

Tecnologia de Impressão por Jato de Tinta para Decoração de Placas Cerâmicas

Vicente Sanz Solana**

**Instituto de Tecnología Cerámica – ITC, Universidade Jaime I – UJI, Castellón, Espanha*

***e-mail: sanzs@uji.es*

Resumo

A tecnologia de decoração por jato de tinta revolucionou o setor cerâmico. As impressoras de jato de tinta foram implantadas massivamente em todo o mundo para decorar placas e, atualmente, estão sendo estendidas para a obtenção de efeitos superficiais (brilho, mate, camaleão, etc.) e a aplicação de esmaltes. No entanto, a obtenção de bons resultados exige o conhecimento de vários aspectos da tecnologia. O presente trabalho descreve os fundamentos das tecnologias existentes para decoração por jato de tinta. Por um lado, os sistemas de impressão e as próprias imagens necessitam de uma gestão específica para se obter o resultado buscado. Por outro lado, é mostrado o funcionamento dos cabeçotes e os aspectos relevantes na dinâmica de formação de gota e de ponto, para os quais as propriedades das tintas são determinantes. Finalmente, são descritos os componentes básicos das impressoras.

Palavras-chave: impressão digital, jato de tinta, placas cerâmicas, pesquisa e inovação.

1. Introdução

As técnicas de decoração de placas cerâmicas evoluíram consideravelmente nos últimos anos devido à necessidade de lançar produtos com novos acabamentos estéticos, às condições meio ambientais e a fatores econômicos. Inicialmente, as técnicas mais gerais para decorar placas cerâmicas foram a serigrafia plana, utilizada inicialmente na década de 1970, e a serigrafia rotativa, também da década de 1970. Esta técnica era relativamente sensível e barata, embora a qualidade das imagens fosse baixa e sua robustez não era aquela necessária para um produto industrial (tons, adesão à tela, etc.)¹.

Posteriormente, na década de 1990, a decoração por rotogravura permitiu melhorar a qualidade das impressões e aumentar a produtividade². Como inconveniente, destacava-se o preço elevado dos rolos de silicone, o que requeria um elevado número de impressões para dar rentabilidade ao padrão (design). Na década de 1990 também surgiu a flexografia para decoração cerâmica³, embora tivesse implantação menos ampla.

Os sistemas de impressão por jato de tinta são muito recentes, desenvolvendo-se desde o final da década de 1980 para aplicações em automação de escritório. Os primeiros estudos sobre a possível utilização da impressão por jato de tinta para a decoração de produtos cerâmicos remontam aos anos 1980, quando W. Roberts⁴ do British Ceram Research propõe um sistema por jato de tinta contínuo empregando bocais com tamanho entre 20 e 100 µm. Embora a ideia de introduzir esta tecnologia para a decoração de placas cerâmicas adquirisse cada vez mais força, sua implantação exigiria muito pesquisa relacionada às tintas, cabeçotes e impressoras.

A primeira impressora industrial foi apresentada pela empresa Kerajet na feira internacional Cevisama em 2000, Figura 1⁵. As primeiras tintas para esta máquina

foram patenteadas pela empresa Ferro neste mesmo ano⁶. Nesta patente é descrito um conjunto de quatro tintas (CMYK) para impressão a cores, incluindo cada tinta um ou mais complexos solúveis de metais de transição. A apresentação desta máquina causou grande impacto. Porém, o elevado preço das tintas e das máquinas, o limitado espaço cromático obtido e sua dependência ao esmalte utilizado aturam inicialmente como uma barreira para a rápida expansão desta tecnologia.

O desenvolvimento paralelo de novos cabeçotes e das tintas pigmentadas podem ser considerados elementos chave para o desenvolvimento da tecnologia, embora existam muitos outros elementos que também tiveram de ser superados para convertê-la em uma realidade industrial, como foram o sistema de transporte de placa, o sistema de administração de tinta, a alimentação dos dados, os sistemas de controle associados e a integração do conjunto em um entorno de produção industrial.

As vantagens da tecnologia de impressão por jato de tinta são numerosas, tanto do ponto de vista técnico como econômico: impressão sem contato, o que reduz as perdas a cru; decoração até a borda; decoração de relevos; elevada resolução de imagem; controle e correção on-line do desenho, o que reduz as tonalidades; variações ilimitadas, aleatória, dos desenhos; mudanças imediatas de modelos; simplicidade na gestão de tintas, com redução de inventários e estoques de tinta; eliminação dos meios de impressão; economia de processo, tanto em lotes pequenos quanto em grandes; personalização simples do produto; menor tempo de desenvolvimento de produto; mão de obra reduzida.

Nesta situação, a tecnologia de impressão por jato de tinta foi um marco ao permitir abordar simultaneamente as três dimensões dos negócios, Figura 2⁷. Permite

embasar a estratégia comercial em produtos diferenciados, otimizar o processo e reduzir os custos de fabricação, e também melhorar o marketing de relacionamento. Desde o surgimento da primeira máquina de impressão para cerâmica em 2000 surgiram no mercado outras máquinas com melhorias. Atualmente há mais de treze máquinas diferentes no mercado, todas viáveis para impressão cerâmica.

A decoração de placas cerâmicas com tecnologia de jato de tinta está crescendo a grande velocidade. De acordo com os dados pesquisados pela revista *Ceramic World Review*⁸, das sete companhias fabricantes de máquinas de impressão digital para cerâmica, em 2010 haviam 538 máquinas instaladas no mundo, em fábricas de cerâmica. Em 2011 foram instaladas 516 máquinas e havia uma previsão de mais de 368 para o primeiro semestre de 2012.

Atualmente, os sistemas de impressão digital estão sendo utilizados em 41 países, em comparação aos 24 que os estavam utilizando em abril de 2012. A Espanha é o país em que esta tecnologia se iniciou e continua sendo o que tem o maior número de máquinas instaladas. Desde janeiro de 2011 até o final de junho de 2012 foram instaladas 155 máquinas. Neste mesmo período, a Itália, o segundo país em máquinas instaladas, praticamente duplicou o número de máquinas, passando de 141 para 266.

A tecnologia de impressão por jato de tinta está se impondo mundialmente. Ao final de 2010 Espanha e Itália contavam com 76% de todas as máquinas instaladas no mundo (410 de um total de 538), mas em junho de 2012 este percentual caiu para 48% (690 máquinas de um total de 1422). Ao final de 2010 China, Índia e Brasil tinham um número relativamente pequeno de máquinas instaladas,



Figura 1. Primeiro modelo de Kerajet, 2000 (SECV).



Figura 2. Dimensões dos negócios.

mas o valor aumentou consideravelmente e passaram a ser o terceiro, quarto e quinto países em número de máquinas instaladas, comente atrás de Espanha e Itália. Também há uma rápida expansão da tecnologia de decoração digital em cerâmica na Turquia, Irão, México, Vietnã, Indonésia, Tunísia, Argélia, Egito e Arábia Saudita.

1.1. Gestão das imagens

Nos últimos anos foi produzida uma tendência contínua para simplificar a impressão. Foi iniciada com a impressão dos fotolitos empregados para a fabricação das telas serigráficas, continuou com a obtenção direta destas telas e a gravação dos rolos de silicone e terminou com os sistemas digitais de impressão direta sobre as placas cerâmicas. Porém, a obtenção de resultados impressos aceitáveis exige um prévio ajuste dos sistemas empregados e o controle dos processos a que a imagem é submetida antes da impressão.

Para a preparação do sistema, cada elemento deve ser calibrado (linearização, limite de tinta) e caracterizado (perfil)^{9,10}. A calibração dos sistemas de entrada e saída (câmera, escâner, monitor, impressoras) permite otimizar seu intervalo físico de resposta. No caso dos dispositivos eletrônicos de entrada, a calibração dos detectores é realizada pelo próprio fabricante, enquanto o monitor pode ser calibrado pelo usuário. No caso das impressoras, a calibração requer ajustes: a linearização e a determinação do limite máximo de tinta.

A relação entre a quantidade de tinta e a cor obtida não é direta. Em alguns casos, como consequência da dissolução do pigmento no vidro, não se obtém qualquer cor até que se supere determinada quantidade de pigmento (p.ex., amarelo). Em outro extremo, há pigmentos (p.ex., azul) que dão a máxima saturação (100%) com uma quantidade menor que aquela a qual o sistema pode aplicar, Figura 3. Além disso, no intervalo intermediário, a resposta frequentemente não é linear, o que desequilibra o equilíbrio cromático das imagens. Como consequência, torna-se imprescindível linearizar a resposta cromática das impressoras com relação ao sinal de entrada.

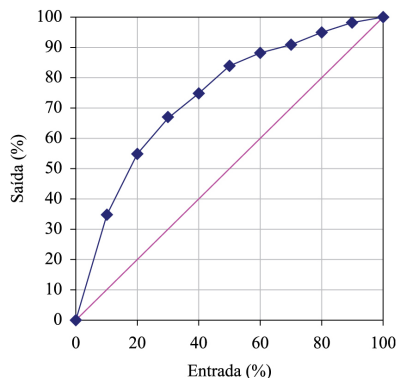


Figura 3. Relação saída/entrada de uma tinta azul sem linearização.

O excesso de tinta causa vários problemas, como borrado dos pontos, tempos de secagem mais prolongados e custo maior. Quando um perfil é gerado deve ser utilizada a quantidade adequada de preto e o limite de tinta. Na cerâmica, o limite de tinta pode variar com as características do esmalte, da tinta e das condições de trabalho, embora geralmente esteja acima de 250%, sendo 400% o máximo que se possa alcançar com o uso de quatro tintas. Ao se criar o perfil de cor que possibilite a conversão das cores da imagem, pode-se definir o limite total de tinta considerado adequado e, sobre esta base, recalcular a imagem. Se, por exemplo, é indicado um limite de tinta total de 300%, nenhuma parte da imagem vai conter mais que 300% de tinta.

Este limite pode ser controlado por algumas técnicas, como UGR (Under Color Removal) ou, preferivelmente, GCR (Grey Color Removal). No GCR, a componente neutra ou cinza da imagem, que poderia ser obtida por uma mistura CMY (ciano-amarelo-magenta), é substituída total ou parcialmente por tinta preta (K), com redução de tinta depositada, Figura 4. Esta correção pode ser feita em toda a imagem. No entanto, quando se faz a substituição de cores por tinta preta, os tons escuros da imagem podem perder matizes. Para evitar isto é possível adicionar-se um pouco de cor aos tons escuros (Under Color Addition).

Os perfis de cor realizam as transformações necessárias para converter as cores do espaço de cor de um dispositivo (origem) ao espaço de cor de outro dispositivo (destino), de forma que se mantenha a cor sem variações, Figura 5. Em sistemas complexos, com mais de um dispositivo de entrada e saída, ou quando são usados diferentes materiais, é necessário um espaço de conexão de perfis (PCS). No caso da cerâmica, o espaço de cor de origem é muito maior que o de destino, e estão sendo desenvolvidos espaços de cor de trabalho especificamente cerâmicos. Em todos os casos, a arquitetura de gestão de cor deve permitir a transmissão de cor entre sistemas físicos, aplicações e sistemas operacionais^{9,10}.

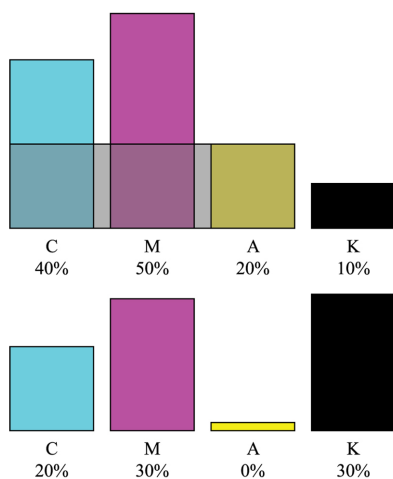


Figura 4. Exemplo de conversão GCR com redução de 40% de tinta.

O fluxo de trabalho mais adequado para as fases de projeto e desenvolvimento deve incluir algumas etapas. A primeira seria a aquisição da imagem. Quanto melhor for a imagem, mais fácil será o trabalho posterior. Devido aos problemas gerados pelos escâneres, atualmente são utilizadas câmaras digitais. Estas proporcionam a resolução e a profundidade de cor adequadas, além de se adequarem a modelos com relevo, e têm um preço razoável. No entanto, seu uso requer pessoas experientes e com amplo conhecimento em iluminação. É aconselhável que as imagens sejam adquiridas com o mesmo tamanho em que serão utilizadas e com alta profundidade de cor (> 8 bits), o que minimiza os erros no processo de edição e conversão.

Em seguida, a imagem deve ser manipulada para ser adaptada ao projeto cerâmico. Estas modificações devem ser feitas no espaço de cor de trabalho (tipicamente Adobe RGB) e incluem várias operações como alteração de tamanho e ajuste dos níveis de intensidade, brilho, ruído, contornos e outros ajustes globais. Todos estes ajustes são realizados no monitor, sendo fundamental que esteja corretamente calibrado e perfilado, bem como que disponha das condições de iluminação ambiental adequadas.

O espaço colorimétrico de impressão é muito menor que o espaço que o olho humano ou os dispositivos de entrada percebem, assim, as imagens devem ser corrigidas para o espaço de cor que realmente se pode imprimir. Existem quatro propósitos para a correção da cor, sendo os mais utilizados o colorimétrico relativo, o colorimétrico absoluto e o percentual. Todos têm como objetivo gerir as partes da imagem cuja cor não pode ser impressa, embora alguns também corrijam a imagem em sua totalidade. Dependendo do propósito escolhido, o ponto negro pode demandar uma conversão específica para manter sua neutralidade e luminosidade¹¹. A correção mais adequada depende da imagem, razão pela qual o designer deve escolher a mais adequada. Em seguida, deve-se fazer uma prova de impressão, as correções que sejam necessárias e, finalmente, a impressão do lote.

1.2. Cabeçotes

Os cabeçotes para impressão por jato de tinta utilizados na decoração cerâmica geram gotas baixo demanda pela ação de um atuador piezolétrico. Os principais fabricantes



Figura 5. Exemplo de tabela para a obtenção dos perfis.

de cabeçotes piezelétricos para o mercado cerâmico são Xaar, Fujifilm Dimatix, Toshiba e Seiko II. Outros fabricantes como Sharp, Domino, Brother, Videojet, Epson, Ricoh, Trident, Kyocera, HP, Panasonic, Samsung, Konica Minolta, Xerox, PicoJet e Microfab estão orientados a outros setores industriais. A arquitetura do cabeçote para conseguir a pressão de impulso das gotas no bico é muito variada, mas todos têm princípios físicos comuns¹².

O atuador piezelétrico se deforma pela ação de um campo elétrico, gerando uma sobre pressão sobre o fluido adjacente. Esta sobre pressão é transmitida como uma onda acústica no meio do fluido contido no canal do cabeçote. A densidade e a viscosidade da tinta, bem como a geometria e o comportamento mecânico das paredes do canal afetam a transmissão da onda. Quando a sobre pressão de fluido alcança a bico, esta provoca a ejeção da tinta, sendo formadas gotas nas quais a energia inicial foi convertida em outros tipos de energia, como cinética, superficial e térmica.

A velocidade de resposta dos piezelétricos é muito elevada, no entanto, para controlar a formação das gotas é necessário que a onda de pressão seja gerada e transmitida adequadamente no interior do cabeçote. Para cada cabeçote existem frequências de ressonância que produzem interferências construtivas entre as ondas de pressão geradas, embora para outras frequências as interferências sejam destrutivas, o que deve ser evitado. Por outro lado, a intensidade e a forma das ondas elétricas utilizadas na excitação do piezelétrico determinam a intensidade e a forma da onda de pressão no bico do cabeçote. O desenho da forma de onda que excita um cabeçote permite controlar a velocidade do disparo, o volume da gota e a formação de gotas satélites. Porém, a existência de numerosas variáveis interconectadas mostra que este trabalho não deve ser realizado pelo usuário final.

Muitos cabeçotes atuais podem funcionar de duas formas: com tamanho de gota constante ou variável. No primeiro caso, as imagens são de pior qualidade, mas a frequência de disparo é maior, o que permite obter maior produtividade. No segundo caso, são geradas gotas menores que podem se unir para formar gotas maiores. As imagens obtidas são mais naturais, mas a frequência de disparo é menor. Em ambos os casos os cabeçotes têm um sistema de aquecimento para que possam ser usadas tintas mais concentradas e para manter a viscosidade de disparo adequada. A tabela 1 mostra as principais características de alguns cabeçotes utilizados na cerâmica.

Os cabeçotes de impressão também têm outras características de interesse e que afetam a qualidade das impressões. A retilinearidade das trajetórias de disparo depende da precisão com que foram fabricadas as placas de bicos e de sua manutenção. Se as trajetórias das gotas não se mantiverem paralelas, alguns pontos serão superpostos e as imagens apresentarão defeitos sistemáticos, que dependem do cabeçote utilizado. Também é importante a distância máxima de disparo, relacionada à velocidade de disparo e ao volume de gota utilizado.

1.3. Tintas

1.3.1. Dinâmica do processo

1.3.1.1. Formação das gotas

Uma vez gerada a frente de pressões no bico do cabeçote é criado um perfil de velocidades e se inicia a formação da gota. Este fenômeno é governado pela equação de continuidade (conservação de massa) e pela equação de movimento (Navier-Stokes)¹².

A análise do processo permite deduzir que a ejeção está controlada pelo equilíbrio entre as forças de inércia, as forças viscosas e as superficiais. Inicialmente, uma parte da energia gerada pelo piezelétrico é convertida em energia cinética no bico do cabeçote. A viscosidade consome parte da energia cinética e a dissipa em forma de calor. Igualmente, a geração de novas superfícies, durante a formação da gota, requer um consumo energético que vem da energia cinética inicial. Como consequência, tanto a viscosidade quanto a tensão superficial se opõem à formação das gotas e seu aumento gera jatos mais lentos. Os equilíbrios entre a energia inercial e as energias de viscosidade e superficial são dados pelos números adimensionais de Reynolds ($Re = \rho v D / \mu$) e Weber ($We = \rho v^2 D / \sigma$), respectivamente. Onde Re é o número de Reynolds, We é o número de Weber, Ca é o número de capilaridade, ρ é a densidade, v é a velocidade, D é o comprimento característico, μ é a viscosidade e σ é a tensão superficial.

Por outro lado, a relação entre a energia de viscosidade e a superficial ($Ca = \mu v / \sigma$) determina o tempo de ruptura da cauda da gota. A força motriz para romper a cauda é determinada pela tensão superficial, enquanto que a resistência é determinada pela viscosidade. A análise numérica destes fenômenos permite quantificar o processo e fazer previsões, sempre que é feita uma calibração adequada do sistema.

Tabela 1. Características dos principais cabeçotes utilizados em cerâmica.

Cabeçote	Xaar 1001 GS12	Dimatrix Durst	Toshiba CF1L
Líquidos compatíveis	Óleo/solvente	Óleo/solvente/água	Óleo/solvente
Viscosidade máxima (cP)	22	20	18
Resolução nativa (dpi)	360	220/360	300
Tamanho de gota primária (pL)	12	30	12
Tamanho de gota máxima (pL)	84	90	84
Comprimento (mm)	70,5	64,77	53,7
Escala de cinzas (N)	8	4	8
Frequência (kHz)	6-14	12-33	6-14

1.3.1.2. Formação dos pontos

O processo de formação de um ponto, a partir de uma gota que impacta um substrato, pode ser dividido em duas etapas: o impacto, com uma escala de tempo de microssegundos, e o nivelamento, em uma escala de tempo de segundos. As variáveis que determinam estes processos são o tamanho, a velocidade e o ângulo de impacto da gota, a tensão superficial e a viscosidade da tinta e as propriedades da superfície como sua energia superficial, rugosidade e porosidade¹³.

Quando uma gota esférica impacta sobre uma superfície, ela se deforma, estendendo-se sobre a mesma. A magnitude do estiramento depende da relação entre a força impulsora (inércia) e as resistências existentes (principalmente a viscosidade e a tensão superficial). A relação entre a energia cinética e a energia superficial é indicada pelo número de Weber (We), enquanto que a relação entre a energia cinética e a resistência viscosa é indicada pelo número de Reynolds (Re). De acordo com estas relações, quanto maior seja o tamanho, a velocidade e a densidade (teor em sólidos) da gota, maior será seu estiramento, enquanto que quanto maior seja a viscosidade e a tensão superficial, menor será o estiramento.

A rugosidade da superfície pode limitar a estiramento da gota devido à retenção de parte da tinta nos vales. Além disso, o ângulo de contato pode favorecer ou contrariar a estiramento da gota, dependendo de seu valor. A velocidade de avanço das peças pela linha é relativamente baixa (< 1 m/s) em relação à velocidade de impacto das gotas (~6 m/s), assim o ângulo de impacto é próximo a 90° e, conseqüentemente, o ponto não se deforma. Na fase de nivelamento, a tensão superficial tenta minimizar a superfície gerada durante a fase de impacto, o que tende a homogeneizar o ponto. Similarmente ao que ocorre na fase de impacto, o ângulo de contato entre a tinta e o substrato pode contribuir para o estiramento obtido.

Simultaneamente a estas etapas ocorre a consolidação do ponto, seja por um processo químico de cura, por sucção do suporte ou por evaporação do veículo. Em todos os casos, a escala de tempo pode ser da mesma ordem de grandeza que aquela da etapa de nivelamento, o que pode limitar seu desenvolvimento, pois a tinta deixa de ser líquida^{14,15}. Para o caso das tintas cerâmicas normalmente utilizadas, os veículos não são reativos, não sendo assim produzida sua polimerização. E as pressões de vapor são muito baixas, o que descarta a secagem por evaporação. Como consequência, o único mecanismo que pode consolidar os pontos é a sucção pelo suporte.

A velocidade de sucção de sólidos porosos secos é muito elevada nos instantes iniciais, o que produz uma rápida consolidação das gotas. Porém, a natureza do veículo empregado e as condições de umidade e temperatura do substrato cerâmico podem ter grande influência sobre a sucção e, conseqüentemente, sobre o estiramento dos pontos¹⁶.

1.3.2. Requisitos

1.3.2.1. Compatibilidade química

Durante seu uso, as tintas estarão em contato prolongado com numerosos materiais, tanto do cabeçote propriamente dito como do resto da máquina, sendo imprescindível

comprovar sua estabilidade química. A compatibilidade deve ser comprovada com a tinta formulada, pois embora esta dependa principalmente da natureza do veículo e dos aditivos empregados, também depende de sua concentração e das interações que possam ser produzidas entre os mesmos.

Os materiais específicos a serem ensaiados com as tintas dependem de cada fabricante dos cabeçotes e/ou máquinas, embora alguns materiais de uso habitual sejam polietileno, polipropileno, poliamidas, silicões, entre outros. A incompatibilidade é determinada pelo contato prolongado entre os materiais ensaiados durante vários meses. Nos materiais plásticos manifesta-se principalmente por uma variação de massa ou uma mudança em suas propriedades físicas (dureza, flexibilidade, etc.). Os adesivos podem deixar de cumprir sua função. As partes metálicas podem sofrer processos de corrosão. A compatibilidade química também deve ser comprovada com os líquidos de limpeza. Estes são mais agressivos, embora seu contato com as peças seja mais breve.

1.3.2.2. Propriedades físicas

Algumas propriedades físicas do comportamento das tintas devem ser levadas em consideração¹⁷.

- a) Viscosidade: A viscosidade afeta diretamente a dinâmica dos processos de formação de gota e ponto devido à resistência ao fluxo. A viscosidade, na temperatura de disparo, deve estar entre 15-25 mPa.s. Normalmente se considera que o comportamento das tintas deveria ser newtoniano. No entanto, assume-se que um comportamento ligeiramente pseudoplástico também é aceitável e pode mesmo aumentar a estabilidade da tinta em relação à sedimentação. A viscosidade deve ser medida em reômetros que permitam sua determinação em diferentes velocidades de cisalhamento.
- b) Tensão superficial: A tensão superficial também tem influência significativa na dinâmica dos processos de formação de gota e ponto, devido à resistência que oferece na geração de novas superfícies. A tensão superficial deve estar entre 25-35 mN/m. Os veículos orgânicos utilizados nas tintas facilmente proporcionam estes valores, mas também se pode recorrer a misturas de líquidos ou ao uso de tensoativos. São determinados com o uso de tensiômetros estáticos, utilizando a placa de Wilhelmy.
- c) Densidade: A densidade é outra propriedade determinante na dinâmica dos processos de formação de gota e ponto devido às forças inerciais e à acústica do cabeçote. Para determinar tinta, a densidade está diretamente relacionada com seu teor de sólidos. Os valores normalmente encontrados para a densidade estão entre 1,2-1,4 g/cm³. O modo mais simples de medi-la é com auxílio de um picnômetro, embora também existam outros métodos instrumentais.

- d) **Tamanho de partícula:** Para evitar o bloqueio dos bicos normalmente se considera que o tamanho das partículas da tinta deva ser, ao menos, 20 vezes menor que o diâmetro destes bicos. Como consequência, com os cabeçotes usados atualmente, o tamanho de partícula dos sólidos usados nas tintas deve ser inferior a 1 µm. Para garantir este limite, as tintas são filtradas durante sua fabricação. O tamanho das partículas também afeta a estabilidade da tinta e o desenvolvimento das cores, assim sua medição é um parâmetro de controle de máxima importância. Existem duas técnicas principais para a medição da distribuição de tamanho de partículas, difração laser e dispersão dinâmica de luz.
- e) **Volatilidade:** O veículo empregado na fabricação das tintas na deve evaporar na placa de bicos, pois a secagem da tinta provocaria a deposição dos sólidos que assim bloqueariam os bicos. Desta forma, são selecionados líquidos com baixa volatilidade ou são adicionados materiais para o controle da evaporação. A volatilidade pode ser medida em termos relativos, sob condições constantes, por comparação com materiais conhecidos.
- f) **Estabilidade:** As tintas devem ser estáveis para proporcionar resultados constantes e evitar interrupções durante a impressão. Os fenômenos que devem ser evitados são a sedimentação e a agregação das partículas.

A velocidade de sedimentação (v) de uma partícula pode ser representada pela lei de Stokes, Equação 1. Segundo esta lei, quanto menor a viscosidade (η) do líquido que promove a suspensão e quanto maior a diferença entre as densidades (ρ) e o tamanho das partículas (D), maior será a velocidade de sedimentação. No entanto, este comportamento somente é observado para suspensões muito diluídas, com $\phi < 0,03$, onde as partículas podem sedimentar sem interagir umas com as outras, e para partículas relativamente grandes, para as quais as forças brownianas são desprezíveis, sempre que a velocidade de sedimentação for baixa, $Re_p < 1$.

$$v = \frac{g \cdot (\rho_p - \rho_l) \cdot D^2}{18 \cdot \eta} \quad (1)$$

Para o caso de suspensões relativamente concentradas, com $\phi > 0,1$, como ocorre para as tintas de impressão, a distância média entre as partículas é pequena, da mesma ordem ou menor que o tamanho das partículas, e assim a sedimentação de cada delas uma é afetada pelas demais. Além disto, as partículas, durante sua queda, deslocam um volume equivalente de líquido, que ascende em sentido contrário. Deste modo, a velocidade relativa do movimento da partícula é maior, assim como a força de atrito. A consequência deste efeito é a redução da velocidade de sedimentação ao se aumentar a fração volumétrica de sólidos (ϕ). Este fenômeno pode ser quantificado por leis potenciais ou ao se utilizar os parâmetros físicos da

suspensão na equação de Stokes, em vez de se utilizar os parâmetros do líquido.

Para concentrações ainda maiores, com $\phi > 0,3$, ou quando as partículas se acumulam no fundo do recipiente, forma-se um leito, relativamente compacto, cuja evolução com o tempo depende do estado de agregação das partículas. O prazo de validade destes processos depende da concentração de sólidos e da defloculação do sistema.

A redução do tamanho das partículas é a ferramenta principal para evitar a sedimentação. De fato, quando as moléculas do líquido da suspensão chocam-se com as partículas menores (0,1–1 µm), estas transferem parte de sua energia cinética, o que impede sua sedimentação. Para o caso de suspensões bimodais, as menores partículas são as que devem suportar as maiores.

As tintas também devem ser estabilizadas do ponto de vista coloidal, ou seja, devem gerar forças de repulsão adequadas para manter as partículas individualizadas. Estas forças de repulsão podem ser de natureza eletrostática e/ou estérica. O controle sobre estas forças é realizado por moléculas que são adsorvidas sobre a superfície das partículas e/ou que regulam as cargas elétricas em sua vizinhança. Se a suspensão não é estável, a agregação das partículas provoca um aumento do tamanho hidrodinâmico, o que leva a um aumento de sua velocidade de sedimentação. A estabilidade das tintas é determinada a partir da variação de suas propriedades com o tempo, acelerando assim sua sedimentação mediante força centrífuga ou mediante técnicas instrumentais baseadas na retro dispersão da luz.

1.4. Composição das tintas

A tecnologia de impressão por jato de tinta é muito versátil, permitindo o uso de grande variedade de materiais sempre que as propriedades físico-químicas finais sejam adequadas ao cabeçote de impressão utilizado. As tintas utilizadas na decoração cerâmica têm os seguintes componentes:

- Sólidos:** São os responsáveis pela coloração ou pelo efeito final buscado após a queima. Podem ser pigmentos, matérias-primas ou fritas. O teor de sólidos na tinta pode estar acima de 40% em massa.
- Veículo:** Líquido utilizado para aplicar os sólidos sobre a superfície cerâmica. São utilizados glicóis, óleos e ésteres. A viscosidade, a tensão superficial e a volatilidade dos veículos devem ser baixas.
- Aditivos:** Sua principal função é a estabilização coloidal das partículas, o que determina o comportamento reológico e a estabilidade das tintas. Também podem ser empregados para modificar a tensão superficial e facilitar a desaeração das tintas. Existe uma grande variedade de produtos, embora a maior parte deles utilize um mecanismo estérico para a estabilização das partículas.

1.5. Impressoras

Ainda que a parte principal das impressoras seja o conjunto dos cabeçotes, existem outros componentes que afetam diretamente seu rendimento, como o circuito de

recirculação das tintas, a eletrônica de controle, a interface do usuário e a estrutura mecânica sobre a qual é montado o conjunto do sistema¹⁸.

1.5.1. Circuito de recirculação das tintas

A tinta consumida pelos cabeçotes deve ser reposta de forma contínua desde seus depósitos para manter seu nível e evitar a entrada de ar. A vazão é muito pequena e variável, desta forma se recorre ao bombeamento de uma vazão maior e constante, em um circuito de recirculação, facilmente controlável, onde são realizadas também outras operações que sejam necessárias.

A filtração da tinta que vem dos depósitos é uma operação preventiva que evita a introdução de partículas e agregados de grande tamanho nos cabeçotes, o que impediria seu correto funcionamento. O tamanho dos filtros deve estar entre 10 e 25 µm. O controle da temperatura da tinta no cabeçote é necessário para assegurar uma viscosidade adequada durante sua impressão. O preaquecimento da tinta pode ser feito no circuito de recirculação, embora o controle fino seja realizado no interior do cabeçote, Figura 6.

A recirculação da tinta fora do cabeçote é realizada facilmente e permite o acondicionamento global da tinta. No entanto, sua eficiência é baixa na prevenção do bloqueio dos bicos. Ao contrário, a recirculação da tinta no interior do cabeçote tem as seguintes vantagens (para a Durst e Xaar): Minimiza o risco de sedimentação da tinta, devido ao arraste gerado pelo fluxo; minimiza a aglomeração das partículas, devida ao cisalhamento, aumentando sua estabilidade; permite o uso de tintas mais viscosas e de comportamento ligeiramente pseudoplástico; favorece a desaeração, graças ao arraste das bolhas geradas no interior dos cabeçotes e assim elimina a necessidade de purga.

Como consequência, as máquinas atuais podem dispor de um sistema de dupla recirculação, onde a tinta se mantém em movimento contínuo dentro dos cabeçotes e dentro dos depósitos, aproveitando a vantagem de ambos os sistemas.

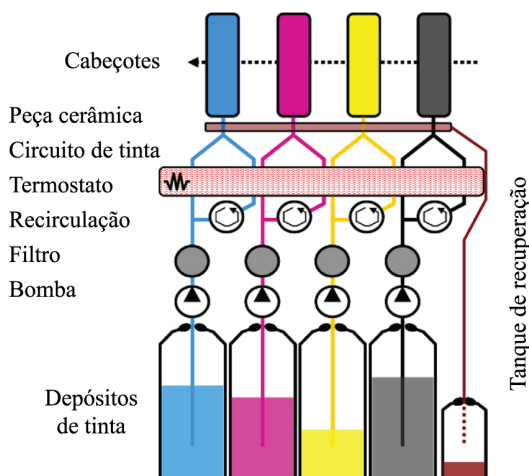


Figura 6. Circuito de tinta.

1.5.2. Barras de cabeçotes

Nas impressoras de passe simples, os cabeçotes individuais devem ser dispostos em barras para cobrir toda a largura de impressão. Existem duas configurações básicas, transversal e oblíqua (Figura 7). Na configuração oblíqua, a resolução de impressão é maior que a resolução nativa dos cabeçotes, dependendo do ângulo de instalação, e o número de cabeçotes empregados é maior. Os usuários desta configuração¹⁹ asseguram que o entrelaçado dos pontos de impressão entre distintos cabeçotes aumenta a homogeneidade e reduz o risco de defeitos de impressão (linhas). A largura de impressão tem crescido, atualmente é 1152 mm. Para otimizar a largura de impressão, algumas empresas permitem a alimentação de peças em paralelo, provenientes de duas linhas. Este recurso permite aumentar consideravelmente a produtividade e reduzir gastos.

Em cada barra de impressão é utilizado um tipo de tinta e as máquinas utilizarão tantas barras quanto forem os materiais que se queira imprimir. Inicialmente foram utilizadas três barras, uma para cada cor. No entanto, a decoração de peças cerâmicas é cada vez mais complexa e o número de barras está aumentando. Também já se utilizou o recurso de imprimir uma mesma tinta com duas barras com o objetivo de aumentar a produtividade das máquinas. Atualmente podem ser utilizadas até 12 barras, dedicadas tanto a tintas coloridas como para obtenção de efeitos especiais. Dependendo do propósito da decoração e da tinta empregada, cada barra pode ser equipada com diferentes tipos de cabeçotes. De concreto, a obtenção de efeitos requer o uso de cabeçotes com maior descarga em relação àqueles utilizados para tintas pigmentadas.

A velocidade de impressão depende diretamente da frequência de disparo dos cabeçotes e da resolução desejada, Equação 2:

$$v_{\text{imp}} \left(\frac{\text{m}}{\text{min}} \right) = f \left(\frac{\text{gota}}{\text{s}} \right) \times 1 \left(\frac{\text{pto.}}{\text{gota}} \right) \times 60 \left(\frac{\text{s}}{\text{min}} \right) \times 1 / \text{resol.} \left(\frac{\text{''}}{\text{pto.}} \right) \times 0.0254 \left(\frac{\text{m}}{\text{''}} \right) \quad (2)$$

Como consequência, quando se fixa a resolução e a frequência de disparo, a velocidade de impressão só pode ser uma. Por outro lado, se a velocidade de impressão é alterada sem se alterar a frequência de disparo, a resolução de impressão será modificada na direção do avanço (Figura 8). Tendo-se em conta esta relação entre

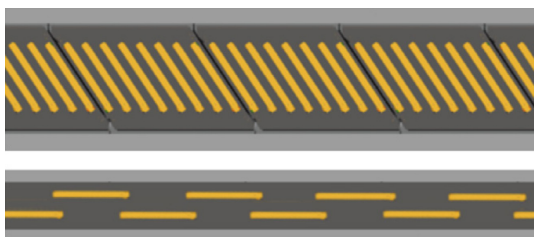


Figura 7. Disposição dos cabeçotes.

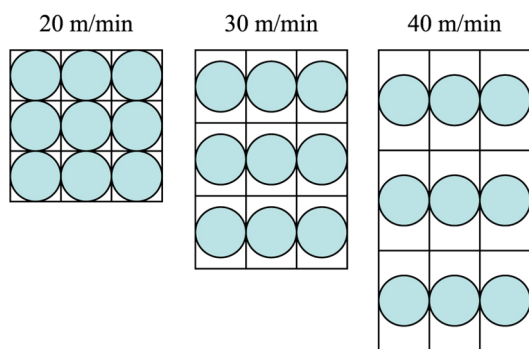


Figura 8. Influência da velocidade de avanço sobre a distância entre os pontos.

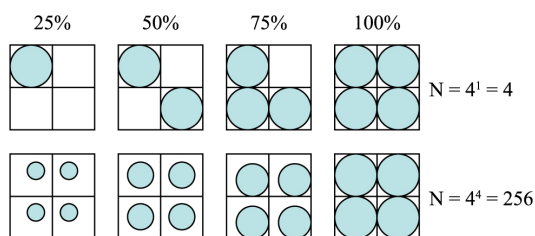


Figura 9. Níveis de cinza (N) disponíveis em uma quadrícula de 2x2 com tamanho de gota constante e variável

velocidade e resolução de impressão, muitos fabricantes indicam a velocidade recomendada para seus cabeçotes para obter determinada resolução.

A velocidade de impressão também pode ser limitada por uma velocidade insuficiente de aporte de tinta ao canal dos cabeçotes. Este problema foi parcialmente solucionado pelos designers gráficos, limitando a máxima quantidade de tinta em determinadas áreas da imagem, e duplicando o número de barras.

Por outro lado, as impressoras incorporam protocolos de limpeza dos cabeçotes durante seu uso, que limitam em certa medida a sua produtividade. A necessidade destas etapas é determinada principalmente pelo acúmulo de tinta na placa dos bicos. A mecânica que suporta todo o sistema deve ter a robustez e precisão necessárias para evitar vibrações e para facilitar os ajustes necessários.

1.5.3. Eletrônica e software

As impressoras gerem milhões de dados por segundo para controlar as barras dos cabeçotes, o circuito de tinta, o circuito pneumático, o sistema de transporte, etc., o que requer uma arquitetura eletrônica muito potente e precisa. Normalmente é utilizado um computador principal, do qual dependem outros (FPGA) que controlam diretamente o funcionamento das barras.

Embora as imagens sejam trabalhadas em pixels/² (polegada), a impressão deve converter os arquivos a gotas/pontos físicos, pois se deve comandar os cabeçotes para que disparem ou não e com qual tamanho de gota. Este trabalho é executado pelo RIP (processador de imagem por varredura, Raster Image Processing), integrado à

impressora, Figura 9. Embora existam muitas técnicas para realizar esta operação, a mais simples é comentada a seguir.

Defina-se uma quadrícula como sendo determinada pela distância entre os bicos de um cabeçote na direção transversal ao avanço e pela razão entre a velocidade e a frequência de disparo, na direção do avanço. Ao ser utilizado um cabeçote binário com tamanho de gota constante, uma quadrícula de 2x2 somente permite obter quatro níveis de cinzas (N), dependendo do número de células preenchidas. A obtenção de 256 níveis exigiria definir uma quadrícula de preenchimento de 16x16 com a consequente perda de qualidade da imagem. Se for utilizado um cabeçote de gota variável com quatro tamanhos de gota podem ser obtidos os 256 níveis em uma quadrícula de 2x2, pois além do preenchimento progressivo das células pode-se contar com o tamanho do ponto. O efeito sobre a qualidade da imagem é tão importante que atualmente são utilizados somente cabeçotes do segundo tipo.

Além disto, as impressoras permitem a manipulação da imagem para sua pré-visualização e para ajuste das condições de impressão. Também incorporam ferramentas gráficas para se obter efeitos (mosaico, deslocamentos, ajustes de cor) sem ser necessário modificar os arquivos originais.

2. Conclusões

A tecnologia de impressão por jato de tinta apresenta um grande desenvolvimento desde sua origem, o que permitiu que fosse implementada industrialmente de forma massiva para fabricação de placas cerâmicas. Atualmente, esta tecnologia não se limita à decoração, mas permite obter múltiplos efeitos cerâmicos, relevos e mesmo a aplicação de esmaltes. Em futuro próximo, a pesquisa desta tecnologia permitirá ampliar o leque de materiais a serem utilizados, obter novas aplicações funcionais e, possivelmente, transformar o próprio processo de fabricação de placas e desenvolver novos modelos de negócio.

Referências

1. SANZ, V. et al. Influência da serigrafia sobre a variação de tonalidade de revestimentos cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, v. 4, n. 1/6, 19-26, 1999.
2. BERTO, A. M. Ceramic tiles: above and beyond traditional applications. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 27, n. 2/3, 1607-1613, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.146>.
3. JIMENEZ-OTERC, M. A. The revolution of ceramic printing high-quality flexographic printing on ceramics. *Tile & brick international*, v. 17, n. 48, 2001.
4. ROBERTS, W. Decorating methods for the future. *Transactions and Journal of the British Ceramic Society*, v. 87, n. 4, 1988.
5. DE CARLO, A. The digital revolution in tile decoration. *Ceramic World Review*, v. 51, n. 78, 2003.
6. BENET, C. C. et al. Individual inks and an ink set for use in the color ink jet printing of glazed ceramic tiles and surfaces. WO Patent 200151573, 2000.

7. FERNANDEZ, J. Ventajas económicas y financieras de los sistemas de decoración de baldosas cerámicas con tecnología inkjet. In: Congresso Luso-Espanhol de Cerâmica e Vidro, 4., 2011, Aveiro. **Anais...**, Aveiro: SPCV, 2011.
8. CRASTA, G.P. Boom in digital technology. **Ceramic World Review**, v. 97, p. 64-67, 2012.
9. INTERNATIONAL COLOR CONSORTIUM. The role of ICC profiles in a colour reproduction system. **White Paper**, n. 7, 2004.
10. INTERNATIONAL COLOR CONSORTIUM. RGB Color managed workflow example. **White Paper**, n. 23, 2008.
11. URIBE, J. **Understanding black point compensation**. Disponível em: <http://cias.rit.edu/~gravure/tt/pdf/cm/TT5_Jorge01.pdf>. Acesso em: XX jan. 2014.
12. WIJSHOFF, H. **Structure- and fluid-dynamics in piezo inkjet Printheads**, 2008. 185 f. Tese de Doutorado- en University of Twente, Enschede, 2008.
13. TOIVAKKA, M. Numerical investigation of droplet impact spreading in spray coating of paper. In: Spring Advanced Coating Fundamentals Symposium, 2003, Åbo. **Anais...** Åbo: Åbo Akademi University, 2003.
14. LIM, T. et al. Experimental study on spreading and evaporation of inkjet printed pico-liter droplet on a heated substrate. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, n. 1/2, 431-441, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.05.028>.
15. CHEN, C. T. Inkjet printing of microcomponents: theory, design, characteristics and applications. In: KAMANINA, N. V. **Features of liquid crystal display materials and processes**. Rijeka: InTech, 2011. Disponível em: <<http://www.intechopen.com>>.
16. SANZ, V. et al. Influencia de las condiciones de impresión sobre la calidad de la imagen. In: CONGRESSO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO, 13., 2014, Castellón. **Anais...** Castellón: Qualicer, 2014.
17. SANZ, V, et al Technical Evolution of Ceramic Tile Printing. **Journal of Imaging Science and Technology**, v. 56, n. 5, p. 50402-1-50402-7(7), 2012.
18. VARELA, F.; MOTA, J. Panorámica y avances en la impresión inkjet. **Formato Digital**, n. 44, 2008.
19. DURST CATALOG.