

## Uniformidad de color en vidrio de baja emisividad de control solar Solarban®

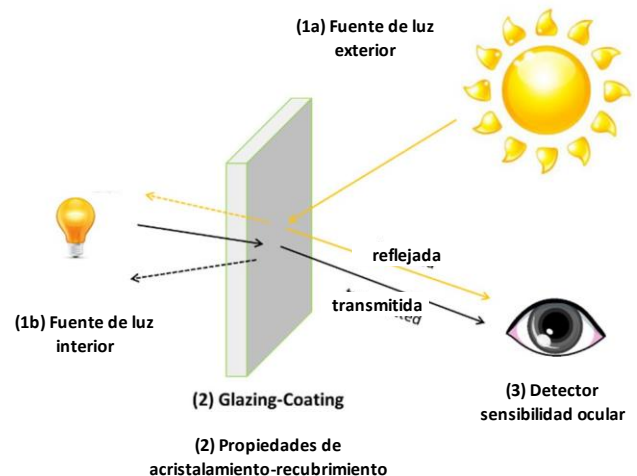
**El objetivo de este documento técnico es describir los fundamentos del color y su relación con los distintos tipos de acristalamiento y aplicaciones en el proceso de diseño, fabricación e instalación de edificios comerciales. La siguiente información describe las recomendaciones de Vitro Vidrio Arquitectónico para la uniformidad del color del acristalamiento, basadas en la norma ASTM C1376.**

Los edificios comerciales abarcan muchos segmentos de uso final diferentes, como oficinas, comercios, viviendas multifamiliares, educación, servicios alimenticios, alojamiento, atención médica y muchos otros. Las tendencias actuales de diseño de todos estos segmentos incluyen una mayor superficie de acristalamiento, unidades de acristalamiento más grandes y mejores atributos de rendimiento energético. El equilibrio de estas tendencias con la necesidad siempre presente de un atractivo estético agradable ha llevado al uso de construcciones de acristalamiento más complejas. En muchos edificios, el objetivo de mejorar el rendimiento energético se consigue incorporando al diseño vidrios recubiertos de baja emisividad de control solar.

Las partes responsables, incluyendo propietarios de edificios, arquitectos, contratistas de acristalamiento, fabricantes y productores de vidrio plano, tienen mucho que considerar dada esta tendencia de diseño y la naturaleza compleja de los productos de vidrio de alta tecnología que se utilizan hoy en día en los edificios. Equilibrar los requisitos de rendimiento y los deseos estéticos no es tarea fácil.

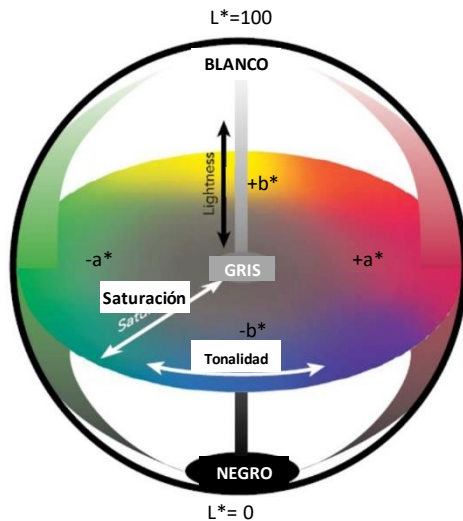
Vitro Vidrio Arquitectónico tiene una larga trayectoria como proveedor de vidrios de baja emisividad de calidad Solarban® y Sungate® para la industria de la construcción arquitectónica. Estos vidrios se componen de sustratos de vidrio transparentes, ultra claros o de color de distintos espesores con una capa ultradelgada adicional depositada en la superficie del vidrio. El proceso de recubrimiento de alta tecnología que se utiliza para lograrlo se denomina deposición catódica por magnetron (MSVD). Este proceso

requiere un nivel de vacío equivalente al del espacio exterior y deposita múltiples capas de diversos metales y óxidos metálicos, un átomo a la vez. Esto requiere mucha energía, controles precisos del flujo de gas, y un monitoreo preciso del proceso para depositar con éxito recubrimientos que se miden en angstroms ( $10^{-10}$  metros). En relación con el espesor del vidrio, el espesor total del recubrimiento es sólo 0.0002 veces más espesa. Sin embargo, incluso con este espesor, los recubrimientos de baja emisividad influyen en la luz que los atraviesa, absorbe o refleja. **Es esta interacción entre la luz, el vidrio recubierto y el ojo del observador la que está directamente relacionada con la uniformidad del color, como se ilustra en el siguiente gráfico.**



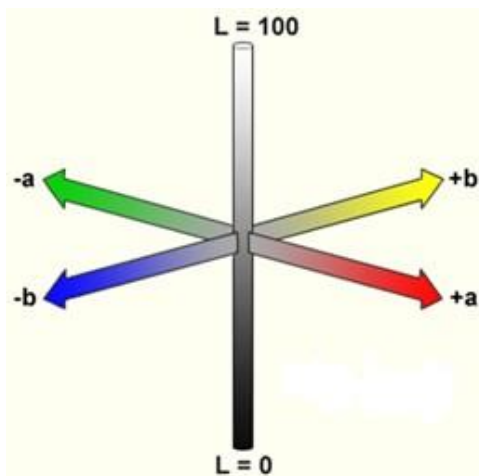
La **uniformidad del color** del vidrio recubierto en una aplicación arquitectónica puede definirse como la variación del aspecto del color y/o de la sombra dentro de una unidad acristalada o entre dos o más unidades acristaladas del mismo tipo en una elevación típica de un edificio. El color del vidrio recubierto, o de cualquier objeto, puede describirse mediante un modelo matemático desarrollado por la CIE (Comisión Internacional de Iluminación). El espacio de color se basa en una coordenada  $L^*$  para la *Luminancia* (claridad-oscuridad) y dos coordenadas de *Color*  $a^*$  y  $b^*$  y, por tanto, es tridimensional, como se ilustra en el gráfico de la siguiente página.

## Uniformidad de color en vidrio de baja emisividad de control solar Solarban®



Color definido en términos de L\*a\*b\* tridimensional

En este modelo de color, los valores L\* van de (0) más oscuro a (100) más claro. Los valores a\* positivos son más rojos, mientras que los valores a\* negativos son más verdes. Los valores b\* positivos son más amarillos, mientras que los valores b\* negativos son más azules. Otra forma de ver el espacio de color L\*a\*b\* se muestra en el siguiente diagrama.



La mayoría de los productos de vidrio y de vidrio recubierto, con la excepción del vidrio de entrapamiento (spandrel) pintado, son de color bastante neutro y tienen valores L\* que van de 20 a 97 y valores a\* y b\* que van de -20 a +20. Por ejemplo, el vidrio de color Solarblue® de 1/4" tiene un color transmitido de L\*=80.0, a\*=-4.8, b\*=-10.0 y, por tanto, parece azul claro. En comparación, el vidrio transparente tiene L\*=95.4, a\*=-1.8, b\*=0.1 y parece ligeramente verde. Si tomamos este mismo vidrio transparente y le ponemos un recubrimiento de baja emisividad, como Solarban® R100, en la superficie #2, ahora L\*=74.1, a\*=-4.7, b\*=-3.2 y el vidrio aparece con un color verde azulado algo más oscuro cuando se mira a través del vidrio en transmisión.

Los recubrimientos de baja emisividad también pueden aumentar la cantidad de reflejo, lo que se suma al color percibido, especialmente cuando se ve desde el exterior del edificio. Bajo ciertas condiciones de iluminación (cielo nublado) y/o ángulos de visión (45 a 60 grados), la apariencia del color reflejado puede dominar especialmente contra el fondo oscuro de un interior sin terminar. Una vez que el edificio esté terminado en el interior y en el exterior, el aspecto del acristalamiento cambiará y las diferencias de color percibidas anteriormente quedarán atenuadas. **Las diferencias de color percibidas debido a los cambios en las condiciones del lugar y/o las condiciones de visualización ilustran aún más la necesidad de medir el color y utilizar los datos junto con las observaciones visuales para evaluar la uniformidad del color.**

La medición del color puede lograrse con un espectrofotómetro. Este tipo de instrumento tiene una fuente de luz, un soporte o puerto para la muestra, una esfera integradora para recoger la luz y un detector. También suele tener un software incorporado para calcular el color medido y mostrar los valores en L\*, a\* y b\* u otros sistemas de color.

## Uniformidad de color en vidrio de baja emisividad de control solar Solarban®

Espectrofotómetros típicos –



Unidad de laboratorio con cámara de muestras cerrada

En el laboratorio normalmente se utilizan espectrofotómetros de sobremesa más grandes, que son los más exactos y precisos y, por tanto, costosos (>\$100,000 USD). Se utilizan para establecer estándares de referencia de color y cuando se requieren mediciones de color más precisas tanto en modo de transmisión como de reflejo.



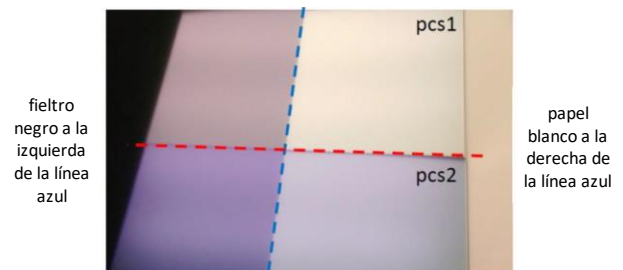
Espectrofotómetro de mano para mediciones en campo

Los espectrofotómetros de mano más pequeños funcionan de forma similar y son eficaces para realizar mediciones de color en campo, ya que son

fácilmente transportables. Una desventaja se relaciona con el hecho de que la muestra que se mide no se mantiene en una cámara cerrada y oscura, sino que se expone a la luz ambiental, lo que puede influir un poco en las lecturas. Además, la unidad de mano sólo mide el color reflejado. Sin embargo, la unidad de mano sigue siendo una herramienta valiosa para medir el color en varios puntos dentro de una unidad de acristalamiento, así como entre múltiples unidades de acristalamiento, incluso de gran tamaño, y también es bastante accesible (~\$10.000 - \$15.000 USD).

**Explicación del cambio de color:** El color de los vidrios calentables *Solarban®* y *Sungate®* designados como VT (templables al vacío) está diseñado para cambiar durante un proceso típico de tratamiento térmico. Estos recubrimientos de baja emisividad térmicamente tratables comienzan siendo de un color, tal y como los produce Vitro en su forma monolítica. El color se modifica aún más durante el proceso de calentamiento posterior utilizado por el fabricante para semi-templar o templar por completo el vidrio, como se muestra en la imagen siguiente.

post calentamiento SB70XL por encima de la línea roja



pre calentamiento SB70XL por debajo de la línea roja

Dos piezas de vidrio Solarban® mostrando el cambio de color debido al tratamiento térmico típico de un fabricante

Cuando el vidrio recubierto se ensambla en una unidad aislante o un laminado junto con otra(s) lámina(s) de vidrio, recubierta(s) o sin recubrir, el color es ahora una mezcla de estos componentes a medida que la luz interactúa con los diversos materiales, incluyendo la(s) cámara(s) de aire y/o la capa intermedia de PVB.

## Uniformidad de color en vidrio de baja emisividad de control solar Solarban®

Durante el desarrollo de los recubrimientos Solarban® o Sungate®, Vitro Vidrio Arquitectónico hace todo lo posible para diseñar, diseñar y probar el recubrimiento considerando todas estas variables y, al final, proporcionar una uniformidad de color que cumpla o supere los requisitos de las aplicaciones de acristalamiento comercial, residencial y de especialidad.

### Diferencias de color y tolerancia

Basándose en el objetivo de color único para cada tipo de producto de vidrio recubierto, se pueden aplicar los requisitos de la norma ASTM C1376 para la uniformidad del color. Tenga en cuenta los comentarios de esta norma en relación con el impacto que las diferentes condiciones de iluminación (es decir, las diferencias entre las condiciones de iluminación de la fábrica y las condiciones en el sitio de trabajo) tendrán en el color percibido.

Si surgen problemas de uniformidad de color en el sitio de trabajo, los datos de color medidos con un espectrofotómetro para el acristalamiento en cuestión, en comparación con un acristalamiento de apariencia aceptable, pueden utilizarse para determinar si se han cumplido o no los requisitos de uniformidad de color.

La **ecuación de diferencia de color** se usa para calcular las diferencias entre dos mediciones de color con fines comparativos [referencia ASTM D2244].

La ecuación de diferencia de color se denomina  $\Delta E^*_{ab}$  y se calcula utilizando lo siguiente:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Por ejemplo, el color reflejado de una muestra recubierta de baja emisividad #1 es  $L^*=33.0$ ,  $a^*=4.0$ ,  $b^*=2.0$  y la muestra #2 es  $L^*=33.5$ ,  $a^*=5.0$ ,  $b^*=4.0$ . La diferencia de color entre ellas se calcula como sigue:

$$\Delta E^*_{ab} = \text{SQRT}((33.5-33.0)^2+(5.0-4.0)^2+(4.0-2.0)^2) = 2.3$$

El cálculo entre un objetivo de color y una medición de color tomada en una pieza de vidrio puede hacerse de forma similar. La norma ASTM C1376 describe cómo se puede obtener el objetivo de color y utilizarlo para determinar la uniformidad del color. La norma ASTM D2244 entra en más detalles sobre cómo se definen las tolerancias de color junto con varios cálculos.

Las **consideraciones sobre la uniformidad del color en el diseño del acristalamiento** deben revisarse durante las primeras etapas del diseño del acristalamiento y la selección del material para un determinado proyecto de construcción. La siguiente lista proporciona muchas de las consideraciones conocidas, pero no es una lista exhaustiva. Así, debe consultarse al fabricante del acristalamiento. También se recomienda encarecidamente realizar una maqueta (*mock-up*) a tamaño real al principio del proyecto en condiciones reales (o simuladas) del edificio terminado y de la ubicación del proyecto. Revise la maqueta en distintas condiciones de visualización (es decir, exterior, interior, en línea recta, en ángulo, nublado, soleado, con persianas, sin persianas, con reflejos de estructuras y árboles adyacentes, con dispositivos de sombreado, etc.) con todos los interesados en el proyecto concreto. Recomiende que se proporcionen los datos del color real del acristalamiento utilizado para la maqueta. La maqueta debe conservarse durante todo el proyecto como referencia de lo que se ha revisado y aprobado en cuanto al aspecto visual. Hay que tener en cuenta que una maqueta realizada en la planta baja con un número limitado de unidades de acristalamiento puede tener un aspecto algo diferente al del muro cortina acristalado terminado a unos treinta pisos de altura debido a consideraciones de color angular.

- El uso de vidrio de color en la lámina exterior, sobre todo con tintes más oscuros, enmascarará gran parte, si no todas, las diferencias de color en el recubrimiento de baja emisividad. Hay que tener cuidado al colocar un vidrio de color más oscuro detrás del vidrio Solarban®, ya que este contraste

## Uniformidad de color en vidrio de baja emisividad de control solar Solarban®

actúa para resaltar la variación de color. Al utilizar un vidrio de color oscuro sin recubrimiento como lámina exterior, una orientación consistente del lado del estaño y del lado del aire en los ensambles de la unidad aislante y/o laminados (consulte el documento TD-122 “Orientación de la superficie de los vidrios de baja transmitancia de luz”).

- Los recubrimientos de baja emisividad desarrollados y optimizados para la superficie #2 de la unidad aislante pueden colocarse en la superficie #3, pero pueden tener más variación de color, especialmente si la lámina exterior es de vidrio Clear o *Starphire Ultra-Clear™*. Para las aplicaciones de control solar, Vitro sugiere que se utilice una lámina exterior de color oscuro para enmascarar las variaciones de color cuando se desee aplicar recubrimientos en la superficie #3 por diseño. Nota: Una unidad aislante con el recubrimiento designado para la superficie #2 que se fabrique o instale al revés tendrá una diferencia de color notable, ya que el recubrimiento está ahora en la superficie #3 tal como se ha instalado.
- Los recubrimientos en múltiples superficies tendrán efectos de color combinados. Por ejemplo, los colores de un recubrimiento de baja emisividad en la superficie #2 y en la superficie #4 pueden ser aditivos. Otro ejemplo sería el de los recubrimientos de baja emisividad en múltiples superficies de las unidades triples.
- Las condiciones del entorno (salientes, sombras y reflejos de árboles o edificios adyacentes) afectan al color percibido y pueden tener un efecto dramático incluso si todo el acristalamiento cumple con los requisitos de uniformidad de color.
- Se puede percibir un color diferente en diferentes elevaciones debido a las diferentes condiciones de visualización. La orientación del edificio en dirección Norte-Sur y Este-Oeste influye en la forma en que la luz solar directa e indirecta incide en el acristalamiento. Por ejemplo, las elevaciones del norte tienden a tener menos luz solar directa y, por tanto, más sombras que pueden afectar al color percibido.
- Durante la instalación del acristalamiento, las unidades con bordes expuestos (sin marcos o filas de ventanas adyacentes) pueden parecer diferentes a la vista por los efectos de la iluminación de los bordes.
- La hora del día y del año afecta a la iluminación ambiental (efecto de luz polarizada) y al color percibido del vidrio.
- Los cielos nublados frente a los soleados pueden afectar al color percibido, a veces de forma drástica.
- Los dispositivos de sombreado interior y las cajas de sombra pueden afectar al color percibido.
- Los tamaños relativos (muy grandes frente a pequeños) de las ventanas adyacentes pueden hacer que el color percibido sea ligeramente diferente debido a la cantidad de superficie de vidrio continua que ve el ojo. De forma similar, los diseños de los muros cortina tienden a ser más críticos que las aberturas perforadas en cuanto a la uniformidad del color percibido. Para más detalles, busque en Internet “metamerismo de tamaño de campo”.
- Los tipos de acristalamiento (spandrel, laminado, vidrio con patrones de puntos/líneas o algún otro patrón decorativo) afectarán al color percibido y añadirán variación. Consulte el Apéndice X1 de la norma ASTM C1376 para obtener más información.
- Se recomienda el uso de inventario adicional para una mejor coincidencia de color si se necesitan reemplazos por la posterior rotura del vidrio de las unidades de acristalamiento instaladas.
- Los efectos del acristalamiento en la apariencia del color de los elementos de diseño interior cuando se mira a través del vidrio o la apariencia de los objetos exteriores cuando se mira desde el interior del edificio hacia afuera están fuera del alcance de este documento técnico.

## Uniformidad de color en vidrio de baja emisividad de control solar Solarban<sup>®</sup>

**Factores que influyen en el color:** Debido a todos los factores enumerados anteriormente que pueden influir, y de hecho influyen, en la percepción del color del acristalamiento de un edificio, hay que tener cuidado al juzgar visualmente la uniformidad del color del acristalamiento. Al llegar a una conclusión sobre el aspecto visual del acristalamiento, hay que tener en cuenta todos los factores que puedan estar influyendo y afectando al color percibido observado en un momento dado.

Se podría concluir que parece haber algo “malo” con el acristalamiento, cuando en realidad las diferencias de color observadas no se deben al vidrio en sí, sino a las condiciones de visualización y/o del entorno.

Esto puede ser especialmente cierto al principio del ciclo de construcción, justo después de la instalación del acristalamiento. Dado que el interior del edificio está sin terminar, el fondo detrás del acristalamiento, cuando se ve desde el exterior, es oscuro con una luz mínima que procede de detrás del vidrio (efecto de agujero negro). Así, lo que se ve principalmente es el color reflejado del acristalamiento, que se ve reforzado por el ángulo de visión.

Una vez que la estructura interior del edificio y la decoración (es decir, las paredes, los muebles, las persianas, las cortinas, las luces, etc.) se han completado, la luz del exterior tiene la oportunidad de pasar a través del vidrio y luego rebotar en esta estructura interna y combinarse con cualquier iluminación interior artificial que resulta en un color transmitido. Este color transmitido se mezcla con el color reflejado y tiende a silenciar el aspecto exterior general del color del acristalamiento. Este fenómeno da mayor credibilidad a la realización de una maqueta completa a tamaño real revisada en diversas condiciones como se ha dicho anteriormente. ***También señala la necesidad de medir el color del acristalamiento con un espectrofotómetro para eliminar la subjetividad al evaluar la uniformidad del color del acristalamiento.***

## Uniformidad de color en vidrio de baja emisividad de control solar Solarban®

TABLA DE HISTORIAL		
CONCEPTO	FECHA	DESCRIPCIÓN
0	2016-08-03	Publicación inicial de la versión arquitectónica
1	2016-10-04	Se actualizó al logotipo y formato de Vitro
2	2018-03-27	Se actualizó logotipo y formato de Vitro
3	2019-06-06	Se revisaron los puntos 1 y 2 en las págs. 4 y 5
4	2020-06-01	Se transfirió a TD-155

Optiblue, Optigray, Vitro y el logotipo de Vitro, Solarban, Starphire son marcas registradas de Vitro.

**PALABRAS CLAVE:** color, acristalamiento, aspecto, uniformidad, estética, baja emisividad, vidrio recubierto, luminancia, transmisión, reflejo, ecuación de diferencia de color, espectrofotómetro, cambio de color, monitorización del color, objetivo de color, gráfico de color, tolerancia de color, diseño de acristalamiento, metamerismo, factores de influencia del color, maqueta

**REFERENCIAS:** ASTM C1376 & D2244, CIE, LBNL, IGDB, US DOE, TD-122

*Este documento pretende informar y ayudar al lector en la aplicación, uso y mantenimiento de los productos Vitro Vidrio Arquitectónico. El rendimiento y los resultados reales pueden variar según las circunstancias. Vitro no ofrece ninguna garantía en cuanto a los resultados que se obtendrán del uso de toda o parte de la información proporcionada en este documento, y por la presente renuncia a cualquier responsabilidad por lesiones personales, daños a la propiedad, insuficiencia del producto o cualquier otro daño de cualquier tipo o naturaleza que surja del uso por parte del lector de la información contenida en este documento.*