

Controle e Automação na Indústria Cerâmica: Estudo de Caso na Fabricação de Porcelanato no Brasil

Dolly Santos Barbosa^{a,b,c}, Jorge Elias da Silva^c,

Ricardo Antonio Francisco Machado^b, Dachamir Hotza^{b,c*}

^aUniversidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Química, Bogotá, Colombia

^bUniversidade Federal de Santa Catarina - UFSC,

Departamento de Engenharia Química - EQA, Florianópolis - SC, Brasil

^cUniversidade Federal de Santa Catarina - UFSC,

Núcleo de Materiais Cerâmicos e Vidros - CERMAT, Florianópolis - SC, Brasil

*e-mail: dhotza@gmail.com

Resumo: Neste trabalho, foram analisadas as variáveis do processo associadas à fabricação dos revestimentos cerâmicos, especificamente aquelas que intervêm no controle e automação. Foi utilizada uma análise de caso referente a uma linha de produção representativa em uma planta específica para desenvolver um diagnóstico preliminar do estado de controle e automação desse segmento da indústria cerâmica do Brasil. Foi elaborada uma descrição das etapas do processo de produção industrial, enfatizando os aspectos relacionados com o controle: quais variáveis intervêm, como se medem e quais se manipulam. Como estudo de caso foi considerada uma planta de um dos maiores produtores de porcelanato no Brasil.

Palavras-chave: revestimentos cerâmicos, porcelanato, controle, automação.

1. Introdução

Incrementos na produtividade e flexibilidade da indústria dos revestimentos cerâmicos podem ser obtidos por meio do aumento no nível de automatização de seus processos^{1,2}. O Brasil é o segundo maior consumidor, o terceiro maior produtor e o quarto maior exportador do mundo¹. Aumentar o índice de automação e controle dos processos produtivos permite não só incrementar a produção, mas também garantir elevados índices de qualidade, reduzir a quebra de produto, eliminar os gargalos pela supressão de tarefas manuais e aumentar o grau de segurança operacional.

O índice de automação pode ser aumentado utilizando máquinas e robôs para fazer as tarefas manuais, e também fazendo com que o transporte dos materiais através da linha de produção tenha menos intervenção humana e se realize de forma contínua. Mas esta é só uma parte da automação, outro aspecto permite manter dentro dos limites aceitáveis (em torno do valor ótimo) o comportamento de variáveis de processo (condições de operação) depois de encontrar seu valor ótimo para não se comprometer as características de qualidade do produto nem a produtividade da planta. Fazer de forma automática este controle não é fácil quando se trata de um processo como o de revestimentos cerâmicos, onde as relações entre as variáveis são complexas e não se tem desenvolvidos os instrumentos de medição em linha para todas as medições necessárias.

Essa possibilidade justifica uma análise detalhada de cada uma das etapas de produção do ponto de vista de controle. Em uma primeira etapa, pretende-se analisar uma linha de produção específica. Além de agregar melhor conhecimento do processo, em uma etapa posterior, pode-se validar essa análise com informações de outras plantas e elaborar um prognóstico e definir os possíveis cenários de atuação. Assim, pode-se partir de um caso de estudo com o propósito de extrapolar e formular soluções, não só para uma empresa como também para todo um setor industrial.

2. Metodologia

Para a realização deste estudo foi revisada a literatura básica e específica, foram selecionados um produto e um processo de fabricação,

foram estudados detalhadamente o processo *in loco* e foram realizadas entrevistas com engenheiros responsáveis pela produção.

Em cada etapa do processo, foram descritas onde e como ações de controle são executadas, independente de essas serem realizadas manual ou automaticamente. Para cada uma das malhas de controle, se identificou qual é a variável controlada, como se realiza sua medição e como se efetua a ação correspondente quando a variável controlada se desvia de seu comportamento desejado. Assim, foi identificada a variável manipulada e o atuador ou elemento final de controle. Realizou-se uma descrição das variáveis medidas como potenciais variáveis controladas.

O processo selecionado corresponde a linhas de produção de grande parte das empresas do setor cerâmico no Brasil. Foram, para tanto, considerados dois critérios:

- produto de alta comercialização no país e manufaturado por diversas empresas nacionais; e
- tecnologia utilizada de amplo uso nesse setor industrial. A produção de cerâmica de revestimento por via úmida e moagem descontínua é predominante no sul do Brasil¹.

O processo industrial analisado se refere à fabricação de grés porcelanato de tipo BI-A esmaltado, de dimensões de 30 x 30 x 1 cm produzido em uma planta localizada na região sul do Brasil. Esse porcelanato esmaltado natural pode ser usado tanto em pisos como em paredes, em ambientes residenciais e comerciais e para decoração tanto de interiores como de exteriores. O processo de produção é por via úmida, com moagem descontínua, conformação por prensagem e monoqueima. A linha de produção é praticamente contínua a partir da prensagem.

3. Análise do Processo

As etapas de extração e armazenamento das matérias-primas são fundamentais para garantir a qualidade do produto fabricado ou para se evitar os problemas de operação. Elas também incluem métodos de controle e ensaios de caracterização. No entanto, não serão analisadas

neste trabalho porque são processos que geralmente não ocorrem nas instalações da planta de processamento cerâmico.

Para se atingir a qualidade desejada do produto acabado, deve-se seguir a norma brasileira ABNT NBR 15463 para placas cerâmicas de revestimento – porcelanato, publicada em 2007³.

As variáveis medidas que não correspondem às variáveis controladas são consideradas potenciais variáveis para controlar. Por sua importância, as variáveis medidas são identificadas ao longo de todo o processo e são apresentadas nas Figuras 1 e 2.

Nessas figuras se mostram seqüencialmente as diferentes etapas e sub-etapas, especificamente:

- nome da etapa;
- nome da matéria-prima, produto intermediário ou final dentro das setas de conexão entre etapas; Alguns intervalos das condições de operação, indicados entre colchetes; e
- variáveis medidas e periodicidade de sua medição indicada entre chaves.

Adicionalmente, na Figura 1, pode-se observar um gráfico onde se acompanha a evolução da umidade (em base úmida) ao longo das diferentes etapas. Também se esquematiza em quais etapas podem-se identificar o estado de consistência do produto intermediário como “partículas independentes” ou “sólido contínuo”.

As etapas no processamento de revestimentos cerâmicos, direcionadas para a produção do produto especificado são: dosagem, moagem, armazenamento de barbotina, atomização, armazenamento de pó, prensagem, secagem, esmaltação, decoração, queima e classificação. Essas são apresentadas a seguir.

3.1. Dosagem e moagem

A dosagem é efetuada no momento em que se prepara a carga para moagem. Para se obter o produto desejado, a dosagem é realizada com base nas provas, obtidas na formulação desenvolvida pelo laboratório. Para o produto selecionado resumiu-se a composição aproximada das matérias-primas utilizadas na Tabela 1.

Adicionalmente às matérias-primas citadas na Tabela 1, 15% do total da formulação corresponde a:

- “chamote”, constituído por todos os resíduos em pó ou em peças, gerados entre as etapas de atomização e de queima;
- resíduo das peneiras;
- “caco”, composto de peças queimadas rejeitadas e previamente moídas; e
- resíduo sólido, procedente da planta de tratamento de efluentes.

Dependendo da umidade (em base úmida) de cada uma das matérias-primas, calcula-se quanto peso úmido é necessário (segundo a formulação) e se programa a balança. A adição de cada matéria-prima se realiza manualmente (com máquinas carregadoras) até o peso úmido indicado pela balança. Carregam-se alternadamente os materiais plásticos e não-plásticos para facilitar a operação de descarga⁵.

Para a moagem, utilizam-se moinhos de bolas descontínuos. A distribuição granulométrica das matérias-primas especifica a proporção dos tamanhos das bolas no moinho (grandes, médias e pequenas). O volume das bolas é controlado pela adição das bolas

Tabela 1. Matérias-primas para o processo de produção de porcelanato esmaltado (estudo de caso).

Tipo	Matéria-prima	% em massa
Plástica	Argila	37
Não plástica	Filito*	25
	Feldspato	15
	Talco	8

*Filito: Fe₂O₃ (1,3%), K₂O (3,2%), Al₂O₃ (21,7%) e SiO₂ (> 61%)⁴.

grandes e médias com base nas medições de seu nível cada mês. Esse nível é medido indiretamente como a diferença entre o diâmetro do moinho e a altura do espaço vazio. Contudo, quando aumenta o tempo de moagem não existindo variações na formulação, se considera como indicativo da diminuição do volume de bolas e executam-se os ajustes necessários

Como se realiza o processo por via úmida, é preciso adicionar água e defloculante (silicato de sódio). Controla-se a viscosidade (tempo de escoamento) e a densidade manualmente por manipulação dos volumes de defloculante e da água, respectivamente. O volume de água adicionada depende da umidade da matéria-prima e é medido em um tanque com escala graduada em litros para ser bombeado ao moinho. A quantidade de defloculante corresponde a 0,7% peso seco e seu volume se mede em outro recipiente graduado, também em litros. A viscosidade da barbotina é medida por meio do tempo de escoamento em um viscosímetro do tipo copo Ford #4 e a densidade aparente em um picnômetro de 100 mL. Mesmo que as medições sejam efetuadas depois de 5 horas de iniciado cada lote, o ajuste só é realizado uma vez por dia. A manipulação dos valores desses volumes durante a execução de um lote só se realiza caso de se encontrar um erro.

O resíduo pode ser controlado por modificação do tempo de moagem ou da velocidade de rotação. Na prática, o tempo de residência no moinho (tempo de moagem) se determina dependendo do resultado das medições de resíduo, densidade aparente e tempo de escoamento (viscosidade), variáveis essas registradas após 5 horas do início de produção do lote. A velocidade de rotação se controla por médio de um controlador lógico programável (CLP), ou seja, segue-se uma programação de três velocidades definidas em tempos determinados previamente, segundo a composição da massa.

A barbotina, que é a suspensão resultante da mistura das matérias-primas com água e defloculante, é descarregada do moinho por injeção de ar comprimido a 2 kgf/cm².

3.2. Armazenamento e homogeneização de barbotina

Ao sair dos moinhos e antes de chegar aos tanques de agitação, a barbotina é peneirada com malha #60 (250 µm) para separar as partículas de maiores dimensões. Nos tanques agitados subterrâneos a barbotina é armazenada e homogeneizada (mistura da barbotina de diferentes bateladas para ajustar os parâmetros). A barbotina é transportada por bombas de membrana para uma bateria de peneiras vibratórias, com malhas mais fechadas (#80, 177 µm) e em seguida é conduzida por gravidade para os tanques pulmão. Para ser impulsionada para ao atomizador, a barbotina é succionada por uma bomba pneumática (chamada de “bomba de barbotina”). Para evitar o entupimento no bico do atomizador (caso a peneira tenha um furo maior que o especificado pela malha) e possíveis defeitos superficiais posteriores, a barbotina deve ser submetida a uma passagem por um filtro simples e a uma separação magnética antes da atomização. Para que sejam evitados defeitos superficiais no produto final, a barbotina também deve passar por ímãs para remoção de contaminações com ferro metálico⁵.

Realiza-se um controle basicamente para manter o balanço de matéria nos tanques e o correspondente à operação e segurança no funcionamento das máquinas e equipamentos. Na barbotina (antes de entrar ao atomizador) se verificam as seguintes variáveis: resíduo, densidade aparente e tempo de escoamento. Se existem grandes variações, mistura-se a barbotina obtida em diferentes bateladas ou modificam-se as condições em etapas anteriores como a moagem ou a dosagem.

3.3. Atomização

Utiliza-se um atomizador de fluxo misto (primeiro em contracorrente e depois em paralelo), com capacidade de 16.000 kg de pó/h.

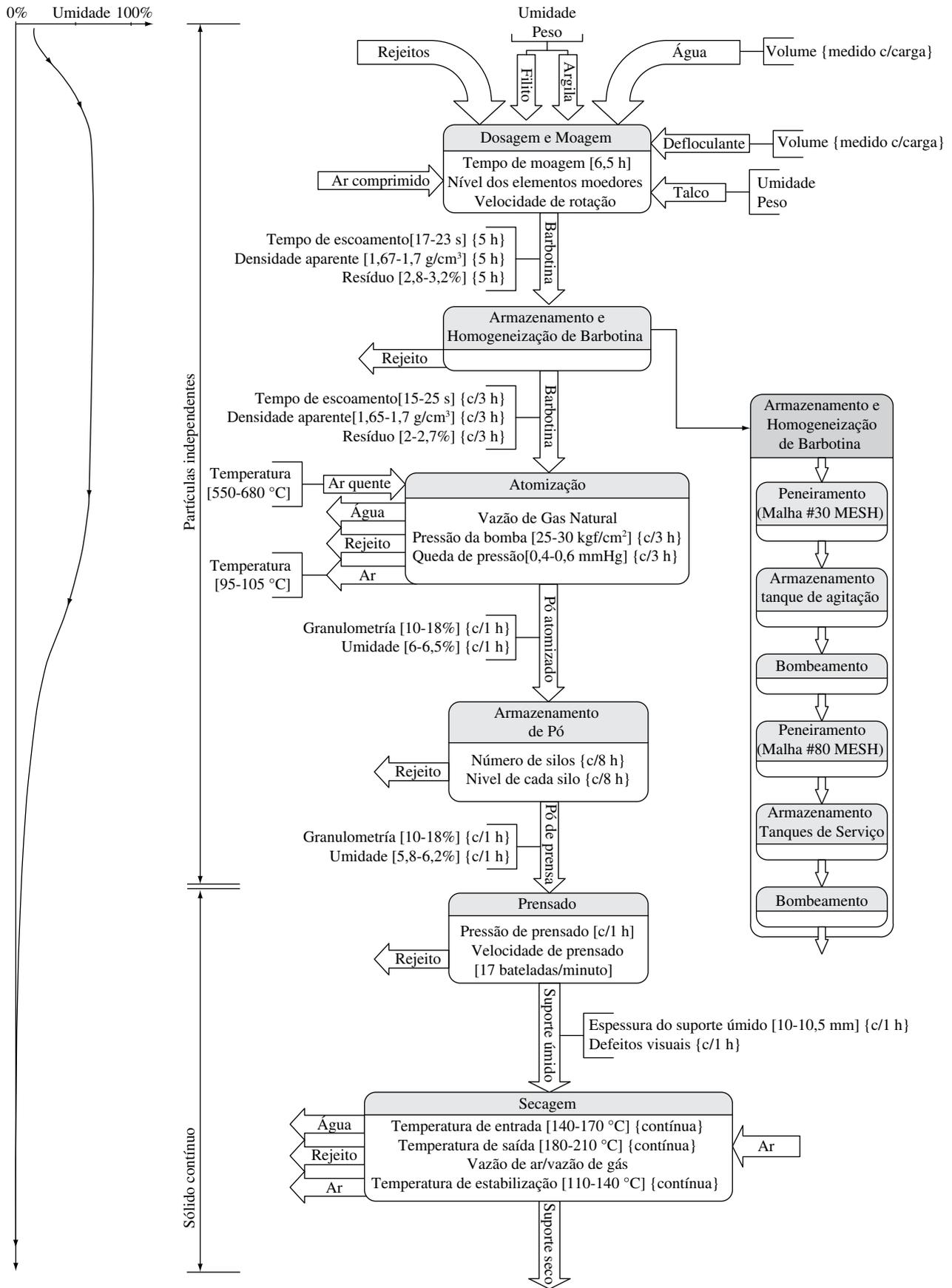


Figura 1. Fluxograma de matéria para o processo de fabricação do porcelanato esmaltado (estudo de caso) Parte 1.

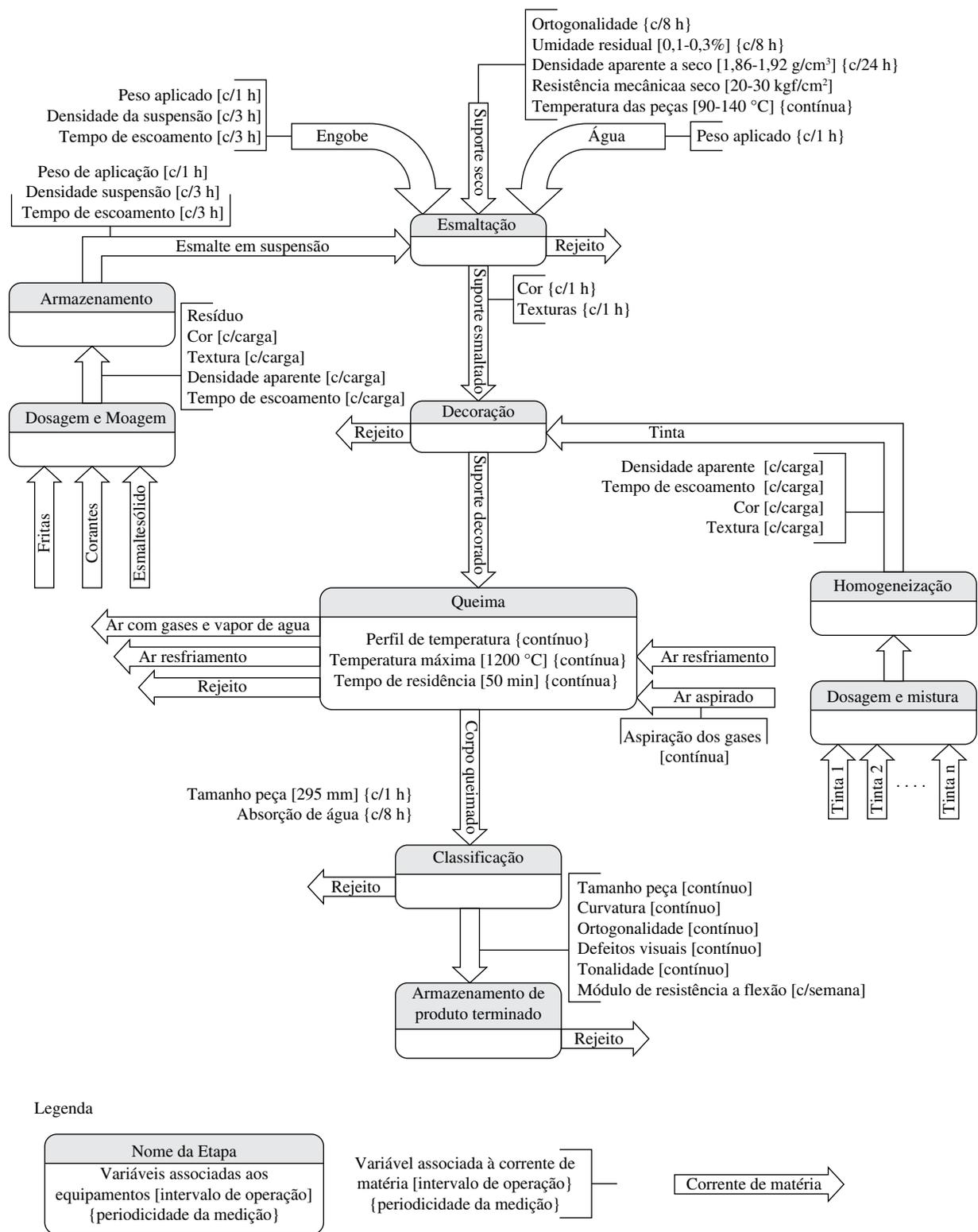


Figura 2. Fluxograma de matéria para o processo de fabricação do porcelanato esmaltado (estudo de caso) Parte 2.

Usa-se ar aquecido por gás natural e circulação forçada para extrair o vapor de água e o pó mais fino.

Os defeitos no produto final como: fora de esquadro, luneta, coração negro, esfolhamento, estampo sujo, variações de tamanho, trincas e quebras por baixa resistência; podem estar associados às variações na homogeneidade, tanto da granulometria como da umidade do pó atomizado⁵. A combinação dessas duas variáveis também determina o ajuste ótimo dos parâmetros de prensagem.

Controla-se a temperatura de entrada do ar, reduzindo o efeito das variações dessa sobre a umidade. O controle é realizado medindo-se a temperatura com um termopar e atuando-se automaticamente sobre a válvula de gás natural com o objetivo de não permitir uma variação maior que 10 °C. Para controlar a umidade, quando esta se desvia do intervalo de referência, realiza-se uma das seguintes ações:

- ajuste da temperatura de entrada do ar (mudando o ponto de referência no controlador de temperatura);

- mudança da pressão da bomba de barbotina (só no caso da umidade e a granulometria terem valores altos);
- troca da pastilha desgastada mais velha (se a densidade e a viscosidade são adequadas); e
- modificação da “depressão” (variação da queda de pressão, aumentando a vazão de ar no exaustor por meio de uma válvula de comporta).

Realiza-se um controle manual da granulometria ajustando-se diferentes variáveis ao mesmo tempo e utilizando-se como dispositivos de medida peneiras manuais ou eletromecânicas. O conjunto de peneiras está montado em um sistema vibratório. Verifica-se o percentual de material retido em cada malha em relação ao total de material.

Praticamente todo o pó atomizado é retirado do atomizador por gravidade e segue através de esteiras transportadoras e elevadores de canecos até os silos. O pó mais fino sai junto com ar e vapor de água, devido à queda de pressão gerada pelo exaustor, e passa por um ciclone, onde o pó fino é retido e segue para o silo⁵.

3.4. Armazenamento nos silos

O transporte para os silos de estocagem é realizado continuamente e o controle de nível dos silos é manual. O nível é medido por corda e a decisão sobre qual silo preencher depende do registro dos níveis realizados no turno anterior.

Aproveitando que se dispõe de oito silos em linha, com capacidade de 40 ton cada um, a atuação se realiza sobre comportas que desviam ou deixam passar o pó na esteira transportadora. Com o objetivo de melhorar a homogeneização da umidade e da granulometria, a permanência nos silos deve ser por no mínimo 24 horas. Além disso, deve-se consumir o material de dois a quatro silos simultaneamente para alimentar as linhas de prensagem.

3.5. Prensagem

A conformação do material é feito por prensagem uniaxial diferenciada de duplo efeito. Utiliza-se uma prensa hidráulica de 2000 ton-f e duas linhas de prensagem com quatro cavidades. São prensadas quatro peças ao mesmo tempo. A prensa tem seu próprio controle automático de pressão. Para prevenir possíveis danos posteriores, é realizada a verificação da pressão a cada hora.

Deve-se garantir a homogeneidade da densidade aparente das peças prensadas não só para uma mesma peça, mas também entre peças situadas em diferentes cavidades⁵. Ainda que a densidade aparente seja um dos parâmetros de controle mais importante no processo, não é medida na saída dessa etapa para todas as peças, por ser o método de imersão de mercúrio um processo lento⁶.

A densidade da peça seca é determinada pelo teor de umidade e pela pressão de compactação⁷. Essa relação e seu efeito sobre a peça depois da queima são mostrados na Figura 3.

Realizam-se medições da espessura do suporte utilizando um paquímetro e se faz uma inspeção visual de defeitos superficiais, somente para verificação.

A velocidade de prensagem é definida manualmente dependendo do consumo de suportes no forno. O controle automático dessa velo-

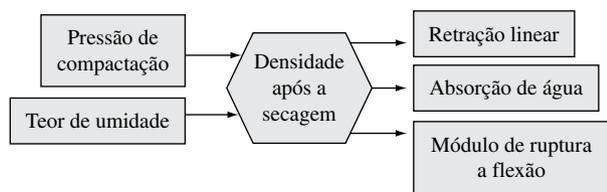


Figura 3. Inter-relação entre as variáveis de processo, a densidade da peça seca e as características da peça queimada⁷.

cidade pode manter uma alta produtividade nessa etapa e assegurar a continuidade do processamento ao longo das seguintes. No entanto, esse controle compromete a interação das variáveis de pelo menos três etapas, as quais podem em qualquer momento ter problemas de produção. Essas considerações são feitas manualmente para variar a velocidade de prensagem.

3.6. Secagem

A secagem das peças cerâmicas tem por objetivo reduzir a quantidade de água do material de 5,4 a 6% para valores inferiores a 0,5%. Podem ser obtidos valores de até 0,1%⁵. A operação de secagem é realizada com um secador vertical mediante a circulação de ar quente, o qual gera os gradientes necessários tanto para a transferência de massa como para transporte de calor⁸. A troca de calor é realizada aproveitando a combustão do gás natural em dois queimadores e o ar quente procedente do forno.

O controle automático no secador consiste em medir temperaturas, por meio de termopares, em três seções: entrada (zona do primeiro queimador) saída (zona do segundo queimador) e estabilização (na saída efetiva das peças). Havendo variações nas temperaturas de entrada e saída, modifica-se a relação ar/combustível, permitindo variações máximas de 5 °C. Na zona de estabilização, varia-se a quantidade de ar interno, dependendo da temperatura medida. Caso a temperatura esteja acima do valor de referência, o ar quente do secador é misturado com ar à temperatura ambiente. Com esse controle, obtém-se uma variação máxima de ±10 °C. Essa variação é suficiente para que as peças saiam do secador à temperatura exigida pelo processo de esmaltação. Além disso, verifica-se a temperatura das peças utilizando-se um sensor infravermelho. Só se atua em caso de falha, parando a linha de transporte para a zona de esmaltação até que a temperatura de saída do secador se estabilize ou se modifique a referência das temperaturas do secador.

Para verificação ou controle manual, realizam-se as seguintes medições:

Ortogonalidade, medida com um paquímetro; permite realizar correções em caso de defeito antes da etapa de queima.

- umidade residual, quantificada com uma balança digital e uma estufa ou um forno (elétrico ou de microondas)⁶; devido ao seu efeito sobre o comportamento mecânico dos suportes crus; foi desenvolvido, especificamente para a medida da umidade residual, um dispositivo contínuo, em tempo real e por radiofrequência⁹;
- densidade aparente, medida pelo método de imersão de mercúrio⁶; a densidade de uma peça, ou a densidade entre as peças de um mesmo prensagem, pode apresentar uma variação de 0,03 g/cm³; e
- módulo de resistência à flexão, medido com um deflectômetro digital, somente quando se apresentam problemas.

Apesar de serem variáveis que influenciam muito na secagem, a umidade inicial, a espessura e a permeabilidade do suporte não são medidas. O tempo de residência é também uma variável importante nessa etapa e depende da velocidade de prensagem definida previamente na operação.

3.7. Esmaltação e decoração

A esmaltação consiste basicamente na aplicação de uma camada de material vítreo no substrato cerâmico. Com a aplicação dos esmaltes se busca impermeabilizar, aumentar a resistência ao desgaste e incrementar a resistência mecânica das peças, além de desenvolver propriedades estéticas⁵. Essas etapas são críticas na determinação da qualidade do produto final.

A preparação, tanto dos esmaltes como das tintas, requer a verificação e medição da densidade aparente, cor, textura e tempo de

escoamento (Figura 2). Adicionalmente para a suspensão de esmalte, mede-se o resíduo.

Na etapa de aplicação sobre o suporte, realizam-se quatro aplicações: água, engobe, esmalte e tinta. Para uma rápida e boa absorção do engobe e do esmalte, necessita-se que a temperatura da peça seja adequada antes da aplicação da água, por isso seu controle é indispensável. Esse controle foi descrito na etapa anterior.

Um indicador da espessura da capa de esmalte e de tinta é o peso do recobrimento. Realiza-se um controle manual do peso de esmalte aplicado, medindo-o com uma balança digital. A aferição do peso é feita na peça crua a temperatura ambiente, sem e com recobrimento. Fazem-se os correspondentes ajustes a cada hora. No caso da aplicação de tinta por rolos de silicone, não é possível fazer medições precisas do peso aplicado de tinta.

Uma variação nos valores de densidade aparente e no tempo de escoamento da suspensão de esmalte e de tinta pode alterar a tonalidade e a cor do produto. Deve-se produzir uma correção se os valores se encontram fora dos limites ao realizar o registro e verificação dessas variáveis. Por exemplo, se a densidade se encontra abaixo de seu valor é adicionada água, para engobe e esmalte, ou o veículo serigráfico, para tintas. Por outro lado, se a densidade está acima de seu valor, adiciona-se suspensão com uma maior densidade⁵.

Uma inspeção visual e manual é efetuada para a separação das peças com defeitos superficiais antes que sejam consumidos energia e materiais em seu processamento nas etapas seguintes.

3.8. Queima

A queima é a fase central do processo cerâmico, onde se provoca uma modificação fundamental nas propriedades das peças cerâmicas, dando lugar a um material duro e resistente. Nessa fase se manifestam todos os efeitos das operações realizadas anteriormente.

Na queima do material utiliza-se um forno horizontal de rolos de 120 m e gás natural como combustível para gerar calor. O forno se divide em faixas ao longo de seu comprimento, cada uma das quais tem um termopar e um servomotor como atuador para modificar automaticamente a relação ar/combustível no queimador correspondente. As medições são centralizadas em um computador, e dependendo do ajuste das temperaturas em cada zona, um sinal proporcional ao erro (diferença entre a temperatura medida e a referência) é enviado a cada um dos atuadores. Segue-se um perfil de temperatura que corresponde ao comportamento da curva de queima. Na Figura 4 são apresentados os fatores importantes para definir tal curva⁵.

O tamanho da peça é função da retração linear e é medido com um paquímetro a cada hora. Dependendo de seu valor, manipula-se a temperatura máxima do ciclo. Além disso, considerando a presença ou não de defeitos, podem-se manipular os motores de acionamento dos rolos, modificando o tempo de residência e conseqüentemente o ciclo de queima.

A absorção de água é medida uma vez em cada turno (8 horas). Caso seu valor se encontre fora dos limites aceitos, verificam-se outras variáveis para decidir modificar a temperatura no forno ou a pressão de prensagem.

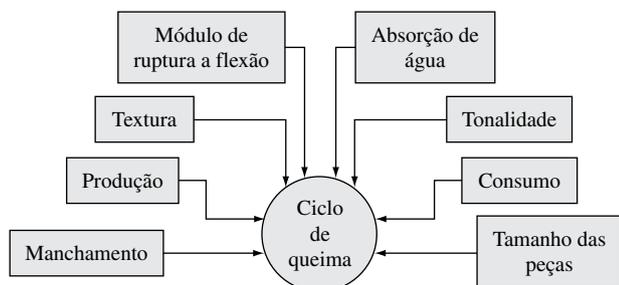


Figura 4. Fatores que afetam a curva de queima.

Se no produto final existem defeitos devido à presença de matéria orgânica (coração negro)^{10,11} e trincas devido à umidade residual, deve-se manipular algum dos seguintes parâmetros:

- vazão de ar do exaustor para modificar a aspiração dos gases na seção de pré-aquecimento do forno;
- tempo de permanência no forno;
- pressão de prensagem; e
- umidade do pó atomizado.

Deve-se trabalhar no limite mínimo de vazão de ar que permita uma menor possibilidade de presença de defeitos sem aumentar muito o gasto de gás natural.

Outras ações sugeridas são as de otimizar o perfil de temperaturas no forno ou fazer que a atmosfera do mesmo seja mais oxidativa¹².

3.9. Classificação

A tolerância dimensional, a curvatura e os defeitos de ortogonalidade são medidos por meio de uma fotocélula na linha de separação e pré-seleção das placas cerâmicas. Se não são atingidas as referências estabelecidas, automaticamente se aciona uma comporta que retira as peças defeituosas.

Os defeitos superficiais e a definição da tonalidade são inspecionados visual e manualmente também de forma contínua. Semanalmente, verifica-se o valor do módulo de resistência a flexão por amostragem. Se estiver fora do intervalo permitido, as outras variáveis serão revisadas para atuar sobre a pressão de prensagem, a temperatura do forno ou na composição da massa.

Quando ocorre um desvio das especificações de curvatura, realizam-se ajustes na temperatura do forno. Tem-se comprovado que as mudanças na temperatura de referência nos módulos de máxima temperatura conduzem a modificações na curvatura¹².

4. Discussão

A partir da análise realizada sobre o processo de fabricação de grés porcelanato para este estudo de caso pode-se afirmar que:

- A supervisão e o controle automático são realizados apenas localmente em cada etapa do processo. As malhas de controle automático encontrados em cada uma das etapas são resumidas na Tabela 2; e
- Na prática, há uma só malha de controle automático por etapa. Naqueles casos onde se tem mais de uma malha de regulação, todas são referidas ao mesmo tipo de variável: temperatura. Nenhuma dessas malhas envolve variáveis de mais de uma etapa. Em sua maioria, essas etapas se encontram integradas aos equipamentos principais já fabricados, o que implica em uma dificuldade de interagir com as variáveis associadas às malhas.

Propõem-se algumas ações de controle automáticas.

4.1. Ações de controle pontuais e locais para serem realizadas em cada etapa

4.1.1. Moagem

- controlar o resíduo, manipulando-se a velocidade de rotação; e
- controlar a viscosidade e densidade para moinhos descontínuos. Para moinhos contínuos, é possível realizar um controle

Tabela 2. Malhas de controle automático nos equipamentos associados às etapas

Equipamento	Malha de controle automático
Moinho	Velocidade de rotação
Atomizador	Temperatura de entrada do ar
Prensa	Pressão de prensagem
Secador	Temperatura de entrada, saída e estabilização
Forno	Temperatura em diferentes pontos ao longo do forno

automático dessas duas variáveis¹³, com maior facilidade do que em moinhos por bateladas¹⁴.

4.1.2. Armazenamento de barbotina

- controlar o resíduo, a densidade aparente e a viscosidade, misturando diferentes lotes já caracterizados; e
- automatizar o controle para manter o balanço de matéria nos tanques.

4.1.3. Atomização

- controlar a umidade; e
- controlar a granulometria; pode-se estudar a implementação de um controle automático, a partir de um sistema de medição baseado em um dispositivo óptico com tratamento de imagens¹⁵.

O controle da umidade e da granulometria exige que se faça uma análise multivariável, pois a inter-relação entre as variáveis não é unívoca, ou seja, precisa-se verificar mais de uma variável para decidir sobre qual variável atuar e de que forma.

4.1.4. Armazenamento nos silos

Ao controlar a granulometria e a umidade na etapa de atomização, pode-se reduzir o tempo de residência de 24 horas nos silos.

4.1.5. Prensagem

Controlar a densidade aparente pela manipulação da pressão de prensagem. Já foram desenvolvidos estudos para medi-la por radiação¹⁶, por ultra-som¹⁷ ou estimá-la por meio da medição da umidade¹⁴.

4.1.6. Secagem

Como só é realizado controle automático de temperatura nas diferentes zonas do secador, propõe-se envolver as medições da densidade aparente e umidade residual no controle automático realizado. Pode-se aproveitar um estudo de medição de densidade aparente não invasiva por ultra-som¹⁸ para placas cerâmicas prensadas e secas.

4.1.7. Esmaltação e decoração

Implementar um sistema óptico com processamento de imagens para o controle da tonalidade, cor e defeitos. Soluções desse tipo ainda não são implementadas com êxito por apresentarem dificuldades na detecção dos defeitos devido a presença de pó e água no ambiente da fábrica¹⁴.

4.1.8. Queima e classificação

- variar o perfil de temperatura a partir de variações na curvatura da peça;
- controlar o tamanho das peças pela variação da temperatura máxima e do tempo de permanência no forno, manipulando-se os motores de acionamento dos rolos; e
- controlar os defeitos pela presença de matéria orgânica e de trincas manipulando-se a vazão do ar para o extrator (aspiração na zona de pré-aquecimento), o tempo de permanência (motores de acionamento dos rolos), o perfil de temperatura, ou a atmosfera do forno.

Para diversos controles, deve-se manipular a curva de queima da peça. Isso gera interferências entre as malhas de controle e também condiciona o controle à realização de uma análise multivariável.

4.2. Ações de controle que envolvem etapas anteriores àquela onde foi realizada a medição.

4.2.1. Armazenamento de barbotina

Controlar o resíduo, a densidade aparente e a viscosidade atuando sobre as condições da moagem ou dosagem (caso não se realize o controle automático nessas etapas)

4.2.2. Prensagem

Controlar a velocidade de prensagem considerando-se o tempo de residência na prensa e a interação com variáveis de outras etapas, como o tempo de residência no secador e o consumo de peças no forno.

4.2.3. Queima e classificação

- controlar defeitos devido à presença de matéria orgânica e de trincas por meio da modificação da pressão da prensagem.
- controlar a absorção de água, considerando a medição de outras variáveis para modificar a temperatura no forno ou a pressão de prensagem

Quando se atua sobre uma variável da mesma etapa podem-se apresentar ações de controle mais drásticas que quando se atua sobre etapas anteriores. Por outro lado, quanto mais longe esteja a ação da variável medida, mais tempo o produto permanecerá fora de especificações. Nesses casos, é imprescindível uma análise multivariável^{19,20} e quase sempre deve-se empregar estratégias de controle avançado (não linear, preditivo, adaptativo, robusto ou uma estratégia baseada em técnicas de inteligência artificial utilizando redes neurais, sistemas especialistas ou algoritmos genéticos)²¹⁻²⁵.

5. Considerações Finais

O nível de automatização e controle encontrado na planta de fabricação de porcelanato analisada não permite a correção integrada do processo para eliminar os desvios existentes na linha de produção. Isso torna a planta menos eficiente do que poderia ser do ponto de vista operacional e compromete a qualidade do produto final, pois pequenos desvios, que influenciam sua qualidade, não podem ser corrigidos ao longo do processo. Conseqüentemente, existem perdas elevadas na produção e um custo operacional que poderia ser minimizado por meio da integração dos processos produtivos e com a elevação do nível de automação.

Mesmo que se encontrem soluções para alguns problemas de medição em linha, ainda há dificuldades intrínsecas para se medir diversas outras variáveis. Para tornar o controle possível, e importante a utilização de ferramentas como as redes neurais, as quais, por meio de um processo de identificação, podem ser usadas como sensores virtuais^{23,24}.

Pelas características do processo e a partir das observações de como se realizam as ações de controle (automático e manual) na planta, a integração do processo não pode ser realizada mediante estratégias de controle em série. Pode-se desenvolver uma ferramenta (sistema supervisor) que tomando as informações (variações nas variáveis escolhidas por sua importância no processo) possa gerar as melhores alternativas das decisões sobre quais variáveis modificar e em que extensão. Para isso, o sistema supervisor pode utilizar: funções a ser otimizadas, conhecimento prévio (regras estruturadas em uma base de conhecimento), limitações e restrições operacionais. Pela análise crítica realizada nesse trabalho, observa-se que existe um grande potencial para a utilização de ferramentas como as redes neurais com conhecimento prévio, com o propósito de fazer o controle e supervisão do processo de forma integrada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa cuja linha de produção serviu como estudo de caso para a análise do processo. À Universidad Nacional de Colombia pela oportunidade concedida a Dolly Santos de realizar seus estudos de doutorado na Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

Referências

1. ANFACER. **Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimento**. Disponível em: <http://www.anfacer.org.br>. Acesso em: abril/2008.
2. Sassi, S. La industria cerámica mundial en la era de la globalización. In: QUALICER 2006, IX., CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y EL PAVIMENTO CERÁMICO, Espanha, **Anais...** v. 1, p. Con 83-99, 2006.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15463: Placas cerâmicas de revestimento – porcelanato**. ABNT, 2007.
4. Medeiros, M. F.; Lima, M. A. B.; Da Silva, R. J. Filitos cerâmicos de Martinópolis (CE) - Potencialidade e aplicações tecnológicas. **Revista de Geologia**, v. 16, n. 1, p. 49-62, 2003.
5. Silva, J. E. **Controle de processo**. Curso de Tecnologia Cerâmica. SENAI, Tijuacas, Santa Catarina, 2001.
6. Amorós, J.L.; Sánchez, E.; García-Tem, J.; Sanz, V.; Monzó, M. **Manual para el control de la calidad de materias primas arcillosas**. Castellón, Espanha: Instituto de Tecnología Cerámica – AICE, 1998.
7. De Paula, G. R.; Quinteiro, E.; Boschi, A. O. Efeito do teor de umidade e da pressão de prensagem sobre as características de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 2, n. 3/4, p. 28-31, 1997.
8. Treybal, R.E. **Mass transfer operations**. 3. ed., New York: McGraw-Hill, 1980.
9. Jarque, J.C.; Cantavella, V.; Segarra, C.; Mallol, G.; Cabrera, B.; Gascón, F. Medida en continuo y en tiempo real de la humedad de baldosas cerámicas a su salida del secador mediante radiofrecuencia. In: QUALICER 2006, IX., CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y EL PAVIMENTO CERÁMICO, Espanha, **Anais...** v. 2, p. PBC 291, 2006.
10. Amorós, J.L.; Beltran, V.; Blasco, A.; Enrique, J.E.; Escardino, A.; Negre, F. **Defectos de fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos**. Castellón, Espanha: Instituto de Tecnología Cerámica – AICE, 1991.
11. Lucas, F. Processos produtivos em revestimentos cerâmicos: variáveis de processo e possíveis causas de defeitos. **Cerâmica Industrial**, v. 9, n. 5/6, p. 7-20, 2004.
12. Jarque, J.C.; Cantavella, V.; Daroca, M.J.; Gómez, P.; Arrébola, C.; Carceller, A. Influencia de las condiciones de operación del horno de rodillos sobre la curvatura de las piezas. In: QUALICER 2002, VII., CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y EL PAVIMENTO CERÁMICO, Espanha, **Anais...** v. 3, p. Pos 149-152, 2002.
13. Sánchez, E.; Cantavella, V.; Llorens, D.; Moltó, C.; Foucard, L.; Miralles, L.; Cuesta, E. Control automático de la densidad y la viscosidad en molinos continuos. In: QUALICER 2006, IX., CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y EL PAVIMENTO CERÁMICO, Espanha, **Anais...** v. 2, p. PBC 123-136, 2006.
14. Mallol, G. Control y automatización en la industria cerámica. Evolución y Perspectivas. In: QUALICER 2006, IX., CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y EL PAVIMENTO CERÁMICO, Espanha, **Anais...** v. 1, p. Con 47-72, 2006.
15. Di Giuseppe, A.; Revel, G.M. Medida automatizada de la granulometría del polvo atomizado para el control del proceso en línea. In: QUALICER 2006, IX., CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y EL PAVIMENTO CERÁMICO, Espanha, **Anais...** v. 3, p. PBC 363-378, 2006.
16. Amorós, J.L.; Feliú, C.; Llorens, D.; Cantavella, V.; Mezquita, A. Medida no destructiva de la densidad aparente de piezas en crudo mediante absorción de rayos X. In: QUALICER 2006, IX., CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y EL PAVIMENTO CERÁMICO, Espanha, **Anais...** v. 2, p. PBC 69-82, 2006.
17. Cantavella, V.; Llorens, D.; Mezquita, A.; Moltó, C.; Bhardwaj, M.C.; Vilanova, P.; Ferrando, J.; 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. In: QUALICER 2006, IX., CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y EL PAVIMENTO CERÁMICO, Espanha, **Anais...** v. 2, p. PBC 165-178, 2006.
18. Marchetti, B.; Revel G.M. Medida en línea de la densidad en crudo de baldosas cerámicas. In: QUALICER 2002, VII., CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y EL PAVIMENTO CERÁMICO, Espanha, **Anais...** v. 1, p. PG1-11, 2002.
19. De Noni, Jr.A.; Modesto, C.; Novaes De Oliveira, A.P.; Hotza, D. Dimensional modeling and control of ceramic tile. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 85, n. 11, p. 9201-9205, 2006.
20. Deshpande, P.B., **Multivariable process control**. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1989.
21. Henson, M.A.; Seborg, D.E. **Nonlinear process control**. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
22. Slotine, J.E. **Applied nonlinear control**. New Jersey: Prentice hall, 1991.
23. Kosko, B. **Neural networks and fuzzy systems**. New York: Prentice Hall, 1992.
24. Haykin, S. **Neural networks**. New York: Prentice Hall, 1999.
25. Ogunaike, B.A.; Ray, W.H. **Process dynamics, modeling, and control**. New York: Oxford University Press, 1994.