

TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN POR CHORRO DE TINTA PARA LA DECORACIÓN DE BALDOSAS CERÁMICAS

Dr. Vicente Sanz Solana

Instituto de Tecnología Cerámica

RESUMEN

La tecnología de decoración por chorro de tinta ha revolucionado el sector cerámico. Las impresoras de chorro de tinta se han implementado en todo el mundo de forma masiva para decorar las baldosas y, actualmente, se está extendiendo su uso a la obtención de efectos superficiales (brillo, mate, camaleonte,...) y a la aplicación de esmaltes. Sin embargo, la obtención de resultados óptimos exige el conocimiento de diferentes aspectos de la tecnología.

En el presente trabajo se describen los fundamentos de las tecnologías concurrentes en la decoración por chorro de tinta. Por una parte, los sistemas de impresión y las propias imágenes requieren de una gestión específica para obtener el resultado buscado. Por otra parte, se ha mostrado el funcionamiento de los cabezales y los aspectos relevantes en la dinámica de formación de gota y de punto, en los que las propiedades de las tintas son determinantes. Finalmente, se describen los componentes básicos de las impresoras.

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de decoración de baldosas cerámicas han evolucionado de forma considerable en los últimos años debido a la necesidad de lanzar productos con nuevos acabados estéticos, a los condicionantes medioambientales y a factores económicos.

Inicialmente, las técnicas más generalizadas para decorar baldosas cerámicas fueron la serigrafía plana, que empezó a utilizarse en la década de los sesenta, y la serigrafía rotativa, que apareció en la década de los setenta. Esta técnica era relativamente sencilla y barata, aunque la calidad de las imágenes era baja y su robustez no era la necesaria para un producto industrial (pegados, tonos, etc.) [1].

Posteriormente, en la década de los noventa, la decoración por huecogrado permitió mejorar la calidad de las impresiones y aumentar la productividad [2]. Como inconveniente, cabía destacar el elevado precio de los rodillos de silicona, que requerían un elevado número de impresiones para rentabilizar el diseño. En la década de los 90 también apareció la flexografía en la decoración cerámica [3], aunque tuvo una implantación mucho menor.

Los sistemas de impresión por chorro de tinta son muy recientes, desarrollándose desde finales de la década de los 80 para aplicaciones ofimáticas. Los primeros estudios sobre la posible utilización de la impresión por chorro de tinta para la decoración de productos cerámicos se remontan a los años 80, cuando W. Roberts [4] del British Ceram Research propone un sistema por chorro de tinta continuo empleando boquillas de un tamaño comprendido entre 20 y 100 μm . Aunque la idea de introducir esta tecnología en la decoración de baldosas cerámicas adquiría cada vez mayor fuerza, su implementación todavía exigía una considerable investigación relacionada con las tintas, los cabezales y las impresoras.

La primera impresora industrial se presentó por la empresa Kerajet en la feria internacional de Cevisama en el año 2000 [5]. Las primeras tintas para dicha máquina fueron patentadas por Ferro ese mismo año [6]. En esta patente se describe un set de cuatro tintas (CMYK) para la impresión en color, incluyendo cada tinta uno o varios complejos solubles de metales de transición. La presentación de esta máquina causó un gran impacto. No obstante, el precio elevado de las tintas y de las máquinas, el limitado espacio cromático obtenido y su dependencia del esmalte utilizado, actuaron inicialmente como una barrera para la rápida expansión de esta tecnología.

El desarrollo paralelo de nuevos cabezales y de las tintas pigmentadas pueden considerarse elementos clave para el desarrollo de esta tecnología, aunque existen muchos otros elementos que también se han tenido que superar para convertirla en una realidad industrial, como son el sistema de transporte de la baldosa, el sistema de suministro de la tinta, la alimentación de los datos, los sistemas de control asociados y la integración del conjunto en un entorno industrial de producción.



Figura 1. Primer modelo de Kerajet año 2000 (fuente SECV).

Las ventajas de la tecnología de impresión por chorro de tinta son numerosas, tanto desde un punto de vista técnico como económico:

- Impresión sin contacto, lo que reduce las bajas en crudo
- Decoración hasta el borde.
- Decoración de relieves.
- Resolución de la imagen elevada.
- Control y corrección on-line del diseño, lo que reduce los tonos.
- Variaciones ilimitadas (aleatorias) de los diseños.
- Cambios de modelo inmediatos.
- Simplifica la gestión de tintas. Reduce inventarios y almacenes de tinta.
- Elimina los medios de impresión.
- Economía del proceso, tanto en lotes pequeños como grandes.
- Personalización del producto sencilla.
- Menor tiempo de desarrollo de producto.
- Mano de obra reducida.

En esta situación, la tecnología de impresión por chorro de tinta ha supuesto un hito al permitir abordar simultáneamente las tres dimensiones de los negocios [7]. Permite basar la estrategia comercial en productos diferenciadores, optimizar el proceso y reducir los costes de fabricación, y mejorar el marketing relacional.

Desde la aparición de la primera máquina de impresión para cerámica en el año 2000 han ido apareciendo otras máquinas mejoradas en el mercado. En la actualidad existen más de trece máquinas diferentes en el mercado, todas viables para la impresión cerámica.

La decoración de baldosas cerámicas con tecnología de chorro de tinta está creciendo a gran velocidad. De acuerdo con los datos del sondeo efectuado por la revista Ceramic World Review[8] a siete compañías fabricantes de máquinas de impresión digital para cerámica, en el año 2010 había 538 máquinas de instaladas en el mundo, en fábricas



Figura 2. Dimensiones de los negocios.

de cerámica. En 2011 se instalaron 516 máquinas y había una previsión de más de 368 para el primer semestre de 2012.

En la actualidad, los sistemas de decoración digital se están utilizando en 41 países, frente a los 24 en los que se estaba usando en abril de 2012. España es el país en el que se inició esta tecnología y continua siendo el que tiene mayor número de máquinas instaladas. Desde enero de 2011 hasta finales de junio de 2012 se instalaron 155 máquinas. En ese mismo periodo Italia, segundo país en número de máquinas instaladas, prácticamente duplicó el número de máquinas pasando de 141 a 266.

La tecnología de impresión por chorro de tinta se está imponiendo a nivel mundial. A finales de 2010 entre España e Italia contaban con el 76% de todas las máquinas instaladas en el mundo (410 de un total de 538), pero en junio de 2012 este porcentaje había descendido al 48% (690 máquinas de un total de 1422). A finales de 2010 China, India y Brasil tenían un número relativamente pequeño de máquinas instaladas, pero la cifra se ha incrementado considerablemente y han pasado a ser el tercer cuarto y quinto país en número de máquinas instaladas, por detrás de España e Italia. También se está produciendo una rápida expansión de la tecnología de decoración digital en cerámica en Turquía, Irán, México, Vietnam, Indonesia, Túnez, Argelia, Egipto y Arabia Saudí.

3. GESTIÓN DE LAS IMÁGENES

En los últimos años, se ha producido una tendencia continua para simplificar la impresión. Se inició con la impresión de los fotolitos empleados para la fabricación de las pantallas serigráficas, se continuó con la obtención directa de dichas pantallas y el gravado de los rodillos de silicona, y se ha terminado con los sistemas digitales de impresión directa sobre las baldosas cerámicas. Sin embargo, la obtención de resultados impresos aceptables exige el ajuste previo de los sistemas empleados y el control de los procesos a los que se somete la imagen antes de la impresión.

Para la preparación del sistema, cada elemento debe ser calibrado (linealización, límite de tinta) y caracterizado (perfilado) [9].

La calibración de los dispositivos de entrada y salida (cámara, escáner, monitor, impresoras) permite optimizar su intervalo físico de respuesta. En el caso de los dispositivos electrónicos de entrada, la calibración de los detectores viene realizada por el propio fabricante, mientras que el monitor puede ser calibrado por el usuario. En el caso de las impresoras, la calibración requiere dos ajustes: la linealización y la determinación del límite máximo de tinta.

La relación entre la cantidad de tinta y el color obtenido no es directa. En ocasiones, como consecuencia de la disolución del pigmento en el vidriado, no se obtiene ningún color hasta que

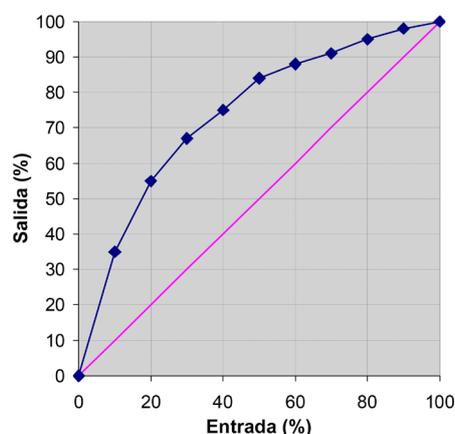


Figura 3. Relación salida/entrada de una tinta azul sin linealizar.

se supera una determinada cantidad de pigmento (ej. amarillo). En el otro extremo, existen pigmentos (ej. azul) que dan la máxima saturación (100%) con menor cantidad que la que puede aplicar el sistema. Además, en el rango intermedio, la respuesta frecuentemente no es lineal, lo que desequilibra el balance cromático de las imágenes. Como consecuencia, es imprescindible linealizar la respuesta cromática de las impresoras respecto a la señal de entrada.

El exceso de tinta causa distintos problemas, como el emborronado de los puntos, que los tiempos de secado sean más prolongados y que el coste sea mayor. Cuando se genera un perfil, debe utilizarse la cantidad adecuada de negro y de límite de tinta. En cerámica, el límite de tinta puede variar con las características del esmalte, la tinta y las condiciones de trabajo, aunque suele encontrarse sobre el 250 %, siendo 400% el máximo alcanzable en el caso de que usemos cuatro tintas. Al crear el perfil de color que permite realizar la conversión de colores de la imagen, se puede definir el límite de tinta total que se considere adecuado y, sobre esa base, se recalcula la imagen. Si, por ejemplo, se indica un límite de tinta total del 300%, ninguna parte de la imagen va a contener más del 300% de tinta. Este límite puede controlarse mediante técnicas como el UGR (Under Colour Removal) o, preferiblemente, el GCR (Grey Colour Removal). En el GCR, la componente neutra o gris de la imagen, que se podría conseguir por una mezcla CMY, se sustituye total o parcialmente por tinta negra (K), con la consiguiente reducción de tinta depositada. Esta corrección se puede realizar en toda la imagen; sin embargo, cuando hacemos la sustitución de colores por la tinta negra, los tonos oscuros de la imagen pueden perder matices. Para evitarlo, se puede añadir un poco de color a los tonos oscuros (Under Color Addition).

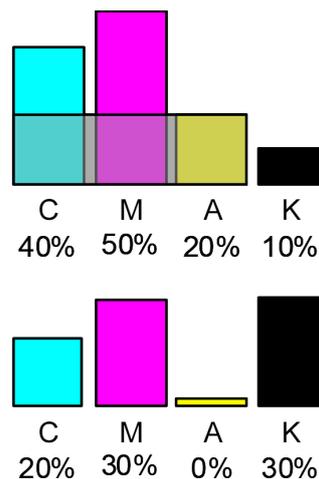


Figura 4. Ejemplo de conversión GCR con reducción del 40% de tinta.

Los perfiles de color realizan las transformaciones necesarias para convertir los colores del espacio de color de un dispositivo (origen) al espacio de color de otro dispositivo (destino) de forma que se mantenga el color sin variaciones. En sistemas complejos, con mas de un dispositivo de entrada y salida, o cuando se usan diferentes materiales, se requiere un espacio de conexión de perfiles (PCS). En el caso cerámico, el espacio de color origen es mucho mayor que el de destino por lo que se están desarrollando espacios de color de trabajo específicamente cerámicos. En todos los casos, la arquitectura de gestión del color debe permitir la transmisión del color entre sistemas físicos, aplicaciones y sistemas operativos [9].

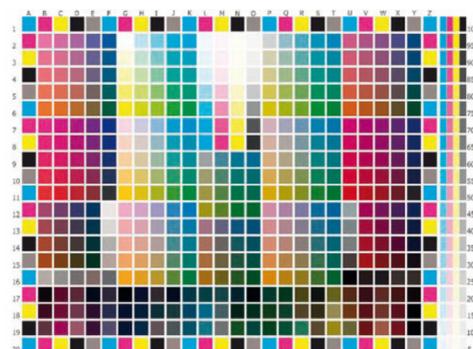


Figura 5. Ejemplo de tabla para la obtención de perfiles.

El **flujo de trabajo** idóneo en las fases de diseño y desarrollo debe incluir las siguientes etapas.

La primera etapa sería la adquisición de la imagen. Cuanto mejor sea ésta, más fácil será el trabajo posterior. Ante los problemas generados por los escáneres, actualmente se ha impuesto el uso de las cámaras digitales. Éstas pueden proporcionar la resolución y la profundidad de color adecuada, adecuarse a modelos con relieve y, además, tienen un precio razonable. Sin embargo, su uso requiere de una persona experimentada y con amplios conocimientos en iluminación. Es aconsejable que las imágenes se adquieran con el mismo tamaño al que van a utilizarse y con una profundidad de color alta (>8 bits), lo que minimiza los errores en los procesos de edición y conversión.

Posteriormente, la imagen debe manipularse para adaptarla al diseño cerámico. Estas modificaciones deben hacerse en el espacio de color de trabajo (típicamente Adobe RGB) e incluyen operaciones muy variadas, como el cambio de tamaño y ajustes de niveles de intensidad, brillo, ruido, contornos y otros ajustes globales. Todos estos ajustes se hacen con el monitor, por lo que es fundamental que esté correctamente calibrado y perfilado, así como disponer de las condiciones de iluminación ambiental adecuadas.

El espacio colorimétrico de impresión es mucho menor que el espacio que percibe el ojo humano o los dispositivos de entrada, por lo que las imágenes deben corregirse al espacio de color realmente imprimible. Existen cuatro propósitos de corrección de color, siendo los tres más utilizados: el colorimétrico relativo, el **colorimétrico absoluto** y el **perceptual**. Todos tienen como objetivo gestionar las partes de la imagen cuyo color no puede imprimirse, aunque algunos corrigen también la imagen en su totalidad. Dependiendo del propósito escogido, el punto negro puede requerir una conversión específica para mantener su neutralidad y luminosidad [10]. La corrección más adecuada depende de la imagen, por lo que actualmente el diseñador debe elegir el más adecuado.

Seguidamente se debe hacer una prueba de impresión, las correcciones que pudieran ser necesarias y, finalmente, la impresión del lote.

4. CABEZALES

Los cabezales de impresión por chorro de tinta utilizados en la decoración cerámica generan las gotas bajo demanda mediante un actuador piezoeléctrico. Los principales fabricantes de cabezales piezoeléctricos para el mercado cerámico son: Xaar, Fujifilm Dimatix, Toshiba y Seiko II. Otros fabricantes, como Sharp, Domino, Brother, Videojet, Epson, Ricoh, Trident, Kyocera, HP, Panasonic, Samsung, Konica Minolta, Xerox, PicoJet y Microfab están orientados a otros sectores industriales.

La arquitectura del cabezal para conseguir la presión de impulsión de las gotas en la boquilla es muy variada, pero todos tienen unos principios físicos comunes [12].

El actuador piezoeléctrico se deforma bajo la acción de un campo eléctrico, generando una sobrepresión en el fluido adyacente. Esta sobrepresión se transmite como una onda acústica en el seno del fluido contenido en el canal del cabezal. En la transmisión de esta onda influyen la densidad y la viscosidad de la tinta, así como la geometría y el comportamiento mecánico de las paredes del canal.

Cuando la sobrepresión del fluido alcanza la boquilla provocará la eyección de tinta, formándose gotas en donde la energía inicial se ha convertido en otros tipos de energía, como son la cinética, la superficial y la térmica.

La velocidad de respuesta de los piezoeléctricos es muy elevada, sin embargo, para controlar la formación de gotas es necesario que la onda de presión se genere y transmita adecuadamente en el interior del cabezal. Para cada cabezal, existen frecuencias de resonancia en las que se producen interferencias constructivas entre las ondas de presión generadas, mientras que en otras frecuencias las interferencias son destructivas y deben evitarse. Por otra parte, la intensidad y la forma de onda eléctrica utilizadas en la excitación del piezoeléctrico determinan la intensidad y la forma de onda de presión en la boquilla del cabezal. El diseño de la forma de onda con la que se excita un cabezal permite controlar la velocidad de disparo, el volumen de gota y la formación de gotas satélite; sin embargo, la existencia de numerosas variables interconectadas aconseja que esta labor no se haga por el usuario final.

Muchos cabezales actuales pueden funcionar de dos formas: con tamaño de gota constante o variable. En el primer caso, las imágenes son de peor calidad, pero la frecuencia de disparo es mayor, lo que permite alcanzar mayores productividades. En el segundo caso, se generan gotas más pequeñas que pueden unirse para formar gotas más grandes. Las imágenes obtenidas son mucho más naturales, pero la frecuencia de disparo es menor.

En todos los casos, los cabezales tienen un sistema de calentamiento para poder usar tintas mas concentradas y mantener la viscosidad de disparo adecuada.

En la tabla se muestran las principales características de algunos cabezales utilizados en cerámica.

	XAAR 1001 GS12	DIMATIX Durst	TOSHIBA CF-1L
Líquidos compatibles	Aceite/disolvente	Aceite/disolvente/agua	Aceite/disolvente
Viscosidad máxima (cP)	22	20	18
Resolución nativa (dpi)	360	220/360	300
Tamaño gota primaria (pL)	12	30	12
Tamaño gota máxima (pL)	84	90	84
Longitud (mm)	70,5	64,77	53,7
Escalas grises (N)	8	4	8
Frecuencia (kHz)	6-14	12-33	6-14

Tabla 1. Características de los principales cabezales utilizados en cerámica.

Los cabezales de impresión también tienen otras características de interés y que afectan a la calidad de las impresiones. La rectitud de las trayectorias de disparo depende de la precisión con la que se haya fabricado la placa de boquillas y de su mantenimiento. Si las trayectorias de las gotas no se mantuvieran paralelas, algunos puntos se superpondrían y las imágenes tendrían defectos sistemáticos, dependientes del cabezal empleado. Igualmente importante es la distancia máxima de disparo, muy ligada a la velocidad de disparo y al volumen de gota empleado.

5. TINTAS

5.1 DINÁMICA DEL PROCESO

5.1.1 Formación de las gotas

Una vez generado el frente de presiones en la boquilla del cabezal se crea un perfil de velocidades y se inicia la formación de la gota. Este fenómeno está gobernado por la ecuación de continuidad (conservación de la masa) y la ecuación de movimiento (Navier-Stokes) [12].

El análisis del proceso permite deducir que la eyección está controlada por el balance entre las fuerzas de inercia, las fuerzas viscosas y las superficiales. Inicialmente, una parte de la energía generada por el piezoeléctrico se convierte en energía cinética en la boquilla del cabezal. La viscosidad consume parte de la energía cinética y la disipa en forma de calor. Igualmente, la generación de nuevas superficies, durante la formación de la gota, requiere un consumo energético que proviene de la energía cinética inicial. Como consecuencia, tanto la viscosidad como la tensión superficial se oponen a la formación de las gotas y su aumento genera chorros más lentos. Los balances entre la energía de inercia, por una parte, y la energía viscosa y superficial, por otra parte, vienen dados por los números adimensionales de Reynolds ($Re = \rho v D / \mu$)¹ y Weber ($We = \rho v^2 D / \sigma$), respectivamente.

Por otra parte, la relación entre la energía viscosa y la superficial ($Ca = \mu v / \sigma$) determina el tiempo de rotura de la cola de la gota. La fuerza motriz para romper la cola viene determinada por la tensión superficial, mientras que la resistencia viene determinada por la viscosidad.

El análisis numérico de estos fenómenos permite cuantificar el proceso y hacer predicciones, siempre que se realice un calibrado adecuado del sistema.

5.1.2 Formación de los puntos

El proceso de formación de un punto a partir de una gota que impacta sobre un sustrato puede dividirse en dos etapas: el impacto, con una escala de tiempos de microsegundos, y el nivelado, con una escala de tiempos de segundos. Las variables que

¹ Símbolos utilizados: Número de Reynolds (Re), número de Weber (We), número de Capilaridad (Ca), densidad (ρ), velocidad (v), longitud característica (D), viscosidad (μ), tensión superficial (σ).

determinan estos procesos son el tamaño, velocidad y ángulo de impacto de la gota, la tensión superficial y la viscosidad de la tinta, y las propiedades de la superficie como su energía superficial, rugosidad y porosidad [13].

Cuando una gota esférica impacta sobre una superficie, se deforma, extendiéndose sobre la misma. La magnitud de la extensión depende de la relación entre la fuerza impulsora (inercia) y las resistencias existentes (principalmente la viscosidad y la tensión superficial). La relación entre la energía cinética y la energía superficial viene indicada por el número de Weber (We), mientras que la relación entre la energía cinética y la resistencia viscosa viene indicada por el número de Reynolds (Re). Según estas relaciones, cuanto mayor sea el tamaño, la velocidad y la densidad (contenido en sólidos) de la gota, mayor será su extensión, mientras que cuanto mayor sea la viscosidad y la tensión superficial, la extensión será menor.

La rugosidad de la superficie puede limitar la extensión de la gota debido a la retención de parte de la tinta en los valles. Además, el ángulo de contacto puede favorecer o contrarrestar la extensión de la gota, dependiendo de su valor.

La velocidad de avance de las piezas en la línea es relativamente baja (<1 m/s), respecto a la velocidad de impacto de las gotas (unos 6 m/s), por lo que el ángulo de impacto está próximo a 90° y, como consecuencia, el punto no llega a deformarse.

En la fase de nivelación, la tensión superficial intenta minimizar la superficie generada durante la fase de impacto, lo que tiende a homogeneizar el punto. Al igual que ocurría en la fase de impacto, el ángulo de contacto entre la tinta y el sustrato puede contribuir en la extensión obtenida.

Simultáneamente a estas etapas se produce la consolidación del punto, ya sea por un proceso químico de curado, por la succión del soporte o por la evaporación del vehículo. En todos los casos, la escala de tiempos puede ser del mismo orden de magnitud que la de la etapa de nivelación, lo que puede limitar su desarrollo, ya que la tinta deja de ser líquida [14][15].

En el caso de las tintas cerámicas utilizadas habitualmente, los vehículos no son reactivos, por lo que no se produce su polimerización; y las presiones de vapor son muy bajas, lo que descarta el secado por evaporación. Como consecuencia, el único mecanismo por el que se consolidan los puntos es por la succión del soporte.

La velocidad de succión de sólidos porosos secos es muy elevada en los instantes iniciales, lo que produce una rápida consolidación de las gotas. Sin embargo, la naturaleza del vehículo empleado y las condiciones de humedad y temperatura del sustrato cerámico pueden tener una gran influencia sobre la succión y, como consecuencia, sobre la extensión de los puntos [16].

5.2 REQUERIMIENTOS

5.2.1 Compatibilidad química

Durante su uso, las tintas estarán en contacto prolongado con numerosos materiales, tanto del cabezal propiamente dicho como del resto de la máquina, por lo que es imprescindible comprobar su compatibilidad química.

La compatibilidad debe comprobarse con la tinta formulada, ya que aunque esta dependa principalmente de la naturaleza del vehículo y de los aditivos empleados, también depende de su concentración y de las interacciones que puedan producirse entre los mismos.

Los materiales específicos a ensayar con la tinta dependen de cada fabricante de cabezales y/o máquinas, aunque algunos materiales habituales son los siguientes: polietileno, polipropileno, nylon, silicona, etc..

La incompatibilidad se determina por contacto prolongado entre los materiales ensayados durante varios meses. En los materiales plásticos se manifiesta principalmente por una variación de peso o un cambio en sus propiedades físicas (e.g. dureza, flexibilidad, etc.). Los adhesivos pueden dejar de cumplir su función. Las partes metálicas pueden sufrir procesos de corrosión.

La compatibilidad química también debe comprobarse con los líquidos limpiadores. Estos suelen ser más agresivos, aunque su contacto con las piezas es breve.

5.2.2 Propiedades físicas

Las propiedades físicas determinantes del comportamiento de las tintas son las siguientes [17].

5.2.2.1 Viscosidad

La viscosidad influye directamente en la dinámica de los procesos de formación de gota y punto, debido a la resistencia al flujo. La viscosidad, a la temperatura de disparo, suele estar entre 15-25 mPa·s. Tradicionalmente se ha considerado que el comportamiento de las tintas debía ser newtoniano; sin embargo, actualmente se asume que un comportamiento ligeramente pseudoplástico también es aceptable y puede aumentar la estabilidad de la tinta frente a la sedimentación. La medida de la viscosidad debe hacerse en reómetros que permitan su determinación a diferentes velocidades de cizalla.

5.2.2.2 Tensión superficial

La tensión superficial también tiene una influencia significativa en la dinámica de los procesos de formación de gota y punto, debido a la resistencia que ofrece en la generación de nuevas superficies. La tensión superficial suele estar entre unos 25-35 mN/m. Los vehículos orgánicos empleados en las tintas proporcionan fácilmente estos valores, aunque también puede recurrirse a mezclas de líquidos o al uso de tensoactivos. Su determinación se realiza habitualmente mediante tensiómetros estáticos, utilizando la placa de Wilhelmy.

5.2.2.3 Densidad

La densidad es otra propiedad determinante en la dinámica de los procesos de formación de gota y punto, debido a las fuerzas de inercia y a la acústica del cabezal. Para una tinta determinada, la densidad está directamente relacionada con el contenido en sólidos. Los valores habituales de la densidad están comprendidos entre 1,2-1,4 g/cm³. Su medida más sencilla es mediante un picnómetro, aunque también existen otros métodos instrumentales.

5.2.2.4 Tamaño de partícula

Para evitar el bloqueo de las boquillas, habitualmente se considera que el tamaño de las partículas de la tinta deben ser, al menos, 20 veces más pequeño que el diámetro de las boquillas. Como consecuencia, con los cabezales habitualmente empleados, el tamaño de partícula de los sólidos utilizados en las tintas debe ser inferior a 1 μm . Para garantizar este límite, las tintas se filtran durante su fabricación. El tamaño de las partículas también influye en la estabilidad de la tinta y en el desarrollo de los colores, por lo que su medida es un parámetro de control de máxima importancia. Existen dos técnicas principales para la medida de la distribución del tamaño de las partículas: la difracción láser y la dispersión dinámica de la luz.

5.2.2.5 Volatilidad

El vehículo empleado en la fabricación de las tintas no debe evaporarse en la placa de boquillas, ya que el secado de la tinta provocaría la deposición de sólidos que bloquearían las boquillas. Como consecuencia, habitualmente se eligen líquidos con una volatilidad muy baja o se añaden materiales para el control de la evaporación. La volatilidad se suele medir en términos relativos, bajo unas condiciones constantes, por comparación con materiales conocidos.

5.2.3 Estabilidad

Las tintas deben ser estables para proporcionar resultados constantes y evitar interrupciones durante la impresión. Los dos fenómenos que deben evitarse son la sedimentación y la agregación de las partículas.

La velocidad de sedimentación (v) de una partícula puede representarse por la ley de Stokes. Según esta ley, cuanto menor sea la viscosidad (η) del líquido suspensionante y cuanto mayor sea la diferencia de densidades (ρ) y el tamaño de las partículas (D), mayor será la velocidad de sedimentación. Sin embargo, este comportamiento únicamente se observa en suspensiones muy diluidas, $\phi < 0,03$ (en donde las partículas pueden sedimentar sin interactuar con otras), y para partículas relativamente gruesas (en donde las fuerzas brownianas son despreciables), siempre que la velocidad de sedimentación sea baja, $Re_p < 1$.

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

En el caso de suspensiones relativamente concentradas ($\phi > 0,1$), como son las tintas de impresión, la distancia media entre las partículas es pequeña, del mismo orden o menor que el tamaño de las partículas, de modo que la sedimentación de cada una de ellas está interferida por las demás. Además, las partículas desplazan en su descenso un volumen equivalente de líquido, que ascenderá en sentido contrario, por lo que la velocidad relativa del movimiento de la partícula, y con ello la fuerza de rozamiento, es mayor. La consecuencia del efecto descrito es una reducción de la velocidad de sedimentación al aumentar la fracción volumétrica de sólidos (ϕ). Este fenómeno puede

cuantificarse por leyes potenciales o utilizando los parámetros físicos de la suspensión (en lugar de los del líquido) en la ecuación de Stokes

Para concentraciones todavía mayores ($\varphi > 0,3$), o cuando las partículas se acumulan en el fondo del recipiente, se forma un lecho, relativamente compacto, cuya evolución con el tiempo depende del estado de agregación de las partículas. Los intervalos de validez de estos procesos dependen de la concentración de sólidos y de la desfloculación del sistema.

La reducción del **tamaño** de las partículas es la herramienta principal para evitar la sedimentación. En efecto, cuando las moléculas del líquido suspensionante chocan con las partículas más pequeñas ($< 0,1-1 \mu\text{m}$), les transfieren parte de su energía cinética, por lo que impiden su sedimentación. En el caso de suspensiones bimodales, las partículas más pequeñas son las que tienen que soportar a las más grandes.

Las tintas también deben estabilizarse desde un punto de vista coloidal, es decir, deben generarse las fuerzas de repulsión adecuadas para mantener las partículas individualizadas. Estas fuerzas de repulsión pueden ser de naturaleza electrostática y/o estérica. El control sobre estas fuerzas se realiza mediante moléculas que se adsorben sobre la superficie de las partículas y/o regulan las cargas eléctricas en sus proximidades. Si la suspensión no está estabilizada, la agregación de partículas provoca un aumento del tamaño hidrodinámico, lo que conduce a un aumento de su velocidad de sedimentación.

La estabilidad de las tintas se determina a partir de la variación de sus propiedades con el tiempo, acelerando su sedimentación mediante una fuerza centrífuga o mediante técnicas instrumentales basadas en la retrodispersión de la luz.

5.3 COMPOSICIÓN DE LAS TINTAS

La tecnología de impresión por chorro de tinta es tremendamente versátil, permitiendo el uso de gran variedad de materiales siempre que las propiedades fisicoquímicas finales sean las adecuadas al cabezal de impresión empleado. Las tintas utilizadas en la decoración cerámica tienen los siguientes componentes:

- **Sólidos.** Son los responsables de la coloración o del efecto final buscado tras la cocción. Pueden ser pigmentos, materias primas o fritas. El contenido en sólidos en la tinta suele estar sobre el 40% en peso.
- **Vehículo.** Líquido utilizado para aplicar los sólidos sobre la superficie cerámica. Se han utilizado glicoles, aceites y ésteres. La viscosidad, la tensión superficial y la volatilidad de los vehículos deben ser bajas.
- **Aditivos.** Su función principal es la estabilización coloidal de las partículas, lo que determina el comportamiento reológico y la estabilidad de las tintas. También pueden emplearse para modificar la tensión superficial y facilitar la desaireación de las tintas. Existe una gran variedad de productos, aunque la mayor parte de ellos utiliza un mecanismo estérico para la estabilización de las partículas.

6. IMPRESORAS

Aunque la parte principal de las impresoras es su conjunto de cabezales, existen otros componentes que afectan directamente a su rendimiento, como son el circuito de recirculación de las tintas, la electrónica de control, la interfaz de usuario y la estructura mecánica sobre la que se monta el conjunto del sistema [18].

6.1 CIRCUITO DE RECIRCULACIÓN DE LAS TINTAS

La tinta consumida por los cabezales debe reponerse de forma continua desde los depósitos con el fin de mantener su nivel y evitar la entrada de aire. Este caudal es muy pequeño y variable, por lo que se recurre al bombeo de un caudal mayor y constante, en un circuito de recirculación, fácilmente controlable, en el que se realizan, además, otras operaciones necesarias.

La **filtración** de la tinta procedente de los depósitos es una operación preventiva que evita la introducción de partículas y agregados de gran tamaño en los cabezales, lo que impediría su funcionamiento correcto. El tamaño de los filtros suele estar entre 10 y 25 μm .

El control de la **temperatura** de la tinta en el cabezal es necesario para asegurar una viscosidad adecuada durante su impresión. El precalentamiento de la tinta se puede realizar en el circuito de recirculación, mientras que el control fino se realiza en el interior del cabezal.

La **recirculación** de tinta fuera del cabezal se realiza fácilmente y permite el acondicionamiento global de la tinta; sin embargo, su eficiencia es baja en la prevención del bloqueo de boquillas. Por el contrario, la recirculación de tinta en el interior del cabezal tiene las siguientes ventajas (Durst y Xaar):

- Minimiza el riesgo de sedimentación de la tinta, debido al arrastre generado por el flujo.
- Minimiza la aglomeración de las partículas, debido a la cizalla, aumentando su estabilidad.
- Permite el uso de tintas más viscosas y de comportamiento ligeramente pseudoplástico.
- Favorece la desaireación, gracias al arrastre de las burbujas generadas en el interior de los cabezales. Elimina la necesidad de purga.

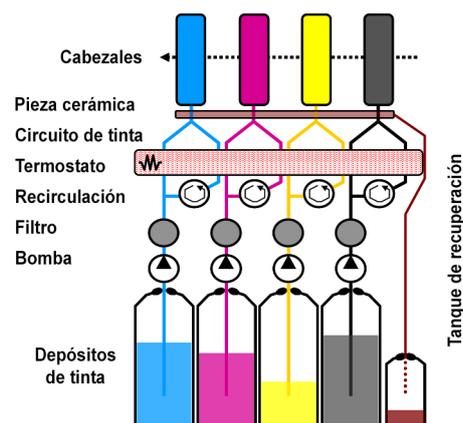


Figura 6. Circuito de tinta.

Como consecuencia, las máquinas actuales suelen disponer de un sistema de **doble recirculación**, en donde la tinta se mantiene en movimiento continuo dentro de los cabezales y dentro de los depósitos, aprovechándose las ventajas de ambos sistemas.

6.2 BARRAS DE CABEZALES

En las impresoras single-pass, los cabezales individuales deben disponerse en barras para cubrir el ancho de impresión. Existen dos configuraciones básicas: transversal y oblicua (Figura 7). En la configuración oblicua, la resolución de impresión es mayor que la resolución nativa de los cabezales (dependiente del ángulo de instalación) y el número de cabezales empleado es mayor. Los usuarios de esta configuración [11] aseguran que el entrelazado de los puntos de impresión entre diferentes cabezales aumenta la homogeneidad y reduce el riesgo de defectos de impresión (líneas). El ancho de impresión ha ido creciendo (actualmente 1152 mm). Con el fin de optimizar el ancho de impresión, algunas impresoras permiten la alimentación de piezas en paralelo, provenientes de dos líneas. Este recurso permite aumentar considerablemente la productividad y reducir los gastos.

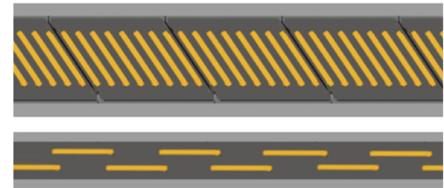


Figura 7. Disposición cabezales.

En cada barra de impresión se utiliza un tipo de tinta, por lo que las máquinas utilizarán tantas barras como materiales quieran imprimirse. Inicialmente se utilizaban tres barras, una por color; sin embargo, la decoración de las piezas cerámicas es cada vez más compleja y el número de barras está aumentando. En ocasiones también se ha impreso una misma tinta con dos barras con el objeto de aumentar la productividad de las máquinas. Actualmente se pueden utilizar hasta 12 barras, dedicadas tanto a tintas coloreadas como a la obtención de efectos especiales. Dependiendo del propósito decorativo y de la tinta empleada, cada barra puede estar equipada con distinto tipo de cabezal. En concreto, la obtención de efectos requiere el uso de cabezales con mayor descarga que los utilizados con tintas pigmentadas.

La velocidad de impresión depende directamente de la frecuencia de disparo de los cabezales y de la resolución buscada:

$$velocidad \left(\frac{m}{min} \right) = freq. \left(\frac{gota}{s} \right) \times 1 \left(\frac{punto}{gota} \right) \times 60 \left(\frac{s}{min} \right) \times \frac{1}{resol.} \left(\frac{pulgada}{punto} \right) \times 0.0254 \left(\frac{metro}{pulgada} \right)$$

Como consecuencia, si se fijan la resolución y la frecuencia de disparo, la velocidad de impresión solo puede ser una. Por otra parte, si se cambia la velocidad de impresión sin cambiar la frecuencia de disparo, se modificará la resolución de impresión en la dirección de avance (Figura 8). Teniendo en cuenta esta relación, entre velocidad y resolución de impresión, muchos fabricantes dan indicaciones de la velocidad recomendada con sus cabezales para obtener una resolución determinada.

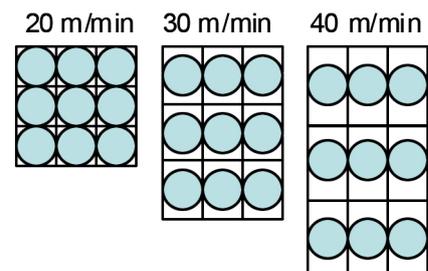


Figura 8. Influencia de la velocidad de avance sobre la distancia entre puntos.

La velocidad de impresión también puede estar limitada por una velocidad insuficiente de aporte de tinta en el canal de los cabezales. Este problema se ha solucionado parcialmente por los diseñadores gráficos, limitando la cantidad de tinta máxima en determinadas

áreas de la imagen, y duplicando el número de barras.

Por otra parte, las impresoras incorporan **protocolos de limpieza** de cabezales durante su uso que limitan en cierta medida su productividad. La necesidad de estas etapas viene determinada principalmente por la acumulación de tinta en la placa de boquillas.

La **mecánica** que soporta todo el sistema debe tener la robustez y precisión necesarias para evitar vibraciones y facilitar los ajustes necesarios.

6.3 ELECTRÓNICA Y SOFTWARE

Las impresoras gestionan millones de datos por segundo para controlar las barras de cabezales, el circuito de tinta, el circuito neumático, el sistema de transporte, etc., lo que requiere una arquitectura electrónica muy potente y precisa. Habitualmente se utiliza un ordenador maestro, del que dependen otros esclavos (FPGA) que controlan directamente el funcionamiento de las barras.

Aunque las imágenes se trabajan en píxeles por pulgada, la impresión debe convertir los ficheros a gotas/puntos físicos, ya que a los cabezales hay que decirles si disparan o no, y con qué tamaño de gota. Esta labor la ejecuta el RIP (Raster Image Processing), integrado en la impresora. Aunque existen muchas técnicas para hacer esta operación, la más sencilla es la que se explica a continuación. Defínase una cuadrícula, determinada por la distancia entre boquillas del cabezal, en la dirección transversal de avance, y por la razón entre la velocidad y la frecuencia de disparo, en la dirección de avance. Si se usa un cabezal binario (con tamaño de gota constante), una cuadrícula de 2x2 únicamente nos permitirá obtener cuatro niveles de grises (N), dependiendo del número de celdas rellenas. La obtención de 256 niveles nos exigiría definir una cuadrícula de relleno de 16x16, con la consecuente pérdida de calidad de la imagen. Si se usa un cabezal de gota variable, con cuatro tamaños pueden obtenerse los 256 niveles en una cuadrícula de 2x2, ya que además del relleno progresivo de las celdas, se cuenta con el tamaño del punto. El efecto sobre la calidad de la imagen es tan importante que actualmente solo se usan cabezales del segundo tipo.

Además, las impresoras permiten la manipulación de la imagen para su previsualización y ajuste a las condiciones de impresión. También incorporan herramientas gráficas para obtener efectos (mosaico, desplazamientos, ajustes de color,...) sin tener que modificar los ficheros originales.

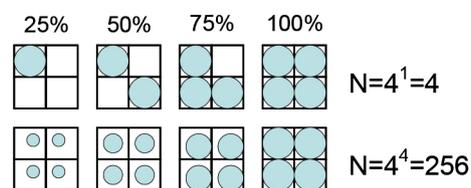


Figura 9. Niveles de gris (N) disponibles en una cuadrícula de 2x2 con tamaño de gota constante y variable.

7. CONCLUSIONES

La tecnología de impresión por chorro de tinta ha tenido un gran desarrollo desde sus orígenes, lo que le ha permitido tener una implementación industrial masiva en la fabricación de baldosas cerámicas. Actualmente, esta tecnología no se limita a la decoración, sino que permite obtener múltiples efectos cerámicos, relieves e incluso la aplicación de esmaltes. Próximamente, la investigación en esta tecnología permitirá ampliar el abanico de materiales a utilizar, obtener nuevas aplicaciones funcionales y, posiblemente, transformar el propio proceso de fabricación de baldosas y desarrollar nuevos modelos de negocio.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sanz, V.; et al, Influência da serigrafia sobre a variação de tonalidade de revestimentos cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, 4 (1-6), 19-26, 1999
- [2] Berto, A. M. Ceramic tiles: above and beyond traditional applications, *J. European Ceram. Soc.* 27, (2007) 1607.
- [3] Jimenez-Otero, M. A. The revolution of ceramic printing high-quality flexographic printing on ceramics, *Tile & Brick Int.* 17, 48 (2001)
- [4] Roberts, W. Decorating methods for the future. *Br. Ceram. Trans. J.* 87 (1988) 4.
- [5] de Carlo, A. The digital revolution in tile decoration, *Ceramic World Review* 51, 78 (2003).
- [6] Ferro Corp.; Garcia, J.; Benet, C.; Fenollosa, J. L.; Querol, J. M. and Secret P. Individual inks and an ink set for use in the color ink jet printing of glazed ceramic tiles and surfaces. WO0151573 (2000).
- [7] Jesus Fernandez, Ventajas económicas y financieras de los sistemas de decoración de baldosas cerámicas con tecnología inkjet. Aveiro, Noviembre 2011
- [8] Crasta, G.P.; Boom in digital technology. *Ceramic World Review*, 97, 2012.
- [9] International Color Consortium (ICC), White papers 7 and 23
- [10] Jorge Uribe, Understanding black point compensation, obtenido Enero, 2014 de http://cias.rit.edu/~gravure/tt/pdf/cm/TT5_Jorge01.pdf
- [11] Durst Catalog
- [12] Herman Wijshoff, Structure- and fluid-dynamics in piezo inkjet Printheads. Tesis doctoral en Universiteit Twente.
- [13] M. Toivakka, Numerical investigation of droplet impact spreading in spray coating of paper, *Advanced Coating Fundamentals Symposium* (2003)
- [14] Taewoong Lim, 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* 52 (2009) 431-441
- [15] Chin-Tai Chen, Inkjet Printing of Microcomponents: Theory, Design, Characteristics and Applications. At <http://www.intechopen.com/>
- [16] Sanz V, et al. Influencia de las condiciones de impresión sobre la calidad de la imagen. *Qualicer* 2014.
- [17] Sanz, V, et al Technical Evolution of Ceramic Tile Printing. *Journal of Imaging Science and Technology*, Volume 56, Number 5 , pp. 50402-1-50402-7(7), 2012.
- [18] F.Varela, J. Mota, Panorámica y avances en la impresión inkjet. *Formato digital*, nº44, Enero 2008.