

Aplicación de la goniospectrofotometría a la caracterización de efectos decorativos especiales

S. MESTRE⁽¹⁾, A. MORENO⁽¹⁾, P. AGUT⁽¹⁾, M.C. BORDES⁽¹⁾, J.J. PÉREZ⁽²⁾, S. REVERTER⁽²⁾, E. NAVARRO⁽²⁾

⁽¹⁾ Instituto de Tecnología Cerámica (ITC). Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE)
Universitat Jaume I. Castellón. España.

⁽²⁾ Coloresmalt, S.A. CV-190 km7, La Foya-Alcora, Castellón, España.

Este trabajo ha sido presentado como comunicación oral en el XI World Congress on Ceramic Tile Qualicer. (Castellón, España, 2010)

La evaluación del color de los vidriados denominados “metalizados” supone un problema importante, máxime cuando no existe una definición clara para este tipo de materiales. Se demuestra que no es suficiente un espectrofotómetro para evaluar el color de estos vidriados, mientras que un goniospectrofotómetro de cuatro ángulos permite obtener un conjunto de datos que se aproximan en mayor medida a una descripción de su aspecto. Sin embargo la descripción de la componente de color del aspecto mediante doce coordenadas cromáticas es difícil de manejar y por ello se propone un índice para evaluar el aspecto “metalizado” a semejanza de los índices de blancura o amarillez. Dicho índice se calcula a partir de los datos del goniospectrofotómetro, y ha permitido diferenciar entre vidriados “metalizados” y “no metalizados” dentro del conjunto de muestras utilizadas en este trabajo.

Palabras clave: vidriados metalizados, goniospectrofotometría, índice.

Application of goniospectrophotometry to the characterisation of special decorative effects

The evaluation of the colour of so-called ‘metallised’ glazes is an important problem, especially since there is no clear definition for this type of material. The study shows that a spectrophotometer is not sufficient for evaluating the colour of these glazes, whereas a goniospectrophotometer with four angles of viewing enables a set of data to be obtained that more closely describe glaze appearance. However, the description of the colour component of glaze appearance using twelve chromatic coordinates is difficult to handle. For that reason, an index is proposed, similar to the whiteness or yellowness indices, for the evaluation of ‘metallised’ appearance. This index is calculated from the goniospectrophotometer data, and has allowed ‘metallised’ glazes to be differentiated from ‘non-metallised’ glazes, in the set of samples used in this study.

Keywords: metallised glazes, goniospectrophotometry, index.

1. INTRODUCCIÓN

La medida del color es una operación habitual en muchos sectores, tanto en los laboratorios como a escala industrial, mediante el uso de colorímetros triestímulo o espectrofotómetros. En el campo cerámico la medida instrumental del color en baldosas de color uniforme es una técnica bastante extendida. De hecho existen normas para la medida del color de las baldosas, así como de las diferencias de color para detectar desviaciones con respecto a un patrón de producción⁽¹⁾. Sin embargo, pesar del progreso en la instrumentación, en última instancia es el observador humano el que considera que dos muestras poseen o no la misma apariencia, y ello ocasiona notables problemas cuando se trata de evaluar baldosas que presentan dificultades específicas.

En los últimos años la extensión en el uso de los vidriados agrupados bajo la denominación “metalizados”, cuyas propiedades ópticas los asemejan a los antiguos lustres, ha planteado un desafío notable a las técnicas colorimétricas, ya que estos vidriados poseen una característica muy especial, su color cambia en función de los ángulos de iluminación y de observación, por lo que resulta muy complejo determinar

visualmente o instrumentalmente si dos muestras poseen el mismo aspecto. De hecho, ni siquiera existe una definición ampliamente aceptada de lo que implica el aspecto metalizado, aunque se han realizado algunos intentos de definir sus características desde el punto de vista óptico⁽²⁾.

En otros sectores, como la automoción, las medidas colorimétricas para este tipo de materiales se realizan con goniospectrofotómetros, equipos capaces de medir el color a diferentes ángulos de observación, para una iluminación con un ángulo de incidencia dado⁽³⁾. En principio las medidas se deberían realizar para cualquier combinación de ángulos de incidencia y observación de modo que se obtuviese una descripción completa del aspecto del vidriado, pero en muchas normas se considera suficiente el realizar las medidas con un ángulo de iluminación fijo, y obtener las coordenadas cromáticas a cuatro ángulos de observación convenientemente escogidos. A partir de las coordenadas cromáticas se puede evaluar la diferencia de color ΔE para cada ángulo de observación y se define la diferencia máxima admisible, según las condiciones de trabajo⁽⁴⁾.

TABLA I: COORDENADAS CROMÁTICAS DE LOS VIDRIADOS METALIZADOS

Vidriado	espectrofotómetro			ángulo	goniospectrofotómetro		
	L*	a*	b*		L*	a*	b*
A01	68.4	-2.2	5.2	25°	36.4	0.5	3.8
				45°	15.1	3.6	5.9
				75°	9.5	5.5	7.0
				110°	9.0	5.9	7.2
A02	57.6	10.3	8.8	25°	75.6	9.3	9.3
				45°	52.6	10.6	8.1
				75°	35.8	13.5	8.4
				110°	35.0	13.2	7.7
A03	57.2	2.0	9.9	25°	78.0	1.3	12.1
				45°	44.5	1.7	6.2
				75°	25.5	5.9	7.4
				110°	22.7	7.8	9.4
A04	60.5	2.0	5.0	25°	29.0	12.4	10.5
				45°	23.0	17.3	18.8
				75°	22.1	19.4	22.6
				110°	21.3	20.4	24.1
A05	60.3	-1.6	4.0	25°	57.0	-1.5	0.1
				45°	24.2	5.6	3.0
				75°	16.2	12.1	9.6
				110°	16.5	13.4	12.2
A06	72.4	1.8	10.6	25°	53.6	7.4	10.6
				45°	27.1	12.7	14.0
				75°	20.8	15.6	18.5
				110°	21.1	16.7	19.9
A07	70.8	5.6	13.0	25°	48.3	13.8	15.9
				45°	28.2	16.3	17.4
				75°	20.9	18.1	19.2
				110°	19.7	19.3	20.0
A08	54.9	15.2	11.6	25°	67.3	14.9	10.6
				45°	41.8	18.4	12.6
				75°	29.7	20.5	14.8
				110°	26.7	20.0	13.8
A09	57.5	10.1	8.2	25°	75.0	8.2	7.8
				45°	45.1	12.8	7.8
				75°	33.2	15.6	9.0
				110°	32.6	14.3	8.0
A10	68.8	8.6	15.5	25°	51.7	14.9	16.8
				45°	31.8	17.5	18.9
				75°	23.5	18.9	19.6
				110°	21.8	19.8	19.7
A11	59.7	15.2	14.3	25°	58.8	17.6	14.1
				45°	37.4	19.9	16.8
				75°	27.8	21.1	18.2
				110°	25.0	20.7	17.1
A12	62.9	8.2	17.3	25°	83.0	8.0	19.9
				45°	45.3	8.0	12.5
				75°	28.3	11.3	11.3
				110°	22.6	11.8	10.8
A13	56.8	2.8	8.5	25°	71.9	2.9	10.4
				45°	52.7	2.8	7.7
				75°	33.6	4.4	5.6
				110°	29.6	5.8	5.8
A14	69.2	-0.9	3.0	25°	36.1	7.0	9.1
				45°	21.4	13.0	18.4
				75°	16.9	14.4	19.5
				110°	16.3	15.1	20.2
A15	68.3	-2.2	2.1	25°	33.9	5.8	8.8
				45°	17.8	10.2	14.7
				75°	14.1	11.2	15.2
				110°	13.8	11.7	15.9
A16	69.9	-1.1	9.5	25°	80.3	-2.0	7.9
				45°	31.8	2.5	4.8
				75°	16.1	9.4	9.1
				110°	16.4	10.8	11.5
A17	69.7	-3.5	4.4	25°	39.0	0.3	1.1
				45°	16.0	4.3	3.2
				75°	10.0	7.9	7.3
				110°	9.6	9.3	8.9
A18	54.4	8.6	19.4	25°	15.2	0.9	4.2
				45°	4.4	0.1	1.6
				75°	1.8	0.5	0.8
				110°	1.2	0.0	0.4
A19	57.3	2.6	11.4	25°	12.6	2.9	2.4
				45°	9.1	3.1	2.8
				75°	7.9	3.1	5.8
				110°	6.1	3.1	5.2
A20	56.0	6.5	24.7	25°	13.0	0.1	1.8
				45°	4.5	-0.1	0.4
				75°	3.1	0.4	1.1
				110°	2.7	-0.8	0.2

Aunque se puedan determinar las coordenadas cromáticas o las diferencias de color en función del ángulo de observación, no se ha definido un parámetro único que pueda considerarse una evaluación del aspecto “metálico” del vidriado. En este trabajo se presenta una propuesta preliminar de un “índice de aspecto metálico” basado en las medidas del color a cuatro ángulos diferentes, y una simplificación del espacio de color CIELab, que se ha validado experimentalmente con un grupo de vidriados de diferentes características.

2. EXPERIMENTAL

Este estudio se ha realizado sobre una selección de 27 vidriados diferentes. 20 de ellos eran vidriados de distintos colores con aspecto “metálico”. Los restantes vidriados poseían un aspecto no metalizado, generados a partir de mezclas de frita y pigmentos en diferentes proporciones.

La evaluación del color de los vidriados se realizó utilizando dos instrumentos diferentes:

- Un espectrofotómetro de esfera integradora con geometría difusa/8° que analiza toda la luz reflejada por la muestra (Macbeth Color-Eye 7000A).
- Un goniómetro según la norma DIN6175-2⁽⁴⁾ cuya configuración óptica permite, para un ángulo de iluminación de 45°, determinar la composición espectral de la luz devuelta por la muestra a 4 ángulos especulares de observación: 25°, 45°, 75° y 110° (figura 1), siendo el ángulo especular el definido con respecto a la dirección especular a la iluminación (Macbeth 740GL).

Con ambos instrumentos se realizaron 5 medidas por muestra, utilizando un iluminante estándar CIE D₆₅ y observador estándar CIE 10°, obteniendo las curvas de reflectancia en función de la longitud de onda para cada ángulo, y a partir de ellas las coordenadas cromáticas CIELab⁽⁵⁾.

3. RESULTADOS

3.1 Comparación de los dos instrumentos de medida del color.

Los dos instrumentos se emplearon para determinar las coordenadas cromáticas de los 27 vidriados, y así comparar los datos generados (Tabla I y Tabla II). De las tablas se deduce inmediatamente que las coordenadas cromáticas obtenidas con el espectrofotómetro se diferencian notablemente de las generadas por el goniómetro en la mayoría de los casos, lo cual es coherente con el diferente modo de operación de cada equipo (recoger toda la radiación devuelta por la superficie frente a recoger la fracción de radiación devuelta en direcciones específicas). Sin embargo, en los datos del goniómetro se aprecia que las coordenadas cromáticas obtenidas a cada ángulo varían muy acusadamente en el caso de los vidriados “metálicos”, mientras que las variaciones son muy pequeñas en el caso de las muestras que no poseían dicha propiedad. Este hecho se corresponde con la característica de los metales de presentar la mayor proporción de luz devuelta en la dirección especular, y devolver menor proporción de luz a medida que el ángulo de medida se aleje en mayor grado de dicha dirección.

Tabla II: COORDENADAS CROMÁTICAS DE LOS VIDRIADOS NO METALIZADOS

Vidriado	espectrofotómetro			ángulo	goniómetro		
	L*	a*	b*		L*	a*	b*
A21	64.8	1.3	4.0	25°	62.7	1.5	4.5
				45°	62.0	1.5	4.8
				75°	61.7	1.5	4.6
				110°	61.8	1.5	4.3
A22	94.3	-0.9	0.9	25°	94.3	-1.1	1.1
				45°	94.3	-1.1	1.4
				75°	94.3	-1.0	1.2
				110°	94.6	-1.0	1.0
A23	26.8	0.4	0.0	25°	3.5	1.6	0.8
				45°	3.2	1.5	1.0
				75°	3.5	2.0	1.2
				110°	3.8	2.1	1.2
A24	53.8	39.9	27.8	25°	49.7	45.5	35.2
				45°	49.3	46.0	36.1
				75°	49.2	46.0	35.9
				110°	49.5	45.7	35.5
A25	42.3	-11.2	13.8	25°	35.0	-15.3	21.7
				45°	34.5	-15.6	22.0
				75°	35.1	-15.4	21.5
				110°	35.9	-15.6	21.6
A26	83.0	-3.7	73.5	25°	82.3	-3.6	85.8
				45°	82.0	-3.6	86.4
				75°	81.7	-3.6	86.2
				110°	81.7	-3.6	86.0
A27	27.2	10.3	-20.3	25°	6.1	32.2	-42.4
				45°	5.6	32.2	-42.4
				75°	5.1	32.3	-42.1
				110°	4.9	31.0	-40.8

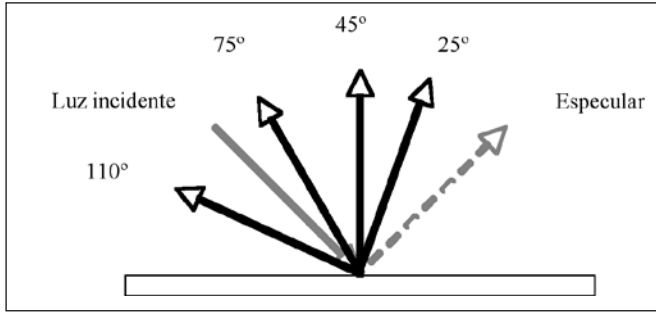


Figura 1: Esquema de los ángulos de incidencia (45° respecto a la normal) y de medida (25°, 45°, 75° y 110° respecto a la reflexión especular) del goniómetro utilizado.

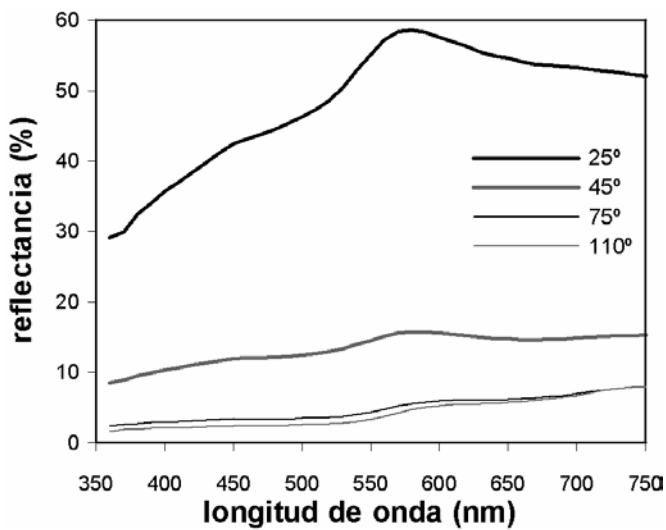


Figura 2: Evolución de la reflectancia frente a la longitud de onda y el ángulo de medida para el vidriado A03.

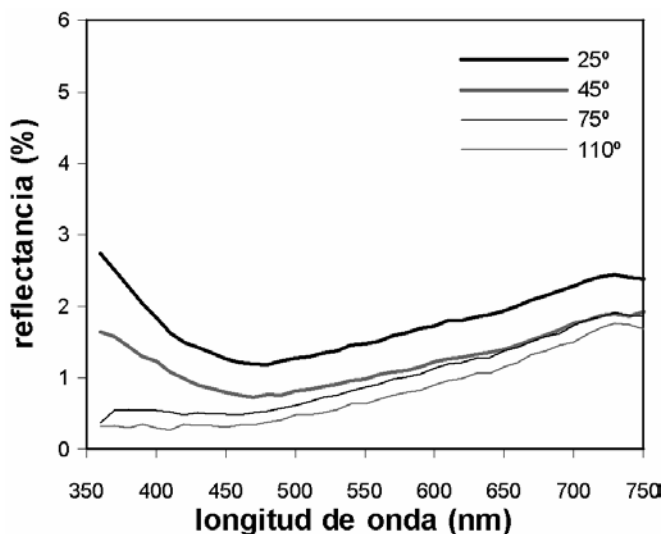


Figura 3: Evolución de la reflectancia frente a la longitud de onda y el ángulo de medida para el vidriado A19.

Las diferencias en los valores de las coordenadas cromáticas obtenidos a cada ángulo son el resultado de cambios notables en las curvas de reflectancia. Como ejemplo, en las figuras 2 y 3 se detallan las curvas de reflectancia obtenidas para las muestras A03 y A19. En el primer caso se aprecia que el vidriado presenta la máxima reflectancia a todas las longitudes de onda para el ángulo más próximo a la dirección especular (25°), y a medida que el ángulo de observación aumenta, la reflectancia disminuye, pero no de una forma progresiva, sino de modo muy acusado al principio (45°) y muy levemente al final (75° y 110°). En el vidriado A19 el comportamiento es cualitativamente similar pero mucho menos acusado, ya que el desplazamiento de las curvas de reflectancia frente al ángulo de medida es mucho menor. También se aprecia que el desplazamiento de las curvas no es homogéneo, y puede cambiar completamente la forma de la curva, como ocurre en la A03.

Como ya se ha indicado, los datos incluidos en la tabla I corresponden a los valores medios de cinco medidas, y podría plantearse si las notables variaciones de color detectadas en función del ángulo de medida, corresponden a cambios locales en las características ópticas de la superficie de los vidriados "metalizados". Para dilucidar la cuestión se calculó la diferencia de color de las cinco medidas realizadas en cada vidriado respecto a su valor promedio. Para este cálculo, se ha utilizado la ecuación que indica la norma alemana DIN6175-2⁽⁴⁾ referente a las tolerancias de color en pinturas metalizadas del sector de la automoción. El uso de la ecuación indicada, permite obtener una mayor aproximación a la percepción visual de las diferencias de color, y difiere respecto a la propuesta por el sistema CIELab* (Ec.1), en el peso que se le asigna en la evaluación de ΔE_{DIN} a la variación de cada coordenada cromática. En la figura 4 se han representado los valores medios de los ΔE_{DIN} calculados según dicha norma para cada una de los vidriados metalizados.

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (\text{Ec.1})$$

Se observa que la diferencia media de color obtenida entre los distintos puntos de la superficie del vidriado respecto al valor promedio es, excepto en un caso, inferior a 2 para todas las muestras y ángulos ensayados. Dado que la citada norma considera que un valor de ΔE_{DIN} superior a 1 ya supone una diferencia apreciable visualmente, ello implica que algunos de los vidriados ya presentan heterogeneidades en el color visualmente apreciables dentro de la misma pieza, heterogeneidades que serían detectables con los cuatro ángulos de medida del goniómetro. Sin embargo, si se comparan los valores de ΔE_{DIN} calculados con las diferencias en las coordenadas cromáticas entre vidriados obtenidas a diferentes ángulos (tabla I), se aprecia que estas últimas son mayoritariamente superiores a las diferencias de color dentro de la misma pieza, y por lo tanto, se puede considerar que dichas diferencias no son debidas a la variabilidad en la superficie de los vidriados, sino a diferencias reales en la composición espectral de la luz devuelta en cada dirección.

Los datos colorimétricos indican que el aspecto "metalizado" conlleva variaciones importantes en las coordenadas cromáticas en función del ángulo de observación, situación que no ocurre en los vidriados carentes de este efecto. En consecuencia, una primera evaluación de la diferencia de aspecto "metalizado" entre dos muestras se podría obtener comparando la diferencia de color obtenida con el espectro-

fotómetro, con las diferencias de color en función del ángulo de observación, obtenidas con un gonioprotómetro. Siguiendo esta hipótesis, en la figura 5 se han representado las diferencias de color ΔE^* entre las muestras A03 y A19, obtenidas para las cinco condiciones de evaluación del color de cada vidriado (los datos correspondientes al espectrofotómetro y los cuatro ángulos del gonioprotómetro), para lo cual se ha utilizado la ecuación CIELab* (Ec.1, no se ha utilizado la ecuación de la norma DIN6175-2 porque está definida para pequeñas diferencias de color y puede generar resultados erróneos en el caso de variaciones grandes de color, como es este caso). Para facilitar la visualización de las diferencias, también se han representado los puntos correspondientes a las medidas en el espacio de color CIELab (figura 6).

En la figura 5 se observa que la ΔE^* obtenida a partir del espectrofotómetro (Esp.) es próxima a la unidad, y muy inferior a las que se obtienen para los distintos ángulos de medida con el gonioprotómetro. Por tanto, en este caso la evaluación de la diferencia de color mediante el instrumento de geometría difusa podría dar lugar a la errónea conclusión de que ambas superficies son muy similares, cuando visualmente se detectarían diferencias muy notables, sobre todo si las piezas se visualizan en un ángulo próximo a la dirección especular (25°), pero incluso con ángulos alejados del especular (75°, 110°), la diferencia de color apreciada visualmente no sería acorde con la determinada instrumentalmente. Este hecho demuestra que los espectrofotómetros no son equipos adecuados para evaluar el color de los vidriados de aspecto "metalizado".

Extendiendo el cálculo de las diferencias de color realizado para la pareja A03-A19 a todas las posibles combinaciones de los vidriados "metalizados", el primer resultado que se obtiene es que la diferencia de color calculada a partir de las coordenadas cromáticas que proporciona el espectrofotómetro es en todos los casos inferior a la que se obtiene para los distintos ángulos de medida con el gonioprotómetro.

Como ejemplo, en la figura 7 se ha representado las diferencias de color ΔE^* para aquellos pares de muestras que presentan un valor de este parámetro obtenido mediante el espectrofotómetro (Esp) inferior a 2. En la figura se aprecia que el ángulo de observación para el cual se obtiene la mayor ΔE^* depende de cada pareja de muestras, y no se cumple que

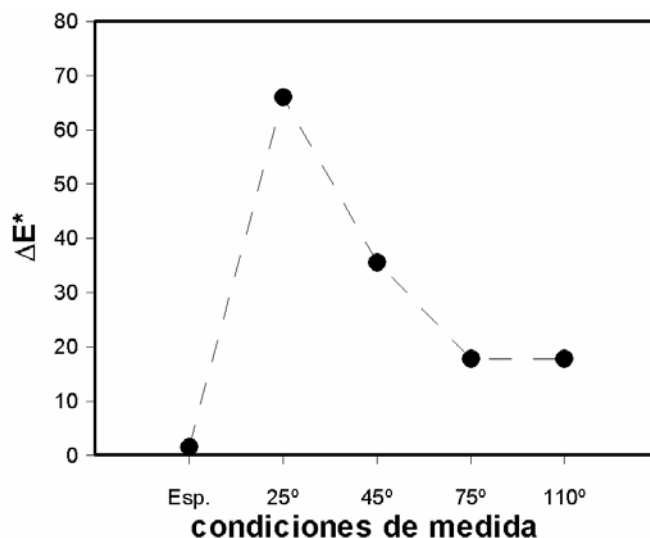


Figura 5: Diferencias de color ΔE^* entre los vidriados A03 y A09 en función del equipo empleado (Esp. Espectrofotómetro y los ángulos corresponden al gonioprotómetro).

sea el ángulo de 25° el que conduce a la mayor diferencia, como ocurre en el par A03-A19, sino que la máxima diferencia depende de cada pareja concreta.

Calculando las frecuencias con las que un ángulo de observación conduce al mayor valor de ΔE^* en la población constituida por todas las posibles parejas de vidriados "metalizados" (ver tabla III), se obtuvo que el ángulo de 25° fue el que presentaba la mayor frecuencia, lo cual era de esperar por ser el más próximo a la dirección especular, pero un porcentaje de parejas próximo al 30% presentaron el máximo para otros ángulos de observación. Estos resultados indican que no se puede medir la diferencia en el carácter "metalizado" de un vidriado basándose en el ΔE^* medido para el ángulo de 25°, ya que existe una probabilidad no despreciable de que dicho dato no corresponda al ΔE^* máximo. Por otra parte, sería deseable que la evaluación del aspecto "metalizado" de un vidriado pudiera realizarse a partir de los propios datos colorimétricos del vidriado, sin necesidad de compararlo con una referencia concreta

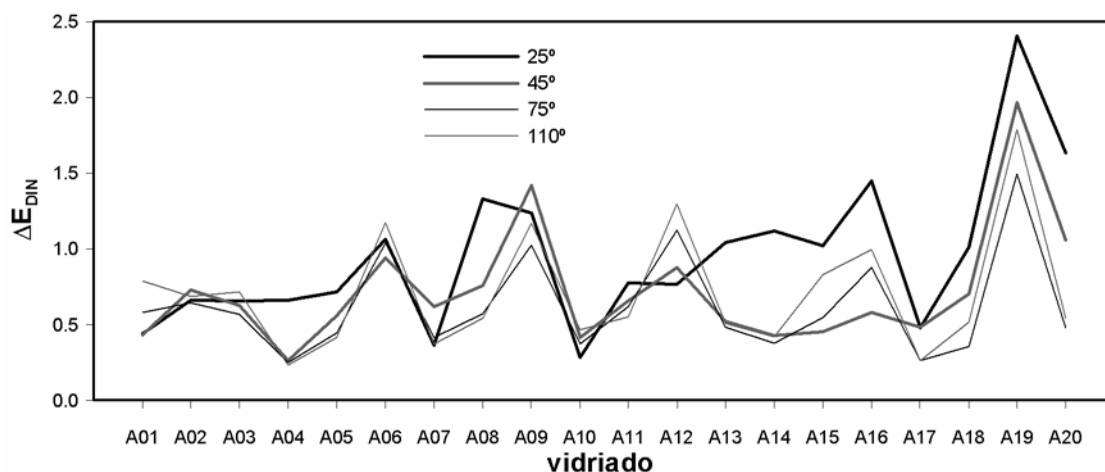


Figura 4: Diferencia de color ΔE_{DIN} entre las distintas medidas respecto al promedio en cada vidriado "metalizado" (según norma DIN6175-2).

3.2 Propuesta de un índice para la estimación del aspecto "metalizado" de superficies cerámicas vidriadas

Dadas las propiedades ópticas de los vidriados "metalizados" y considerando, como se ha puesto de manifiesto previamente, la necesidad de utilizar el goniómetro para la correcta caracterización de su aspecto, la descripción de las características cromáticas de estos vidriados se podría realizar siguiendo la práctica habitual en otros sectores, que describen las coordenadas cromáticas medidas a cuatro ángulos estandarizados. Sin embargo, resulta conveniente disponer de un parámetro que permita estimar de forma objetiva el aspecto "metalizado", ya que la descripción mediante varios juegos de coordenadas cromáticas puede conducir a confusiones, y siempre resulta más sencillo manejar un único parámetro, a semejanza de los índices de blancura, aunque obviamente se pierda información al comprimir varias variables en una sola.

La propuesta de un índice para describir el aspecto "metalizado" de los vidriados parte de la figura 6. La unión en el espacio de color CIELab de los puntos definidos por las cuatro triadas de coordenadas cromáticas (L^* , a^* , b^*) generadas por el goniómetro al medir un vidriado "metalizado", da lugar a un tetraedro irregular cuyas aristas corresponden a la ΔE^* entre los distintos ángulos de medida. En dicha figura se observa que los tetraedros definidos para las dos muestras están situados en zonas distintas del espacio de color, pero sobre todo poseen dimensiones muy diferentes, lo cual es un indicio muy notable de las variaciones en el color que presentan ambas superficies en función del ángulo de observación. En consecuencia, cuanto mayor sea la longitud de las aristas del tetraedro, mayores serán las diferencias de color para un vidriado dado al modificar el ángulo de observación, y por tanto la suma de las seis aristas del tetraedro pueden aportar una primera aproximación a un índice que describa el aspecto "metalizado", ya que si no existiesen diferencias entre las coordenadas CIELab obtenidas a diferentes ángulos, el

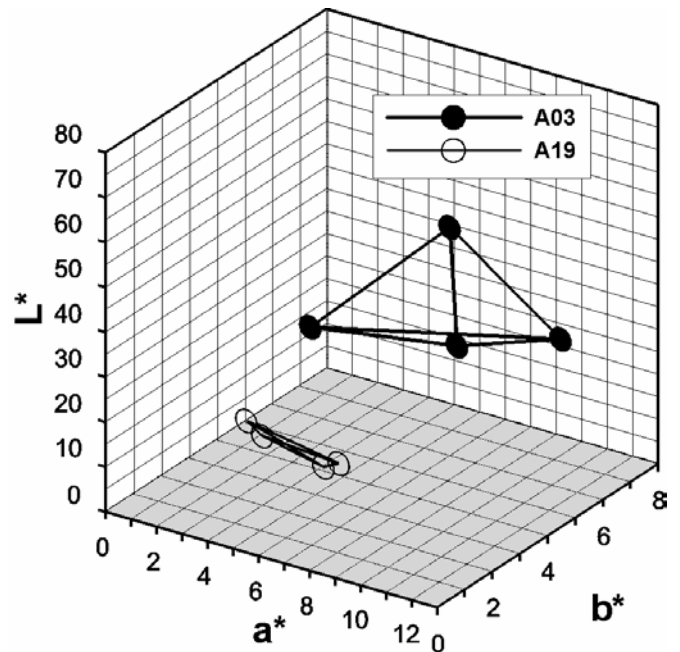


Figura 6: Situación en el espacio CIELab de las coordenadas cromáticas de los vidriados A03 y A19, evaluadas a los cuatro ángulos del goniómetro.

TABLA III: FRECUENCIA CON LA QUE SE OBTIENE LA MAYOR ΔE^* PARA CADA ÁNGULO DE OBSERVACIÓN.

Ángulo de observación	25°	45°	75°	110°
Frecuencia de aparición del ΔE^* máximo (%)	71	18	4	7

TABLA IV: ÍNDICE PARA LA ESTIMACIÓN DEL CARÁCTER "METALIZADO" CALCULADO PARA TODOS LOS VIDRIADOS ANALIZADOS.

Muestra	I_M	Muestra	I_M	Muestra	I_M
A1	18.49	A10	20.37	A19	5.20
A2	28.54	A11	22.98	A20	7.01
A3	38.57	A12	41.09	A21	0.78
A4	11.65	A13	30.11	A22	0.38
A5	31.00	A14	15.74	A23	0.69
A6	23.76	A15	14.37	A24	0.82
A7	19.70	A16	44.59	A25	1.00
A8	27.76	A17	21.61	A26	0.67
A9	28.99	A18	9.46	A27	1.75

valor del índice sería nulo. Se podría objetar que el volumen del tetraedro también sería representativo de las diferencias de color, pero en el caso de que los puntos representativos de las cuatro medidas en el espacio CIELab fuesen coplanares, el volumen del tetraedro sería nulo, mientras que la suma de las aristas seguiría siendo un valor no nulo. De hecho en la figura 6 los puntos correspondientes al vidriado A19 son casi coplanares.

El valor máximo del índice propuesto vendría dado por el mayor tetraedro que sea posible definir dentro del espacio de color CIELab, que es un espacio finito. Una primera aproximación se puede obtener considerando que el espacio de color CIELab es una esfera con un radio igual a 50 y cuyo centro se sitúa en $L^* = 50$ y $a^* = b^* = 0$. En este caso el tetraedro de mayor tamaño que se puede inscribir dentro de dicha esfera es un tetraedro regular cuya arista es igual a $100 \cdot (2/3)^{0.5}$, y que por tanto la suma de las seis aristas es igual a $600 \cdot (2/3)^{0.5}$, que sería el valor máximo alcanzable por el índice (Figura 8).

Para facilitar la comprensión del índice, el valor de la suma de las seis aristas correspondientes a las diferencias de color de un vidriado determinado, se puede normalizar con respecto al valor máximo posible de la suma y definir el índice final como un porcentaje de dicho máximo (Ec.2), de este modo el valor de I_M podría variar entre 0 y 100.

$$I_M = \frac{\Delta E_{25-45}^* + \Delta E_{25-75}^* + \Delta E_{25-110}^* + \Delta E_{45-75}^* + \Delta E_{45-110}^* + \Delta E_{75-110}^*}{600 \cdot \sqrt{2/3}} \cdot 100 \quad (Ec.2)$$

Aplicando esta ecuación a los 27 vidriados ensayados se obtienen los resultados detallados en la tabla IV. Resulta evidente que los vidriados con aspecto "metalizado" generan valores de I_M superiores a 5 (A01 a A20), mientras que los vidriados que no poseen dicha característica (A21 a A27), presentan valores del índice inferiores a 2. En consecuencia, el índice propuesto es capaz de separar los vidriados "metalizados" de los normales, y además se puede considerar que cuanto más elevado sea su valor, mayor aspecto "metalizado" poseerá el vidriado. Estos resultados también implican que es necesario utilizar un

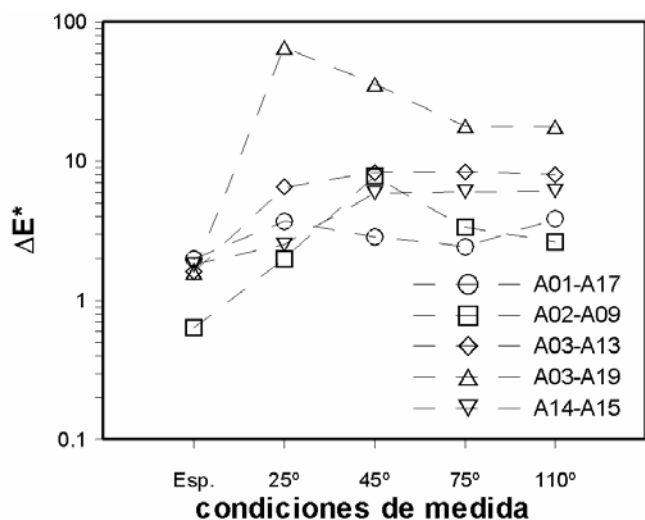


Figura 7: Diferencias de color ΔE^* para diferentes parejas de vidriados en función del equipo empleado.

gonioespectrofotómetro para obtener una evaluación de esta propiedad, ya que I_M no puede obtenerse a partir de los datos proporcionados por un espectrofotómetro.

Obviamente el índice propuesto es una primera aproximación, ya que es necesario realizar un desarrollo ulterior para confirmar su validez. Las tareas a realizar serían las siguientes:

- Realizar las medidas sobre una base de vidriados mucho más amplia, y correlacionar los valores de I_M con apreciaciones visuales sobre los vidriados. De este modo se podría definir el intervalo de valores de I_M a partir del cual se puede considerar que un vidriado posee un aspecto "metalizado". De este estudio puede resultar que la relación entre I_M y la percepción visual no sea lineal, sino que posea otro tipo de dependencia, que en dicho caso habría que determinar.
- Recalcular el factor de normalización, ya que el espacio de color CIELab es en realidad una esfera deformada, y por tanto el problema de identificar el tetraedro de mayor tamaño que es posible inscribir en el mismo no es trivial.

4. CONCLUSIONES

Los vidriados con aspecto "metalizado" presentan variaciones de color según el ángulo de observación, de modo que su aspecto no puede ser evaluado correctamente con los espectrofotómetros de reflectancia difusa, ya que las coordenadas cromáticas que se evalúan con dicho equipo pueden corresponder a colores muy alejados de los apreciados visualmente. Los gonioespectrofotómetros resultan más adecuados para describir el aspecto de estos vidriados, aunque ello conlleva definir un conjunto de coordenadas

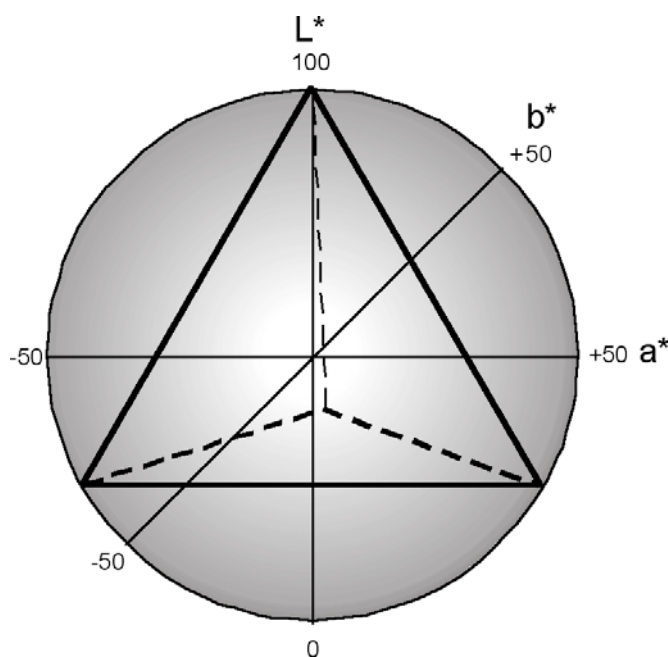


Figura 8: Representación esquemática del tetraedro de mayor tamaño que se puede insertar en la simplificación del espacio CIELab.

cromáticas para cada ángulo de observación, lo cual implica manejar un volumen de datos más elevado.

Se ha comprobado que no existe ningún ángulo de medida cuyas diferencias entre dos vidriados se pueda correlacionar con diferencias en el "metalizado". Aunque las medidas con el ángulo de 25° suelen conducir a las mayores diferencias de color, dependiendo del vidriado dicho máximo puede aparecer a otros ángulos de observación.

Se ha propuesto un índice que permite evaluar instrumentalmente el aspecto "metalizado" de los vidriados a partir de las medidas de un goniospectrofotómetro de cuatro ángulos, que no necesita una referencia externa y tampoco depende de cuál sea el ángulo donde aparezca la mayor diferencia de color.

BIBLIOGRAFÍA

1. UNE-EN-ISO 10545-16: 2001. Baldosas cerámicas. Parte 16: Determinación de pequeñas diferencias de color. AENOR. Madrid.
2. V. Reillon, S. Berthier, C. Andraud. "New perspectives for the understanding of the optical properties of middle-age nano-cermet: The lustres". *Physica B* 394, 242-247, 2007.
3. R.S. Hunter, R.W. Harold. "The measurement of appearance". New York: John Wiley & Sons, 1987.
4. DIN 6175-2:2001. Farbtoleranzen für Automobillackierungen. Teil 2: Effektlackierungen. Deutsches Institut für Normung, Berlin.
5. Colorimetry. International Commission on Illumination. Publication CIE N°15.2 Viena, 1986.

Recibido: 5-5-10

Aceptado: 14-7-10

