

Análisis y modelado de la transmisión de variabilidad dimensional en un proceso de producción de baldosas cerámicas

J. A. HEREDIA¹, M. GRAS^{2,1}

¹ Universitat Jaume I. Area de Ingeniería de los procesos de fabricación Dpto. E.S.I.D Universitat Jaume I,

² Keraben S.A.

La variación dimensional es un problema todavía no resuelto en los procesos de fabricación de baldosas cerámicas de baja absorción de agua y pese a los esfuerzos realizados por los fabricantes para controlar el proceso los resultados no cumplen con las especificaciones del mercado; esta situación es común en muchos procesos de transformación multi-etapa en los que la variación observable en una determinada característica del producto es consecuencia de la generada y transmitida por las distintas etapas del proceso. Este estudio plantea un enfoque preventivo para el análisis del problema utilizando métodos para el modelado de la transmisión de la variabilidad habitualmente utilizados en procesos de fabricación, combinados con la utilización de herramientas estadísticas para estimar y validar en un caso real un modelo matemático que explique la variación de la característica de calidad final a partir de la de cada una de las variables del proceso estimando la contribución de cada una al problema. Disponer de un modelo matemático explicativo del problema permitirá rediseñar los planes de control del proceso y priorizar las actuaciones de mejora para minimizar el problema.

Palabras clave: Baldosas cerámicas, Calibres, Composición de varianzas, Proceso multi-etapa.

Analyzing and modeling the size variation transmission in a floor tiles production process.

Dimensional variability in low water absorption tiles manufacturing is a problem which is not solved enough yet and, despite the efforts performed by manufacturers in order to control the processes, results are still exceeding tolerances set by the market; this is a usual situation in many multi-stage transformation processes, in which final variation arises from the one generated and transmitted by the different stages of the manufacturing. The study brings up a preventive focus on the problem using variability transmission modelling methodologies usually applied in other manufacturing processes, combined with the use of statistical tools to estimate and validate in a real case a mathematical model which explained the result of dimensional variability from each one of the related process variables, estimating the contribution of each one of them to the problem. Having an explicative mathematical model of the problem will allow a better design of control plans and giving priority to improvement actions focused to minimise the problem.

Key words: Floor tiles, Sizes, Variance Synthesis, Multi-Stage process

1. INTRODUCCION

La variación dimensional observable en el producto de un mismo lote de producción es uno de los problemas típicos en la fabricación de baldosas cerámicas de baja absorción de agua; esta suele ser superior a las tolerancias que establece el mercado determinando un proceso estadísticamente "incapaz" que obliga a los fabricantes a clasificar el producto acabado en subgrupos de diferentes dimensiones "calibres" para poder facilitar la colocación del material. Este problema supone un aumento de coste por el incremento de posiciones en el almacén, la complejidad logística de la gestión de un stock separado en diferentes "calibres", la necesidad de sobredimensionar los lotes de fabricación y en muchas ocasiones las reclamaciones de los clientes insatisfechos con el resultado del material. La reducción de esta variabilidad es un objetivo prioritario de todos los fabricantes.

Las baldosas cerámicas se fabrican mediante un proceso en serie que comprende las operaciones de preparación de la pasta, prensado, secado, esmaltado-decoración, cocción y clasificación; este es un ejemplo de proceso multi-etapa con

transmisión de variabilidad en el que la variación en los resultados de la característica de calidad final "dimensión" es consecuencia de la generada y transmitida a lo largo del mismo. Este proceso está muy estudiado y se conocen las variables que afectan a la dimensión final de la baldosa así como los modelos de relación entre las mismas (1) (2) pero los trabajos publicados describen modelos estimados experimentalmente en laboratorio; se ha estudiado el comportamiento de las variables a escala industrial de etapas individuales pero no de un proceso en su conjunto.

El objetivo de este trabajo es plantear y aplicar una metodología para analizar el comportamiento de un proceso completo durante la producción de un lote, estimando y validando un "modelo de composición de varianzas" que explique la variación obtenida en la característica de calidad "dimensión" a partir de las generadas por cada variable y aplicando métodos descritos para el modelado matemático de la transmisión de variabilidad en procesos multi-etapa (3)(4) combinados con herramientas de control estadístico. Disponer

de un modelo matemático que explique el problema permitirá cuantificar la contribución al problema de cada etapa de proceso, priorizar las acciones de mejora y diseñar el método de control más eficaz para reducir la variabilidad.

Aunque los resultados del estudio no sean cuantitativamente trasladables a otros procesos similares ya que diferentes instalaciones y grados de automatización ofrecerán resultados distintos; las variables que determinan el "modelo de composición de varianzas" son comunes a todos los procesos de fabricación de baldosas cerámicas y la metodología de análisis y modelado es aplicable en general no solo al estudio de este problema cerámico sino al análisis de cualquier característica de calidad de procesos con múltiples etapas con problemas de transmisión de variabilidad.

2. LA VARIACION DIMENSIONAL DE LAS BALDOSAS CERAMICAS

Las variaciones dimensionales observadas en las baldosas cerámicas de baja absorción de agua que de algún modo pueden alterar la armonía del diseño o dificultar su colocación son consecuencia de cambios en la contracción lineal experimentada por el soporte durante la última etapa de transformación (cocción), donde el tratamiento a altas temperaturas empieza a producir una vitrificación de la composición y este fenómeno genera cambios en la porosidad y contracción de la mezcla de materias primas (5) que se describe mediante su "diagrama de gresificación" (2). Diferentes variables de proceso pueden provocar modificaciones en este diagrama cambiando el valor de contracción de la baldosa; estas son (1)(2): los cambios de características de la mezcla de materias primas, las variaciones del polvo atomizado, la presión de prensado, la densidad aparente de la pieza conformada y la temperatura y ciclo de cocción. Además de estas variables, en el proceso puede haber presencia de otros factores de variación como diferencias de presión aplicada a las distintas cavidades del molde (6) o gradientes de temperatura en el horno (7) que con los sistemas de control disponibles actualmente en las instalaciones no pueden medirse directamente y cuyo efecto puede detectarse estudiando la respuesta obtenida a la salida de la etapa.

Materias primas: el comportamiento en el proceso de una composición determinada puede cambiar por variaciones de las materias primas individuales que la forman o por variaciones en el porcentaje de cada una de ellas; además, cambios en los parámetros de trabajo de la etapa de molienda (1) (2) pueden también provocar distribuciones de tamaño de partícula diferentes que impliquen cambios en el comportamiento del producto en los procesos de prensado y cocción.

Polvo atomizado: en los procesos habituales de preparación vía húmeda, la mezcla de materias primas previamente molturada en molinos de bolas se seca en instalaciones de atomización donde se produce el "polvo" que se utilizará en la etapa de conformado de soporte; las variables que determinan la calidad del polvo atomizado son fundamentalmente su distribución granulométrica y su humedad (8)(9). Aunque la granulometría del polvo afecta a su fluidez y a todos los procesos de transporte (8) su variación no tiene efecto sobre la contracción lineal en la etapa de cocción ya que a las presiones de trabajo industriales superiores a 300 Kg/cm² la contracción lineal de la baldosa es independiente del estado

del aglomerado utilizado (9). La humedad del polvo es sin embargo una variable crítica en la etapa de prensado ya que el agua actúa como lubricante durante este proceso facilitando el empaquetamiento (10). Las variaciones de humedad de polvo atomizado generadas por oscilaciones en las condiciones de funcionamiento de las instalaciones de atomización tienen un efecto muy importante sobre el resultado de la densidad aparente de la pieza prensada, que a su vez modifica la contracción lineal del producto en el proceso de cocción (1),(2); estas variaciones pueden ser de distinto rango en función del grado de automatización del proceso de atomización y se consiguen minimizar mediante el empleo de sistemas para el control automático de humedad (11) pero incluso en las instalaciones más automatizadas, la variación de humedad sigue teniendo un fuerte impacto en el comportamiento del soporte en los procesos señalados de prensado y cocción.

Proceso de prensado: la microestructura de la pieza prensada determina su comportamiento durante la cocción (1) (12); esta se mide indirectamente a partir de su densidad aparente cuyo valor depende de la humedad del polvo atomizado y de la presión de prensado (13). Las variaciones de presión de prensado se generan tanto por oscilaciones de la presión media aplicada como por diferencias entre diferentes cavidades de un mismo molde consecuencia de defectos de carga de los alveolos o por problemas mecánicos del conjunto prensa-molde (6); en este segundo caso no es posible medir la variación de presión al no disponer de sensores y debe recurrirse a estimar su contribución a la variación final midiendo su efecto en la respuesta (densidad aparente del producto prensado)

Cocción: las variables de esta etapa que determinan la contracción de la pieza son la temperatura y el tiempo de permanencia (1) (2); aumentos de tiempo de permanencia tienen efectos similares a aumentos de temperatura pero en un horno continuo y durante la producción de un lote este tiempo no varía ya que el horno se alimenta con un flujo continuo de entrada de material y en el caso de producirse cambios de ciclo habría acumulación de producto que haría inviable la operación. Las variaciones de la temperatura de cocción se generan por los sistemas de regulación (Termopares-Controladores-Sistemas de quemadores) y por pequeños huecos en el flujo del material alimentado al horno; además de estas variaciones y al igual que en el caso de la prensa es posible observar en algunas situaciones la aparición de gradientes trasversales de temperatura que hacen que las piezas procesadas en los laterales del horno estén sometidas a temperaturas diferentes. Se han publicado trabajos experimentales en los que se han utilizado rodillos sensorizados para medir directamente estas diferencias de temperatura en diferentes zonas del horno (7) pero estos sistemas son experimentales y todavía no se aplican industrialmente de forma sistemática. Una alternativa para detectar la presencia de este problema es cuantificar su efecto mediante un análisis del producto a la salida del horno.

Se concluye pues que la variación dimensional durante la producción de un lote debiera ser suficientemente explicada a partir de la observable en la composición de la pasta, la humedad del polvo atomizado, la presión de prensado, la diferencia de densidad aparente entre piezas de distintas cavidades del molde, la temperatura de cocción y los gradientes de temperatura en el horno, siendo estas variables las que determinan la transmisión de variabilidad en el proceso.

3. MODELO DE TRANSMISIÓN DE VARIABILIDAD

Para la estimación del modelo de transmisión de variabilidad encontramos los resultados conocidos de la estadística sobre la transmisión del error (14) y las técnicas de modelado que se han desarrollado y se aplican actualmente en diversos procesos; fundamentalmente del sector de automoción (4). Diversos autores (3) (4) muestran que los modelos de transmisión de error proporcionan mejores resultados para la mejora de los procesos que los métodos de diseño y análisis de experimentos. No se ha encontrado ninguna aplicación desarrollada en procesos cerámicos.

El método que se utiliza para modelar matemáticamente la transmisión de variabilidad consiste en la estimación de un "modelo de composición de varianzas" que explique la variabilidad final del proceso a partir de la de cada una de las variables identificadas "componentes del modelo". La metodología se basa en la propuesta por Morrison en su "síntesis de varianzas" (3) para los procesos de transformación multi-etapa pero este se mejora con la utilización de herramientas de análisis estadístico para estimar los coeficientes de los modelos de relación entre variables y las varianzas de los componentes; asegurando que los datos utilizados provienen de procesos operando en régimen estable y posibilitando además la estimación de la contribución de variables críticas del proceso que solo tiene efecto sobre la variabilidad y aún no pudiéndose medir directamente si que se puede determinar su efecto en el producto.

Para la estimación de la variación generada por cada componente y la final, debe monitorizarse los resultados de las variables durante un periodo representativo (un lote de producción típico) asegurando la trazabilidad de la información y la estabilidad del proceso.

3.1 Herramientas estadísticas

Para la estimación de las varianzas generadas por las variables medibles en cada etapa así como obtenida finalmente en el proceso se utilizan gráficos de control (14); estos son una herramienta de demostrada utilidad para el análisis y control de proceso a partir de los datos de un muestreo y permiten tanto verificar la estabilidad durante el periodo analizado como estimar con precisión su desviación típica $\hat{\sigma}$ y su varianza $\hat{\sigma}^2$ a partir del rango medio obtenido en las muestras. El análisis de varianzas (ANOVA) (14) permite confirmar la significación estadística del efecto de un factor determinado sobre la variación de un conjunto de datos y estimar su contribución a la varianza y en este estudio se utilizará para estimar el efecto de factores cuyo efecto solo puede determinarse a partir de la respuesta y para estimar los errores de medición..

3.2. Modelo matemático

El modelo matemático propuesto establece la hipótesis de que si una característica de calidad final de un proceso puede definirse a partir de un modelo de relación lineal como:

$$y = \sum_i a_i X_i + \sum_j b_j u_j + \sum_m \varepsilon_m \quad (\text{Ec.1})$$

Su varianza puede explicarse como

$$\sigma_y^2 = \sum_i a_i^2 \sigma_{x_i}^2 + \sum_j b_j^2 \sigma_{u_j}^2 + \sum_m \sigma_{\varepsilon_m}^2 \quad (\text{Ec.2})$$

Donde

- y : es la característica de calidad final, siendo σ_y^2 su varianza,
- x_i : representa a las variables del proceso con varianza $\sigma_{x_i}^2$ y cuya relación con la característica de calidad la determinan los coeficientes del modelo de relación a_i
- u_j : son variables independientes del proceso que solo afectan a la variabilidad pero que su efecto $\sigma_{u_j}^2$, solo puede estimarse a partir del análisis de la respuesta y cuya relación con la característica de calidad la determinan los coeficientes del modelo de relación b_j
- ε_m : es la variación no explicada por el modelo e incluye el de los modelos de relación, de los sistemas de medida y del propio modelo.

Los pasos que se desarrollan para establecer y validar el modelo (Ec.2) incluyen:

- Determinación mediante la experimentación industrial de los modelos de relación entre las variables y la característica de calidad que establecerán los coeficientes del modelo.
- Estimación de la varianza de la característica de calidad, de cada componente del modelo de composición de varianzas y de los errores de medición asegurando que la determinación se ha realizado en periodos de estabilidad
- Validación del modelo (Comparación entre la variabilidad predicha y la obtenida)

4. APLICACIÓN EXPERIMENTAL

El proceso analizado produce baldosas de pasta roja de baja absorción de agua y dimensión nominal 331,5 mm. La línea de producción incluye un proceso preparación de polvo atomizado vía húmeda en el que no se dispone de sistemas de control automático y en el que la variable se controla a partir de muestreos periódicos, conformado de soporte mediante prensado uniaxial en prensa hidráulica con tres cavidades de molde y posterior cocción en ciclo de 45 minutos a temperatura máxima de 1160 °C en horno monoestrato alimentado con filas de 6 piezas.

La aplicación experimental se ha realizado durante la producción de un lote de fabricación de 6000 m² que en este caso concreto se ha producido en continuo durante 24 horas siendo estas las condiciones habituales de producción de los lotes por lo que los resultados pueden asumirse como representativos de este proceso; este se ha monitorizado durante este periodo a través de todas sus etapas asegurando la trazabilidad de los datos así como la continuidad de la producción.

4.1 Modelo de transmisión de variabilidad y composición de varianzas en el proceso cerámico.

La Fig. 1 representa el modelo de transmisión de variabilidad en el proceso en el que pueden identificarse las variables de cada etapa y como se transmite la variación a la siguiente.

La variable de salida de proceso es la dimensión de la baldosa cuya varianza debe explicarse a partir de la generada y transmitida en las etapas del proceso, identificando:

En la etapa de preparación del polvo atomizado las variables "composición del soporte" y "humedad" cuyas varianzas se transmiten al proceso de prensado.

En la etapa de prensado, además de la varianza transmitida por la etapa anterior, la presión de prensado y la posible diferencia entre cavidades provocan cambios en la densidad aparente de la pieza prensada cuya varianza se transmite al proceso de cocción además de las variaciones de composición.

En el proceso de cocción, las variaciones transmitidas por el proceso de prensado, junto a los cambios en la temperatura de cocción y las diferencias entre canales de horno "gradientes" generan los cambios dimensionales finales de las baldosas.

El modelo matemático de composición de varianzas propuesto en la Ec. 2 es en este caso:

$$\sigma_{Di}^2 = a_H^2 \sigma_H^2 + a_P^2 \sigma_P^2 + a_T^2 \sigma_T^2 + b_{Comp}^2 \sigma_{Comp}^2 + b_{Ca}^2 \sigma_{Ca}^2 + b_{Gr}^2 \sigma_{Gr}^2 + \sigma_{mediccion}^2 + \sigma_\epsilon^2 \quad (Ec.3)$$

Donde se utiliza la siguiente nomenclatura:

- Di = Dimensión de la baldosa
- H = Humedad del polvo atomizado
- P = Presión de prensado
- T = temperatura de cocción
- Comp = Composición
- Ca = Diferencia entre cavidades del molde
- Gr = Diferencias entre canales de horno "gradientes"
- $\sigma_{Di}^2, \sigma_H^2, \sigma_P^2, \sigma_T^2, \sigma_{Comp}^2, \sigma_{Ca}^2, \sigma_{Gr}^2$ son las varianzas correspondientes
- $a_H, a_P, a_T, b_{Comp}, b_{Ca}, b_{Gr}$ son los coeficientes que relacionan estas variables con la dimensión (Ec.1)

- $\sigma_{mediccion}^2$ y σ_ϵ^2 corresponden a la varianza del sistema de medición de la dimensión y al error del propio modelo.

Las variables Humedad, Presión y Temperatura se miden directamente en el proceso y su relación con la dimensión de la baldosa la determinan los coeficientes a_i , correspondiendo su suma de varianzas al término $\sum a_i^2 \sigma_{Xi}^2$ de la Ec.2 siendo los términos de la Ec.3 $a_H^2 \sigma_H^2 + a_P^2 \sigma_P^2 + a_T^2 \sigma_T^2$

La varianza generada por las variaciones de composición, diferencias de densidad aparente entre cavidades y diferencias entre canales de horno se determina mediante su efecto en la respuesta y su relación con la dimensión de la baldosa la determinan los coeficientes b_i , correspondiendo su suma de varianzas al término $\sum b_i^2 \sigma_{Xij}^2$ de la Ec.2 siendo los términos de la Ec.3 $b_{Co}^2 \sigma_{Co}^2 + b_{Ca}^2 \sigma_{Ca}^2 + b_{Gr}^2 \sigma_{Gr}^2$

La medida de la dimensión se ha realizado según describe la norma ISO 10545; la medida de humedad se ha realizado por secado, la densidad aparente del producto prensado mediante el método de inmersión en mercurio (13) y las mediciones de temperatura y presión a través de los sensores industriales calibrados previamente.

4.2. Estimación de los modelos de relación entre variables

Para determinar los modelos matemáticos explicativos de la relación entre las variables en el rango de operación, se ha recurrido a la experimentación a escala industrial en el mismo proceso realizando ensayos con varias repeticiones en intervalos próximos al de trabajo y al ajuste del modelo mediante regresión lineal. Los resultados obtenidos establecen los siguientes modelos de relación con un nivel de significación superior al 99%:

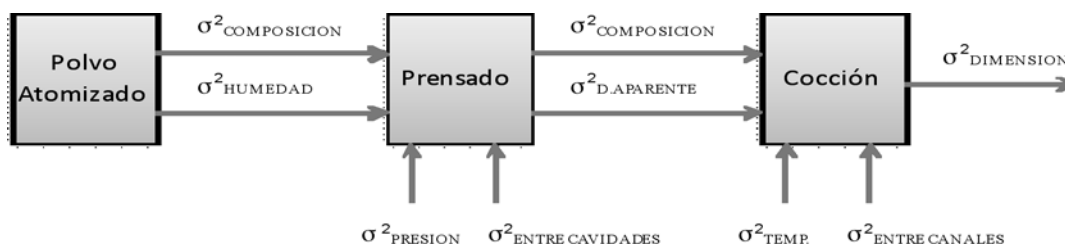


Fig. 1. Modelo de transmisión de variabilidad

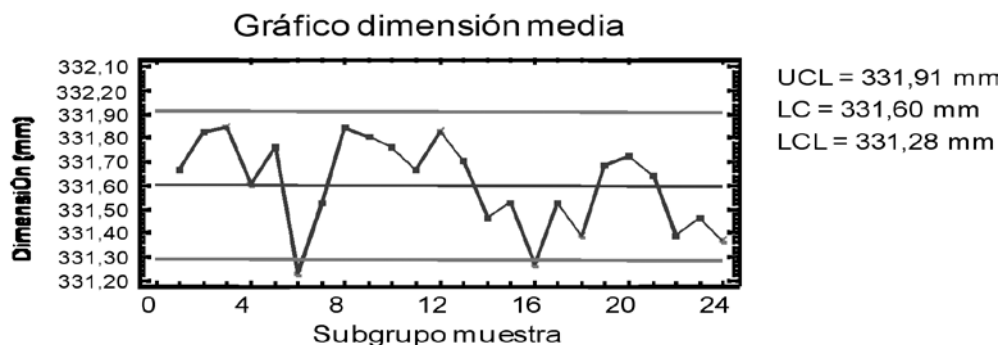


Fig 2: Gráfico de resultados de la dimensión media de las muestras

Densidad aparente (Da) = 1,63 + 28,14x10⁻³H + 0,43x10⁻³P (Ec.4)

Dimensión de la baldosa (Di) = 287,48 + 47,19 Da - 0,04T (Ec.5)

Que definen un modelo completo:

Di = 287,46+ (47,19*(1,63 + 28,14x10⁻³H + 0,43x10⁻³P))-0,04T (Ec.6)

4.3 Estudio de variabilidad de la característica de calidad final

Para estimar la variabilidad de la dimensión final y de las variables del proceso se utilizan los gráficos de control del proceso. Esta es una técnica elemental de control de calidad que muestra la evolución de los valores medios de subgrupos de muestras respecto a unos límites de control (UCL y LCL) calculados a partir de los datos del proceso en condiciones de estabilidad.

Se realizó un seguimiento de la dimensión a la salida del horno durante la producción de un lote tomando subgrupos de cinco piezas cada hora; el gráfico de control de la media de las muestras (fig. 2) representa los valores obtenidos para los subgrupos de (n=5) muestras medidos durante el estudio.

En este caso el valor medio observado para el promedio (LC) corresponde a 331,60 mm y los límites de control estadístico superior (UCL) e inferior (LCL) son 331,91 mm y 331,28 mm que se han calculado con el criterio habitual para los gráficos de control (LC±3σ/√n). Se observan dos subgrupos (6 y 16) con valores promedios fuera de los límites estadísticos. Tras estudiar estas situaciones se comprueba que corresponde a situaciones anómalas del proceso (fallos de alimentación) que deben excluirse del estudio para estimar la variación del proceso en estado estable - bajo "control estadístico"- y que corresponde a un valor de desviación típica dimensional $\hat{\sigma}_{Di} = 0,28$ mm que determina un intervalo de variación poblacional $6 \hat{\sigma}_{Di} = 1,66$ mm claramente superior a las tolerancias de 1 mm establecidos para un "calibre". La varianza estimada $\hat{\sigma}_{Di}^2$ es de $76,18 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$.

Por otra parte, la varianza del error de medición de la dimensión de las baldosas se ha estimado a partir de medidas replicadas de una misma baldosa y su valor es de $\hat{\sigma}_{mediccion}^2 = 2,30 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$; este valor se incorporará como un término más del modelo de composición de varianzas (Ec.3)

4.4 Estimación de la variabilidad generada por las variables de proceso

4.4.1 VARIABILIDAD GENERADA POR LA COMPOSICIÓN

El efecto de los cambios de composición se ha determinado a partir de muestras periódicas de polvo atomizado tomadas durante el periodo, estas se han procesado posteriormente en idénticas condiciones de humedad, presión y temperatura de cocción para identificar diferencias significativas entre la dimensión final obtenida en las mismas; de cada muestra se han realizado tres repeticiones del ensayo para estimar el error. Los datos obtenidos se estudian mediante un análisis de varianza (ANOVA) (Tabla I) que permite estimar la significación de las diferencias de resultados entre muestras:

TABLA I: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LAS DIFERENCIAS DE COMPOSICIÓN

Fuente variación	Grados libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	P
Composición	14	0,56880	0,04060	10,62	0,0000
Error	30	0,11470	0,00380		
Total	44	0,68350			

Un valor de p inferior a 0,05 confirma que el factor en estudio tiene efecto significativo sobre los resultados; en este caso se confirma que las variaciones de composición entre las diferentes muestras analizadas tienen un efecto significativo sobre la dimensión final de la baldosa; la varianza generada $\hat{\sigma}_{Co}^2$ se puede estimar partir de los valores correspondientes al promedio de los cuadrados (CM) de los componentes del ANOVA $\hat{\sigma}_{Co}^2 = (CM \text{ Composición} - CM \text{ error})/n = (0,04060 - 0,00380)/3 = 12,30 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$. El error de medición en este análisis está incorporado como parte del error del ANOVA

4.4.2 VARIABILIDAD GENERADA POR LA HUMEDAD Y PRESIÓN DE PENSADO

Con periodicidad horaria, se han tomado tres muestras de polvo de las que se ha determinado el valor de humedad con tres repeticiones para poder estimar el error de la medición, registrando también en cada uno de estos periodos el valor

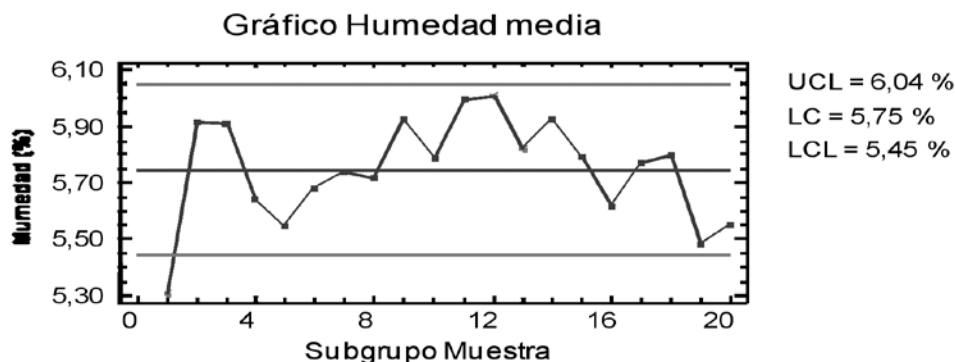


Fig 3: Evolución de la humedad del polvo atomizado

de presión máxima aplicada observado en el manómetro del equipo. Los valores de humedad obtenidos en las muestras se han tratado estadísticamente mediante un gráfico de control (Fig 3) y siguiendo el mismo procedimiento descrito para el control de la dimensión se ha estimado la desviación de la humedad en $\hat{\sigma}_{\text{humedad}} = 0,1140\%$ y su varianza $\hat{\sigma}_H^2 = 19,57 \times 10^{-3}$. A esta estimación de varianza se debe restar la generada por el error de medición de humedad que se ha estimado a partir de las repeticiones de las medidas realizadas sobre las muestras tomadas y que tiene un valor $\hat{\sigma}_{\text{Error Medida H}}^2 = 1,11 \times 10^{-3}$ lo que determina la varianza final de la humedad $\hat{\sigma}_H^2 = 18,46 \times 10^{-3}$.

Repetiendo un proceso equivalente para los valores obtenidos de presión se estima la varianza generada por la presión $\hat{\sigma}_p^2 = 66,04 \times 10^{-2} (\text{Kg}/\text{cm}^2)^2$

4.4.3 VARIABILIDAD GENERADA POR DIFERENCIAS ENTRE DIFERENTES CAVIDADES DEL MOLDE

La varianza generada por las diferencias de presión aplicada a las diferentes cavidades del molde (σ_{Ca}^2) solo puede detectarse estudiando su efecto sobre la respuesta obtenida a la salida de la etapa; en este caso mediante un análisis de los valores de densidad aparente obtenidos en piezas prensadas en distintas cavidades. Para cuantificar este componente de la varianza se han tomado muestras de las piezas prensadas a intervalos horarios durante el periodo en estudio y sobre los resultados se ha realizado un análisis de varianza (ANOVA) (Tabla II)

TABLA II: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LAS DIFERENCIAS ENTRE CAVIDADES DE MOLDE.

Fuente variación	Grados libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	P
Entre cavidad	2	0,000167	0,0000834	4,28	0,0186
Error	57	0,001111	0,0000195		
Total	59	0,001278			

TABLA III COMPOSICIÓN DE VARIANZAS

Causas de variación	Varianza	Coficiente ²	Componente	Porcentaje
Composición (Comp)	$12,30 \times 10^{-3}$	1	$12,30 \times 10^{-3}$	16,1
Humedad (H)	$18,46 \times 10^{-3}$	1,76	$32,55 \times 10^{-3}$	42,7
Presión (P)	$66,04 \times 10^{-2}$	$0,42 \times 10^{-3}$	$0,28 \times 10^{-3}$	0,4
Diferencia cavidades prensa (Ca)	$3,20 \times 10^{-6}$	2227,33	$7,13 \times 10^{-3}$	9,4
Temperatura (T)	1,47	$1,58 \times 10^{-3}$	$2,32 \times 10^{-3}$	3,1
Gradientes horno (Gr)	$12,30 \times 10^{-3}$	1	$12,30 \times 10^{-3}$	16,2
Error de medición ($\epsilon_{\text{medición}}$)	$2,30 \times 10^{-3}$	1	$2,30 \times 10^{-3}$	3,0
Variación no estimada (ϵ_{modelo})			$6,99 \times 10^{-3}$	9,2
Variabilidad Total			$76,18 \times 10^{-3}$	

Dado que el valor de p es menor a 0,05 podemos concluir que existe diferencia significativa entre los resultados de densidad aparente de las distintas cavidades del molde. La estimación de la varianza σ_{Ca}^2 se calcula al igual que en el caso de la composición (Ap 4.4.1) a partir de los promedios de los cuadrados (CM) de la tabla ANOVA: $\hat{\sigma}_{Ca}^2 = (\text{CM entre cavidades} - \text{CM error})/n = 3,19 \times 10^{-6} (\text{gr}/\text{cc})^2$. El error de medición de la densidad aparente está incorporado en este caso como parte del error del ANOVA.

4.4.4. VARIABILIDAD GENERADA POR LA TEMPERATURA DE COCCIÓN

Las variaciones generadas en la temperatura máxima de cocción se han estimado a partir de los valores ofrecidos por los sensores pirométricos del horno medidos cada hora durante el periodo de estudio y del mismo modo que se ha realizado con las variables anteriores, su análisis mediante gráficos de control ofrece una estimación de la varianza de $\hat{\sigma}_{\text{Temperatura}}^2 = 1,47 \text{ } ^\circ\text{C}^2$

4.4.5 ESTIMACIÓN DE LA PRESENCIA DE GRADIENTES DE TEMPERATURA

La presencia de gradientes de temperatura en el horno y la varianza dimensional generada σ_{Gr}^2 se estima mediante el análisis de su efecto en la respuesta, en este caso analizando si existen diferencias significativas entre la dimensión de las piezas obtenidas en los diferentes canales del horno durante el periodo de estudio. El análisis (ANOVA) es el mismo descrito para estimar las variaciones de composición y de diferencias de densidad aparente entre las cavidades de la prensa (Ap. 4.4.1 y 4.4.3); identificando como significativa la diferencia dimensional entre canales del horno que genera una varianza $\hat{\sigma}_{Gr}^2 = 12,30 \times 10^{-3} \text{mm}^2$.

4.5 Estimación y validación del modelo de composición de varianzas

La tabla que describe el modelo de composición de varianzas (*Tabla III*) incluye los diferentes componentes del modelo "causas de variación" y para cada una de ellas la estimación de su varianza. La columna "coeficiente²" incluye los cuadrados de los coeficientes que relacionan la varianza de cada una de las "causas de variación" con la varianza de la dimensión: los correspondientes a la Humedad, Presión y Temperatura se calculan a partir de los coeficientes los detallados en la Ec.6 que relaciona a estas variables con la dimensión final; el coeficiente correspondiente a la diferencia de cavidades de prensa es el coeficiente que relaciona la densidad aparente con la dimensión (Ec.5) y los coeficientes correspondientes a la composición, gradientes de horno y error de medición tienen valor 1 ya que sus varianzas determinan directamente su efecto en la dimensión final.

La columna "componente" es el producto de las "varianzas" y los "coeficientes²" y corresponde a los diferentes términos de la Ec.3; esta detalla el efecto de la varianza de cada una de las causas de variación sobre la dimensión final representando la siguiente columna su porcentaje de contribución al problema.

Comparando la variabilidad predicha por el modelo con la observada, se confirma que este explica el 91,8% de la variabilidad final del proceso lo que confirma la hipótesis de que esta puede explicarse a partir de las variables seleccionadas; la diferencia corresponde a los errores de los modelos de regresión y al del propio modelo de composición de varianzas.

Los resultados, confirman la humedad del polvo atomizado como la variable crítica en el caso estudiado ya que supone un 42,7 % de la variabilidad; este resultado evidencia el impacto de esta variable en el resultado final así como la necesidad de recurrir a sistemas de control automático de la humedad en el proceso de atomización confirmando la incapacidad de los métodos convencionales de control por muestreo periódico para mantener la variable en rangos de variación aceptables.

Las variaciones de presión y temperatura de cocción no son muy relevantes pero los gradientes de temperatura en el horno, las diferencias de densidad aparente entre diferentes cavidades de la prensa y las variaciones de composición suponen una fuente de variación importante que además difícilmente puede controlarse sin recurrir a la utilización de técnicas como las planteadas.

Las causas de las variaciones de composición pueden deberse a heterogeneidad de las materias primas o a deficiencias del sistema de pesaje, situaciones que pueden mejorarse optimizando los procesos de homogeneización y mejorando los sistemas de dosificación. Las diferencias de densidad aparente entre diferentes cavidades del molde detectadas pueden minimizarse si se utilizan prensas con estructuras más reforzadas o si se utilizan moldes con sistemas de compensación adecuados y los gradientes de temperatura en el horno solo pueden resolverse mediante una adecuada regulación de los sistemas de combustión y curva de presiones del horno; en cualquier caso y dada dificultad de detectar la presencia de estos factores salvo recurrir a un análisis como el descrito, se sugiere establecer

esta metodología de análisis de datos utilizando ANOVA como un control periódico de proceso.

El modelo matemático estimado permite tanto establecer los niveles de variabilidad exigibles para cada uno de los componentes del modelo a fin de obtener una variabilidad final coherente con las especificaciones del mercado como predecir la variabilidad esperada ante cualquier cambio cuya mejora pueda cuantificarse en términos matemáticos de reducción de varianza.

Los resultados obtenidos corresponden al proceso concreto estudiado y aunque si son representativos del mismo en las condiciones de operación analizadas no pueden trasladarse cuantitativamente a otros procesos de fabricación de baldosas cerámicas ya que diferencias tecnológicas (Grado de automatización, tipo de maquinaria etc.) ofrecen resultados de variabilidad diferente para las variables en estudio; no obstante la metodología propuesta es aplicable para el estudio de cualquier proceso equivalente ya que el modelo de composición de varianzas propuesto (Ec.3) es el mismo para todos los procesos equivalentes así como los métodos de análisis estadístico propuestos.

5. CONCLUSIONES

El método propuesto ha permitido cuantificar la aportación de cada variable al resultado total de variación estimando y validando un modelo matemático explicativo del problema que puede utilizarse para mejorar la situación orientando los esfuerzos a reducir el efecto de las variables identificadas.

El modelo estimado puede utilizarse también para predecir el resultado de cualquier actuación de mejora, de modo que conociendo el efecto que pueda tener sobre la reducción de la variación de una variable, pueda estimarse su impacto sobre el resultado final y para establecer las tolerancias que serían exigibles en cada control para garantizar una variación determinada.

Los próximos desarrollos de este estudio se orientarán a vincular la variabilidad final con el impacto económico de la misma estableciendo un modelo de costes de variabilidad que permita, junto al modelo estimado, determinar cuáles son las actuaciones de mejora económicamente más viables para robustecer el proceso y llevarlo a un nivel de variación coherente con las especificaciones del mercado.

La metodología propuesta puede asimismo aplicarse al análisis y mejora de la variabilidad observable en cualquier otra característica de calidad en procesos multi-etapa cuyo resultado sea consecuencia de la acción de diferentes variables identificables a lo largo del proceso.

BIBLIOGRAFIA

1. Amorós J.L.; Blasco A.; Beltrán V.; Negre F. *Pastas de gres de monococción. Influencia de las variables del proceso en la calidad del producto acabado* Técnica Cerámica, 120, 1368-1384, 1984.
2. Escardino A.; Amorós J.L.; Enrique J.E. *El diagrama de gresificación en la fabricación de pavimentos de gres*. Cerám. inf., 84, 211-220, 1981.
3. Morrison S.J. *Variance Synthesis revisited*. Quality Engineering, 11(1), 149-155. (1998)
4. Apley, D.W.; Shi J. "A Factor-Analysis Method for Diagnosing Variability in Multistage Manufacturing Processes," Technometrics, 43, pp.84-95. 2001

5. Kingery WD; Bowen HK : *Introduction to ceramics* Ed John Wiley & Sons 1976
6. Portoles J; Sanchez J; Negre F; Mallol G; Monzo M; *Estudio de la dinámica del ciclo de prensado y su influencia sobre la compactación de baldosas cerámicas mediante la sensorización de una prensa industrial. Qualicer 1994 III congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico.* 73-91 (1994)
7. Ferrer C.; Llorens D.; Mallol G.; Monfort E.; Moreno, A. *Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato. Medida de gradientes transversales de temperatura* Técnica Cerámica, 227, 653-662, 1994.
8. Amorós JL: *Pastas ceramicas para pavimentos de monococción. Influencia de las variables de prensado sobre las propiedades de la pieza en crudo y sobre su comportamiento durante el prensado y la cocción.* Tesis Doctoral (1987) Universidad de Valencia
9. Amorós JL; Blasco A; Enrique JE Negre F. *Características de polvos cerámicos para prensado.* Bol.Soc.Esp ceram.Vidr 26.1 31-37 (1987)
10. Amorós J.L.; Blasco A.; Enrique J.E.; Beltrán V.; Escardino A. *Variables en la compactación de soportes cerámicos de pavimento y revestimiento.* Técnica Cerámica, 105, 792-812, 1982.
11. Negre F.; Jarque J.C.; Felú C.; Enrique J.E *Estudio de la operación de secado por atomización de polvos cerámicos a escala industrial, su control y automatización.* Técnica Cerámica, 228, 736-744, 1994.
12. Amorós JL; Orts MJ; Monfort E *Prensado unidireccional de polvos cerámicos aglomerados por atomización microestructura de la pieza en crudo.* Ciencia y tecnología de los materiales cerámicos y vítreos 139-144 Ed Faenza Editrice
13. Amorós JL; Escardino A; Beltrán V *Control de la compactación durante el proceso de fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos* Técnica cerámica 118. 1307-1314 (1983)
14. Montgomery D.C *Introduction to statistical quality control.* Ed John Wiley & Sons 2005 Chap 3,5 Pag 130,194

Recibido: 25-9-09
Aceptado: 30-11-09

