

**Caracterização  
de cor e aparência  
em automóveis**



## Caracterização de cores automotivas e aparências utilizando uma BRDF (Função Diferencial de Refletância Bidirecional) sub-amostrada e uma nova espectrofotometria multiangular portátil

Plásticos coloridos são compostos químicos complexos que envolvem processos avançados em contínua inovação e evolução. Adotando nanomateriais e microtecnologias em processos e controles, os engenheiros de criação desenvolveram sistemas que proporcionam custos mais baixos e uma estilização inovadora de cores, além de gerar a reação emocional desejada pelo projetista.

As medições espectrofotométricas esféricas e planares tradicionais são insuficientes para caracterizar os modernos plásticos coloridos. Este trabalho apresenta uma combinação original de BRDF espacial sub-amostrado (incluindo geometria extraplanar) e um modelo fenomenológico simples que captura tanto as contribuições das fórmulas em nanoescala e microescala como as contribuições do processo para a aparência geral. São apresentadas as geometrias de amostragem espectrofotométrica preferenciais, além de exemplos com variação de fórmulas, variações entre lotes, variações de processos, e a possibilidade de separação dos fatores.

### Informações básicas

Nos materiais em que o brilho, a textura e outros efeitos desempenham um papel importante, o processo de seleção, definição e controle de produção ainda é baseado em amostras físicas e na avaliação visual. Os métodos tradicionais de medição e comunicação de cores não apóiam diretamente o controle do processo de produção e a detecção das causas principais de erros. Pigmentos perolizados texturizados e estampados em plásticos são algumas das áreas que podem se beneficiar de um meio para definir, comunicar e conferir a aparência.

A aparência visual consiste em detecção e inferência. Ela estende a refletância espectral em um ponto no contexto de uma observação. Ele inclui pressupostos relacionados à iluminação e à observação, além das condições físicas da amostra, tais como forma e textura. No início, nosso trabalho se propôs a estabelecer uma base para um processo confiável de produção de cores utilizando a definição e a comunicação espectral de cor. Entretanto, para fazer isso, precisávamos de um método para traduzir os conceitos abstratos de aparência de cores em um modelo expressivo concreto. Nossas pesquisas, ainda em andamento, procuram estender esse paradigma para uma definição mais abrangente da aparência total que inclui contexto e inferência.

Do ponto de vista da medição, temos fundamentalmente um espectro-radiômetro. Uma fonte de luz é dirigida a um objeto através de uma determinada Função de Transferência Óptica

(OTF). A luz que atinge o objeto interage através de cada camada e interface do objeto, orientada pelas equações de Maxwell e submetida à dispersão de Mie e Rayleigh. Desse ponto, a Função de Distribuição de Refletância Bidirecional (BRDF) resultante ou a Função de Distribuição de Refletância de Dispersão Subsuperficial Bidirecional (BSSRDF) se dá a partir de uma determinada direção de observação. Esse conjunto de amostras de BRDF é coletado por um sistema óptico que possui uma segunda OTF. Então, detectamos a OTF resultante e a transformamos em termos de Contexto (descrito e definido mais adiante). Assim que as informações forem processadas para o Contexto, temos a etapa final que envolve a inferência, a qual permite a criação, a comunicação e a tomada de decisões.

A dificuldade em medir a BRDF de uma amostra é o tempo necessário para a realização de muitas medições goniospectrorradiométricas, pois existe a necessidade em muitos ângulos e diferentes geometrias de iluminação e observação. Nossa pesquisa se concentrou em medições e dispositivos portáteis, e normalmente é difícil manter esse tipo de instrumento firme por mais de 1 ou 1,5 segundo. Assim, uma medição determinista rigorosa exige mais pares de iluminação/observação do que é possível no tempo disponível. Como uma medição sub-amostrada se relaciona com uma solução tão fechada? Que ângulos são importantes? Que informações de espectro são importantes?

Nossa plataforma de medição de aparência apresentada neste trabalho consiste em um sistema compacto de espectrofotômetro multiangular combinado com a amostragem esparsa de espectros de refletância direcional para a BRDF tradicional (como mostra a figura 1). Um projeto de espectrofotômetro com diodo baseado em um filtro dielétrico supera as limitações de intervalo dinâmico e precisão das outras abordagens e permite a retro-correlação com as geometrias planares existentes. A iluminação e a medição em vários ângulos extraplanares geram um rico conjunto de dados capaz de descrever de maneira completa a aparência da superfície. Uma plataforma comum foi usada para derivar uma família de instrumentos voltados para todos os usuários, desde o projeto até a produção.

A amostragem das várias funções BRDF da forma como são geradas define a resposta resultante usada para quantificar a aparência. Medições espectroscópicas multiangulares geram grandes quantidades de dados. Para tornar esses dados manejáveis, aplicam-se rigorosos modelos físicos para calcular os descritores paramétricos da aparência superficial. Pesquisas nas áreas de óptica, eletromag-



netismo, gráficos por computador e visão geraram consideráveis avanços na área de modelagem da aparência superficial. Esses modelos foram avaliados e refinados para poderem ser aplicados em amostras e aplicações industriais. A fim de descrever a aparência superficial foi desenvolvido um conjunto de modelos de refletância para BRDF e parametrização de texturas. Esses descritores (parâmetros do modelo) são transportados como XML, formando a base de um processo digital de aparência superficial, do conceito à criação. Veja a Figura 2.

Os dados da BRDF podem ser derivados das medições goniométricas do espectrômetro, com a aplicação dos dados à seguinte expressão:

$$L_r(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}) = \int_{\Omega_x} f_r(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}', \boldsymbol{\omega}) L_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}') (\mathbf{n}_x \bullet \boldsymbol{\omega}') d\boldsymbol{\omega}'$$

onde  $L_r$  é a radiância refletida em  $\mathbf{x}$  na direção  $\boldsymbol{\omega}$ .  $\Omega_x$  é o hemisfério de direções recebidas,  $f_r$  é a BRDF em  $\mathbf{x}$  e, no nosso caso, contém um termo  $f_{rS}$  especular/brilhante e um termo  $f_{rD}$  difuso, de forma que:

$$f_r(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}', \boldsymbol{\omega}) = f_{rS}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}', \boldsymbol{\omega}) + f_{rD}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}', \boldsymbol{\omega})$$

$L_i$  é a radiância recebida, que pode ser relacionada ao fluxo por:

$$L_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}') = \frac{d^2\Phi_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}')}{(\mathbf{n}_x \bullet \boldsymbol{\omega}') d\boldsymbol{\omega}' dA_i}$$

No caso de um modelo de transporte de fótons em várias camadas, a forma da equação de representação volumétrica é consideravelmente diferente da forma acima, e deve levar em conta tanto a profundidade óptica de cada camada difusora como a função de fase que descreve a natureza da função difusora. A equação assume a seguinte forma:

$$L_r(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}) = \int_0^s e^{-\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}')} \sigma_a(\mathbf{x}') L_e(\mathbf{x}', \boldsymbol{\omega}) d\mathbf{x}' + \int_0^s \hat{\mathbf{e}}^{-\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}')} \sigma_s(\mathbf{x}') \int_{\Omega_{4\pi}} p(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}', \boldsymbol{\omega}) L_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}') d\boldsymbol{\omega}' d\mathbf{x}' + e^{-\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}+\mathbf{s}\boldsymbol{\omega})} L(\mathbf{x}-\mathbf{s}\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega})$$

onde a profundidade óptica  $\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  é dada por:

$$\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \int_{\mathbf{x}}^{\mathbf{x}'} \sigma_t(t) dt$$

e a função de fase pode assumir diversas formas diferentes, dependendo da estrutura do revestimento e da natureza do material difusor predominante. A função de fase usada com mais frequência é a função de fase de Henyey-Greenstein, que pode ser usada combinada com diferenças de cada camada e/ou componente difusor. Ela assume a forma generalizada:

$$p(\Theta) = \sum_{i=1}^N \frac{w_i(1-g_i^2)}{4\pi(1+g_i^2-2g_i\cos\Theta)^{1.5}}$$

onde  $w_i=1$

Onde,  $g_i$  controla a forma de cada lobo e  $w_i$  controla o peso. Dependendo da complexidade do revestimento, do contexto da amostragem e da inferência que se pretende fazer, são necessários entre

72-90 ângulos de medição (canais) para uma formulação BSSRDF completa de um revestimento de 3 a 4 camadas, como uma tinta automotiva. No outro extremo, são necessários de 10 a 12 ângulos para uma medição por BRDF de um plástico homogêneo onde as diferenças de fórmula e processo (e não apenas a fórmula) são um aspecto essencial.

### Objetivo do trabalho

As normas existentes no setor para medir plásticos coloridos consistem em medições com espectrofotômetro goniométrico esférico ou planar. O problema dessa abordagem é que os plásticos complexos de hoje são de natureza tridimensional. A contribuição da fórmula dos plásticos para a percepção muda na direção extraplanar. As geometrias planares tradicionais e os sistemas de câmera única não dão conta do fato de que os efeitos de percepção têm natureza goniométrica. Eles mudam com as variações das condições de iluminação e observação. Atualmente, não medimos a aparência com uma esfera, apenas estabelecemos sua média. As variações de aparência devidas ao alinhamento molecular são efeitos de percepção. Hoje em dia, medimos apenas a difusão e reflexão médias da luz com a amostra. Como a BRDF (BSSRDF) resultante varia de forma multidimensional, também variam os efeitos perceptíveis tais como Textura e alinhamento molecular. Os atuais sistemas não são capazes de caracterizar e comunicar de maneira sólida o impacto da variação dos processos e das fórmulas sobre os efeitos perceptivos. Nosso objetivo é apresentar uma solução econômica de hardware e software para fazer isso.

### Procedimento experimental

Duas propriedades exclusivas da interação entre a luz e o material podem ser exploradas no processo de medição para se aprender e compreender mais sobre a estrutura e a composição de um material (ou revestimento). A primeira propriedade que podemos considerar é o fato de que todos os materiais são dispersivos. Isso significa que a capacidade de um material de desviar a luz (seu índice refrativo) é diferente na luz azul (400 nm) em relação à luz vermelha (700 nm). Essa mudança no poder de inflexão existe independentemente da cor aparente (propriedade absorviva) do material. Até mesmo um material que aparenta ser preto ou brilhante (como um espelho) apresenta dispersão pelo fato de que a luz não interage simplesmente na superfície, mas também penetra na superfície durante a reflexão ou absorção. Na verdade, o que nos interessa é a constante dielétrica do material, que é dispersivo. O complexo índice refrativo (poder de inflexão + absorção) é proporcional à raiz quadrada da constante dielétrica. A segunda propriedade que podemos considerar é a dispersão da luz dentro de um material. A dispersão da luz em um material pode ser descrita de várias maneiras diferentes, mas em todos os casos a natureza da dispersão também depende do comprimento de onda. A luz azul se dispersa de maneira diferente da luz vermelha. Todos os materiais dispersam a luz em algum grau, até mesmo um vidro aparentemente transparente. Realizando medições espectrofotométricas sensíveis da luz dispersa por um material (ou revestimento) e comparando as pequenas inclinações de onde a luz azul se dispersa em relação à luz vermelha, é possível determinar a constituição



física e a estrutura do material. A energia deve ser conservada. Assim, compreendendo as características da energia luminosa e medindo as características da luz que retorna de um material, podemos solucionar modelos cada vez mais complexos para determinar a composição e a estrutura dos materiais. A luz só pode ser refletida, defletida, dispersada ou absorvida, e a energia deve ser conservada. Existem muitas outras formas pelas quais a luz pode interagir com os materiais, além de outros aspectos, tais como a polarização, que podem ser levados em conta e discutidos. Entretanto, para simplificar, deixaremos de lado esses aspectos nesta discussão. O caso especial de interferência realmente surge e será abordado posteriormente quando discutirmos alguns pigmentos de efeitos especiais.

O modelo talvez mais simples que podemos empregar é derivado da teoria eletromagnética, e se chama Teoria do Meio Efetivo. A Teoria do Meio Efetivo afirma simplesmente que, independentemente da complexidade do revestimento ou material, podemos tratá-lo como um material único e homogêneo. Um material descrito com 3 camadas e 9 ingredientes é tratado como se fosse um único material que é a média ponderada dos ingredientes em relação à sua distribuição pelas camadas, a espessura das camadas e a estrutura do limite entre duas camadas adjacentes. Um material processado com uma determinada fórmula (receita de ingredientes e estrutura definida de camadas) será caracterizado pelas suas propriedades dispersivas exclusivas. Se algo for alterado na fórmula, essas propriedades exclusivas também serão alteradas. Mesmo que a distribuição do tamanho médio das partículas mude, as propriedades exclusivas de dispersão serão alteradas.

Junto com a Teoria do Meio Efetivo, um dos métodos mais simples de caracterizar o comportamento dispersivo da luz é considerar onde a luz está sendo dispersada em relação à reflexão/emersão da amostra em algum sistema de coordenadas. Podemos representar isso como uma inclinação, para a frente ou para trás e de um lado para o outro, com a magnitude correspondente à energia luminosa que não é absorvida. Quanto mais luz for dispersada / refletida em uma determinada direção, maior será a sua magnitude. Se fizermos isso em cada comprimento de onda, poderemos analisar a natureza dispersiva do material ou revestimento. Utilizando essa analogia, um material uniformemente refletivo em todos os comprimentos de onda e que se dispersa de maneira uniforme em todas as direções não apresentará nenhuma inclinação em nenhuma direção. Um material que se aproxima bastante desse comportamento é o Spectralon™ (também conhecido como Fluorolon™). O Spectralon tem aparência branca difusa de maneira uniforme em todas as geometrias de iluminação e de todos os ângulos de observação. Não há nenhum brilho ou lustro no Spectralon bem preparado, mesmo em ângulos de incidência extremamente agudos. A maneira mais fácil de calcular a inclinação da energia é representar cada

ângulo de observação como um vetor fixo traçado do centro da amostra até o centro da pupila de entrada do espectrômetro. Um vetor é criado para cada comprimento de onda e cada ângulo de observação; a magnitude será a quantidade de energia medida. Então, a inclinação é derivada simplesmente por uma soma de vetores de todos os ângulos de observação, comprimento de onda por comprimento de onda, resultando em um único vetor de inclinação para cada comprimento de onda. Esse processo de aplicação de um pressuposto da Teoria do Meio Efetivo junto com um cálculo de soma vetorial proporciona a discriminação característica necessária.

As normas existentes no setor para medir plásticos consistem em medições com espectrofotômetro goniométrico esférico ou planar. O problema dessa abordagem é que os plásticos complexos de hoje são de natureza tridimensional. A contribuição da estrutura do material para a percepção muda na direção extraplanar. As geometrias planares tradicionais e os sistemas de uma câmera não dão conta do fato de que os efeitos de percepção têm natureza goniométrica. Eles mudam com as variações das condições de iluminação e observação. Não medimos nem o brilho nem a turbidez. Esses são efeitos perceptíveis. Podemos medir apenas a dispersão e a reflexão da luz no material. Como a BRDF (BSSRDF) resultante varia de forma multidimensional, também variam os efeitos perceptíveis tais como brilho e turbidez.

Como as geometrias exclusivamente planares e os sistemas com uma câmera são falhos, foi necessário que desenvolvêssemos uma plataforma que incluísse geometrias extraplanares. A indústria precisa da correlação com esses sistemas planares antigos. Entretanto, são necessárias melhorias incrementais na arquitetura existente e não abordagens mais radicais. Além disso, as realidades dos dispositivos de medição portáteis, tais como o tempo de medição, a estabilidade da plataforma, etc., excluíram soluções mais robustas tais como espectrofotômetros goniométricos de varredura. Os aspectos de custo e tempo/estabilidade de medição nos levaram a realizar experiências para determinar o número mínimo de ângulos de amostragem extraplanar necessário para atingir nossas metas de gerar informações diretas relacionadas aos processos e às fórmulas. Os Projetos de Experimentais foram criados envolvendo variações em painéis termoplásticos moldados por injeção, com diferentes fórmulas e processos. Os painéis foram criados e medidos com o uso de um espectrofotômetro goniométrico de varredura. Os resultados foram analisados e os lobos matemáticos foram adaptados aos resultados. A partir disso, determinamos a geometria de amostragem da nossa plataforma de hardware. Além da geometria planar tradicional com 5 ângulos, acrescentamos dois ângulos planares de amostragem e quatro ângulos extraplanares. Para aumentar ainda mais a densidade e a robustez dos dados, também incluímos um segundo iluminante, dobrando efetivamente os resultados de medição sem dobrar o custo ou a complexidade. Veja a Figura 3.

Com base nas descrições acima, fabricamos alguns sistemas e repetimos nossos Projetos de Experimentais em uma base mais ampla, utilizando mais variações de fórmula e processos com incrementos menores.





Os dados brutos foram processados com o uso da nossa metodologia de soma vetorial espectral. Este método segue princípios da Teoria do Meio Efetivo para resumir dados espectrais multiangulares em uma representação espectral bidimensional ou tridimensional. O método é uma soma ponderada dos vetores das direções de medição. Os pesos são os fatores de refletância de cada direção. O resultado dessa soma é um espectro de pontos em um espaço tridimensional, um ponto para cada comprimento de onda medido.

A soma ponderada de vetores também é dimensionada pelo comprimento da soma vetorial de um refletor Lambertiano branco ideal, para tornar os valores razoavelmente comparáveis com os valores típicos de refletância. O sistema de coordenadas dos resultados consiste na direção especular (eixo z), na projeção da direção da iluminação em ângulo reto com a especular (eixo y), e o produto cruzado dessas duas direções (eixo x). Chamamos esse resultado de "espectros do xDNA".

A soma vetorial do xDNA é a soma dos vetores de direção do detector, dimensionados pela refletância em cada direção, além de um outro fator de peso em cada direção. O peso opcional pode ser usado para restringir a soma vetorial a determinadas direções, para enfatizar direções particulares, ou para corresponder à energia presente em cada direção. Todos os dados apresentados neste trabalho utilizarão um único iluminante (o tradicional 45 graus) e os 10 canais difusos (não-especulares).

O efeito das configurações do equipamento é, naturalmente, específico de cada equipamento de aplicação. Portanto, embora duas amostras possam ter espectros no xDNA com o mesmo formato e, portanto, serem classificadas como diferenças de processo, não existe nenhum critério exclusivamente óptico capaz de definir se a diferença se deve a diferenças de configuração no mesmo equipamento, a equipamentos diferentes de aplicação, a aditivos de controle, a diferenças de umidade, ou a outras condições que afetam o processo de aplicação. Para determinar a equivalência dos formatos dos espectros no xDNA, utilizamos as operações lineares de translação, rotação e escala. Todas as operações de transformação são realizadas em relação a um padrão. O vetor de translação, a matriz de rotação e o fator de escala são calculados juntos, utilizando um algoritmo de Procrustes para calcular um ajuste de quadrados mínimos do espectro xDNA transformado da amostra ao espectro xDNA padrão. Para fins de comparação com o padrão, os resultados intermediários das operações de translação e rotação são transladados mais uma vez para que fiquem posicionados no centro do padrão.

### Rotação

A rotação do espectro transladado xDNA<sub>t</sub> é indicado por xDNA<sub>a</sub>. A rotação é, normalmente, uma característica ligada tanto a mudanças de processo como à distribuição da receita. Por exemplo, em um processo de moldagem a rotação resulta de uma mudança

no processo que gera ou uma mudança na distribuição do peso molecular no tamanho das partículas de uma receita, ou uma mudança na orientação das partículas em virtude dessas mudanças.

Nem sempre é óbvio qual valor detecta melhor as diferenças de fórmula: se o espectro xDNA<sub>a</sub> alinhado ou o espectro xDNAs em escala. Em algumas situações duas amostras que diferem apenas nas condições do processo apresentam diferenças consideráveis em seus espectros xDNA<sub>a</sub> alinhados. Portanto, é necessário examinar os espectros xDNAs em escala para saber se a diferença entre as amostras é, de fato, uma diferença de processo, e não uma diferença de fórmula. Por outro lado, não é comum surgirem casos em que o xDNAs seja muito pequeno para amostras com diferenças perceptíveis de fórmula, tais como cinzas difusos diferentes.

Continuando com a analogia biológica, podemos considerar a relação entre o espectro xDNA sem transformação e o espectro xDNAs em escala como algo semelhante à relação entre o fenótipo e o genótipo de um ser vivo. Assim como o fenótipo de um organismo vivo é o resultado não apenas da sua constituição genética, mas também da sua interação com o ambiente, o xDNA de uma superfície é o resultado do material subjacente, caracterizado pelo xDNAs, e da sua interação com o ambiente, representada pelas condições do processo de aplicação. Levando em conta as transformações do xDNA, queremos manter em mente tanto os espectros transformados como os parâmetros de transformação. Não há nenhum número capaz de capturar sozinho todas as informações de interesse nessas situações. Não se esqueça de que o motivo para o uso de índices ou outros valores únicos (tais como fórmulas de diferença de cor) é que a sua simplicidade e a quantidade de informações fornecidas compensam a informação perdida quando um valor único é utilizado.

Descrevemos fórmulas de diferença que generalizam funções colorimétricas e fórmulas de diferença para os dados coordenados do xDNA. Também são consideradas fórmulas que usam diretamente os dados de refletância, além de aplicações de todas essas fórmulas a dados xDNA transformados espacialmente.

### A fórmula DF

Assim como derivamos dados colorimétricos de dados espectrográficos com o uso de iluminantes e da ponderação de observadores, as funções CIELAB, DE\*, DE<sub>94l</sub>, DE<sub>2000</sub> e outras funções de ponderação, é possível derivar dados colorimétricos de espectros tridimensionais do xDNA. Entre as possíveis abordagens de generalização das fórmulas de diferença de cor para espectros dimensionais mais genéricos estão as seguintes:

1. Calcular dados colorimétricos tais como XYZ, LAB, e fórmulas de diferença em cada um dos planos x, y e z. Combinar fórmulas de diferença calculadas nos diferentes planos como a raiz quadrada da soma dos quadrados das fórmulas de diferença em um só plano.
2. Calcular os dados XYZ em cada um dos planos x, y e z. Utilizar esses valores como os componentes x, y, z do vetor com valores dos dados X, Y e Z, e então calcular a magnitude dos vetores



tridimensionais X, Y e Z. Agora, calcular L, a, b e os dados de diferença de cor utilizando as magnitudes unidimensionais X, Y e Z.

Utilizamos a notação DF para a fórmula de diferença de cor calculada pela generalização do Delta E normal com a abordagem 1. A curva do xDNA pode ser a curva bruta do xDNA, ou uma das curvas transformadas xDNA<sub>t</sub>, xDNA<sub>a</sub>, ou xDNA<sub>s</sub>. Utilizamos DF<sub>t</sub>, DF<sub>a</sub> e DF<sub>s</sub> para os resultados do cálculo de DF em curvas transformadas.

Como as funções colorimétricas foram construídas para aproximar as diferenças de percepção humanas, DF não é necessariamente a diferença ideal para aplicação aos espectros xDNA transformados, tais como xDNA<sub>t</sub>, xDNA<sub>a</sub> e xDNA<sub>s</sub>. Mesmo assim, as abordagens de generalização de fórmulas de diferença acima funcionam tão bem nos espectros transformados quanto no xDNA sem transformação.

### Discussão dos dados e dos resultados

Apresentamos abaixo uma série de exemplos de complexidade crescente. Os resultados abaixo utilizam um único iluminante (ângulo de incidência de 45 graus) e os 10 ângulos não-especulares, conforme mostra a figura 3. Como o xDNA representa essencialmente o desvio da energia, começamos apresentando uma amostra sem essencialmente com nenhum desvio.

#### Spectralon™

O Spectralon é um material branco difuso com uma BRDF essencialmente hemisférica. Sua refletância é de 99,1% em todo o espectro visível, e difusa em todos os ângulos. Como a BRDF é uniforme em todas as direções e para todos os comprimentos de onda, todos os vetores serão idênticos. Neste caso, todos os 31 resultados de comprimento de onda ficarão sobrepostos. As Figuras 4a e 4b mostram os resultados. Nestes gráficos (e seguintes), o eixo z é apresentado na vertical, y é horizontal, e x dentro do papel. Lembre-se de que o eixo z corresponde à direção especular, y corresponde à direção de iluminação, e x está fora do instrumento. Observe que a Figura 4b tem o mesmo resultado de 4a, mas com o eixo traçado em uma escala diferente. As pequenas diferenças apresentadas na Figura 4b resultam do processo de lixamento do Spectralon. A Figura 4c mostra o resultado da adição de pigmento Preto ao Spectralon com as refletâncias apresentadas da amostra, resultantes de 99,1; 80; 60; 40; 20; 10; 5 e 2%.

#### Ladrilho cerâmico

As Figuras 5a e 5b mostram os resultados de uma série de medições realizadas em um conjunto de ladrilhos cerâmicos em tons de cinza. Os valores de refletância são 1%, 3,5, 15, 32, 50 e 88%, respectivamente. Observe no gráfico "b" o desvio extraplanar de comprimento de onda por comprimento de onda devido à

fina camada vitrificada a quente no ladrilho. Isso não existe nas amostras de Spectralon.

#### Ladrilhos BCRA vermelho e verde

A Figura 6 mostra os Ladrilhos BCRA do vermelhos e verdes. A Figura 6a mostra o xDNA vermelho. A Figura 6b mostra as refletâncias espectrais brutas do vermelho. Observe, novamente, o desvio extraplanar da direita para a esquerda. Entretanto, ao contrário dos ladrilhos brancos, este não oscila comprimento de onda por comprimento de onda. As Figuras 6c e d são para o ladrilho verde, respectivamente. Neste caso, o desvio extraplanar forma um circuito, embora em uma pequena escala x.

#### Corantes orgânicos BASF em amostras de polipropileno

A Figura 7 mostra uma série de diferentes fórmulas de Polipropileno com 100% de pigmento orgânico, 99,5% de pigmento orgânico, com 0,5% de pigmento preto, 30% de pigmento orgânico com 70% de Branco, 15% Orgânico com 85% Branco, 8% de pigmento orgânico com 92% de Branco, e 2% de pigmento orgânico com 98% branco. Os corantes orgânicos são Violeta K5011, Azul K6330, Verde K9360, Amarelo K0961 HD e Vermelho K3911 HD.

#### Amostras

A Figura 8 mostra os corantes orgânicos BASF em concentração total através do espectro no espaço do xDNA.

#### Amostras

A Figura 9 mostra visualizações no espaço do xDNA traçada através da textura superficial

#### Amostras

A Figura 10 mostra fórmulas de Tons de Cinza nas mesmas concentrações, mas empregando os pigmentos Preto e Branco

### Conclusão

Apresentamos uma original combinação de BRDF espacial sub-amostrado (incluindo geometria extraplanar) e um modelo fenomenológico simples que captura tanto as contribuições das fórmulas em nanoescala e microescala como as contribuições do processo para a aparência geral. Apresentamos uma geometria espectrofotométrica preferencial de amostragem, além de exemplos de fórmulas, variações entre lotes, variações de processos, e a possibilidade de separação dos fatores. Apresentamos um método que denominamos xDNA e derivadas métricas dele para reduzir a dimensionalidade dos dados, sem deixar de manter as relações goniométricas essenciais entre os efeitos perceptíveis tais como aspereza e cintilação, além de diferenças de processos e fórmulas.

### Trabalhos futuros e ações

Continuaremos ampliando nossos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento para a medição e comunicação mais robustas de aparência com aparelhos portáteis. Logicamente, nossos próximos passos serão no sentido de medições distribuídas no espaço, computação, representações de modelos e ferramentas de comunicação.

## Bibliografia

- QED: The Strange Theory of Light and Matter (A Estranha Teoria da Luz e da Matéria)*, Richard P. Feynman, Princeton Science Library, 1971
- Zur Elektrodynamik bewegter Körper (Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento)*, Albert Einstein, Annalen der Physik, 17, 1905
- Multiple Scattering Processes: Inverse and Direct (Processos de Dispersão Múltipla: Inversa e Direta)*, Harriet Kagiwada, Addison Wesley Publishing, 1975
- Farbenphysik Fur Industrielle Anwendungen (Física de Cores para Usos Industriais)*, Georg A. Klein, Springer Verlag, 2004
- Light and Matter (Luz e Matéria)*, Yehuda B. Band, Wiley, 2006
- Radiative Transfer (Transferência Radiativa)*, Chandrasekhar, Oxford University Press, 1960
- A novel technique for analysis of electromagnetic scattering from microstrip antennas of arbitrary shape (Nova técnica de análise da dispersão eletromagnética a partir de antenas microstrip de formato arbitrário)*, Uckun, S.; Sarkar, T.K.; Rao, S.M.; Salazar-Palma, M., IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume 45, nº 4, abril de 1997 pp. 485-491
- A vector inverse algorithm for electromagnetic scattering (Um algoritmo de vetor inverso para dispersão eletromagnética)* Borden, B. U.S., Naval Weapons Center, China Lake, CA - SIAM Journal on Applied Mathematics (ISSN 0036-1399), vol. 44, junho de 1984, p. 618-626. 1984
- Electromagnetic Scattering by a System of Dielectric Spheres Coated With a Dielectric Shell (Dispersão Eletromagnética por um Sistema de Esferas Dielétricas Revestidas por uma Capa Dielétrica)*, Hamid, A. K.; Hussein, Mousa I.; Hamid, Michael, Universidade do Sul Do Alabame em Mobile, nov. 2003
- Fast analysis of electromagnetic scattering from finite strip gratings on a grounded dielectric slab (Análise rápida da dispersão eletromagnética a partir de grades finitas em uma chapa dielétrica aterrada)*, Valero, Alejandro; Rojas, Roberto G., Radio Science, Volume 35, nº 6, p. 1307-1314 (RaSc. Homepage), 2000
- A Numerical Solution for Electromagnetic Scattering from Large Faceted Conducting Bodies by Using Physical Optics-SVD Derived Bases (Solução numérica para dispersão eletromagnética a partir de corpos condutores factados de grandes dimensões, utilizando bases derivadas de óptica física SVD)*, Gianluigi Tiberi, Agostino Monorchio, Giuliano Manara e Raj Mittra, IEICE Transactions on Electronics, Vol E90-C, Nº 2, pp. 252-257, 2006
- Finite Elements for Wave Electromagnetics (Elementos Finitos para Eletromagnética de Ondas)*, P. P. Silvester, G. Pelosi, IEEE Press: Nova York, 1994. ISBN 0-7803-1040-3. ix+534 pp.

## Ilustrações, tabelas e figuras

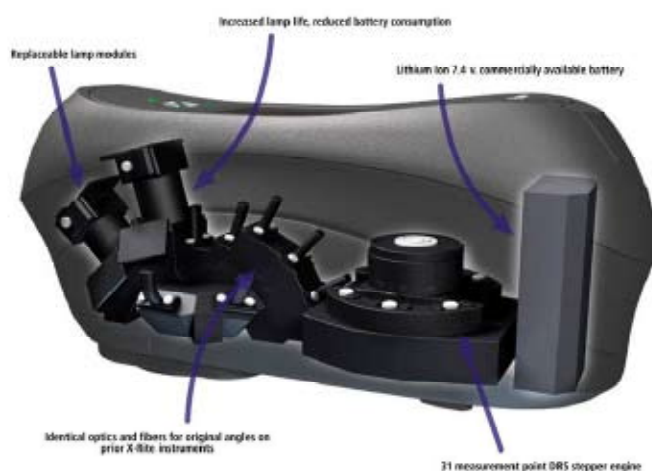


Figura 1. Espectrofotômetro goniométrico extraplano multiangular MA98

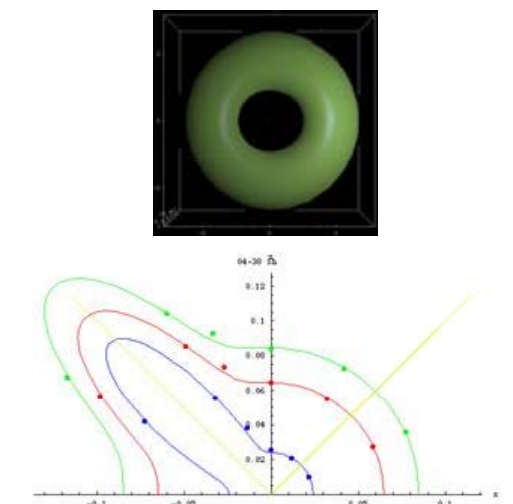


Figura 2. Figura do modelo BRDF ajustado à medição multiangular e à respectiva representação superficial

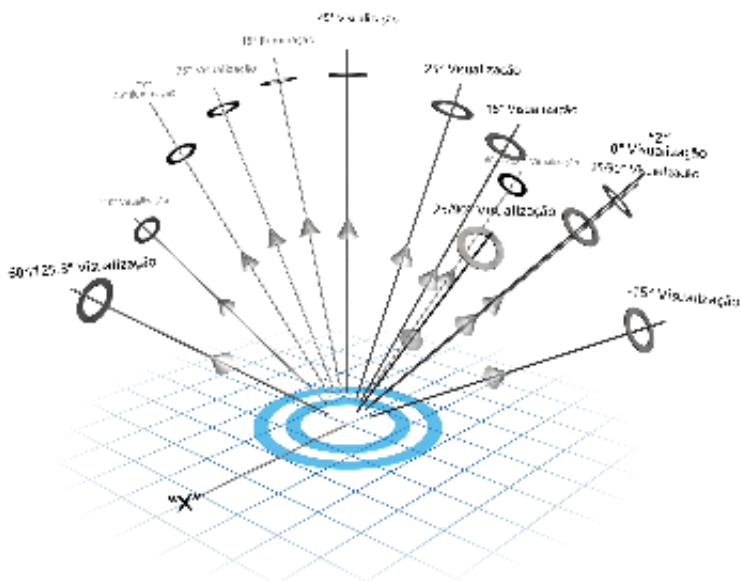


Figura 3. Geometrias e modos de exibição do MA98

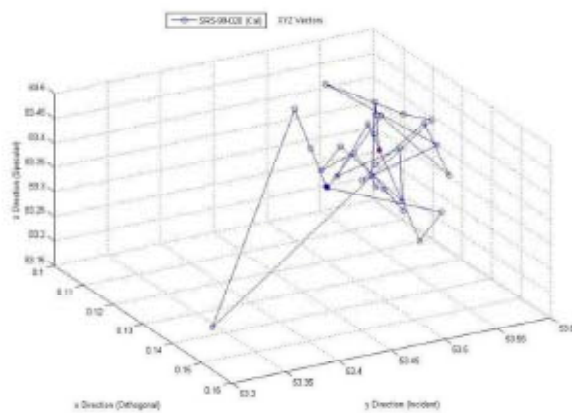
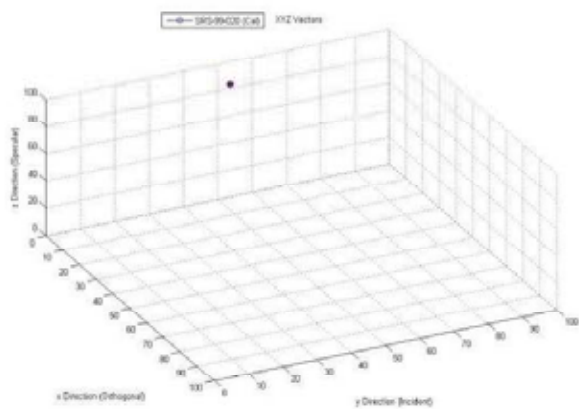
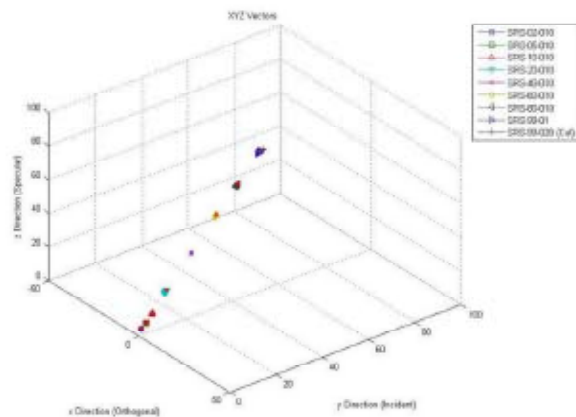
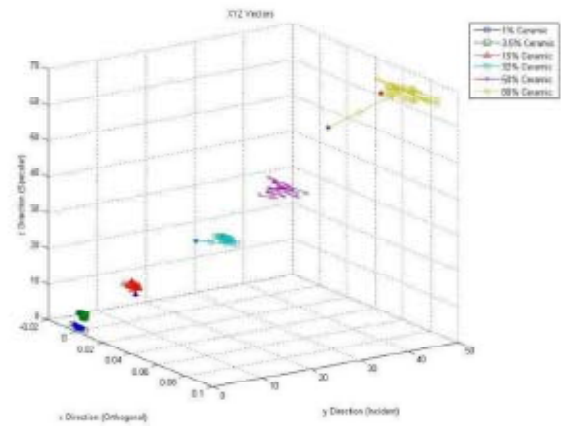
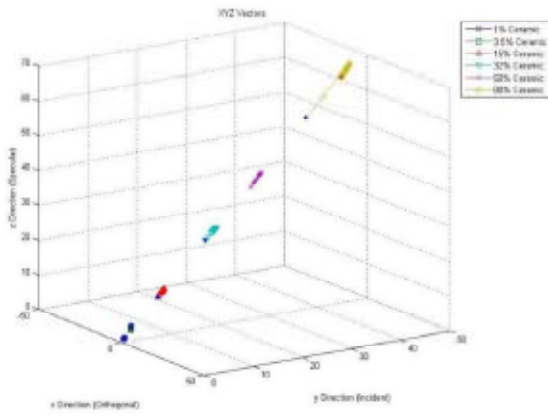


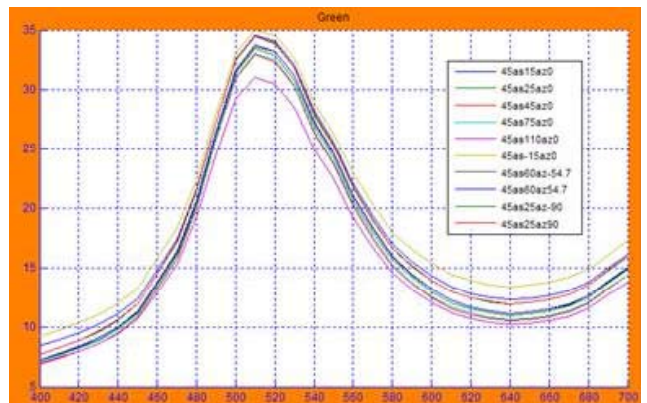
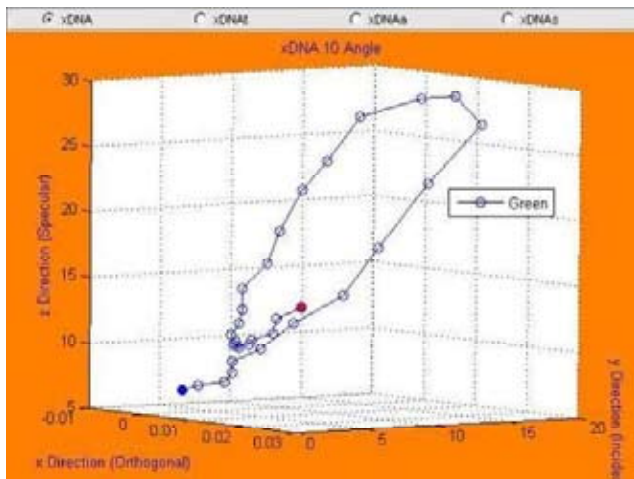
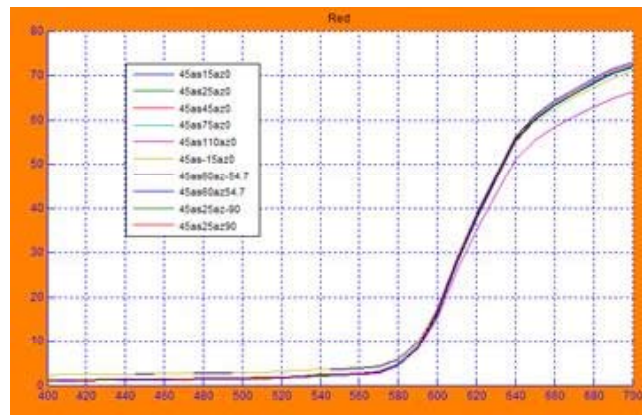
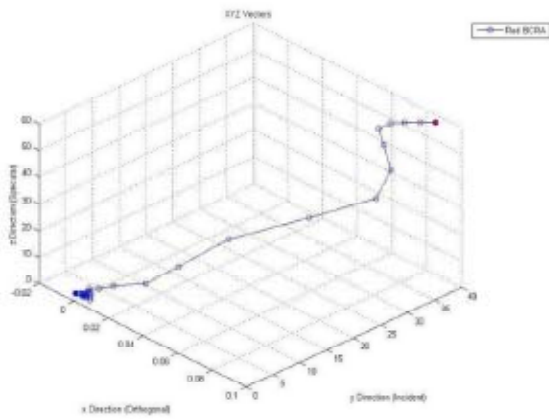
Figura 4a e 4b Resultados do Spectralon. A Figura 4c mostra o pigmento Preto adicionado ao Spectralon, com as refletâncias resultantes amostras de 99,1; 80; 60; 40; 20; 10; 5 e 2% apresentadas



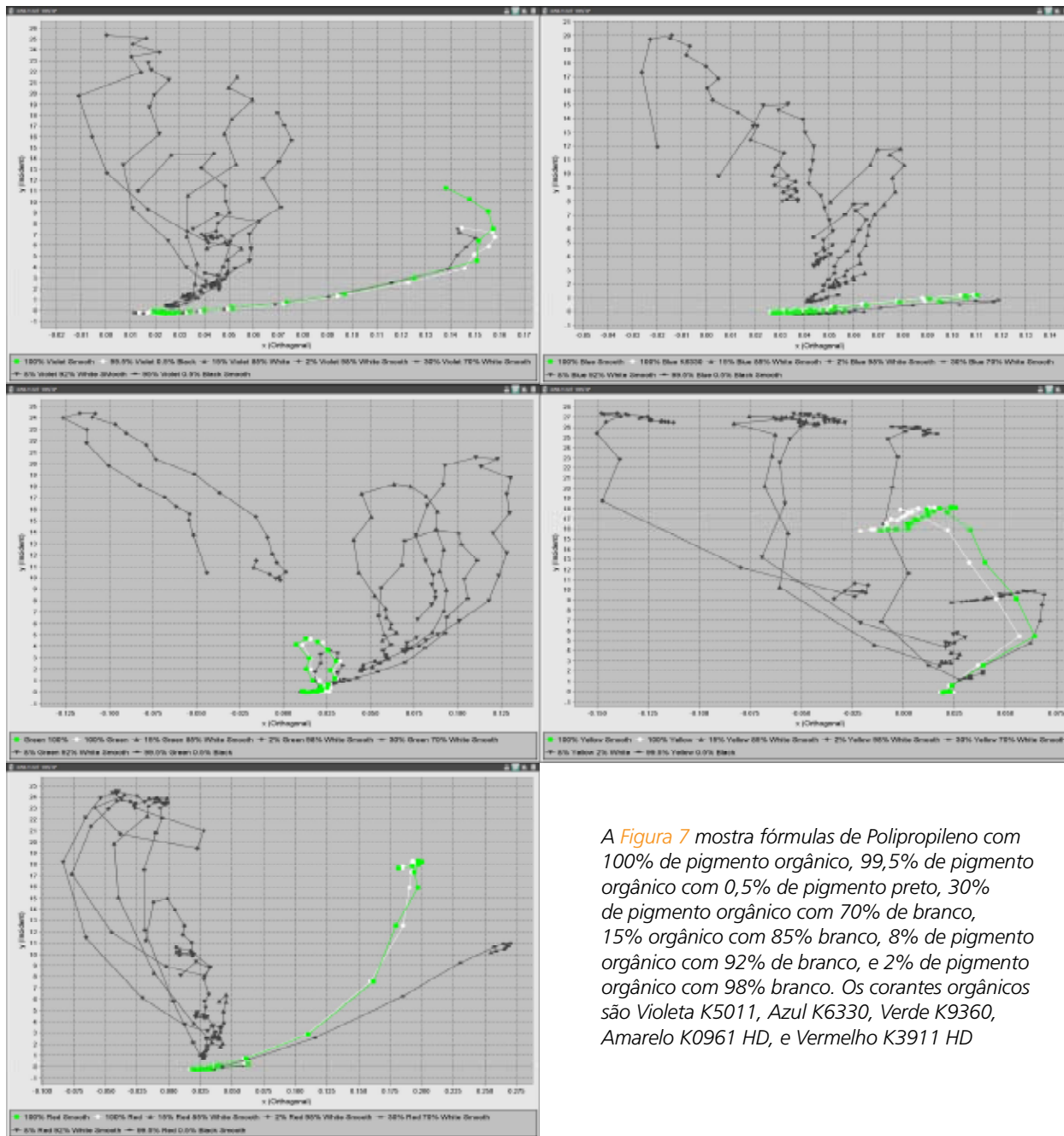




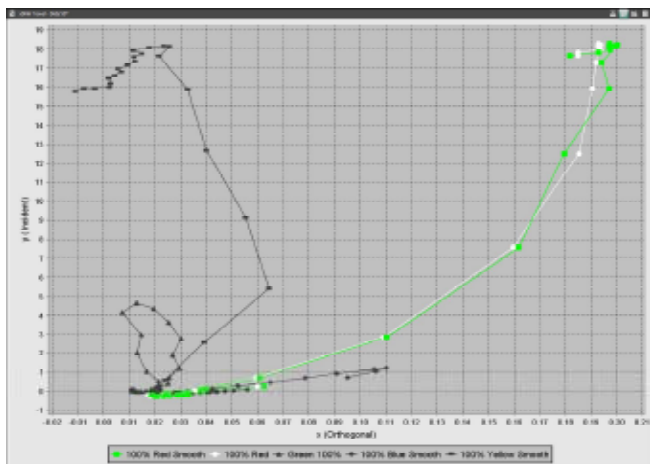
As Figuras 5a e 5b mostram os resultados de uma série de medições realizadas em um conjunto de ladrilhos cerâmicos em tons de cinza. Os valores de refletância são 1%, 3,5, 15, 32, 50, e 88% respectivamente



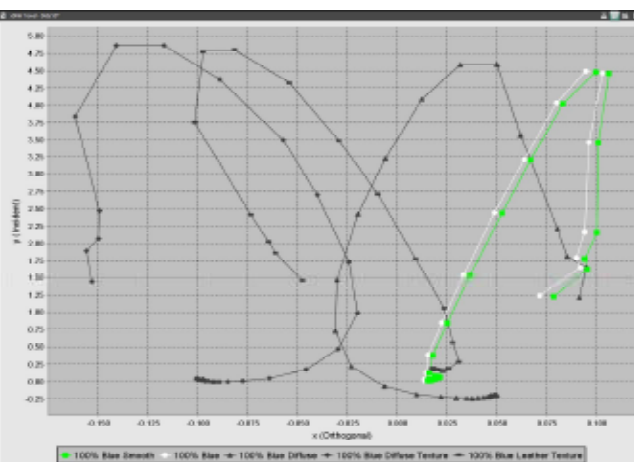
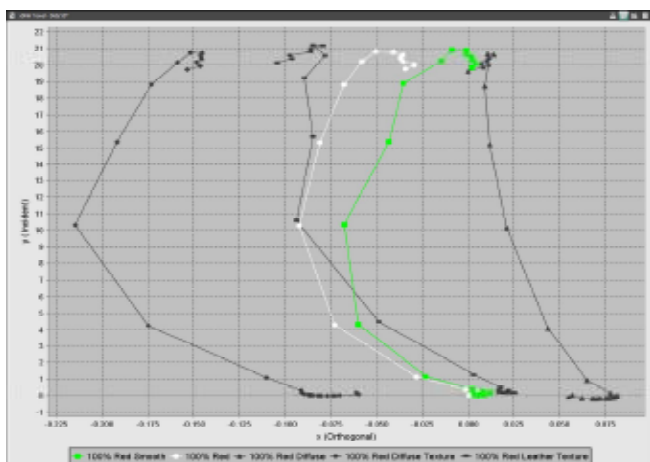
A Figura 6 mostra os Ladrilhos BCRA vermelho e verde. A Figura 6a mostra o xDNA do vermelho. A Figura 6b mostra as refletâncias espectrais brutas do vermelho. As Figuras 9c e 9d são para o ladrilho verde



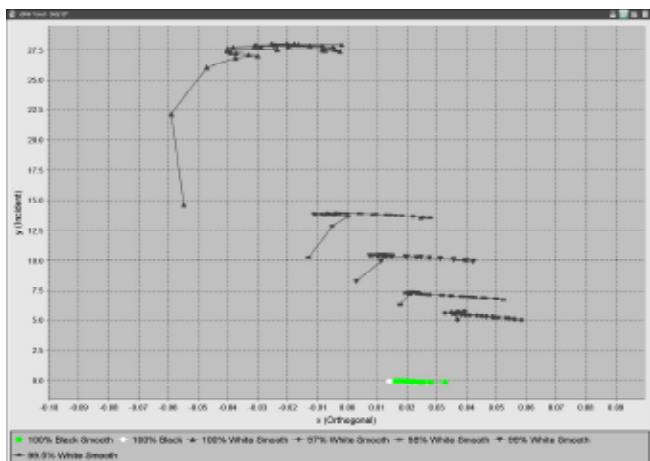
A Figura 7 mostra fórmulas de Polipropileno com 100% de pigmento orgânico, 99,5% de pigmento orgânico com 0,5% de pigmento preto, 30% de pigmento orgânico com 70% de branco, 15% orgânico com 85% branco, 8% de pigmento orgânico com 92% de branco, e 2% de pigmento orgânico com 98% de branco. Os corantes orgânicos são Violeta K5011, Azul K6330, Verde K9360, Amarelo K0961 HD, e Vermelho K3911 HD



A **Figura 8** mostra os corantes orgânicos BASF em concentração total através do espectro no espaço do xDNA.



A **Figura 9** mostra modos de exibição no espaço do xDNA traçados através da textura superficial



A **Figura 10** mostra fórmulas de Tons de Cinza nas mesmas concentrações, mas empregando os pigmentos Preto e Branco

