



Desafios na Medição e Caracterização do Goniocromatismo

Autores: Esther Perales, Elisabet Chorro, Víctor Navarro e Francisco Miguel Martínez-Verdú
Grupo Cor e Visão
Departamento de Óptica
Universidade de Alicante, Espanha
Tradução e revisão técnica: Kelson dos Santos Araújo
Universidade do Minho, Portugal

Resumo

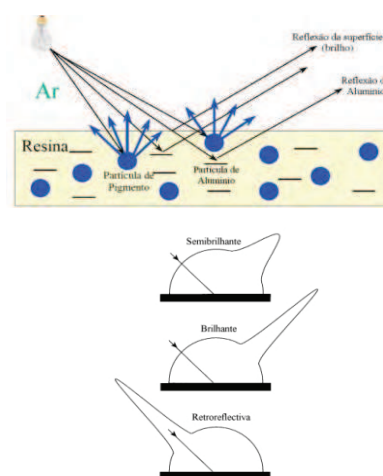
O goniocromatismo, efeito que consiste na alteração da cor visualizada em função da variação do ângulo de iluminação e/ou de observação, ocorre quando o material avaliado contém pigmentos de efeitos especiais [1, 2], tais como partículas laminadas de alumínio ou pigmentos multicamadas (de interferência). Nos últimos 100 anos vimos o apogeu comercial alcançado pela química de corantes e pigmentos. Deste modo, o interesse pelos pigmentos com efeitos especiais não pára de crescer já por muitos anos e em setores tão diversos como plásticos, cosméticos, cerâmicas, tintas gráficas, papel e embalagens, tintas e revestimentos etc.. No entanto, ainda falta muito para compreendermos plenamente a caracterização óptica e visual (colorimétrica) destes materiais, bem como o controle exato da formulação destes pigmentos especiais para prever seus efeitos ópticos e visuais. Este artigo apresenta uma revisão do estado da arte (situação atual do desenvolvimento tecnológico na área) com enfoque nas problemáticas da medição e da caracterização do goniocromatismo.

1. Introdução

Os pigmentos de partículas metálicas, com formatos laminados e dispostos de modo controlado em paralelo à

superfície externa, são semelhantes aos espelhos. Não obstante, já que são espelhos imperfeitos, apresentam reflexões ligeiramente afastadas do ângulo especular. Estes espelhos tampouco estão alinhados perfeitamente, pelo que o ângulo de iluminação relativo ao pigmento não é sempre o mesmo. Como resultado, os materiais que contêm pigmentos de partículas metálicas refletem uma quantidade destacada de luz incidente nas direções dos ângulos aespulares próximos, conforme sua aparência visual final nas qualidades de brilhantes (glossy), semibrilhantes (semi-glossy), ou inclusivamente retroreflectivas (Figura 1).

Figura 1. Superior: esquema das reflexões especular e aespular de um revestimento composto por partículas metalizadas (Al) e pigmentos convencionais. Inferior: perfis polares de reflectância para 3 tipos de brilho.





Conforme vamos afastando o ângulo de observação do ângulo especular, a luminosidade ou claridade da amostra pode mudar significativamente. Quando avaliamos amostras coloridas que contêm partículas metálicas e pigmentos convencionais, a característica mais importante é conhecida como *flop* (iridescência), definida como a alteração em termos de luminosidade (claridade) quando a amostra é observada desde os ângulos aespeculares próximos até os ângulos aespeculares distantes. O maior brilho é visto nos ângulos aespeculares próximos. Uma equação para o índice de *flop* foi desenvolvida com base nas medições realizadas para os ângulos recomendados pela empresa DuPont e elaborados em termos da luminosidade CIE, L_{15}^* , L_{45}^* e L_{110}^* , calculadas a partir das medições da luminosidade CIE nos três ângulos: 15°, 45° e 110°, respectivamente.

$$Flop = \frac{2,69 \cdot (L_{15}^* - L_{110}^*)^{1,11}}{(L_{45}^*)^{0,86}}$$

$$= \frac{2,69 \cdot (L_{45^\circ/120^\circ}^* - L_{45^\circ/25^\circ}^*)^{1,11}}{(L_{45^\circ/90^\circ}^*)^{0,86}}$$

Os pigmentos perolizados ou de interferência caracterizam-se por serem formados por finas lâminas de mica recobertas por dióxido de titânio, embora existam muitas outras formas de construção a partir deste esquema estrutural básico [1, 2]. Quando a luz branca incide sobre o pigmento, parte dela é refletida e a outra transmitida através da camada de dióxido até se encontrar com a lâmina de mica, onde volta a ser refletida. Tal componente refletido emerge do pigmento paralelamente ao primeiro raio refletido e em fase com este. Como consequência, a onda resultante será mais intensa e, além disso, a tonalidade do pigmento sofrerá alterações. Tais alterações dependerão da espessura da camada do óxido metálico, da orientação das lâminas, do índice de refração e do ângulo

de iluminação [3].

O principal motivo para que esta classe de pigmentos de efeitos ópticos receba também a denominação de pigmentos de interferência, ou iridescentes, deve-se aos fatores descritos a seguir. Levando-se em conta a estrutura em camadas que os pigmentos desta classe apresentam, é possível aplicar a teoria da interferência óptica em camadas múltiplas com índices de refração e espessuras diferentes [4, 6]. A diferença de percurso óptico para um par de raios incidentes sobre a superfície da partícula é a chave para a geração de ondas sobrepostas construtivas e destrutivas, favorecendo ou minimizando seletivamente diferentes formas de reflectância espectral, ou seja, as cores para o observador humano. Assim, considerando-se o índice de refração n para a camada de rutilio, d a espessura da mesma e α o ângulo de incidência sobre a superfície em contato com o ar, a diferença de δ fase obtida é:

$$d = 2d\sqrt{n^2 - \text{sen}^2\alpha} + \frac{1}{2}$$

No caso do comprimento de onda com máxima reflectância, temos Y:

$$l_{\text{máx}} = \frac{4d}{2m+1} \sqrt{n^2 - \text{sen}^2\alpha},$$

com $m = 0, 1, 2, 3, K$

Consequentemente, ao passo que os pigmentos de partículas metálicas estão limitados a alterações na luminosidade percebida, os pigmentos de interferência criam a sensação de “mudança de cor” (de tonalidade) de um objeto quando os ângulos de observação e de iluminação mudam.

2. Aparência Visual de Materiais Goniocromáticos

Geralmente, é possível caracterizar a aparência visual de materiais em qualquer situação que se apresente. Porém, as aplicações industriais da cor são tão amplas e variadas que,

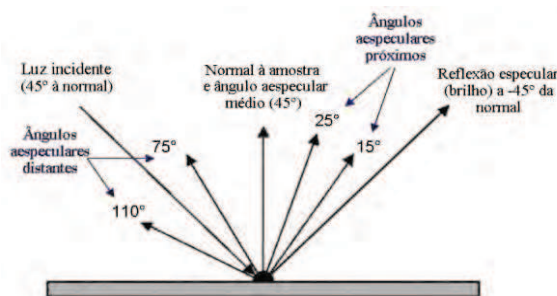




em algumas situações, é necessário definir conceitos específicos e fórmulas relacionadas para caracterizar diferentes problemas (solidez da cor, brancura, brilho, opacidade, grau de metamerismo etc.). No entanto, em especial, a caracterização óptica e visual de materiais goniocromáticos não é nada simples, mas muito pelo contrário, já que, como mencionado anteriormente, depende dos ângulos de iluminação e de observação.

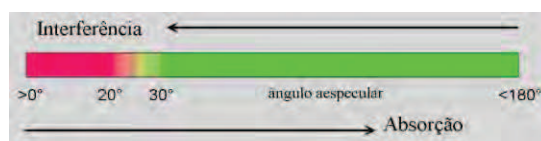
Quando observamos materiais goniocromáticos visualmente, podemos ver três cores dominantes que se denominam: *aespecular próxima, de face e flop (iridescente)* [7]. É possível observar a cor aespecular próxima quando vemos uma amostra com um ângulo muito próximo ao especular. A cor aespecular próxima depende mais dos flocos (escamas) metálicos ou dos pigmentos de interferência, mas sempre sofrerá uma pequena influência da cor convencional. Quando nos aproximamos do ângulo especular entram em destaque as propriedades do revestimento da superfície e o brilho de definição de imagem que exercem influência sobre a cor especular próxima. A cor de *face* é observada quando visualizamos a amostra em um ângulo convencional difuso ao longo da normal e para um ângulo de iluminação de 45° e é influenciada em sua maioria pela cor convencional. A cor *flop* (iridescente) é observada quando olhamos para uma amostra na direção oposta à do ângulo especular e é influenciada pelos pigmentos convencionais (que causam reflexões difusas) e pelos flocos (escamas) metálicos ou pigmentos de interferência que também contribuem para a reflexão difusa. À medida que aumentamos o ângulo *flop* relativo ao ângulo especular, a dispersão devida aos flocos metálicos ou aos pigmentos de interferência adquire uma influência maior sobre a cor *flop*.

Figura 2. Descrição dos ângulos aespeculares próximos, de face (ao redor da normal) e de flop (distantes) partindo de uma incidência luminosa a 45°



Estes materiais refletem a luz seletivamente somente nas cercanias dos ângulos aespeculares, com um máximo de 30°. À medida que o ângulo de observação se aproxima dos ângulos aespeculares mediano e distante, a cor da amostra se aproxima da cor do substrato e, então, a cor resultante passa a seguir as leis da mistura subtrativa (por absorção) de corantes e pigmentos. Além disso, a cor percebida da reflexão do componente aespecular próximo mudará dependendo do ângulo de iluminação. Então, na zona de transição da Figura 3, ocorre uma combinação de misturas de cores com base nos princípios aditivos (interferência) e subtrativos (absorção) de pigmentos. Consequentemente, para avaliar os pigmentos de interferência deveremos incluir vários ângulos de iluminação.

Figura 3. Esquema da interação das misturas aditiva (interferência) e subtrativa (absorção) nos pigmentos perolizados.



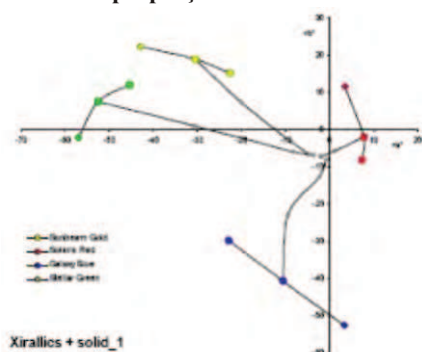
Adicionalmente, a caracterização fica ainda mais complicada quando são misturados no material/substrato tanto pigmentos convencionais (sólidos) como pigmentos de efeitos metálicos ou perolizados. Deste modo, por exemplo, combinando o mesmo tipo de pigmento sólido em vários tipos de pigmentos de interferência (Figura 4, esquerda), as cores resultantes são caracterizadas claramente pela forma





"T" correspondentes às curvas aespeculares e de interferência, as quais iremos definir mais adiante. Por outro lado, combinando um pigmento de interferência com um pigmento metálico (Al) e um pigmento sólido em proporções diferentes, os resultados cromáticos são ainda mais variáveis aparentemente seguindo, contudo, alguma regra indeterminada (Figura 4, direita). De todo modo, qualquer que seja a combinação entre pigmentos sólidos, metálicos e/ou perolizados, o usuário/cliente deseja obter uma reprodução da receita/cor de tal modo que a aparência cromática seja igual à da cor de referência (padrão) sob qualquer geometria de medição/visualização, sem necessidade de saber de início qual é o substrato físico, os pigmentos e suas proporções utilizados na cor de referência (por exemplo, igualar a aparência de uma cor perolizada entre materiais quimicamente diferentes). Isto implica que o surgimento de metamerismo devido à variação da geometria de visualização deve ser o mínimo possível (Figura 5). Nestes casos, trata-se de uma matização multicor que não pode basear-se exclusivamente na matização da cor (cálculo da receita) para uma única geometria de medição, mas sim para várias simultaneamente. Estamos falando, então, de matizações multimetaméricas [8] ou, na melhor das hipóteses, de matizações multiespectrais, ambas representando o desafio atual da Ciência e Tecnologia da Cor neste campo teórico/aplicado.

Figura 4. Misturas de pigmentos de interferência e sólidos. Superior: resultados de vários pigmentos Xirallic com o mesmo pigmento sólido. Inferior: resultados do pigmento Violeta Fantasy com pigmento de Al e outro pigmento sólido em proporções diferentes.



3. Problemática na Medição de Amostras Goniocromáticas

Perante a complexidade, brevemente descrita anteriormente, do comportamento óptico-visual dos pigmentos metálicos e perolizados, é óbvio que não nos é suficiente utilizar as técnicas da espectrofotometria bidirecional ou de esfera integradora. Diante disso, já há várias décadas que instituições de normalização, como a DIN, alemã, e a ASTM, norte-americana, têm estabelecido várias diretrizes neste campo da aparência da cor de materiais especiais [9]. Deste modo, primeiramente, são descritos os ângulos aespeculares *cis* e *trans*, tidos como representando os desvios angulares relativos à direção especular no sentido horário (*trans*) e anti-horário (*cis*), conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 5. Exemplo no diagrama de cromaticidade CIE-a*b* da matização multimetamérica de uma amostra goniocromática. A curva aespecular parece estar melhor reproduzida que a curva de interferência.

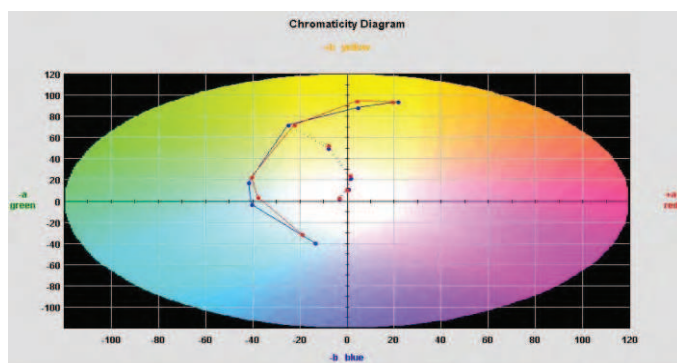
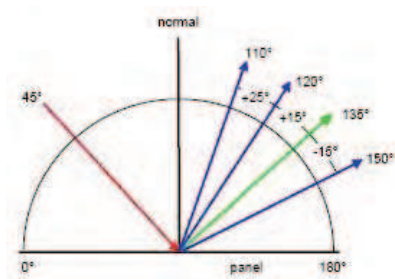




Figura 6. Direções angulares para medição do goniocromatismo. Ângulo de incidência/iluminação a 45° (em vermelho), ângulo especular a 135° (em verde) e ângulos aespeculares (em azul): tipo cis (+15 e +25° relativos ao ângulo especular), tipo trans (-15° relativo ao ângulo especular).



A partir dos ângulos aespeculares são definidas também a curva de interferência e a curva aespecular na representação dos resultados colorimétricos da aparência visual de uma amostra goniocromática em um espaço de cor. A primeira curva corresponde a um conjunto de dados colorimétricos associados a pares de ângulos de iluminação/observação com o ângulo aespecular constante. A segunda corresponde a um conjunto de dados colorimétricos associados a pares de ângulos de iluminação/observação com o mesmo ângulo de incidência (iluminação). Na Tabela 1, vemos as 5 geometrias de medição, segundo a norma ASTM, e as 4 geometrias de acordo com a norma DIN (europeia). De qualquer maneira, como é óbvio, é possível definir muitas geometrias adicionais, mas o desafio está em implementá-las na prática dentro de um espectrofotômetro multiângulos.

Com respeito às geometrias de medição do goniocromatismo que produzem melhores resultados, já se constatou que o ideal é usar mais de 5 geometrias e, se possível, que algumas delas estejam associadas de tal forma que compartilhem o mesmo ângulo aespecular, ou seja, que façam parte da chamada "curva de interferência", em vez da "curva aespecular". Deste

modo, mudando o ângulo de iluminação é possível obter diversas curvas aespeculares da mesma amostra, todas válidas, fornecendo novas informações sobre o comportamento cromático completo do material. Porém, ainda que os valores absolutos dos ângulos aespeculares envolvidos possam ser iguais, os ângulos respectivos de iluminação e observação indicam-nos que pode não haver nenhuma relação angular entre eles. Ou seja, que as geometrias não podem ser invertidas. Por exemplo, se o ângulo de iluminação é de 45° e o ângulo de observação é de 110°, o ângulo aespecular será de 25°. Embora um ângulo de iluminação de 110° e um ângulo de observação de 45° produzam o mesmo ângulo aespecular, a observação seria do tipo "trans", com a qual nenhuma comparação entre as medições daria resultados visuais idênticos. Deste modo, entre ângulos aespeculares dos tipos "cis (+)" e "trans (-)", cria-se um deslocamento (*trans cis*) em nível espectral no sentido dos comprimentos de onda maiores (Figura 7). Em nível colorimétrico, isto levará a avaliações colorimétricas não simétricas, mesmo se girarmos a amostra em 180° com relação à normal colocada na abertura de um Espectrofotômetro multiângulos [10, 11]. A razão principal desta não reversibilidade cromática, ou anisotropia cromática, deve-se ao fato de que, em numerosos casos, a camada de óxido metálico sobre o substrato não é plana, mas sim apresenta espessura variável, pelo que não é a mesma coisa iluminar e ver por um lado/plano e pelo outro, nem em termos ópticos nem visualmente.

Levando-se em conta a relevância comercial que os pigmentos metálicos e perolizados têm já há décadas, os espectrofotômetros multiângulos existem há menos de 15 anos e sempre com projetos de construção optomecânicos adaptados às geometrias de medição recomendadas pelas normas ASTM e DIN. Evidentemente, devemos atribuir a causa desta dependência instrumental com recomendações de normalização à grande importância do controle de qualidade visual na indústria automobilística, uma das forças motrizes



da indústria dos nossos tempos. Desta forma, na década de 1990, quando começou-se a normalizar a avaliação do goniocromatismo, todos os grandes fabricantes de instrumentos de medição da cor (Datacolor, Konica Minolta, GretagMacbeth, X-Rite, Byk-Gardner, Hunterlab etc.) lançaram no mercado espectrofotômetros multiângulos de bancada e portáteis (Figura 8) para tentarem obter uma fatia significativa do novo mercado de aplicações do goniocromatismo. Entre os instrumentos deste leque inicial, o espectrofotômetro multiângulos por excelência, quer dizer, o mais utilizado

para muitos setores industriais (altamente recomendado para o setor automotivo), é o modelo MA-68II da empresa X-Rite. Este instrumento incorpora as 5 geometrias de medição recomendadas pelas normas ASTM 2194 e DIN 6175-2.

Como já indicado anteriormente, talvez as 5 geometrias de medição ASTM e DIN sejam suficientes para a caracterização de cores metálicas, mas não para cores perolizadas nem, inclusive, no caso de outras cores com outros efeitos ópticos (resplande-cência/*glitter*, cintilação/*sparkle* etc.). Com uma iniciativa científico-tecnológica por parte da empresa Datacolor, esta implementou as sugestões técnicas de vários

Figura 7. Resultados que demonstram a não reversibilidade cromática em uma amostra goniocromática (Colorstream T20-02 Arctic Fire Exterior (T20-02) PSD 5-40 mm Rutilio) medida com um espectrofotômetro multiângulos Datacolor FX10 girando-a ao redor da normal sobre a abertura do instrumento de 0° a 360° com intervalos de 15°.

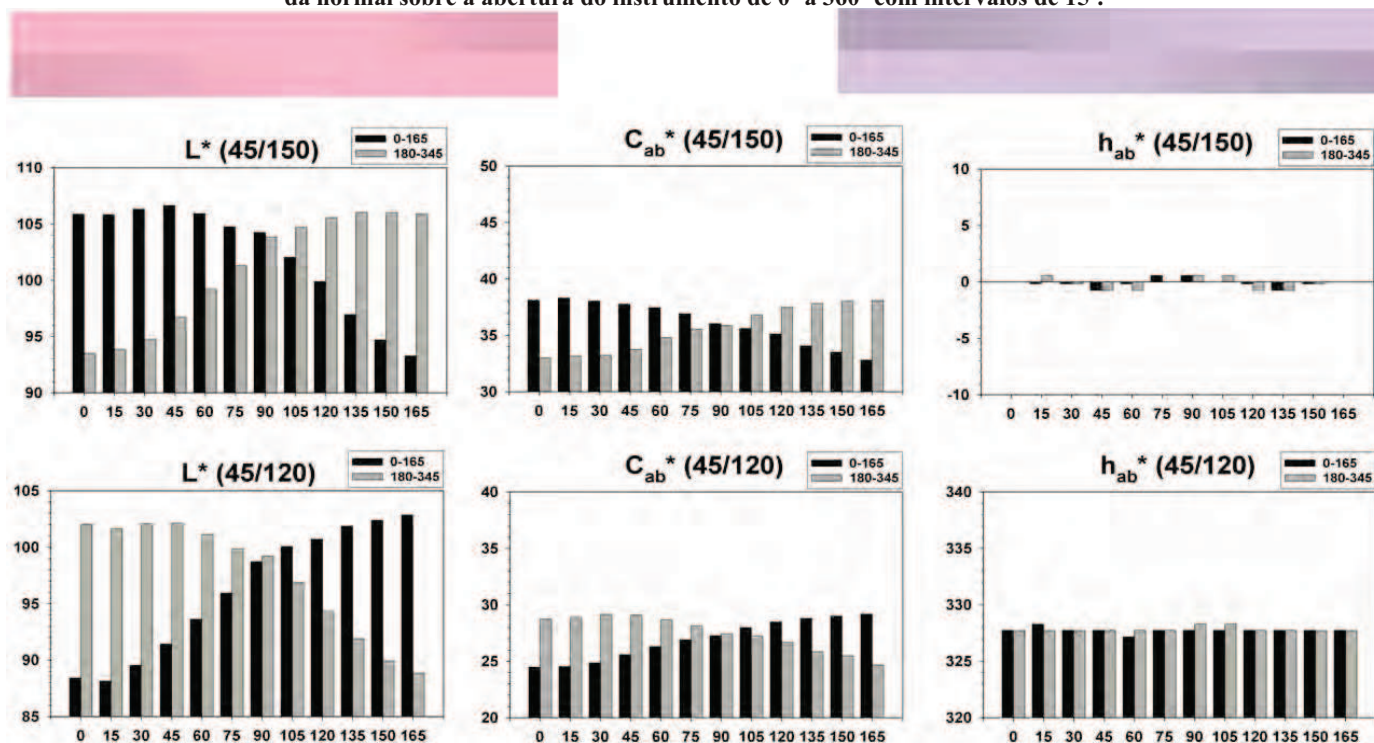


Tabela 1
Configurações geométricas típicas de medição do goniocromatismo, conforme as normas internacionais: DIN 6175-2, ASTM E2194.

Normas				ASTM			ASTM /DIN	ASTM /DIN	ASTM /DIN	ASTM /DIN
Ângulo de iluminação	25°	25°	45°	45°	75°	75°	45°	45°	45°	45°
Ângulo de observação (aespecular)	170° (-15°)	140° (+15°)	150° (-15°)	120° (+15°)	120° (-15°)	90° (+15°)	110° (+25°)	90° (+45°)	60° (+75°)	25° (+110°)





especialistas internacionais em avaliação do gonio-cromatismo para lançar no ano de 2005 um novo modelo de espectrofotômetro multiângulos (FX10). Neste instrumento, do conjunto de 10 ângulos de observação e iluminação, seis deles são especificamente concebidos para a medição de pigmentos de interferência, enquanto que cinco podem ser usados para a medição de amostras de partículas metálicas padrões de acordo com as normas DIN 6175 e ASTM E2194. Os ângulos de iluminação e recepção podem cada um variar da esquerda 0° para a direita 180°.

A empresa X-Rite, em resposta à inovação científico-tecnológica do modelo FX10 da Datacolor, no outono passado lançou no mercado o novo espectrofotômetro multiângulos X-Rite MA98 com algumas novidades, como a incorporação de um segundo ângulo de iluminação, o ângulo aespular "trans" (-15°) e vários ângulos de observação fora do plano convencional de iluminação/observação, com o que permite fazer uma avaliação preliminar em nível tridimensional.

Figura 8. Exemplos de espectrofotômetros multiângulos existentes no mercado durante a última década. De cima para baixo e da esquerda para a direita: BykMac, X-Rite MA68II, Konica Minolta CM-512m3, Optronik CarFlash, GretagMacbeth ColorEye640 e GretagMacbeth ColorEye-6.



O aparecimento no mercado do espectrofotômetro X-Rite MA98 pressupõe um passo voltado mais no sentido da implementação na prática de espectrofotômetros multiângulos tridimensionais, quer dizer, capazes de

medir a função de distribuição da reflectância bidirecional espectral (ou sBDRF - *spectral bidirectional reflectance distribution function*) de qualquer tipo de material. Assim, já há cerca de uma década que encontramos trabalhos científicos sobre a gonioespectrofotometria integral [12], alguns baseados em projetos optomecânicos mais flexíveis que o do modelo FX10, como os GK311M da Zeiss e os GCMS-3B da Avian, além de outros adaptados a partir de goniofotômetros [13] para medição do brilho, outros que já usam telespectroradiômetros [14] ou câmeras multiespectrais [15]. Esta classe de novos protótipos em gonioespectrometria integral vem sendo aplicada em enorme variedade de campos, desde a caracterização da aparência de obras de arte até a otimização da aparência visual de qualquer material óptico em realidade virtual para ambientes arquitetônicos, videogames e cinema 3D, moda virtual etc..

Figura 9. Espectrofotômetro multiângulos FX10 (esquerda) e X-Rite MA98 (direita)



Historicamente, a primeira comparação entre espectrofotômetros na Europa foi feita em 1993. Tal comparação interinstrumental serviu para determinar o estado da arte (situação atual do desenvolvimento tecnológico na área) das medições de reflectância espectral e especificação da cor de materiais por meio da espectrofotometria. Participaram quatro laboratórios metrológicos provenientes de diferentes países da União Europeia. Em cada laboratório, foram calibrados os mesmos conjuntos de padrões cerâmicos coloridos. A comparação interinstrumental envolveu a geometria 0/45 e os componentes especulares incluído e excluído. O resultado foi que, aproximadamente, metade das



medições feitas pelos laboratórios nacionais não estava de acordo com o limite de perceptibilidade cromática ($0,5\Delta E_{ab}$). Portanto, estes espectrofotômetros eram inadequados para aplicações industriais. A segunda comparação interinstrumental em termos europeus começou em 1997 [16]. O objetivo principal neste projeto foi o de harmonizar as medições de cor entre 8 laboratórios nacionais (entre eles, o Laboratório de Metrologia Óptica do CSIC, em Madri) para obter uma concordância de $0,5\Delta E_{ab}$ para 95% de cores não fluorescentes e que gerou a publicação de um guia de boas práticas para medições de cores opacas e translúcidas. Isto foi alcançado pelo desenvolvimento de um sistema de determinação e correção de erros sistemáticos e aleatórios. O segundo objetivo foi o de ampliar a capacidade de medição de forma a abranger cores fluorescentes usando o método de monocromador duplo em 3 países europeus, além de levar a cabo uma intercomparação de materiais fluorescentes para cumprir com os requisitos metrológicos. De qualquer maneira, daí em diante aparecem na literatura trabalhos sobre comparações entre espectrofotômetros [17-20], mas nenhum ainda com amplitude e abrangência significativas sobre os espectrofotômetros multiângulos para a caracterização do goniocromatismo.

4. CONCLUSÕES

Um espectrofotômetro multiângulos com capacidade de proporcionar geometrias de medição associadas a curvas especulares e de interferência é necessário para a caracterização do goniocromatismo. Somente com este tipo de instrumento, ou em sua versão tridimensional usando um conjunto optomecânico e uma câmera multiespectral, é que se pode obter a função de distribuição da reflectância bidirecional espectral (sBDRF) de um material goniocromático, parâmetro que

synthetiza seu comportamento óptico (espectral) em todas as direções possíveis de visualização. Assim, diante de uma aplicação industrial qualquer (tintas e revestimentos para o setor automotivo, realidade virtual etc.) em que seja importante o conhecimento integral do comportamento óptico e visual desta classe de materiais, é imprescindível dispor de um instrumento com as características descritas anteriormente para realizar tarefas tais como o desenvolvimento de bases de dados multiespectrais, sistemas de formulação de cores metálicas e perolizadas etc..

REFERÊNCIAS

- 1) F.J. Maile, G. Pfaff, P. Reyniers: "Effect pigments past, present and future". *Prog. Org. Coat.*, 54, 150-163 (2005).
- 2) G. Pfaff: *Special Effect Pigments*. Norwich: William Andrew Publishers, 2008.
- 3) P. Wissling: *Metallic Effect Pigments*. Norwich: William Andrew Publishers, 2006.
- 4) E. Kirchner, J. Houweling: "Measuring flake orientation for metallic coatings". *Prog. Org. Coat.*, 57, (2008, in press).
- 5) G. Chartier: *Introduction to Optics*. Berlin: Springer, 2005.
- 6) R.D. Guenther: *Encyclopedia of Modern Optics*. New York: Academic Press, 2004.
- 7) R.S. Berns: *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology*, 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- 8) J.M. Medina: "Proposed Metameric Indices for Goniochromatic Objects". *Col. Res. Appl.*, 27, 6, 382-390 (2002).
- 9) K.K. Sharma: *Optics. Principles and Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- 10) J. Schanda: *Colorimetry: understanding the CIE System*. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- 11) G. Baba, K. Suzuki: "Gonio-spectrophotometric analysis of white and chromatic reference materials". *Anal. Chim. Act.*, 380, 173-182 (1999).
- 12) E. Chorro, F. Martínez-Verdú, J. Campos, A. Pons: "On the importance of rotating metallic and pearlescent samples around the normal in multi-gonio-spectrophotometric measurements". Publication CIE x33:2008: Proc. CIE Expert Symposium on Advances in Photometry and Colorimetry (Torino, 2008), 139-140, A1-A6 (2008).
- 13) K.J. Voss, A. Chapin, M. Monti, H. Zhang: "Instrument to measure the bidirectional reflectance distribution function of surfaces". *Appl. Opt.*, 39, 33, 6197-6206 (2000).
- 14) U. Binger, W. Halbritter, W. Jordan, G. Sauter, W. Steudtner, N. Wagner: "The new hemispherical robot goniophotometer of the central laboratory for light measurements of Osram GMBH Munich". Publication CIE x33:2008: Proc. CIE Expert Symposium on Advances in Photometry and Colorimetry (Torino, 2008), 159-163 (2008).
- 15) M. Shaw, T. Goodman: "Array-based goniospectroradiometer for measurement of spectral radiant intensity and spectral total flux of light sources". *Appl. Opt.*, 47, 2637-2647 (2008).
- 16) M.E. Nadal, G. Obein: "NIST goniospectrometer for surface color measurements". Publication CIE x33:2008: Proc. CIE Expert Symposium on Advances in Photometry and Colorimetry (Torino, 2008), 134-138 (2008).
- 17) J. Taylor, A.R. Hanson, P.J. Clarke, J. Campos, A. Pons, W. Czepluch, T. Jaaskelainen, J. Hiltunen, J. Gaudemer, O. Soares, J.L.C. Costa, L. Liedquist: *Good Practice guide to surface colour measurement*. Publicación Europea SMT4-CT96-2140 EUR 19552EN (2000).
- 18) Campos, J. Pons, M. Martín: "Reflectance changes in white reflectance standards measured in different instruments with 0/d geometry". Proc. 10th Congress of the International Colour Association - AIC (Granada, 2005), 10, 41-44 (2005).
- 19) D.R. Wyble, D.C. Rich: "Evaluation of methods for verifying the performance of color-measuring instruments. Part I: repeatability". *Color Res. Appl.*, 32,3, 166-175 (2007).
- 20) D.R. Wyble, D.C. Rich: "Evaluation of methods for verifying the performance of color-measuring instruments. Part II: inter-instrument reproducibility". *Color Res. Appl.*, 32,3, 176-194 (2007).

