

EL VIDRIO EN LA ARQUITECTURA

José Pablo Calvo Busello (Tel: +34 914 464 886/ +34 626 353 534. E-mail: 648009617b@gmail.com)

Arquitecto; Cristalería Española, S.A., Dirección Técnica General, (1973-1991) y Asesoría de Vidrios y Fachadas, C.I.T.A.V. (1991-2011)

Resumen

El vidrio ha sido el material tradicional para iluminar nuestras estancias y comunicarnos visualmente con el exterior desde que, allá en el S.XII el Gótico rasgó las pesadas estructuras románicas y abrió los muros a los vitrales y, posteriormente, a finales del S.XIX y en el S.XX las estructuras ligeras de hierro forjado y de acero combinadas con vidrios permitieron realizar fachadas totalmente acristaladas.

Esta preeminencia del vidrio sobre el resto de materiales, le traslado problemas que hasta ese momento solucionaban ellos, fundamentalmente *aislamiento térmico*, en zonas frías, y *protección solar*, en las cálidas, y sin olvidar sus prestaciones fundamentales de transparencia y transmisión luminosa. Es fundamental conocer *Qué* es el vidrio, *Como* lo empleamos, para poder hacer un uso racional de él y obtener la mayor comodidad en nuestras estancias evitando los problemas secundarios, como *recalentamiento* indeseado o *roturas térmicas*, que pueden ocasionarse por su uso inadecuado.

Palabras clave: Qué, Como, Térmica, Solar, Recalentamiento, Roturas

Abstract

The glass has been the traditional material to illuminate our rooms and visually communicate with the outside world since back in the twelfth century GothicRomanesque structures tore the heavy walls and opened the windows and then at the end of XIX century and the light structures S.XX wrought iron and steel combined with glass allowed for fully glazed facades.

This preeminence of the glass on the other materials, we transfer problems they solved so far, mainly thermal insulation in cold areas, and sun protection in the warm, and not forgetting its fundamental benefits of transparency and light transmission. It is essential to know what is the glass, as we use it, to make rational use of it and get the comfort in our rooms avoiding secondary problems such as unwanted or broken thermal overheating, which can result from improper use.

Keywords: What, How, Thermal, Solar Overheating Breaks

1. Introducción

El VIDRIO ..., un material usado por el hombre desde hace varios miles de años, prácticamente desde finales del Paleolítico Superior, en su forma natural de *obsidiana*, vidrio volcánico generado por rocas eruptivas nacidas de los magmas que surgen del manto superior de la tierra y que por enfriamiento rápido no llegan a cristalizar, y las escasamente utilizadas *tectitas* provenientes de impactos de meteoritos sobre la Tierra en el Cenozoico durante el período comprendido entre mediados del Terciario y del Cuaternario.

La *obsidiana* por su característica fractura con bordes concoideos muy cortantes, como vidrio que es, fue muy utilizada para la elaboración de armas y utensilios fundamentalmente en el Centro y Sur de América, donde era muy abundante, por las civilizaciones precolombinas (mayas, mexicas e incas) como sustituta del sílex.



Fig. 1.1 Cuchillo ceremonial de *obsidiana*.

Además de su uso como herramienta la *obsidiana* se empleó, por su brillo y aptitud para el pulimento, en la elaboración de piezas artísticas siendo denominada en Perú *espejo de los incas*.



Fig. 1.2 Vasija con forma de mono. Cultura Mexica S.XIV-XVI (d.C.)

Mucho tiempo después con la aparición de la alfarería y la metalurgia, probablemente asociada a esta última y derivada de la fundición de objetos en molde de arena, se descubrió en época y zona desconocidas con seguridad la forma de elaborar ese material ambiguo desde su origen, transparente como el agua pero rígido como la piedra, frágil y cortante como un cuchillo.

En las siguientes páginas recorreremos el camino de la historia del vidrio buscando respuestas a algunas preguntas sobre este material de las que esbozamos algunas muy simples a modo de guía.

¿QUÉ? ... es el vidrio como material, como se obtiene, de qué se compone, cuales son sus características físicas, mecánicas y térmicas. Entre muchas acaso la más sugestiva definición sea **líquido de viscosidad infinita** ... así de sencillo.

¿PARA QUÉ? ... lo empleamos en Arquitectura y como entró en ella. *Para iluminar nuestras estancias, para crear espacios inmateriales sugeridos por la luz y para relacionarnos visualmente con el exterior.*

¿COMO? ... lo hemos usado y como debemos hacerlo en el futuro, en qué aplicaciones, con qué precauciones. El vidrio ha pasado, en los últimos tiempos y en multitud de ocasiones, de ser *un relleno necesario* en un marco a *cerramiento único y absoluto, única barrera entre interior y exterior, utilizado muchas veces con excesiva profusión y un punto de frivolidad llegando a olvidar su función primordial, la transmisión de luz.* En el futuro deberemos valorar con criterio la Estética, Necesidad, Ventajas e Inconvenientes de su uso para llegar a las soluciones más adecuadas, que no tienen porqué ser las de *moda* en el momento.

2. ¿Qué es el vidrio?.

Físicamente el vidrio pertenece al grupo de los líquidos subenfriados [1] con las siguientes características generales, entre otras:

- Carece de estructura cristalina (nunca debe llamarse al vidrio "cristal" aunque en lenguaje coloquial sea muy frecuente).
- Carece de punto de fusión definido.
- Presenta una transición reversible entre los estados líquido y rígido sin fases cristalinas.
- Es termodinámicamente inestable.
- Macroscópicamente es isótropo.
- Presenta ordenación estructural de corto alcance y desorden estructural remoto.
- Se encuentra, subenfriado, en estado de desequilibrio.
- Posee mayor energía interna que un estado cristalino.

De estas características se deduce que nos encontramos ante una sustancia estructuralmente desordenada que no responde a leyes cristalográficas o termodinámicas por lo que los vitroides pueden considerarse un estado excepcional de la materia llegando en tiempos a definirse como un cuarto estado de la misma con rigidez de sólido y estructura de líquido.

Su comportamiento térmico, comparado con un sólido cristalino, se presenta en la Fig. 2.1 [1].

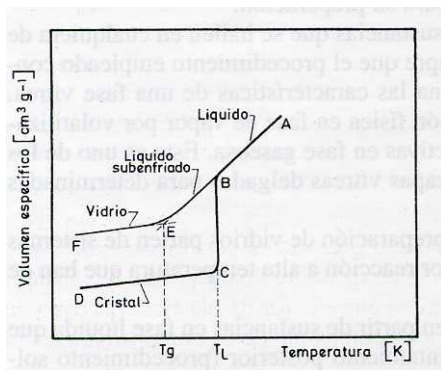


Fig. 2.1 Comportamiento térmico de un sólido vítreo y otro cristalino .

Partiendo del estado líquido (A) al descender la temperatura de ambos hasta el valor T_L (B) el sólido cristalino experimenta una reducción prácticamente inmediata de su volumen específico pasando al estado sólido cristalizado (C), es decir el material posee un punto de fusión (enfriamiento) concreto con una claro aumento de su densidad, es decir en el tramo A-B es líquido y en el C-D sólido sin posiciones intermedias.

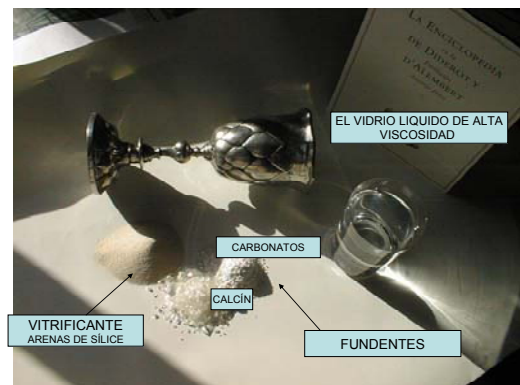
Sin embargo el vitroide en el mismo punto (B), y sin variar de estructura ni densidad de forma apreciable comienza a incrementar su viscosidad de manera que al llegar a la temperatura T_g (E) ha llegado al estado rígido (viscosidad máxima) pero sin variación de estructura, es decir en el tramo de enfriamiento A-B es líquido, en el tramo B-E, denominado *intervalo de transición*, coexisten fases líquidas con otras de viscosidad creciente que se van incrementando hasta alcanzar la rigidez a partir del punto E en el que la viscosidad alcanza su valor máximo entre 10^{13} y $10^{13.5}$ dPa s.

En cuanto a su composición podríamos referirnos como guía al relato de Plinio el Viejo en su Naturalis Historia en la que narra como unos comerciantes fenicios vararon su barco para pernoctar en la desembocadura de un río de Siria, el Belus actualmente Naaman, de aguas turbias lentas y cenagosas que al bajar la marea descubriría un lecho de arenas limpias y brillantes sobre las que colocaron unas piedras de *trona* (carbonatos y bicarbonatos sódicos naturales), objeto de su comercio, para cocinar su cena. Encendido el fuego observaron que la *trona* y las arenas del lecho del río se fundían produciendo un líquido transparente que dio origen al vidrio.... ¿?

Si bien el relato merece un crédito histórico muy cuestionable pues, antes del establecimiento de los Fenicios en la costa de Siria, Egipcios y Sirios (2500 a.C.) producían ya piezas de vidrio en sus talleres tiene una validez técnica innegable como vamos a ver.

Gran narrador y divulgador científico Plinio el Viejo, por cierto muerto en la erupción del Vesubio probablemente por emanaciones sulfurosas al dejarse llevar de su inquietud investigadora para presenciar la erupción en peligrosa proximidad, haría buena la frase “la menor distancia entre un hombre y la verdad es un cuento” pues el relato anterior nos facilita, a través de un bello cuento, los datos básicos sobre la composición del vidrio: *Arena del lecho de un río, carbonatos, fuego ...*

En la imagen y los dos cuadros siguientes se idealizan, en la primera, y detallan, en los segundos, los elementos que componen al vidrio y sus propiedades básicas:



COMPOSICIÓN BÁSICA DEL VIDRIO PLANO SODOCALCICO DE USO HABITUAL EN DE EDIFICACIÓN		
GRUPO PRINCIPAL	Porcentaje	MATERIA PRIMA
VITRIFICANTES: También llamados formadores de red vitrea, su función es dar estructura fundamental al vidrio y su calidad determina la espectrofotometría, y las propiedades térmicas y mecánicas fundamentales del producto final.	72-75%	-- Arenas de cuarzo, de origen sedimentario En función de su calidad y pureza se obtienen vidrios de coloración más natural, menos verdosos por tener menor contenido de óxido de hierro (Fe_2O_3) que en los vidrios planos ordinarios de edificación se encuentra entre 0'030-0'050%, y para los denominados "extraclaros" entre 0'015-0'020%. En Europa se encuentran arenas de gran calidad para la fabricación de vidrio plano en Dörentrup y Hohenbocka, entre el Elba, y el Weser, Nemours y Fontinebleau en Francia y en la región de Mol en Amberes, Bélgica.
FUNDENTES: Es el grupo que favorece la formación del vidrio, rebajando la temperatura de fusión del vitrificante y también se denominan modificadores de red . - Los mejores son los óxidos alcalinos y entre todos el de sodio.	20-22%	-- Carbonatos y sulfatos, de sodio y de calcio. -- Óxidos de potasio litio y magnesio. También se emplea como fundente el propio vidrio molido, que en argot vidriero se denomina calcin , aunque para vidrio plano solo se emplea el del mismo horno pues aportar calcin de un horno diferente producirá defectos y alteraciones de la calidad de producto final. En este sentido podría decirse que el vidrio de cada horno tiene "grupo sanguíneo".
ESTABILIZANTES: Su función es la de modificar algunas características del vidrio sin alterar la estructura de su red, pero facilitando su formación.	3-6%	-- Materiales aluminosos: Óxido e hidróxido de aluminio, feldespatos, caolines y rocas aluminosas. -- Óxido de plomo , que es uno de los materiales que más ennoblece al vidrio pues aporta brillo, sonoridad y "blancura" al vidrio (en algunos vidrios destinados a la fabricación de copas o vajilla el plomo puede alcanzar porcentajes superiores al 25%)
COMPONENTES SECUNDARIOS: En este apartado se sitúan aquellos componentes que, en cantidad minoritaria, se usan para funciones determinadas, colorear, decolorar ... etc		-- Fluoruros , mediante criolita, fluorosilicato sódico, espato de fluor, fluoruro sódico... etc. para opacificaciones. -- Óxidos para coloración intencionada.

PROPIEDADES COMUNES DE LOS VIDRIOS SODOCÁLCICOS DE USO HABITUAL EN EDIFICACIÓN (Para vidrio incoloro de 10 mm de espesor)		
PROPIEDADES ÓPTICAS		
Índice de refracción	$n = 1.52$	
Transmisión Ultravioleta	$T_{UV} = 44\%$	Para $310 \text{ nm} \leq \lambda \leq 360 \text{ nm}$
Transmisión Luminosa	$TL = 86\%$	Para $360 \text{ nm} \leq \lambda \leq 760 \text{ nm}$
Transmisión Infrarroja (corta)	$T_{IR,corta} = 44\%$	Para $760 \text{ nm} \leq \lambda \leq 2.500 \text{ nm}$
Transmisión Infrarroja (larga)	$T_{IR,larga} = 0$	Para $\lambda > 5.000 \text{ nm}$
Factor Solar	$g = 0.77$	Según UNE-EN 410
PROPIEDADES MECÁNICAS		
Densidad	$\gamma = 2.5 \text{ kg/dm}^3$	
Dureza (escala Mohs)	6.5	Entre la ortosa y el cuarzo
Módulo de Elasticidad	$E = 7.3 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$	
Coef. De Poisson	$\nu = 0.22$	
Resistencia a compresión ⁽¹⁾	$\sigma_{C,rec} = 1.000 \text{ N/mm}^2$	Para vidrio recocido
Resistencia a tracción ⁽¹⁾	$\sigma_{T,rec} = 40 \text{ N/mm}^2$	Para vidrio templado
	$\sigma_{T,templ} = 150 \text{ N/mm}^2$	Para vidrio recocido
	$\sigma_{FT,rec} = 10-20 \text{ N/mm}^2$	Para vidrio templado
	$\sigma_{FT,templ} = 120/150 \text{ N/mm}^2$	
PROPIEDADES TÉRMICAS		
Calor específico	$C = 0.19 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1}$	
Coef. de dilatación lineal	$\alpha = 8.9 \times 10^{-6}$	
Conductividad térmica	$\lambda = 0.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
Resistencia al choque térmico	$\cong 60 \text{ K}$	Vidrio recocido
	$\cong 240 \text{ K}$	Vidrio templado
PROPIEDADES ACÚSTICAS		
Velocidad del sonido	5/6 km/s	Equivalente a la del acero
Atenuación acústica	$R_W = 33 \text{ dBA}$ $R_A = 32 \text{ dBA}$ $R_{A,w} = 31 \text{ dBA}$	Según UNE-EN 717-1

NOTAS: ⁽¹⁾ Las resistencias mecánicas del vidrio dadas en la Tabla corresponden a límites genéricos medios y se estudiarán con más detenimiento en el apartado específico correspondiente.

En las mismas influyen conceptos como tiempo de aplicación de la carga y estado de los bordes del vidrio que aquí no se consideran.

Fig. 2.2. Materiales que componen el vidrio y Propiedades Básicas.

En cuanto a los procesos de fabricación dejemos a un lado la historia de los métodos empleados para obtener vidrio plano para la edificación en épocas anteriores y pasemos a describir el sistema actual para su obtención.

En la actualidad el vidrio plano básico para la edificación se fabrica por fusión continua, en un horno de balsa, y posterior flotación en un baño de estaño; de ahí la inserción de la copa de estaño en el esquema simbólico de componentes del vidrio de la Fig. 2.2, este sistema, empleado hoy por prácticamente todos los fabricantes, fue patentado por PILKINGTON BROTHERS en 1952.

El horno de balsa es un elemento de fabricación que deberá fundir vidrio, sin interrupción, durante toda su campaña, llamando así al periodo de tiempo durante el cual el horno es válido para la producción y cuya duración media puede ser de unos 15 a 18 años.

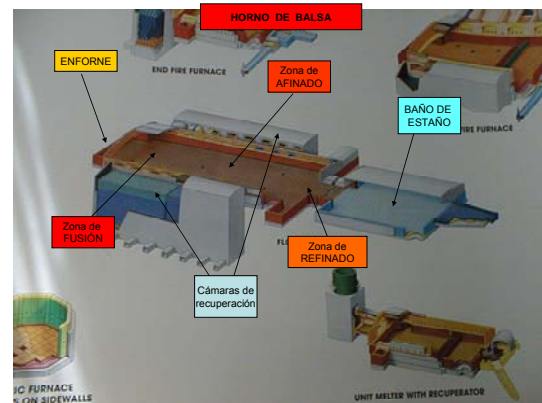


Fig. 2.3 Horno de balsa para fabricación de vidrio plano.

Los Hornos habituales corresponden al tipo de quemadores transversales y contienen una balsa de vidrio fundido de unos 300 ó 400m² de superficie y entre 1'00 y 1'60m de profundidad cuyas partes fundamentales son:

- ENFORNE: Boca trasera del horno por la que se introduce la mezcla de composición.

- ZONAS DE FUSIÓN Y AFINADO: Donde se funde la composición y se depura la masa ya fundida eliminando las impurezas

- ZONA DE REFINADO: En la que se estabiliza y regula la temperatura (1050°C) y viscosidad (10⁴ dPa s) del vidrio fundido antes de su vertido en el baño (habitualmente definido como "Float") para transformarlo en lámina de vidrio plano.

- CAMARAS DE RECUPERACIÓN: Para el aprovechamiento del aire caliente (850°C) que se extrae del horno y así reducir los consumos energéticos.

A la salida del Horno el vidrio se vierte sobre el estaño de la cámara de flotado donde se desarrolla el proceso fundamental de fabricación.

Por el proceso de flotación se obtendría vidrio de 6mm, que corresponde con el espesor de estabilidad del vidrio sobre el estaño para su viscosidad a 1050°C (10⁴ dPa s) , por tanto para obtener otros espesores se recurre a los procedimientos descritos en la Fig. 2.4. [2]

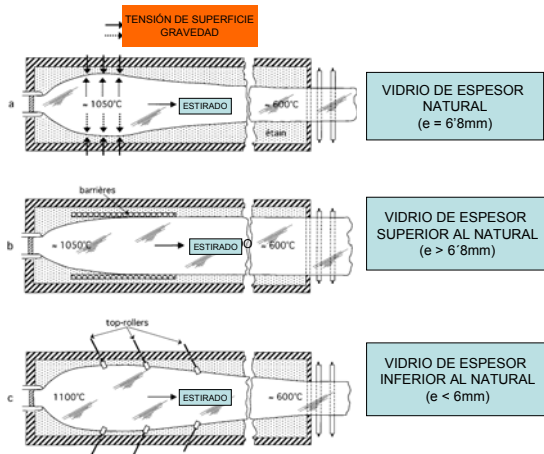


Fig. 2.4. Técnica de fabricación de los distintos espesores.

Considerando que la producción, en Tn por unidad de tiempo de un horno debe ser casi siempre la misma, con el fin de garantizar las campañas óptimas reduciendo el envejecimiento del Horno, la obtención de espesores diferentes a 6mm se consigue empleando *barreras (fender)* y reteniendo el estirado obteniendo así láminas más gruesas, o *rodillos (top-rollers)* para traccionar transversalmente la hoja de vidrio acelerando al mismo tiempo su velocidad de extracción reduciendo así su espesor. Los *top-rollers* también se emplean en la fabricación de vidrios de espesores mayores de 6mm

Dentro del baño el vidrio flota sobre el estaño, de mayor densidad, con el esquema de la Fig. 2.5. [2]

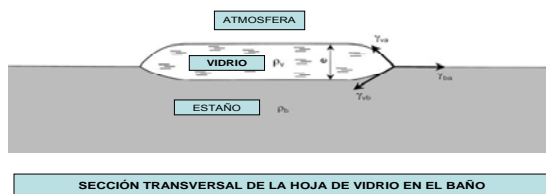


Fig. 2.5. Acciones sobre el vidrio fundido en el baño.

A la salida del Float, con una temperatura de $\approx 600^{\circ}\text{C}$ y una viscosidad de 10^{11} dPa s comienza el proceso de enfriado y recocido del vidrio, labor que se efectúa en un “*arca de recocido*”, durante el cuál se controlará la temperatura de enfriamiento que si se realizara en atmósfera libre y natural a temperatura ambiente y sin control, dejaría tensiones permanentes en la hoja de vidrio diferentes en sus caras externas y el interior, a causa de la mala conductividad térmica del material, lo que produciría un vidrio de extrema fragilidad y muy sensible a los cambios térmicos, prácticamente inútil para su uso.

Es por consiguiente un proceso delicado que marcará al vidrio para el futuro y determinará muchas de sus propiedades y la buena aptitud para la transformación, corte, pulido de bordes, ...etc. La velocidad de enfriamiento requiere un control muy estricto y es diferente para cada tipo de vidrio y cada espesor de hoja.

Los espesores comerciales de los vidrios base de edificación son:

2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 19 mm

y la dimensión comercial de las hojas de vidrio obtenido por este procedimiento es de $6000 \times 3210\text{mm}$ y, aunque pueden conseguirse dimensiones de mayor longitud previa consulta a los fabricantes, el ancho es una dimensión fija aceptada internacionalmente por necesidades de transporte.

El aspecto del vidrio, ya rígido, a la salida del *arca de recocido* es el de la Fig. 2.6 donde se aprecian las marcas dejadas por los “*top-rollers*” en los bordes del vidrio durante el proceso de ajuste de espesores en el Float.



Fig. 2.6. Hoja de vidrio en la extendería, a la salida del recocido.

Las marcas indicadas se eliminan a la salida de la hoja continua mediante un corte longitudinal automático de los bordes del vidrio bruto en una operación denominada *desbandado*, que debe ser suficientemente ancho para garantizar la eliminación completa de las marcas.

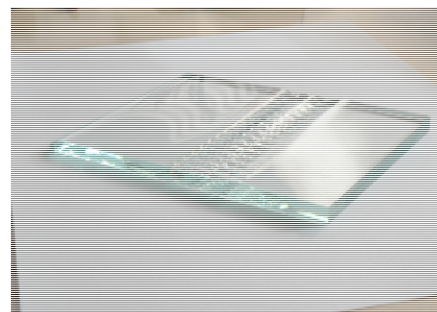


Fig. 2.7. Detalle de las marcas de los “*top rollers*”.

3. ¿Para qué empleamos el vidrio y como entró en la Arquitectura?

Desde que el ser humano se hizo sedentario tuvo que generar abrigos que le protegieran del espacio exterior por lo que podemos definir la Arquitectura, desnudándola de cualquier significación dialéctica y llevada a los extremos más básicos, como *la necesidad de generar espacios para desarrollar la actividad humana*, desde las tiendas de piel de camello del desierto a los igloos de bloques de hielo del Ártico en todos los abrigos se busca una defensa frente a las condiciones climatológicas externas y supuestamente hostiles y luz para desarrollar nuestra actividad.

En esta acotación de espacios existen tres elementos fundamentales:

- *El exterior* dependiente de las condiciones de climatología del lugar sobre el que no existe control pues depende de la situación del asentamiento, fundamentalmente la Latitud y los consiguientes niveles de soleamiento y temperaturas estacionales, régimen de lluvias del lugar y, en general, de las condiciones climatológicas.

- *El interior* en el que se desea mantener las mejores condiciones de estancia y, por consiguiente, exige unos valores de temperatura, iluminación, y abrigo lo más adecuados para la actividad a desarrollar para los variables regímenes climatológicos exteriores.

- *La frontera* entre ambos, a través de la cuál sucederán los intercambios entre los dos anteriores.

En la rama Matemática de la Topología el punto frontera entre dos espacios se define como aquel en cuyo entorno, por pequeño que sea, existen puntos de ambos espacios. Empleando la definición Topológica *la fachada cerramiento, piel* o como queramos definir a lo que cierra nuestros espacios habitables, *es el punto frontera entre exterior e interior* y a través de ella se producirá el intercambio entre ambos y en ese punto es donde se sitúa nuestro vidrio y podríamos resumir las necesidades de protección que debe cubrir en el siguiente esquema.

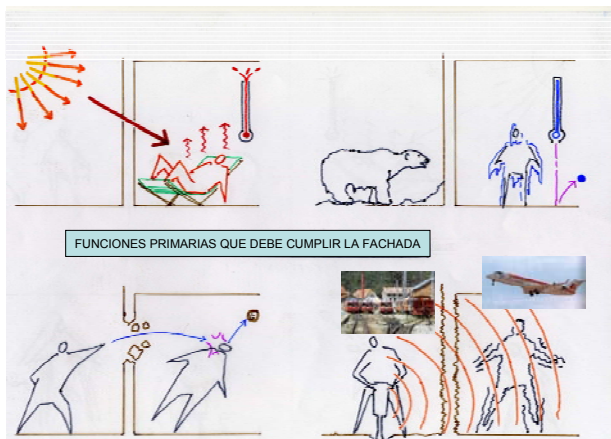


Fig. 3.1. Condiciones mínimas que debe cubrir una fachada

A estas condiciones de defensa térmica, física y acústica, se une otra fundamental, la que dio entrada al vidrio en nuestros cerramientos, *la iluminación*.

En condiciones subtropicales la radiación solar, luz y calor, es alta aún en estaciones frías y, por consiguiente, las necesidades de huecos externos de iluminación son discretas lo que también beneficia la menor transmisión de calor a través de los mismos pero en zonas septentrionales este efecto se invierte de manera que a menos radiación y por tanto menos iluminación se añaden los problemas de una climatología más fría. Esta condición, como veremos más adelante, debe tenerse muy en cuenta en el momento de diseñar los cerramientos.

Y volviendo a la historia del vidrio y su entrada en la Arquitectura, en la Europa de la Alta Edad Media en el Románico los alojamientos humanos pueden calificarse, desde el punto de vista de la iluminación, de lóbregos y cerrados, con iluminación escasa y, en los casos de la Arquitectura civil, casi inexistente y reducida a las puertas de acceso y poco más. La Arquitectura religiosa presentaba un panorama similar, las grandes Catedrales de imponente diseño, por ejemplo Santiago de Compostela, presentan una imagen externa cerrada, de bloque pétreo, y un interior oscuro, diríamos que opresivo y esto ¿por qué? ... ¿por una interpretación anímica del culto o por una imposibilidad técnica?. La respuesta la encontramos en un movimiento de constructores nacido en L' Ile de France en el S. XII donde unos *iluminados* comenzaron a diseñar estructuras donde se diferenciaba "*lo que soportaba y lo que era soportado*", los que diseñaron endriagos como estos para evacuar el agua de sus cubiertas:



Fig. 3.2. Gárgolas de la Basílica de San Quentin (FRANCIA)

y separaron claramente cerramiento de estructura, conduciendo los esfuerzos al cimiento mediante, bóvedas de tracería, arcos fajones, pilares, baquetones y arbotantes, andamiajes en fin, liberando a los muros de su condición de soporte, era EL GÓTICO, una revolución estructural durante el cuál comunidades de canteros y constructores recorrieron Europa dejando detrás su estela

de obras; Chartres, Amiens, Reims, Notrê Dame, León, Burgos, ...y su canto del cisne, Beauvais abriendo al vidrio las fachadas que, liberadas de su compromiso resistente y convertidas en vidrieras artísticas, pudieron aportar a la Arquitectura *la luz*, y a los interiores *el color*.



Fig. 3.3. Imágenes del Gótico

Desde ese momento el vidrio ocupa un espacio propio en el cerramiento, piel, fachada...como queramos llamar al elemento frontera entre interior y exterior en nuestros alojamientos para iluminar y permitir la comunicación visual con el exterior. No obstante su papel, tras el GÓTICO, se subordinaba a cerrar los huecos exteriores asociado inseparablemente a las carpinterías hasta que casi 700 años después, a mediados del S.XIX, otros *iluminados* sucesores del jardinero Le Nôtre, propiciaron una nueva revolución estructural que liberó al vidrio de su papel de relleno.

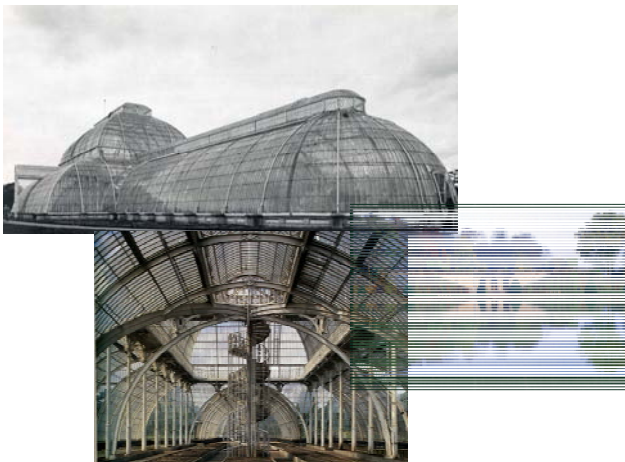


Fig. 3.4. Imágenes de La Casa de la Palmera (Palm House) de Décimus Burton y Richard Turner.

Guiados por la necesidad de crear amplios invernaderos para el cultivo de especies tropicales fueron el origen de otra revolución constructiva, el empleo del hierro en forma de fundición y forja para realizar estructuras muy ligeras y cerrarlas totalmente con vidrio.

Esta innovación pulverizó los *corsés* donde el vidrio se alojaba y fue el germen de su empleo con criterios actuales.

Podríamos considerar Palm House y el Palacio de Cristal posterior, desgraciadamente desaparecido, como padres del uso que el Movimiento Moderno hizo del vidrio y abuelos de nuestras fachadas ligeras .

Con el nacimiento del Movimiento Moderno y la docencia de la Escuela Bauhaus, ya en el S.XX, el vidrio fue elemento primordial en las creaciones de Mies, Le Corbusier, Gropius, Van de Velde ... y tantos más que propagaron los criterios de iluminación, relación visual de interior y exterior, ventilación y espacio libre en los que el vidrio tenía papel preponderante, según los Cinco Puntos de la Arquitectura de la U.I.A.

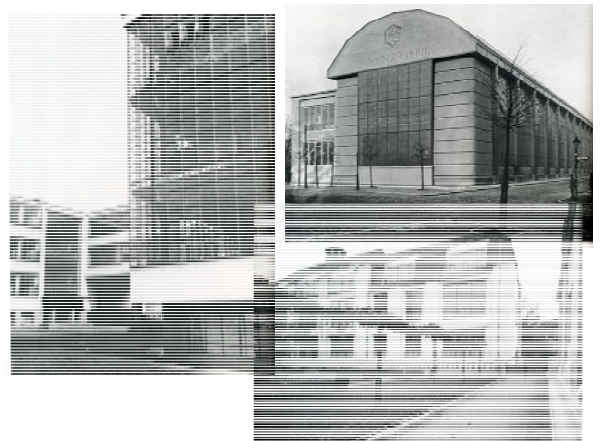


Fig. 3.5. Imágenes del Bauhaus, en Weimar (Van de Velde), Dessau (Walter Gropius), y de la Fábrica de turbinas de AEG (Peter Bherens).

Pero no todo era progresismo y, a pesar de los esfuerzos del Movimiento Moderno, gran parte de la construcción de esa época, incluso los emblemáticos rascacielos de Nueva York; Chrysler, Empire State, Rockefeller Center ... correspondientes al último coletazo en los años treinta del Art Decó americano, se diseñaron con fachadas pétreas y tradicionales carpinterías y vidrio, *canteras colgadas* como las definió Le Corbusier.



Fig. 3.6. Empire State y Rockefeller Center.

Tras la II G.M. la deprimida situación económica de Europa empujó a los profesionales europeos a Estados Unidos donde encontraron posibilidad de desarrollar su trabajo y entre ellos algunos Arquitectos que configuraron el Movimiento Moderno.

Uno de ellos tiene especial significación, primero por haber sido Director de la Escuela Bauhaus y en segundo lugar por haber marcado un hito, un antes y un después, en la Arquitectura de Norteamérica, *Mies van der Rohe*. Como antes hicieron Décimus Burton y Richard Turner con la estructura en la Palm House Mies cambió radicalmente el concepto de cerramiento exterior de edificios de altura retomando su teórico *rascacielos de acero y vidrio* concebido en los años veinte y que nunca se construyó.

La ocasión la encontró en los Apartamentos Lake Drive (Chicago) y fundamentalmente en el Edificio Seagram (Nueva York).



Fig. 3.7. La Idea (Rascacielos de Acero y Vidrio) y la Realidad (Edificio Seagram)

La diferencia fundamentalmente entre este último y los rascacielos del Art Decó (Fig.3.6) es el número de ventanas de cada uno, aquellos tienen miles mientras que el Seagram solo cuatro pues cada fachada es una inmensa ventana de carpintería y vidrio, había nacido el concepto de *fachada ligera* habitualmente llamado muro cortina, denominación no demasiado satisfactoria, anclado a los forjados horizontales de forma flexible.

Considerando que la superficie de carpintería no supera habitualmente el 10 ó 12% de la totalidad del hueco el vidrio se encontró con prácticamente toda la fachada para él, lo que le convertía en el dueño de la piel de este tipo de construcciones pero también le transfería la responsabilidad de cubrir el resto de prestaciones, térmicas, acústicas, de seguridad ...etc. de los cerramientos opacos tradicionales, y todo ello manteniendo su tradicional transparencia.

Por tanto analizar todas las propiedades físicas del vidrio, tanto térmicas como mecánicas, se hizo imprescindible para obtener resultados óptimos en sus nuevas aplicaciones.

Hitos fundamentales en la investigación que nos conduciría al conocimiento científico del vidrio y sus propiedades fueron:

- Creación de la empresa *Jenaer Glaswerk und Genossen* (Jena,1884) por los científicos Otto Schott, Ernst Abbe y Carl Zeiss.
- Fundación de *American Ceramic Society* (Estados Unidos, 1899).
- Fundación de *Society of Glass Technology* (Gran Bretaña, 1917)
- Fundación de *Deutsche Glastechnische Gesellschaft* (Alemania, 1922).
- Creación de la *International Commission on Glass*, por iniciativa de W.E.S.Turner (principio de los años treinta).

3.2. Propiedades Térmicas del Vidrio Incoloro.

El Sol proporciona calor y luz y todo cuerpo, situado en la superficie terrestre, está sometido a su acción. La energía solar se transmite por radiaciones, directas o difusas, cuyas longitudes de onda dependen de la temperatura de la *fotosfera*, corteza solar externa, que es de 6000°C.

Esa radiación, filtrada por nuestra atmósfera, llega a la superficie terrestre con el siguiente espectro:

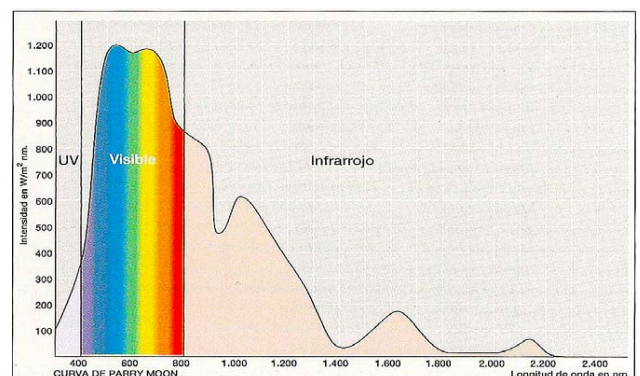


Fig. 3.8. Curva de Parry Moon

y en las siguientes proporciones para cada longitud de onda:

Tabla 3.1

Tipo de Radiación	Longitud de Onda (λ)	T% que llega
Ultravioleta (UV)	300-380 nm	5%
Luz Visible (LV)	380-750 nm	50%
Infrarrojo Solar (IR)	750-2400 nm	45%

Todo cuerpo transparente sometido a radiación se comporta, de forma general, de acuerdo al siguiente esquema:

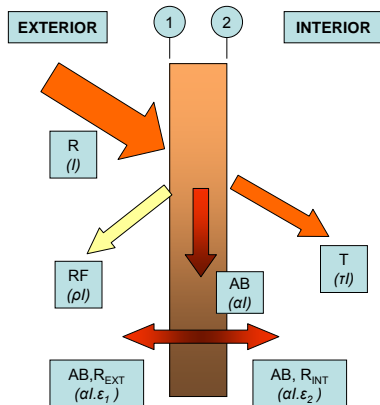


Fig. 3.9. Esquema genérico del mecanismo de Radiación.

Donde:

$R(I)$; Radiación externa recibida.

$RF(\rho I)$, Radiación Reflejada hacia el Exterior.

$AB(\alpha I)$, Radiación Absorbida por el cuerpo, que produce una elevación de su temperatura.

$T(\tau I)$, Radiación transmitida al interior.

RE_{ext} , y RE_{int} , Radiaciones del cuerpo hacia el exterior y el interior, inducidas por su calentamiento, $f[AB;(\alpha I)]$ y de la Emisividad de sus caras $f(\epsilon_j)$.

Este tráfico de radiaciones se produce respetando las siguientes relaciones fundamentales:

$$R = RF + AB + T; [I = (\rho I) + (\alpha I) + (\tau I)]$$

$$\lambda(R) \rightarrow f[\text{Temperatura del radiador externo, Sol}].$$

$$\lambda(R_{EXT}; R_{INT}) \rightarrow f[\text{Temperatura del cuerpo radiante}].$$

El esquema anterior, particularizado para un vidrio en cada intervalo de longitud de onda, UV (Ultravioleta), LV (Luz Visible) e IR (Infrarrojo Solar) es el siguiente:

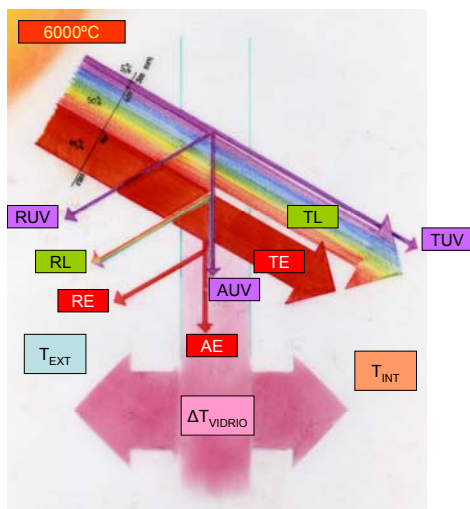


Fig. 3.10. Esquema del tráfico de la Radiación Solar en un vidrio.

Llamamos Factor Solar (g) a la proporción entre la Radiación Total recibida en el Exterior (R) y el sumatorio de la Radiación Total directa Transmitida (T) más la Absorbida y Reenviada al interior (RE_{INT}), y (Fig. 3.9):

$$g = (\Sigma[T] + RE_{INT}) / \Sigma[R]$$

y nos indica el nivel de transparencia del vidrio frente a la radiación solar recibida.

Por otra parte, respondiendo a los principios de Termodinámica entre dos zonas a diferente temperatura separadas por una lámina de material homogéneo se producirá un flujo de calor, a través de esta, de la más caliente a la más fría tendente a igualar temperaturas para estabilizar el sistema.

La permeabilidad de la lámina al calor es una característica del material que la compone y de su espesor y determinará la mayor o menor velocidad del flujo a su través y por tanto su mayor o menor capacidad de aislamiento entre ambos espacios. A este valor se denomina Transmitancia Térmica (U) y su expresión general, para una lámina de material uniforme, es:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{e}{(\lambda)} + \frac{1}{h_i}}$$

Por otra parte la lámina, en este tráfico de calor, aumentará su temperatura y en función de su capacidad de radiación lo cederá por sus dos caras de acuerdo a su Emisividad (ϵ) que es el parámetro superficial de los materiales que mide su facilidad para ceder, por radiación, el calor acumulado.

Para el vidrio la definición de cada parámetro, su dependencia y uds. en el S.I. se presentan en la Tabla 3.2, y el esquema del flujo en la Fig. 3.11:

Tabla 3.2

Definición	Parámetro	Función de:
Coefficiente de Intercambio Superficial Exterior ($W. m^{-2}. K^{-1}$)	h_e^*	Velocidad del viento en el Exterior (V_v)
Temperatura Exterior ($^{\circ}K$)	T_{EXT}^*	Climatología.
Coefficiente de Conductividad Térmica del Vidrio ($W. m^{-1}. K^{-1}$)	(λ)	Propiedad Física del Vidrio.
Emisividad (s.ud.)	ϵ	Propiedad Física del Vidrio.
Temperatura Interior ($^{\circ}K$)	T_{INT}	Valor de Acondicionamiento.
Coefficiente de Intercambio Superficial Interior ($W. m^{-2}. K^{-1}$)	h_i	Convección Interior dependiente del sistema de Calefacción
Espesor de la lámina (m)	e	Dimensión

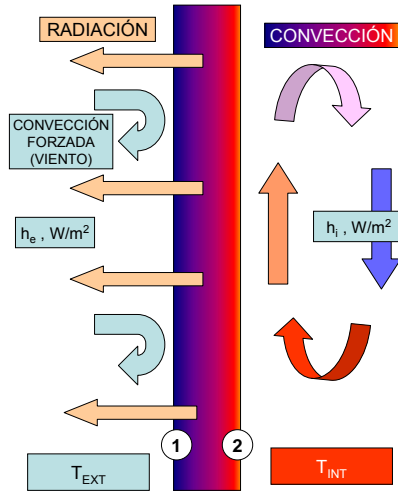


Fig. 3.11. Flujo del Calor a través de un vidrio sin participación de la Radiación Solar.

De los Parámetros de la Tabla 3.2 los señalados (*) son variables y dependen del momento del día, la intensidad de Radiación Solar y la Velocidad del Viento, por lo que en períodos muy cortos, a lo largo de un mismo día, pueden oscilar en intervalos muy abiertos.

El resto son fijos pues corresponden a valores físicos del material y a condiciones de la construcción.

El valor medio del Coeficiente de Conductividad Térmica del vidrio es aproximadamente de $0.85 \leq (\lambda) \leq 1.00$ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$).

La Emisividad (ϵ) es el parámetro superficial de los materiales que, como ya hemos dicho, mide su facilidad para ceder por radiación el calor acumulado y su valor, para el vidrio plano incoloro, es igual para ambas caras y de valor, $\epsilon = 0.89$.

Las unidades de U son, en el S.I., W, m y $^{\circ}K$ por lo que para el vidrio monolítico el valor de $e/(\lambda)$ es totalmente irrelevante pues su rango es de 10^{-2} a 10^{-3} , para el espesor de vidrios comerciales monolíticos, y las pérdidas a su través dependerán solo del intercambio superficial interior (h_i), exterior (h_e) y de su emisividad (ϵ).

Para valorar el efecto del viento sobre las pérdidas de calor a través del vidrio se ha estimado la variación del valor del Coeficiente de Intercambio Superficial Exterior (h_e) y de la Transmitancia Térmica (U) para las siguientes condiciones exteriores de partida:

Definición	Parámetro	Valor
Temperatura Exterior	T_{EXT}	$-2^{\circ}C$
Temperatura Interior	T_{INT}	$22^{\circ}C$
Coeficiente de Intercambio superficial Interior	h_i	$8 W/m^2K$

Se han considerado también ausencia de radiación solar y cielo nublado, condiciones climatológicas que pueden calificarse de moderadamente frías.

El valor de las velocidades de viento (V_e) se ha tomado en Grados de la Escala Marítima Beaufort, por ser una referencia habitual y práctica, hasta un valor medio (G.6).

El cálculo se ha desarrollado con el Programa *Visión 4.0 incluido en el FRAME plus 5.0* de la Universidad de WATERLOO (Ontario) para análisis térmico de acristalamientos.

Tabla 3.3

Viento		Resultados	
Grado (G)	Velocidad $m \cdot s^{-1}$ ($km \cdot h^{-1}$)	h_e ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	U ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
0	0-0'6 (0-2)	12'27	6'85
1	0'8-1'40 (3-5)	12'27	6'85
2	1'7-3'1 (6-11)	12'27-16	7'40
3	3.3-5'6 (12-20)	16'62-22'30	8'15
4	5'8-8'1 (21-29)	23'3-28'6	8'60
5	8'3-10'8 (30-39)	29'0-34'1	8'92
6	11'1-13'9 (40-50)	34'6-39'7	9'19

Con el examen de la Tabla anterior se comprueba que una variación en la velocidad de viento exterior desde G2, (*brisa suave*) a G6 (*viento fresco*) incrementa las pérdidas teóricas, a través del vidrio monolítico, un 24%, lo que indica la amplia variabilidad del proceso.

Si ahora incorporamos al conjunto la radiación solar, con un valor cualquiera, el comportamiento genérico del mismo sería el presentado en la Fig. 3.12.

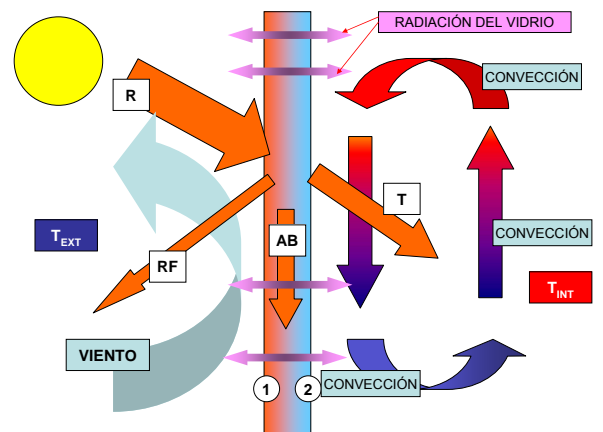


Fig. 3.12. Flujo Total de Energía a través de un vidrio.

La suma de todas las ganancias y pérdidas a través del vidrio es el Balance Energético (B.E.) y nos proporciona la cantidad de energía a aportar (calefacción) o a eliminar (refrigeración) de nuestra estancia para mantener un buen nivel de confort.

Los B.E. no son ecuaciones matemáticas con solución exacta y única pues como vemos se rigen por un proceso físico en régimen variable dependiente de valores climatológicos aleatorios y accidentales, Temperaturas Exteriores, Radiación Solar, Nubosidad, y Velocidades de Viento que varían, a lo largo del día, en un entorno muy abierto.

Las variables sobre las que tenemos control son las siguientes:

- Características Físicas de los vidrios que determinan los valores del Factor Solar (g) y la Transmitancia Térmica (U). Sobre esta última al depender de h_c y por tanto de la velocidad del viento V_v el control es relativo.

- Tipo de (calefacción/ refrigeración) que deseamos instalar lo que determinará el Coeficiente de Convección Interior (h_i) y por tanto la velocidad y cantidad de calor que llegará al vidrio.

Las variables aleatorias son, como ya hemos indicado anteriormente:

- Temperatura exterior (T_{EXT}), variable según la estación y durante todo el día. Existen Tablas de valores medios por estación y situación geográfica.

- Radiación Solar, directa y difusa (R) cuya variación es estacional según Latitud del lugar, de la que existen Tablas de Radiación Estacionales, y Nubosidad que altera directamente la Radiación Solar reduciendo su efecto directo e incrementando la Radiación difusa, varía de forma aleatoria a lo largo del día y según las estaciones y de ambos parámetros depende directamente la energía que recibe el vidrio del Sol.

- Velocidad del Viento (V_v), absolutamente variable y dependiente de valores atmosféricos y estacionales, así como de la altura a la que se encuentra instalado el vidrio, la forma de la edificación y las posibles sombras eólicas o efectos de ráfaga inducidos por edificios próximos.

Acudiendo a términos estructurales podríamos decir que nos encontramos frente a un problema *hipoestático* con más datos de los necesarios (grado < 0).

Al valor del B.E., que determinará la cantidad de energía a aportar o eliminar del interior para mantener una temperatura de confort, se debe añadir el efecto de calentamiento o enfriamiento del vidrio cuya cara interior (2) está en contacto con nuestro espacio habitable. Determinemos para el vidrio de silicato sodocálcico, incoloro, monolítico, de 6mm que estamos empleando como patrón la temperatura de cara interna (2) para las condiciones de uso estacionales siguientes:

Parámetros	Verano (día)	Invierno (Noche)
Temperatura exterior	36°C	-2°C
Radiación	740W.m ⁻¹	0W.m ⁻¹
Nubosidad	Despejado	Cubierto
Velocidad de viento	1m.s ⁻¹	11m.s ⁻¹

En condiciones de Radiación Solar alta, en día despejado, y sin apenas viento el vidrio, a pesar de tener una Absorción Energética (15%) bastante baja, alcanza una temperatura de 34°C convirtiéndose en un radiador hacia el interior e incrementando de forma indeseable la carga térmica de la estancia lo que exige por tanto mayor refrigeración para mantener la T_{INT} en torno de los 24°C.

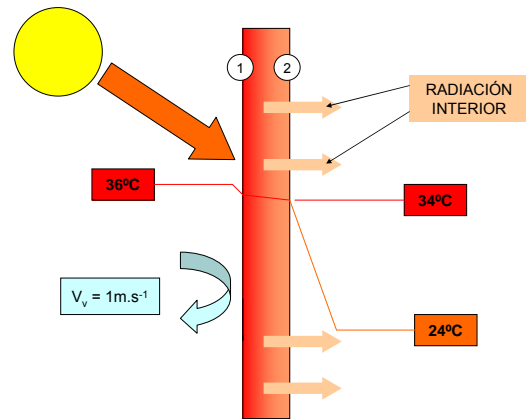


Fig. 3.13. Temperaturas de cara interna (VERANO).

Para condiciones de temperatura bajas en el exterior, en ausencia absoluta de Radiación Solar y viento medio el vidrio no pasará de 5°C y aparecerá una zona de ambiente frío en contacto con su cara interna (*efecto de pared fría*) que produce un área de incomodidad en las proximidades del acristalamiento, además de tener pérdidas elevadas de calor pues su Transmitancia Térmica es muy alta ($U=9,2W.m^{-2}.K^{-1}$).

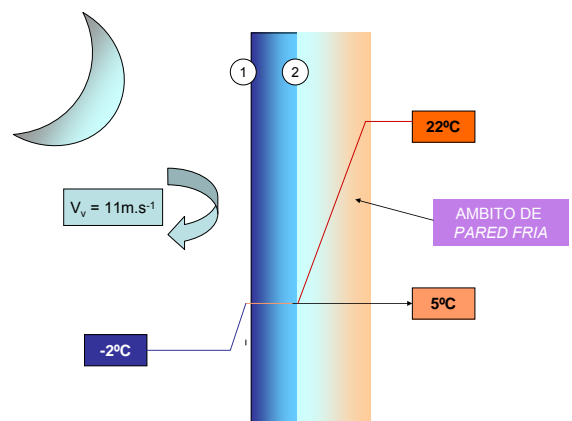


Fig. 3.14. Temperaturas de cara interna (INVIERNO)

De los resultados obtenidos se deduce que cuanto más cercana sea la temperatura interior del vidrio, cara (2), a la T_{INT} de confort en la estancia mejor comportamiento térmico tendrá el acristalamiento y menores serán los consumos de acondicionamiento, pero el vidrio incoloro por sí mismo no alcanza los parámetros físicos necesarios y fue necesaria su evolución.

3.3. Evolución del vidrio. Vidrios de prestaciones mejoradas.

Recapitulando lo visto en el Apartado anterior, los acristalamientos del Movimiento Moderno, el Art Decó de los años treinta e incluso los primeros rascacielos de fachada ligera en la década de los cincuenta contaban, solo, con vidrio plano incoloro obtenido por procedimientos de estirado o por laminado continuo y pulido.

Para los parámetros fundamentales de comportamiento de cualquier vidrio frente a la Radiación Solar y la Transmisión de Calor se empleará la siguiente nomenclatura en cada tramo de longitud de onda λ :

Tabla 3.4.

Parámetros	UV	LV	IR
Transmisión	T_{UV}	TL	TE
Reflexión Exterior	---	RL_{EXT}	RE_{EXT}
Reflexión Interior	---	$RL_{INT}^{(1)}$	$RE_{INT}^{(1)}$
Absorción	---	---	AE
Factor Solar	g		
Transmitancia Térmica	U		

Notas: (UV); Radiación Ultravioleta, ($300 \leq \lambda \leq 380$)nm
 (LV); Luz Visible, ($380 < \lambda \leq 750$)nm
 (IR); Infrarrojo Solar, ($750 < \lambda \leq 2400$)nm
⁽¹⁾; la RE_{INT} y RL_{INT} no participan en la ecuación general de compatibilidad de la Radiación Solar $RD = T + RF + AB$.

Los valores teóricos de estos parámetros se determinan en Laboratorio de acuerdo a las prescripciones de la Norma EN 410:2011. *Vidrio para la edificación. Determinación de las características luminosas y solares de los acristalamientos.*

Los parámetros para un vidrio se silicato sodocálcico incoloro de 6mm (el espesor no es demasiado relevante para ellos), son los siguientes:

Tabla 3.5.

Parámetros	UV	LV	IR
Transmisión	T_{UV} : 53%	TL : 89%	TE : 79%
Reflexión Exterior	---	RL_{EXT} : 8%	RE_{EXT} : 7%
Reflexión Interior	---	$RL_{INT}^{(1)}$: 8%	$RE_{INT}^{(1)}$: 7%
Absorción	---	---	AE : 14%
Factor Solar	g : 0'82		
Transmitancia Térmica	U : 5'7 W.m ⁻² . K ⁻¹ (¹)		

NOTA: ⁽¹⁾ Se debe recordar aquí, y no olvidarlo en siguientes ocasiones, que el valor de U depende directamente del intercambio térmico superficial exterior, que es función a su vez de la velocidad de viento ($h_c \rightarrow f[V_v]$); el valor de (U) de la Tabla es por consiguiente relativo y comparable con el de otros vidrios ensayados de acuerdo a la Norma EN-410:2011 pero no absoluto y por tanto su fiabilidad solo es fiable para vidrios ensayados en las mismas condiciones.

Las prestaciones de este vidrio son muy buenas en el rango de la luz visible (TL:89%) pero realmente escasas en cuanto a protección térmica tanto para la Radiación Solar (TE:79% y g:0'82) como para la Transmitancia Térmica teórica (U: 5'70W.m⁻².K⁻¹).

Esta circunstancia perjudicaba el uso del vidrio incoloro para fines que no fueran los de iluminación y forzaba al empleo de elementos complementarios para reducir la radiación directa solar, interponiendo una hoja de cualquier material que no fuera transparente, entre la Radiación Solar directa y el acristalamiento. Los toldos o la tradicional persiana han sido de uso habitual en climas subtropicales, también los vuelos horizontales o marquesinas, que no reducen la visión pero arrojan sombras sobre el acristalamiento, cumplen la misma función y la inclinación de los vidrios hacia el exterior disminuye el ángulo de incidencia de los rayos solares reduciendo su intensidad de radiación.

Pero estas medidas eran válidas, y aún lo son bien utilizadas, para huecos de dimensiones habituales hasta la llegada de las ventanas-fachada (Edificio Seagran) en las que su aplicación resultaba imposible. Podemos imaginar el Rockefeller Center o el Empire State con toldos en sus ventanas pero sería cómico asociar su uso al Seagran.



Fig. 3.15. Edificio Seagran con protección solar.

Se desarrollaron así vidrios que fueran más eficientes para Control Solar y Aislamiento Térmico sin alterar sustancialmente sus propiedades luminosas obteniendo las siguientes familias:

Propiedades	Tipo de vidrio
Control Solar	Absorbente (V.C.M.)
	Reflectante Pirofítico (V.C.)
	Reflectante Magnetrónico (V.C.)
Aislamiento Térmico	Bajos Emisivos Pirofíticos (V.C.)
	Bajos Emisivos Magnetrónicos (V.C.)
Control Solar + Aislamiento Térmico	Reflectantes Magnetrónicos con Baja Emisividad (V.C.)

NOTAS: (VCM) corresponde a vidrios de color en masa.
 (VC) son vidrios con capas aplicadas en una de sus caras.

3.3.1.- Vidrios absorbentes.

Considerando la relación fundamental del tráfico de la Radiación de Energía Solar a través de un vidrio:

$$R = RF + A + T$$

Y por tanto:

$$T = R - (A + RF)$$

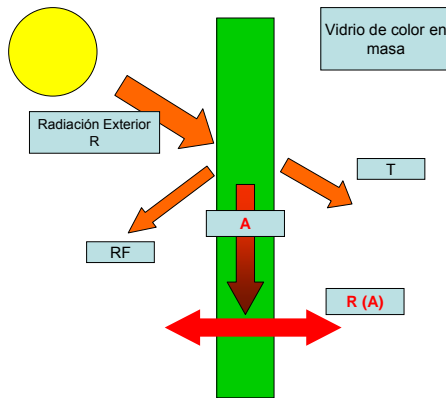


Fig. 3.17. Esquema de flujos de radiación

Incrementar la absorción (A) conduce a disminuir la transmisión (T) si se conserva la reflexión (RF), lo que se consiguió desarrollando vidrios de color en masa, verde, gris y bronce, partiendo de composiciones de vidrio tradicional e incorporando [1]:

- Iones ferrosos (Fe^{2+}) para el color Verde.
- Óxido de Cobalto y óxido ferroso para el Gris.
- Selenio e iones ferrosos (Fe^{2+}) para el Bronce.

El incremento de la absorción (AE) tiene un resultado secundario que es el aumento de temperatura del vidrio sometido a radiación y por tanto el aumento de la parte de absorción reenviada al interior por radiación del vidrio caliente, R(A). Este efecto debe valorarse con cuidado pues la reducción de carga térmica obtenida en el instante de la radiación se pierde por la emisión de calor, durante las horas siguientes a la radiación, del vidrio caliente hacia el interior.

El efecto será particularmente molesto en climas templados con gradientes de temperatura reducidos entre el día y la noche y beneficioso en climas de meseta, con gradiente importante, en los que el vidrio puede ejercer el efecto de radiador gratuito hacia el interior en la noche.

Los valores característicos de cada vidrio se pueden encontrar en las Tablas facilitadas por los fabricantes para cada espesor y color aunque aquí presentamos los correspondientes al vidrio verde de 6 y 10mm para comparar sus valores con el incoloro ya conocido.

Tabla 3.6.

Vidrio verde (VCM) 6mm			
Parámetros	UV	LV	IR
Transmisión	$T_{UV} : 18\%$	$TL : 73\%$	$TE : 43\%$
Reflexión Exterior	---	$RL_{EXT} : 7\%$	$RE_{EXT} : 5\%$
Reflexión Interior	---	$RL_{INT} : 7\%$	$RE_{INT} : 5\%$
Absorción	---	---	$AE : 51\%$
Factor Solar	$g : 0'57$		
Transmitancia Térmica	$U : 5'7 W.m^{-2}.K^{-1}$		

Tabla 3.7.

Vidrio verde (VCM) 10mm			
Parámetros	UV	LV	IR
Transmisión	$T_{UV} : 9\%$	$TL : 63\%$	$TE : 31\%$
Reflexión Exterior	---	$RL_{EXT} : 6\%$	$RE_{EXT} : 5\%$
Reflexión Interior	---	$RL_{INT} : 6\%$	$RE_{INT} : 5\%$
Absorción	---	---	$AE : 64\%$
Factor Solar	$g : 0'48$		
Transmitancia Térmica	$U : 5'6 W.m^{-2}.K^{-1}$		

Estos vidrios mantienen una transmisión luminosa alta en t%, pero por efecto de su coloración la luz transmitida sufre alteraciones significativas en su espectro y deformará los colores en el interior, debe tenerse en cuenta. Analizando ambos vidrios para las condiciones empleadas para el vidrio incoloro las temperaturas de cara interna (2) dan los siguientes valores:

Parámetros	Verano (día)	Invierno (Noche)
Temperatura exterior	36°C	-2°C
Radiación	740W.m ⁻¹	0W.m ⁻¹
Nubosidad	Despejado	Cubierto
Velocidad de viento	1m.s ⁻¹	11m.s ⁻¹

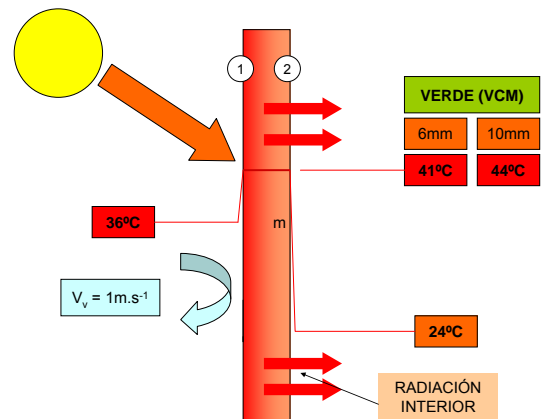


Fig. 3.18. Temperaturas en régimen cálido.
Vidrio verde (VCM) de 6 y 10mm

Temperaturas de 41°C y 44°C se aproximan a las de un radiador tradicional de calefacción por agua caliente, y superan a los 36°C del exterior.

En régimen de frío, con radiación nula, se obtienen prácticamente los mismos resultados que para el vidrio incoloro.

El uso de vidrios de color en masa debe ir acompañado, por tanto, de un estudio cuidadoso de los efectos de rebote de calor o emplearlos en posición externa con cámara ventilada para aprovechar su factor solar (g) y evitar el calentamiento exterior. Ejemplos son las fachadas de doble piel o las de pantalla.



Fig. 3.19. Edificio del BBVA (AZCA) Fco. Javier Saenz de Oiza

3.3.2.- Vidrios de capas.

Tras los vidrios de color en masa (VCM), que modificaban la absorción energética la investigación se centró en la reflexión. Conocida es desde muy antiguo la capacidad de reflejo de los espejos pero el espejo, con azogado ordinario, refleja tanto la luz como la radiación infrarroja solar; basta recordar que Arquímedes de Siracusa diseñó espejos curvos con los que incendiaba las velas de los navíos romanos que sitiaban su ciudad y en la actualidad, aunque bien es verdad que con poco éxito, se intentan comercializar *cocinas solares campestres* que consisten simplemente en un espejo parabólico en cuyo foco se sitúa el recipiente para cocinar.

Ahora bien el espejo ordinario es opaco, lo que contradice la primera y fundamental propiedad que debe satisfacer un vidrio de fachada, la iluminación, y por tanto inútil para nuestros fines pero ¿es opaco por el tratamiento que recibe o por el espesor de ese tratamiento?.

Planteado de otra manera, un metal, similar a los empleados en la fabricación del espejo tradicional ¿podría llegar a ser transparente?. El espesor de tratamiento de un espejo se mide en micras (μm) y con ese espesor no permite el paso de la luz pero ¿si la capa pudiera reducir su espesor a dimensiones nanométricas (nm) mil veces menor que la anterior, es decir en el campo de las radiaciones que el vidrio recibe, seguiría siendo opaca?.

En geología es habitual preparar muestras de minerales para su estudio con microscopía óptica por *transmisión* por lo que deben tener transparencia, en términos coloquiales de un adoquín, absolutamente opaco, se puede preparar una muestra transparente de granito y recordemos que los romanos colocaban en sus huecos exteriores placas muy finas de alabastro que era, por lo menos, translúcido y Mies van der Rohe (siempre Mies ...) empleó alabastro en algunas de sus obras para transmitir iluminación tamizada al interior.

Estos razonamientos llevaron a la técnica de deposición de capas superficiales de muy bajo espesor en los vidrios y al nacimiento así de los *espejos energéticos* como bien podríamos llamar a los vidrios de capas.

Sus procesos de fabricación siguieron dos vías:

- Fabricación en caliente (Pirólítica), la más antigua, depositando agentes reactivos sobre el vidrio a su salida del baño (600°C) inmediatamente antes de entrar en el arca de recocido.

- En frío por un proceso magnetrónico mediante el cual se *bombardea* al vidrio, en una cámara de alto vacío, con partículas metálicas procedente de un cátodo metálico que según el gas empleado en la fabricación (gas noble inerte, oxígeno o nitrógeno) llegan al vidrio en forma de metales puros, óxidos o nitruros respectivamente. Esta técnica se debe a la investigación en el campo de la informática para fabricar circuitos para ordenadores sobre láminas de vidrio, con conductores metálicos.

Prácticamente todos los vidrios del mercado destinados al acondicionamiento térmico se fabrican con pocas variaciones, por estos procedimientos, ya sea para protección solar o para aislamiento (Baja Emisividad).

Las capas se clasifican, según su resistencia a la degradación, de acuerdo a la Norma EN-1096: Parte 1 en las siguientes Clases:

Clase	Uso en acristalamiento	Colocación de la capa
A	Monolítico U.V.A. ó	Exterior o Interior, indistintamente
B	Laminado	Solo en el interior
C	U.V.A. ó Laminado	Conveniente en contacto con el intercalario
D	U.V.A., solamente	En el interior de la cámara, desbandando los bordes de la capa para realizar el sellado de estanquidad sobre vidrio base.

Además de estas Clases existe una última S, para uso específico en escaparates de almacenes y utilizable con la capa al interior o el exterior pero cuya esperanza de vida es baja y por consiguiente no es recomendable su uso en edificación habitual

- Capas de fabricación pirolítica.

El principio de fabricación consiste en proyectar el agente reactivo sobre el vidrio, que puede ser incoloro o coloreado en masa, a 600°C, con lo que se produce una reacción del agente portador con la temperatura del vidrio quedando sobre el mismo la capa del elemento a depositar firmemente adherida por ser un proceso térmico.

Los agentes reactivos que se depositan sobre el vidrio pueden ser [3]:

- 1.- Gas Silano (SiH₄) para depositar sílice, o disoluciones líquidas de metales (Cr, Ni, Co, Fe) para fabricar vidrios de Protección Solar con (g) mejorada.
- 2.- Disoluciones sólidas de SnO₂, en partículas de 5nm (50A^o) para producir los vidrios de Baja Emisividad.

Las capas así obtenidas son de Clase A ó B para las capas metálicas y B para las no metálicas (sílice) y sus principales limitaciones son el espesor de fabricación, pues solo se elaboran en 6mm, y la lentitud del proceso de obtención. También el hecho de fabricarse junto con el vidrio base durante el enfriamiento y no en fase posterior sobre vidrio frío, limita la logística de su producción y almacenamiento.

Por otra parte tiene buena transmisión luminosa (TL) y baja absorción energética (AE) para un factor solar (g) algo mayor que el verde de 6mm, pero su reflexión luminosa exterior (RL_{EXT}) es alta, casi triple que la de un incoloro, por lo que condiciona el diseño y puede producir deslumbramientos indeseables en su entorno según la orientación.

Está considerado de algún modo como un vidrio *demodé* pero aún sigue en producción, en ocasiones como primario de otro acristalamiento de uso más específico como es el caso del tipo de Baja Emisividad empleado como vidrio base para su transformación en puertas de hornos domésticos. Las características técnicas medias de estos vidrios, sobre base incolora, son las de la Tabla adjunta, aunque también se puede disponer de más datos en los catálogos de los fabricantes.

Tabla 3.8.

Pirolítico PLATA			
Parámetros	UV	LV	IR
Transmisión	T _{UV} : 32%	TL : 66%	TE : 63%
Reflexión Exterior	---	RL _{EXT} : 29%	RE _{EXT} : 25%
Reflexión Interior	---	RL _{INT} : 31%	RE _{INT} : 21%
Absorción	---	---	AE : 16%
Factor Solar			g : 0'66
Transmitancia Térmica	U : 5'7 W.m ⁻² . K ⁻¹		

Tabla 3.9.

Pirolítico CLARO-INCOLORO			
Parámetros	UV	LV	IR
Transmisión	T _{UV} : 19%	TL : 45%	TE : 50%
Reflexión Exterior	---	RL _{EXT} : 32%	RE _{EXT} : 25%
Reflexión Interior	---	RL _{INT} : 26%	RE _{INT} : 19%
Absorción	---	---	AE : 25%
Factor Solar			g : 0'56
Transmitancia Térmica	U : 5'6 W.m ⁻² . K ⁻¹		

- Capas de fabricación magnetronica.

Su principio es análogo, depositar sobre la superficie de un vidrio,, en atmósfera de vacío, una capa que en este caso es siempre metálica, que confiere al vidrio determinadas propiedades de filtro de radiaciones y aislamiento.

La fabricación se realiza sobre vidrios *fríos* y de reciente fabricación, *friscos* según el argot del vidriero, para que su superficie se encuentre en el mejor estado posible y libre de adherencias y suciedad. Algunos vidrieros instalan estas líneas de fabricación a continuación de los hornos de producción de vidrio base evitando de este modo al máximo el transporte y manipulación del vidrio antes de la deposición de las capas.

El abanico de metales empleados en las capas es muy amplio, Au, Ag, Cr, Ni, Ti, Zn, Cu, acero inoxidable, ...y sus óxidos o nitruros lo que diversifica mucho los tipos de vidrios obtenidos. En resumen se busca dotar al vidrio base de *filtros* de radiación para diferentes longitudes de onda y obtener así diferentes niveles de protección. El vidrio resultante es de Clase B ó C.

Las capas genéricas de un vidrio magnetronico de protección solar y su comportamiento térmico, independientemente de los metales específicos empleados en su fabricación, son los siguientes:

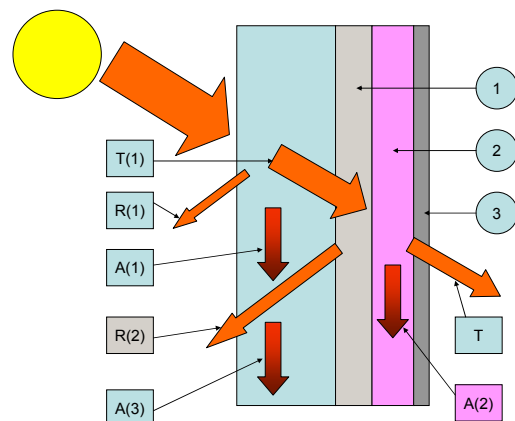


Fig.3.20. Esquema de un vidrio de capa

En la Fig. 3.20. la función general de cada capa es :

- 1: Reflexión.
- 2: Absorción.
- 3: Protección de las anteriores.

El tráfico de la radiación a través del vidrio se presenta con bastante claridad en el esquema:

- T(1), R(1) y A(1) son, respectivamente Transmisión, Reflexión y Absorción primarias del vidrio base.
- R(2), Reflexión debida a la capa reflectante.
- A(2), Absorción debida a la capa absorbente.
- A(3), Absorción del vidrio base debida a la reflexión de capa R(2).
- T, Transmisión final.
- $\sum [A(1) + A(2) + A(3)]$, Absorción total.

Como se puede comprobar el vidrio de capa de este tipo dispone de varios filtros para la radiación pero esta, al atravesar dos veces al vidrio base incrementa la absorción por lo que el empleo de vidrios de color en masa puede llevar al vidrio, en casos extremos por ejemplo con vidrio de color en masa y capa de alta protección, a valores de absorción total de AE:80%, valor que lleva aparejada una transmisión luminosa baja o muy baja (TL: 7%) y los riesgos descritos en el Apdo. 4: *Comportamiento mecánico del vidrio*.

La disposición y función de cada capa indica que el vidrio de capa magnetronica tiene *posición determinada, siempre con la cara tratada hacia el interior, en la cara (2) del acristalamiento, generalizando en "cara par" si la U.V.A. tiene más de una cámara aunque no es frecuente*. Si su colocación se invierte la primera capa que la radiación encuentra es la absorbente lo que desbarata todo el esquema y reduce su protección solar en casi un 60%, incrementando además su calentamiento.

Cuando se trata de obtener vidrios aislantes, los llamados de Baja Emisidad o *LowE*, el número de capas de fabricación es mucho mayor, en ocasiones más de siete, una de las cuales es de Ag por lo que el vidrio obtenido es muy sensible a la oxidación y pertenece a la Clase D, siempre deberá ensamblarse en una unidad de vidrio aislante U.V.A. y desbordearlo para garantizar su durabilidad. Su transmisión luminosa es muy elevada y el aspecto externo es casi el de un vidrio sin tratamiento.

Los vidrios de B.E. deben colocarse en cualquier cara interior de una U.V.A., caras (2) ó (3) pero siempre con la capa en contacto con el aire o gas de la cámara pues si se laminara contra otro vidrio con la capa en contacto con el intercalario (PVB) transmitiría calor por Conducción perdiendo su capacidad de aislamiento. Las Emisividades oscilan entre valores de $0'1 \leq \epsilon \leq 0'02$.

La versatilidad en la producción de vidrios de capa permitió aunar en una sola capa las propiedades de Control Solar y Baja Emisividad generando la familia de vidrios *selectivos*, según nomenclatura de los fabricantes, que garantizan una buena protección solar y un alto aislamiento térmico. Pertenecen también a la Clase D o ,como mucho, a la C ensamblándose habitualmente en unidades U.V.A. La capa, por su carácter de Protección Solar, debe ser colocarse siempre en cámara y orientada hacia el interior, cara (2).

Los vidrios de capa magnetronica se denominan de forma habitual por su Factor de Eficacia, relación (TL/g), luego un 60/40 sería un vidrio con TL: 60% y Factor Solar 0'40. Adjuntamos Tablas con los valores de algunos de base incolora y de color, de 6mm, y con diferentes niveles de protección solar, sin B.E.

Tabla 3.10.

Magnetronico INCOLORO (Protección Solar Alta/ 20)			
Parámetros	UV	LV	IR
Transmisión	T _{UV} : 15%	TL : 20%	TE : 17%
Reflexión Exterior	---	RL _{EXT} : 32%	RE _{EXT} : 26%
Reflexión Interior	---	RL _{INT} : 27%	RE _{INT} : 32%
Absorción	---	---	AE : 57%
Factor Solar			g : 0'30
Transmitancia Térmica	U : 5'2 W.m ⁻² . K ⁻¹		

Tabla 3.11.

Magnetronico INCOLORO (Protección Solar Baja/50)			
Parámetros	UV	LV	IR
Transmisión	T _{UV} : 29%	TL : 51%	TE : 45%
Reflexión Exterior	---	RL _{EXT} : 18%	RE _{EXT} : 14%
Reflexión Interior	---	RL _{INT} : 17%	RE _{INT} : 17%
Absorción	---	---	AE : 40%
Factor Solar			g : 0'56
Transmitancia Térmica	U : 5'7 W.m ⁻² . K ⁻¹		

Tabla 3.12.

Magnetronico VERDE (Protección Solar Alta/ 20)			
Parámetros	UV	LV	IR
Transmisión	T _{UV} : 5%	TL : 16%	TE : 1%
Reflexión Exterior	---	RL _{EXT} : 23%	RE _{EXT} : 13%
Reflexión Interior	---	RL _{INT} : 27%	RE _{INT} : 32%
Absorción	---	---	AE : 77%
Factor Solar			g : 0'28
Transmitancia Térmica	U : 5'2 W.m ⁻² . K ⁻¹		

Tabla 3.13.

Magnetronico VERDE (Protección Solar Baja/50)			
Parámetros	UV	LV	IR
Transmisión	T _{UV} : 10%	TL : 42%	TE : 25%
Reflexión Exterior	---	RL _{EXT} : 14%	RE _{EXT} : 9%
Reflexión Interior	---	RL _{INT} : 16%	RE _{INT} : 17%
Absorción	---	---	AE : 66%
Factor Solar			g : 0'42
Transmitancia Térmica	U : 5'7 W.m ⁻² . K ⁻¹		

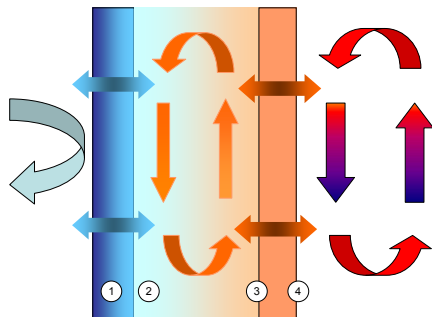
3.4. Evolución del vidrio. Acristalamientos compuestos.

Hasta ahora hemos hablado de protección solar pero nuestro clima también tiene estaciones frías, o gradientes térmicos significativos diarios en estaciones denominadas cálidas, y es necesario considerar también las pérdidas térmicas a través del acristalamiento.

Recordando (Fig.3.12), como se pierde calor a través de un vidrio entre exterior e interior el mecanismo dependía fundamentalmente de:

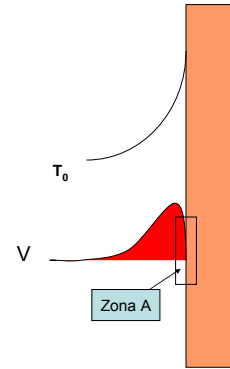
- Coeficiente Convectivo Interior (h_i), dependiente del tipo de acondicionamiento de la estancia, y que nos indica la velocidad con la que el aire, *caloportador*, lleva el calor al vidrio.
- Coeficiente de Intercambio Superficial Exterior (h_e), dependiente de la velocidad del viento en el exterior (V_e).
- Radiación del vidrio hacia el exterior, dependiente de su Emisividad (ϵ).

En resumen las pérdidas térmicas en régimen frío se producen por Convección y Radiación. Si disponemos dos láminas de vidrio a una distancia significativa, por ejemplo 1 ó 2m, y sin Radiación Solar, el tráfico de calor seguirá la siguiente ruta:



En el interior la convección calentará al vidrio interno [(4)-(3)] que a su vez radiará sobre la cámara intermedia en la que el aire comenzará también un movimiento de convección que también calentará al vidrio más exterior [(2)-(1)] que perderá el calor por refrigeración del viento y por radiación y a esto se sumará la pérdida térmica del vidrio función de su Transmitancia (U), en la pérdida térmica participan, fundamentalmente, las dos formas de transmisión de calor Convección y Radiación.

Considerando una lámina vertical a una Temperatura (T) en contacto con un fluido caloportador la velocidad del fluido seguirá el esquema adjunto movilizándose la convección natural por desplazamiento del fluido más caliente hacia arriba al hacerse menos denso.



En la Zona A el aire de la cámara, fluido caloportador, tiene una viscosidad en función de su temperatura, y dependiendo de ese valor en las zonas inmediatas a la lámina vítrea predominan las fuerzas viscosas entre aire y vidrio favoreciendo un régimen laminar (deslizamiento paralelo al vidrio de las láminas de aire) que impide el movimiento de convección, de forma coloquial es como si el aire estuviera *pegado* al vidrio.

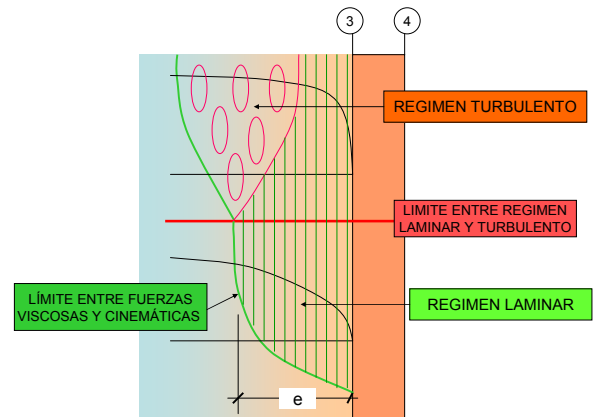


Fig. 3.21. Detalle de la Zona A. Movimiento del aire en convección natural.

Según nos alejamos de la lámina disminuye la acción de las fuerzas viscosas a favor de las cinemáticas que producen movimientos turbulentos hasta que a una distancia (e) son estas las dominantes y el régimen del aire es claramente irregular apareciendo la convección. Por tanto si acercamos ambos vidrios hasta llegar a la distancia límite entre los regímenes laminar y turbulento la convección prácticamente desaparecerá y habremos eliminado una de las pérdidas de calor.

Para cámaras de aire de U.V.A. esa dimensión se ha estimado en 18mm o, a lo sumo 20mm, y es la máxima recomendable para que la cámara de una U.V.A. tenga su máximo rendimiento.

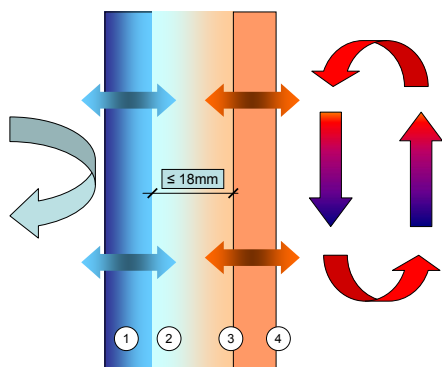


Fig. 3.21, Esquema de pérdidas en una U.V.A. con cámara adecuada.

El empleo de otros gases estables en las cámaras, generalmente argón, con viscosidades diferentes a las del aire puede mejorar el rendimiento de la U.V.A. y permite emplear cámaras de mayor dimensión con una ganancia en los resultados finales.

El empleo de vidrios de B.E. incrementa el rendimiento térmico en temporada fría y en la Fig. 3.22. vemos la evolución cualitativa del empleo de U.V.A. respecto a monolítico y del empleo de gases y vidrios de Baja Emisividad que se detalla en la Tabla 3.14., para condiciones de cálculo de Norma y sin radiación solar.

Como valor de comparación se emplea la Transmitancia del vidrio de 6mm.

$$U_{6mm} = 5.73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Tabla 3.14.

6 Incoloro (S) 6 Incoloro				
	Cámara de Aire		Cámara de Argón (Ar)	
S	U	Ganancia ⁽¹⁾	U	Ganancia ⁽¹⁾
6mm	3.25	43.5%	2.99	48%
18mm	2.72	52.7%	2.59	55%
6 Incoloro (S) 6 Bajo Emisivo [ε = 0.04]				
	Cámara de Aire		Cámara de Argón (Ar)	
S	U	Ganancia ⁽²⁾	U	Ganancia ⁽²⁾
6mm	2.08	36%	2.09	30%
18mm	1.55	43%	1.30	49.8%

NOTAS: ⁽¹⁾ Ganancia de aislamiento respecto al monolítico de 6mm

⁽²⁾ Ganancia respecto a la misma composición sin B.E.

Como simplificación podemos resumir que el salto fundamental en la reducción de los valores de la Transmitancia se produjo con el ensamblado de acristalamientos con cámara de aire de baja convección (U.V.A.) que posteriormente recibió el refuerzo de los vidrios de Baja Emisividad.

La cámara de una U.V.A. se debe denominar, por tanto, cámara de baja convección, definición que indica claramente su comportamiento térmico aunque en muchas ocasiones se defina como de aire desecado, lo cual es cierto pero no basta, e incluso como cámara de vacío por el razonamiento de si no existe fluido no existe convección, impecable térmicamente pero un disparate mecánico pues los vidrios de una U.V.A. con vacío en su cámara estarían soportando al nivel del mar una presión de 100kN/m² equivalente a 100m de columna de agua ¡!

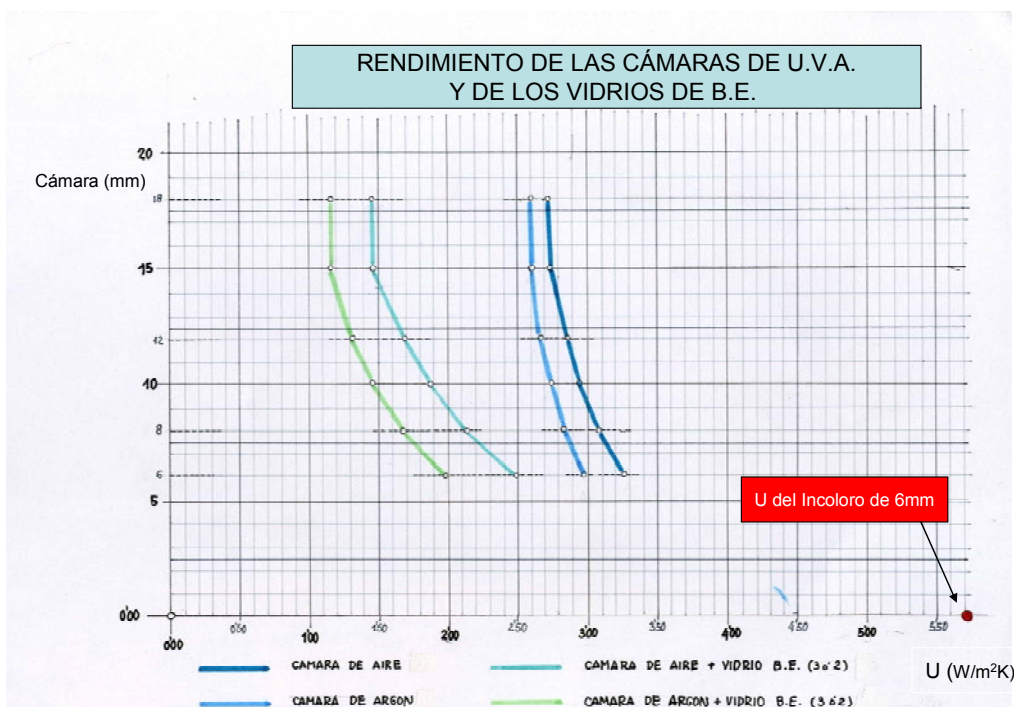
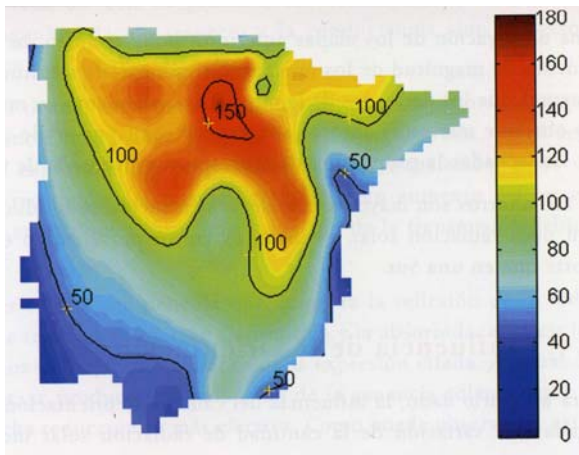


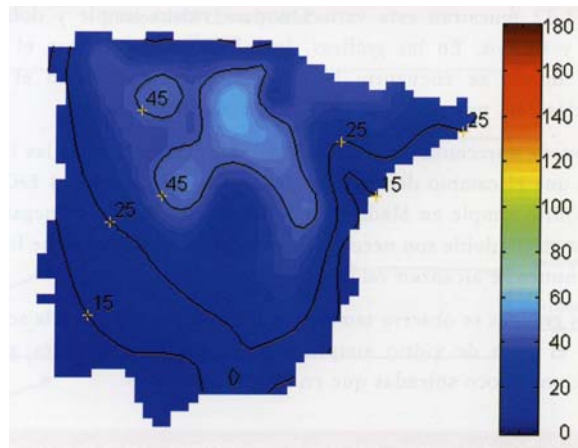
Fig. 3.22. Fases de la evolución de las unidades de vidrio aislante (U.V.A.).

La efectividad de cada tipo de acristalamiento, aplicado a situaciones climatológicas reales, se puede comprobar en los siguientes esquemas de Rendimiento Medio tomados del Libro 1 de los *Fundamentos Técnicos*

de la *Calificación Energética de Viviendas*. Publicación del Secretaria General Técnica del Ministerio de Fomento y del IDEA del Ministerio de Industria y Energía (1999).



Cambio de Vidrio monolítico a U.V.A.

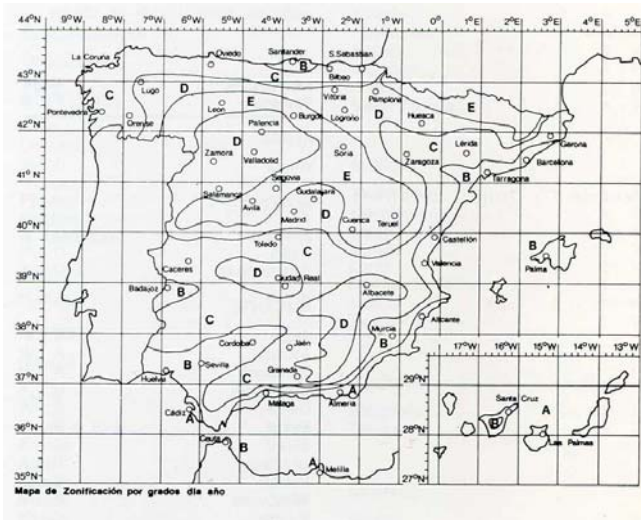


Cambio de U.V.A. ordinario a U.V.A. con vidrio de Baja Emisividad

Fig. 3.23. Rendimiento Medio comparado por el cambio de los vidrios monolíticos a U.V.A. de vidrio ordinario, y de estos a U.V.A con vidrio de Baja Emisividad.

Los gráficos anteriores nos indican que en nuestras latitudes la mayor efectividad se obtuvo con el paso de monolíticos a U.V.A. mientras que el empleo de la B.E. es aceptable en zonas tradicionalmente frías pero no fundamental, para valores climatológicos medios, y esto sin considerar efectos puntuales de climatologías con alto gradiente térmico.

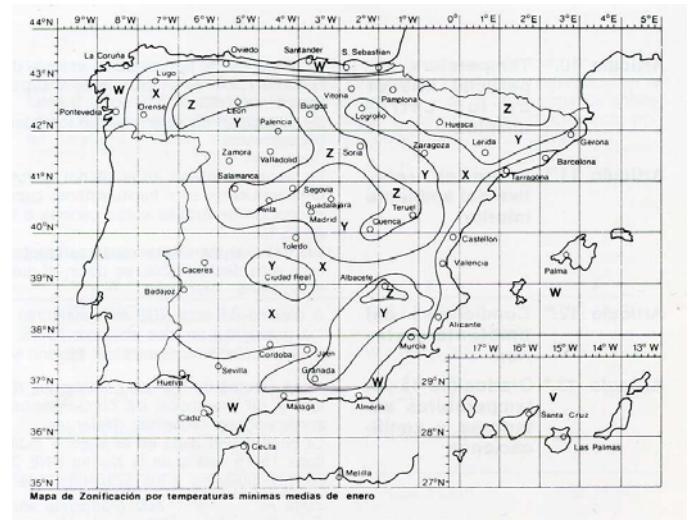
En la antigua Normativa NBE-CT-79 se determinaba la rigurosidad climática repartiendo el territorio nacional en cinco zonas según los grados/día anuales en base 15-15 según Norma UNE-24.046 (Mapa 1) y las temperaturas medias mínimas del mes de enero (Mapa 2). En la Fig. 3.24. se presentan ambos la distribución de Zonas Climáticas de acuerdo a la distribución de Grados/ día



MAPA 1

ZONIFICACIÓN GRADOS- DÍA / AÑO

- A: ≤ 400
- B: 401 a 800
- C: 801 a 1300
- D: 1301 a 1800
- E: ≥ 1801



MAPA 2

ZONIFICACIÓN POR TEMPERATURA EXTERIOR DE CONDENSACIÓN.

- V: 10°C
- W: 5°C
- X: 3°C
- Y: 0°C
- Z: -2°C

Fig. 3.24. Distribución de Zonas Climáticas según CT-79

En las siguientes figuras se esquematiza el valor de los Grados-día según las Zonas de la Fig. 3.24. Según ellas en la Península, con Latitud entre 43° y 36° Norte, predominan las necesidades de calefacción sobre las de refrigeración salvo en zonas muy concretas del Sur, y Sureste peninsular.

En las Islas Canarias, con Latitud 27° y 29° Norte clima marítimo y sus especiales condiciones orográficas, necesitaría un estudio especial en función de la altitud geográfica de la construcción.

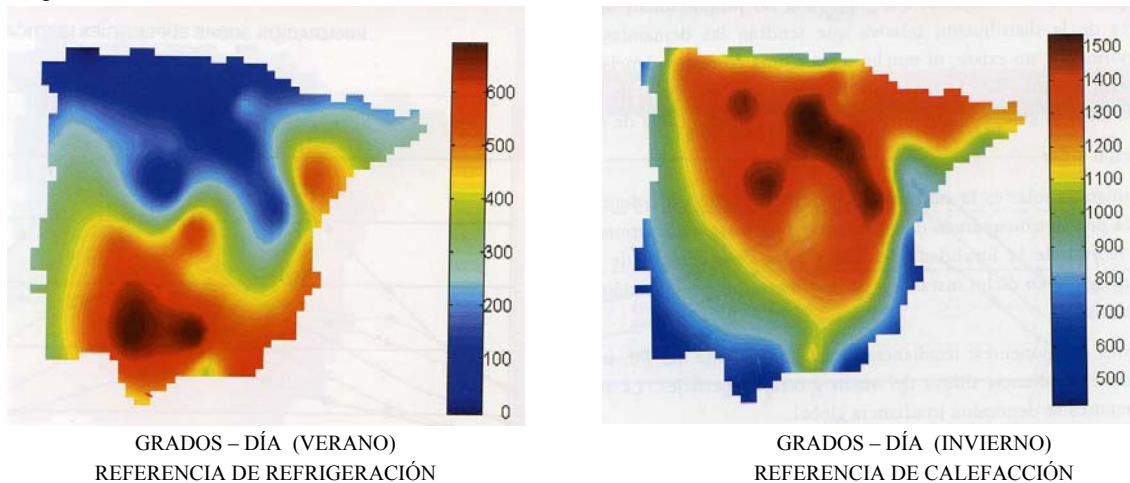


Fig. 3.24. Esquemas de Grados/día en la Península.

En la Normativa anterior (NBE-CT-79), acaso por ser espejo de otras de países centroeuropeos más fríos, apenas se contemplaban condiciones de verano, lo que ignoraba nuestra Latitud y el aporte solar que significa.

En la Normativa actual *C.T.E. DB-HE: Ahorro de energía* se establecen condiciones de Severidad Climática (SC) de invierno y verano y de acuerdo a ellas marcar las Zonas Climáticas siguientes:

SC (verano)	A4	B4	C4		E1
	A3	B3	C3	D3	
			C2	D2	
			C1	D1	
SC (invierno)					

Fig. 3.25.

El cuadro se complementa con una Tabla de zonas Climáticas donde se indica la Zona correspondiente a cada de cada Capital de Provincia y las correcciones a aplicar, dentro de cada Provincia, a los diferentes Municipios en función a su altitud geográfica respecto a la Capital.

Su resumen para cada Provincia se presenta en el siguiente Mapa simplificado en la Fig.3.26.

MAPA NACIONAL DE ZONAS CLIMÁTICAS

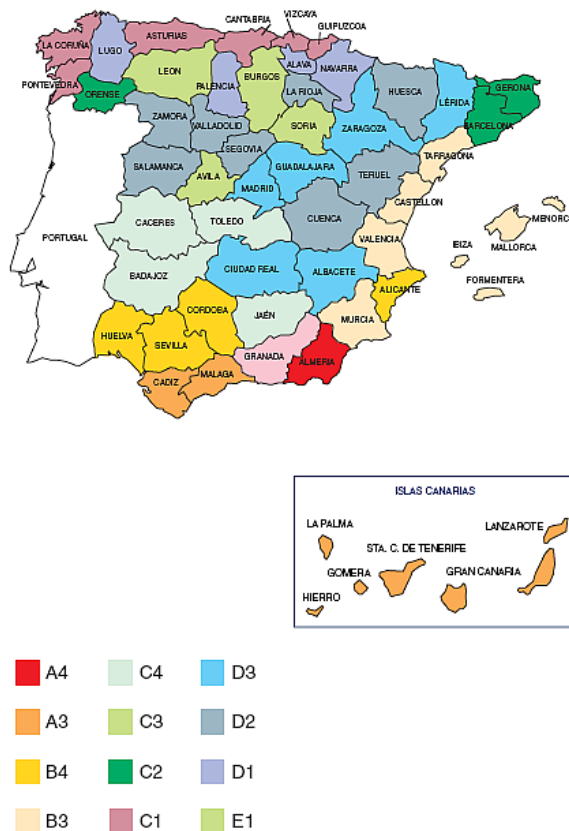


Fig. 3.26.

El C.T.E. DB/ HE 1 marca los límites mínimos para las características de los acristalamientos función de:

- Zona Climática (SC de verano e invierno).
- Orientación de los huecos (N, S, E, ú W).
- Superficie de los huecos en cada orientación (t% sobre superficie de cerramiento).

Un diseño eficaz, adaptado a cada situación geográfica, debería seguir los siguientes pasos:

- Orientación adecuada de los huecos, lo que pocas veces es posible en la ciudad consolidada con edificación mayoritariamente *parietal*, con medianerías, y la situación de ventanas es una imposición del trazado de las calles o en la edificación *abierta*, de bloque exento, en los que el trazado urbanístico pocas veces la tiene en cuenta.

- Necesidades de iluminación que determinarán, junto con el uso de las estancias, la orientación y la Zona concreta de situación, la dimensión de los huecos. Podríamos decir *diseñar para el lugar*.

- Considerar que *calentar* es más barato que *enfriar* y por tanto ante una decisión sobre una muy elevada protección de invierno con acristalamientos de emisividad muy baja (p.ej. 0'01 ó 0'02) pero con temporadas de radiación solar elevada tendríamos que actuar como Ulises en el estrecho de Mesina frente a *Scylla y Carybdis* dirigiendo el barco al primero, perdiendo seis remeros, antes de zozobrar todos frente al segundo.

- Seguir el criterio de *mínimos*, según las recomendaciones de C.T.E. DB/HE 1 antes comentados.

Como orientación y para posterior comentario en la Tabla 3.15. se han resumido los valores límite pésimos de los parámetros característicos, Transmitancia Térmica mínima (U) y Factor Solar máximo (g) de los huecos, vidrio más carpintería, para cada Zona y superficies relativas 11-20% y 31-40%, como medias significativas para edificación residencial de alta densidad(bloques) y de baja densidad (unifamiliar aislada o asociada) en las orientaciones Norte (N) para la Transmitancia (U) y Este/Oeste (E/W) para el Factor Solar (g).

Tabla 3.15.

VALORES LÍMITE PÉSIMOS

ZONA	U (W.m ⁻² . K ⁻¹) [N]		g [E/W]	
	11-20%	31-40%	11-20%	31-40%
A3				0'48
A4	4'7	3'8	---	0'43
B3				0'45
B4	3'8	3'0	---	0'42
C1				0'56
C2				0'47
C3	3'4	2'6	----	0'43
C4				0'41
D1				0'54
D2	3'0	2'2	----	0'46
D3				0'42
E1	3'1	2'2	----	0'54

Los valores reseñados representan necesidades discretas, tanto de Transmitancia Térmica (U) como de Factor Solar (g), en gran parte de nuestro territorio. A continuación se analizan cuatro composiciones y su validez en términos normativos para las exigencias mínimas:

1.- U.V.A., Vidrio exterior incoloro, (ϵ : 0'89) de 6mm, cámara de aire de 15mm y vidrio interior también incoloro de 6mm.

2.- U.V.A., Vidrio exterior Selectivo 76/50, (ϵ : 0'10) de 6mm, cámara de aire de 10mm y vidrio interior incoloro de 6mm.

3.- U.V.A., Vidrio exterior Selectivo 60/45, (ϵ : 0'07) de 6mm, cámara de aire de 10mm y vidrio interior incoloro de 6mm.

4- U.V.A., Vidrio exterior de Control Solar 51/56, (ϵ : 0'63) de 6mm, cámara de aire de 10mm y vidrio interior incoloro de 6mm.

Tabla 3. 16.

ZONAS DE VALIDEZ		Valores Característicos (Vidrio 1)		
		U	g	TL
11-20%	A3, A4/ B3, B4/ C1, C2, C3	3'07	0'72	80%
31-40%	Ninguna			
		Valores Característicos (Vidrio 2)		
11-20%	Todas			
31-40%	A3, A4/ B3/ C1, C2, C3/ D1, D2/ E1	2'05	0'54	68%
		Valores Característicos (Vidrio 3)		
11-20%	Todas			
31-40%	A3/ C1, C2/ D1, D2/ E1	1'98	0'47	62%
		Valores Característicos (Vidrio 4)		
11-20%	Todas			
31-40%	A3/ C1	2'58	0'48	46%

A la vista de la Tabla 3.16 vemos que composiciones de propiedades medias o bajas, incluso la U.V.A. banal de 6(15)6 de vidrios incoloros sin ningún tratamiento, cubre demandas mínimas en muchas zonas .

No es la intención de este Capítulo servir como *Catálogo de Recetas* sino fomentar el análisis antes de la decisión. Los últimos vidrios de capa tienden a incrementar la Transmisión Luminosa ($TL \geq 60\%$), reducir la Emisividad ($\epsilon \leq 0'02$) y reducir también el Factor Solar ($g \leq 0'30$) en una carrera que parece haber olvidado la gran influencia de las condiciones reales de climatología de cada lugar.

En la Fig. 3.27 se representa cualitativamente el escenario térmico en el que el vidrio debe cumplir su función como elemento frontera entre interior y exterior.

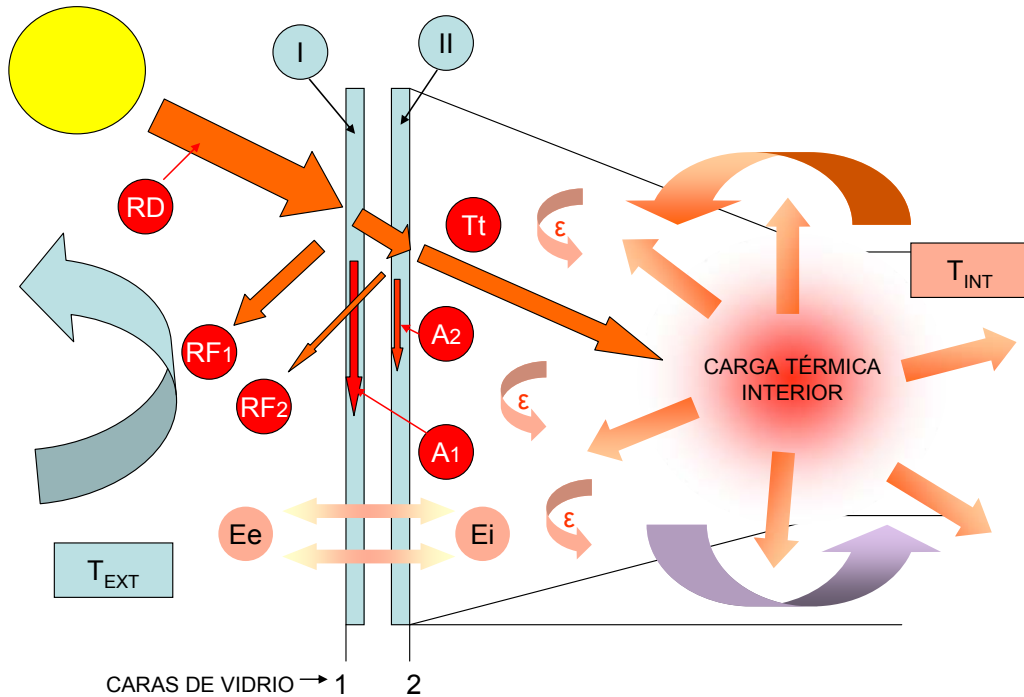


Fig. 3.27. Escenario térmico completo para un vidrio de fachada.

SIMBOLO	NOMENCLATURAS: SIGNIFICADO	
	<p>.- ACCIÓN DE LA EMISIVIDAD. La Emisividad (ϵ) de un vidrio ordinario incoloro de edificación recordemos que es de 0'89. Los vidrios de capa con tratamiento Bajo Emisivo tienen valores que oscilan entre $0'10 \leq \epsilon \leq 0'02$ en la cara tratada, manteniendo el valor de 0'89 en la otra cara.</p>	
	<p>.- RADIACIÓN DEL VIDRIO EN FUNCIÓN DE SU TEMPERATURA. Ei; Radiación Reenviada al Interior, función de la Emisividad y de T_{INT}. Ee; Radiación Cedida el Exterior, función de la Emisividad y de T_{EXT}</p>	
	<p>.- CARGA TÉRMICA INTERIOR. Su valor depende del equilibrio entre ganancias y pérdidas, en régimen variable.</p>	
	<p>.- RADIACIONES SOLARES: RD; Directa Solar Exterior. RF1; Reflejada por el vidrio exterior. RF2; Reflejada por el vidrio interior.</p>	<p>A1; Absorción del vidrio exterior. A2; Absorción del vidrio interior. Tt; Transmitida Total al interior.</p>

En términos generales la radiación solar entra en infrarrojo corto ($\lambda \leq 2400$ nm) mientras el calor generado por ella intenta salir en infrarrojo largo, del mismo modo que lo haría el calor aportado por la calefacción interior en invierno, y en esta cesión hacia el exterior influye de forma fundamental la Emisividad del vidrio (ϵ), y la Transmitancia Térmica (U) dependiente a su vez del coeficiente de intercambio superficial exterior (h_e), función de la velocidad del viento en el momento (V_v).

Según las condiciones climatológicas exteriores pueden producirse dos situaciones extremas según las temperaturas exteriores del momento:

.- En una situación de $T_{EXT} \ll T_{INT}$, y velocidad de viento (V_v) media alta, (clima frío o invernal) contar con una Baja Emisividad es muy ventajoso pues retenemos energía interior adquirida de forma gratuita por la Radiación Solar.

- Si las condiciones fueran $T_{EXT} > T_{INT}$, y con viento flojo, (clima cálido o estival) la situación se invierte, la Baja Emisividad de la cara interna del vidrio, con valores bajos ($\epsilon \leq 0'02$) sería una barrera (*ratonera del calor*) que retendría la energía interior de larga longitud de onda., generada por el Infrarrojo Solar al calentar el interior incrementando la Carga Térmica a eliminar por el acondicionamiento.

Estas dos situaciones, que pueden considerarse como límites del intervalo, tienen variaciones locales en la misma estación según el tipo de clima (templado, mesetario, marítimo, alta montaña, ...etc.) y por condiciones propias de la edificación (orientación del acristalamiento, la situación geográfica de la edificación, su altura y posible exposición especial a régimen de vientos ... etc.).

En la Tabla siguiente se resumen las características genéricas comunes de los vidrios de capa magnetronica, para edificación residencial, según sus últimas tendencias de fabricación y algún comentarios sobre las mismas.

Tabla 3. 17.

Característica	Comentarios.
Alta Transmisión Luminosa ($TL \geq 60\%$)	<p>- En latitudes altas es primordial pues la menor intensidad de radiación del Sol exige más superficie de iluminación y la máxima Transmisión Luminosa a los vidrios.</p> <p>- En latitudes bajas su exceso puede obligar a disponer protecciones para reducir el efecto de deslumbramiento, persianas, toldos, voladizos, etc. o realizar huecos menores.</p> <p>- En cualquier caso la luz transmitida, debe ser neutra y no alterar significativamente la calidad del color percibido con ella, Factor de Colorimetría ($RC \geq 90$).</p>
Emisividad muy reducida ($\epsilon \leq 0'02$)	<p>- En latitudes altas con climatología predominantemente fría, es muy útil para evitar pérdidas de calor por radiación del vidrio, considerando además que la escasa iluminación natural conduce a huecos de mayor dimensión y por tanto mayores pérdidas.</p> <p>- En latitudes bajas nos remitimos a la descripción del <i>rebote de calor hacia el interior</i> descrito anteriormente sobre la Fig. 3.27.</p> <p>- Con determinados tipos de carpintería, también en latitudes bajas, pueden aparecer riesgos de rotura por diferencia térmica que podrían obligar a templar los vidrios (nos remitimos al <i>Apdo. 4. Comportamiento mecánico del vidrio</i>).</p>
Factor Solar bajo ($g \leq 0'3$)	<p>- En latitudes altas reduce el aporte natural de calor solar por lo que no es recomendable en climas fríos.</p> <p>- Por el contrario en latitudes bajas es necesario para reducir el aporte de calor solar y el incremento de carga térmica.</p>

3.5.- Evolución de los acristalamientos exteriores. Nuevas tendencias.

En el año 1991, un estudio de José Antonio Coto Director de Investigación y Desarrollo de Cristalería Española S.A. [3] comentaba de forma esquemática, magistral, el "*estado del arte*" del vidrio en aquellos momentos. No deja de sorprender que, además de los tipos de vidrio hasta aquí descritos, absorbentes, reflectantes de tipo pirolítico y magnetronico (tanto de control solar como de baja emisividad) y las U.V.A. con cámara de aire o de gas, se hablaba de otros que aún hoy , después de 21 años, se conocen de forma tímida, a saber:

- De propiedades variables, *Termocrómicos, Fotocrómicos y Electrocrómicos*, que varían sus propiedades de Transmisión Luminosa y Color con el calor, la radiación solar o la corriente eléctrica respectivamente.

- *Fotovoltaicos* productores de energía eléctrica bajo la acción solar que, en el momento actual, se fabrican por métodos magnetronicos y cuya transparencia es controlable, permitiendo el paso de la luz y la visión en la medida deseada y han liberado al vidrio de su función de soporte de las opacas células conocidas actualmente (B)

- *Autocalentadores*, vidrios de capa magnetronica que con el paso de la corriente eléctrica se convierten en radiadores de calor o laminados con conductores metálicos de sección mínima inscritos en el intercalario y prácticamente invisibles.

Aunque algunos de ellos no tienen espacio de uso común en la Arquitectura su existencia abre vías de pensamiento e investigación futura como la descrita a continuación de la que ya existe alguna aplicación.

Hasta ahora solo hemos hablado de acristalamientos *estáticos*, en el sentido de la invariabilidad de sus propiedades en función de sus componentes, vidrios de capas, cámara etc., es decir el acristalamiento frente a la climatología siempre es el mismo y tiene los valores físicos determinados en Laboratorio de acuerdo a la UNE-EN: 410.

Pero desde el año 2007 existen vías de investigación y experiencias que, actuando sobre la cámara del acristalamiento y su relleno, consiguen variar sus propiedades en función de la estación y las necesidades, aprovechando la propiedad del agua como absorbente de radiación o depósito de calor.

Conocida es la elevada absorción del agua, frente a la Radiación Solar, en los segmentos de Ultravioleta ($300 \leq \lambda \leq 380$) e Infrarrojo Solar ($750 \leq \lambda \leq 2400$), por consiguiente interponiendo una lámina de agua entre el

Sol y nosotros se reduce sobremanera la radiación recibida sin apenas alteración de la luz transmitida.

En este proceso el agua se calienta por lo que es necesario refrigerarla para que siga cumpliendo su función de aislante de calor.

Por otra parte si esa lámina de agua se calienta en momentos de frío exterior formará un *muro de calor* entre el exterior y nuestra estancia, reduciendo también las pérdidas energéticas.

Este sistema ya se había empleado con aire, como elemento caloportador, en acristalamientos de vidrios monolíticos en doble piel haciendo circular aire caliente entre los dos vidrios.

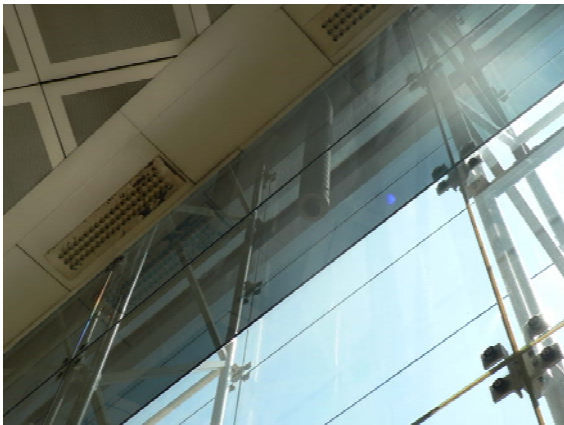


Fig. 3. 28. Detalle de toberas en la doble piel de fachada del anterior Aeropuerto de Barcelona.



Fig. 3. 29. Consejo Consultivo de la C.A. de Castilla y León (Alberto Campo Baeza)

La investigación sobre estas premisas, que se inicio hace bastantes años, chocaba con problemas insalvables en aquellos momentos como eran la gran presión hidrostática que el agua producía en los vidrios y las instalaciones de calentamiento y refrigeración del agua empleada como caloportador.

En el año 2007 la ETSIA de la UPM comenzó a desarrollar, amparada por el Programa de creación de empresas *Actúa UPM*, el Proyecto de I+D+i que, en el momento actual ha generado un nuevo tipo de vidrio aislante activo de cámara de agua (A) y sistemas de micro intercambiadores de calor que empleando exclusivamente vidrios incoloros laminados de seguridad y variando la temperatura del agua de la cámara ha conseguido resultados esperanzadores para este sistema.

Las ventajas del método son las siguientes:

- 1.- Empleo exclusivamente de vidrios incoloros laminados habituales en edificación en estado natural.
- 2.- Obtener una transparencia prácticamente total y natural, sin apenas alteración de la calidad de luz recibida.
- 3.- Conseguir acristalamientos *activos frente a la excitación climática recibida*, de modo que el mismo acristalamiento es válido para estaciones invernales y estivales manteniendo una temperatura del vidrio interior prácticamente uniforme, y sin grandes diferencias con la del ambiente de la estancia, pues depende de la temperatura del agua de la cámara controlada por los intercambiadores de calor.
- 4.- Eliminar el efecto de rebote de calor por radiación de los vidrios interiores hacia la estancia.
- 5.- Eliminación de los efectos de las presiones *isócoras*, que veremos en el *Apartado 4.- Comportamiento mecánico del vidrio*.

Y sus desventajas :

- 1.- La ausencia de experiencia amplia de su comportamiento a largo plazo, pues las obras realizadas son muy recientes.
- 2.- El empleo de mecanismos activos, bombas, intercambiadores... etc. para mantener la temperatura y circulación del agua (caloportador). Con esto es necesario un mantenimiento regular soportable que no encarezca el uso con el tiempo.
- 3.- Garantías de los sellantes frente a la presión hidrostática.
- 4.- Limitaciones de dimensión en el caso de grandes superficies por problemas mecánicos de resistencia a la presión, aunque se han instalado piezas, en algunas ocasiones, con altura de suelo a techo.

4. Comportamiento mecánico del vidrio

En este apartado no analizaremos el cálculo mecánico del vidrio para fachadas en general, ni su uso como estructura, sino aquellos problemas de fractura inducidos por un inadecuado uso de vidrios en fachada, es decir aquellos casos cuya patología se derive de problemas térmicos y de la influencia de elementos secundarios que acompañan en ocasiones al acristalamiento tales como cortinas interiores, determinados tipos de carpintería, sombras arrojadas, ...etc.

Considerando que el vidrio no es un material cristalino su resistencia teórica depende de la resistencia del enlace de Si-O cuya variación de fuerzas de unión corresponde con una función sinusoidal según la expresión [1]:

$$\sigma = \sigma_t \operatorname{sen} \frac{2\pi x}{\lambda}$$

- Para: σ_t : Tensión teórica para separar un átomo de Sílice (Si) de otro de Oxígeno (O).
 $\lambda/2$: Intervalo de variación de las fuerzas interatómicas.
 a_0 : Distancia interatómica de equilibrio en el caso de que no exista ninguna tensión de tracción según el eje x .

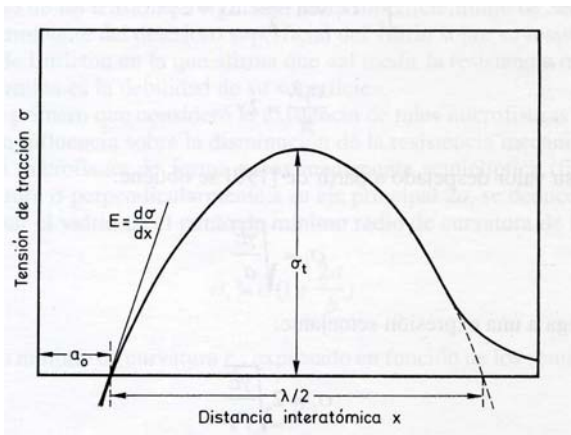


Fig.4.1. Variación de las fuerzas de cohesión en función de la distancia de separación interatómica

La variación de la tensión en función de a_0 es:

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{2\pi\sigma_t}{\lambda} \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$$

Para valores de x muy pequeños, $x \approx a_0$, $(2\pi x/\lambda) \approx 1'00$ y con E de valor $(7'2 \cdot 10^4 \text{N/mm}^2)$ se obtiene la expresión:

$$\sigma_t = \frac{E \lambda}{2\pi a_0}$$

El desarrollo de esta fórmula para:

$$\lambda/a_0 : \text{Cte.}$$

$$E : d\sigma/dx = 7'2 \cdot 10^4 \text{N/mm}^2$$

Proporciona un valor de la resistencia teórica del vidrio plano recocido de $\sigma_t \approx 2'2 \cdot 10^4 \text{N/mm}^2$.

La resistencia real obtenida por ensayos ($\sigma_{g,k}$) de una placa de vidrio plano recocido es $\leq 50 \text{N/mm}^2$ notablemente menor que la teórica admitiéndose que la desviación se debe, según la teoría generalmente aceptada, a las irregularidades, microfisuraciones elípticas o *bolsas* que surcan la superficie del vidrio debidas al enfriamiento o a la abrasión por su manipulación normal.

Inglis, en 1913, [4] fue el primero en considerar a las microfisuras superficiales del vidrio plano como responsables de su resistencia real y Littleton afirmó, algunos años después, que *medir la resistencia mecánica del vidrio es determinar la debilidad de su superficie*.

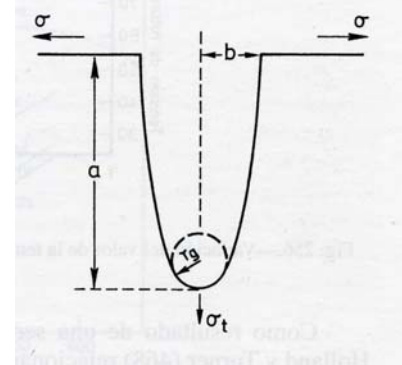


Fig.43.2. Esquema de una microfisura elíptica y el esquema de tensiones que determina su evolución

La humedad también cumple un papel importante en la rotura del vidrio pues el agua puede actuar penetrando en las microfisuras y producir una corrosión química, bajo una situación de tensión, cuyo efecto es ir haciendo más profunda la *bolsa* lo que reduce el radio r_g y acelera el proceso de fractura [5].

Por último la persistencia de la carga, su tiempo de aplicación, también influye negativamente en la resistencia produciendo una situación de fatiga que incrementa el efecto anterior.

Pero aparte de estos razonamientos fisico-químicos cuyo nivel de actuación es microscópico existe otro fundamental a nivel macroscópico que es el estado del borde del vidrio tras su proceso de corte.



Fig.4.3. Aspecto del borde de un vidrio a "canto vivo" sin pulir.

El corte industrial del vidrio monolítico sigue realizándose, en casi todos los casos, en mesas horizontales donde una *rula* rasga superficialmente la hoja para, posteriormente, *tronzarla* en un proceso mecánico de flexión que abre la rasgadura. En este proceso se producen fisuraciones de borde, apreciables en la Fig.4.3 y en la siguiente Fig. 4.4. [6]

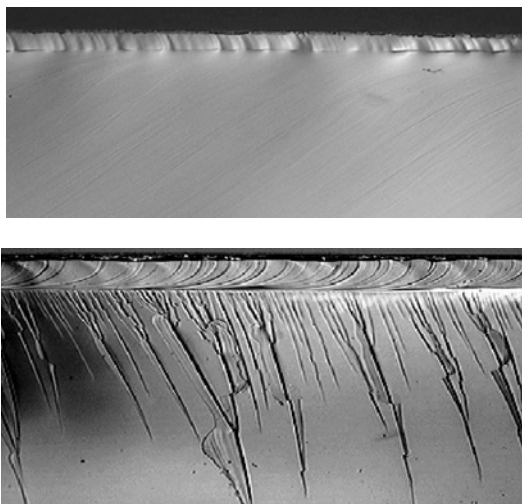


Fig.4.4. Aspecto detallado de las fisuras del borde de corte de un vidrio a "canto vivo" sin pulir. El borde superior corresponde al de desplazamiento de la rula

A la vista de estas imágenes vemos que los primeros razonamientos sobre la teoría de rotura basados en evolución de microfisuras solo tienen validez para cantos de vidrio en los que se haya eliminado la irregularidad del corte industrial mediante un pulido de canto y biselado de bordes, lo que se denomina canto pulido industrial, borde deslustrado sin brillos o borde pulido según la UNE EN-12150.Parte 1.

Una de las causas más frecuentes de rotura de vidrios es el mal estado de sus cantos y las saltaduras o *lascas* producidas en las manipulaciones de transporte y colocación.

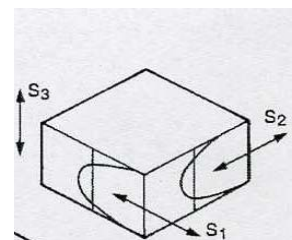
Para un buen estado de bordes el vidrio plano recocido tiene una resistencia característica, según prEN 13474. Parte 1, de $f_{g,k} = 45\text{N/mm}^2$.

La resistencia del vidrio recocido habitual puede mejorarse mediante el temple que puede ser térmico o químico, aunque en edificación solo se aplica industrialmente el primero.

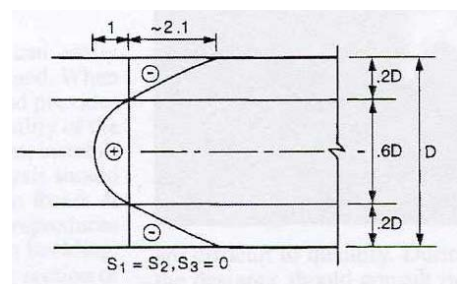
El proceso de templado térmico consiste en calentar al vidrio en un horno horizontal con resistencias eléctricas hasta el *intervalo de transición*, temperaturas entre 650°C y 700°C aproximadamente, enfriándolo inmediatamente con una fuerte corriente de aire frío por ambas caras durante un tiempo entre 15s y 20s, según la temperatura alcanzada en el calentamiento.

El resultado es justo el contrario del conseguido en el *arca de recocido*, en la que se enfría al vidrio intentando que las tensiones de enfriamiento sean las mínimas. En el soplado del temple se intenta conseguir tensiones de compresión muy elevadas en las caras exteriores de la hoja de vidrio con el fin de *cerrar microfisuras* reduciendo su efecto negativo en la resistencia del vidrio.

El esquema de tensiones genéricas obtenidas se presenta en la Fig. 4.6. [7]



Dirección de las tensiones



Distribución en el espesor del vidrio

Fig.4.6. Tensiones incorporadas a un vidrio por templado térmico.



Fig.4.7. Vista del canto de un fragmento de vidrio templado fracturado donde reaprecian las diferentes zonas de tensión.

Con este proceso el valor de la resistencia característica del vidrio plano sube a $f_{g,k} = 120\text{N/mm}^2$, aunque esta considerable ganancia lleva aparejado un aumento en la sensibilidad a rotura pues, como sabemos, un impacto de cuerpo muy duro en las proximidades del borde o en el canto de la pieza, que llegue a penetrar en la zona comprimida superficial, conlleva la rotura total de la misma provocada por la liberación de las tensiones de tracción confinadas en su interior.

Otro efecto a tener en cuenta producido por el temple en el vidrio plano es la *anisotropía* fenómeno óptico de los materiales que poseen entre otras la propiedad de la *fotoelasticidad* y manifiestan de forma visible sus tensiones internas, cuando se ven bajo luz polarizada que puede ser la luz indirecta solar.

Tabla 4.1.



Fig.4.8. Anisotropía en vidrios templados.

El valor de las $f_{g,k}$ sirven de base para el cálculo de las tensiones admisibles $f_{g,d}$, cuyos valores más comunes para el vidrio plano flotado común en edificación se dan en la Tabla 4.1. tomada del Proyecto de Norma Europea prEN 13474. Vidrio para la Edificación. Diseño de los Acristalamientos. Parte2: Cálculo de cargas uniformes.

Repetimos que estos valores dependen en alto grado del estado de los cantos de las piezas y un corte inadecuado que produzca fisuración de tronco excesiva (Fig. 4.3.; 4.4. y 4.5) o cualquier golpe en el canto durante las operaciones de transformación o montaje, que origine una lasca en él, producirá la prematura ruina del vidrio independientemente de los valores de resistencia teórica de la Tabla. 4.1.

Producto vítreo		Duración de la carga uniformemente repartida					
		Corta (Viento)		Media (Nieve, Climáticas)		Larga (Peso propio, altitud)	
Tipo de vidrio	Tratamiento	ELU	ELS	ELU	ELS	ELU	ELS
Flotado plano	Recocido	17'00	30'07	8'50	15'30	6'40	11'50
	Templado Térmicamente	49'60	80'70	41'10	65'30	39'00	61'50
	Termoendurecido	27'90	47'30	19'40	32'00	17'30	28'20

El vidrio, por ser mal transmisor del calor, puede mantener en su masa temperaturas diferentes en una misma pieza, se puede decir que la radiación caliente *al vidrio que ve*. Muy significativa es la Fig. 4.8., en la que se aprecia que el vidrio expuesto a la radiación estará más caliente que el situado en sombra, por el voladizo y el pilar inmediatos, con una diferencia de temperatura marcada por la absorción energética del vidrio (AE) y la ventilación de su superficie (velocidad del viento) variable a lo largo del día.



Fig. 4.8. Sombras arrojadas sobre un acristalamiento por elementos constructivos externos.

En los acristalamientos los casos más habituales se pueden tipificar en los siguientes:

- Sombras arrojadas por elementos de fábrica, dinteles jambas, voladizos o cuerpos de construcción como chimeneas, o edificaciones próximas.

- Persianas exteriores a medio bajar que impiden la radiación uniforme sobre el vidrio.

- Cortinas o estores a medio desplegar en el interior próximos al acristalamiento y con ventilación insuficiente entre ambos, y en general cualquier elemento opaco mobiliario, etc. pegado al acristalamiento.

- Papeles o láminas adheridas al vidrio por el interior.

- Acristalamientos instalados en carpinterías de corredera que en situación de abertura parcial producen idéntico efecto a las cortinas para el vidrio exterior.

- Un caso particular del anterior es el apilamiento en los caballetes de obra de los acristalamientos de forma irregular, con algunas piezas salientes respecto al resto, y expuestos a radiación solar.

La diferencia de temperatura, o choque térmico, entre dos puntos de una misma lámina de vidrio es por consiguiente una carga adicional que debe soportar nuestro acristalamiento y no conviene olvidar.

El choque térmico que puede soportar un vidrio se determina de forma teórica de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\Delta T = \frac{[2 \times fg;d \times (1-\mu)]}{(\alpha \times E)}$$

para: ΔT = Diferencia de temperatura admisible entre dos puntos de un mismo volumen.

$fg;d$ = Tensión admisible de flexotracción para el vidrio bajo cargas de duración media.

μ = Coeficiente de Poisson ($\mu = 0.22$).

E = Módulo de elasticidad longitudinal ($7 \cdot 2 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$).

α = Coeficiente de dilatación térmica ($9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)

Su aplicación da los siguientes valores teóricos del ΔT para cada tipo de tratamiento:

Tabla 4.2.

Tratamiento	Estado Límite	
	ELU	ELS
Recocido	20'50°C	36'80°C
Templado térmico	98'90°C	194'20°C
Termoendurecido	46'70°C	77'00°C

Estos valores son los teóricos, bastante conservadores, y nos indican que en caso de riesgo por choque térmico la mejor decisión es templar los vidrios o por lo menos someterlos a un termoendurecido o *temple corto*.

No obstante, como orientación, adjuntamos una Tabla de la Norma francesa NF P 78-201-1 en la que se precisan algo más estos criterios en función del estado de cantos, tipo de vidrio, carpintería y apoyo de la lámina.

Tabla 4.3.

CRITERIOS : Diferencias de temperaturas admisibles para los vidrios recocidos (* NF P 78-201-1)			
Inclinación (grados)	90 > β > 60	60 > β > 30	30 > β > 0
Monolítico, borde bruto de corte	34 (31)	31 (28)	27 (25)
Monolítico, borde esmerilado	41 (37)	37 (33)	33 (29)
Laminado simétrico, medida fija, borde bruto de corte	34 (31)	31 (28)	27 (25)
Laminado simétrico, medida fija, borde esmerilado	41 (37)	37 (33)	33 (29)
Laminado simétrico, cortado, borde bruto de corte	29 (26)	26 (23)	23 (20)
Laminado asimétrico, medida fija, borde bruto de corte	26 (23)	23 (21)	21 (19)
Laminado asimétrico, medida fija, borde esmerilado	34 (31)	31 (28)	27 (25)
Laminado asimétrico, cortado, borde bruto de corte	24 (22)	22 (20)	19 (18)
Vidrio o luna armada	24 (22)	22 (20)	19 (18)
Vidrio impreso	31 (28)	28 (25)	25 (22)

* Acristalamiento apoyado perimetralmente
* Carpintería con baja inercia térmica (Carpinterías de baja inercia)

Los riesgos térmicos solo aparecen en los acristalamientos bajo los efectos de la radiación solar, salvo casos excepcionales. Para comprobar sus efectos se estudiarán las temperaturas de los vidrios bajo condiciones de radiación en verano para acristalamientos de los tipos descritos más habituales.

La composición de los acristalamientos a comprobar en las situaciones descritas se detallan en la Tabla 4.4, todas de vidrios de 6mm de espesor y cámara de aire de 15mm.

Tabla 4.4.

Vidrio	Composición		
	Vidrio exterior	Cámara	Vidrio interior
1	Incoloro	Aire de 15mm	Incoloro
2	Control solar Protección/20		Incoloro
3	Bajo Emisivo $\epsilon = 0'04$		Incoloro
4	Selectivo 70/54 $\epsilon = 0'10$		Incoloro

Las condiciones tipo de colocación serán las siguientes:

A .- Persiana exterior, con ventilación natural

B .- Cortina o estore interior, próximo al vidrio, con ventilación reducida entre ambos.

C .- Carpintería de corredera a medio abrir.

Las condiciones de climatológicas serán las de Verano según los datos pésimos ya empleados en el Apdo. 3.

Tabla 4.5.

Parámetros	Verano (día)
Temperatura exterior	36°C
Radiación	740W.m ⁻¹
Nubosidad	Despejado
Velocidad de viento	1m.s ⁻¹

Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 4.6., considerando que (I) es el vidrio exterior y (II) el interior.

Tabla 4.6.

Acrisolamiento y condición de uso.		Temperatura de los vidrios			
		Sin obstrucción		Con obstrucción	
Vidrio	Tipo	I	II	I	II
1	A	42°C	37°C	52°C	35°C
	B			51°C	63°C
	C ⁽¹⁾			50°C	59°C
				62°C	41°C
2	A	63°C	38°C	57°C	35°C
	B			68°C	53°C
	C ⁽¹⁾			71°C	66°C
				61°C	36°C
3	A	47°C	34°C	59°C	31°C
	B			52°C	62°C
	C ⁽¹⁾			55°C	88°C
				87°C	38°C
4	A	52°C	34°C	60°C	31°C
	B			57°C	58°C
	C ⁽¹⁾			60°C	87°C
				86°C	37°C

NOTAS: ⁽¹⁾ Los dobles valores de las Temperaturas en este caso corresponden la superior al acristalamiento que desliza por el exterior y el inferior al acristalamiento que desliza por el interior.

Los choques térmicos para los casos estudiados, en cada acristalamiento y condición de uso, serán:

Tabla 4.7.

Acrisolamiento y condición de uso.		Choque Térmico (ΔT)	
T	Tipo	Vidrio I	Vidrio II
1	A	10°C	2°C
	B	5°C	15°C
	C ⁽¹⁾	8°C	22°C
		20°C	4°C
2	A	6°C	3°C
	B	5°C	15°C
	C ⁽¹⁾	8°C	28°C
		2°C	2°C

Tabla 4.7. (continuación)

3	A	12°C	3°C
	B	5°C	28°C
	C ⁽¹⁾	8°C	54°C
		40°C	4°C
4	A	8°C	3°C
	B	5°C	24°C
	C ⁽¹⁾	8°C	53°C
		34°C	3°C

A la vista de los resultados sería preciso tomar las siguientes precauciones:

- Riesgos *ligeros y medios* (1-2/C; 3-4/B): Bastaría un pulido de cantos con borde deslustrado sin brillo (canto pulido industrial en *argot* vidriero).

- Riesgos *altos* (3-4/C): Templado térmico.

Los resultados obtenidos indican que el empleo de vidrios con emisividades muy bajas ($\epsilon \leq 0'07$) deben considerarse con cautela en climas donde la radiación solar durante algunas estaciones y periodos del día sea alta, *para carpinterías de corredera en las que los vidrios puedan superponerse.*

Las conclusiones generales de lo anterior serían:

1.- Las persianas exteriores, toldos o cualquier otra obstrucción solar externa ventiladas y a una distancia de $\geq 150-200\text{mm}$ del acristalamiento no deben ocasionar problemas especiales siempre que la Absorción Energética del vidrio exterior sea $AE \leq 30/40\%$.

2.- Cuando se empleen vidrios exteriores de B.E. o Selectivos con emisividad $\epsilon \leq 0'06$, con carpinterías de corredera que permitan la superposición ocasional de los vidrios, deberán emplearse vidrios con borde deslustrado sin brillos (UNE-EN 12150. Parte 1) canto pulido industrial en el *argot* vidriero, y si $\epsilon \leq 0'04$ estudiar la necesidad de un templado térmico en función de la climatología del lugar.

3.- El almacenamiento de los acristalamientos en obra debe realizarse, a ser posible, en recintos protegidos de la intemperie y siempre cubiertos.

Otro fenómeno a considerar en las U.V.A. es el comportamiento dinámico del aire de la cámara por dos causas:

- Diferencia de altura geográfica entre el lugar de fabricación y el de montaje.

- Diferencias de temperaturas y cambios barométricos durante la vida de la U.V.A., ya colocada en la fachada.

Las transformaciones que puede sufrir un gas encerrado en un recipiente pueden ser de los siguientes tipos:

- Isotermas, a Temperatura es constante ($T = \text{cte.}$).

- Isobáricas, a Presión constante ($p = \text{cte.}$).

- Isócoras, a Volumen constante ($V = \text{cte.}$).

Esta última afecta al gas de la cámara de las U.V.A.^S que, por su condición de estanca, no altera su volumen.

Supongamos una U.V.A., cuyo gas de la cámara tiene valores de Presión, Volumen y Temperatura en las condiciones de clima y altura geográfica del lugar de fabricación en el momento de su sellado, se traslada a otro lugar y se monta a una altura diferente de la de fabricación y a otras condiciones climatológicas lo que produce los siguientes cambios:

- Diferente presión exterior debida a la diferencia de altura topográfica diferencial.

- Diferente presión exterior barométrica por la situación meteorológica.

- Temperatura diferente que dilata o retrae al gas de la cámara.

Este proceso, que se produce en una cámara estanca sin comunicación con el exterior, induce acciones mecánicas en los vidrios de la U.V.A. de Presión o Succión.

El efecto visual, es muy acusado en acristalamientos fabricados con vidrios de alta reflexión luminosa, y se puede apreciar en la Fig 4.8.



Fig. 4.8. Aspecto de un acristamiento sometido a los efectos de las presiones "isócoras" en su cámara.

Las presiones y succiones sobre los vidrios se presentan esquemáticamente en la Fig. 4.9.

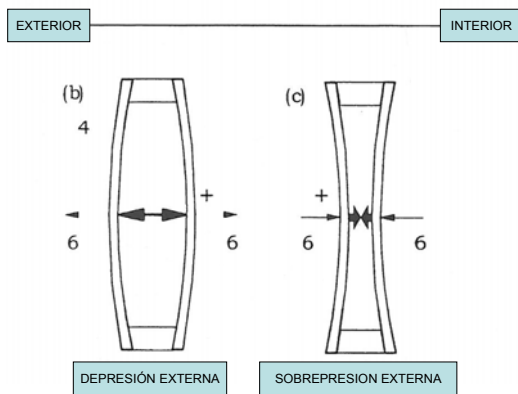


Fig. 4.9. Esquema de isócoras en una U.V.A.

En determinados casos estas acciones pueden llegar a romper los vidrios componentes como lo haría cualquier acción de viento, pero con el agravante de ser cargas de larga duración, las correspondientes a diferencia de altura, y de media duración las producidas por cambios climatológicos.

Por tanto se deben evaluar estas acciones en los siguientes casos:

1.- Cuando el montaje se vaya a realizar en zona muy distinta, geográfica y climatológica, a la de fabricación.

2.- Cuando en el transporte el vidrio vaya a sufrir cambios de altura considerables, paso de puertos de montaña por ejemplo, o se realice por medios especiales, barco o avión. En este caso al ser una condición no permanente puede dotarse a la cámara de la U.V.A. de una válvula de equilibrado que garantiza su estanquidad y el equilibrio entre presión externa e interna, hasta la llegada a lugar de montaje.

Las presiones *isócoras* obtenidas deberán combinarse con las correspondientes al resto de acciones: viento, sobrecargas de uso, etc. considerando, como antes hemos indicado, que para la determinación de la Tensión Admisible en el vidrio su duración es *media*, para los cambios climatológicos (Temperatura y Presión Barométrica) y *larga* para la diferencia de altura geográfica y de construcción entre el lugar de fabricación y el de montaje (Tabla 4.1.), aunque esta última puede evitarse, como ya dijimos para el caso de transportes especiales, o para diferencias significativas de altura geográfica, empleando válvulas de equilibrado que se sellarán tras el montaje.

La determinación de las acciones *isócoras* sobre los vidrios se puede realizar por el procedimiento detallado a continuación propuesto por el Proyecto de Norma Europea prEN 13474 Vidrio para la edificación. Parte 1: Base general de cálculo que recoge la Norma Alemana *Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen* (Septiembre 1998).

[Especificaciones técnicas para la utilización de acristalamientos de apoyo lineal]

Tabla 4.8.

DETERMINACIÓN DE PRESIONES ISÓCORAS EN LAS U.V.A. SEGUN prEN 13474-1.

NOMENCLATURAS

- $P_{C;0}$: Presión isócara climática.
- $P_{H;0}$: Presión isócara por altitud.
- P_P : Presión meteorológica en el momento de sellado de la U.V.A.
- P : Presión meteorológica en el del lugar de utilización.

- H_P : Altitud del lugar de fabricación.
- H : Altitud del lugar de utilización.

- T_P : Temperatura del lugar de fabricación en el momento del sellado.
- T : Temperatura del lugar de utilización.

- C_H : Disminución de la presión atmosférica con la altitud $0'012 \text{ kN/m}^2 \cdot \text{m}$.
- C_C : Aumento de la presión isócara con la altitud $0'34 \text{ kN/m}^2 \cdot \text{K}$.

F O R M U L A C I Ó N

$$P_{H;0} = 0'012 \times (H - H_P)$$

$$P_{C;0} = 0'35 \times (T - T_P) - (P - P_P)$$

E J E M P L O

Para una U.V.A. fabricada a H_P : 100 m, a una presión de P_P : 960 mlbar y una temperatura de T_P : 16°C, y colocado en una torre de 250 m de altura, en Madrid (H : 660m), en condiciones de verano con temperatura en Madrid de T : 35°C y presión barométrica de P : 980 mlbar.

$$P_{H;0} = 0'012 \times [(660+250) - 100] = 9'7 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{C;0} = 0'35 \times (35 - 16) - (99'96 - 97'92) = 4'6 \text{ kN/m}^2$$

Estas presiones representan, en circunstancias, extremas como las presentadas, acciones superiores a cualquier carga de viento habitual.

Método Simplificado del prEN.13474.Parte 1.

PRESIONES ISÓCORAS

Condición ¹	Parámetros para el lugar de utilización		Parámetros para fabricación (sellado final)		Presión isócara $p_{c;0}$ kN/m^2
	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Presión meteorológica Kn/m^2 ²	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Presión meteorológica kN/m^2 ²	
Verano	+ 45	100	+ 18	103	+ 12,0
Invierno	+ 3	104	+ 30	980	- 15,0

Nota 1: Las condiciones estivales e invernales se describen en 5.3.3.3
 Nota 2: 100 $\text{kN/m}^2 = 1000 \text{ hPa} (= 1000 \text{ bar})$

CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS TIPO

Condición estival:

- Temperatura del aire exterior e interior + 30 °C
- Radiación solar 800 W/m^2 , ángulo de incidencia 30°
- Absorción del acristalamiento 35%
- Coeficiente de transmisión térmica interior 8 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
- Coeficiente de transmisión térmica exterior 13 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
- Presión meteorológica intermedia.

Condición invernal:

- Temperatura del aire exterior - 10 °C
- Temperatura del aire interior + 18 °C
- Coeficiente de transmisión térmica interior 8 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
- Coeficiente de transmisión térmica exterior 25 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
- Presión meteorológica alta.

5.- Conclusiones.

Bibliografía

[1] José María Fernández Navarro. El Vidrio. Textos Universitarios N° 6. C.S.I.C. y S.E.C.V. Tercera Edición Madrid 2003.

[2] James Barton y Claude Guillemet. Le Verre. Science et technologie EDP SCIENCES France 2005.

[3] José Antonio Coto. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. Vol. 41 N° 221 Enero/ Febrero/ Marzo Madrid 1991.

[4] Inglis, C.E. Stresses in a plate due to messure of craks and sharp corners. Trans. Inst. Naval Arch. 55. 1913

[5] Charles, R.J. ; Hulling, W.B. The kinetics of glass failure by stress corrosion. Sympos sur la resistance mecanique du verre et les moyens de l'a.meliorer. Florencia 1961, 511-527, Edit. Union Scient. Continent. du Verre. Charleroi, 1962.

- [6] Olivier Gaume. Ingenieur a Recherche á Saint-Gobain Recherche.
Découpe a verre plat (BM 7 428-5).
- [7] The Institution of Structural Engineers. Structural use of glass in
buildings. 1999.

Direcciones de innovación.

- (A) IntelliGlass. Acristalamientos activos con cámara de agua.
www.intelliglass.es
- (B) Soliker / Uni Solar. Vidrios de capa fotovoltaicos .
Transparentes o translúcidos. www.soliker.es