

## **PONENCIA 117 bloque C1**

# **DIAGNOSTICO PRELIMINAR DEL CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN EN LA FABRICACIÓN DE GRES PORCELANATO EN BRASIL**

**Dolly Santos<sup>(1,2)</sup>, Jorge Elias da Silva<sup>(3)</sup>, Ricardo Antonio Francisco Machado<sup>(2,3)</sup>,  
Dachamir Hotza<sup>(3)</sup>**

- (1) Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Química, Ciudad Universitaria, Bogotá, Colombia
- (2) Universidade Federal de Santa Catarina, CPGENQ/UFSC, Campus Universitário Trindade, Florianópolis 88040-900, Brasil
- (3) Universidade Federal de Santa Catarina, PGMAT/UFSC, Campus Universitário Trindade, Florianópolis 88040-900, Brasil

### **SUMARIO**

En este trabajo se analizan las variables de proceso asociadas a la fabricación de baldosas cerámicas, específicamente aquellas que deben tenerse en cuenta para el control y automatización. Se utiliza el análisis de caso de una línea de producción representativa, en una planta específica, para desarrollar un diagnóstico preliminar del estado del control y automatización de este segmento de la industria cerámica en Brasil. Se realiza una descripción de las etapas del proceso de producción industrial haciendo énfasis en los aspectos relacionados con el control principalmente cuales variables intervienen, como se miden y cuales se manipulan. Como caso de estudio fue considerada una planta de producción de uno de los mayores productores de porcelanato en Brasil.

Palabras claves: gres porcelanato, control proceso cerámico, revestimientos cerámicos, automatización

### **INTRODUCCIÓN**

La industria de baldosas cerámicas tiene una alta posibilidad de incrementar su flexibilidad y productividad a través del aumento en el grado de automatización de los procesos. Tal posibilidad amerita un análisis detallado de cada una de las etapas de producción desde el punto de vista de control. El analizar una línea de producción específica es un proceso muy enriquecedor, para en una segunda etapa validar el análisis con información de otras plantas y hacer posible un pronóstico y elaboración de posibles escenarios de actuación. Es así como partiendo del análisis realizado sobre un caso de estudio se puede luego extrapolar para formular soluciones no tan solo para una empresa sino para el sector industrial.

La tendencia del mercado mundial de revestimientos cerámicos es de crecimiento<sup>[15,27]</sup> y el mercado doméstico brasilero es el segundo en tamaño del mundo<sup>[5]</sup>. Elevar el índice de automatización y control de los procesos productivos permite no sólo incrementar la producción sino también garantiza elevados índices de calidad, reducción de quiebra de producto, eliminar cuellos de botella por la eliminación de tareas manuales y aumentar el grado de seguridad operacional.

### **METODOLOGIA**

Para la realización de este estudio se revisó la literatura básica y específica, se seleccionó un producto y un proceso de producción, se estudió detenidamente el proceso en el campo y se realizaron entrevistas a los ingenieros de producción.

En cada etapa se identifica donde se ejecutan realmente acciones de control independiente de si se realizan manual o automáticamente. Para cada lazo de control se identifica cual es la variable controlada, como se realiza su medición y como se efectúa la acción correspondiente cuando la variable controlada se sale del

comportamiento esperado. Es decir, también se identifica la variable manipulada y el actuador o elemento final de control.

El proceso seleccionado debía corresponder en gran parte a alguna línea de muchas de las empresas de este sector en Brasil. Se tuvieron en cuenta dos criterios: que el producto fuera de alta comercialización en el país y manufacturado por diversas empresas en el mismo y segundo que la tecnología utilizada fuera de amplio uso en este sector industrial. La producción de cerámica de revestimiento por vía húmeda y molienda discontinua es predominante en Brasil<sup>[5]</sup>.

El proceso industrial analizado se refiere a la fabricación de gres porcelanato de tipo BI-a esmaltado, de dimensiones de 30x30x1cm producido en una planta localizada al sur de Brasil. Este porcelanato esmaltado natural puede ser usado tanto en pisos como en paredes, en ambientes residenciales y comerciales y para decoración tanto de interiores como de exteriores. El proceso de producción es por vía húmeda, con molienda discontinua, conformado por presión y mono-cocción. La línea de producción es continua a partir del prensado. Cubre principalmente las siguientes etapas: molienda, atomización, prensado, secado, esmaltación, cocción.

### ANALISIS DEL PROCESO

Las diferentes etapas y sub-etapas son mostradas secuencialmente en las Figuras 1 y 2. En ellas encontramos:

- El nombre de la etapa,
- El nombre de la materia prima, producto intermedio o producto final dentro de las flechas de conexión entre etapas.
- Algunos intervalos de las condiciones de operación, indicados entre corchetes: { }
- Periodicidad de la medición, indicada entre corchetes: [ ]

Adicionalmente en la Figura 1, se puede ver un gráfico cualitativo que acompaña la evolución de la humedad (en base húmeda) a lo largo de las diferentes etapas. También se esquematiza en que etapas se puede identificar el estado de consistencia del producto intermedio como “partículas independientes” o “sólido continuo”.

Para asegurar la calidad del producto producido se cumple la norma brasilera ABNT NBR 15463 para placas cerámicas para revestimiento – Porcelanato, publicada el 19 de febrero de 2007 por la Asociación Brasileira de Normas Técnicas<sup>[1]</sup>.

Las etapas de extracción y almacenamiento de las materias primas incluyen ensayos de caracterización y control. Aunque estas etapas son fundamentales en la calidad del producto producido o en los problemas de operación no serán analizados en el presente trabajo porque son procesos comunes a varios productos y diferentes líneas de producción.

La dosificación es efectuada en el momento en que se prepara la carga para el molino y es realizada con base en las pruebas, para obtener el producto deseado, reflejadas en la formulación suministrada por el laboratorio. Para el producto seleccionado podemos resumir y tener una composición aproximada de las materias primas utilizadas, en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Materias primas para el proceso de producción de porcelanato esmaltado, caso de estudio.

TIPO	MATERIA PRIMA	% en masa
PLASTICA	Arcilla	37
NO PLASTICA	Filito <sup>1</sup>	25
	Feldespatos	15
	Talco	8

Adicionalmente a las enunciadas en la Tabla 1, un 15 % de las materias primas corresponden a:

- “Chamote”, constituido por todos los rechazos en polvo o en pieza generados desde la etapa de atomización y antes de la cocción;
- Residuo de los tamices;
- Piezas quemadas rechazadas molidas;
- Residuo sólido procedente de la planta de tratamiento de efluentes.

<sup>1</sup> Filito: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1.3 %), K<sub>2</sub>O (3,2%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (21.7 %) e SiO<sub>2</sub> (> 61 %) <sup>[23]</sup>

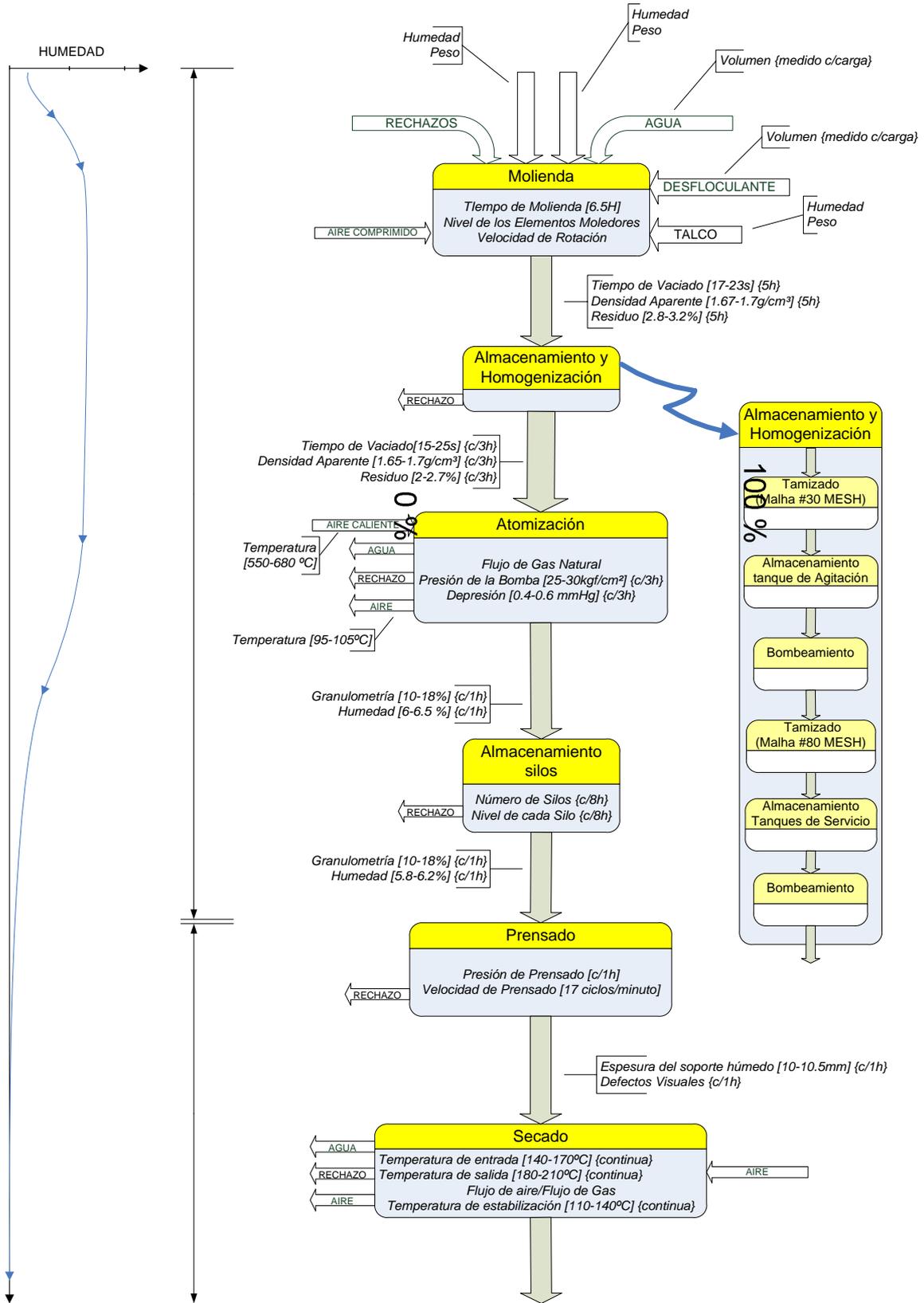


Figura 1. Diagrama de flujo de materia para el proceso de producción de porcelanato esmaltado, caso de estudio (parte 1).

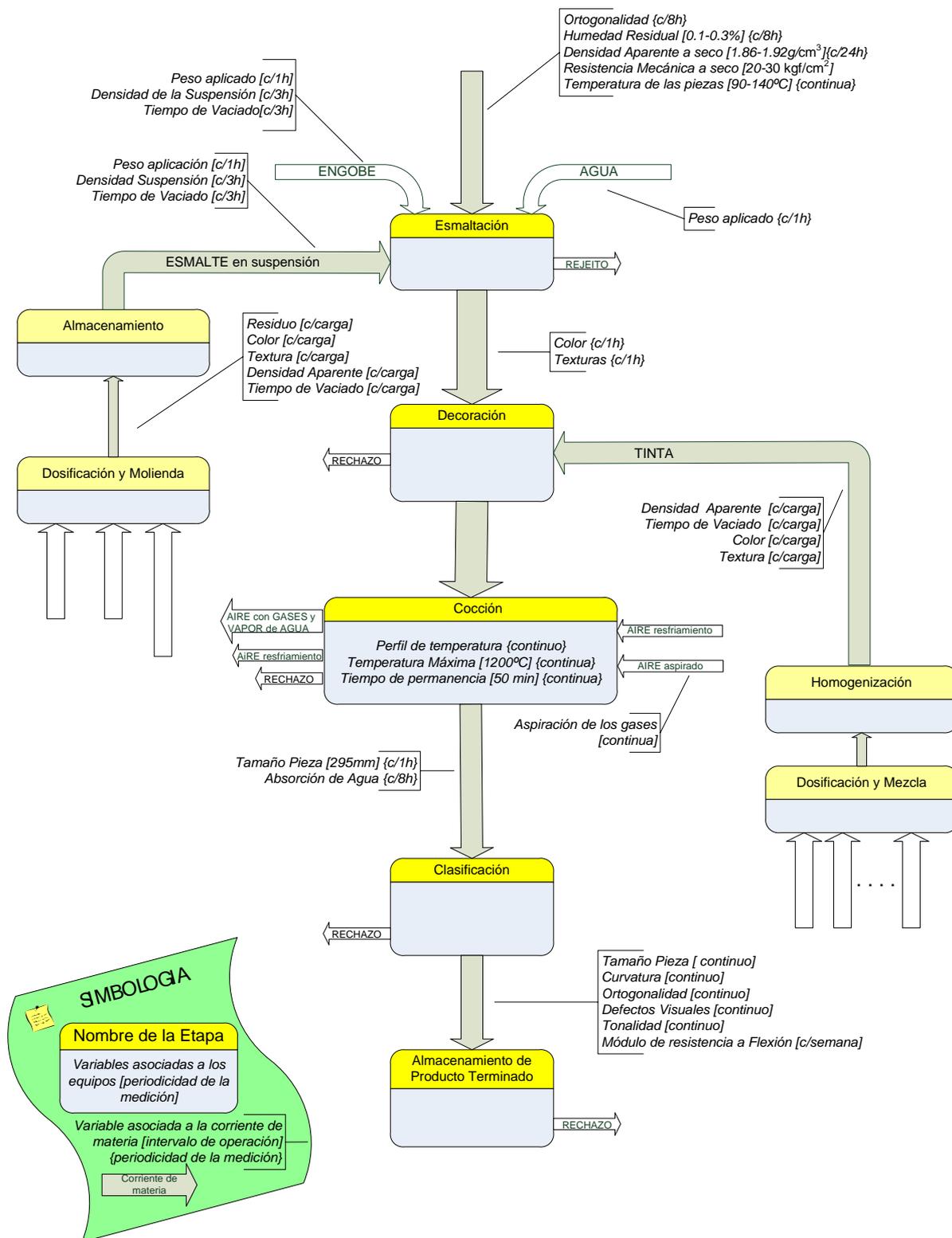


Figura 2. Diagrama de flujo de materia para el Proceso de producción de porcelanato esmaltado, caso de estudio (parte 2).

Dependiendo de la humedad (en base húmeda) de cada materia prima se calcula cuanto peso húmedo se necesita (según la formulación) y se programa la balanza. La adición de cada materia prima se realiza manualmente (con

máquinas cargadoras) hasta el peso húmedo indicado en la balanza. Se cargan alternadamente los materiales plásticos y no plásticos para facilitar la operación de descarga.

#### MOLIENDA

Se utilizan molinos de bolas discontinuos. La distribución granulométrica de las materias primas, especifica la proporción de los tamaños de las bolas en el molino, siendo esta distribuida en los tamaños grandes, medianos y pequeños. El volumen de las bolas es controlado haciendo adiciones de bolas grandes y medianas con base en las mediciones de su nivel cada mes. Este nivel es medido indirectamente como la diferencia entre el diámetro del molino y la altura del espacio vacío. Sin embargo cuando aumenta el tiempo de molienda no existiendo variaciones en la formulación, se toma como un indicativo de la disminución del volumen de bolas y se realizan los ajustes necesarios.

Como se realiza por vía húmeda, es necesario adicionar agua para ajustar la densidad y desfloculante para ajustar la viscosidad. Las modificaciones posibles sobre la cantidad de desfloculante y la adición de agua se realizan dependiendo de los valores medidos en la barbotina de tiempo de vaciado (viscosidad) y densidad aparente, respectivamente, pero se efectúa el ajuste sólo una vez al día. El volumen de agua adicionada depende de la humedad de la materia prima y se mide en un tanque con escala graduada en litros para ser bombeada al molino. El volumen de desfloculante se mide en otro recipiente graduado en litros. Los dos se miden al iniciar cada carga y el tiempo de vaciado y la densidad aparente después de 5 horas de comenzado el lote. La viscosidad es medida como el tiempo de vaciado de la copa Ford # 4 en un viscosímetro de orificio y la densidad aparente en un picnómetro de 100 ml. La manipulación durante la ejecución de un lote de los valores de volumen de agua y volumen de desfloculante sólo se realiza en caso de encontrar un error.

Debería poderse controlar la viscosidad y la densidad directamente por manipulación de los volúmenes de desfloculante y de agua, respectivamente. Estas dos variables afectan la productividad y el consumo energético en la etapa de atomización, así como que pueden inducir problemas en la pulverización<sup>[28]</sup>. Se han realizado trabajos sobre el control automático de estas dos variables pero para molinos continuos<sup>[8,26]</sup>. Se reconoce una mayor facilidad para realizarlo en molinos continuos que por lotes<sup>[15]</sup>.

Una variable importante que define propiedades y defectos en el producto final es el residuo, para el que encontramos las siguientes relaciones:



Se puede controlar el residuo por modificación del tiempo de molienda o de la velocidad de rotación. En la práctica, el tiempo de permanencia en el molino (tiempo de molienda) se determina dependiendo del resultado de las medidas de residuo, densidad aparente y tiempo de vaciado (viscosidad) registradas a las cinco horas de comenzado el lote. La velocidad de rotación del molino no se manipula para controlar el residuo, esta velocidad se controla a través de un Control Lógico Programable, es decir, se sigue una programación de tres velocidades definidas en tiempos determinados previamente, según la composición de la masa.

La barbotina que es la suspensión resultante de la mezcla de las materias primas con el agua y el desfloculante, es descargada del molino por inyección de aire comprimido a 2 kgf/cm<sup>2</sup>.

#### ALMACENAMIENTO Y HOMOGENIZACION DE BARBOTINA

En la etapa de almacenamiento y homogenización, la barbotina es sometida a un tamizado, almacenado, homogenizado y filtrado adicional a las operaciones de transporte. No existen acciones de control diferente al control de inventario y el correspondiente a la operación y seguridad en el manejo de las máquinas y equipos.

La barbotina es almacenada y homogenizada (mezcla de la barbotina de diferentes lotes para ajustar los parámetros) en tanques agitados subterráneos previo paso por tamices con malla # 30. Luego es nuevamente pasada por tamices con malla # 80, con ayuda de bombas de membrana y es llevada por gravedad hacia los tanques de servicio, que sirven como tanques “pulmón” para alimentar el atomizador. La barbotina es succionada del tanque de servicio por una bomba neumática e impulsada hacia el atomizador por una bomba pistón (llamada bomba de barbotina). Para evitar taponamientos en el atomizador y posibles defectos superficiales posteriores la barbotina tiene que pasar por filtros simples y por imanes antes de la atomización.

Sólo se realiza una verificación de las variables: residuo, densidad aparente y tiempo de vaciado en la barbotina, antes de entrar a la etapa de atomización. Si existen grandes variaciones deben hacerse ajustes en las etapas

anteriores. A veces se soluciona mezclando barbotina obtenida en diferentes lotes, otras veces se deben modificar las condiciones en la molienda o en la dosificación.

#### ATOMIZACION

Se utiliza un atomizador de flujo mixto con capacidad de 16000 kg de polvo/h. Utiliza aire calentado con gas natural y circulación forzada para extraer el aire, vapor de agua e polvo fino.

Varios defectos en el producto final como descuadre, variaciones de tamaño, luneta, corazón negro, grietas y quebras por baja resistencia, están asociados a variaciones en la homogeneidad tanto de la granulometría como de la humedad<sup>[28]</sup>. La combinación de estas dos variables también determina el ajuste óptimo de los parámetros de prensado<sup>[10]</sup>. Por tanto en esta etapa se deben controlar estas dos variables principalmente.

La humedad es afectada por la temperatura de entrada del aire, por la depresión y por la presión a la salida de la bomba de barbotina. La temperatura de entrada del aire es controlada mientras que la de salida es sólo monitoreada. Al controlar la temperatura de entrada del aire se reducen el efecto de variaciones de está sobre la humedad. El control es realizado midiendo la temperatura con un termopar y actuando automáticamente sobre la válvula de gas natural para no permitir una variación mayor a 10°C. Para controlar la humedad, cuando esta se sale del intervalo de referencia se realizan las siguientes acciones:

- Ajuste de la temperatura de entrada del aire, es decir, se cambia manualmente el punto de ajuste de la temperatura de entrada del aire en el controlador;
- Verificación de la presión de la bomba de barbotina. Se desea que esta presión sea mantenida fija, sólo modificándose en caso de algún problema, esto es cuando tanto la humedad como la granulometría tienen valores altos;
- Comparación de los valores de densidad y viscosidad. Si estos son adecuados se procede a verificar las fechas de cambio de las pastillas, para cambiar la más vieja;
- Modificación de la depresión, aumentando la abertura del flujo de aire en el extractor por medio de una válvula de compuerta. La presión es medida a través de un manómetro de agua.

Se realiza un control manual de la granulometría ajustando diferentes variables al mismo tiempo y utilizando como dispositivo de medida tamices manuales o electromecánicos. Se debe estudiar la implementación de un control automático habiéndose resuelto el problema de la medición en línea. Se desarrolló un sistema basado en un dispositivo óptico de tratamiento de imágenes<sup>[10]</sup>.

Prácticamente todo el polvo atomizado abandona el atomizador por gravedad. El polvo fino sale junto con el aire y el vapor de agua debido a la depresión generada por el extractor, y es pasado a través de un ciclón para recuperar los finos. Todo el polvo atomizado es transportado por medio de correas transportadoras y elevadores de cangilones hasta los silos.

#### ALMACENAMIENTO EM LOS SILOS:

El transporte a los silos se realiza continuamente y el control del nivel de los silos es manual. La medición del nivel se realiza por cuerda y la decisión sobre cual silo llenar depende del registro de niveles realizado en el turno anterior. Aprovechando que se disponen de ocho silos con capacidad de 40 ton cada uno en línea, la actuación se realiza sobre compuertas que desvían o dejan pasar el polvo en la correa transportadora. Para mejorar la homogenización de la humedad y de la granulometría es necesario que la permanencia en los silos sea de por lo menos 24 horas y que la alimentación a las líneas de prensado consuma el polvo de 2 a 4 silos simultáneamente.

#### PRENSADO

La conformación del material es realizada por prensado uniaxial diferencial de doble efecto en dos líneas de prensado con prensa hidráulica de 2000 ton-f y con cuatro cavidades. La prensa tiene su propio control automático de presión. Para prevenir posibles daños posteriores es efectuada una verificación de la presión de prensado cada hora.

La densidad aparente es una de los parámetros de control más importante en la producción cerámica<sup>[22]</sup>. Se debería garantizar la homogeneidad de ella no sólo para un soporte sino para los 4 soportes ubicados en diferentes cavidades. Sin embargo la densidad aparente no es medida a la salida de esta etapa por ser un proceso dispendioso<sup>[2]</sup>. Sin embargo, se han realizado estudios y desarrollos para medirla por radiación<sup>[4]</sup>, por ultrasonido<sup>[7]</sup> o estimarla a través de la medición de la humedad<sup>[21]</sup>. Para verificación solamente se realizan mediciones del espesor del soporte con un "pie de rey" y una inspección visual de defectos superficiales.

La velocidad de prensado es definida manualmente dependiendo del consumo de soportes en el horno. Un control automático de esta velocidad podría mantener una alta productividad en esta etapa y asegurar la

continuidad del procesamiento a lo largo de las siguientes. Comprometiendo este control la interacción de variables de por lo menos tres etapas, que pueden tener problemas de producción. Manualmente se realizan esas consideraciones para la toma de la decisión de variar la velocidad de prensado.

## SECADO

El secado es realizado en un secador vertical mediante la circulación de aire caliente. Para la transferencia de calor se aprovecha la combustión de gas natural en dos quemadores y el aire caliente procedente del horno. El aire caliente crea los gradientes necesarios tanto para la transferencia de masa (humedad) como para el transporte de calor<sup>[31]</sup>. Las variables que más influyen en el secado son: temperatura y velocidad del aire caliente, espesor y permeabilidad del soporte, humedad inicial y tiempo de residencia. El tiempo de residencia no se manipula y depende de la velocidad de prensado definida previamente. La humedad inicial, el espesor y la permeabilidad del soporte no son medidos en esta etapa.

Se realizan las siguientes mediciones para control o verificación:

- La temperatura de las piezas. Es medida continuamente por un sensor infra-rojo.
- La ortogonalidad. Es medida con un Pie de Rey para poder realizar las correcciones necesarias en caso de defecto y no esperar a ser percibido este sólo hasta la salida del horno.
- La humedad residual. Es cuantificada con ayuda de una balanza digital y horno microondas, horno eléctrico o estufa<sup>[2]</sup>. Dada su importancia al condicionar el comportamiento mecánico de soportes crudos, se desarrolló un dispositivo de medida en continuo y en tiempo real por radiofrecuencia específicamente para esta etapa<sup>[16]</sup>
- La densidad aparente. Es medida por el método de inmersión en mercurio<sup>[2]</sup> y se permite una variación de 0.03 g/cm<sup>3</sup> en la densidad en la pieza o entre piezas de un mismo prensado. Se ha estudiado, analizado y mejorado la técnica de medición de densidad aparente no invasiva por ultrasonido, específicamente para baldosas después de prensadas y secas<sup>[22]</sup>.
- El modulo de ruptura a flexión. Se mide con un deflectómetro digital sólo cuando ocurren problemas.
- La temperatura de secado. Para este secador existen tres secciones por lo tanto tres mediciones son realizadas por medio de termopares:
  - o Región del quemador de entrada.
  - o Región del quemador de salida.
  - o Región de estabilización que se encuentra en la salida efectiva de las piezas.

El control automático en el secador se basa en medir esas tres temperaturas (entrada, salida y de estabilización). Al tener variaciones en las temperaturas de entrada y salida se modifica la relación aire/combustible permitiendo tener variaciones máximas de 5°C.

En la zona de estabilización se modifica la cantidad de aire recirculado interno dependiendo de la temperatura medida (caso la temperatura este por encima del valor de referencia el aire caliente del secador es mezclado con aire a la temperatura ambiente). Con este control se obtienen variaciones máximas de  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  siendo suficiente para que las piezas salgan del secador a la temperatura exigida en el proceso de esmaltación. Como es tan importante la temperatura de las piezas su medición posterior por medio del sensor infrarrojo, sirve como verificación y sólo en caso de falla se actúa parando la línea de transporte para la zona de esmaltación hasta que la temperatura a la salida del secador se estabilice o se modifica el punto de ajuste de las temperaturas del secador.

## ESMALTACION Y DECORACION

Estas dos etapas son críticas en la determinación de la calidad del producto final. Adicional a ellas se encuentran las correspondientes a la preparación del esmalte y de las tintas, como se ve en la figura 2. La preparación tanto de esmaltes como de tintas requiere una verificación y medición de la densidad aparente, color, textura y tiempo de vaciado. Para la suspensión de esmalte, adicionalmente se mide el residuo.

Ya en la etapa de aplicación sobre el soporte se realizan cuatro operaciones: Aplicación de agua, aplicación de engobe, aplicación de esmalte y aplicación de tinta. Para una rápida y buena absorción del engobe y del esmalte se necesita que la temperatura de la pieza sea adecuada antes de la aplicación del agua, por lo que su control es indispensable. Este control se describió en la etapa anterior.

Un indicador del espesor de la capa de esmalte y de tinta es el peso del recubrimiento. Se realiza un control manual y fuera de línea del peso de esmalte aplicado, midiéndolo con una balanza digital e realizando los correspondientes ajustes a cada hora. Por estar trabajando con rodillos de silicona no se pueden hacer mediciones precisas del peso aplicado de tinta.

Una variación en los valores de densidad aparente y en el tiempo de vaciado de la suspensión de esmalte y de tinta puede alterar la tonalidad y el color del producto. Debe producirse una corrección si los valores se encuentran fuera de los límites al realizarse el registro y verificación de estas variables. Así, por ejemplo si la

densidad se encuentra por debajo de su valor es adicionada agua (para engobe y esmalte) o el vehículo serigráfico (para tintas), o por el contrario si está por encima de su valor se adiciona suspensión con una mayor densidad.

Una inspección visual y manual es efectuada para la separación de piezas con defectos superficiales antes de gastar energía y materiales en el procesamiento en las etapas siguientes. Ante los innegables beneficios se puede sugerir una medición basada en un sistema óptico con un software de procesamiento de imágenes. Soluciones de este tipo todavía no se han implementado con éxito por presentar dificultades en la detección misma de los defectos y el ambiente agreste por presencia de polvo y agua<sup>[21]</sup>.

#### COCCION

La cocción es la fase principal, donde ocurren las principales modificaciones en las propiedades del material cerámico. Se utiliza un horno horizontal de rodillos de 120 m y gas natural como combustible para generar calor. Un control automático posibilita el control de temperatura de las diferentes zonas del horno. El horno se divide a lo largo en franjas cada una de las cuales tiene un termopar y un servomotor como actuador para modificar la relación aire/combustible en el correspondiente quemador. Las mediciones son centralizadas en un computador y dependiendo del ajuste de las temperaturas en cada zona, una señal proporcional al error (diferencia entre la temperatura medida y la ajustada) es enviada a cada uno de los actuadores. Se registra el perfil de temperatura para hacer un seguimiento de la curva de cocción.

Se mide el tamaño de la pieza, que es función de la retracción lineal, con un pie de rey cada hora. Dependiendo de este valor se manipula la temperatura máxima del ciclo. Dependiendo del tamaño del soporte y la presencia o no de defectos se pueden manipular también los motores de los accionamientos de los rodillos, modificando así el tiempo de residencia y por ende el ciclo de cocción.

La variable absorción de agua es medida una vez en cada turno (ocho horas) y si el valor se encuentra fuera de los límites aceptados se verifican las otras variables para decidir si se modifica la temperatura en el horno o la Presión de prensado.

Si en el producto final existen defectos debido a la presencia de materia orgánica (Corazón Negro)<sup>[3,19]</sup> y a trincas debidas a humedad residual, se manipula el flujo de aire del extractor para modificar la aspiración de los gases en la sección de precalentamiento del horno o el tiempo de permanencia en el horno o la presión de prensado o la humedad del polvo atomizado. Debe trabajarse al límite mínimo de flujo de aire que permita una menor posibilidad de presencia de defectos sin aumentar mucho el gasto de gas natural. Otras acciones sugeridas son la de optimizar el perfil de temperaturas en el horno o hacer que la atmósfera del mismo sea más oxidativa<sup>[3]</sup>.

#### CLASIFICACION

Para evaluar la calidad de las piezas se realizan inspecciones de: Tolerancia dimensional, curvatura, defectos de ortogonalidad, defectos superficiales, definición de tonalidad y del módulo de resistencia a flexión. Los primeros tres son medidos en forma continua por medio de una fotocelda en la línea de separación y preselección de baldosas. Si no se cumple con las referencias establecidas automáticamente acciona una compuerta para retirar las piezas defectuosas.

Los defectos superficiales y la definición de tonalidad son inspeccionados visual y manualmente también de forma continua. Semanalmente se verifica el valor del módulo de resistencia a flexión por muestreo y dependiendo de si este valor está fuera del intervalo permitido se revisan las otras variables para actuar sobre la presión de prensado o la temperatura en el horno o en la composición de la masa.

Si la curvatura se sale de especificación se realizan ajustes en la temperatura del horno. Se ha comprobado que los cambios en la temperatura de consigna en los módulos de máxima temperatura conducen a cambios en la curvatura<sup>[15]</sup>. Sería factible implementar un control automático midiendo la curvatura y actuando sobre la temperatura máxima del horno, pero debe estudiarse detalladamente esta posibilidad porque existen otras variables que también se verían afectadas por los cambios realizados por este control.

#### CONSIDERACIONES FINALES

Del análisis realizado y basados en que la cantidad encontrada de lazos de control automático fue muy baja comparada con la de los lazos de control manual, podemos concluir que el nivel de automatización es bajo, lo cual concuerda con otros estudios realizados sobre este tipo de proceso<sup>[21]</sup>. En la Tabla 2 se encuentra el resumen de los lazos de control automático encontrados en las diferentes etapas. Prácticamente encontramos sólo un lazo de control automático por etapa (en aquellos casos donde hay más de un lazo, todos se refieren al mismo tipo de variable, temperatura). Estos lazos en su mayoría se encuentran integrados a los equipos principales desde

fábrica y ninguno de ellos involucra variables de más de una etapa. Esto implica una dificultad de interactuar con las variables asociadas a estos lazos por encontrarse dependiendo de una tecnología a veces bajo la modalidad “llave en mano”.

Tabla 2. Lazos de control automático en los equipos asociados a las etapas

EQUIPO	LAZO DE CONTROL AUTOMATICO
Molino	Control de velocidad de rotación
Atomizador	Control de la temperatura de salida del aire
Prensa	Control de presión de prensado
Secador	Control de temperatura de entrada, de salida y de estabilización (3 lazos de control)
Horno	Control de temperatura en diferentes puntos a lo largo del horno

Varias de las correcciones realizadas manualmente involucran acciones en etapas anteriores a aquella en la cual se realiza la medición. Esta observación también ha sido encontrada en otros estudios<sup>[17,21]</sup>. El primer problema al que nos enfrentamos es a la realización de una medición que pueda transmitir una señal que podamos utilizar para que una acción sea tomada en forma automática. Después nos enfrentamos a decidir sobre que variable es mejor actuar. Como regla general de debe actuar sobre aquella que lo afecta más y de forma más rápida<sup>[24,30]</sup>. Esto coincide con las decisiones tomadas de actuar directamente sobre alguna variable en el horno cuando se encuentran variaciones fuera del intervalo permitido de variables como: tamaño, absorción de agua, modulo de resistencia a la flexión y la presencia de corazón negro en el producto final. Todas ellas se miden ya sea en la cocción o en la etapa de clasificación y entre las posibilidades de actuación también se encuentran variables de etapas anteriores, por ejemplo la presión en el prensado.

Entre mas lejana este la acción de la variable medida, mas tiempo transcurre procesándose producto fuera de especificaciones. Pero el problema de actuar sobre una variable de una misma etapa, caso del horno, es que se le va a exigir más al equipo para corregir problemas que debieron ser corregidos en etapas anteriores, a veces no con muy buen resultado. Hacer correcciones sobre variables en otras etapas exige realizar un análisis multivariable, por eso se pone de manifiesto una interacción entre las variables que no es uno a uno y por tanto la necesidad de verificar otras variables para tomar la decisión sobre cual finalmente se va actuar. Es posible obtener un mapa general de las diferentes interacciones realizando un cuidadoso análisis de causa y efecto entre las variables comprometidas en el proceso (como próxima etapa de este trabajo será realizado este análisis). Este estudio de causa y efecto puede ratificar controles ya establecidos o proponer lazos y estrategias de control avanzado (multivariable, no lineal, predictivo, adaptativo, ...), que mejoren el comportamiento de las variables repercutiendo en la calidad del producto y en la productividad de la planta<sup>[6,9,13,14,24,29]</sup>. Por ejemplo, puede generar una opción de controlar otra variable que, perteneciendo a una etapa intermedia, afecta muchas otras variables que inciden directamente sobre las propiedades del producto final. Este es el caso de la densidad aparente del soporte prensado, que como es de difícil medición en línea, se han realizado implementaciones con éxito de una estrategia que contempla estimarla a través de medir la humedad en el soporte prensado y crudo, para modificar el punto de ajuste del control de la presión de prensado, aprovechando las correlaciones que existen entre esta presión, la humedad y la densidad aparente<sup>[21]</sup>.

Podemos concluir que el nivel de automatización e control encontrado no permite la corrección integrada del proceso para eliminar los desvíos existentes en la línea de producción. La supervisión y el control automático son apenas realizados localmente en cada etapa del proceso, lo que torna la planta desde el punto de vista operacional menos eficiente de lo que podría ser. Eso lleva a un compromiso de la calidad del producto final porque pequeños desvíos, que influyen su calidad, no pueden ser corregidos a lo largo del proceso. Consecuentemente, existen pérdidas elevadas en la producción y un costo operacional que podría ser minimizado a través de la integración de los procesos productivos y la elevación del grado de automatización<sup>[20,24]</sup>.

Aunque se han resuelto algunos problemas de medición en línea, la persistente dificultad de medir ciertas variables a controlar, nos hace pensar en la posibilidad de usar tecnologías como las redes neuronales para, a través de un proceso de identificación, utilizarlas como sensores virtuales<sup>[12,18]</sup>. Una opción a tener en cuenta en el esmaltado y decoración, donde pueden usarse las redes neuronales y RGB (sistema para determinación del color).

También es factible pensar en explorar la utilización de un modelo de redes neuronales aprovechando sus características de modelo “caja negra” junto con el conocimiento heurístico (llamadas redes neuronales con conocimiento previo), con el propósito de predecir, para determinadas propiedades y características del producto final, los mejores valores de ciertas variables escogidas por su importancia. Las ventajas de la utilización de redes neuronales con conocimiento previo, asociadas al conocimiento heurístico o a modelos simplificados del proceso, permite que sean introducidas restricciones y manejo de las inconsistencias que pueden presentarse cuando se utilizan redes neuronales tipo caja negra<sup>[12,18]</sup>. Por el análisis crítico realizado en este trabajo, se

observa que existe un gran potencial para la utilización de este tipo de herramientas para el control y supervisión del proceso de forma integrada, posibilitando la eliminación de diversos puntos críticos que llevan a la elevación de costos y comprometen la calidad del producto final.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa cuya línea de producción sirvió como caso de estudio para el análisis del proceso. A la Universidad Nacional de Colombia por dar la oportunidad de realizar los estudios de doctorado a Dolly Santos en la Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil. Al doctor Agenor de Noni Junior por su colaboración.

## REFERENCIAS

1. ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. <http://www.abntnet.com.br/fidetail.aspx?FonteID=25877> Acceso el 27 septiembre de 2007.
2. AMORÓS J.L., SÁNCHEZ, E., GARCÍA-TEM, J., SANZ, V. Y MONZÓ, M. *Manual para el control de la calidad de materias primas arcillosas*. Instituto de Tecnología Cerámica – AICE, Castellón, España, 1998.
3. AMORÓS, J.L., BELTRAN, V., BLASCO, A., ENRIQUE, J.E., ESCARDINO, A., NEGRE, F. *Defectos de fabricación de Pavimentos y revestimientos Cerámicos*. Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas e Instituto de Tecnología Cerámica, Universitat de València, 1991.
4. AMORÓS, J.L., FELIÚ, C., LLORENS, D., CANTAVELLA, V., y MEZQUITA, A. *Medida no destructiva de la densidad aparente de piezas en crudo mediante absorción de rayos X*. Qualicer 2006. IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y el Pavimento Cerámico. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2006. vol 2 pp PBC 69.
5. ANFACER. Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimento. <http://www.anfacer.org.br> Acceso el 26 septiembre de 2007.
6. ASTROM, K. J. ; WITTENMARK, B. *Computer controlled systems theory and design*. Prentice hall, New Jersey, 1984.
7. CANTAVELLA, V., LLORENS, D., MEZQUITA, A., MOLTÓ, C., BHARDWAJ, M.C., VILANOVA, P., FERRANDO, J. y MALDONADO-ZAGAL, S. *Uso de la técnica de ultrasonidos para medir la densidad aparente de las baldosas en crudo y optimizar el proceso de prensado*. Qualicer 2006. IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y el Pavimento Cerámico. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2006. vol 2 pp PBC 165.
8. CANTAVELLA, V., SÁNCHEZ, E., MALLOL, G., MONFORT, E., MIRALLES, L., CUESTA, E. y GARCÍA, M.C. *Control de la operación de molienda en continuo*. Qualicer 2002. VII Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y el Pavimento Cerámico. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2002. vol 1 pp PGI 219-236.
9. DESPHANDE, P.B., *Multivariavel Process Control*. ISA, 1989.
10. DI GIUSEPPE, A. y REVEL, G.M. *Medida automatizada de la granulometría del polvo atomizado para el control del proceso en línea*. Qualicer 2006. IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y el Pavimento Cerámico. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2006. vol 3 pp PBC 363.
11. EDGAR, T.F., HIMMELBLAU, D.M. *Optimization of Chemical Process*. McGraw-Hill, 1989.
12. GOLDBERG, D. *Genetics Algorithms in Search, Optimization e Machine Learning*. Addison-Wesley, 1988.
13. HESTENES, M.R. *Conjugate Direction Methods in Optimization*. Springer-Verlag, 1980.
14. HAYKIN, S. *Neural Networks*. Prentice Hall, 1999.
15. HENSON, M.A., SEBORG, D.E., *Nonlinear process control*. Prentice hall, New Jersey, 1997.
16. ISERMANN, R. *Digital control system*, Springer, 1981.
17. JARQUE, J.C., CANTAVELLA, V., DAROCA, M.J., GÓMEZ, P., ARRÉBOLA, C. y CARCELLER, A. *Influencia de las condiciones de operación del horno de rodillos sobre la curvatura de las piezas*. Qualicer 2002. VII Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y el Pavimento Cerámico. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2002. vol 3 pp Pos 153.
18. JARQUE, J.C., CANTAVELLA, V., SEGARRA, C., MALLOL, G., CABRERA, B. y GASCÓN, F. *Medida en continuo y en tiempo real de la humedad de baldosas cerámicas a su salida del secador mediante radiofrecuencia*. Qualicer 2006. IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y el Pavimento Cerámico. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2006. vol 2 pp PBC 291.
19. JÚNIOR, A. N. *Modelagem matemática aplicada ao controle dimensional de placas cerâmicas de monoqueima processadas via úmida*. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, PGMAT, UFSC. Florianópolis. 2004.
20. KOSKO, B. *Neural Networks and fuzzy systems*. Prentice Hall, 1992.
21. LUCAS, F. *Processos Produtivos em Revestimentos Cerâmicos: Variáveis de Processo e Possíveis Causas de Defeitos*. Cerâmica Industrial, 9 (5/6) Setembro/Dezembro, 2004.
22. LUYBEN, W.L., BJORN D.T. and LUYBEN, M.L. *Plantwide Process Control*. McGraw-Hill, New York, 1998.
23. MALLOL, G. *Control y Automatización en la Industria Cerámica. Evolución y Perspectivas*. Qualicer 2006. IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y el Pavimento Cerámico. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2006. vol 1 pp Con 47-72.
24. MARCHETTI, B. y REVEL G.M. *Medida en línea de la densidad en crudo de baldosas cerámicas*. Qualicer 2002. VII Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y el Pavimento Cerámico. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2002. vol 1 pp PGI 11.
25. MEDEIROS, M. de F., LIMA, M. A. B. e DA SILVA, R. J., *Filitos Cerâmicos de Martinópolis (Ce) - Potencialidade e Aplicações Tecnológicas* – Revista de Geologia, Vol. 16, nº 1, 49-62, 2003.
26. OGUNAIKE, B.A., RAY, W.H. *Process dynamics, modeling, and control*, Oxford University Press, 1994.
27. REED, J. S. *Principles of Ceramic Processing*. 2nd ed. New York, Wiley, 1995.
28. SÁNCHEZ, E., CANTAVELLA, V., LLORENS, D., MOLTÓ, C., FOUCARD, L., MIRALLES, L. y CUESTA, E. *Control Automático de la densidad y la viscosidad en molinos continuos*. Qualicer 2006. IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y el Pavimento Cerámico. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2006. vol 2 pp PBC 123-136.
29. SASSI, S. *La industria Cerámica Mundial en la era de la Globalización*. Qualicer 2006. IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y el Pavimento Cerámico. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2006. vol 1 pp Con 83- 99.
30. SILVA, J. E., *Controle de Processo*. Curso de Tecnologia Cerâmica. SENAI, Tijucas, Santa Catarina. 2001.
31. SLOTINE, J.E. *Applied nonlinear control*. Prentice hall, New Jersey, 1991.
32. SMITH, C.A., CORRIPIO, A. B. *Principles and practice of automatic process control*. John Wiley & Sons, Inc. Second edition. New York, 1997.

33. TREYBAL, R.E. *Mass Transfer Operations*. Third Edition, McGraw-Hill, New York, 1980.