno del material.)
- ❖ Los vidrios absorbentes permiten disminuir la fracción transmitida de la radiación solar en provecho de la fracción absorbida. Vidrio simple absorbente TL = 0,41
- ❖ Los vidrios reflectantes se caracterizan por un incremento de la proporción de radiación solar reflejada y una disminución de la fracción transmitida. Vidrio simple reflectante: TL = 0,32

En nuestro caso, nos encontramos con un valor TL de 0.65 y la reflexión 0.18 de ésta manera podemos afirmar que nuestro vidrio absorberá un 65% que se transmitirá al interior de la edificación, un 18% será la reflexión luminosa y un 17% la absorberá el conjunto.

1.8.12.3.8 FACTORES ENERGÉTICOS

Cuanto los rayos solares inciden en un vidrio, la radiación solar total (300nm y 2500nm) se divide en varias partes:

ρ_e (o ER) – Parte reflejada hacia el exterior, es la energía reflejada directamente por el acristalamiento.

τ_e (o ETD) – Parte transmitida a través del acristalamiento, es la energía transmitida directamente por el acristalamiento.

α_e (o EA) – Parte absorbida por el acristalamiento, es la energía absorbida directamente por el acristalamiento. Ésta se divide en: q_i (factor de transferencia térmica secundaria hacia el interior) y q_e (factor de transferencia térmica secundaria hacia el exterior)

Estos valores están relacionados entre sí por medio de las siguientes fórmulas:

$$\rho_e + \tau_e + \alpha_e = 100$$

$$\alpha_e = q_i + q_e$$

El factor solar g (o FS) representa la energía total transmitida a través del vidrio. Se trata, así pues, de la suma de la radiación transmitida directamente y de la radiación absorbida que devuelve al interior:

$$g = \tau_e + q_i$$

En la imagen siguiente se pueden ver todos los conceptos anteriormente descritos y su posición frente la lámina de vidrio:

A partir de lo anteriormente descrito, podremos encontrar más valores, a parte de los que el fabricante indica, partiendo de las fórmulas anteriores:

$$\rho_e = 28\%$$

$$\tau_e = 33\%$$

$$\alpha_e = 39\%$$

$$q_i = 6\%$$

$$q_e = 33\%$$

$$g = 39\%$$

1.9 DEFECTOS EN EL VIDRIO

El concepto de “defecto en vidrio” puede conllevar a la misma ambigüedad de descripciones que obtiene el propio vidrio, en el inicio de este documento ya se comentaron la gran diversidad de criterios con los que se definen esta clase de material.

Según comentó Gabriel Adriñan en la conferencia de las Jornadas del vidrio de 2008, podríamos considerar un defecto de un vidrio, a cualquier discontinuidad no deseada detectable por medios físicos, químicos u ópticos del material en estudio, tomando como "ensayo en blanco" a un vidrio patrón de características claramente especificadas.

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

La gran mayoría de defectos que suelen afectar al vidrio influyen en la disminución de transparencia y un aumento de la fragilidad.

Los defectos de homogeneidad química suelen aparecer antes del proceso de conformado (después de la fusión). Cuando son heterogeneidades físicas suelen producirse a partir del moldeo, pero solo se manifiestan después del conformado.

Cuando aparece un defecto, primero debemos conocer sus síntomas, para así poder determinar la causa de la aparición de éste y el tratamiento más idóneo.

Los defectos no solo aparecen durante el proceso de fabricación, sino que también pueden aparecer durante su almacenaje u servicio.

No existe ninguna clasificación estándar que clasifique y determine los defectos relacionados con el vidrio, pero nos ha parecido interesante el esquema que se marca en el libro Terminología de los defectos del vidrio³⁰ para explicar todos los defectos con los que nos podemos encontrar.

En el anexo³¹ de este documento se encontrará un listado de tipos de defectos más comunes y sus características.

³⁰ [3] página 132

³¹ J - DEFECTOS. Página 145

BLOQUE 2 - CASOS A ESTUDIAR

2.1 POSIBLE ROTURA POR CHOQUE TÉRMICO

2.1.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO

El vidrio es un material al que hoy en día se le dan una gran variedad de usos y aplicaciones. Como ya sabemos, el vidrio presenta un complejo comportamiento mecánico a las sollicitaciones externas a las que está sometido a lo largo de su vida útil.

Es por ese motivo por el que cada vez sea más imprescindible conocer el material profundamente para adaptarlo correctamente a la aplicación a la que ha sido requerido.

Para analizar la fractura de un vidrio podemos emplear desde la observación, a simple vista, como la observación con la ayuda de microscopios electrónicos. En investigación tiene mucho más interés las fracturas controladas, pero, como es evidente, la mayoría de las fracturas con las que nos encontramos se presentan una vez se le han dado utilidad a los vidrios, por lo que hay que analizar a posteriori las posibles causas que las motivaron, siendo a veces realmente compleja su interpretación.

Uno de los principales objetivos en la edificación a día de hoy, es la de reducir costes y tratar de prever, en la medida de lo posible, los problemas que puedan ocasionar materiales mal prescritos. Para, de ésta manera, poder ajustarse económicamente a las valoraciones iniciales y no crear problemáticas hacia el usuario final.

Por lo que se refiere al objetivo principal de éste apartado, podríamos definir dos de muy claros: Un primero es estudiar los tipos de fractura del vidrio e intentar definir cuál ha sido la causa más probable de fractura de un elemento. El segundo objetivo se basa en estudiar si realmente es posible poder prever una ruptura de éste tipo, prescribiendo unos parámetros básicos para reducir la probabilidad de fractura por ese motivo.

2.1.2 EXPOSICIÓN DEL CASO

La construcción de objeto de este informe, se trata de una vivienda de nueva edificación situada en Girona. Dicha construcción, en la que todavía no han finalizado sus obras de construcción, está en fase de acabados.

La vivienda, consta de tres cuerpos distintos, los tres con forma circular en planta. El elemento de estudio de éste informe, es el cuerpo principal, donde se localiza el dormitorio principal, la cocina y el comedor. Este cuerpo, es soportado, en gran parte, por un gran pilar central situado en el centro de la estancia, en la planta baja de la planta piso de ésta misma construcción. Los muros de fachada se unen con la propia cubierta para formar el cerramiento exterior del conjunto.

Los cerramientos acristalados de los que consta la vivienda tienen formas muy complejas y dimensiones considerables. A su vez, el propio cerramiento exterior forma un saliente que proyecta sombra sobre el cerramiento de vidrio, dependiendo de la disposición de los rayos del sol.

Todavía no existen sistemas de calefacción y ventilación de ningún tipo y se aprecia dentro de la instalación unas altas temperaturas.

Las características del vidrio a estudiar, son las siguientes:

Dimensiones (BxH): **561,57 x 267.55 cm**
Área: **10.87 m²**
Peso: **595,10 kg**

Composición:

VIDRIO CAMARA LAMINAR 66.1 GUARDIAN SUN / 16 GAS / LAMINAR 55.1.

En el anexo³² de este documento, se adjuntan las fichas técnicas del material facilitadas por el propio fabricante.

Para facilitar la comprensión de la localización del vidrio en obra, a continuación una imagen del vidrio una vez colocado, visto desde el exterior de la vivienda:



FIG. 62 - VIDRIO A ESTUDIAR VISTO DESDE EL EXTERIOR. FUENTE: VIDRES BERNI

En los anexos³³ se encuentran más imágenes de éste vidrio y del proceso de colocación de éste.

³² K – DECLARACIÓN DE PRESTACIONES. Página 161

³³ K – IMÁGENES. Página 162

La colocación de éste vidrio se realizó a finales de Marzo de 2015, a principios de Junio, se notificó al industrial que había realizado el suministro y colocación que este vidrio se había fracturado sin motivo aparente alguno.

Por lo que se refiere al soporte de vidrio a la estructura, en la parte superior, se soporta mediante pequeños ángulos de dimensiones 100x50 cm de acero inoxidable tipo aisi-316, repartidos a lo largo de la superficie y fijados directamente al forjado del edificio. En concreto, éste vidrio tiene 8 soportes en forma de ángulo.

En referencia al soporte inferior, éste se basa en un tubo de 40x40 mm, con un ángulo soldado en su parte superior de 45x30 mm todo en acero inoxidable aisi-304, alzado desde el suelo hasta dejarlo a nivel del suelo.



**FIG. 63 -
IMAGEN DE LA
FRACTURA.
FUENTE: VIDRES
BERNI**

Por lo que se refiere a los datos climatológicos de los que disponemos sobre el día de la ruptura, los de la ciudad cercana al emplazamiento de la obra que dispone de estación meteorológica, son los siguientes:

Día de la ruptura: **martes 08/06/2015**

Temperatura máxima: **34 °C**

Temperatura mínima: **16 °C**

Por lo que se refiere a los datos medios históricos en la misma fecha y misma localización, encontramos los siguientes:

Temperatura media máxima histórica: **24 °C**

Temperatura media mínima histórica: **13 °C**

La fuente de los datos es el Servei meteorològic de Catalunya.

A continuación, en croquis, la figura (aproximada) que forma el vidrio a fracturarse:

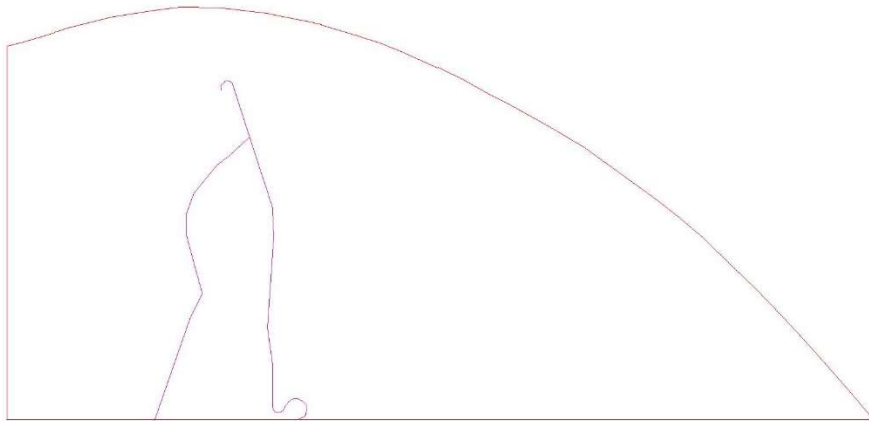


FIG. 64 - FRACTURA DEL VIDRIO EN CROQUIS

Como vemos, se ha fracturado con formas, en su mayoría, de trazado circular y dos de sus grietas se unen en un mismo punto superior, aunque surgen de dos extremos inferiores distintos.

En la parte superior, la grieta termina de la siguiente manera:



FIG. 65 - DETALLE DE LA GRIETA EN LA PARTE SUPERIOR DEL VIDRIO. FUENTE: VIDRES BERNI.

Como podemos comprobar en la imagen, la grieta del vidrio no llega hasta el extremo superior del vidrio, si no que finaliza con un pequeño rizo en la punta.

No se visualiza ningún tipo de impacto en todo el recorrido que realiza la grieta, ni en la parte interior del vidrio ni en la exterior. Por lo que, desde un primer momento, se descarta que la aparición de la fractura sea debida a un impacto.

Debido a lo anteriormente descrito, y después de una reunión con la dirección facultativa de la obra, las dos hipótesis que se barajan son la de rotura por choque térmico o la rotura por cambios en la estructura del propio edificio.

Es importante determinar cuál de las dos hipótesis es la más probable, dado que a partir de ellos definiremos de quién es la

responsabilidad (económica) de hacerse cargo de la reparación de éste elemento.

2.1.3 PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

El objeto de estudio de éste documento es el de conocer en mayor profundidad las características del vidrio, por ese motivo, se ha creído conveniente estudiar los aspectos de la hipótesis de fractura de vidrio por choque térmico. De ésta manera podremos verificar la hipótesis o refutarla.

Los campos que se estudiarán serán los siguientes:

1. Verificación de que el vidrio prescrito es el adecuado dado el emplazamiento, el clima y las dimensiones de éste.
2. Estudio de la morfología de la grieta y análisis del proceso de fractura. Por medio de teorías de fractura (mecánica de fractura) y características teóricas del vidrio, podremos determinar si el patrón de rotura que sigue coincide con el de rotura por stress térmico.
3. Estudio de las condiciones climáticas en el momento de la fractura y análisis de las proyecciones de sombras en la superficie del vidrio.
4. Análisis del sistema de soporte del vidrio y su influencia en los cambios de temperatura.

Pese a que en los apartados anteriores ya se han enumerado las características principales del vidrio, se ha creído conveniente hacer un estudio más exhaustivo de algunos puntos específicos relacionados con la rotura del vidrio, para poder tener conocimientos suficientes para poder estar en condiciones de enumerar hipótesis.

Todo este estudio aparece en el apartado siguiente, donde se enumeran los fundamentos teóricos a tener presente y el análisis de éstos.

2.1.4 ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Cuando creamos un cerramiento de vidrio, éste estará sometido a la radiación y, por lo tanto, absorberá calor. Esto producirá un incremento en la temperatura del vidrio y le obligará a dilatar.

Dado que el vidrio a estudiar tiene una protección metálica perimetral, sus bordes recibirán menos calor y estarán a menor temperatura que el centro de la superficie, que recibirá toda la radiación. Consecuentemente, la masa del vidrio situada en el centro necesitará dilatar más que lo extremos y esto generará una tensión entre ambos (stress térmico) que podrá producir la rotura del vidrio.

A continuación, se estudian los 4 ámbitos indicados en el apartado anterior, con tal de verificar cuál ha sido el tipo de rotura más probable y verificar que las prescripciones de material han sido las adecuadas.

2.1.4.1 TIPO DE VIDRIO

En el momento de escoger el tipo de vidrio a utilizar en construcción se suele cometer el gran error de tan solo tener en cuenta sus características estéticas. Esto se acaba convirtiendo, a la larga, en grandes problemas de confort térmico, acústico o roturas espontáneas.

Para realizar una selección del tipo de vidrio, se debe realizar un buen análisis previo en el que se tengan en cuenta las propiedades “invisibles” del vidrio, no solo las estéticas. Se deberá escoger la tipología de vidrio acorde con el uso que se le vaya a dar y un espesor adecuado.

A su vez, se deberán tener en cuenta aspectos tales como la orientación del edificio, el clima, la presión esperada de viento, el régimen de nevadas y la altura del edificio. Estos parámetros anteriormente indicados nos definirán los requisitos que deberá tener el vidrio.

A continuación, se realiza un análisis de la tipología de vidrio utilizado y de los requisitos mínimos a cumplir con tal de verificar que el vidrio que se ha instalado ha sido el adecuado y una mala elección del vidrio no ha sido el culpable de la fractura.

Como se ha indicado en apartados anteriores, la composición del vidrio utilizado es la siguiente:

VIDRIO CAMARA LAMINAR 66.1 GUARDIAN SUN / 16 GAS / LAMINAR 55.1

Esto quiere decir que tenemos un vidrio aislante (con cámara de aire), formado por un vidrio laminar de seguridad 6+6 con butiral transparente que, a su vez, tiene un tratamiento de control solar en la cara interior. Una cámara de aire de 16 mm formada por gas argón y posteriormente un vidrio laminar de seguridad 5+5 con un butiral transparente en el interior.

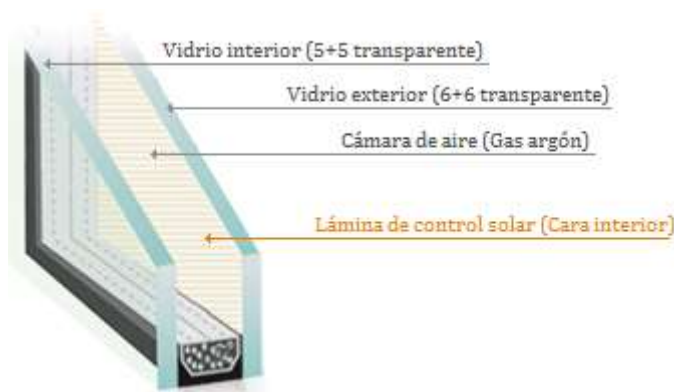


FIG. 66 - SECCIÓN DEL VIDRIO, INDICANDO LAS PARTES QUE LO COMPONEN.

En apartados anteriores ya se han comentado las diferencias entre las tipologías de vidrio, por lo que no nos ha parecido importante volver a recordar conceptos tales como que es un vidrio laminar de seguridad (Ver apartado 1.4.4.5).

De ésta manera, podremos determinar si, efectivamente, la elección de la tipología del vidrio fue la más óptima.

2.1.4.1.1 ANÁLISIS DE LAS PRESTACIONES DEL VIDRIO

Si nos basamos en lo que se ha indicado anteriormente por lo que se refiere a vidrios aislantes y vidrios de control solar, podríamos dar como correcta la elección de la tipología de vidrio. Aun así, dado que tenemos los certificados del fabricante en el anexo³⁴ en el que se indican cada una de las prestaciones del vidrio utilizado, se analizarán profundamente éstas para poder corroborar que realmente estábamos trabajando con una composición adecuada.

2.1.4.1.1.1 RESISTENCIA AL IMPACTO DE CUERPO PENDULAR

En el Documento de Apoyo al Documento Básico DB-SUA Seguridad de utilización y accesibilidad Código Técnico de la Edificación (DA DB-SUA / 1), se indican las prestaciones que debe cumplir un vidrio frente a un impacto y los ensayos a realizar para corroborar que cumple con la norma.

Según el documento anterior, el valor que nos da el fabricante es **1(B)1**. Esto querrá decir que, en caso de rotura, aparecerán numerosas grietas en la superficie pero que los fragmentos permanecerán juntos y no se separarán (no produciendo riesgo de impacto ni proyección de vidrios al vacío en caso de rotura).

Por lo que se refiere al valor (1) último, nos indica que se podría instalar éste vidrio en zonas con desnivel superior a 12 metros. Dado que la altura en la que se sitúa el vidrio respecto el nivel del

³⁴ K - PRESTACIONES DEL VIDRIO. Página 161

suelo es de 6 metros, lo daríamos por válido.

2.1.4.1.1.2 RESISTENCIA A VARIACIONES BRUSCAS DE TEMPERATURA

En la imagen podemos comprobar que se indica que el máximo diferencial de temperatura que puede llegar a soportar un vidrio sin romperse es de 40K.

Esto implica que la ruptura se da en el caso de que haya una diferencia de 40 unidades de kelvin. La temperatura se da en kelvin con tal de cumplir con lo que dicta el sistema internacional. Aun así, y partiendo de que pese a que la posición del cero absoluto difiere en las escalas de kelvin y de grados Celsius, podemos afirmar que éste diferencial también podría definirse como 40ª centígrados.

2.1.4.1.1.3 RESISTENCIA AL VIENTO, NIEVE, CARGA EN MM.

El valor que el fabricante indica, no es más que la composición del vidrio. Para tener en cuenta si la prescripción ha sido la correcta, deberemos seguir las directrices que nos marca el manual del vidrio.

2.1.4.1.1.3.1 ÁMBITO DE APLICACIÓN

Es importante indicar que éste cálculo solo es válido para edificios de hasta 60 metros de altura.

2.1.4.1.1.3.2 ZONA EÓLICA

Determinamos las coordenadas geográficas del emplazamiento en el mapa de las zonas eólicas³⁵. Partiendo de que, tal y como se indicó previamente, el emplazamiento de la obra está en Girona, encontramos que la zona pertenece al **grupo Y**.

2.1.4.1.1.3.3 CARGA TOTAL DE VIENTO SOBRE LOS EDIFICIOS

Para edificios de planta rectangular o combinación de rectángulos, se considerará una presión (**P**) a barlovento y una succión (**S**) a sotavento, sobre cada metro cuadrado de la fachada del edificio, cuya suma (**Q**) se obtiene en función de la altura (**H**) sobre el nivel de suelo, de la zona eólica y de la situación topográfica del emplazamiento del edificio.

Se considera una situación topográfica expuesta: Las costas, las cumbres de montaña, desfiladeros, bordes de meseta y aquellos lugares en que pueden preverse vientos locales de intensidad excepcional.

Para el cálculo de la carga sobre acristalamiento y otras superficies en que pueda haber huecos abiertos se tomará el valor (**Q**). Con tal de encontrar el valor de la carga total de viento (**Q**), necesitaremos conocer los siguientes valores:

- ❖ Zona eólica: Zona Y.
- ❖ Situación topográfica: Expuesta
- ❖ Altura (h) sobre nivel del suelo: 6 metros

³⁵ ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. pag. 90

Partiendo de los anteriores puntos, encontramos que $Q = P = 82 \text{ Kp/m}^2$

$P = 820 \text{ Pa}$

2.1.4.1.1.3.4 ESPESOR DE LOS VIDRIOS

Existe una tabla resumen en la que se indican los espesores, longitud y ancho de los vidrios para las diferentes presiones debidas a la acción del viento, según la zona eólica y situación topográfica del edificio. Ésta tabla solo contempla vidrios de hasta 280 cm de base y de altura. Dado que el objeto de estudio se excede considerablemente de las dimensiones anteriormente indicadas, no se ha considerado oportuno tener presente la tabla, por ese motivo realizaremos el estudio a partir de las fórmulas que aparecen en el manual del vidrio.

El acristalamiento está enmarcado a 4 lados y la división entre ambos lados es la siguiente:

$$\frac{L}{l} = \frac{5,6157}{2,6755} = 2,098$$

Partiendo del valor que nos aparece, y dado que $L/l \leq 3$, utilizaremos la siguiente fórmula:

$$e = \sqrt{\frac{S \cdot P}{72}}$$

Siendo:

e = Espesor nominal de fabricación del vidrio. (mm)

S = Superficie total del acristalamiento (m^2)

P = Presión carga total de viento (Pa)

Dado que en apartados anteriores se han encontrado los valores anteriores, encontramos que:

$$e = \sqrt{\frac{(10,87) \cdot (820)}{72}} = 11,126 \text{ mm}$$

2.1.4.1.1.3.5 OTROS TIPOS DE VIDRIO

En el caso de los vidrios armados, templados, laminados y cámara, se obtiene el espesor (E_t) mínimo teórico, multiplicando el espesor (e) hallado en la tabla anterior por un coeficiente de equivalencia, según el cuadro del anexo³⁶:

$$E_t = \epsilon \cdot e$$

En el caso de los vidrios laminados y aislantes (cámara climalit) el espesor (E_t) es la suma de los espesores de los vidrios que los componen (Cuando la diferencia de espesores de sus componentes es como máxima de 2mm).

Los coeficientes (ϵ) de los vidrios laminados y aislantes son aplicables tanto si sus componentes son templados o no.

Dado que nos encontramos con un vidrio de doble cámara, deberemos aplicar un coeficiente de corrección $\epsilon = 1.5$

$$e_t = \epsilon \cdot e = 1,5 \cdot 11,126 = 16,68 \text{ mm}$$

La suma de los espesores que componen el vidrio utilizado (5+5/16/6+6) es de 22 mm.

³⁶ I - TABLA RECTIFICACIÓN ESPESORES. Página 144

Podemos afirmar que el espesor del vidrio seleccionado es el correcto.

2.1.4.1.2 PROPIEDADES TÉRMICAS (VALOR U)

En este caso nos encontramos con un valor $U = 1 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ pierde por hora, por cada metro cuadrado de superficie y por cada grado de diferencia de temperatura entre el interior y el exterior una cantidad de calor de 1 Watt. Por ejemplo, en el caso de este muro y con una temperatura exterior de $\pm 0 \text{ }^\circ\text{C}$, se necesita por cada m^2 de muro una fuente de calor de 20 W para mantener la temperatura del interior en $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.1.4.1.3 FACTORES LUMINOSOS

Los factores luminosos se definen solo sobre la base de la parte visible del espectro solar (entre 380nm y 780 nm).

Los factores de transmisión τ_v (o TL) y la reflexión de la luz ρ_v (o RL) se definen respectivamente como las partes de la luz visible transmitida y reflejada por el vidrio.

La radiación absorbida por el vidrio no es visible, y por ese motivo no se suele tener en cuenta.

A continuación podemos ver una imagen en la que se indican gráficamente que son los elementos anteriormente citados.

La transmisión luminosa (TL) es el porcentaje de luz transmitida por un vidrio al interior de un local.

En consecuencia, cuanto mayor TL, más grande será la cantidad de luz que penetra en el edificio, y menos iluminación eléctrica será necesaria durante el día.

Con tal de comparar, veremos valores de transmitancia luminosa que tienen diferentes tipos de vidrio:

- ❖ Los vidrios claros son conocidos por su alta capacidad para dejar pasar la luz. Vidrio simple claro: TL = 0,90. (En el caso de un vidrio claro, el 90 % de la intensidad luminosa es transmitida mientras que el 8 % es reflejada y el 2 % degradada a calor en el seno del material.).
- ❖ Los vidrios absorbentes permiten disminuir la fracción transmitida de la radiación solar en provecho de la fracción absorbida. Vidrio simple absorbente TL = 0,41
- ❖ Los vidrios reflectantes se caracterizan por un incremento de la proporción de radiación solar reflejada y una disminución de la fracción transmitida. Vidrio simple reflectante: TL = 0,32

En nuestro caso, nos encontramos con un valor TL de 0.65 y la reflexión 0.18 de ésta manera podemos afirmar que nuestro vidrio absorberá un 65% que se transmitirá al interior de la edificación, un 18% será la reflexión luminosa y un 17% la absorberá el conjunto.

2.1.4.1.4 FACTORES ENERGÉTICOS

Tal u como se ha visto en el apartado anterior (ver 1.8.12 página 82) encontramos los siguientes valores:

$q_e = 28\%$
 $\tau_e = 33\%$
 $\alpha_e = 39\%$
 $q_i = 6\%$
 $q_e = 33\%$
 $g = 39\%$

2.1.4.2 MORFOLOGÍA DE LA GRIETA

Si nos basamos en el libro de “Los Vidrios” de Eduardo A. Mari, veremos que nos encontramos con dos casos distintos. Ver apartado anterior.

La grieta tiene formas curvadas, E. Mari especifica que cuando la grieta es curvada quiere decir que ésta ha tenido bajas velocidades de propagación y suele ser resultado de una rotura por choque térmico.

Por otro lado, aunque la grieta es curvada, también nos encontramos que ésta se bifurca en un momento dado, dando como resultado dos partes simétricas.

En ausencia de tensiones y heterogeneidades en el vidrio, y si el esfuerzo aplicado es elevado, la fractura se bifurcará de forma simétrica. La distancia del punto de origen a la cual aparece la bifurcación de la grieta, es inversamente proporcional al cuadrado de la tensión de fractura inicial y no depende de la velocidad de propagación. El ángulo de una bifurcación simple, en ausencia de tensiones, será de 45°

Aunque se cumple que hay un ángulo de bifurcación simple de (aproximadamente) 45° y se ha bifurcado de forma simétrica en un primer tramo.

A partir de lo anteriormente citado, diremos que nos encontramos ante una fractura de alta tensión, en la que ha habido tanta energía almacenada en su interior que ésta se ha propagado en dos ramas distintas pero con una baja velocidad de propagación.

La causa más probable de rotura del vidrio ha sido por choque térmico (o stress térmico).

2.1.4.3 CONDICIONES CLIMÁTICAS

2.1.4.3.1 VERIFICACIÓN CUMPLIMIENTO CTE

2.1.4.3.1.1 TRANSMITANCIA TÉRMICA

En éste caso, la fórmula sirve para indicar la transmitancia del conjunto vidrio + marco, dado que en éste caso ambos valores de transmitancia es $1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, no será necesario el cálculo, por lo que **$U_H = 1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$**

Si nos vamos al DB-HE CTE y buscamos el emplazamiento de la obra, vemos que la provincia de Girona está considerado zona D2. Partiendo de la orientación de la fachada y el % de huecos del edificio, encontramos la transmitancia límite, que es **$2.1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$** .

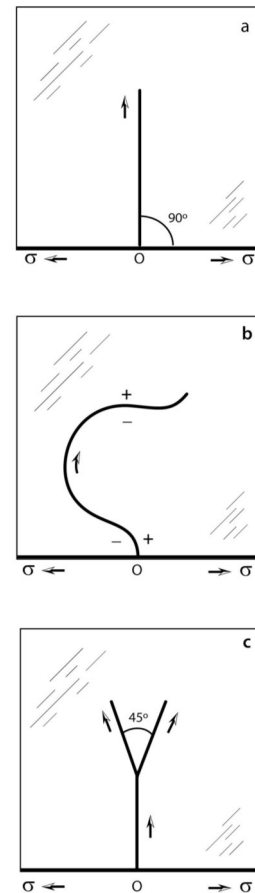


FIG. 67 - TIPOS DE PROPAGACIÓN DE LA FRACTURA EN EL VIDRIO. FUENTE: LOS VIDRIOS, E. MARI.

Por consiguiente, podemos afirmar que la transmitancia térmica del conjunto era la adecuada dado el emplazamiento de la obra.

2.1.4.3.1.1.1 FACTOR SOLAR

El factor solar está relacionado con la cantidad de radiación que entra en el edificio, a mayor “g” del vidrio, mayor factor solar.

Aplicaremos la fórmula siguiente:

$$F = F_s \cdot [(1-F_m) \cdot g + F_m \cdot 0,04 \cdot U_m \cdot \alpha]$$

F_s = Factor de sombra para obstáculos de fachada. Aparece en la tabla E11 del código técnico, la encontramos en el anexo³⁷. A partir de esta encontramos los siguientes valores:

L = 167,6 cm
H = 267,4
D = 0
Orientación = NE

D/H = 0
L/H = 0,6267

A partir de los valores anteriores, partiendo de la tabla E11 obtenemos que **F_s = 0,71**

F_m = Parte de la ventana que corresponde al marco. Se encuentra a partir de la operación siguiente: $F_m = 1 - F_v$, siendo F_v la parte de la ventana que corresponde dividiendo los m² de cristal por los m² de hueco.

A partir del dibujo en AutoCad del que disponemos, podemos afirmar las siguientes áreas:

Área del Hueco: 11,4139 m²

Área del vidrio: 10,87 m²

Por lo tanto, $F_v = 10,87/11,4139 = 0,9523$

$F_m = 1 - F_v = 1 - 0,9523$. **F_m = 0,0473**

El Factor solar (g_s) nos lo da el fabricante **$g_s = 0,39$**

La absorvividad, (α) la encontramos en la tabla E10³⁸. **$\alpha = 0,40$**

A partir de los datos anteriores, podemos encontrar el factor solar modificado:

$$F_h = 0,71 \cdot [(1-0,0473) \cdot 0,39 + 0,0473 \cdot 0,04 \cdot 1 \cdot 0,40]$$

F_h = 0,2635

Una vez encontrado el factor solar modificado, debemos realizar el comparativo respecto el factor solar límite, que se indica en función de la zona climática de España en el DB-HE CTE. Partiendo

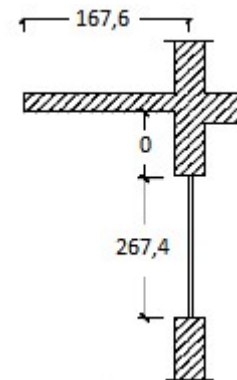


FIG. 68 - DIMENSIONES PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR SOMBRA. SECCIÓN DEL CERRAMIENTO.

³⁷ K - TABLA E.11 CTE. Página 163

³⁸ K- TABLA E 10 CTE. Página 163

del emplazamiento de la obra, del % de huecos y de la orientación de la fachada, encontramos que no hay ningún valor establecido para este tipo de situaciones..

La norma indica que nuestro factor debe ser inferior al denominado factor límite medio, dado que no se indica ningún valor debido a la orientación del edificio, podemos considerar correcta la prescripción del vidrio y el cumplimiento con el CTE.

2.1.4.3.1.1.2 PROYECCIÓN DE SOMBRAS

La idea de este apartado es ver como se proyectan las sombras en el vidrio a estudiar a lo largo del día de la fractura, de esta manera podremos corroborar si se trata de sombras perjudiciales o por el contrario son aceptables y no han provocado la ruptura.

En un primer momento se comenzó realizando el estudio de proyección de sombras por medio de los ábacos, tal y como se comentaba en el apartado anterior 1.8.6.2.3, pero se acabó descartando por su complejidad.

Finalmente se decidió hacer una representación gráfica del edificio en el que se encuentra nuestro vidrio, con sus dimensiones reales. Después de indicar ciertos datos importantes (como la situación del norte y la fecha) hemos conseguido ver representada la proyección de las sombras en nuestro vidrio.

Aunque en el anexo³⁹ se pueden observar la evolución de las sombras a lo largo de la franja horaria que comprende desde las 6:30 hasta las 12:00 a continuación solo se enumeraran las imágenes más representativas que nos han ayudado en el momento de realizar el estudio.

Veamos la sombra que se proyecta a primera hora de la mañana, a las 6:30h de la mañana aproximadamente:

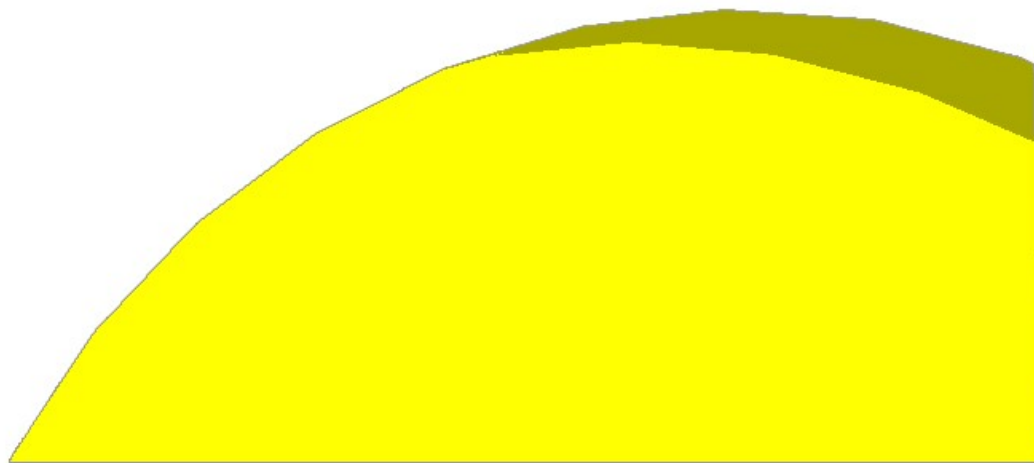


FIG. 69 - PROYECCIÓN DE SOMBRAS A LAS 6:30 H

Según la imagen anterior, el área sombreada pertenece a un 7,53 % de la superficie total del vidrio.

Debemos recordar que la máxima tensión térmica se produce cuando una superficie igual o menor al 25% de una pieza está afectada por una sombra estática o permanente y/o el perímetro del sector sombreado ocupa más de un 25% de la pieza de vidrio. La sombra se considera estática cuando su duración es igual o mayor a 4 horas; si es menor, es una sombra móvil.

³⁹ K - EVOLUCIÓN DE LAS SOMBRAS. Página 163

Por ese motivo, se busca la franja horaria en la que el área de la sombra proyectada supera el 25% del área total del vidrio, después de estudiarlo, vemos que es a partir de las 8:30h de la mañana:

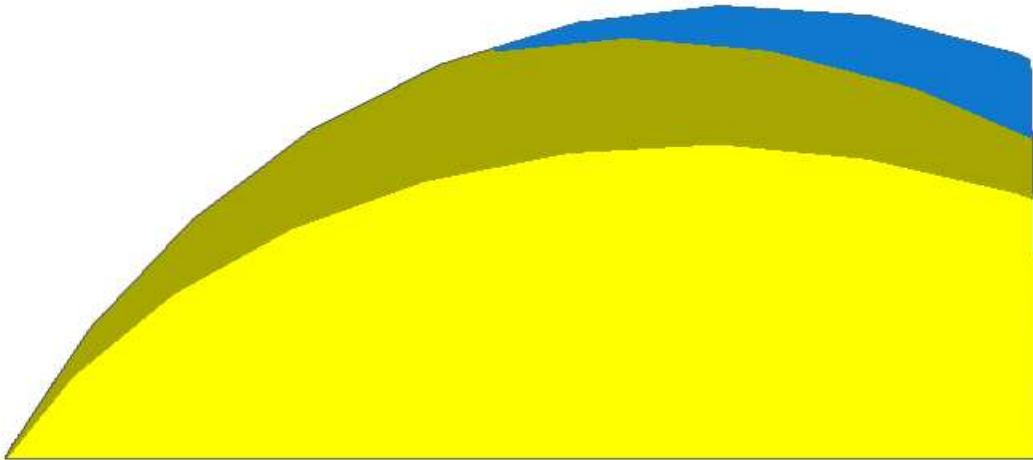


FIG. 70 - PROYECCIÓN DE SOMBRAS A LAS 8:30H. EL SOMBREADO AZUL REPRESENTA LA PROYECCIÓN DE SOMBRAS QUE TENIAMOS A LAS 6:30H

A partir de las 8:15 de la mañana la sombra supera el 25% de la superficie. A partir de ese momento la sombra se extiende proporcionalmente hasta cubrir toda la superficie del vidrio. Como podemos comprobar, la zona sombreada en azul se podría considerar como estática, por consiguiente, es muy probable que se produjera acumulación de tensiones en esta zona.

Según lo indicado anteriormente, el perímetro también es muy importante para tener en cuenta la aparición de estas tensiones. El perímetro total del elemento a estudiar es de 14.32 m. A las 6:30 de la mañana el perímetro sombreado es un 21.23%, a las 8:30h de la mañana el perímetro supera un 45%.

Después de lo anteriormente descrito, podemos corroborar que **no solo por el área de sombreado, sino que también por el perímetro, la sombra que se proyecta es perjudicial para el vidrio y es muy probable que haya sido lo que ha provocado la fractura.**

2.1.4.4 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE SOPORTE

Será de gran importancia conocer el material del marco y sus características; dado que éste influenciará en gran parte al comportamiento del vidrio a lo largo de su vida útil.

Si el marco de la ventana no es buen conductor, como por ejemplo de madera o PVC, la temperatura de los bordes será menor y, por lo tanto, el stress térmico será mayor que con otros materiales.

No solo nos interesa conocer el material, el color del marco también será importante. Como ya sabemos, los colores oscuros absorben más el calor, esto implicará que la temperatura del borde sea superior y el stress térmico disminuya.

Si el marco está aislado térmicamente del muro, los bordes del vidrio se calentarán más rápidamente y el stress térmico disminuirá. Por el contrario, si el marco está en contacto directo con la estructura del edificio, los bordes del vidrio perderán calor por conducción hacia la masa fría del muro; Esto disminuirá la temperatura del marco y aumentará las tensiones acumuladas por stress térmico.

2.1.4.4.1.1 PROPIEDADES DEL HUECO EN OBRA

El hueco en obra se considera uno de los elementos más débiles desde el punto de vista del aislamiento térmico, dado que permite grandes fugas de calor en invierno y una gran cantidad de aportes solares en verano. Ello conlleva a un mayor gasto energético, ya sea en calefacción como en aire acondicionado con tal de mantener los niveles de confort adecuados.

Utilizar unos materiales adecuados, así como asegurar el buen estado de conservación de estos serán esenciales para conseguir reducir las pérdidas energéticas.

2.1.4.4.1.2 LA FUNCIÓN DEL MARCO

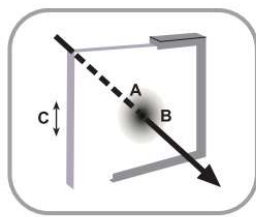
El marco en una ventana o un cerramiento de vidrio suele ocupar entre un 25% y un 35% de la superficie total del hueco. Entre sus principales propiedades por lo que se refiere al aislamiento térmico podríamos considerar su transmitancia térmica como el parámetro más importante a tener en cuenta.

Podemos clasificar los marcos en función del material del que están fabricados:

- **Metálicos:** Por norma general están fabricados en aluminio o acero. Tiene un gran abanico de posibilidades de acabados estéticos y su área respecto la superficie total del hueco en obra suele estar sobre los 25%. Su transmitancia térmica suele ser $U=5,7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
- **Metálicos con RPT:** Este tipo de marco es muy similar al descrito en el apartado anterior pero en este caso se incorporan varios elementos separadores de baja conductividad térmica que separan los componentes interiores del marco. Estos separadores confieren al sistema de marco de un mejor comportamiento térmico. Los valores de transmitancia más comunes suelen ser de $4-3.2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.
- **Madera:** Son marcos formados por elementos macizos de madera, debido a su baja conductividad confiere al conjunto de un buen aislamiento térmico. Suele tener una presencia superior por lo que se refiere a % respecto el hueco en obra, por lo que su influencia sobre el factor solar modificado es mínima. El mayor inconveniente que suele tener este tipo de marcos es el mantenimiento que necesita la madera. Su transmitancia varía en función de la densidad y del tipo de madera utilizada, aunque suele oscilar entre $2.2-2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.
- **PVC:** Por norma general suelen ser perfiles huecos de PVC, que ofrecen unos valores de aislamiento térmico muy buenos. Igual que en el caso de los elementos de madera, suele tener gran importancia en % respecto el hueco total de la obra, por lo que el conjunto tiene un buen comportamiento por lo que se refiere al aislamiento térmico. Sus valores de transmitancia son de $2.2-1.8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

2.1.4.4.1.3 EL MARCO Y SU INFLUENCIA EN EL ESTRÉS TÉRMICO

Como ya se ha comentado en los apartados anteriores, la rotura por choque térmico se debe a que el vidrio, sometido a la radiación solar, eleva su temperatura y se dilata. Si el vidrio se encuentra dentro de un marco, los bordes recibirán menos calor y estarán a menor temperatura que el centro, que recibirá toda la radiación. Debido a esto el centro necesitará dilatar más que los extremos y esto generará una tensión entre ambas zonas, que puede inducir a la rotura del vidrio. Esto suele ocurrir cuando la diferencia de temperaturas entre las dos zonas supera los 40°C .



Generación de tensión térmica
 A: Caliente, trata de expandirse.
 B: frío, resiste la expansión.
 C: tensión de tracción.

FIG. 71 - GENERACIÓN DE TENSIÓN TÉRMICA. FUENTE: LIRQUEN

2.1.4.4.1.4 VERIFICACIÓN CUMPLIMIENTO CTE

Como se ha estudiado en anteriores ocasiones, la transmitancia es uno de los valores clave para poder conocer el comportamiento térmico de un conjunto de cerramiento y, por consiguiente, puede ser fundamental a la hora de establecer si el motivo ha sido choque térmico.

Como ya se ha comentado en anteriores ocasiones, no es necesario realizar el cálculo de la transmitancia, dado que nos viene dado por el propio proveedor que suministró e instaló los vidrios. De esta manera podemos afirmar que $UH = 1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

La transmitancia límite del hueco será la misma que se ha encontrado anteriormente para el vidrio, dado que viene dada por conjunto de elementos que conforman el hueco. La transmitancia límite será $2.1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Por consiguiente, podemos afirmar que la transmitancia térmica del conjunto era la adecuada dado el emplazamiento de la obra y que cumple con los parámetros indicados en el CTE.

2.1.4.4.1.5 EL SISTEMA DE SOPORTE Y LA TEMPERATURA

La elección del sistema de cerramiento propuesto para una edificación implica evaluar todos los aspectos que influirán en el funcionamiento de la abertura, como la presión del viento, la exposición a la lluvia, la proyección de sombras, las dimensiones del vano, el aislamiento térmico, acústico, etc. No solo eso, si no que la normativa vigente también nos establecerá unas garantías de seguridad y confort.

En este apartado nos centraremos en la distribución de temperaturas en el conjunto y la verificación de que este cumple con los parámetros establecidos por la norma actual.

Debido a que en los anteriores apartados se ha estudiado profundamente el tipo de vidrio escogido y la influencia del tipo de éste en la fractura, no se volverá a hacer hincapié en el tema. Aun así, debemos tener presente que el cerramiento actuará como conjunto (marco-vidrio) por lo que en este apartado se analizará el conjunto de los dos elementos y los materiales que lo envuelven. Lo primero que realizaremos es una sección del cerramiento a estudiar delimitando cada uno de los elementos que lo forman:

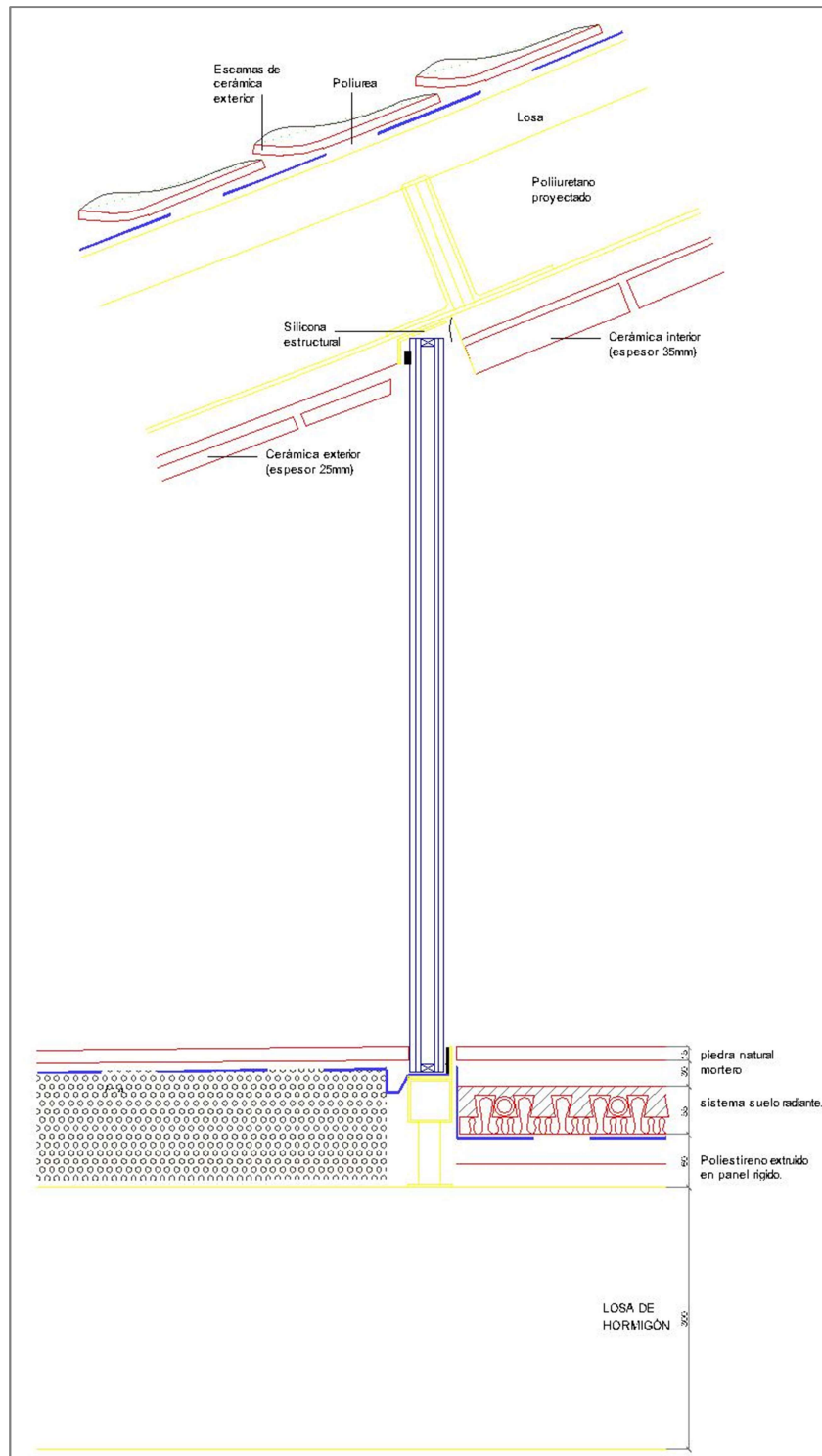


FIG. 72 - SECCIÓN DE MATERIALES UTILIZADOS EN OBRA. FUENTE: VIDRES BERNI

Ahora a partir de los materiales indicados, vamos a analizar la distribución de las temperaturas en el conjunto. Para lograrlo, utilizaremos el programa Therm.

Therm es un programa de cálculo de calor en 2 dimensiones en régimen estacionario, por lo que nos es especialmente útil para calcular las características térmicas de los puentes térmicos de los huecos y los sistemas de acristalamiento. No se cree conveniente explicar paso a paso el funcionamiento de este programa ni la metodología que se ha utilizado, dado que no se considera objeto de estudio de este proyecto.

Lo primero que hacemos es añadir cada uno de los materiales de los cuales se compone nuestra sección y darles a estos los valores facilitados por los fabricantes. Después se indican los parámetros de temperatura que hay en ese momento dado en el interior y exterior de la vivienda.

Se parte de las temperaturas que había el día 08/06/2016 a las 9 de la mañana. El motivo por el que se ha escogido esta hora es porque, después de estudiar la proyección de sombras en el vidrio, se considera uno de los momentos más desfavorables.

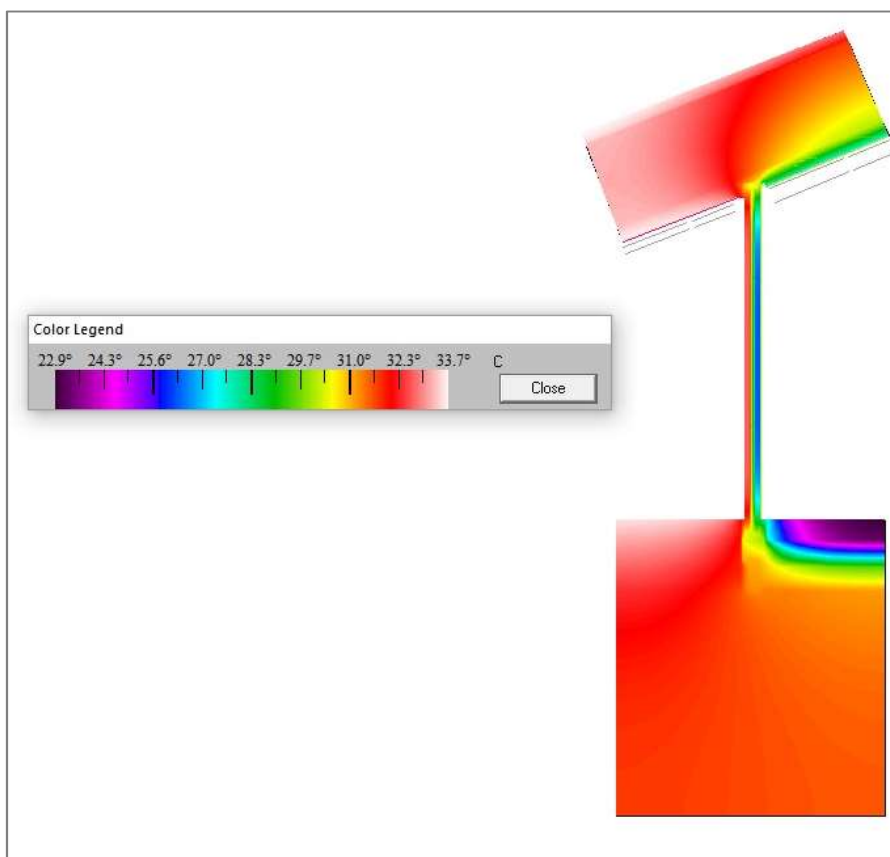


FIG. 73 - DISTRIBUCIÓN DE LAS TEMPERATURAS A PARTIR DE THERM.

A partir del cálculo con Therm nos aparecen diferentes gráficos⁴⁰ para poder visualizar la distribución de temperaturas. Entre otros, encontramos el flujo de vectores, las líneas isotermas y las gráficas de colores. En estas páginas aparece este último, porque nos ha parecido de mayor comprensión visual, pero las demás se pueden consultar en los anexos de este documento:

Como vemos en el gráfico según la leyenda, la mayor diferencia de temperatura se localiza en la zona central del vidrio. En esta vemos que la temperatura interior es de 25,6 °C y la exterior alcanza los 32,3°C.

⁴⁰ K - GRÁFICOS THERM. 168

La diferencia entre ambas es de 6,7°C, nada que ver con los 40°C de diferencia de temperatura para correr el riesgo de rotura por puente térmico. Aun así, este estudio podemos determinar que no es concluyente, dado que el programa informático no tiene en cuenta las proyecciones de sombras y, por lo tanto, el incremento de temperatura que puede llegar a tener el vidrio en una parte de su área debido a los rayos solares.

Con todo y con eso, podemos afirmar que el sistema propuesto de soportes no ha sido el culpable de esta rotura de puente térmico.

2.1.5 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

A partir de los anteriores apartados y de los resultados de estudio de cada una de las hipótesis que planteábamos inicialmente en nuestro planteamiento metodológico, podemos afirmar que lo más probable es que el vidrio haya roto, efectivamente, por choque térmico.

Por lo que se refiere a la prescripción del vidrio, después de estudiar todos los puntos (ver 2.1.4.1) y de analizar todos los valores que conforman, podemos confirmar que la prescripción del vidrio de éste proyecto es la correcta. Como se ha comprobado, el espesor del vidrio supera los valores mínimos indicados por la norma. A su vez, es un vidrio laminado de seguridad; de tal manera que en caso de ruptura de alguno de los vidrios, los fragmentos de éste no caerían al vacío, si no que quedarían enganchados en la lámina de butiral que une ambos vidrios.

El vidrio también tiene buenas cualidades por lo que se refiere a confort térmico, gracias a su cámara de aire, a la composición de los vidrios y, sobre todo, a capa de baja emisividad que incluye.

En referencia a la morfología de la grieta, esta tiene formas curvas; Cuando la grieta es curvada quiere decir que ésta ha tenido bajas velocidades de propagación y suele ser resultado de una rotura por choque térmico. Por otro lado, aunque la grieta es curvada, también nos encontramos que ésta se bifurca en un momento dado, dando como resultado dos partes simétricas.

Partiendo de lo anteriormente citado, diremos que nos encontramos ante una fractura de alta tensión, en la que ha habido tanta energía almacenada en su interior que ésta se ha propagado en dos ramas distintas pero con una baja velocidad de propagación. A partir de lo anteriormente descrito, por lo que se refiere a la morfología de la grieta, podemos afirmar que la causa más probable de rotura del vidrio ha sido por choque térmico (o stress térmico).

Seguidamente, y en referencia al estudio de las condiciones climáticas y su influencia en el vidrio, podemos afirmar que no solo por el área de sombreado que se proyecta sobre el paramento de vidrio, sino que también por el perímetro, la sombra que se proyecta es perjudicial para el vidrio y es muy probable que haya sido lo que ha provocado la fractura.

Por último, se ha analizado el conjunto que conforman el marco y el propio vidrio. Se ha corroborado que la transmitancia cumple con la normativa vigente. A su vez, se ha analizado el marco utilizado para verificar el comportamiento de este en unión con el vidrio. La distribución de la temperatura parece estable y la diferencia de temperatura entre el interior y exterior es lo suficientemente reducida como para que no exista riesgo de choque térmico. A partir de lo anteriormente descrito, consideramos que el marco utilizado era el correcto y no ha sido la causa originaria de la rotura.

Como conclusión podríamos afirmar que después del estudio realizado la rotura más probable del vidrio ha sido por choque térmico.

2.1.6 CONSIDERACIONES

Con tal de prevenir el caso de rotura por choque térmico en los vidrios en futuros proyectos y después de las conclusiones anteriores, se enumeran los siguientes comentarios / recomendaciones:

- Un buen estudio de las condiciones climáticas y del emplazamiento de la obra, seguido de un análisis exhaustivo del tipo de vidrio y del espesor recomendado serán fundamentales a la hora de evitar roturas imprevistas.
- El tratamiento más eficaz para evitar el riesgo a rotura por choque térmico es realizar en los vidrios el proceso de templado. Este tipo de vidrios puede aguantar diferencias de temperatura de 200°C frente los 40°C que, como hemos visto en apartados anteriores, puede llegar a aguantar un vidrio normal.
- Es muy importante tener en cuenta la morfología del edificio, estudiar los salientes y voladizos con tal de evitar sombras perjudiciales.
- El estado de los cantos del vidrio será esencial para que tenga un buen comportamiento al aparecer las tensiones internas. Lo ideal son los cantos pulidos y se recomienda hacer un buen control de calidad para verificar que estos no tienen microfisuras.
- Los vidrios de gran superficie, los coloreados en masa (parsoles), los vidrios de capa y los vidrios laminados por su naturaleza absorben más calor y son más propensos a sufrir roturas. Lo ideal en estos casos es utilizar los vidrios templados.
- La colocación de vinilos de colores (sobre todo oscuros) sobre el vidrio incrementará la aparición de diferencias térmicas dentro de una misma superficie del vidrio, ello podría conllevar a la fractura del vidrio.
- Si se colocan cerca de los vidrios elementos que puedan generar diferencias de temperaturas muy elevadas. Sería un ejemplo de este tipo de elementos muebles con piezas metálicas o muebles que proyecten sombras sobre una parte del área del vidrio.
- Se recomienda instalar los vidrios lo más alejados de fuentes de calor o de frío y, a su vez, es recomendable no dirigir estas fuentes de forma directa a los elementos de vidrio.
- Los vidrios que se acopian en obra a la intemperie antes de realizar la colocación podrán acumular altas temperaturas, debido a que la radiación no se disipa, por lo que el riesgo de rotura es máximo. Lo ideal para acopiar el material es preferiblemente en almacenes o interiores, si no es posible, se deben colocar en espacios sombreados permanentemente.
- Si el marco es de un material no conductor (Por ejemplo, madera o PVC) la temperatura en los extremos será muy inferior, eso implicará un mayor stress térmico.

2.2 HEAT SOAK TEST

2.2.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO

El riesgo de rotura del vidrio templado debido a inclusiones de sulfuro de níquel es un tema que es bien conocido por la mayoría de industriales del vidrio.

Para disminuir la probabilidad de tener un vidrio con estas inclusiones, lo que el propio fabricante recomienda es realizar el “heat soak test”, que en grandes rasgos viene a ser incrementar la temperatura del vidrio a 280°C una vez está a temperatura ambiente, de esta manera, si existen inclusiones vítreas, el vidrio se romperá y de esta manera se evitará la rotura espontánea una vez instalado en obra.

A partir de esta descripción, se nos ocurría una duda: ¿Cómo puede ser que tan solo elevando la temperatura a 290°C el vidrio rompa, si el propio proceso de templado implica que la temperatura del vidrio se eleva a más de 600°C?

Por otro lado, los fabricantes, juntamente al certificado conforme se ha realizado el “Heat Soak Test” a un vidrio, incluyen una anotación en el que se especifica claramente que, aunque se realice el test, no es en ningún caso garantía de no rotura de los vidrios por ese motivo.

¿Es realmente necesario realizar este tipo de test, a nivel industrial es rentable?

A partir de las incógnitas que plantea este tema, con tal de aclarar un concepto tan común en el rango del vidrio, a continuación se estudiará en que consiste el proceso de “Heat Soak Test”, analizando su proceso, el comportamiento del vidrio a lo largo de este y analizando también las inclusiones vítreas de Sulfuro de Níquel.

2.2.2 ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tal y como se ha estudiado a lo largo de este trabajo, una gran cantidad de los vidrios float contienen algún nivel de defectos, como piedras y burbujas. Estos son una parte inevitable del proceso de manufactura del vidrio.

Uno de los defectos más comunes es las inclusiones de piedras de sulfuro de Níquel (NiS), también conocido como Millerita. El Níquel puede aparecer a partir de trazas presentes en la arena, del combustible e incluso de la maquinaria utilizada para mezclar la materia prima. El Sulfuro es posible que aparezca a partir del combustible o de la utilización de sulfuro de Sodio.

Este problema solo aparece en vidrios tratados térmicamente, con el proceso de templado, los vidrios monolíticos están exentos a este problema; Eso es debido a la alta tensión interna que tienen los vidrios templados, al haber un cambio de volumen en su interior rompen instantáneamente, dado que hay una gran acumulación de tensiones en su interior, cosa que no ocurre con los vidrios monolíticos. La mayoría de inclusiones de NiS no suelen dar ningún tipo de problema, sin embargo, hay una pequeña cantidad de piedras de NiS, que al enfriarse lentamente desde 390 °C hasta temperatura ambiente, experimenta un cambio en su estructura cristalina (hay un cambio de fase) que acaba resultando en un aumento del volumen de la

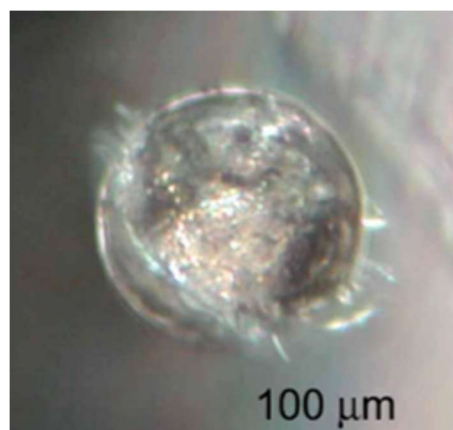


FIG. 74 - INCLUSIÓN DE PARTÍCULAS DE NiS. FUENTE: EXTRALUM

partícula. Eso deriva en una fractura del vidrio. Una vez que se inicia una grieta, se propaga a lo largo del vidrio casi instantáneamente, reduciendo el panel de vidrio a pequeños fragmentos.

Básicamente, nos encontramos con un tipo de partícula de Sulfuro de Níquel que es estable a partir de los 390°C (α -NiS), una vez se realiza el proceso de enfriado del vidrio, estas partículas poco a poco cambian de fase, de tal manera que se vuelven estables a temperaturas por debajo de los 390°C, estas se conocen como β -NiS.

Según Andreas Kasper⁴¹ el cambio da como resultado un incremento de volumen de un 4% de la partícula, dado que la inclusión, que quedó comprimida, vuelve a su estado original.

Las inclusiones por norma general tienen forma esférica, aunque a veces pueden aparecer con forma ligeramente elíptica. Eso demuestra que durante el proceso de fusión del vidrio las inclusiones llegan a fundirse, pero no llega a homogeneizarse con la masa del vidrio, quedando pequeñas gotas de sulfuro de níquel fundido en la masa del vidrio fundido. Por otro lado, la superficie de las piedras es rugosa, eso indica que la cristalización ha ocurrido durante el enfriamiento de los vidrios.

Esta transformación, que se la conoce como fase alotrópica de transformación, de α a β no es algo que pase a lo largo del proceso de enfriamiento, dado que al enfriar el vidrio rápidamente las partículas de NiS quedan “congeladas” en su fase comprimida. A temperatura ambiente, la transformación es muy lenta, puede conllevar de meses a años. Esto se debe a los diferentes coeficientes de dilatación térmica del vidrio y del sulfuro de níquel.

El coeficiente de dilatación térmica del sulfuro de níquel (Ni_1S_1), según Andreas Kasper se midió en sus laboratorios y dio como resultado $14 \cdot 10^{-6}$ para un rango de temperaturas de 20 a 300°C y $16 \cdot 10^{-6}$ para temperaturas entre 350 y 500°C. Estos valores son considerablemente superiores al del vidrio que es $9 \cdot 10^{-6}$ en el mismo rango de temperatura.

Las inclusiones de sulfuro de níquel que se estudiaron en el laboratorio de Andreas Kasper dieron como resultado partículas con diámetros que variaban entre 0,05 y 0,6mm; La media rondaba los 0,2 mm. En todos los vidrios destruidos por esta inclusión se encontró que esta se encontraba en la zona interna, independientemente de su grosor y que en altura se situaba entre el 25 y 75% de su longitud. De todas las muestras estudiadas (224 vidrios que procedían de hornos donde se había realizado el HST o edificios) el 96,4% de ellas se demostró que habían roto por inclusiones de sulfuro de níquel.

Estas fracturas solo ocurren si se sitúan en una zona donde se acumulan las tensiones internas del vidrio. La dimensión de la inclusión también es muy importante, por el momento la inclusión más pequeña que ha producido una rotura de 0,04 mm. Esto nos demuestra que es posible que un vidrio tenga inclusiones de sulfuro de níquel y no llegue a romper nunca por ese motivo.

La fractura espontánea en el vidrio templado puede suceder en cualquier momento, sin necesidad de aplicar una carga o tensión, en corto plazo o aún cinco o diez años después de la fabricación. Estas inclusiones son tan pequeñas (alrededor de 0.03mm de diámetro que, en la práctica, son imposibles de localizar e identificar en el vidrio antes o después del proceso de templado. Es

⁴¹ [37] página 149

importante indicar que, aunque existan partículas de NiS en la masa del vidrio templado, ello no va a implicar la rotura seguro, esto solo sucede cuando la partícula se sitúa en una zona de acumulación de tensiones internas.

Según John Bowler-Reed⁴² en el primer caso en el que se tuvo conciencia de cómo afectaba al vidrio el sulfuro de Níquel fue en el informe de E. R. Ballantyne "Fractura de revestimiento de pared de vidrio endurecido, ICI House, Melbourne". En este informe se demostró que el sulfuro de níquel fue el responsable de las fracturas de vidrio que ocurrieron en el edificio ICI House de Melbourne.



FIG. 75 - ICI HOUSE (ORICA HOUSE), MELBOURNE. FUENTE: WIKIPEDIA

Para disminuir la cantidad de casos de rotura espontánea, la Norma Europea 14179-1:2005⁴³ indica cómo se debe realizar el proceso conocido como "Heat Soak Test". Esta norma también especifica claramente que el riesgo de rotura una vez se ha realizado el tratamiento de Heat Soak, es de una rotura por cada 400 toneladas de vidrio tratado. Este es el motivo por el que ningún fabricante asegura que el vidrio no vaya a romperse después del tratamiento.

Aun así, Andreas Kasper, en su artículo, que data de 2009, explicaba que después de seis años aplicando el Heat Soak Test a los vidrios templados de la empresa Saint Gobain Glass, no tenía conocimiento de que ningún vidrio que hubiera pasado el test se hubiera roto. Por lo que podemos comprobar que el riesgo residual una vez realizado el HST es realmente bajo.

Como se ha comentado anteriormente, el vidrio que presenta este tipo de problemas es el vidrio tratado térmicamente mediante el proceso de templado, este proceso ya se ha explicado en apartados anteriores⁴⁴, por lo que no se ha considerado necesario explicarlo de nuevo.

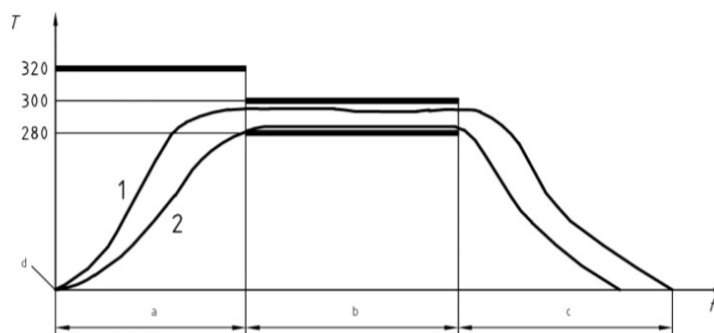


FIG. 76 - PROCESO DE HEAT SOAK. FUENTE: NORMA EUROPEA

Key			
<i>T</i>	glass temperature at any point, °C	<i>d</i>	ambient temperature
<i>t</i>	time, h	<i>a</i>	heating phase
1	first glass to reach 280 °C	<i>b</i>	holding phase
2	last glass to reach 280 °C	<i>c</i>	cooling phase

⁴² [26] página 148

⁴³ [27] página 149

⁴⁴ Ver apartado 1.6.2 página 54

El proceso de Heat Soak consiste en tres fases:

- ❖ Heating phase (incremento de temperatura)
- ❖ Holding phase (se mantiene la temperatura estable durante un tiempo determinado).
- ❖ Cooling phase (Enfriamiento)

2.2.2.1 Heating phase

En este caso, los vidrios, a temperatura ambiente se introducen en el horno (con cierta separación entre ellos, según indica la norma. Se incrementa la temperatura de los vidrios hasta que en la superficie del último vidrio se ha conseguido la temperatura de 280°C.

Aunque lo ideal sería que la temperatura del aire en el interior del horno no superase los 320°C, por motivos de tiempo y economizar procesos la norma específica que se puede sobre pasar, siempre y cuando la temperatura superficial de los vidrios no supere los 320°C. A partir de los 300°C es posible que el vidrio cambie sus propiedades, por lo que se deberá verificar que en ningún caso éstas han sido modificadas.

2.2.2.2 Holding phase

El proceso de mantenimiento de temperatura estable empieza cuando la temperatura superficial de todos los vidrios ha llegado a los 280°C, esta temperatura se deberá mantener 2 horas. El horno estará a una temperatura de 290°C ± 10°C.

2.2.2.3 Cooling phase

Una vez el vidrio se ha mantenido durante 2 horas a la temperatura establecida, se debe volver temperatura ambiente. Esta fase se dará por concluida cuando la temperatura del aire del interior del horno disminuya a los 70°C.

Una vez se han realizado estas tres fases, si el vidrio no se ha roto a lo largo del proceso, se considera que las partículas de sulfuro de níquel que hayan podido quedar en el interior no son perjudiciales (siempre teniendo en cuenta el riesgo residual que puede quedar).

Básicamente, lo que se consigue con este proceso es justamente acelerar el posible cambio de fase de α -NiS a β -NiS. De esta manera, si hay alguna inclusión perjudicial, esta aumentará de volumen y romperá el vidrio en el propio horno. Con tal de reducir costes, la norma europea reguladora⁴⁵ indica que se puede realizar este proceso con varios vidrios a la vez (la cantidad de vidrios dependerá de las dimensiones del horno, dado que los vidrios se colocarán con unas distancias específicas entre ellos). Comentando este proceso con los proveedores y fabricantes de vidrio, todos opinan que este proceso conlleva pérdidas económicas considerables. Cuando uno de los vidrios rompe en el horno, al ser un vidrio templado que al romper “explota” acaba rompiendo a todos los demás vidrios que están en el horno. Esto conlleva pérdidas no solo de material, sino que también el incumplimiento de plazos de entrega de material.

⁴⁵ [27] pàgina 151

Según John Bowler-Reed⁴⁶ se utilizó un método distinto al Heat Soak, conocido como método de detección fotográfica, en el edificio Brisbane de Australia. De los 4.194 paneles de vidrio templado que había en el edificio, se detectaron 291 inclusiones de sulfuro de níquel, pero este resultado tiene que verse en relación con las 140 roturas que habían ocurrido antes de realizar el estudio y 10 roturas más que ocurrieron durante los siguientes siete meses. Según la opinión del autor, que comparte con otros dos expertos en el campo, este método de detección no es rentable. Con los métodos de producción de los que disponemos actualmente se han reducido considerablemente los riesgos de fractura por inclusiones de sulfuro de níquel.

Gracias a la visualización de los patrones de rotura mediante microscopios electrónicos, se permitió descubrir de manera indirecta la presencia de estas partículas, que se sitúan en el centro del origen de la fractura, con un patrón típico con forma de “mariposa”.

Según Andreas Kasper⁴⁷ las alas de la “mariposa” están formadas por dos piezas de vidrio con forma pentagonal o hexagonal. El micro análisis de las inclusiones, dio como resultado que en su interior se encontraba níquel, sulfuro y además, pequeñas cantidades de metales, como por ejemplo acero o cobre. Mediante micro difracción⁴⁸ se identificó el sulfuro de níquel como el componente principal. Aun así, es

importante remarcar que no siempre que aparezca una rotura con patrón similar al de mariposa, la rotura ha sido producida por una inclusión. También se puede producir una fractura con patrones similares cuando la rotura se debe a las tensiones internas del vidrio, siendo exento el vidrio de inclusiones de cualquier tipo.

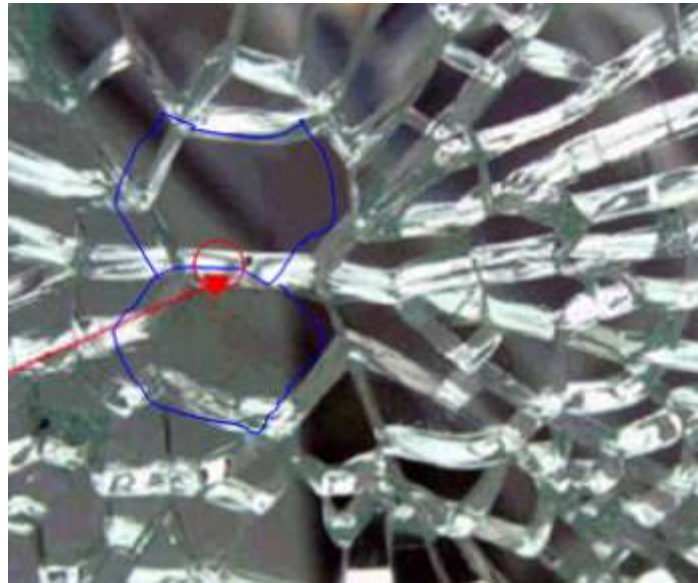


FIG. 77 - PATRÓN TÍPICO DE ROTURA ESPONTÁNEA TIPO “MARIPOSA” Y LA PARTÍCULA MONOLÍTICA. FUENTE: EXTRALUM.

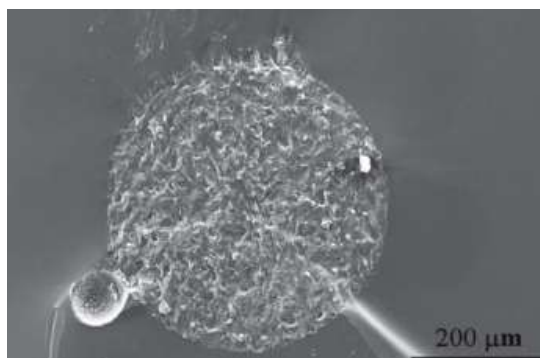


FIG. 78 - PARTÍCULA MONOLÍTICA DE SILICIO. FUENTE: EXTRALUM

Recientemente, la teoría “clásica” que se ha explicado anteriormente sobre la rotura espontánea ha cambiado considerablemente, al descubrirse un nuevo posible motivo generador de la fractura, este se conoce como “Partícula monolítica de silicio”. Este descubrimiento lo realizó Jianjun Yang⁴⁹ en el 2007.

⁴⁶ [26] página 154

⁴⁷ [37] página 153

⁴⁸ La microdifracción es un análisis de difracción de rayos X efectuado en muestras pequeñas. La difracción de rayos X (o cristalografía de rayos X) es una técnica experimental para el estudio y análisis de materiales, basada en el fenómeno de difracción de los rayos X por sólidos en estado cristalino.

⁴⁹ [56] página 155

Según el abstract de la monografía el autor indica que se ha descubierto y demostrado mediante examen de SEM en seis muestras de vidrios templados rotos, que una de las causas importantes de rotura espontánea del vidrio templado es debido a la inclusión de partículas de silicio monolítico, en lugar de sólo las partículas de sulfuro de níquel que la mayoría de expertos en la industria del vidrio creen que es la principal causa de la rotura espontánea del vidrio templado. El mecanismo de la rotura espontánea resultante de las partículas de silicio se analizó mediante el método de elementos finitos. El cálculo indica que la iniciación de la grieta y propagación por la tangente a la tensión de tracción cerca podría demostrar que es la causa de la rotura espontánea.

El coeficiente de expansión de las partículas monolíticas de silicio tiene una magnitud dos veces mayor a la de la matriz de vidrio templado, por lo que el fenómeno de expansión descrito anteriormente para las partículas de sulfuro de níquel se produce de manera equivalente. Tienen una dimensión promedio de 0.3 mm y al microscopio electrónico se visualizan como en la imagen **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

2.2.3 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

La ausencia de Sulfuro de Níquel no puede ser garantizada por ningún fabricante. Su presencia es imperceptible, impredecible e incluso después de realizar el HST sigue habiendo probabilidades de rotura espontánea en el vidrio.

Una buena prescripción del material será esencial. Un buen diseño para las aplicaciones del vidrio deberá reconocer ésta situación y se deberá utilizar el vidrio templado en aplicaciones en las que la rotura espontánea no cause problemas de seguridad y funcionalidad. Una de las soluciones será no utilizar vidrios templados monolíticos, si no vidrios templados y laminados; De tal manera que en caso de rotura espontánea las piezas de vidrio no caerían al vacío, si no que quedarían unidas mediante la lámina de butiral.

Por lo que se refiere a la duda que se planteaba al inicio de este apartado, si, se recomendaría realizar el Heat Soak Test, pese a que la probabilidad de eliminación de la probabilidad de rotura no sea de un 100% debido al riesgo residual.

A día de hoy, por experiencia propia, el Heat Soak Test se realiza en ocasiones muy puntuales, de hecho prácticamente no se realiza; Ya sea por falta de información o por desconocimiento de las consecuencias la mayoría de profesionales no tienen en cuenta este parámetro, ni en el momento de prescribir ni el de valorar la obra. Por parte de los industriales se debería incluir este test en todas las valoraciones (el coste del HST no supera los 15 €/m²) para reducir el riesgo al máximo y, a su vez, se debería concienciar a prescriptores tales como Arquitectos, Arquitectos Técnicos e industriales del rango del vidrio de la importancia de realizarlo y de las consecuencias que pueda llegar a acarrear.

2.3 IRISACIONES EN VIDRIO

2.3.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO

A principios de Febrero de 2016 se realizó la puesta en obra de unos vidrios en la fachada de un escaparate en el sur de Francia

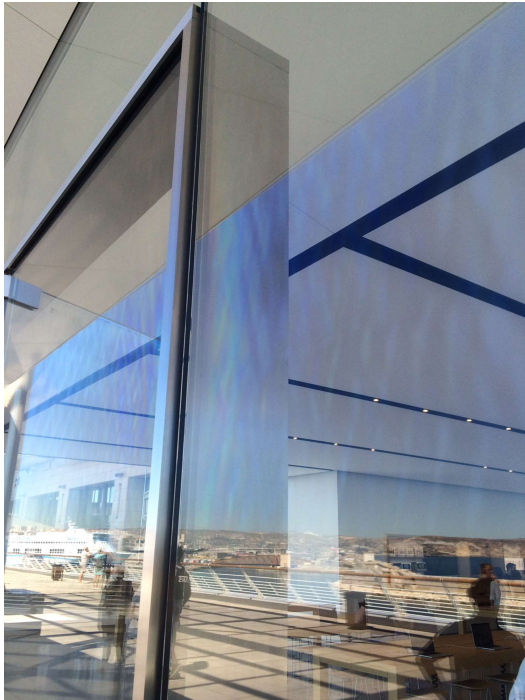


FIG. 79 - IMÁGENES DE LA FACHADA ACRISTALADA FRANCESA. FUENTE: VIDRES BERNI.

A finales del mes de Julio, la propiedad empezó a quejarse de que habían aparecido unas manchas en los vidrios, que solo se apreciaban en algunos momentos del día y que dificultaban la visión del interior de la tienda a los transeúntes que paseaban. El cliente pidió explicaciones, dado que consideraba que estos vidrios eran defectuosos de fábrica.

Es importante remarcar que estos vidrios se habían realizado con unas dimensiones fuera de lo común justamente para esta obra, que la puesta en obra de estos elementos fue realmente compleja (la grúa se situó en la planta sótano y se tuvo que coordinar la colocación con ventosas con una mini-grúa en la planta piso) y que la obra estaba situada en Marsella (Francia). Todos los puntos anteriores implican que, en el caso de que el cliente tenga razón y los vidrios hayan resultado defectuosos, el coste de reposición de estos elementos sería muy importante y correría a cuenta de la empresa instaladora.

A continuación se estudiará en qué consisten realmente estas manchas y, sobre todo, si estas se consideran un defecto. A su vez, se estudiarán métodos de prevención para que esto no ocurra y posibles métodos de detección de estas manchas antes de realizar la puesta en obra del material.

2.3.2 ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Primero de todo, se ha considerado importante comentar que el objetivo de este trabajo en ningún caso es realizar un profundo estudio de las propiedades ópticas de un vidrio; En referencia a esta temática hay innumerables documentos debido a la gran importancia que tiene la relación de la luz con el vidrio en el ámbito de la óptica y optometría. Este estudio intenta, simplemente, comprender a grandes rasgos cuál es el comportamiento de un vidrio aplicado a la edificación frente la luz exterior.

Cuando se habla de las características generales de un vidrio, se suele definir que este material, cuando es físicamente homogéneo, es isótropo. En la realidad, un vidrio perfectamente homogéneo es realmente difícil de conseguir, ya sea por pequeños “defectos” superficiales o por deformaciones derivadas de tratamientos térmicos (templado o termo endurecido, por ejemplo).

Un material isótropo es aquel que presenta siempre el mismo comportamiento, independientemente de la dirección, mientras que en un material anisotrópico sus propiedades

varían con la dirección.

Según Fernández Navarro⁵⁰, al reflejarse la luz en un vidrio isótropo (perfectamente homogéneo) se comporta como un medio vacío y los rayos luminosos se propagan con la misma velocidad en todas las direcciones. En un vidrio anisótropo, cualquier rayo que incida sobre este, se descompondrá en dos rayos con direcciones distintas (pero perpendiculares), que se propagaran con distintas velocidades y, por tanto, poseerán distintos índices de refracción.

Cuando un vidrio se somete a la acción de fuerzas mecánicas pierde su característica de ser isótropo y se vuelve birrefringente. Este cambio se puede originar bien frente una fuerza mecánica exterior a la que está sometido el vidrio o bien como consecuencia de tensiones internas aparecidas durante el enfriamiento.

2.3.2.1 TIPO DE VIDRIO

Los vidrios de fachada que estamos estudiando en este apartado tenían la siguiente composición: 12+12: Vidrio extra claro termoendurecido 12 mm + sentry glass + vidrio extra claro termoendurecido 12 mm.

El vidrio extra claro ya lo conocemos de apartados anteriores (es un vidrio en el que sus componentes se han homogeneizado mucho más que en el vidrio normal, quitándole gran parte del tono verdoso característico del vidrio convencional.

Se ha considerado hacer una pequeña explicación de los conceptos “termoendurecido” y “sentry glass” para poder conocer mejor el comportamiento del material que estamos estudiando.

2.3.2.1.1 TERMOENDURECIDO

Aunque se ha comentado ya en apartados anteriores (véase 1.6.4) igual que en el caso del vidrio templado, el proceso de termo endurecido consiste en someter al vidrio a una temperatura próxima a la de reblandecimiento, pero en este caso el enfriamiento es mucho más lento.

De esta manera, el material resultante es un vidrio con tensiones permanentes menores, con una mayor resistencia térmica y mecánica que la que presenta el propio vidrio monolítico y, a diferencia del vidrio templado, con un patrón de rotura muy parecido al del vidrio monolítico. Se recomienda colocar este tipo de vidrio en aplicaciones que no exijan seguridad, dado que el vidrio termo endurecido no se considera como tal, ni en el código técnico de edificación ni en las normas europeas que regulan este material.

Por norma general, este tipo de vidrio se suele utilizar como acristalamiento general (en escaparates o cerramientos de exterior) donde se necesita una resistencia adicional para soportar las cargas de presión del viento y cambios térmicos.

Igual que en el caso de los vidrios templados, una vez realizado el proceso de termo endurecido, no se puede realizar ninguna manufactura (taladros, pulido de cantos o grabados al chorro de arena o ácido.

2.3.2.1.2 SENTRY GLASS

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, el vidrio termoendurecido no se considera un vidrio de seguridad, es por ese motivo se utilizan dos vidrios con tratamiento térmico unidos entre sí por medio de una capa intermedia, en este caso Sentry Glass. De esta manera, si alguno de los

⁵⁰ [2] página 155

vidrios llega a romperse, los fragmentos quedarán adheridos a la capa intermedia, en lugar de dispersarse y convertirse en proyectiles que pongan en peligro la seguridad de las personas.

Sentry Glass es un intercalario de la marca DuPont que se caracteriza por tener una mayor rigidez que la mayoría de los butirales intercalarios que hay en el mercado. Este material es muy conocido en el ámbito del vidrio, por lo que la intención de este apartado no es enumerar las características del material, que son fácilmente asequibles al consultar en cualquier manual, simplemente hacernos a la idea de que se trata y en qué se diferencia del resto de materiales.

Un 95% de los vidrios laminados que se producen en la actualidad se realizan con butiral de polivinilo (PVB) que por sus prestaciones (económicas y de material) suelen ser la mejor solución. Pero en algunos casos puntuales, es necesario utilizar intercalarios que soporten mayores cargas o nos ayuden a reducir el espesor sin comprometer la seguridad del conjunto.

Según DuPont, Sentry Glass es cien veces más rígido que los intercalarios que existen actualmente⁵¹. Las capas de butiral de polivinilo (PVB) son muy eficaces cuando están expuestas a cargas súbitas y temporales, como sería el caso de efectos de vandalismo, huracanes o explosiones. Este tipo de butiral es un polímero suave, que tiende a deformarse cuando está sometido a cargas a largo plazo, es por ello que cuando se realizan cálculos de cargas estáticas solo se contemplan los dos vidrios por separado, como si no estuvieran unidos.

En las dos figuras de la derecha podemos ver una comparación entre un vidrio con butiral PVB y un SG por lo que a la resistencia a impacto se refiere. Este ensayo se realizó a -12°C y empezó sometiendo a los vidrios a 25 impactos de 4300 N, seguidos por 10 de 8600 N. Los dos vidrios pasaron la prueba inicial sin romperse. El vidrio con PVB soportó hasta el segundo impacto de 12900N y el vidrio con Sentry Glas al tercer impacto de 17200N.

2.3.2.2 IRISACIONES EN VIDRIO

Un elemento anisotrópico es aquel que presenta un comportamiento distinto en función de la dirección. En el caso de la luz, los vidrios anisótropos presentan distintos valores en sus índices de refracción en función de la dirección que cobre la luz al atravesar la lámina de vidrio.

La mayoría de vidrios (float) cristalizan con la máxima simetría, con sus átomos o iones igualmente distribuidos en las tres direcciones principales del espacio, son isótropos. Una vez estos vidrios son sometidos a un tratamiento térmico, su estructura se ve modificada en parte, por lo que la disposición de los elementos que lo constituyen varían con la dirección y, por tanto, la elasticidad para las ondas luminosas también es diferente.

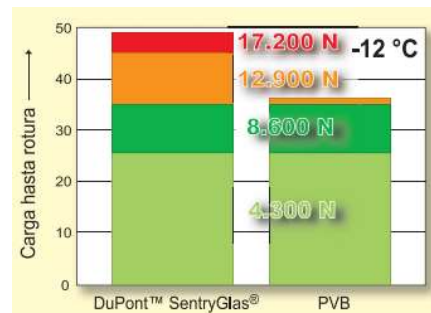


Fig. 5: Comparación de resistencia a impactos de laminados hechos con SentryGlas® y PVB.

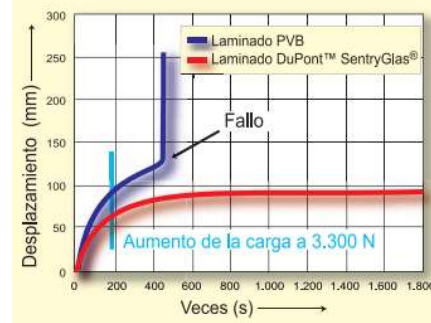


FIG. 80 - COMPARACIÓN COMPORTAMIENTO ENTRE VIDRIO CON BUTIRAL PVB Y VIDRIO CON SENTRYGLAS. FUENTE: DUPONT.

⁵¹ [49] pág. 161

Según define la norma EN-12150:2000⁵² el fenómeno de la Anisotropía en el vidrio (también considerada como irisación) se produce en vidrios a los que se han sometido al proceso de templado o termoendurecido. Una vez el vidrio se somete al tratamiento térmico, este puede tener áreas donde las tensiones son diferentes en la sección transversal del vidrio. Estas áreas de tensión producen un efecto bi-refringente en el vidrio que es visible bajo una luz polarizada.

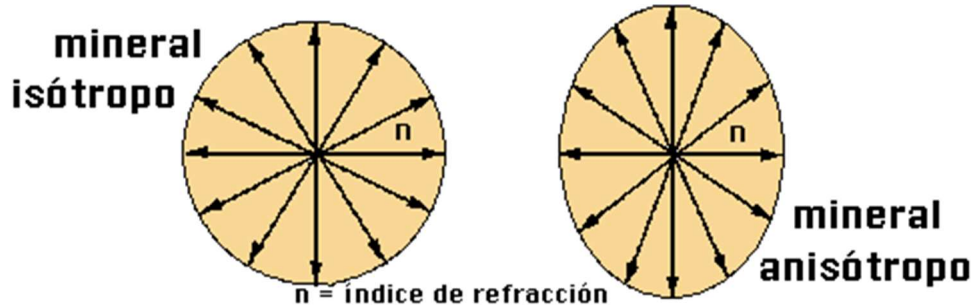


FIG. 81 - CROQUIS ELEMENTO ISÓTROPICO / ANISÓTROPICO. FUENTE: DEPARTAMENTO DE EDAFOLOGÍA Y QUÍMICA AGRÍCOLA UNIVERSIDAD DE GRANADA

Cada sección del proceso de templado puede causar anisotropía. Si el vidrio se calienta y se enfría de forma rápida y uniforme, la anisotropía sencillamente no puede producirse. Sorprendentemente, los peores casos de anisotropía normalmente se producen en la sección de calentamiento. Utilizar un calentamiento local demasiado fuerte produce una diferencia de temperatura crítica. Esta diferencia continúa a lo largo de la sección de enfriamiento rápido y produce una anisotropía considerable al final. La sección de enfriamiento rápido también desempeña una función importante en la causa de la anisotropía. Cualquier falta de uniformidad en el enfriamiento rápido, como cuando los rodillos conducen el enfriamiento sobre el vidrio o las boquillas de enfriamiento rápido soplan el aire de manera irregular, puede conducir fácilmente a su aparición.

Cuando el vidrio de seguridad templado térmicamente es visto bajo luz polarizada, las áreas sometidas a tensiones aparecen como zonas coloreadas, a veces conocidas como lunares de leopardo. La luz polarizada aparece con la luz normal de día. La cantidad de luz polarizada depende del tiempo y del ángulo del sol. El efecto bi-refringente es más evidente bajo un cierto ángulo de visión o con gafas polarizadas.

No se considera defecto en ningún caso. Este fenómeno óptico es el resultado de la descomposición de la luz y luz interferencia que se produce cuando refleja en los lados de los vidrios (principalmente en vidrios laminados o cámara). Esta iridiscencia se puede apreciar únicamente en días soleados, viene de una interferencia de la luz que se produce cuando una parte de la luz es polarizada y refleja en las caras de los vidrios. Es visible solamente en ciertas condiciones y no permanentemente.

2.3.3 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

Uno de los puntos que más controversia y debate generan en el ámbito del vidrio es si la anisotropía en la superficie del vidrio se considera defecto o no. Pese a que las normas que regulan la calidad del vidrio no lo consideren un defecto y que los proveedores se basen en los estándares

⁵² [50] página 163

de calidad para explicar que este fenómeno es parte inherente del tratamiento térmico, a menudo diseñadores, arquitectos y sus clientes sí lo consideran un defecto y se niegan a aceptar vidrios con estas características.

El hecho que el cliente final lo perciba como un defecto importante convierte a este en un problema real para el que hay que buscar soluciones. El problema es únicamente una cuestión de estética, el cliente percibe el vidrio como de mala calidad, pero en ningún caso las propiedades estructurales del vidrio se ven dañadas.

Uno de los primeros puntos que deberíamos tener en cuenta a la hora de prescribir un vidrio de estas características, es ser consciente de los problemas que puede generar e informar al cliente final desde un principio de estos. La anisotropía es más evidente dos o tres horas antes de la puesta de sol, sobre todo en instalaciones de vidrio próximas a la costa, por lo que no será un problema visible a lo largo de todo el día.

Por otro lado, la prescripción de un material adecuado también será fundamental. Substituir el vidrio templado por vidrio laminar de seguridad formado por vidrios float (siempre y cuando sea posible por motivos de seguridad) nos ahorrará problemas con el cliente.

Desde un punto de vista industrial, aunque no se pueda descartar este fenómeno, sí que se pueden optimizar los parámetros en la línea de templado. Es decir, si en el momento de diseñar la línea de templado el proveedor lo tiene en cuenta y se optimizan los procesos de calentamiento y enfriamiento del vidrio para que en ningún caso sean desiguales, esto disminuirá la cantidad de anisotropía visible en el vidrio. Aunque no se considere defecto, es un problema real y se deberían tomar medidas para solucionarlo.

Es muy difícil hablar de un defecto si no podemos medirlo. Hasta la fecha, solamente hay un sistema de medición, Glaston IriControl, para la anisotropía del vidrio. Esta herramienta permite medir con precisión el nivel de anisotropía en el vidrio. Sin embargo, las cuestiones más urgentes son definir qué nivel de anisotropía sigue siendo aceptable y cómo debe tenerse en cuenta la posición del vidrio en la instalación.

Gracias a la conciencia de proveedores y profesionales del sector, poco a poco se va tomando conciencia del problema y, por parte de procesadores, cada vez aparecen nuevos sistemas que mejoran las líneas de templado y disminuyen la aparición de este fenómeno.

2.4 ROTURA DE PUERTA LAMINADA

2.4.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO

Tiempo atrás, por parte de un hotel en el que estuvimos trabajando en Praga, nos enviaron la imagen de una puerta rota que llamaba mucho la atención. En la figura siguiente (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se puede ver la puerta rota. El hotel alegó que la clienta que estaba utilizando la habitación no la había tocado y aun así se había roto.



FIG. 82 - IMAGEN DE LA PUERTA ROTA. FUENTE: VIDRES BERNI

Pese a que parezca increíble, lo que se ve doblado en el suelo es lo que en su momento fue una puerta pivotante de vidrio. De hecho, si nos fijamos, la puerta todavía tiene uno de los pernios colocado en uno de sus extremos.

El vidrio que conforma la puerta es un templado y laminado 6+4, siendo el vidrio de 4 mm un parsol (coloreado en masa bronce) y el de 6 mm un Stopsol classic bronce. A estas puertas no se les realizó ningún tratamiento de heat soak test. El hecho que se escogiera esta composición y no una más común (como sería el caso de un 5+5) fue por un motivo de producción: El vidrio tipo stopsol, por temas de rotura de stock de los fabricantes, solo estaba en 6 o 4 mm, por lo que se decidió conseguir los 10 mm a partir de un vidrio laminado de groesos distintos.

En el caso de fracturas de puertas formadas por vidrio templado y laminado, lo más común, es que uno de los vidrios se rompa y explote pero que el otro soporte el impacto. Lo curioso de esta imagen es que ambos se han roto a la vez.

A partir de la imagen podemos plantear varias cuestiones: ¿Es posible que una puerta de estas características se rompa espontáneamente, sin ningún tipo de impacto? ¿El grosor de 4 mm es un problema? La mayoría de puertas templadas y laminadas se realizan en 5+5, ¿1 solo mm de diferencia de grosor puede ser el causante de una fractura de este tipo?

La mayoría de vidrios de fachada, barandas y visores de piscina que se colocan actualmente son de este mismo material (templado y laminado) y pese a que los grosores suelen ser superiores ¿Es posible prever este problema? ¿Hasta qué punto puede ser un problema para la seguridad de los usuarios?

2.4.2 ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Inicialmente se realizará un estudio de los materiales instalados y se compararán sus especificaciones técnicas con las de otros vidrios de mayor grosor que han dado un buen resultado, teniendo el mismo uso. De esta manera veremos si realmente el grosor o el tipo de material es el causante de las fracturas de los vidrios.

Por otro lado, con tal de resolver las cuestiones de seguridad que se planteaban inicialmente, partiremos de ensayos y documentación cedida por los proveedores con tal de poder ser capaces de prescribir en cada caso el material adecuado.

2.4.2.1 TIPO DE VIDRIO

En anteriores ocasiones ya se ha hablado de las características del vidrio templado y laminado, por lo que la intención no es extenderse y repetir lo anteriormente citado.

Una puerta pivotante o batiente, en la mayoría de los casos, debe realizarse con vidrio templado. Eso es debido a que los herrajes que conforman la puerta (los pernios, los tiradores, las cerraduras, etc.) se sujetan mediante muescas o perforaciones en el vidrio. Si el vidrio no se temple previamente, la acumulación de tensiones que tiene el vidrio al realizarle las muescas y perforaciones acaba rompiendo la lámina de vidrio. El vidrio templado no se puede transformar, es decir, cortar, taladrar ni biselar, una vez que se ha templado ni pueden realizarse tratamientos superficiales, ya sea pulido con chorro de arena o grabado al ácido, ya que esto podría debilitarlo y causar daños prematuros.

A su vez, el vidrio templado (también conocido como securizado) en caso de fractura este se desmenuza en pequeños fragmentos, minimizándose de este modo los riesgos de heridas profundas a los usuarios.

En algunas ocasiones, con realizar la puerta en un vidrio monolítico templado no es suficiente. Por ejemplo, cuando se necesitan buenos valores de estanqueidad acústica y se debe precisar de un butiral con atenuación acústica, en el caso de vidrios anti vandálicos que evitan su fácil rotura o en el caso de que el cliente precise de un acabado estético especial. En esos casos, la puerta deberá estar conformada por dos vidrios templados, unidos entre sí mediante una lámina intercalaria (ya sea PVB, Sentry Glass o similares).

En el caso de este proyecto era por motivos estéticos: los arquitectos querían un cerramiento de baño de efecto reflectante, de tal manera que, si la incidencia lumínica del interior de la habitación es superior a la de la cabina del baño, el vidrio tiene efecto espejo y prácticamente no se puede ver qué hay en el interior y, en cambio, si miras desde el interior de la cabina hacia la habitación la imagen es nítida.

2.4.2.2 PRESTACIONES Y ESPESOR DEL VIDRIO

2.4.2.2.1 PRESTACIONES TÉCNICAS

El fabricante, una vez finalizada la obra, nos facilitó un certificado con las prestaciones del vidrio instalado, en el anexo⁵³ se puede ver el informe. Dado que en el primer caso a estudiar, el del choque térmico en Girona, ya se analizó en profundidad este tipo de documento, no se ha considerado necesario volver a enumerar sus características.

Partiendo del documento facilitado, nos quedaremos con el valor de “Resistencia al impacto del cuerpo pendular”, que en este caso el valor es 1C1. Primero de todo, aclarar que aunque este ensayo esté pensado para vidrios en los que el desnivel que salvan es superior a 55 cm, analiza las prestaciones frente al impacto y su forma de rotura, por lo que nos puede servir a modo de comparativa.

Vamos a coger la ficha de otro proyecto, en este caso es un hotel de la ciudad de Barcelona que consta de 56 habitaciones y que en cada una de ellas hay una puerta de características muy similares a la instalada en Praga. En este hotel no ha habido ningún problema de roturas, los herrajes son los mismos (misma casa comercial y referencia), es también vidrio templado y laminado pero, en este caso, el grosor es 5+5. En el anexo⁵⁴ se adjunta también la ficha técnica. En este caso vemos que la resistencia a cuerpo pendular es la misma, el valor es 1C1.

Veamos pues en que consiste este valor y que información nos puede dar al respecto. En este caso 1C1 sería el X(Y)Z que nos especifica el código técnico, por lo que, partiendo de las premisas indicadas, encontramos la siguiente información:

X:1 = Es el mejor valor, en este caso el vidrio no rompe o rompe de acuerdo a unas condiciones de ensayo.

Y:C = Modo de rotura por desintegración, llevando a un gran número de pequeñas partículas que no son dañinas.

Z:1 = Es el mejor valor, y dado que no hay desnivel nos serviría cualquiera de los 3 posibles.

A modo anecdótico, comentar que un vidrio de categoría 1(C)1 como el que estamos estudiando, el código técnico lo recomienda para zonas con desniveles superiores a 12 metros, por lo que queda demostrado que el material tiene unas características a nivel de seguridad muy superiores a las que le deberíamos pedir a una mera puerta de habitación.

2.4.2.2.2 VIDRIO LAMINAR CON DISTINTOS GROSORES

Desde hace varios años, viendo los profesionales del sector la constante evolución hacia elementos que cada vez tienden a ser más estructurales, han ido apareciendo teorías y dossieres para facilitar el cálculo de este tipo de materiales. Primero de todo tenemos que tener en cuenta que realizar el cálculo de un vidrio laminado no es nada fácil, el vidrio laminado muestra un complicado comportamiento mecánico estructural debido a la combinación de un material rígido (vidrio) y un material blando (PVB).

En construcción, el método de diseño estándar (elástico) se denomina el enfoque de esfuerzo máximo. En el enfoque de esfuerzo máximo, el ingeniero determina las dimensiones de una estructura asegurando que las tensiones máximas no excedan la fuerza del material en cualquier posición de la estructura. El método

⁵³ L – DECLARACIÓN PRESTACIONES PUERTA INSTALADA. Página 165

⁵⁴ L – DECLARACIÓN PRESTACIONES PUERTA EJEMPLO. Página 165

de diseño elástico se utiliza frecuentemente en diseño de estructuras de vidrio. Cuando se utiliza el enfoque de esfuerzo máximo, es esencial que las tensiones máximas se predigan correctamente.

Aunque los elementos laminados suelen tener materiales iguales en las capas de vidrio, es decir, $E1 = E3$, existen vidrios laminados denominados como híbridos⁵⁵, donde ambas capas de vidrio presentan distintas propiedades $E1 \neq E3$. A partir de esta problemática, nos vamos a ayudar del simulador informático conocido como Glastruct para realizar una comparativa entre ambos materiales, partiendo de las diferencias de composiciones.

En este caso, debemos partir de que el programa no trabaja en sistema internacional, por lo que hemos tenido que ajustarnos al sistema imperial de unidades, por lo que las unidades aparecen en pulgadas (in.) y libras por pie cuadrado (PSF).

Al comparar ambos materiales, partiendo en los dos casos de las mismas características (mismo tipo de vidrio, altura, ancho...) simplemente cambiando las dos composiciones de vidrio podemos comprobar que los valores de resistencia en ambos casos son totalmente idénticos. El programa solo admite introducir valores de cargas de viento, por lo que en ambos casos se ha ido incrementando el valor de carga puntual de corta duración (3 segundos o más) para conseguir el valor máximo. En ambos casos el resultado es idéntico, 128,35 psf que son 6,145 Kpa de resistencia a las cargas.

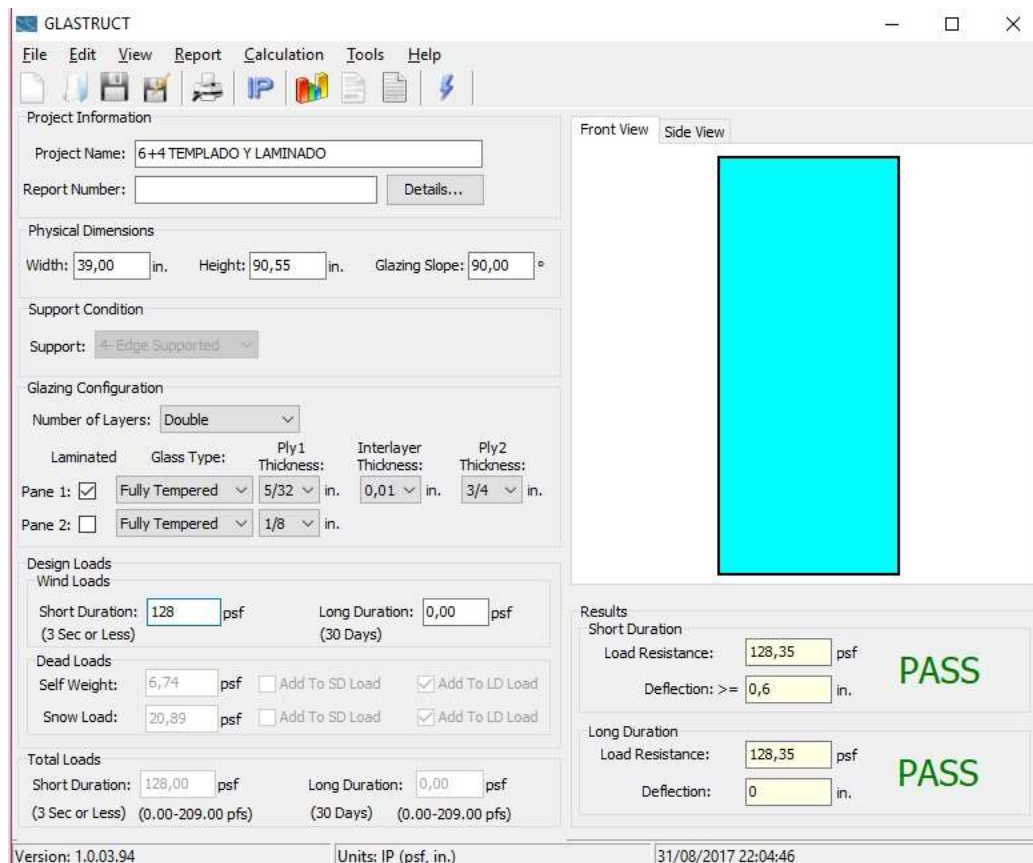


FIG. 83 - RESULTADO DEL CÁLCULO PARA EL VIDRIO ESTUDIADO (COMPOSICIÓN 6+4)

En el anexo⁵⁶ de este documento se encuentran los resultados de las dos hipótesis establecidas en este documento, para poder realizar la comparativa de los valores de ambos.

2.4.3 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

El objetivo principal de este apartado era demostrar que la composición prescrita en las puertas del hotel era la adecuada. Para poder realizar esta demostración, se ha realizado una comparación entre otro material, de características muy similares pero distinta composición.

Como se ha podido comprobar en los anteriores apartados, el vidrio templado y laminado de composición 6+4 y el de 5+5 obtienen los mismos valores de resistencia y cumplen de sobras con la normativa que hay actualmente en vigencia. Por lo que se considera que la elección del material es totalmente válida. El vidrio templado y posteriormente laminado con PVB es un producto que presenta una resistencia al impacto muy alto, a los esfuerzos de flexión y a las solicitaciones de origen térmico.

Por lo que se refiere al motivo de fractura, en este caso no tenemos suficiente información para poderla determinar. Aun así, por experiencia, la mayoría de los clientes de los hoteles, en romperse algún elemento de su habitación siempre tienden a excusarse diciendo que ellos no han sido, así que podríamos poner en duda el testimonio de la clienta. Sobre todo, teniendo presente que para romper un vidrio de estas características de esta manera se ha tenido que someter al vidrio a un esfuerzo considerable.

Otra explicación posible que existe a este caso, partiendo de que la clienta del hotel hubiera dicho la verdad, puede ser que el vidrio haya roto por una inclusión de níquel en su interior. Esta explicación la podemos considerar improbable, dado que una fractura por este fenómeno podría haber causado la fractura en uno de los vidrios, pero el otro es poco probable que hubiera roto a partir de la “explosión” del primero, como se comentaba al principio de este apartado, ver un vidrio roto con estas características no suele ser muy común y la instalación de vidrios templados y laminados 5+5 sí que lo es.

En el caso de que la rotura de esta puerta hubiera sido debido a inclusiones de níquel, este problema se hubiera solucionando fácilmente realizando el heat soak test a todos los vidrios. Aunque este tratamiento tiene un sobre coste, puede ahorrarnos muchos problemas. En este caso era una puerta de vidrio, que no salvaba ninguna altura, pero podría haber sido una baranda o un vidrio de fachada y una fractura de este tipo sí que hubiera sido peligrosa para el usuario.

Concienciar de la importancia de realizar el heat soak test debería ser prioritario antes de empezar una obra, sobre todo, en elementos que salven grandes alturas.

⁵⁶ L - HIPÓTESIS. Página 165

2.5 VIDRIOS PARA PISCINAS

2.5.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO

En este último apartado no se va a estudiar un caso concreto, si no que se estudiará el caso de los visores de piscina a nivel genérico, pero se mostrará un ejemplo de cálculo y de lo que no se debe hacer.

El vidrio está evolucionando tanto, que ni las propias normas aplicables son capaces de ajustarse a esta evolución constante. Al realizar el contrato de obra, por norma general, se especifica claramente que la instalación a realizar por parte del industrial debe cumplir con la normativa aplicable. Normalmente, aparece una cláusula parecida a la siguiente:

Todos los productos, trabajos e instalaciones suministrados y/o ejecutados por el industrial deberán cumplir dispuesto en el CTE Código Técnico de la Edificación y demás normativa técnica de aplicación (REBT, RITE, NTE, EHE, etc...)

Pero, ¿En qué medida se nos puede exigir cumplir con este tipo de normativas, si el elemento que se está instalando no está contemplado en estas normas?

El objetivo de este apartado es verificar si el código técnico se adapta a los métodos de construcción con vidrio que usamos hoy en día, estudiar los límites sobre los que estamos trabajando y plantear incoherencias respecto la realidad y la norma sobre papel.

A su vez, este apartado plantea hacer una reflexión de hasta qué punto es sensato construir con vidrio, si independientemente de las normas aplicables (o de las que no lo son específicamente) como profesionales debemos poner límite a lo que realmente es posible edificar y hasta qué punto, un material “frágil” como es el vidrio, puede llegar a trabajar a nivel estructural y ser seguro para el usuario final.

2.5.2 ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Primero de todo, lo que vamos a hacer es estudiar la normativa que hay actualmente aplicable. En este caso vamos a obviar las normas de calidad de material, dado que como profesional, en principio, no deberían preocuparnos demasiado (nuestra preocupación no debería ir más allá de que el proveedor al entregar el material nos entregue la documentación conforme la cumple).

Primero de todo, veamos el concepto de flecha admisible:

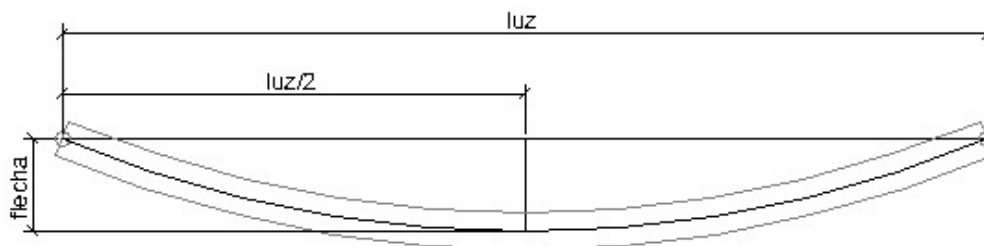


FIG. 84 - FLECHA DE UN ELEMENTO CONSTRUCTIVO. FUENTE: BLOG PABLO NIETO

El código técnico de la edificación indica las siguientes flechas:

4.3.3 Deformaciones

4.3.3.1 Flechas

- 1 Cuando se considere la integridad de los elementos constructivos, se admite que la estructura horizontal de un piso o cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación de acciones característica, considerando sólo las deformaciones que se producen después de la puesta en obra del elemento, la flecha relativa es menor que:
 - a) 1/500 en pisos con tabiques frágiles (como los de gran formato, rasillones, o placas) o pavimentos rígidos sin juntas;
 - b) 1/400 en pisos con tabiques ordinarios o pavimentos rígidos con juntas;
 - c) 1/300 en el resto de los casos.
- 2 Cuando se considere el confort de los usuarios, se admite que la estructura horizontal de un piso o cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación de acciones característica, considerando solamente las acciones de corta duración, la flecha relativa, es menor que 1/350.
- 3 Cuando se considere la apariencia de la obra, se admite que la estructura horizontal de un piso o cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación de acciones casi permanente, la flecha relativa es menor que 1/300.
- 4 Las condiciones anteriores deben verificarse entre dos puntos cualesquiera de la planta, tomando como luz el doble de la distancia entre ellos. En general, será suficiente realizar dicha comprobación en dos direcciones ortogonales.
- 5 En los casos en los que los elementos dañables (por ejemplo tabiques, pavimentos) reaccionan de manera sensible frente a las deformaciones (flechas o desplazamientos horizontales) de la estructura portante, además de la limitación de las deformaciones se adoptarán medidas constructivas apropiadas para evitar daños. Estas medidas resultan particularmente indicadas si dichos elementos tienen un comportamiento frágil.

FIG. 85 - APARTADO EN EL QUE EL CÓDIGO TÉCNICO DETERMINA LA FLECHA MÁXIMA. FUENTE: DOCUMENTO BÁSICO SE. CTE

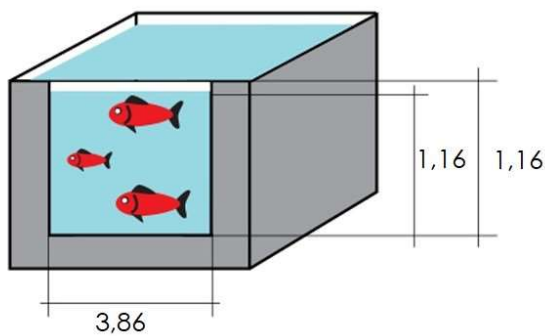
En este caso, dado que no pertenece a ninguno de los casos que se indican específicamente, se considerará una flecha de 1/300, que es la genérica para resto de casos.

Veamos hasta qué punto es posible cumplir con estas especificaciones. Para poder verificar el grosor de un vidrio y la flecha que presenta, nos vamos a basar en el método simplificado de cálculo de espesores de vidrio que presenta el manual de Saint Gobain Glass (Francia). Es importante hacer el inciso que la normativa francesa aplicada al vidrio en edificación está muy evolucionada, muchísimo más que el código técnico. Es por ese motivo por el que muchas veces los profesionales recurrimos a esta para poder dar base a nuestros cálculos.

El cálculo que se va a seguir es el que aparece en la página 421 de Memento SGG⁵⁷. Partiendo de las premisas que se indican en este manual, nosotros vamos a realizar el cálculo de un caso real. A continuación se indican las dimensiones que se van a tener en cuenta para el cálculo:

En este caso se plantea un vidrio sujetado a 3 costados, en el que el agua está a la misma altura que el propio vidrio. El propio manual indica que el coeficiente de seguridad aplicado a los cálculos que ellos indican es del orden de 3,5 y que la flecha máxima admisible es 1/200 de la medida más pequeña (en este caso la altura).

⁵⁷ [88] pág. 148



Dado que la flecha del código técnico es mas desfavorable, vamos a partir de $1/300$ como flecha máxima admisible.

Como el objetivo de este apartado no es explicar el método de cálculo que se plantea en esta normativa, solo se van a estudiar los resultados. En el anexo encontraremos la metodología de cálculo que se especifica en el manual de Saint Gobain y que hemos seguido en este apartado.

El método de cálculo es bastante simple, se hace una hipótesis escogiendo unas características y estas se van modificando hasta que el resultado cumple con lo que es posible fabricar y con la flecha máxima admisible. Primero escogemos un tipo de vidrio (monolítico o templado) y el número de hojas que queremos que tenga nuestro laminado.

Es cuestión de ir haciendo hipótesis hasta que el resultado nos cumple. En este caso, después de plantear muchas hipótesis y realizar los cálculos necesarios, el resultado ha sido que no se puede fabricar.

¿Qué grosor de vidrio necesitaríamos para que este vidrio cumpliera con la flecha máxima establecida por el código técnico? Hacemos el cálculo y el resultado nos da que debería ser un vidrio laminado formado por 20 hojas de 35 mm para cumplir con la flecha, es decir, 0,70 metros de grosor de vidrio. Por supuesto, este valor es imposible.

¿Y si utilizamos la flecha que nos marca el manual del vidrio de Saint Gobain? Hacemos el cálculo y el resultado nos da que debería ser un vidrio laminado formado por 14 hojas de 35 mm para cumplir con la flecha, es decir, 0,49 metros de grosor de vidrio. Lo mismo que en el caso anterior, a nivel de producción es totalmente imposible realizar un vidrio con estas características.

Llegados a este punto, como profesionales, ¿cómo debemos actuar frente a un proyecto de estas características? ¿Debemos decirle al cliente que no es viable hacerlo con este material? ¿Debemos obviar lo que diga el código técnico y realizarlo, aunque en el contrato se firme una cláusula en la que se indique que vamos a cumplir con lo que en él se especifica?

El problema del vidrio que se ha calculado anteriormente es que era una reposición, es decir, ya estaba colocado previamente. En este caso concreto, se llegó a hacer, sin tener en cuenta la flecha máxima admisible. Se utilizó un vidrio templado y laminado, en concreto la composición era de 12+12+12+12 templado, con cantos pulidos, al que no se le ha hecho el Heat Soak Test.

El vidrio que había instalado inicialmente tenía una composición de 15+15+15+15 sin templar. Se creyó (erróneamente) que las propiedades del vidrio templado a nivel de resistencia mecánica también conseguirían una mejora en su rigidez. Por supuesto, incremento de la resistencia mecánica no implica disminución de la elasticidad del material. Por lo que el resultado fue el siguiente:

El motivo por el que se disminuyó el espesor del vidrio, es que los anteriores (de 60 mm en total) tocaban con el perfil en “u” que los sujetaba y acababan rompiéndose.

El vidrio utilizado para realizar este visor de piscina no era curvo, simplemente el empuje del agua ha deformado el vidrio.



FIG. 87 - IMAGEN DEL RESULTADO. FUENTE: VIDRES BERNI

La flecha más desfavorable, situada en el punto central del vidrio, calculada in situ, es de 3.2 cm. Por supuesto, este valor es inadmisibile.

Este es el resultado de un mal diseño original por parte de la dirección facultativa y una mala prescripción del material.

En un caso como este lo más sensato, profesionalmente hablando, hubiera sido negarse a realizar este tipo de trabajos, dado que está claro que desde un inicio había un problema de diseño que iba a dificultar que el resultado fuera el deseado. Se podría haber planteado la realización de este cerramiento, por ejemplo, con metacrilato.

Veamos una comparativa entre el vidrio y el metacrilato:

COMPARATIVA DE PROPIEDADES

	VIDRIO	METACRILATO	
1	Transparencia (Transmisión de luz)	89%	92%
2	Transmisión térmica (Conductividad)	5,7 W/m ² K	5,6 W/m ² K
3	Densidad (peso)	2.500Kg/m ³	1.190Kg/m ³
4	Resistencia al impacto	Muy baja	Alta
5	Dureza	6,5 (Alta)	Baja
6	Coef. Dilatación lineal	9x10-6 mm/m°C	7x10-5 mm/m°C
7	Coste (para e=6mm)	40€/m ²	40€/m ²
8	Fragilidad	Muy alta	Muy baja
9	Durabilidad	Alta	Baja
10	Permeabilidad al agua.	Desprezable	Desprezable
11	Resistencia a tracción	300/700Kg/cm ²	72.000Kg/cm ²

■ Valor poco adecuado ■ Valor mas favorable

FIG. 86 - COMPARATIVA ENTRE EL VIDRIO Y EL METACRILATO. FUENTE: PORTALPEZ.

2.5.3 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

El sector del vidrio está evolucionando de forma vertiginosa, no solo a nivel estético, sino que también a nivel técnico y conceptual. Está claro que el código técnico actualmente no se ajusta a las prestaciones de los materiales, pero lo más preocupante es que este, probablemente no llegará a evolucionar a la misma velocidad a la que evolucionan los nuevos materiales.

Esto nos deja a los técnicos “desamparados”; Pese a que nuestros conocimientos sobre materiales y nuestras capacidades de realizar cálculos puedan lograr avances increíbles, deberíamos edificar con sensatez, siempre primando la seguridad del usuario ante todo.

Veamos el ejemplo anterior: dejando a un lado el parámetro estético. Vamos a suponer que, al no haber realizado el Heat Soak Test, uno de los vidrios tiene una inclusión de níquel y acaba rompiendo. Tal es la tensión de estos vidrios que, en caso de que uno de ellos se rompiera, la presión que ejerce el agua sobre la superficie del vidrio probablemente acabaría rompiendo el resto de vidrios que componen el visor.

En este caso, por medio de cálculos de podría haber previsto el valor de la flecha máxima resultante y, a partir de ahí, decidir si realmente era sensato construir con un elemento de estas características.

En el caso de que hubiéramos decidido que no era viable, se le deberían haber planteado materiales alternativos al cliente, como es el caso del metacrilato algún policarbonato de características similares que tuvieran unos valores aceptables.

CONCLUSIONES DEL TRABAJO

El objetivo principal de este documento era conocer en profundidad el vidrio, realizando un recorrido a lo largo de sus propiedades y, a su vez, lograr resolver algunas incógnitas que nos planteaban los casos reales.

A partir de los anteriores apartados que componen el bloque dos (el que se refiere a los casos prácticos a estudiar) ha habido ciertos paralelismos en la mayoría de las conclusiones a las que se han llegado en cada uno de los casos.

Primero de todo, indicar que realizar una buena prescripción del vidrio es esencial. En el ámbito profesional, no todos los profesionales disponen del suficiente conocimiento del material como para poder hacer una buena prescripción, ello acaba derivando en problemas que, en su gran mayoría, se podrían haber previsto con la información suficiente. En la mayoría de los casos, esta falta de información viene dada a partir de que muchos profesionales no son conscientes del gran número de aplicaciones a las que puede responder el vidrio hoy en día; Cada vez el vidrio se utiliza más como elemento estructural, por lo que el arquitecto técnico acaba dependiendo en muchos casos de algún industrial especialista, que aunque conoce el material de primera mano, no siempre tiene los conocimientos necesarios a nivel de estructuras.

La concienciación a los profesionales de la importancia de realizar tratamientos preventivos, tales como el Heat Soak Test, combinados con un buen asesoramiento técnico por parte de industriales y especialistas en vidrio se podría prever gran parte de los problemas. Esto no solo nos ahorraría tiempo y esfuerzo, si no que la colocación del vidrio adecuado podría ser muy rentable. Podríamos evitar fracturas, se podría conseguir buenos valores climáticos, una buena estanqueidad acústica, consiguiendo así un buen confort en el interior de las construcciones en las que trabajamos.

Es primordial remarcar que conocer los límites de los vidrios y ser conscientes de la repercusión que pueden llegar a tener nuestras decisiones. Cualquier persona que haya trabajado a pie de obra sabe que no siempre es fácil tener presente todos estos parámetros cuando la obra ya se ha iniciado. Normalmente los proyectos ya vienen redactados y, la mayoría de las veces, los vidrios o no están definidos o no son los adecuados.

A partir de aquí, en la mayoría de los casos se acaban seleccionando las tipologías de los vidrios en tiempos muy reducidos, debido a las velocidades vertiginosas a las que solemos edificar. Esto acaba derivando en muchos casos, en que la elección del tipo de vidrio se acaba haciendo a partir del condicionante económico, sin tener en cuenta realmente que vidrio sería el más adecuado.

La correcta realización de los proyectos, ya desde fases iniciales, sería esencial para poder prever este tipo de problemas. Si la persona encargada de realizar el proyecto tiene conocimientos suficientes sobre vidrio y es capaz de realizar una buena prescripción del material, a partir del proyecto se realizarían valoraciones ajustadas a la realidad y se evitarían desviaciones económicas una vez se realizara la obra. Conocer el vidrio de primera mano, realizar una buena prescripción, saber cuándo es sensato construir con él y realizar todos los análisis preventivos posibles, nos ahorrará grandes problemas y nos hará profesionales más competentes.

TABLA DE ILUSTRACIONES

Fig. 1 - Representación plana esquemática de la estructura de SiO ₂ , comparativa entre cristal y vidrio. Fuente: Universidadpopularc3c.....	8
Fig. 2 - Técnica de solpado. Fuente: Encyclopédie por diderot y d'alembert, 1773.....	10
Fig. 3 - Fundiendo vidrio; Grabado de Re Metallica, 12 libros sobre minería y metalurgia, Georgius Agricola (1494-1555, Basel, 1557).....	11
Fig. 4 - La producción de vidrio crown. Grabado de la Encyclopédie por Diderot y D'alembert, 1773	14
Fig. 5 - Proceso de fabricación de vidrio plano por medio de un cilindro. Fuente: Apuntes de la facoltà di architettura. Luigi Vanvitelli	14
Fig. 6 - Croquis en sección de un mosaico a suelo. Autor: José María Martínez Murillo.....	16
Fig. 7 - Cristo Pantocrátor en la iglesia de Santa Sofía de Estambul. Fuente: Somos viajeros.	17
Fig. 8 - Detalle de uno de los vitrales de la catedral de Ausburgo. Autor: Hans Bernhard.....	18
Fig. 9 - Detalle de vidriera. Capilla de la virgen de Le Mans (S.XII). Autor: Selbimay.....	18
Fig. 10 - Imagen de la Santa Chapelle. Fuente: web Sainte Chapelle	19
Fig. 11 - Detalle de la vidriera de la catedral de Evreux, Francia. ejemplo de la evolución de las figuras. Fuente: Vassil	19
Fig. 12 - Ejemplo de vitral cistercense. Abadía de Pontigny, Yonne, Francia. Imagen de Wikipedia	19
Fig. 13 - Hermanos Le Prince, vidriera. Representación del árbol de Jesé, en la iglesia de Saint Etienne de Beauvais (S.XVI)	20
Fig. 14 - Tiffany & Co. two angels (1910). autor: Daderot.....	21
Fig. 15 - Detalle interior casa batlló de barcelona, antoni gaudí. Aautor: Mstylav Chernov.....	22
Fig. 16 - The Crystal Palace de Josef Praxton, Grabado de la época.....	23
Fig. 17 - Galleria Victor Manuel II (Milan), Fotografía de giacomo brogi.....	23
Fig. 18 - Faguswerk. fabrica Fagus, Alfred an der Leine, 1911. Walter Gropius/ Adolf Meyer.....	24
Fig. 19 - El edificio que walter Gropius diseñó para la Bauhaus de Dessau (1926). Fuente: 20 minutos.....	24
Fig. 20 - Detalle de los cerramientos de vidrio en el pabellón alemán de Van Der Rohe. Fuente: Flickr, profzucker	25
Fig. 21- Detalle de las fachadas y pasarelas de van neelle. Fuente: Wikipedia.....	25
Fig. 22 - The lever house, del edificio una vez construido, foto de 1953. Fuente: Wired New York26	
Fig. 23 - Cubierta y cerramiento de vidrio de la nueva galería nacional de Berlín. Fuente: Corners of the 20th century	26
Fig. 24 - Oficinas de Willis faber & Dumas. Ipswich, Reino Unido, 1975. Fuente: Tectónica	27
Fig. 25 - Interior de la Casa Laminata, construida enteramente de vidrio. Autor: Luuk Kramer	28
Fig. 26 - Fachada de la casa mimética de Dominic Stevens, mostrando la reflexión del paisaje en sus paredes. Fuente: Mimeo; Autor: Emmett scanlon	28
Fig. 27 - Etapas básicas del proceso de producción del vidrio. Fuente: Apuntes de F. Blanco, Universidad de Oviedo.....	35
Fig. 28 - El sistema colburn. Fuente: José María Fernández Navarro, Los vidrios.....	38
Fig. 29 - El Sistema Fourcault. Fuente: José María Fernández Navarro, Los Vidrios.....	39
Fig. 30 - El sistema Pittsburgh. Fuente: José María Fernández Navarro, Los Vidrios.	39

Fig. 31 - Procedimiento boudin colado continuo. Fuente: José María Fernández Navarro, Los Vidrios.....	40
Fig. 32 - ejemplos de vidrio impreso. Fuente AGC, Diseño de Michele de Lucchi.....	40
Fig. 33 - Etapas básicas del proceso de producción de vidrio flotado. Fuente: corporación Furukawa.....	42
Fig. 34 - Diagrama de reciclaje de envases de vidrio. fuente: genesis.uag.mx	47
Fig. 35 - Diferencia entre los patrones de ruptura de un vidrio convencional, termoendurecido y templado. Fuente: ITEC	50
Fig. 36 - Proceso de fabricación de un vidrio pirolítico. fuente: grupo Corbalán.....	51
Fig. 37 - Vidrio reflectivo y bajo emisor. fuente: manual del vidrio plano.....	52
Fig. 38 - Ejemplo de grabado al ácido. Fuente: Crocetek.....	54
Fig. 39 - grabado uniforme al chorro de arena. hospital de frankfurt. diseño de heiner blum	54
Fig. 40 - sección de un vidrio cámara. fuente: gratol.....	56
Fig. 41 - terminología básica del vidrio curvado. fuente: cricursa	57
Fig. 42 - Ejemplo de vidrio moldeado doble. Fuente: Leroy Merlin.....	57
Fig. 43 - Un ejemplo de aplicación de moldeado doble. en este caso se han realizado unos paramentos verticales curvados. Fuente: Carpin tecnic	58
Fig. 44 - muro cortina. fuente: glasstech.....	60
Fig. 45 - entre forjados. fuente: glasstech.....	61
Fig. 46 - Tipos de sistemas spider. Fuente: Glasstech.....	61
Fig. 47 - sistema de sujeción tipo araña (o spider). fuente: vitralba	61
Fig. 48 - fachada ventilada. fuente: glasstech.	62
Fig. 49 - Radiación solar (R) incidiendo sobre una superficie de vidrio con dos ángulos de incidencia diferentes (30 y 80°). Fuente: Acondicionamiento térmico de edificios.....	67
Fig. 50 - Formas de sombreado exterior y su influencia en el stress térmico. Fuente: Acondicionamiento climático de edificios.....	68
Fig. 51 - Generación de tensión térmica. Fuente: Manual del vidrio.....	70
Fig. 52 - Resistencia según el tipo de vidrio. Fuente: Acondicionamiento térmico de edificios.	71
Fig. 53 - Grafico tensión deformación.....	71
Fig. 54 - Las tensiones de trabajo admisibles, expresadas en dan/cm ² . fuente: Ariño.....	73
Fig. 55 - Fractura de un vidrio debido a un esfuerzo de tracción. Fuente: la fractura del vidrio (francisco capel).....	74
Fig. 56 - Tipos de propagación de la fractura en el vidrio. Fuente: Los vidrios,.....	75
Fig. 57 - Fracturas por estrés térmico por baja y alta tensión. Fuente: Manual del vidrio plano.....	76
Fig. 58 - El espectro electromagnético. Fuente: grupo led.....	77
Fig. 59 - Refracción oblicua en un vidrio incoloro. Fuente: Seti.cl	77
Fig. 60 - certificado conforme los vidrios cumplen con la norma europea que expiden las empresas una vez entregados los vidrios. Fuente: Vidres Berni.....	82
Fig. 61 - Factores luminosos del vidrio. Fuente: AGC Yourglass Pocket.....	86
Fig. 62 - Vidrio a estudiar visto desde el exterior. Fuente: Vidres Berni.....	90
Fig. 63 - Imagen de la fractura. fuente: Vidres Berni.....	91
Fig. 64 - Fractura del vidrio en croquis.....	92
Fig. 65 - Detalle de la grieta en la parte superior del vidrio. Fuente: Vidres Berni.....	92
Fig. 66 - Sección del vidrio, indicando las partes que lo componen.	94
Fig. 67 - Tipos de propagación de la fractura en el vidrio. fuente: los vidrios, e. mari.	98

Fig. 68 - Dimensiones para el cálculo del Factor Sombra. Sección del cerramiento.....	99
Fig. 69 - Proyección de sombras a las 6:30 h	100
Fig. 70 - Proyección de sombras a las 8:30h. El sombreado azul representa la proyección de sombras que teníamos a las 6:30h.....	101
Fig. 71 - Generación de tensión térmica. Fuente: Lirquen	103
Fig. 72 - Sección de materiales utilizados en obra. Fuente: Vidres Berni.....	104
Fig. 73 - Distribución de las temperaturas a partir de Therm.	105
Fig. 74 - Inclusión de partículas de NiS. Fuente: Extralum.....	108
Fig. 75 - ICI House (Orica House), Melbourne. Fuente: Wikipedia.....	110
Fig. 76 - Proceso de Heat Soak. Fuente: Norma Europea	110
Fig. 77 - Patrón típico de rotura espontánea tipo “mariposa” y la partícula monolítica. Fuente: Extralum.	112
Fig. 78 - Partícula monolítica de Silicio. Fuente: Extralum	112
Fig. 79 - Imágenes de la fachada acristalada francesa. fuente: vidres berni.	114
Fig. 80 - Comparación comportamiento entre vidrio con butiral PVB y vidrio con SentryGlas. Fuente: Dupont.	116
Fig. 81 - Croquis elemento isótropo / anisótropo. Fuente: Departamento de Edafología y Química Agrícola Universidad de Granada.....	117
Fig. 82 - Imagen de la puerta rota. Fuente: Vidres Berni.....	119
Fig. 83 - Resultado del cálculo para el vidrio estudiado (composición 6+4)	122
Fig. 84 - Flecha de un elemento constructivo. Fuente: blog Pablo Nieto.....	124
Fig. 85 - Apartado en el que el código técnico determina la flecha máxima. Fuente: documento básico se. cte.....	125
Fig. 86 - Comparativa entre el vidrio y el metacrilato. Fuente: Portalpez.....	127
Fig. 87 - Imagen del resultado. fuente: vidres berni.....	127

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS (Ordenados alfabéticamente por el apellido de autor)

- [1] *Antolín, M.A.* **Contribución al estudio de inhomogeneidades en vidrios industriales.** Boletín sociedad Española Cerámica y Vidrio. 1972
- [2] *Arana, José Luís; González, Javier Jesús.* **Mecánica de fractura.** Servicio editorial de la universidad del País Vasco.
- [3] *Cortés Pizano, Fernando,* **Breve historia de las aplicaciones del vidrio plano en construcción.** Enero, 2001.
- [4] *Díaz, Victorio; Barreneche Raúl.* **Acondicionamiento térmico de edificios.** Editorial Nobuko. Edición 2005.
- [5] *Ballantyn, E.R;* **Fracture of Toughened Glass Wall Cladding, ICI House Melbourne.** Australian CSIRO Division of Building Researc, Report No. 061-4, 196
- [6] *Bao Yiwang, Yang Jianjun, Shi Xinyong;* **Another Cause for Spontaneous Breakage of tempered Glass – Silicon Particles in Tensile Zone.** Glass performance days 2007
- [1] **Diccionario de la lengua Española.** Real Academia Española.
- [2] *Fernández Navarro, José María.* **El vidrio. Constitución, fabricación y propiedades.** Editorial CSIC, Instituto de Cerámica y Vidrio, 1985.
- [3] *Fernández Navarro, José María.* **Terminología de los defectos del vidrio.** Sociedad Española de Cerámica y vidrio, 1973.
- [4] *García Heras, Manuel.* **Historia del vidrio.** Editorial CYAN, 2013
- [5] *Groover, Mikell P.* **Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas.** Editorial Raela Maes.
- [6] *Jacob & Associates Pty Ltd;* **A Review of the Níkel Sulphide Induced Fracture in Tempered Glass.** Glass Processing Days, Poster 10 – 2001.
- [7] *Macfarlane, Adam; Martin, Gerry.* **La historia invisible: El vidrio, el material que cambió el mundo.** Editorial océano, 2006.
- [8] *Mari, E.A.* **Los vidrios. Propiedades, tecnologías de fabricación y aplicaciones.** Editorial AméricaLee, 1982.
- [9] *Montes Rodríguez, Julián, Castro Martínez, Lucas y Real Romero, Juan Carlos.* **Procesos industriales para materiales no metálicos.** Editorial Vision Net, 2ª edición.
- [10] *Reuleaux, Francisco.* **La fabricación y elaboración del vidrio: Los grandes inventos.** Editorial Maxtor, 2011.
- [11] *Shackelford, F.* **Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros.** Cuarta edición. Ed. Prentice Hall (1998).

- [12] Tectónica (Monografías de arquitectura, tecnología y construcción) **Nº10 – El vidrio**
- [13] *Varios autores. Architecture Materials*, Cristal. Editorial Evergreen, 2008.
- [14] *W. Morey, George. The properties of glass (Second edition)*. Editorial: Reinhold Publishing Corp. 1954.

APUNTES, NORMAS Y MONOGRAFÍAS (Orden alfabético)

- [15] **DA DB SUA/1** – Clasificación de los vidrios según sus prestaciones frente al impacto y su forma de rotura según la norma UNE-EN 12600:2003. Documento de apoyo al documento básico DB-SUA Seguridad de utilización y accesibilidad. Código técnico de la edificación.
- [16] **NC-02.001** Norma de calidad visual del vidrio Monolítico. Norma mercosur 294
- [17] *A.A.Griffith*, "Phil. Trans. Roy. Soc, Vol. A221, p. 163-197. Londres (1921).
- [18] *Adrián Borsella, Gabriel. Defectos frecuentes del vidrio. Definición, clasificación y caracterización*. Tema expuesto en la conferencia brindada durante las Jornadas del Vidrio del 2008, en la sede de ATAC.
- [19] AGC. **Manual del vidrio, Yourglass Pocket**. Edición 2010
- [20] *Aguirre de Yraola, Fernando. Muros cortina*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas
- [21] **Apuntes asignatura Materiales II** - Escuela de Ingeniería Técnica Civil. Arquitectura Técnica. Universidad Politécnica de Cartagena. [Consulta 24 de Febrero de 2015]. Disponible: http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6197/mod_resource/content/1/Generalidades_02._Historia.pdf
- [22] *Arán Molina, Yolanda. Fachadas ligeras, muros cortina. Proyecto final de grado de ingeniería de edificación*. Universidad Politécnica de Valencia. 2011.
- [23] *Arbós Bellapart. El vidrio en la ingeniería estructural: Propiedades esenciales*. [Consulta 01 de Noviembre de 2015]. Disponible: <http://www.bellapart.com/images/stories/pdfs/articles/el-vidrio-en-la-ingenieria-estructural.pdf>
- [24] *Avellaneda Díaz-Grande, Jaume. Façanes lleugeres amb cambra ventilada. Criteris per al disseny constructiu*. ETSAV. Edición 1996.
- [25] *Blanco Álvarez, Francisco*. Apuntes para la asignatura: **“Tecnología de Cementos, Vidrio y Cerámicas”**. Universidad de Oviedo, Lecciones 1-18. [Consulta: 18 Abril 2014]. Disponible en: www6.uniovi.es/usr/fblanco/
- [26] *Bowler-Reed, John. The disintegration of thermally toughened glass by nickel sulphide inclusions*. March 2002
- [27] BS EN 14179-1:2005. **Glass in building. Heat-soaked thermally-toughened soda lime silicate safety glass. Definition and description**
- [28] *Charles, R. J., J.Appl. Phys.* **29** (1958) p.1657.

- [29] *Cortés Pizano, Fernando. La vidriera del Renacimiento.* Universitat de València. Marzo 2001
- [30] *Capel, Francisco. La fractura del vidrio.* Anales de mecánica de fractura 26, Vol 1. (2009)
- [31] **CITAV. Manual del vidrio.** Centro de información técnica de aplicaciones del vidrio. (1996)
- [32] **Diseño de fachadas ligeras. Manual de introducción al proyecto arquitectónico.** Hydro Building Systems. ITEC Setiembre de 2005.
- [33] *G. R. Irwin, "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. J. Appl. Mech. Vol. 24, n° 3, p. 361-364, 1957*
- [34] **Informe sobre la transición entre la “homologación” y el marcado CE aplicable a los vidrios laminados de seguridad (Blindajes Transparentes).** Ministerio de industria, turismo y comercio.
- [35] *Joan Espinàs i Neus Mateu. El vidrio I - Materiales.* Apuntes asignatura construcción I de la Salle Arquitectura.
- [36] *Joan Espinàs i Neus Mateu. El vidrio II - Materiales.* Apuntes asignatura construcción I de la Salle Arquitectura.
- [37] *Kasper, Andreas. Spontaneous Glass Breakage Caused by Nickel Sulfide (a Review).* Saint-Gobain Sekurit Deutschland & Oussama Yousfi, SIMAP Grenoble.
- [38] *López Montes, Cosme. Inclusiones en el vidrio 1.* Originadas por las materias primas de la mezcla vitrificable. Laboratorio Central de Cristalería Española S.A (Avilés). Boletines sociedad española de cerámica y vidrio, Vol. 9 – N°2
- [39] *López Montes, Cosme. Inclusiones en el vidrio 2.* Originadas por los materiales refractarios. Laboratorio Central de Cristalería Española S.A (Avilés). Boletines sociedad española de cerámica y vidrio.
- [40] *López Montes, Cosme. Inclusiones en el vidrio 3.* Originadas por la desvitrificación. Laboratorio Central de Cristalería Española S.A (Avilés). Boletines sociedad española de cerámica y vidrio.
- [41] *Malalts i Riera, A; Gy, R. Deterioro mecánico de la superficie del vidrio.* Boletín de la sociedad Española de Cerámica y vidrio, 36 [5] 503-510 (1997)
- [42] **Memoria del seminario de conservación de vidrieras históricas.** The Getty conservation institute.
- [43] *Morales Gómez, Adoración; Martínez Murillo, José María; De la Plaza Escudero, Lorenzo. Pequeño diccionario visual de términos arquitectónicos* Ediciones cátedra, cuadernos arte cátedra, 2013.
- [44] *Nieto Alcaide, Víctor. Grutescos en vidrio: El ornamento y la vidriera Española del siglo XVI.* UNED
- [45] *Niro, Ariel. Monografía, investigación de campo: El vidrio en los oficios del fuego. Parques de Estudio y Reflexión,* La Rreja, Diciembre 2012.
- [46] *Preston, F.W.,J.Am.Ceram. Soc.,15,176 (1932)*

- [47] **Technal. Manual de fachadas ligeras.** Introducción tecnológica. Technal. Edición 2003.
- [48] Saint Gobain Glass. **Manual del vidrio.** Edición 2001
- [49] Stelzer, Ingo. SentryGlas – **Prestaciones superiores y económicas en vidrio laminado de seguridad.** DuPont.
- [50] **UNE-EN 12150-1:2000** – Vidrio para la edificación. Vidrio de silicato sodocálcico de seguridad templado térmicamente. Parte 1: Definición y descripción.
- [51] **UNE-EN 12600:2003** – Vidrio para la edificación. Ensayo pendular. Método de ensayo al impacto y clasificación para vidrio plano.
- [52] **UNE-EN 13830:2016**
- [53] **UNE EN 410-1998** – Norma Aenor
- [54] **UNE EN 410-2011** – Norma Aenor
- [55] **UNE-EN 410:2011 ERRATUM:2011** - Norma Aenor
- [56] *Yang, Jianjun.* **Another cause for spontaneous breakage of tempered glass – silicon particles in tensile zone.** Glass Performance Days 2007

PAGINAS WEB (Orden cronológico según consulta)

- [57] *Varios autores.* **Fachadas acristaladas.** Glasstech. [Consulta: 08 de Febrero de 2014].
Disponible en: <http://neufert-cdn.archdaily.net/uploads/product_file/file/282/1372711903-fachadas-acristaladas.pdf>
- [58] *Saint-Gobain glass.* **Introducción del vidrio.** [Consulta: 24 Febrero 2014]. Disponible en:
<www.saint-gobain-sekurit.com/es/glazingcatalogue/introducción-del-vidrio>
- [59] **Curso gratuito de introducción Historico-artística del vitral.** [Consulta 05 Abril de 2014].
Disponible: < <http://www.aulafacil.com/cursos/116838/arte-humanidades/arte/introduccion-historico-artistica-del-vitral/introduccion>>
- [60] **Primera parte: El arte de las vidrierías. Artículo, escola de Restauració i conservació d'obres d'art de Barcelona, E CORE.** [Consulta 25 de Marzo de 2014].
Disponible:< www.escoladerestauracion.es/?p=32>
- [61] **Segunda parte: El arte de las vidrierías. Artículo, escola de Restauració i conservació d'obres d'art de Barcelona, E CORE.** [Consulta 25 de Marzo de 2014].
Disponible:< www.escoladerestauracion.es/?p=44>
- [62] **Vidrierías Españolas. Artículo, escola de Restauració i conservació d'obres d'art de Barcelona, E CORE.** [Consulta 25 de Marzo de 2014]. Disponible:<
www.escoladerestauracion.es/?p=47>
- [63] **Anónimo. Cristo Pantocrátor. Mosaico Bizantino 1261. Vidrierías Españolas. Artículo Universidad Cristo Marroquín.** [Consulta 25 de Marzo de 2014].
Disponible:< <https://educacion.ufm.edu/anomimo-pantocrator-mosaico-bizantino-1261/>>

- [64] **Arte Guías. Vidrieras medievales, vidrieras góticas.** [Consulta 05 Abril de 2014]. Disponible: < <http://www.arteguias.com/vidrieras-gotico.html>>
- [65] **Las principales etapas en la fabricación del vidrio. Una perspectiva histórica.** [Consulta 24 de Abril de 2014]. Disponible: <www.todo.itgo.com/temas/vidrio.htm>
- [66] **El vidrio y su reciclaje, empresa Crismol.** [Consulta 17 de Julio de 2014]. Disponible: < www.crismol.com>
- [67] **El impacto medioambiental del vidrio.** [Consulta 17 de Julio de 2014]. Disponible: < www.ecologiablog.com/post/11083/impacto-medioambiental-del-vidrio>
- [68] **Impactos ambientales y actividades productivas en la industria del vidrio.** [Consulta 17 de Julio de 2014]. Disponible: < www.estrucplan.com.ar/Producciones>
- [69] Mari, E.A. **La industria del vidrio y el medio ambiente: oportunidad y enfoque del Análisis del Ciclo de Vida.** Boletín de la sociedad española de Cerámica y vidrio. [Consulta 27 de Agosto de 2014]. Disponible: < ceramicayvidrio.revistas.csic.es/index.php/ceramicayvidrio/article/viewFile/672/697>
- [70] Mata, Alejandro y Gálvez, Carlos. **Reciclaje de vidrio.** [Consulta 09 de Setiembre de 2014]. Disponible: < genesis.uag.mx/posgrado/revistaelect/calidad/cal010.pdf>
- [71] Corbalán, grupo. **Industrias del vidrio. El vidrio de tratamiento térmico.** [Consulta 09 de Setiembre de 2014]. Disponible: < www.corbalan.com/>
- [72] **El vidrio en fachadas ligeras, Construmática.** [Consulta 10 de Diciembre de 2014]. Disponible: < www.construmatica.com/construpedia/Vidrio_en_Fachadas_Ligeras>
- [73] **El Mundo, vidrio arquitectónico. Fabricación de espejos.** [Consulta 10 de Diciembre de 2014]. Disponible: < www.elmundoarquitectonico.com >
- [74] **Tablas y constantes.** [Consulta 12 de Diciembre de 2014]. Disponible: < <http://www.galeon.com/profedemateyfisica/tablas.pdf> >
- [75] Muñoz-Repiso Rubio, Verónica. **Curso gratis de introducción histórico Artística del Vitral.** [Consulta 15 de Diciembre de 2014]. Disponible: www.aulafacil.com/cursos/116838/arte-humanidades/arte/introduccion-historico-artistica-del-vitral/introduccion
- [76] **Manual del vidrio curvado. Cricursa.** [Consulta 07 de Enero de 2015]. Disponible: <<http://www.construnario.com/diccionario/swf/26160/manual%20del%20vidrio%20curvado.pdf>>
- [77] **Otros procesos de transformación del vidrio. La veveciana Glass Solutions.** [Consulta 07 de Enero de 2015]. Disponible: <http://www.laveneciana.sggs.com/la_veneciana/Informacion%20sobre%20productos/Procesos%20de%20Transformacion/otros/proceso_de_transformacion.asp>
- [78] **Tipos de cantos, Guardian Sunguard.** [Consulta 07 de Enero de 2015]. Disponible: http://www.sunguardglass.es/SpecificationsResources/TechnicalLibrary/TechnicalInformation/gi_010612
- [79] **La fractura del vidrio, capítulo 3. Colección digital UANL.** [Consulta 1 de Noviembre de 2015].

Disponible: http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1080124351/1080124351_05.pdf

- [80] **Diagnostic Interpretation of Glass Failure.** [Consulta 2 de Noviembre de 2015].
Disponible: <http://www-g.eng.cam.ac.uk/gft/media/Pg%20projects/Mauro's%20publication/Diagnostic_Interpretation_of_Glass_Failure_DRAFT.pdf>
- [81] **Cálculo del factor solar modificado del hueco teniendo en cuenta únicamente el retranqueo.** [Consulta 25 de Noviembre de 2015].
Disponible: <<http://www.scalofrios.es/CEE/ejercicios/ejercicio/Solucion%20calculo%20de%20huecos5.pdf>>
- [82] **Efecto de los gradientes de temperatura: Roturas por choque térmico.** [Consulta 31 de Enero de 2016]. Disponible: <http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm11/pfcm11_4_5.html>
- [83] **La transmitancia térmica en edificación.** [Consulta 19 de Marzo de 2016]. Disponible: <<http://www.arquitecturayenergia.cl/home/el-valor-u-la-transmitancia-termica-en-edificacion/>>
- [84] **Tomar el control de la anisotropía.** [Consulta 08 de Agosto de 2017]. Disponible: <<https://www.glastory.net/es/tomar-el-control-de-la-anisotropia/>>
- [85] **Isotropía/anisotropía.** [Consulta 08 de Agosto de 2017]. Disponible: <<http://edafologia.ugr.es/OptMine/intro/isoanis.htm>>
- [86] **Cálculo de desplazamientos en placas de vidrio laminado sometidas a carga estática mediante el concepto de módulo de elasticidad efectivo.** Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. [Consulta 15 de Agosto de 2017]. Disponible: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0366317515000229>>
- [87] **Strength design methods for laminated glass.** Maria fröling. [Consulta 15 de Agosto de 2017]. Disponible: <<http://www.byggmek.lth.se/fileadmin/byggnadsmekanik/publications/tvsm3000/web3071.pdf>>
- [88] **Memento. Saint Gobain Glass.** [Consulta 15 de Agosto de 2017]. Disponible: http://fr.saint-gobain-glass.com/sites/fr.saint-gobain-glass.com/im-extra-web2-natpub.sgg.lbn.fr/files/memento_web.pdf

ANEXOS

ANEXOS BLOQUE 1

A. COLORACIÓN DE LOS VIDRIOS

A partir de los apuntes del profesor F. Blanco ⁵⁸ de la Universidad de Oviedo, conocemos los compuestos químicos más utilizados para dar coloración.

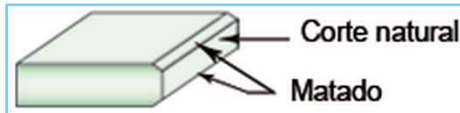
COMPUESTO QUÍMICO	COLORACIÓN
Óxido de Hierro	Verde
Óxido de Cromo	Verde, Café, azul
Sulfito de Hierro	Amarillo a café-rojo
Óxido de Níquel	Gris a verde
Óxido de Manganeso	Violeta
Óxido de Cobalto	Azul a violeta
Óxido de Cobre	Rojo-azul a verde
Selenio	Naranja a Rojo
Sulfito de Cadmio	Amarillo
Oro	Rubí a rojo
Plata	Amarillo
Óxidos de Manganeso	Incoloro

⁵⁸ [25] página 112

Los colores bronce y gris, que no tienen gran importancia en la tabla anterior pero sí que son muy utilizados actualmente, derivan de combinaciones de los anteriores.

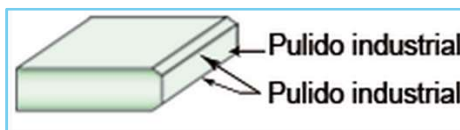
B. TIPOS DE CANTOS

Los siguientes métodos son los más utilizados actualmente:



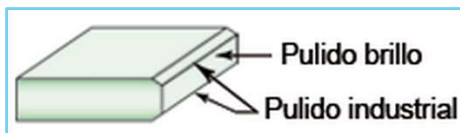
AL CORTE. FUENTE: GUARDIANGLOSS

Al corte: Simple eliminación de los ángulos del vidrio. Sin ningún tipo de acabado. (Se suele conocer popularmente como cantos matados).



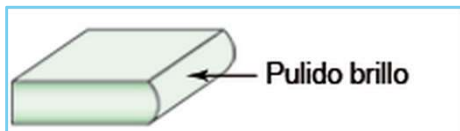
PULIDO I. FUENTE: GUARDIANGLOSS

Pulido industrial plano: Su acabado es mate y se suele utilizar en acristalamientos estructurales de silicona con cantos al descubierto.



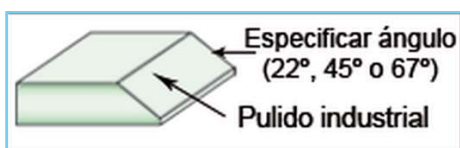
PULIDO B. FUENTE: GUARDIANGLOSS

Pulido brillo plano: Ídem al ejemplo anterior pero en este caso el acabado es brillante, se suele utilizar en acristalamientos estructurales de silicona en el que los cantos influyan en el acabado estético.



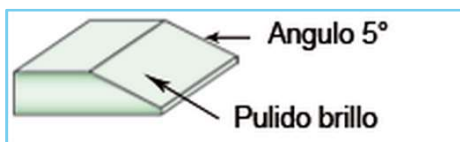
PULIDO BRILLO REDONDO. FUENTE: GUARDIANGLOSS

Pulido brillo redondo: El acabado es como el del caso anterior pero en vez de eliminar el vértice de sus ángulos se ha redondeado todo el perímetro. Se suele utilizar en objetos decorativos tales como espejos o muebles.



INGLETE. FUENTE: GUARDIANGLOSS

Inglete pulido industrial: Se utiliza en el caso de vidrios en el que todo su canto tiene un ángulo de 22, 45 o 67°. Se suele utilizar en acristalamientos estructurales de silicona.









BISEL. FUENTE: GUARDIANGLOSS

Bisel: Para ángulos de 5°. Se suele utilizar en el caso de espejos o acabados decorativos en muebles.

C. ALGUNAS TIPOLOGÍAS DE VIDRIO LAMINAR

A continuación vemos un ejemplo gráfico del uso más adecuado de los butirales en el caso de los vidrios laminado. Vemos los niveles de protección de los vidrios en función de la cantidad de butirales de pvb utilizados. Fuente: AGC glass

Nivel de protección	Tipo de vidrio de seguridad	Aplicaciones
<p>contra los accidentes</p> <p>Protección contra las lesiones</p>	<p>Vidrio templado</p>  <p>por tratamiento térmico</p> <p>Vidrio "Safe"</p>  <p>Vidrio cubierto con una película de seguridad</p>	<p>Puertas, cabinas de ducha y mamparas interiores</p> <p>Espejos de seguridad, revestimientos murales</p>
<p>Protección contra las lesiones (choques) y caídas a través del acristalamiento</p>	<p>Stratobel</p>  <p>2 hojas de vidrio y al menos 2 PVB</p>	<p>Escaleras, balaustradas, mamparas de separación, barandillas (piscinas), tejados</p>
<p>contra las agresiones</p> <p>Protección elemental contra el vandalismo</p>	<p>Stratobel</p>  <p>2 hojas de vidrio y al menos 2 PVB</p>	<p>Acristalamiento de las habitaciones (planta baja)</p>
<p>Protección contra las fracturas</p>	<p>Stratobel</p>  <p>2 hojas de vidrio y al menos 4 PVB</p>	<p>Casas aisladas</p>
<p>Protección reforzada contra las fracturas</p>	<p>Stratobel</p>  <p>2 hojas de vidrio y al menos 6 PVB</p>	<p>Casas aisladas</p>

D. RADIACIÓN. TEORÍA DE BOLZMANN

Según la teoría de Boltzmann, la energía térmica radiante emitida por un vidrio viene definida por la expresión siguiente:

$$E = \sigma T^4$$

Siendo:

σ : Constante de radiación ($5,746 \cdot 10^{-2} \text{ Js}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

T : Temperatura absoluta

Por otra parte, tiene mucha influencia el coeficiente ε de absorción de la radiación por el vidrio, cuyo valor varía considerablemente en función de la longitud de onda de la radiación. Para una longitud de onda determinada, o para unas longitudes de intervalos muy estrechos, podríamos definir el coeficiente de transmisión calorífica con la siguiente expresión:

$$\lambda_r = \frac{16 \sigma n^2 T^3}{3\varepsilon}$$

Siendo:

n : índice de refracción del vidrio

σ : Constante de radiación ($5,746 \cdot 10^{-2} \text{ Js}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

T : Temperatura absoluta

ε : Coeficiente de absorción de radiación

E. RESISTENCIA AL CHOQUE TÉRMICO

El máximo cambio brusco de temperatura que puede soportar una varilla de vidrio sin romperse, viene dada por la siguiente expresión:

$$\Delta T = \frac{2 \sigma_t (1 - \mu)}{\alpha E}$$

Siendo:

σ_t : Resistencia al límite del vidrio a la rotura por tracción. (Ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)

μ : Constante de Poisson. (Ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)

α : Coeficiente de dilatación lineal. (Ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)

E : Modulo de elasticidad. (Ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)

La Fórmula de Winkelmann nos describe como poder calcular la resistencia al choque térmico mediante el valor K. La fórmula es la siguiente:

$$K = \frac{\sigma_t}{\alpha E} f \sqrt{\frac{\lambda}{cp}}$$

K: Coeficiente de resistencia al choque térmico

σ_t : Resistencia límite del vidrio a rotura por tracción. . (Ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)

α : Coeficiente de dilatación lineal. Los vidrios que tienen un coeficiente $<5 \cdot 10^{-6}$ soportan bien los cambios bruscos de temperatura (En la figura 73 vemos los distintos valores)

E: El módulo de elasticidad

f: Es un factor de forma
 λ : La conductividad térmica
c: Calor específico
 ρ : Densidad

En la tabla siguiente vemos las resistencias al choque térmico de algunas tipologías de vidrios:

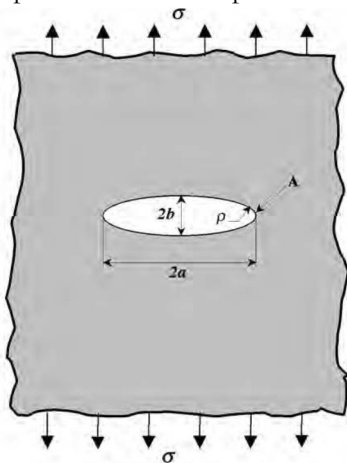
RESISTENCIA AL CHOQUE TÉRMICO DE ALGUNOS TIPOS DE VIDRIOS				
Tipo de vidrio	E [GPa]	μ	$\alpha \cdot 10^6$ [K ⁻¹]	ΔT [°C]
Vidrio cristal	65-68	0,23	10,2	≈ 60
Sódico-cálcico	72-75	0,22	8,8	≈ 70
Silicoborato 3,3	63,8	0,18	3,3	≈ 190
Vycor®	68,0	0,16	0,75	≈ 950
SiO ₂	72,0	0,16	0,51	≈ 1100
Vitrocerámica	≈ 90	0,20	≈ 0	≈ ∞

FIG 1 - RESISTENCIA AL CHOQUE TÉRMICO DE ALGUNOS TIPOS DE VIDRIOS. FUENTE: EL VIDRIO; JOSÉ MARÍA FERNÁNDEZ NAVARRO.

F. MECÁNICA DE FRACTURA ELÁSTICA LINEAL

○ LA CONCENTRACIÓN DE TENSIONES EN LAS GRIETAS DE INGLIS

Pese a que Griffith se considera uno de los precursores del estudio de la Mecánica de Fractura, sus estudios partían de los que previamente había hecho Inglis, por ese motivo se ha considerado importante enumerar previamente la teoría de éste.



Inglis analizó un agujero elíptico en una placa plana. Ésta tenía una longitud 2^a y un ancho $2b$, y a ésta se le aplica una tensión perpendicular al eje mayor de la elipse. (Ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

Inglis asumió que el agujero no está influenciado por las condiciones de contorno de la placa. La tensión en el extremo del eje mayor (Punto A) viene dada por la expresión siguiente:

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b} \right)$$

La imagen anterior se refiere a un agujero elíptico en una placa plana. La fuente de esta imagen es el documento conocido como mecánica de fractura, de José Luis Arana y Javier Jesús Gonzalez.

La relación σ_A/σ se define como el factor de concentración de tensiones, k_t .

Cuando $a = b$, el agujero es circular y en este caso $k_t = 3$.

Cuando el eje mayor a , aumenta respecto a b , el agujero elíptico empieza a cambiar estéticamente. Para éste caso la expresión anterior no sería válida, y sería mucho más recomendable utilizar la fórmula siguiente:

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}}\right) \quad \text{Siendo } \rho = \frac{b^2}{a}$$

○ EL PRINCIPIO ENERGÉTICO DE GRIFFITH

De acuerdo con el Primer Principio de Termodinámica, cuando un sistema pasa de un estado de no-equilibrio a un estado de equilibrio, se produce una disminución de la energía del sistema. A partir de éste principio, Griffith estudió las condiciones las condiciones de fractura de los vidrios. La teoría inicial de Griffith, presentada en el año 1923, especifica lo siguiente:

Se puede formar una grieta (o una grieta existente puede crecer) solamente si el proceso origina una disminución de la energía total o esta permanece constante

A. A. Griffith, tuvo el ingenio de modelar una fisura desde un punto de vista energético. Consideró un elemento estructural plano sometido a tensión uniforme de tracción y posteriormente rígidamente fijado en sus extremos. Se obtenía así un sistema con una cantidad fija de energía de deformación almacenada en el mismo. Si una fisura ha de abrirse en el elemento creando nuevas superficies la energía necesaria para generarlas solo se puede obtener de la energía elástica almacenada previamente por deformación.

Es bien conocida la expresión de Griffith que relaciona la resistencia de rotura con las micro grietas existentes en el material. La tensión crítica para propagar una grieta depende de su tamaño según la expresión:

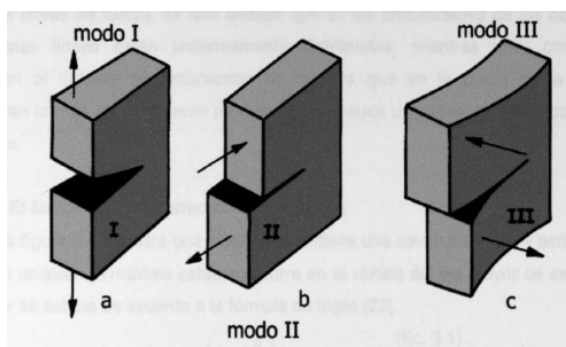
$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2 E \gamma_0}{\pi a}}$$

γ_0 : Energía superficial que varía con el tamaño de grano y la pureza del material y en menor extensión con la temperatura y la porosidad

E: módulo de Young (modulo elástico)

2a: la longitud de la grieta que en parte nos da idea de la microestructura del material

○ EL PRINCIPIO ANALÍTICO DE G. R. IRVING



Irving diferencia tres modos de propagación de una grieta en función de las fuerzas aplicadas a un elemento:

MODO I: Apertura de la grieta, es aquel donde una fuerza causa un esfuerzo de tensión que actúa en dirección normal a las superficies de la grieta. Es el más peligroso de los tres y el más frecuente

MODO II: Deslizamiento o modo de corte, una fuerza causa un esfuerzo de corte que actúa en dirección paralela al borde de la grieta.

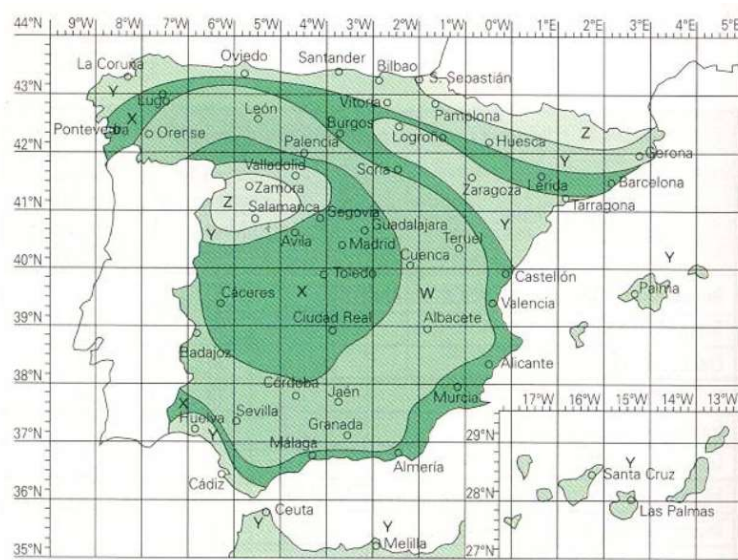
MODO III: Cizalladura o de corte paralelo, se refiere al esfuerzo de corte aplicado en dirección paralela al borde de la grieta.

Irving generaliza la teoría presentada por Griffith y presenta un nuevo término, el $\sigma a^{1/2}$ también conocido como factor de intensidad de tensiones (K). Éste mide la intensidad de tensión debido a la presencia de una grieta.

Ésta teoría considera el campo de tensiones creado en el frente de una fisura de un material sometido a una tensión σ . Mediante un análisis de tensiones (ayudándonos de las funciones de Westergaard) podremos describir el estado de tensiones en un punto M (r, θ) situado a una distancia r ($r \ll a$) del frente de la fisura y los correspondientes desplazamientos.

G. MAPA DE ZONAS EÓLICAS

Mapa zonas eólicas territorio español. Según el manual del vidrio Saint Gobain Glass. Edición 2001



H. CARGA TOTAL DE VIENTO (Q)

Tabla Carga total de viento (Q). Según el manual del vidrio Saint Gobain Glass. Edición 2001

Carga total de viento q en Kp / m²

Zona eólica	W		X		Y		Z		
	Normal	Expuesta	Normal	Expuesta	Normal	Expuesta	Normal	Expuesta	
Altura H en m sobre el nivel del suelo	60	100	110	111	122	123	135	136	149
	57	99	109	110	121	122	134	135	148
	54	98	108	109	120	121	133	134	147
	51	97	107	108	119	120	132	132	146
	48	96	106	107	118	119	131	131	144
	45	95	105	106	117	118	129	130	143
	42	94	104	105	116	116	128	128	141
	39	92	102	103	114	114	126	126	138
	36	91	100	102	112	113	124	124	137
	33	90	99	101	111	112	123	123	135
	30	89	98	100	110	110	121	122	134
	27	88	96	98	107	109	119	120	131
	24	86	95	96	106	107	117	118	129
	21	84	92	93	103	104	114	114	125
	18	81	89	90	99	100	110	110	121
	15	76	83	84	93	94	103	103	114
	12	71	78	79	87	88	96	97	106
	9	65	72	73	80	81	89	89	97
	6	60	66	67	74	74	82	82	90
	3	53	59	60	66	66	73	73	80

I. TABLA RECTIFICACIÓN ESPESORES

La tabla siguiente donde se puede encontrar el valor ϵ sale a partir de el Manual del vidrio de Saint Gobain Glass, edición 2001.

Tipo de acristalamiento		ϵ
Vidrio armado		1,20
Vidrio endurecido o semi- templado SGG PLANIDUR		0,90
Vidrio templado SGG SECURIT	si $P < 900 \text{ Pa}$	0,80
	si $P \geq 900 \text{ Pa}$	0,75
Vidrio laminado SGG STADIP	doble	1,3
	triple	1,6
Acristalamiento aislante SGG CLIMALIT	doble	1,5
	triple	1,7

J. DEFECTOS

○ DEFECTOS EN MASA Y DE FUSIÓN

Por norma general, este tipo de defectos suelen ser heterogeneidades en la masa o una coloración indeseada del vidrio final.

● INCLUSIONES GASEOSAS

Inclusión gaseosa, generalmente esférica cuando el vidrio está fundida, pero que puede ser deformada de diferentes maneras durante el proceso de enfriamiento y manipulación.

Normalmente sus formas se definen mediante calificativos (por ejemplo, esférica, alargada...). En el caso de que se conozca el contenido de la burbuja, se puede indicar convenientemente.

No hay una nomenclatura que permita clasificar las burbujas en función de su tamaño muy rigurosamente, pero éstos son los términos de uso más común y su significado. Vale la pena comentar que los valores son aproximados:

- ❖ Diámetro > 2 mm = Burbuja
- ❖ Diámetro < 2 mm = Punto brillante
 - 2 mm > Diámetro > 0.2 mm = Punto fino
 - Diámetro < 0.2 mm = Picado

Por norma general, las burbujas suelen tener forma esférica, eso es debido a la presión hidrostática que realiza sobre la burbuja la masa fundida del vidrio. Al reducir la temperatura y aumentar la viscosidad, las deformaciones que se hayan producido en las burbujas a lo largo de los movimientos de corrientes dentro de la masa derivaran en burbujas de formas elipsoidales irreversibles.

A veces, parte de los gases que son introducidos en la mezcla vitrificable quedan ocluidos formando burbujas que se suelen eliminar fácilmente cuando ascienden a la superficie. Durante el proceso de afinado el vidrio debe liberarse de todas las burbujas residuales. Si tras ésta etapa quedan burbujas por eliminar, éstas pasaran a ser un defecto físico del vidrio, por consecuencia de un mal afinado.

El material refractario es también un importante causante de las burbujas, por dos motivos. En un primer caso su superficie heterogénea hace que sea favorable la aparición de núcleos gaseosos, por otro el refractario es una fuente contaminante por sí mismo, albergando gases ocluidos en sus propias grietas. Las reacciones químicas entre el material refractario y el vidrio también suelen ser otra causa de formación de burbujas.

Entre los materiales que conforman el vidrio, frecuentemente encontramos pequeños fragmentos metálicos que se introducen accidentalmente junto a otros materiales.

El hierro se convierte en una gran fuente de burbujas, igual que la mayoría de metales. Una de las maneras de poder reconocer éste tipo de burbuja es que cuando hace el recorrido de ascensión a la superficie, deja una estela de color marrón.

- **Burbuja de caña:** Burbuja situada en la cara interna de un objeto de vidrio, procedente de alguna impureza presente en la caña de soplar.
- **Burbuja de sal, burbuja de sulfato:** Burbuja blanquecina que contiene un depósito salino, generalmente sulfato sódico.

Las **Burbujas Secundarias** son aquellas que se producen en el vidrio una vez se han afinado. Este fenómeno se le conoce como rebullido. Las causas principales de la aparición de éste son las siguientes:

- ❖ Subida inadecuada de la temperatura del fundido.
- ❖ Disminución de la presión o alteración de la atmosfera del horno.
- ❖ Presencia de vapor de agua en la atmósfera del horno.

Dentro de las burbujas secundarias, podríamos determinar a las siguientes tipologías de inclusiones gaseosas:

- **Bullón de superficie:** Burbuja, generalmente alargada, muy próxima a la superficie del vidrio que puede llegar a ocasionar una deformación en la superficie.
- **Bullón reventado:** Burbuja próxima a la superficie cuya pared se ha roto.

- **Burbuja de levantador:** Burbuja introducida accidentalmente al levantar el vidrio.
- **Rebullido superficial:** Velo de burbujas finas aparecidas en la superficie de un objeto por efecto de un recalentamiento excesivo.

La naturaleza del gas que está en el interior de las burbujas puede depender de muchísimos factores, como el tipo de vidrio, la composición, los afinantes, la atmósfera del horno... etc.

Por norma general, cada burbuja contiene una mezcla de diversos gases, y para dar unos resultados aproximados, según el estudio de Mulfinger en su libro "*Analysedes inhates von Gabblasen im Glas*" en el que se basa Jose María FernandezNavarro en su libro de los vidrios podríamos decir que los más comunes son los siguientes: (88.7 % - CO₂), (84.4% N₂), (73% -O₂).

- **Burbuja de aire:** Burbuja con forma irregular originada durante el prensado, en particular en el del vidrio óptico.
- **Burbuja de vacío:** Burbujas que tienen cantidades muy pequeñas de gas y se forman durante el enfriamiento rápido en bloques gruesos de vidrio, debido a las grandes tensiones de tracción que se producen en éste.

• INCLUSIONES CRISTALINAS

Son también conocidos como "Piedras", suelen ser pequeños fragmentos que encontramos en la masa del vidrio que no se han llegado a fundir.

Este tipo de defectos no solo afecta a su estética, si no que puede llegar a producir severas modificaciones en las propiedades mecánicas del vidrio (favoreciendo así la ruptura inesperada del vidrio).

Los estudios con **métodos no destructivos** se basan en la observación directa. Con la ayuda de una lupa o un microscopio podremos conseguir información sobre su compactación y sus grietas.

Con la ayuda de un polariscopio podremos comprobar si hay tensiones a su alrededor. Si está tensionado, la inclusión será aluminosa. Al contrario, si no encontramos tensión (o éstas son muy débiles) lo más probable es que nos encontramos con la presencia de sílice.

Por otro lado, podemos realizar los estudios con métodos destructivos. En realidad éste tipo de método es realmente complicado, dado que lograr separar la inclusión del vidrio para analizarla es prácticamente imposible.

Cuando las condiciones y el vidrio lo permitan, se puede intentar extraer la piedra con la ayuda de alguna herramienta, como un torno y una diminuta muela abrasiva.

Si la extracción se hace con elementos químicos esto puede conllevar que también acabe disolviéndose la piedra.

Si la densidad es distinta podemos separarla por flotación. El procedimiento consiste en triturar el vidrio y sumergirlo en mezclas de líquidos variables que intenten cubrir los diferentes valores de densidades (el tetrabromoetileno y el xileno son ejemplos).

También se podrían utilizar rayos x o una micro sonda electrónica, pero ésta es una maquinaria muy cara con la que la mayoría de laboratorios no cuentan.

Lo que más se utiliza es la microscopía petrográfica, ésta nos dará la suficiente información como para poder determinar la composición de la inclusión. La metodología es la siguiente: tomamos una lámina delgada como muestra de la inclusión, la pegamos en un porta-objetos con bálsamo de Canadá y la pulimos hasta que consigue un espesor de 0.02 mm.

Éste estudio nos dará la siguiente información: índice de refracción, birrefringencia, extinción y elongación.

INCLUSIONES CRISTALINAS MÁS COMUNES

Como se ha comentado anteriormente, a éste tipo de defecto también se les conoce como **pedras de composición**, son restos de la mezcla que no se han llegado a fundir.

INFUNDIDOS

Tal y como su propia palabra indica, los infundidos son aquellas partes de la masa del vidrio que no han llegado a fundirse y, por lo tanto, hacen que el material no sea homogéneo.

Algunas de las materias que intervienen en la formación del vidrio pueden producir infundidos, ya sea porque su granulometría es demasiado gruesa, por provenir de materiales contaminantes de la mezcla o por segregación,

La **Sílice** suele ser el más común, esto es debido a que es el componente principal en la composición del vidrio y a su vez es el elemento que más tarda a fundirse. Suelen aparecer en granos aislados o aglomeraciones de partículas.

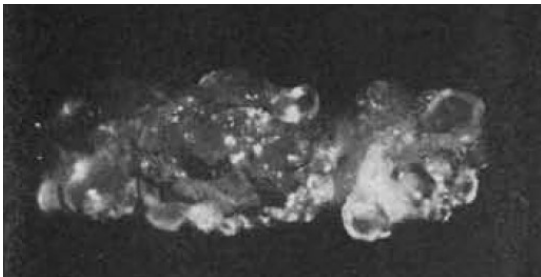


FIG 2 - INFUNDIDOS DE ARENA, VISTOS DIRECTAMENTE AL ESTEREOMICROSCOPIO (20 AUMENTOS). FUENTE: COSME MONTES LÓPEZ (LABORATORIO CENTRAL DE CRISTALERÍA ESPAÑOLA S.A)

Cuando éste material se somete a altas temperaturas le suelen aparecer grietas en su superficie, esto nos puede ayudar al identificar el material. A su vez, a su alrededor suelen aparecer

burbujas y, con mayor frecuencia, cuerdas.

Los **feldespatos** suelen ser otro tipo, aunque suelen haber inclusiones de éste tipo, solo en el caso de que la granulometría del material utilizado sea mucho mayor de lo recomendado.



FIG 3 - GRANO DE SILIMANITA TRANSFORMADO EN EL INTERIOR DEL VIDRIO (LUZ POLARIZADA, 20 AUMENTOS). FUENTE: COSME MONTES LÓPEZ (LABORATORIO CENTRAL DE CRISTALERÍA ESPAÑOLA S.A).

Junto las arenas podemos encontrar otros materiales no deseados para la fabricación del vidrio (**impurezas**), suelen ser sustancias aluminosas (caolín, silimanita, andalucita...).

Es realmente complicado llegar a determinar su naturaleza ópticamente, dado que estéticamente suelen ser muy parecidas a las impurezas de sílice. Una manera realmente fácil de poder determinar su composición es por medio de un polariscopio, dado que alrededor de la impureza encontraremos grandes tensiones si se trata de un elemento aluminoso.

Las causas principales por las que suelen aparecer los infundidos son las siguientes:

- ❖ Utilización de materiales con una **granulometría** no adecuada.
- ❖ **Granos muy pequeños.** Hacen que la masa se funda prematuramente, volviéndola más viscosa y más difícil de homogeneizar.
- ❖ **Temperatura** en el horno inferior a la necesaria.
- ❖ **Distribución térmica irregular.** Por corrientes de convección se pueden llegar a desplazar algunos materiales que no hayan tenido tiempo a fundirse.
- ❖ Inclusiones que estaban presentes previamente en el **casco** que se agrega al vidrio.

DESVIDRIFICACIONES (O CRISTALIZACIONES DEL VIDRIO)

Las desvidrificaciones son inclusiones sólidas producidas por la **cristalización** de uno o más componentes.

Primero de todo, explicaremos cuál es el fenómeno de la **desvidrificación**. Éste es un proceso en virtud del cual, a partir de una fase estructuralmente desordenada, se forma una fase sólida estable, con una ordenación geométrica regular.

Por norma general, este proceso se produce como consecuencia de una disminución de la energía del conjunto cuando el fundido se enfría por debajo de su temperatura de “líquidus”.

La desvidrificación nos aparece por dos procesos que producen un cambio en la temperatura del vidrio: uno es el proceso de formación de núcleos cristalinos y el otro el proceso de crecimiento de los cristales. Estos dos procesos producen que se descienda la temperatura del vidrio, hasta cierto punto en el que el creciente aumento de la viscosidad lo detiene. Las posibilidades de cristalización a una temperatura determinada dependen de las velocidades de ambos procesos.

Por norma general las desvidrificaciones se manifiestan normalmente en lugares donde hay cierta discontinuidad del fundido y en zonas de heterogeneidad química.

La zona donde suelen aparecer con mayor frecuencia son en las paredes del vidrio, donde están en contacto con las paredes del material refractario. Otra zona es la superficie libre del vidrio fundido, debido a la presencia de polvo, condensación y partículas arrastradas por los humos.

La **crystalita** y **tridimita** son dos fases cristalinas del **silíce** son las únicas en las que cabe esperar que aparezcan desvidrificaciones, debido al intervalo de temperatura en la que se lleva a cabo la fusión, la **crystalita** es la más importante. Estos dos tipos de desvidrificación pueden producirse cuando el vidrio se somete a temperaturas bajas durante mucho tiempo o si existen cuerdas o nódulos de silíce. Son muy características por tener formas geométricas muy peculiares (hojas de helecho, forma de estrella, puntas de lanza...).

La aparición de la **forsterita** es poco frecuente y solo se producen en vidrios ricos en óxido de magnesio. Adoptan forma de listones.

La **α -wollastonita** corresponde a la forma por encima de 1180°C y solo aparece en el caso de vidrios enfriados muy lentamente, formando agregados cristalinos de grandes dimensiones, con formas de hojas de helecho (muy parecidas a las de **crystalita**).

Por otro lado, la **β -wollastonita** (también conocida como modificación de baja temperatura) la solemos encontrar con más frecuencia, se presenta normalmente en forma de agujas o listones.

En algunos vidrios ópticos tipo “Flint”, que son ricos en óxido de boro, puede llegar a desvitrificar el **disilicato de bario**, producido por el lento enfriamiento al que se suele someter este tipo de vidrios. Suelen tener la forma de láminas hexagonales.

Por norma general, la **mullita** no aparece como desvitrificación, solo en el caso de vidrios muy ricos en **alúmina**. Presentan formas de agujas dispuestas radialmente constituyendo esferolitos.

También es muy poco común la aparición de la **willemita**, solo en el caso de vidrios que contengan óxido de cinc. Sus cristales adoptan la forma de prisma. Lo es también la **alamosita**, solo en el caso de vidrios que contengan. Sus cristales adoptan la forma acicular.

Los **silicatos sodicocálcicos** es la fase cristalina que presenta más desvitrificación en los vidrios comerciales. Ésta cristaliza con facilidad cuando el vidrio se deja enfriar lentamente por debajo de los 1050°C. Cristaliza en forma de agujas que se agrupan en pincel o radialmente, formando esferolitos.

El **diópsido** aparece en los vidrios que tienen más de un 4% de óxido de magnesio en su composición. Suele tener forma acicular o de listones.

La aparición de desvitrificación depende de:

- ❖ **Composición** química del vidrio
- ❖ **Temperatura** de mantenimiento
- ❖ Variación de la temperatura en función del tiempo.

La **causa** principal, a parte de los tres puntos anteriores, podríamos considerar que es la desvitrificación de una fase cristalina que puede inducir a la cristalización de otra fase vecina, esto da lugar a una desvitrificación escalonada y explica por qué a veces pueden coexistir dos o más fases cristalinas cuyas desvitrificaciones no se hayan producido en el mismo momento.

Podríamos seguir los siguientes pasos con tal de **prevenir** la aparición:

- ❖ El procedimiento más utilizado es agregar a la mezcla vitrificable pequeñas cantidades de **otros componentes**. La tendencia a cristalización disminuye al aumentar la complejidad química, dado que resulta más complicado que sus átomos se agrupen ordenadamente y formen una red cristalina. A continuación vemos algunos de éstos componentes:
 - alúmina, (4%) dependiendo de la alcalinidad del vidrio, pueden llegar a reducir considerablemente el riesgo de desvitrificación.
 - óxido de magnesio (1-2%)
 - K₂O, BaO, B₂O₃, PbO y ZnO (en pequeñas proporciones).
- ❖ Escogiendo la **composición** del vidrio basándonos en el diagrama de equilibrio de fases; Aunque a veces es realmente complejo llegar a variar la composición de un vidrio, estas variaciones suelen acarrear cambios en alguna de sus propiedades.
- ❖ La **temperatura** debe ajustarse a lo máximo a los límites de seguridad. El enfriamiento debe realizarse disminuyendo la temperatura lo más rápido posible hasta alcanzar el límite de conformado y de nuevo, otra vez rápidamente, hasta llegar a la temperatura de recocido.

OCLUSIONES DE SULFATO

También se las conoce como burbujas de sulfato. Hay diferentes opiniones a la hora de clasificar éste tipo de defectos, hay autores que las clasifican como infundidos y otros como desvitrificaciones.

Este tipo de inclusiones suelen ser de color blanco opalino, aunque a veces puedan llegar a tener colores rojizos o grises. Su dimensión suele ser elevado a comparación de los anteriores, puede llegar a tener varios milímetros.

Si se observa con un telescopio, se pueden ver unas formas muy características en forma de mosaico, son unas diminutas retículas en forma de grietas que irradian desde un núcleo central.

Por norma general este tipo de inclusiones está formado por sulfato sódico (principalmente por su variedad, la thenardita). También puede aparecer en vidrios potásicos.

Un caso peculiar es cuando forma un velo superficial que a veces empaña la transparencia del vidrio y disminuye su vidrio. Éste velo está constituido por diminutos cristales de sulfato, que cuando se enfría, al reaccionar los álcalis de su superficie con el anhídrido sulfúrico que encontramos en la atmósfera.

A continuación especificamos las **causas** más comunes:

La causa principal es la existencia de sulfato en cantidades superiores al 1.8% de Na₂SO₄ (éste es el límite máximo que se puede permitir).

Éste exceso de sulfatos puede venir también dado como consecuencia de la aportación de SO₂ que, como impureza, suele acompañar muchos combustibles.

Como medios de **prevención** podríamos indicar los siguientes:

- ❖ Si elevamos la temperatura por encima de los 1240°C (que es la temperatura de descomposición del sulfato sódico), pueden llegar a disolverse las inclusiones de sulfato formadas con anterioridad, aunque pueden llegar a dejar algunas cuerdas.
- ❖ Añadiendo a la mezcla una cantidad adecuada de polvo de carbón que actúa como reductor de sulfato.

PIEDRAS DE REFRACTARIO

Este es el defecto de inclusiones cristalinas más frecuente y se considera uno de los más graves. Este defecto se debe a la progresiva corrosión del material con el que se halla en contacto el vidrio fundido.

Algunas veces son pequeños fragmentos o gránulos arrancados de la **superficie refractaria**, en este caso los gránulos se caracterizan por tener un núcleo central opaco de color pardo; por tener una forma más o menos redondeada y por hallarse de un nódulo de vidrio a su alrededor. Normalmente alrededor del nódulo suelen aparecer cuerdas.

En otros casos el resultado de la desvitrificación a causa del **enriquecimiento de la composición** de la mezcla con determinados elementos químicos. Veremos a continuación cuales son los más frecuentes en función de los elementos que la conforman:

Algunas de las más características son el **cuarzo**, la **crystalita** y la **tridimita**. Se suelen diferenciar por tener un tamaño mucho mayor a las inclusiones y las desvitrificaciones. Por norma general están formadas por crystalita y tridimita.

La **alúmina** también es conocida como inclusiones de corindón, forma granos relativamente gruesos. Las

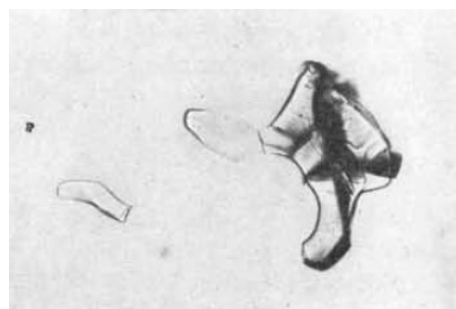


FIG 4 - CRISTALES DE TRIDIMITA PROCEDENTES DE LA BÓVEDA DEL HORNO (LUZ NORMAL, 60 AUMENTOS). FUENTE: COSME MONTES LÓPEZ (LABORATORIO CENTRAL DE CRISTALERÍA ESPAÑOLA S.A.).

inclusiones de corindón se producen cuando el refractario se encuentra en contacto con el vidrio fundido y éste va disolviendo el aglomerante que mantiene los granos unidos. Otras veces, aparecen como consecuencia de los humos (álcalis volatilizados).

En el caso de los hornos de balsa donde los refractarios están hechos a base de circona, pueden dar lugar a la aparición de la **baddleyita**. En realidad es poco frecuente la aparición de este elemento, dado que tiene una elevada resistencia química, estéticamente son cristalizaciones dentadas.

La **silimanita** es el componente que más se utiliza para la realización de refractarios de todas las andalucitas. Aunque por norma general se transforma a mullita por cocción a alta temperatura, suelen quedar restos de silimanita que pueden llegar a desprenderse y originar inclusiones de vidrio.

Las inclusiones de silimanita y mullita son muy parecidas entre sí, tan solo se llegan a diferenciar observando su índice de refracción.

La presencia de cristales de **circón** no solo la encontramos en vidrios con materiales refractarios de este tipo sino que también en los vidrios que han estado en contacto con refractarios de circona electro fundida. Los encontramos en forma de cristales de forma acicular y en granos de material originario.

La **nefelina** suele aparecer en refractarios silico-aluminosos. Aparecen formando una aureola constituida por minúsculos cristales secundarios, forman pequeñas agujas minúsculas de carácter uniaxial negativo. Por desvitrificación de nódulos sílico-alumínico-sódicos o de lágrimas vítreas que gotean, pueden formarse inclusiones relativamente grandes. En el caso de la nefelina, ésta se suele formar a temperaturas más elevadas. Se diferencia de la nefelina por su hábito detrítico.

Por otro lado, las inclusiones feldespáticas tienen casi siempre su origen en los refractarios aluminosos o sódico cálcicos. El enriquecimiento progresivo en alúmina que experimenta el vidrio fundido junto a las paredes de horno por efecto de la corrosión del material refractario, puede dar lugar a la formación de compuestos feldespáticos.

GOTAS DE BÓVEDA

Aunque no siempre llegan a ser inclusiones sólidas o piedras, parten del material refractario y de algunas fases cristalinas.

Son pequeñas áreas de heterogeneidad en el vidrio fundido, de color gris y con forma de gotas alargadas.

Suelen provenir de la corrosión del techo o de las paredes de los hornos, por efecto del ataque de los vapores alcalinos y el polvo que se desprende durante el proceso de fusión. Esta acción da lugar a la creación de una capa semi vítrea reblandecida que da lugar a las pequeñas estalactitas.

PIEDRAS NEGRAS



FIG 5 - GRANOS DE CORINDÓN (LUZ NORMAL, 60 AUMENTOS). FUENTE: COSME MONTES LÓPEZ (LABORATORIO CENTRAL DE CRISTALERÍA ESPAÑOLA S.A.).



FIG 6 - SECCIÓN EN LÁMINA DELGADA DE UNA GOTA DE BÓVEDA (LUZ NORMAL, 20 AUMENTOS). FUENTE: COSME MONTES LÓPEZ (LABORATORIO CENTRAL DE CRISTALERÍA ESPAÑOLA S.A.).

Suelen ser impurezas que acompañan a las materias primas o contaminaciones del material refractario.

Tienen un aspecto muy peculiar, son de color negro y están formados por cromita de hierro. Suelen carecer de la aureola que tienen la mayoría de inclusiones a su alrededor y suelen tener cantos netos y bien definidos.

En los vidrios donde tenemos mayor probabilidad de aparición de éste tipo de inclusión es en los vidrios verdes de cromo. En éste tipo de vidrios la mejor prevención es introducir el cromo en forma de dicromato potásico en disolución, aunque no siempre funciona.

PIEDRAS METÁLICAS

Igual que las piedras negras, no suelen ser inclusiones muy frecuentes y son fáciles de identificar. Son inclusiones opacas y son de color negro. Están formadas por metales en estado elemental que proceden o de impurezas que había en la mezcla inicial antes de fundirse o bien de la enérgica reducción de algunos componentes del vidrio.

Existen las piedras derivadas de la **silíce**, que aunque no son exactamente elementos metálicos, pero se incorporan éste tipo de inclusiones en este listado por semejanza. La reducción de la sílice del vidrio a sílice en estado elemental requiere de condiciones mucho más enérgicas de lo normal (aunque suelen darse más frecuente de lo esperado). Por norma general, éste tipo de inclusiones aparecen por la introducción accidental de elementos externos (como tapones o precintos de aluminio) junto al casco del vidrio. Por éste motivo éste tipo de defecto solo aparece en la fabricación de vidrio hueco.

Las piedras generadas por el **sulfuro de níquel** tienen un aspecto metálico dorado brillante y de pequeño tamaño (son difíciles detectar).

En vidrios templados suelen producir roturas espontaneas. Las tensiones aparecen con consecuencia al aumento de dimensión que da lugar a ésta transformación, produce que aparezcan grietas alrededor del vidrio y a partir de éstas, la rotura espontánea.

Es muy frecuente la aparición de estas heterogeneidades en los vidrios que contienen óxido de níquel, una vez aparecen estos defectos la única manera de garantizar que no habrá rotura es haciendo recocido.

• HETEROGENEIDADES

Estas inclusiones son diferencias en zonas locales de la masa del vidrio, producidas por diferencias químicas o por la historia térmica del vidrio.

Hay diversas causas por las que se forman heterogeneidades, a continuación se enumeran las más comunes:

- ❖ Contaminación debido a la disolución del material refractario.
- ❖ Mezclado irregular de las materias primas
- ❖ Segregación de las materias primas producidas durante el almacenamiento o transporte de éstas.
- ❖ Redisolución de desvitrificaciones aparecidas en el vidrio y desplazadas por movimientos de convección.

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE HETEROGENEIDADES

Para poder dictaminar el origen de las heterogeneidades, lo principal es conocer la composición química del vidrio (cosa que no siempre es fácil). En el caso de nódulos o venas, se suele recortar esa parte de la pieza en concreto para poder analizarla.

En el caso de que no se pueda separar la inclusión del vidrio, se puede proceder al triturado de ésta y la separación por medio de flotación o centrifugación en el caso de materiales con densidades distintas.

El procedimiento más rápido (que no necesita de triturado) es el de el mico análisis por medio de la sonda electrónica.

De todas las características físicas del vidrio, el índice de refracción es el que más información nos da a la hora de detectar variaciones en la homogeneidad, por lo que podríamos realizar el análisis con métodos ópticos.

Entre otros, los más conocidos son los siguientes:

Método Ombroscópico. Se basa en la proyección sobre una pantalla, la sombra de la pieza de vidrio, por medio de una luz puntual. En las zonas en las que haya heterogeneidades no se verá ninguna imagen, si no que la luz se distorsionará.

Método de Toepler. La luz de un foco luminoso circular se concentra por medio de una lente en la abertura de un diafragma. Entre la lente y el diafragma se concentra la pieza de vidrio. La luz pasa a un objetivo que proyecta la imagen del vidrio sobre una pantalla, si hay alguna heterogeneidad ésta será detectada por el diafragma y se obtendrán puntos de oscuridad en la pantalla.

Método interferométrico. La muestra de vidrio a estudiar se intercala en la trayectoria de los rayos luminosos, con lo que las heterogeneidades que existan darán lugar a una diferencia en el camino óptico, cosa que generará en una desviación en el curso de las líneas de interferencia. La sensibilidad de éste sistema de medida es muy elevado y las piezas que se vayan a estudiar deben estar sometidas primeramente al método de recocido.

Método de registro continuo. Éste sistema nos permite obtener cómodamente las variaciones del índice de refracción, el método más utilizado es que desarrolló Antolín⁵⁹ y se le conoce como estriómetro. Para estudiar los defectos del vidrio producidos por estratificación se selecciona una muestra perpendicular a las caras de la hoja del vidrio y una vez pulida se coloca en el estriómetro, de tal manera que el haz de luz pasa por el espesor de la hoja. En el caso de otros defectos (como hilos o cuerdas) el barrido se efectuará también a lo largo de una sección transversal de los mismos.

HETEROGENEIDADES MÁS COMUNES

- ❖ **Nódulos:** Los nódulos son la manifestación más común. Presentan forma esferoidal bien delimitada, que se diferencia de la superficie del vidrio como una zona abultada. Casi siempre son el resultado de la vitrificación de inclusiones sólidas que, debido a su mayor viscosidad y (a veces) su mayor tensión superficial, no tuvieron tiempo de fundirse junto al resto de masa.
- ❖ **Cuerda:** Vena en el vidrio, relativamente gruesa y muy visible, que puede aparecer en la superficie del producto acabado.

⁵⁹ [1] página 132

- ❖ **Estrías:** Venas de vidrio más finas que las cuerdas.
- ❖ **Hilo, veta:** Vena de vidrio muy fina, netamente delimitada, que se presenta aislada en la masas del vidrio.
- ❖ **Goma:** Cuerda tenue ondulante y difusa en el proceso de digestión.
- ❖ **Onda:** Venas de vidrio incoloras, dispuestas generalmente en la dirección de estirado o de colado (vidrio plano)
- ❖ **Lágrima, gota:** Inclusión vítrea en forma nodular, que a menudo viene acompañada de una prolongación filiforme.
- ❖ **Veta coloreada:** Vena vítrea que se distingue del resto por su color.
- ❖ **Cuerda con tensiones:** Cuerda cuyas tensiones son visibles con el polariscopio.

- ***DEFECTOS DE RECOCIDO***

Estado de un objeto en el que aparecen excesivas tensiones en su superficie después de haber pasado por el proceso de recocido.

- ***DEFECTOS DE COLORACIÓN***

Éstos se refieren a la desviación de la tonalidad que se desea obtener en el vidrio.

CAUSAS DE LA COLORACIÓN RESIDUAL

La tonalidad residual que indeseablemente puede adquirir un vidrio incoloro durante su fabricación se debe siempre a la contaminación producida por impurezas.

Entre las impurezas más comunes encontraríamos el óxido de hierro, cromo, níquel, cobalto, vanadio y titanio. La más frecuente es la que produce el hierro al introducirse al vidrio acompañando a algunos de sus componentes.

La coloración del vidrio puede desempeñar también un importante papel en el propio proceso de fabricación, siendo un indicador de la marcha del horno y de las condiciones oxidantes o reductoras de la atmósfera en la que se llevó a cabo la fusión.

Cuánto más azul sea el vidrio, mayor será la capacidad de absorción de energía infrarroja por parte de las capa superiores del fundido y menor su poder de penetración.

EL PROCESO DE DECOLORACIÓN

La cantidad de coloración azul que producen los iones ferrosos es unas quince veces superior a la que producen los iones férricos. Por ese motivo, a lo largo del proceso de fusión se intenta transformar en forma férrica la mayor parte posible de óxido de hierro.

Aun así, para poder conseguir los resultados óptimos, se deberán tener en cuenta las siguientes premisas:

- ❖ Como más elevada es la temperatura, mayor es la proporción de iones ferrosos y por tanto la coloración azul.
- ❖ Como más se prolongue la fusión, más se favorecerá su forma ferrosa.

DEFECTOS DE COLORACIÓN MÁS COMUNES

- ❖ **Oscurecido, color pardo o ala de mosca:** Resultado de un crecimiento excesivo de las partículas coloidales producido por una mala realización del tratamiento térmico. Da como resultado unas manchas de color pardo.
- ❖ **Ahumado, empañado o ceniza:** Se caracterizan como tales aquellos vidrios cuya superficie ha sido alterada de modo permanente por un precipitado o por reacción con los humos y los gases. Particularmente en los vidrios de plomo puede producirse un velo superficial oscuro de plomo metálico formado en atmósfera reductora.

○ *DEFECTOS POR FABRICACIÓN*

No tan solo nos afectarán los materiales ni las temperaturas, el proceso que se lleve a cabo para la realización del vidrio también implicará unos defectos característicos.

El vidrio es un material muy sensible a la presencia de defectos. Estos defectos raramente son defectos puntuales localizados en la masa del vidrio (como por ejemplo piedras). La mayoría de las veces son defectos de superficie, que han sido creados a lo largo del proceso de fabricación

A continuación se enumeran los defectos provocados por los procesos de conformado más comunes y a su vez, los defectos estéticos más convencionales de éstos. Aunque se consideren defectos superficiales, cualquiera de éstos puede afectar a la estabilidad del material (vidrio) y conllevar una fractura espontánea. Por ese motivo no se recomienda la utilización de vidrios que presenten cualquiera de éstos defectos.

El control de la degradación mecánica de la superficie del vidrio es importante, no solo para mantener la resistencia y el aspecto estético del material, sino que también para asegurar la resistencia mecánica de los productos.

● *DEFECTOS EN VIDRIO PLANO*

La siguiente clasificación parte de lo indicado en el libro Terminología de los defectos del vidrio⁶⁰.

DEFECTOS COMUNES EN VIDRIO PLANO

Hay algunos defectos que son comunes en todos los vidrios planos, por lo que sería innecesario repetirlos en cada una de las categorías. Éstos son:

- **Peine:** Finas estrías superficiales de intensidad variable y paralelas entre sí.
- **Martelado:** Defecto de la superficie de una hoja de vidrio estirado colado o templado, producido por depresiones pequeñas y poco profundas que le dan un aspecto de martillado o batido.

⁶⁰ [3] página 132

- **Glasadura o grasadura:** Grieta de aspecto brillante, de bordes soldados, que penetra hasta una profundidad considerable en la dirección del espesor, producida por el contacto de una superficie fría o por una presión excesiva.
- **Fisura:** Pequeña grieta superficial de escasa profundidad y de aspecto brillante, producida por contacto del vidrio caliente con una superficie fría o por una presión excesiva.
- **Fisura marginal o lengua:** Grieta que se inicia en el borde de la hoja y penetra en su interior.
- **Bisel, espuela, chaflán de corte o “jaire”:** Desviación del borde de corte, con respecto a su forma deseada, por efecto de un mal recocado o de un corte mal trazado.
- **Falsa escuadra:** Defecto de corte que da lugar a lados adyacentes que no forman ángulo recto.
- **Desconchón, desconchado, descascado o escama:** Pequeña esquirla, de forma concoidea, separada o no del vidrio.
- **Suciedad “crasse”:** Se denominan aquellas partículas (o cuerpos extraños) adheridos a la superficie del vidrio.
- **Defecto de paralelismo entre las caras:** Cuando un haz de luz incide en la superficie del vidrio éste resulta desviado. Si el ángulo de ambas caras varía de forma continua se produce un efecto de lente y una visión distorsionada.
- **Doble imagen:** Desdoblamiento de la imagen de un objeto observado por transparencia a través de una hoja de vidrio, provocado por reflexiones secundarias en el interior de la misma. La intensidad de éste defecto depende de la inclinación de la hoja y el ángulo formado por sus caras. Se suele poner de manifiesto en medios oscuros.
- **Distorsión:** Defecto situado en una de las dos caras de la hoja, que deforma la imagen de los objetos observados por transparencia o por reflexión.

DEFECTOS DEL VIDRIO FLOAT

- **Burbuja abierta en la cara inferior:** Cavidad simétrica, a veces alargada, situada en la cara inferior de la lámina.
- **Burbuja en la cara superior:** Pequeña burbuja abierta o cerrada en la cara superior de la lámina.
- **Burbuja de masa con halo:** Burbuja situada en el interior del vidrio que produce una ligera protuberancia en la cara superior de la lámina. Observada bajo ciertas condiciones parece estar rodeada de un halo.
- **Polvo de estaño:** Acumulación, en la cara interior de la lámina, de burbujas microscópicas que presentan un aspecto de polvo y que se forman en el extremo caliente del baño de estaño.
- **Marcas o bandas de “dross”:** Velo grisáceo en la cara inferior de la lámina, está constituido por una acumulación de manchas de compuestos de estaño que pueden disponerse formando grupos o bandas en el sentido de avance de la hoja. Se forma a la salida del baño de estaño.

- **Polvo frío:** Manchas muy pequeñas, generalmente agrupadas.
- **Marcas o bandas de “dross” petadas:** Trazas de compuestos de estaño dejadas periódico por un rodillo en la cara inferior de la lámina y acompañadas por una fisura.
- **Estaño:** Manchas o trazos formados por partículas de estaño adheridas a la cara inferior de la lámina a la que proporcionan un aspecto especular.
- **Mancha de estaño:** Mancha blanquecina, muy ligera, de uno a varios centímetros, situada en la cara superior de la lámina y que no produce distorsión óptica. Observada bajo una iluminación intensa presenta un aspecto grisáceo y si el vidrio está plateado, se distingue como una marca gris de bordes netamente definidos.
- **“Top speck”:** Pequeña gota de estaño o de un compuesto de estaño, rodeada de una aureola de vidrio coloreado (esto solo se puede ver en el microscopio) que resulta de su disolución parcial y que produce deformación en la cara superior de la lámina.
- **“Crater drip”:** Profunda huella que forma un cráter en la cara superior de la lámina y que contiene una gota de estaño desprovista de halo coloreado.
- **“Drip”:** Copo de óxido o de sulfuro de estaño, generalmente de color negro y rodeado de una zona grisácea, depositado en la zona superior de la lámina.
- **“Bloom”:** Coloración azulada sobre la cara inferior de la lámina, producida por una oxidación del estaño difundido en el vidrio durante su tratamiento térmico. Su intensidad y extensión dependen de la concentración del estaño en la capa superficial.
- **Hilo:** Hilo de vidrio, de propiedades ópticas diferentes, dispuesto en el sentido de avance de la lámina sobre una de sus dos caras.
- **Hilo de vidrio frío:** Hilo más destacado formado solamente por la cara inferior de la lámina.
- **“Dross” diagonal:** Huellas en dirección diagonal sobre la cara inferior de la lámina.
- **Marcas de cortina:** Ligeros arañazos, muy largos, situados sobre la cara superior de la lámina, paralelamente a su dirección de avance que resultan especialmente visibles cuando se platea (espejo) su superficie.
- **Marcas de labio:** Arañazos profundos, generalmente continuos, que aparecen a la salida del baño de estaño en la cara inferior de la lámina, situados paralelamente a su dirección de avance.
- **Distorsión en línea interrumpida:** Distorsión constituida por un cierto número de líneas sucesivas de unos 20-50 mm de ancho y 150-900 mm de largo, en la dirección de avance de la lámina.
- **“Ridge”:** Distorsión aislada muy larga, cuya anchura puede alcanzar los 100 mm, dispuesta en la dirección de avance de la lámina.
- **Distorsión superficial en línea continua:** Línea continua superficial aislada, dispuesta en el sentido de avance de la lámina.

- **Distorsión diagonal:** Análoga en su forma a la distorsión en línea interrumpida, suele estar situada en el borde de la lámina formando un ángulo con su dirección de avance.
- **Martelado:** Distorsión en forma de mancha, cuyo eje principal es perpendicular a la dirección de avance de la lámina.

DEFECTOS DE TEMPLADO

- **Chapa o "Tôle":** Deformación de una hoja por efecto de un mal recocido. Si el defecto es muy acusado, da lugar a una ondulación de los bordes.
- **Barco o contrabanco:** Curvatura transversal de una hoja producida por un recocido defectuoso.
- **Marca de pinza:** Huellas que dejan sobre el borde del vidrio las puntas de las pinzas empleadas para suspender el vidrio durante el proceso de templado.
- **Irisaciones de temple:** Figuras que se corresponden con las boquillas de soplado de las turbinas de aire, éstas resultan visibles en un vidrio templado cuando se observan en ciertas condiciones.

DEFECTOS EN VIDRIO LAMINADO

- **Defecto de paralelismo entre los vidrios laminados:** Suele ser por efecto de una posición defectuosa de los vidrios, una deformación de los rodillos laminadores o un defecto de alineación de los elementos desbastadores.
- **Huellas de rodillo:** Marcas producidas por el rodillo laminador sobre el vidrio caliente, que se repiten periódicamente a cada vuelta.
- **Patas de gallo:** Huellas producidas en el vidrio por efecto de una breve adherencia a un rodillo demasiado caliente.
- **Golpe de rodillo:** Variación periódica del espesor del vidrio laminado bruto, producida por una deformación del rodillo laminador, que da lugar a que las dos caras no resulten paralelas.
- **Ondulación:** Ondulación periódica en un vidrio, producida por un defecto de redondez de los rodillos portadores o de los rodillos de la extendería.
- **Pliegue de colada, arruga de colada:** Plisado en la superficie de la lámina de vidrio, perpendicular a la dirección de los rodillos y producido por una falta de sincronización entre los rodillos laminadores.
- **Serpentín:** Pequeñas ondulaciones producidas en el borde de la lámina que suelen ir acompañadas de una variación cíclica de espesor.

DEFECTOS DEL VIDRIO IMPRESO

- **Falta de impresión:** Zona aislada que ha quedado sin impresión por hallarse localmente desgastado o dañado su rodillo impresor.

- **Impresión borrosa:** Falta de nitidez en el dibujo impreso.
- **Dibujo deformado o dibujo sinuoso:** Alineación defectuosa del dibujo impreso producida por una diferencia entre la velocidad de la zona central y la de los bordes de la banda.
- **Contradibujo:** Ligera deformación de la superficie lisa de un vidrio impreso que da lugar a que se aprecien en ella los principales relieves de la cara impresa.
- **Patatas de gato:** Sucesión de huellas en la dirección longitudinal de la banda que alteran la nitidez del dibujo (producida por una burbuja apresada entre el vidrio y el rodillo).

DEFECTOS DE VIDRIO ARMADO

- **Deformación de la malla:** Distorsión del entramado de las mallas.
- **Malla rota o arrancada:** Deformación de la malla producida por la rotura de uno o más alambres o por falta de soldadura en sus puntos de intersección.
- **Malla inclinada o falsa escuadra de malla:** Desviación de los alambres de la trama, de tal manera que quedan paralelos entre sí, pero no perpendiculares a la dirección de colada.
- **Malla curvada:** Curvatura de los alambres de la trama formando un arco continuo en todo el ancho de la malla.
- **Tejadillo:** Deformación de un alambre transversa entre dos alambres longitudinales.
- **Punto de cadeneta:** Parte de la malla que aflora intermitentemente a la superficie.
- **Tamizado:** Pequeñas depresiones formadas en una de las caras de la hoja producido por un escurrido de la masa de vidrio entre la malla.
- **Estampado:** Abultamiento superficial correspondiente a las mallas de un entramado hexagonal.
- **Ondas de inserción:** Pequeñas venas ondulantes de vidrio alrededor de los alambres de la malla. Este defecto sólo aparece en la luna armada.
- **Vaina o burbuja de alambre:** Burbuja elipsoidal, delgada y alargada, formada alrededor de un alambre que no ha resultado mojado por el vidrio y que se extiende a lo largo de dicha malla.
- **Hilo abullonado:** Presencia de numerosas burbujas a lo largo de los alambres de la malla.
- **Bandera:** Regueros de burbujas, generalmente coloreados, dispuestos en forma de arco entre los hilos de la trama.

○ *DEFECTOS EN LOS BORDES*

En algunos casos, identificaremos que debido a la manufactura del vidrio nos aparecen los bordes con discontinuidades, éstos presentan un riesgo en la seguridad de las personas.

○ *DEFECTOS POR ROTURA/ ARAÑADO*

No todos los daños que afectan al vidrio se producen cuando éste está en su proceso de su fabricación, es decir, todavía en caliente. Si no que también nos encontramos con algunos defectos que aparecen a partir de la degradación del material, ya sea por una mala puesta en obra, por un mal uso o por la exposición a impactos a la que suele estar sometido el vidrio:

- **Arañado, rallado:** Surco producido en la superficie del vidrio por roce de un cuerpo duro sobre el vidrio frío.
- **Rotura estrellada o estrella:** Fractura que se propaga radialmente en varias direcciones.
- **Huella o marca de golpe:** Grietas superficiales, de escasa profundidad, producidas por impacto de un objeto duro no puntiagudo.
- **Esquina desconchada:** Rotura de un vértice
- **Rozadura:** Deterioro de la superficie producido por una fricción ligera entre dos hojas de vidrio durante su manipulación.
- **Estregadura:** Deterioro superficial producido por un roce enérgico entre dos hojas de vidrio o por una esquirla de vidrio atrapada entre ellas.
- **Esquirlas o lascas:** Partículas de vidrio que, procedentes del corte o de roturas en la máquina, quedan adheridas a la hoja de vidrio.
- **Estregadura de rodillos:** Huellas producidas en el vidrio por las esquirlas adheridas en los rodillos de la cámara de estirado.

○ *DEFECTOS AL ENVEJECER*

No tan solo nos encontraremos con daños superficiales producidos por arañazos o golpes, si no que las inclemencias del tiempo y la exposición de los vidrios a condiciones extremas pueden producir defectos que modifiquen sus propiedades iniciales:

- **Impresión:** Depósito superficial constituido generalmente por manchas blanquecinas debidas a un ligero ataque químico del vidrio por los agentes atmosféricos. Este defecto se produce frecuentemente durante el almacenamiento.
- **Impresión de papel o marca de papel:** Huellas producidas sobre una hoja de vidrio por el papel de separación, por efecto de un ataque químico de la superficie.
- **Pegado o vidrio pegado:** Adherencia entre dos hojas de vidrio atacadas durante su almacenamiento, de tal manera que la película formada entre ellas impide su separación sin dañarlas.
- **Irisación:** Colores de interferencia producidos por un ataque químico muy débil.
- **Alterado o impresionado:** Calificativo aplicado a un vidrio más o menos atacado por los agentes atmosféricos.
- **Capa hidratada o mojada:** Capa superficial de vidrio alterada por la impregnación de agua y que puede regenerarse por secado ulterior.

- **Condensación o empañado:** Empañado producido por condensación de humedad en las caras interiores de un doble acristalamiento (vidrio cámara).
- **Moho o enmohecimiento:** Ataque producido por microorganismos.

ANEXOS BLOQUE 2

K. POSIBLE CHOQUE TÉRMICO

○ DECLARACIÓN DE PRESTACIONES DEL VIDRIO

Declaración de prestaciones del vidrio instalado. Fuente: Vidres Berni.

6. Prestaciones declaradas

Unidad de Vidrio Aislante EN 1279-5:2005+A2:2010		
LamiGlass 66.1 Guardian Sun // 16 // LamiGlass 55.1		
Resistencia al fuego		NPD
Reacción al fuego		F
Prestación al fuego exterior		NPD
Resistencia a la bala		NPD
Resistencia a la explosión		NPD
Resistencia a la efracción		NPD
Resistencia al impacto de cuerpo pendular		1(B)I/1(B)I
Resistencia a variaciones bruscas de temperatura y diferenciales de temperatura	K	40K/40K
Resistencia al viento, nieve, carga en m/m	mm	66.1/16/55.1
Atenuación acústica al ruido aéreo directo	dbA	NPD
Emisividad	e_d	NPD
Propiedades térmicas (valor U) $W/(m^2.K)$	$W/(m^2.K)$	1,3
Transmitancia luminosa τ_v		0,65
Reflexión luminosa ρ_v		0.18/0.16
Transmitancia de energía solar τ_e		0,34
Reflexión de energía solar ρ_e		0.28/0.25
Factor solar g		0,40

NPD: Prestación no declarada

Cámara aire

○ IMÁGENES DE LA PUESTA EN OBRA



Imágenes cedidas por Vidres Berni.



○ *TABLA E11 i E10 CTE*

Tabla E.10 Absortividad del marco para radiación solar α

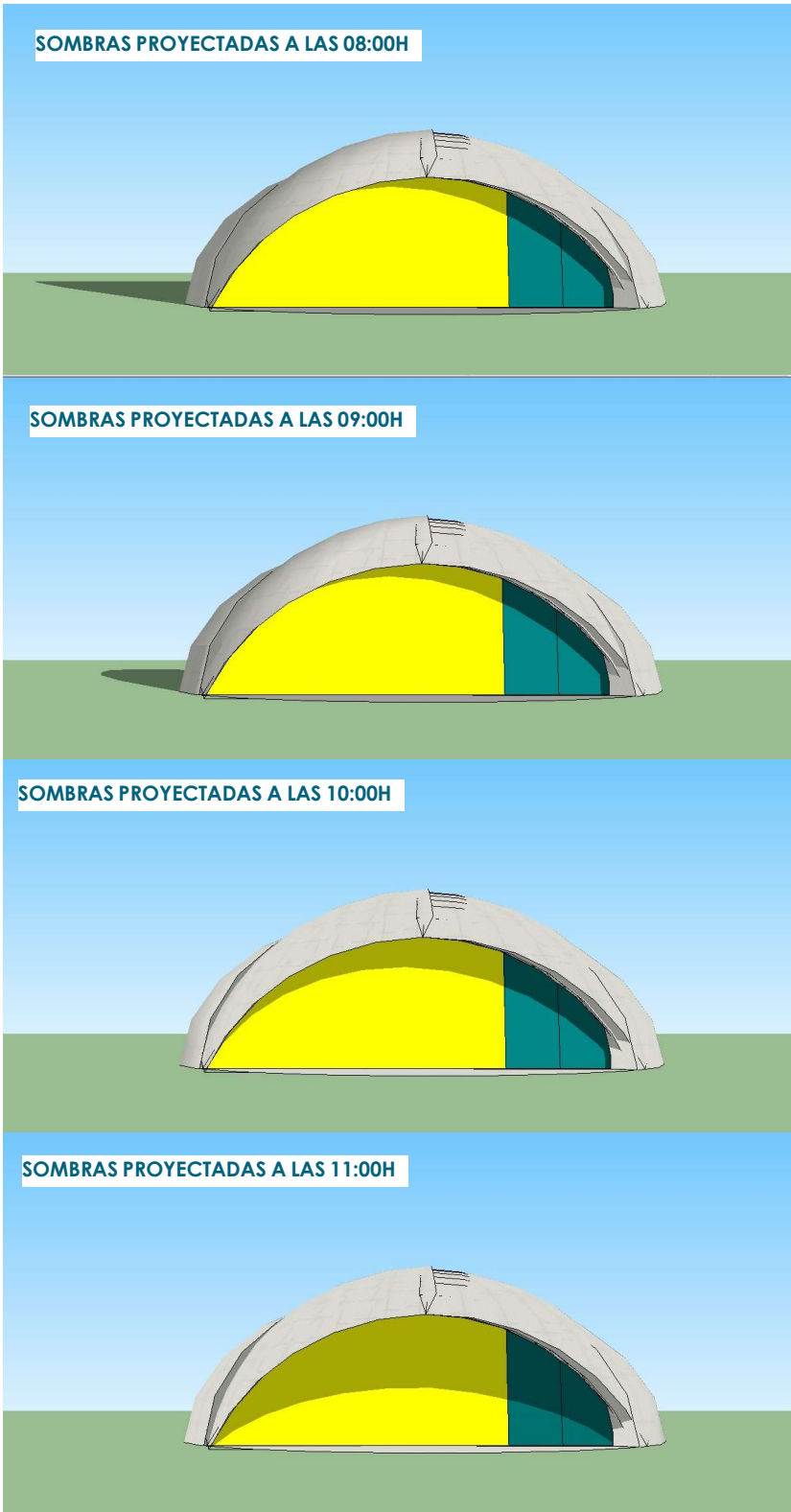
Color	Claro	Medio	Oscuro
Blanco	0,20	0,30	---
Amarillo	0,30	0,50	0,70
Beige	0,35	0,55	0,75
Marrón	0,50	0,75	0,92
Rojo	0,85	0,80	0,90
Verde	0,40	0,70	0,88
Azul	0,50	0,80	0,95
Gris	0,40	0,65	---
Negro	--	0,96	---

Tabla E.11: Factor de sombra para obstáculos de fachada: Voladizo

		$0,2 \leq L/H \leq 0,5$	$0,5 \leq L/H \leq 1$	$1 \leq L/H \leq 2$	$L/H > 2$
S	$0 < D/H \leq 0,2$	0,82	0,50	0,28	0,16
	$0,2 < D/H \leq 0,6$	0,87	0,64	0,39	0,22
	$D/H > 0,6$	0,93	0,82	0,60	0,39
SE/SO	$0 < D/H \leq 0,2$	0,90	0,71	0,43	0,16
	$0,2 < D/H \leq 0,6$	0,94	0,82	0,60	0,27
	$D/H > 0,6$	0,98	0,93	0,84	0,65
E/O	$0 < D/H \leq 0,2$	0,92	0,77	0,55	0,22
	$0,2 < D/H \leq 0,6$	0,96	0,88	0,70	0,43
	$D/H > 0,6$	0,99	0,96	0,89	0,75

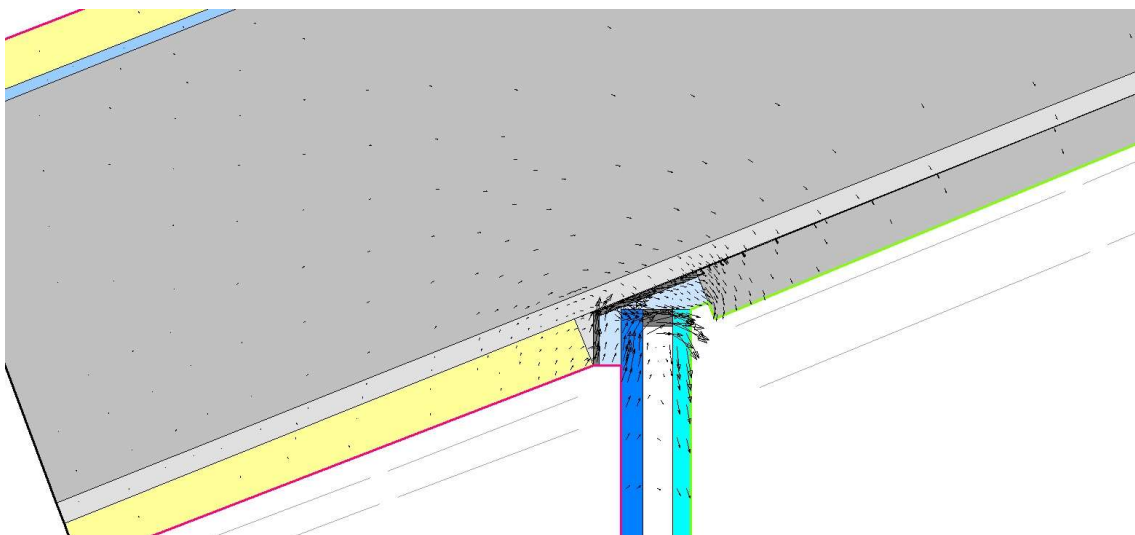
NOTA: En caso de que exista un retranqueo, la longitud L se medirá desde el centro del acristalamiento.

○ *PROYECCIÓN*

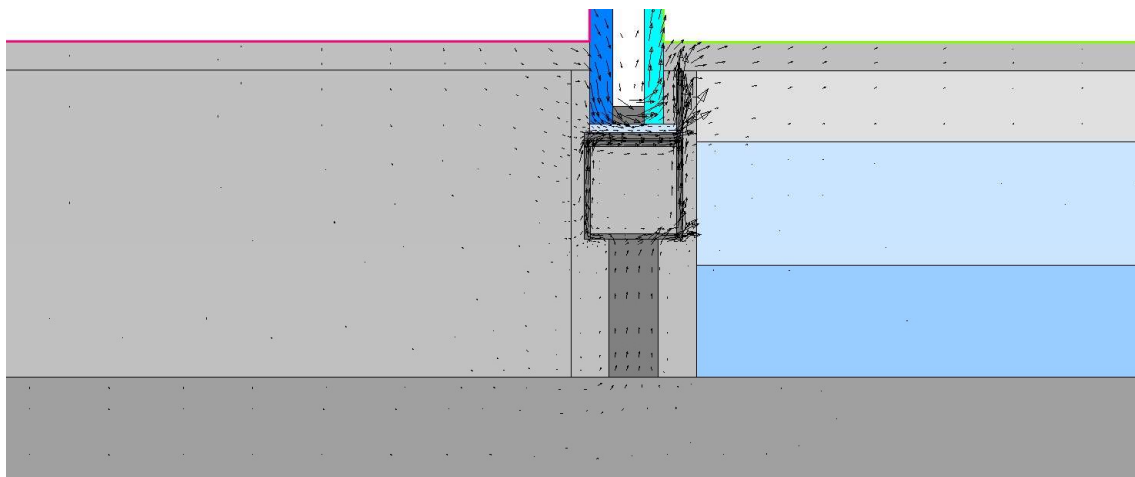




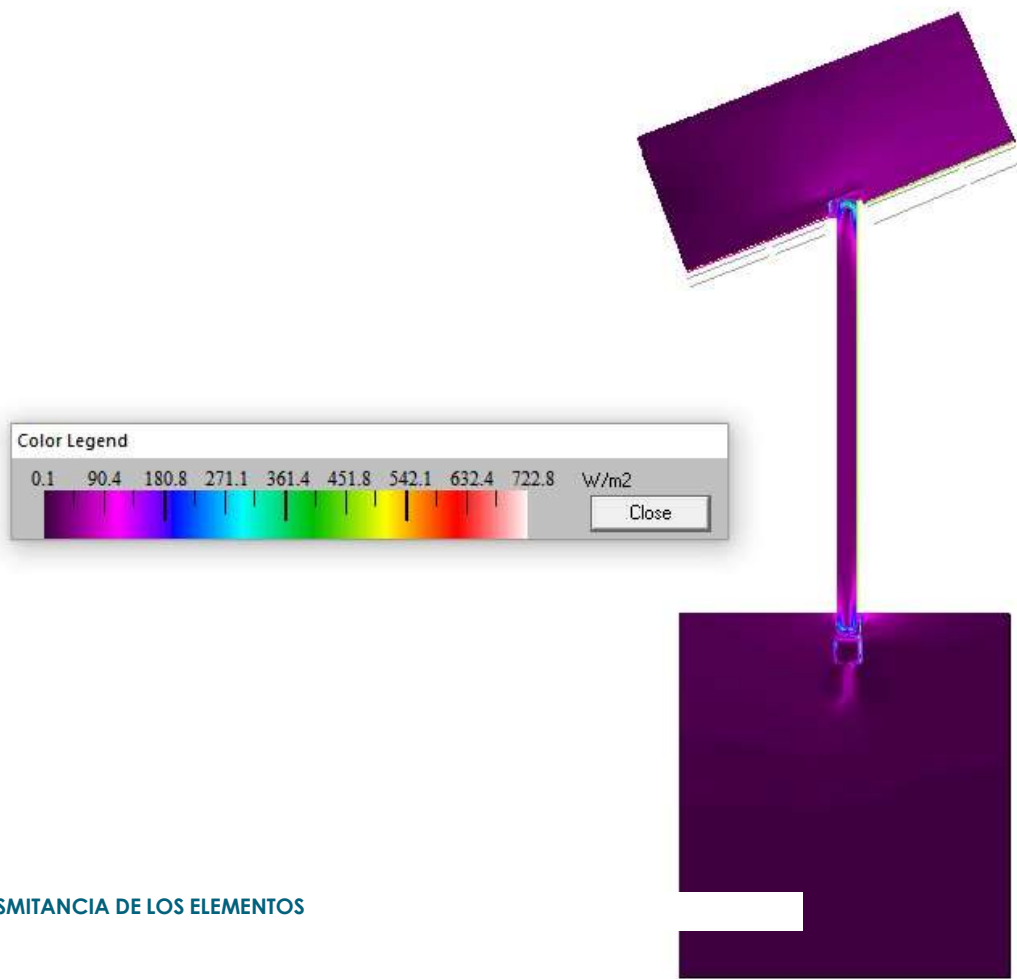
○ *DATOS EXTRAÍDOS A PARTIR DEL CÁLCULO CON THERM*



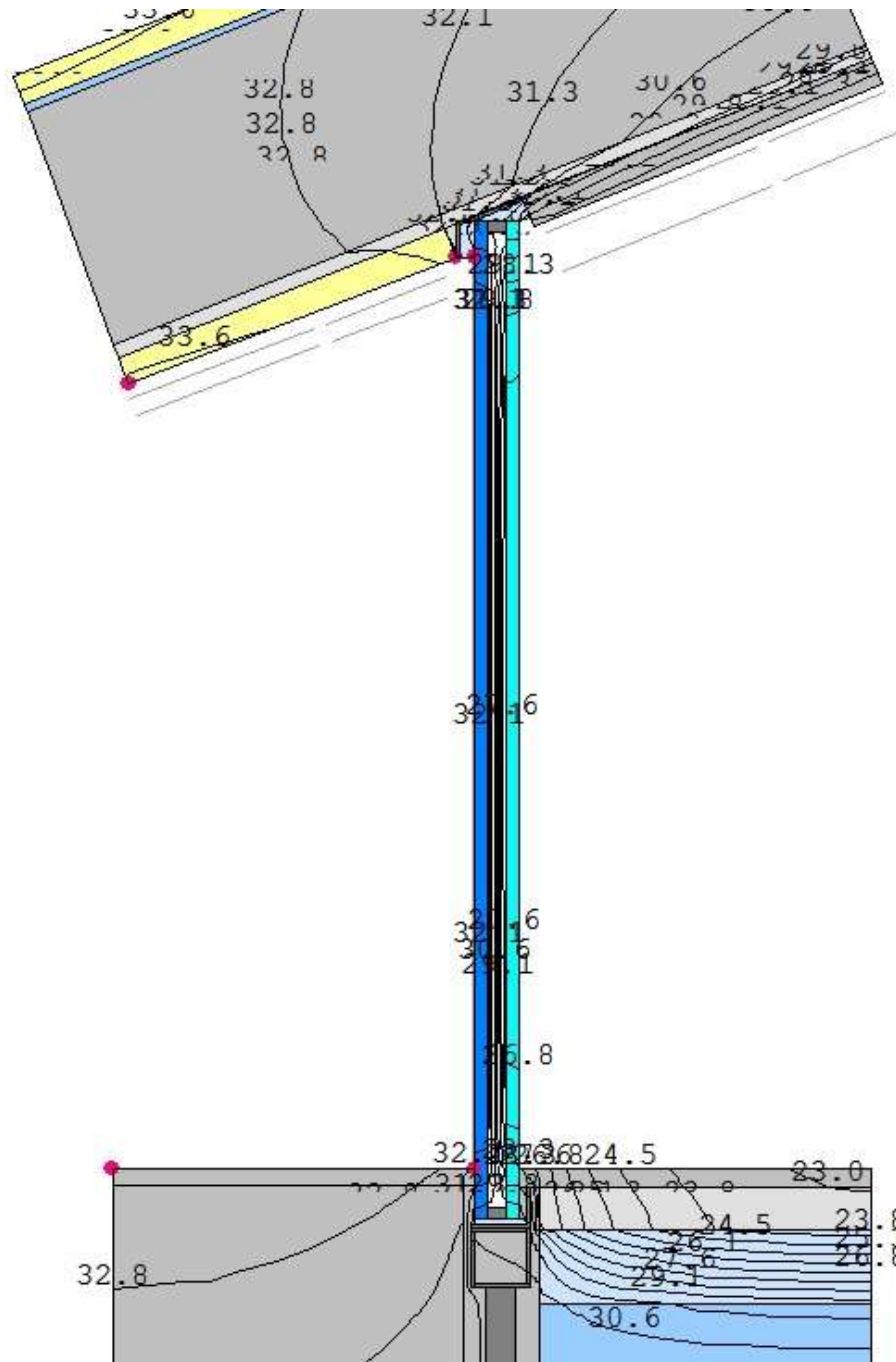
FLUJO DE VECTORES SUPERIOR



FLUJO DE VECTORES INFERIOR



TRANSMITANCIA DE LOS ELEMENTOS



LÍNEAS DE ISOTERMAS

L. ROTURA DE PUERTA LAMINADA

○ *DECLARACIÓN DE PRESTACIONES (De la puerta instalada)*

Declaración de prestaciones facilitada por el fabricante. Fuente: Vidres Berni.

COMPOSICIÓN ACRISTALAMIENTO:

VIDRIO EXTERIOR :	Laminat Templat Stopsol Classic Bronze 6mm + 1.52mm pvb + Templat Parsol Bronze 4mm
CAMARA:	
VIDRIO INTERIOR:	

DATOS TÉCNICOS:

	Exterior	Interior
SEGURIDAD EN CASO DE INCENDIO:		
RESISTENCIA AL FUEGO :	PND	PND
REACCIÓN AL FUEGO :	PND	PND
PRESTACIÓN AL FUEGO EXTERIOR :	PND	PND
NIVELES DE PROTECCIÓN :	Exterior	Interior
RESISTENCIA A LA EFRACCIÓN :	P4A	PND
RESISTENCIA AL IMPACTO DEL CUERPO PENDULAR :	1C1	PND
RESISTENCIA A LAS BALAS :	PND	PND
RESISTENCIA A LAS EXPLOSIONES :	PND	PND
RESISTENCIA A VARIACIONES BRUSCAS DE TEMPERATURA :	200K	PND
RESISTENCIA A LA CARGA DE VIENTO Y NIEVE :	PND	PND
DATOS LUMÍNICOS :		
TRANSMISIÓN LUMINOSA :	15 %	
REFLEXIÓN LUMINOSA EXTERIOR :	10 %	
REFLEXIÓN LUMINOSA INTERIOR :	%	
DATOS SOLARES :		
TRANSMISIÓN ENERGÉTICA DIRECTA :	18 %	
ABSORCIÓN ENERGÉTICA :	73 %	
FACTOR SOLAR :	36 %	
AISLAMIENTO TÉRMICO :		
COEFICIENTE TRANSMISIÓN TÉRMICA :	5,4	W/m2K
ATENUACIÓN ACÚSTICA :		
ESTIMACIÓN NIVEL ATENUACIÓN ACUSTICA (Rw) :	PND	dB

○ *DECLARACIÓN DE PRESTACIONES (De la puerta ejemplo)*

Declaración de prestaciones facilitada por el fabricante. Fuente: Vidres Berni.

COMPOSICIÓN ACRISTALAMIENTO:

VIDRIO EXTERIOR :	Templado Float 5mm + but.gris + but.mate+but.gris + Templado Float 5mm
CAMARA:	
VIDRIO INTERIOR:	

DATOS TÉCNICOS:

	Exterior	Interior
SEGURIDAD EN CASO DE INCENDIO:		
RESISTENCIA AL FUEGO :	PND	PND
REACCIÓN AL FUEGO :	PND	PND
PRESTACIÓN AL FUEGO EXTERIOR :	PND	PND
NIVELES DE PROTECCIÓN :	Exterior	Interior
RESISTENCIA A LA EFRACCIÓN :	P1A	PND
RESISTENCIA AL IMPACTO DEL CUERPO PENDULAR :	1C1/1C1	PND
RESISTENCIA A LAS BALAS :	PND	PND
RESISTENCIA A LAS EXPLOSIONES :	PND	PND
RESISTENCIA A VARIACIONES BRUSCAS DE TEMPERATURA :	200/200K	PND
RESISTENCIA A LA CARGA DE VIENTO Y NIEVE :	5+5	PND
DATOS LUMÍNICOS :		
TRANSMISIÓN LUMINOSA :	15 %	
REFLEXIÓN LUMINOSA EXTERIOR :	4 %	
REFLEXIÓN LUMINOSA INTERIOR :	4 %	
DATOS SOLARES :		
TRANSMISIÓN ENERGÉTICA DIRECTA :	24 %	
ABSORCIÓN ENERGÉTICA :	71 %	
FACTOR SOLAR :	51 %	
AISLAMIENTO TÉRMICO :		
COEFICIENTE TRANSMISIÓN TÉRMICA :	5.5	W/m2K
ATENUACIÓN ACÚSTICA :		
ESTIMACIÓN NIVEL ATENUACIÓN ACUSTICA (Rw) :	PND	dB GL

○ HIPÓTESIS PLANTEADAS

GLASTRUCT

File Edit View Report Calculation Tools Help

Project Information
 Project Name: 6+4 TEMPLADO Y LAMINADO
 Report Number: [] Details...

Physical Dimensions
 Width: 39,00 in. Height: 90,55 in. Glazing Slope: 90,00 °

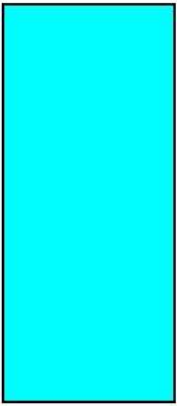
Support Condition
 Support: Edge Supported

Glazing Configuration
 Number of Layers: Double
 Laminated Glass Type: Ply1 Thickness: Interlayer Thickness: Ply2 Thickness:
 Pane 1: Fully Tempered 5/32 in. 0,01 in. 3/4 in.
 Pane 2: Fully Tempered 1/8 in.

Design Loads
 Wind Loads
 Short Duration: 128 psf Long Duration: 0,00 psf (3 Sec or Less) (30 Days)
 Dead Loads
 Self Weight: 6,74 psf Add To SD Load Add To LD Load
 Snow Load: 20,89 psf Add To SD Load Add To LD Load

Total Loads
 Short Duration: 128,00 psf Long Duration: 0,00 psf (3 Sec or Less) (0.00-209.00 pfs) (30 Days) (0.00-209.00 pfs)

Front View Side View



Results
 Short Duration
 Load Resistance: 128,35 psf PASS
 Deflection: >= 0,6 in.
 Long Duration
 Load Resistance: 128,35 psf PASS
 Deflection: 0 in.

Version: 1.0.03.94 Units: IP (psf, in.) 31/08/2017 22:04:46

GLASTRUCT

File Edit View Report Calculation Tools Help

Project Information
 Project Name: 5+5 TEMPLADO Y LAMINADO
 Report Number: [] Details...

Physical Dimensions
 Width: 39,00 in. Height: 90,55 in. Glazing Slope: 90,00 °

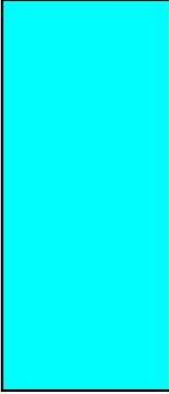
Support Condition
 Support: Edge Supported

Glazing Configuration
 Number of Layers: Double
 Laminated Glass Type: Ply1 Thickness: Interlayer Thickness: Ply2 Thickness:
 Pane 1: Fully Tempered 3/16 in. 0,01 in. 3/16 in.
 Pane 2: Fully Tempered 1/8 in.

Design Loads
 Wind Loads
 Short Duration: 128,00 psf Long Duration: 0,00 psf (3 Sec or Less) (30 Days)
 Dead Loads
 Self Weight: 6,74 psf Add To SD Load Add To LD Load
 Snow Load: 20,89 psf Add To SD Load Add To LD Load

Total Loads
 Short Duration: 128,00 psf Long Duration: 0,00 psf (3 Sec or Less) (0.00-209.00 pfs) (30 Days) (0.00-209.00 pfs)

Front View Side View



Results
 Short Duration
 Load Resistance: 128,35 psf PASS
 Deflection: >= 0,6 in.
 Long Duration
 Load Resistance: 128,35 psf PASS
 Deflection: 0 in.

Version: 1.0.03.94 Units: IP (psf, in.) 31/08/2017 22:04:46

M. VIDRIOS PARA PISCINAS

Según los archivos del manual "Memento" de Saint Gobain Francia encontramos la siguiente metodología a seguir en el cálculo de acuarios:

3.2

Détermination des épaisseurs

20 mm. Le maintien ponctuel doit être assuré sans serrage du produit verrier. L'interposition d'une entretoise permet de limiter le serrage.

La dimensionnement des vitrages avec la participation de ces dispositifs se fait de la façon suivante:

Ces formules sont uniquement valables lorsque le rapport hauteur/largeur est au plus égal à 1,5.

L'épaisseur "e" déterminée est à multiplier par le facteur d'équivalence E qui est fonction du type de vitrage (voir page 418).

1 maintien ponctuel au milieu du bord libre	2 maintiens ponctuels équidistants
$e_e = \frac{l \times \sqrt{P}}{4,9} \times 0,625$	$e_e = \frac{l \times \sqrt{P}}{4,9} \times 0,588$

Légende : l est le bord libre (m), P est la pression (Pa).

Vitrages d'aquarium ou hublots de piscine

Les dalles d'aquarium ou de piscine en verre sont soumises à des charges hydrostatiques, augmentées éventuellement de charges uniformément réparties. Elles sont considérées comme des éléments de remplissage. En conséquence, elles ne doivent pas subir de déformations dues aux mouvements de la structure ou du sol.

Nature des produits verriers

Les dalles d'aquarium en verre sont réalisées en verre monolithique recuit ou durci, ou en verre feuilleté à plusieurs composants de même épaisseur. Les produits verriers sont en verre clair ou coloré.

Les composants des dalles feuilletées, participant à la reprise des charges.

soz PLANILUX, soz DIAMANT, soz PLANIDUR, soz SECURIT ou soz SECURIPPOINT). Dans le cas contraire, l'épaisseur de la dalle est calculée avec la contrainte admissible du composant le moins performant.

Les dalles sont toujours façonnées (chant meulé, plat mat).

Les intercalaires des feuilletés sont en PVB, cependant ceux-ci ne sont pas considérés comme participant à la reprise des charges.

Sécurité

L'épaisseur des dalles d'aquarium est calculée avec un facteur de sécurité de l'ordre de 3,5. Ce facteur de sécurité tient compte de la permanence des charges avec un coefficient de "fatigue" minorateur.

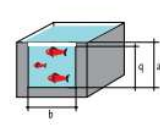
Verre monolithique durci

En cas de casse accidentelle, dès que le verre est brisé, le bassin va se vider plus

3.2

Détermination des épaisseurs

Dalle rectangulaire verticale en appui sur 3 côtés* (voir tableau page 426)



Épaisseur d'un composant

$$e_e = b \cdot \sqrt{\frac{\beta_0 \cdot 10^3 \cdot q}{n \cdot \beta_1}}$$

Flèche maximale de la dalle

$$f = \frac{1,6 \cdot (l_1 \cdot b^2 + a \cdot b^2)}{e_e^3 \cdot n}$$

* Dans ce cas, les calculs sont effectués comme si la hauteur d'eau était au moins égale à la hauteur du vitrage

Détermination de l'épaisseur commerciale du feuilleté e_f

e_f > e_e

avec : e_f = e_e x n

l'épaisseur de l'intercalaire est négligée.

Recommandations particulières

Les vitrages devront être exempts d'amorce de rupture. Les dalles rayées ou écaillées ne devront pas être utilisées. En cas de rayure après pose, notamment sur la face en extension, côté public, il est fortement recommandé de remplacer ces vitrages sans attendre.

Rapport b/a	β ₀	β ₁
0,5	1,160	2,30
0,66	1,560	3,04
1,0	1,948	3,68
1,5	2,666	4,45
2,0	3,114	5,33
> 2	3,679	6,51

* Dans ce cas, les calculs sont effectués comme si la hauteur d'eau était au moins égale à la hauteur du vitrage

Détermination des épaisseurs • 425

3.2

Détermination des épaisseurs

Questions techniques

blessures, des dégâts matériels plus ou moins importants selon le volume de ce bassin.

Il est formellement déconseillé d'utiliser ce type de vitrage pour des bassins de contenance supérieure à 1 000 litres (1 m³). En aucun cas, ces bassins ne pourront recevoir une quelconque présence humaine.

Verre monolithique trempé

L'usage du verre monolithique trempé en aquariophilie est fortement déconseillé car, en cas de bris, il y a disparition complète et instantanée de la paroi et création d'une vague dévastatrice.

Verre feuilleté recuit, durci ou trempé

En cas de bris accidentel d'un des composants du feuilleté, le facteur de sécurité subsistant est encore suffisant pour assurer une sécurité temporaire permettant d'évacuer le public, sauver la flore et la faune avant de vider le bassin et de procéder au remplacement de la dalle sinistrée.

Mise en œuvre

Voir chapitre "Mise en œuvre", page 498.

Contraintes admissibles

Les contraintes admissibles à prendre en considération tiennent compte de la permanence des charges.

Flèches admissibles

La flèche au centre du volume verrier, sous charge de service, n'excédera pas 1/200 de la plus petite dimension.

Méthode de calcul

L'épaisseur de la dalle de verre est fonction :

- de la hauteur d'eau ;
- du nombre d'appuis ;

avec :

- n = nombre de composants du feuilleté n = 1 pour un verre monolithique ;
- e_e = épaisseur nominale d'un des composants (mm).

Tous les composants ont la même épaisseur ;

- β₀, β₁, β₂, β₃, β₄ = coefficients de Timoshenko dépendant du rapport longueur/largeur ;
- q = hauteur d'eau mesurée à la base du clair de vue de la dalle (m) ;
- a = hauteur de la dalle (dimension du clair de vue en m) ;
- b = longueur de la dalle (dimension du clair de vue en m) ;
- σ = contrainte admissible en MPa (N/mm²).

La flèche de la dalle est calculée :

- au centre de la dalle pour les cas où la hauteur d'eau est supérieure à la hauteur du vitrage ;
- à l'endroit où la flèche est maximale quand la hauteur d'eau est égale à la hauteur du vitrage ;

Type de vitrage	Contrainte admissible σ en MPa (N/mm ²)
Verre recuit	6
soz PLANIDUR	12

3.2

Détermination des épaisseurs

Questions techniques

Valeurs des coefficients α et β pour le calcul des flèches

Rapport b/a	β ₀ charge uniforme	β ₁ charge triangulaire	β ₂ charge uniforme	β ₃ charge triangulaire
1,0	2,819	1,554	4,06	2,03
1,1	3,261	1,678	4,85	2,43
1,2	3,691	1,809	5,64	2,86
1,3	4,085	1,944	6,38	3,19
1,4	4,444	2,086	7,05	3,53
1,5	4,779	2,235	7,72	3,86
1,6	5,074	2,372	8,30	4,15
1,7	5,344	2,502	8,83	4,41
1,8	5,580	2,619	9,31	4,65
1,9	5,798	2,720	9,74	4,87
2,0	5,986	2,814	10,13	5,06
3,0	6,998	3,596	12,23	6,12
4,0	7,269	3,720	12,82	6,41
5,0	7,334	3,755	12,97	6,48
> 5,0	7,358	3,767	13,02	6,51

Rapport a/b	β ₀ charge uniforme	β ₁ charge triangulaire	β ₂ charge uniforme	β ₃ charge triangulaire	β ₄ charge triangulaire
1,0	2,819	1,554	4,06	2,02	2,02
1,1	3,261	1,678	4,85	2,43	2,43
1,2	3,691	1,809	5,64	2,84	2,86
1,3	4,085	1,944	6,38	3,19	3,15
1,4	4,444	2,086	7,05	3,53	3,63
1,5	4,779	2,235	7,72	3,86	3,99
1,6	5,074	2,372	8,30	4,15	4,32
1,7	5,344	2,502	8,83	4,41	4,63
1,8	5,580	2,619	9,31	4,65	4,91
1,9	5,798	2,720	9,74	4,87	5,18
2,0	5,986	2,814	10,13	5,06	5,42
3,0	6,998	3,596	12,23	6,12	7,07
4,0	7,269	3,720	12,82	6,41	8,32
5,0	7,334	3,755	12,97	6,48	9,65
> 5,0	7,358	3,767	13,02	6,51	9,76

426 • Détermination des épaisseurs