

Controle e Automação na Indústria Cerâmica: Evolução e Perspectivas

José Gustavo Mallo Gasch

*Instituto de Tecnología Cerámica – ITC,
Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas,
Universitat Jaume I, Castellón, España
e-mail: gustavo@itc.uji.es

Resumo: Nos últimos 30 anos tem ocorrido uma autêntica transformação do processo produtivo de revestimentos cerâmicos, incorporando tecnologia, em alguns casos, revolucionária. Tal como se aponta na introdução deste trabalho, a tecnologia incorporada se encontra em estado de automação incipiente, com grandes possibilidades de desenvolvimento que, caso seja alcançado, permitirão incrementar a flexibilidade e a produtividade das instalações de fabricação, bem como a qualidade e as prestações do produto final, aumentando a competitividade das empresas. Nesta conferência são analisadas as possibilidades atuais de automação das etapas do processo de fabricação de revestimentos cerâmicos, descrevendo os diferentes elementos de medidas e o estado da arte em cada caso. São analisadas as vantagens e inconvenientes dos sistemas de controle propostos e são apontados os aspectos que podem ajudar a definir o perfil da “planta produtiva do futuro”. Na última parte do trabalho, são apresentados os resultados de um sistema de controle automático da densidade aparente dos suportes de grês porcelanato, desenvolvido recentemente.

Palavras-chave: *controle de processos, automação, instrumentação.*

1. Introdução

Uma prova da maturidade nos processos tecnológicos é a preocupação crescente pelos temas relacionados com o controle e a instrumentação. Alguns estudos indicam que o setor de revestimentos cerâmicos tem alcançado elevados graus de automação, quando comparado com os setores de sanitários ou louças. A incorporação do controle na indústria cerâmica progrediu de acordo com uma série de fases, que muitas vezes evoluíram paralelamente, e que não se encontram com o mesmo grau de desenvolvimento em todas as etapas produtivas.

Na indústria química tradicional, o controle dos processos está mais desenvolvido que na indústria cerâmica. Isto se deve, em parte, ao fato de que o setor cerâmico trabalha com sólidos, e o nível de conhecimento que existe sobre as operações unitárias que envolvem sólidos é muito inferior ao que existe quando se trabalha com fluidos. O segundo aspecto que dificulta o controle automático deriva da natureza estrutural do produto cerâmico, o que exige muitas e complexas características finais necessárias, diferentemente do que ocorre com a maior parte dos processos químicos onde o mais importante é a composição química; no caso dos revestimentos cerâmicos o produto final deve cumprir um conjunto de requisitos que vão desde os puramente técnicos (baixa porosidade, resistência ao desgaste, etc.), que dificultam, em muitas ocasiões, a implantação dos sistemas de controle. Finalmente, outro aspecto que dificulta a automação deste tipo de indústria é a ampla variedade de produtos (modelos) que atualmente uma mesma empresa deve fabricar.

O fato de que o processo de produção de materiais cerâmicos requer a realização consecutiva de diferentes operações básicas (moagem, secagem por atomização, prensagem, etc.) sobre os materiais até alcançar o produto final (Figura 1), fez com que a introdução do controle automático tenha sido paulatina, sendo abordada por etapas de processo; este caráter modular do processo faz com que as características de um material resultante de uma série de operações que constituem em si uma etapa, ainda que não incidam de maneira

determinante sobre o produto final, sejam de extraordinária importância já que determinam seu comportamento na etapa seguinte. Este material resultante de uma determinada etapa, que às vezes se denomina produto, é na realidade uma matéria-prima semi-elaborada que será utilizada como tal em uma fase posterior do processo (por exemplo: o pó atomizado) ou um produto intermediário, que sofrerá transformações posteriores (por exemplo: um suporte recém prensado).

Com o objetivo de quantificar a implantação do controle na indústria cerâmica podem ser definidos os “níveis de automação” (Figura 2). No nível inferior se encontra o controle puramente manual e no superior um controle automático global, que envolveria todas as etapas produtivas assim como suas interações.

1.1. Nível 1: controle manual

O primeiro nível de controle poderia ser denominado manual. Um operário faz a medida de alguma (ou algumas) variável(is) e, em função das especificações do produto (tolerâncias), modifica de forma manual uma série de variáveis. Exemplos destas ações se encontram na maioria das empresas que fabricam pó atomizado onde, o controle do conteúdo de umidade do pó é realizado medindo-se de forma manual, com uma balança de infravermelhos, e atuando sobre a temperatura especificada de um queimador ou sobre alguma outra variável.

1.2. Nível 2: controle automático das variáveis de máquina

A complexidade de muitas máquinas atuais (secadores, prensas, fornos, etc.) faz com que em todas elas exista certo controle. Este controle envolve as variáveis de máquina, por oposição às variáveis de produto, que são as características do material que está sendo produzido. Este nível de controle é encontrado em muitos equipamentos; como por exemplo, as prensas, onde a variável da

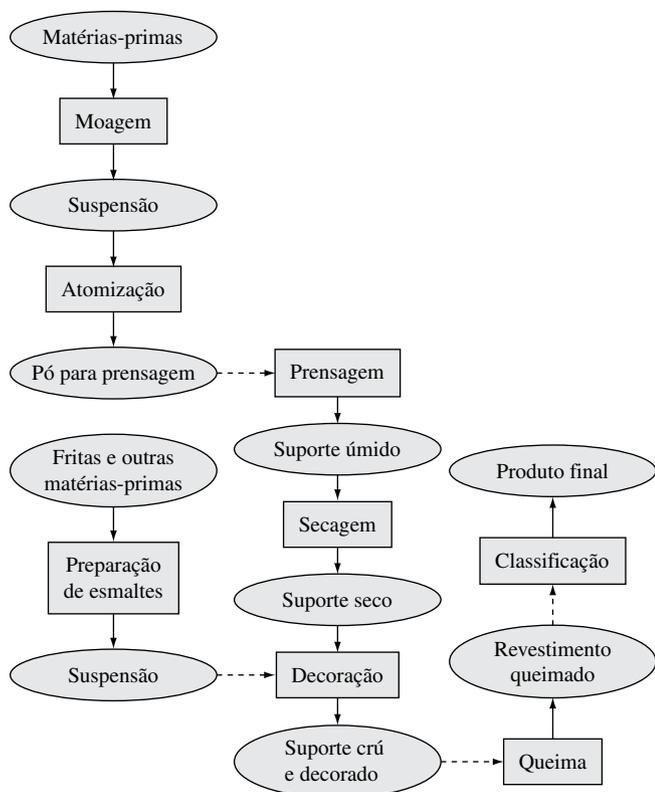


Figura 1. Processo de fabricação de revestimentos cerâmicos prensados e esmaltados, por monoqueima via úmida.

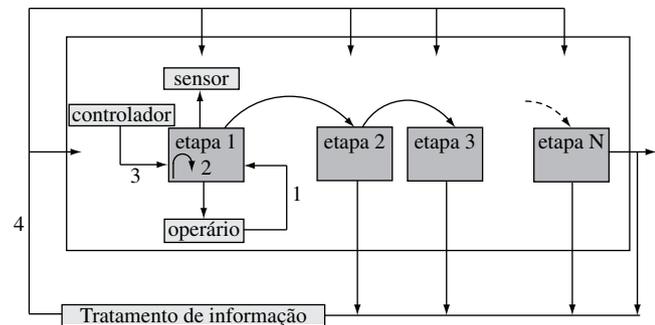


Figura 2. Níveis de automação.

máquina que se controla é a pressão de prensagem, ao passo que as variáveis de produto que interessa regular são a densidade aparente e a espessura da peça.

Os níveis de controle não estão associados às máquinas, como se poderia pensar a princípio, mas a conjuntos de variáveis de entrada e de saída. Assim, no atomizador, o par de variáveis temperatura dos gases / umidade do pó atomizado é controlado manualmente (nível 1) na maioria das empresas, ao passo que o par de variáveis temperatura dos gases / posição da válvula de gás do queimador é um exemplo claro de controle das variáveis da máquina (nível 2).

É característico deste nível o emprego de sistemas de controle relativamente simples, como são os controladores PID ou os programáveis PLC. O desenvolvimento vertiginoso que a informática tem apresentado nas últimas duas décadas fez com que muitas máquinas de certa complexidade disponham de computadores incorporados. É um pouco desalentador que, apesar da potência que estes dispositivos

possuem, na maioria dos casos são utilizados como meros registradores de dados, quando poderiam ter um papel muito mais ativo.

1.3. Nível 3: controle automático das variáveis de produto

No terceiro nível de controle se encontra a regulagem das variáveis de produto. Este terceiro nível implica, ao menos, duas áreas de conhecimento diferentes: a dos materiais e processos; e a instrumentação.

O conhecimento dos materiais e dos processos envolvidos na fabricação de fritas e revestimentos cerâmicos se encontra suficientemente avançado para implantar um sistema de controle na maioria dos casos. Isso se deve, em parte, ao fato que para implantar um controle é suficiente dispor de um modelo de entradas e saídas, que relacione as modificações produzidas em uma variável de saída como consequência de uma variável de entrada. Técnicas gerais como o planejamento de experimentos ou a identificação empírica de parâmetros podem permitir que seja obtido o conhecimento necessário para a realização de um controle automático.

As maiores dificuldades do controle automático estão, em quase todos os casos, em dispor do sensor adequado para realizar a medida ou em definir as variáveis sobre as quais atuar (variáveis manipuladas). A seleção de um novo sensor é um processo complexo, já que deve funcionar com suficiente precisão e robustez em um campo para o qual, com toda probabilidade, não foi originalmente projetado. Casos típicos são os medidores de umidade por infravermelho, projetados originalmente para a medição de umidade nas folhas de tabaco; os medidores de radiofrequência, empregados na indústria de madeira e do gesso; os sensores de densidade, aplicados na indústria de mineração.

Nos casos mais simples, este controle pode ser realizado com os controladores PID ou com autômatos programáveis. Todavia, na medida em que as equações que regem os processos são mais complicadas, é necessário recorrer aos computadores. Em outros setores industriais os computadores são empregados para o controle antecipativo, preditivo, sistemas inteligentes ou para a simulação dinâmica². Na atualidade, o uso de modelos deste tipo só está aplicado nos sistemas de classificação automático dos revestimentos cerâmicos. Ainda que existam trabalhos desenvolvidos para a aplicação destes sistemas avançados no controle de processos (aplicação de modelos DMC (controle de matriz dinâmica)³ à moagem, simulação dinâmica aplicada à secagem de revestimentos cerâmicos⁴, ou implementação de diagramas de compactação para o controle da densidade das peças na saída da prensa⁵, estes desenvolvimentos no se encontram suficientemente difundidos na atualidade.

1.4. Nível 4: controle global

As diferentes operações unitárias que constituem o processo cerâmico (moagem, secagem por atomização, prensagem, etc.) não são independentes. A saída de uma representa a entrada da seguinte (Figura 1). Assim, o controle do conteúdo de umidade do pó para prensagem condiciona a densidade aparente dos suportes prensados, a qual, por sua vez, influi na contração linear das peças durante a queima.

A incorreta execução de qualquer uma das etapas do processo não só afeta o desenvolvimento das etapas seguintes, mas também as características dos produtos intermediários (porosidade, permeabilidade, etc.) assim como as dos produtos acabados. O processo de fabricação de revestimentos cerâmicos deve ser considerado como um conjunto de etapas interconectadas que progressivamente transformam as matérias-primas no produto acabado⁶. O controle automático não pode nem deve se limitar às etapas individuais. O controle global do processo é uma filosofia cuja aplicação permitiria dispor de informação (e não só de dados) de processo, otimizar

globalmente a fabricação de revestimentos cerâmicos e detectar os pontos fracos.

Na indústria cerâmica, este quarto nível está começando a ser abordado, ainda que de forma incipiente e involuntária, sobretudo, a aquisição da informação. Cada vez são mais numerosas as empresas que dispõem de um sistema centralizado em que os operários de cada etapa introduzem os dados do processo, se tem indicação do número de peças processadas e se faz um acompanhamento das peças ao longo do processo. Infelizmente há aspectos-chaves que não estão abordados: é virtualmente impossível intercomunicar as máquinas, pois os fabricantes de equipamentos utilizam protocolos de comunicação fechados. O uso de protocolos fechados é uma forma de garantir a exclusividade: nada, salvo o fabricante poderá estabelecer comunicações com a máquina ou poderá integrá-la em uma rede maior.

Um controle global deveria contemplar também uma atuação global: quer dizer, a aquisição de variáveis de processo e sua manipulação e não unicamente a aquisição da informação relacionada com a produtividade das máquinas. A tecnologia existente hoje em dia permite dar esse passo.

2. Controle e Automação das Diferentes Etapas do Processo

2.1. Moagem

O objetivo da moagem é a obtenção de uma suspensão homogênea de sólidos em água com uma distribuição de tamanhos de partículas (DTP) adequada para a realização das etapas posteriores (prensagem, secagem, etc.) compatível com uma quantidade de sólidos elevada e uma viscosidade adequada para que o desenvolvimento da operação de secagem por atomização seja otimizada⁷.

A granulometria do sólido que integra a suspensão condiciona o comportamento da peça durante seu processamento (compacidade, permeabilidade, etc.) e determina alguns dos parâmetros da peça acabada (tamanho final, porosidade, etc.). A medida de distribuição de tamanhos de partículas é complexa e custosa e, em função disso, em nível industrial, se aproveita a estreita relação existente, para um determinado material e um tipo de moinho, entre a DTP e a quantidade de partículas grossas do sólido para diferentes tempos de moagem. De fato, a moagem via úmida reduz majoritariamente o tamanho de partículas grossas, estreitando a DTP, de forma que a medida do teor de resíduo (como se conhece coloquialmente o retido sobre uma peneira) permite, mediante um ensaio simples, controlar a operação de moagem.

A densidade da suspensão determina em grande medida o rendimento energético da etapa de atomização e, portanto, deve ter o valor mais elevado possível. Portanto, para uma dada composição, ao aumentar a densidade, o mesmo também ocorre com a viscosidade;

viscosidades altas dificultam a descarga do moinho, podem conduzir ao surgimento de anomalias no mesmo (formação de crostas e aglomerados), diminui a velocidade de peneiramento e influi negativamente na atomização. Por tudo isso, na etapa de moagem objetiva-se a obtenção da densidade mais elevada possível, mantendo constante uma viscosidade que permita o processamento da mesma.

Na moagem, é preciso distinguir aquela que se realiza em moinhos contínuos daquelas que ocorrem em moinhos descontínuos tipo Alsing. A automação é muito mais fácil nos primeiros que nos segundos; portanto neste artigo a discussão será centrada nos moinhos contínuos.

As variáveis de máquina (vazão de sólidos, água e defloculante) são medidas automaticamente. Segundo a diferenciação em níveis apresentada na introdução, pode-se considerar que a moagem contínua se encontra no nível 2. Nos últimos 5 anos houve um esforço importante para implementar o controle automático da densidade e da viscosidade da suspensão, deixando de lado o controle do resíduo^{8,9}. A idéia do controle automático nos moinhos contínuos consiste em medir continuamente a densidade e a viscosidade, que atualmente são medidas de forma manual, e atuar sobre as vazões de água e defloculante (Figura 3).

A principal dificuldade do controle automático desta operação é a seleção de elementos de medida confiáveis da densidade e da viscosidade, dadas as exigentes condições industriais de operação. Na atualidade, a medida da densidade industrial de suspensões pode ser considerada como um problema resolvido com o emprego dos densímetros de efeito Coriolis (Figura 4).

A tendência de futuro do controle nesta etapa passaria pelo projeto de um sistema de controle avançado capaz de medir a densidade, a viscosidade e inclusive o resíduo. As dificuldades são múltiplas: interação entre os controles de densidade e viscosidade, utilização de um sensor de viscosidade, etc. A incorporação de resíduo, ainda que tecnicamente possível, gera dificuldades cuja solução não se prevê a curto a prazo. O sistema de controle, necessariamente, deveria ser suficientemente inteligente para gerir a interação entre todas as variáveis, o que não é possível utilizando exclusivamente controladores PID.

2.2. Secagem por atomização

A secagem por atomização da suspensão preparada por moagem é o procedimento de granulação mais estendido no setor de revestimentos cerâmicos na Espanha e Itália para a obtenção do pó para prensagem. Duas são as variáveis mais importantes dos pós para prensagem: seu conteúdo de umidade e sua granulometria.

A umidade determina, junto com a pressão máxima de compactação, a densidade aparente do suporte que, como se verá posteriormente, é uma das variáveis mais importantes de todo o processo pro-

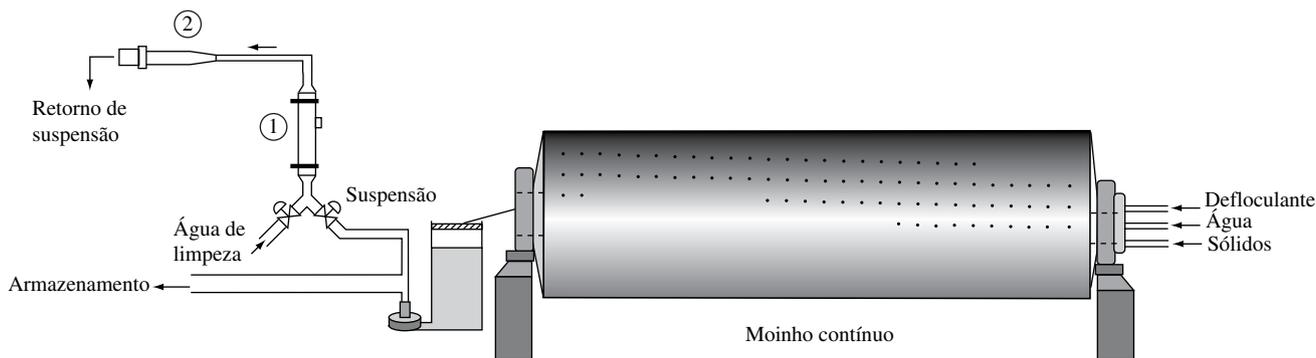


Figura 3. Esquema da disposição dos elementos de medida em um moinho contínuo industrial. 1) Densímetro / medidor de vazão; 2) Viscosímetro.

duto. A relação quantitativa entre densidade, pressão de prensagem e umidade é o conhecido diagrama de compactação¹⁰.

A distribuição de tamanhos dos grânulos (DTG) determina a fluidez do pó, a qual incide em seu comportamento, fundamentalmente durante o preenchimento das cavidades da prensa^{11,12}. Uma fluidez adequada do pó conduz ao preenchimento homogêneo das cavidades da prensa e a uma distribuição uniforme da densidade aparente do suporte compactado; se a densidade aparente é uniforme, o comportamento do suporte durante seu processamento também será e, o que é mais importante, a geometria do produto final será adequada.

Os trabalhos desenvolvidos pelo ITC^{13,14} permitiram um avanço importante no controle do par de variáveis temperatura especificada dos gases/umidade do pó atomizado. Na atualidade são muitas as empresas que dispõem de medidores de infravermelhos, junto com um coletor de amostra de pó atomizado; ainda que seja menor o número de empresas que utiliza este sinal para completar o controle, e não somente medir, mas também controlar a umidade (Figura 5).

A distribuição granulométrica poderia ser medida automaticamente; no entanto, existem dois fatores que dificultam o controle desta variável: o elevado custo dos sensores e o fato de que com o design atual dos atomizadores e, em particular das boquilhas, não é possível modificar facilmente a distribuição granulométrica.



Figura 4. Densímetro de efeito Coriolis

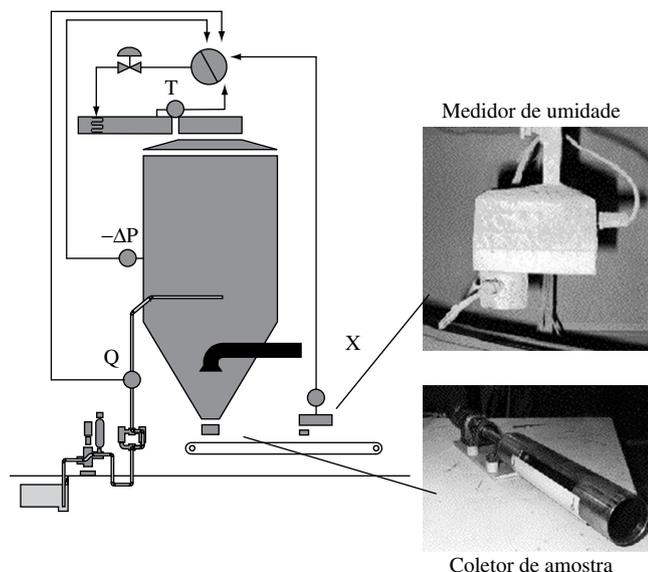


Figura 5. Controle automático da umidade do pó granulado na saída do atomizador.

2.3. Prensagem

A variável de processo mais importante relacionada com as características do suporte prensado é sua densidade aparente, tanto seu valor médio em uma mesma peça e entre peças, como sua distribuição dentro de uma mesma peça.

A densidade aparente influi no comportamento da peça durante as etapas posteriores à prensagem e condiciona algumas das mais importantes características do produto final. A densidade aparente é a variável macroscópica que reflete a estrutura porosa do suporte, pois determina, para uma mesma composição, sua permeabilidade aos gases, sua resistência mecânica, o processo de sinterização, seu módulo de elasticidade, etc. Um valor inadequado de densidade aparente pode conduzir ao aparecimento de trincas durante a secagem, quebras na linha de esmaltação, coração negro, falta de estabilidade dimensional (calibres e/ou fora de esquadro) ou de planaridade no produto final ou uma porosidade final inadequada^{10,11,12,15}.

A homogeneidade na distribuição da densidade aparente melhorou muito nos últimos anos com a utilização dos punções hidráulicos; ainda que a falta de uniformidade não tenha desaparecido por completo, a principal preocupação na atualidade está centrada na diferença de densidade aparente entre peças.

Na atualidade a medida da densidade aparente é realizada de forma manual ou semi-automática, mediante o procedimento de imersão em mercúrio. Foram realizados trabalhos^{16,17} para tentar substituir este ensaio, dado seu caráter descontínuo, manual, destrutivo e nocivo, sem que até o momento tenha sido encontrada uma solução suficientemente satisfatória para seu uso como controle industrial. Neste momento, está se avaliando o emprego de ultra-som para esta aplicação, com resultados muito promissores. Ainda assim, o Instituto de Tecnologia Cerâmica desenvolveu e patenteou um equipamento de medida da densidade aparente mediante absorção de raios X (Figura 6). Nas provas realizadas em escala de laboratório obteve-se precisão suficiente para a utilização do mesmo como sistema de controle¹⁸.

Tentou-se realizar a medição contínua da densidade aparente utilizando sensores de ultra-som sem que se tenha alcançado, nos experimentos realizados, a precisão requerida para permitir um controle automático. A instalação de sensores extensiométricos no punção da prensa para medir a distribuição da pressão no suporte durante sua compactação juntamente com sensores infravermelhos para determinar a umidade do pó para prensagem, foi outra tentativa de obter uma medição contínua da distribuição da densidade aparente²⁰; contudo,

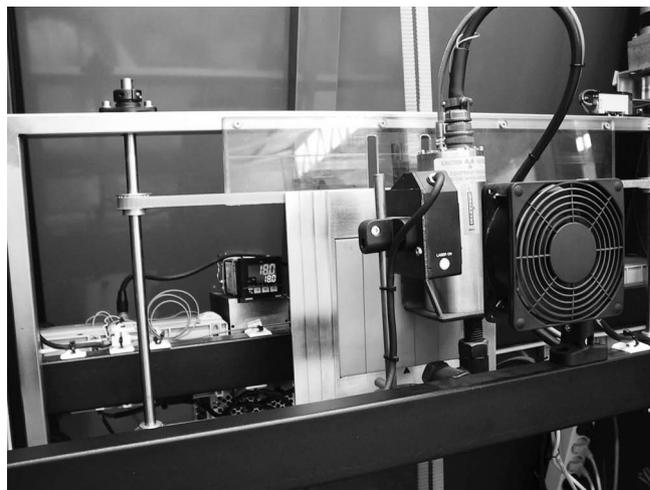


Figura 6. Medição da densidade aparente dos suportes por inspeção radiológica.

a complexidade mecânica do sistema fez com o que o mesmo não encontrasse aplicação industrial como sistema de controle.

Uma forma alternativa de abordar o problema consiste em utilizar uma estratégia de controle antecipativo. O controle antecipativo se baseia na medição da variável que causa a perturbação, e não a variável a controlar, como ocorre no controle por retro alimentação. Sabe-se que a principal variável de perturbação é o conteúdo de umidade do pó para prensagem, de forma que através de sua medição deveria ser possível controlar a densidade aparente. A umidade do suporte pode ser medida com um sensor de infravermelhos situado na saída das prensas e modificar a pressão de prensagem de acordo com as variações de umidade para manter a densidade aparente constante. Com este sistema, é possível estimar continuamente a densidade aparente média dos suportes e mantê-la dentro das margens de variação estabelecidas, reduzindo significativamente a percentagem de calibres, como se comentará posteriormente.

2.4. Secagem

A secagem dos suportes recém prensados permite reduzir o conteúdo de umidade dos mesmos e conseguir que seja alcançada uma temperatura adequada para que a etapa de decoração possa ser realizada corretamente.

As variáveis de processo a controlar relacionadas com os suportes através da secagem são sua temperatura e seu conteúdo de umidade. Uma umidade residual elevada dos suportes ($>0,1\%$) reduz sua resistência mecânica e dificulta a operação de decoração. A temperatura afeta a etapa de esmaltação: valores inadequados podem produzir defeitos (furos, etc.) ou a falta de homogeneidade na distribuição do esmalte sobre a superfície das peças.

Tanto a temperatura como a umidade dos revestimentos cerâmicos na saída do secador dependem da distribuição da temperatura e, em menor medida, da umidade relativa dos gases dentro do secador. A informação que se obtém da curva de temperatura dentro dos secadores é muito fragmentada, especialmente nos secadores verticais.

Foram desenvolvidas sondas de temperatura que se introduzem no secador e aportam informação da curva de temperatura dos gases ou da superfície das peças⁴. Estas sondas consistem em um equipamento de aquisição de dados com uma série de termopares e são utilizadas esporadicamente para o diagnóstico dos secadores. Na Figura 7, apresenta-se o perfil de temperatura dos gases obtido com uma destas sondas, no interior de um secador vertical, em três posições diferentes.

A informação da curva de temperatura dentro de um secador permite detectar zonas onde a secagem é demasiadamente lenta (com a conseqüente perda de rendimento) ou demasiadamente rápida (o

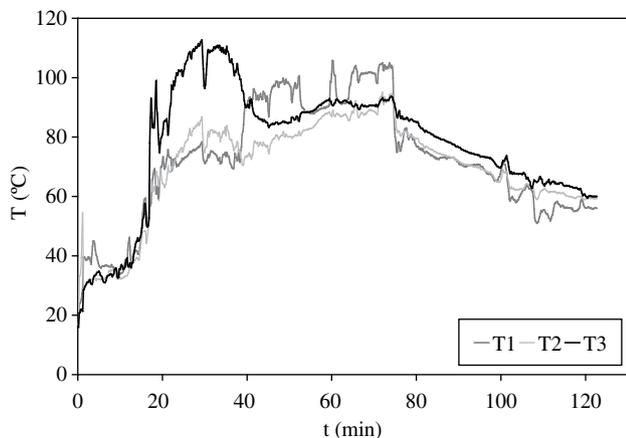


Figura 7. Distribuição de temperatura dos gases em um secador vertical durante um ciclo de secagem, em diferentes posições.

que poderia originar problemas de trincas), conduzindo a um desenho mais racional das curvas de secagem.

A temperatura na saída do secador só é medida mediante pirômetros óticos com um indicador onde o operário pode ler o valor instantâneo de temperatura. Tem-se, portanto, uma leitura pontual da temperatura da peça à medida que passa abaixo do pirômetro. É impossível, nestas condições, conhecer a temperatura média de uma peça situada em uma determinada posição do secador. Desenvolveu-se um software que permite combinar a informação da temperatura média da peça na saída do secador com a sua posição dentro do mesmo²¹. Na Figura 8 mostra-se a evolução da temperatura média na saída do secador de três peças situadas em posições distintas no interior do mesmo.

A utilização desta instrumentação não é complicada, especialmente nos secadores verticais, e aporta informação útil sobre o funcionamento do secador e sobre sua estabilidade térmica tanto no estado estacionário como não estacionário.

A segunda variável de importância na secagem industrial é a umidade residual dos suportes. Esta umidade residual afeta a resistência mecânica²² das peças: quanto maior a umidade, menor a resistência mecânica e, por tanto, maior a probabilidade de que a peça sofra algum tipo de ruptura.

A umidade residual só é medida de forma manual, a partir de amostras retiradas de peças industriais, que são introduzidas em uma balança com resistência elétrica ou em uma estufa. Os sensores de umidade por infravermelho, empregados na medida do conteúdo de umidade do pó para prensagem e dos suportes recém prensados (para o controle antecipativo de sua densidade) não podem ser empregados neste caso, já que a radiação infravermelha é pouco penetrante e só permite que se conheça a umidade na superfície da peça. Para medir a umidade média é necessário empregar sensores de microondas ou de radiofrequência. A experiência no setor de revestimentos cerâmicos é maior com estes últimos; os ensaios realizados têm revelado que é possível empregar estes dispositivos para obter medidas precisas de umidade residual dos suportes na saída do secador.

2.5. Esmaltação e decoração

Esta operação não é somente uma etapa, mas sim um conjunto de sub-etapas conectadas. Cada uma destas sub-etapas tem suas próprias variáveis independentes, porém sem dúvida existe interação entre as diferentes sub-etapas; assim, por exemplo, a quantidade de água aplicada com um aerógrafo influi sobre a qualidade da aplicação do esmalte base.

Foram realizados esforços para implementar um sistema de seguimento e controle de inclusão destas sub-etapas. Buscou-se con-

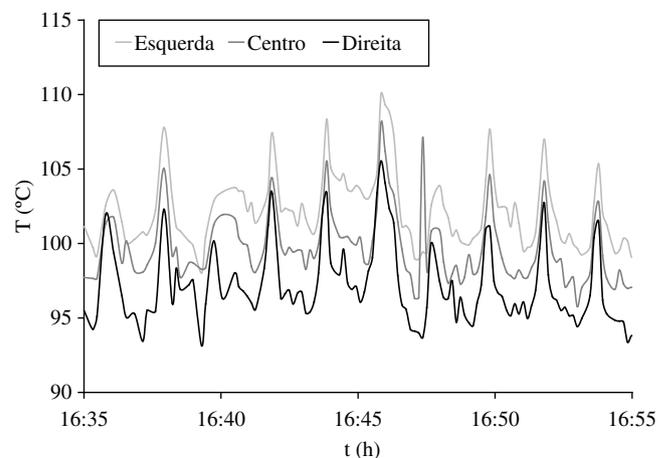


Figura 8. Evolução da temperatura de três peças, situadas em diferentes posições, na saída do secador.

trolar a quantidade do esmalte aplicado mediante o uso de células de carga. Os resultados obtidos evidenciaram a dificuldade de realizar medidas suficientemente precisas do peso das peças antes e depois de cada aplicação.

Maior êxito foi obtido com o controle da quantidade de esmalte aplicado usando campana²³ (Figura 9). Neste caso, um medidor de vazão eletromagnético registra a vazão de esmalte aplicado pela campana, e corrige os desvios atuando sobre uma válvula motorizada.

Foi comprovado que, mantendo a válvula na posição manual, as variações de vazão são significativas, e têm sua origem fundamentalmente na variação da viscosidade do esmalte devido a variações na densidade (por evaporação da água) e na temperatura (por troca com o ambiente e pelo aquecimento provocado pela bomba de impulsão).

Na Figura 10 são apresentadas as curvas de distribuição das vazões com controle manual e com controle automático, em que se utiliza o sinal do medidor de vazão eletromagnético para manter a vazão do esmalte constante.

Muitos dos problemas que aparecem na linha de esmaltação estão relacionados a uma incorreta aplicação da decoração, que provoca defeitos visíveis na própria linha de esmaltação. Esta afirmação é baseada no fato de que algumas empresas dedicadas à inspeção visual automática, estudaram o uso destes sistemas para avaliar as características das peças antes da queima²⁴.

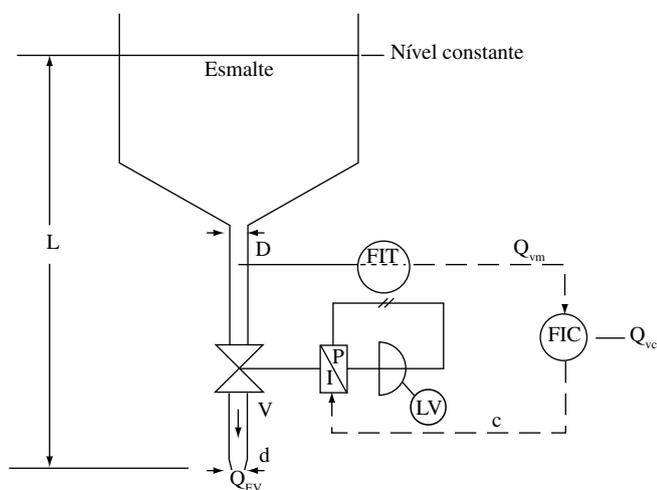


Figura 9. Esquema do dispositivo de controle automático da vazão de esmalte em uma campana.

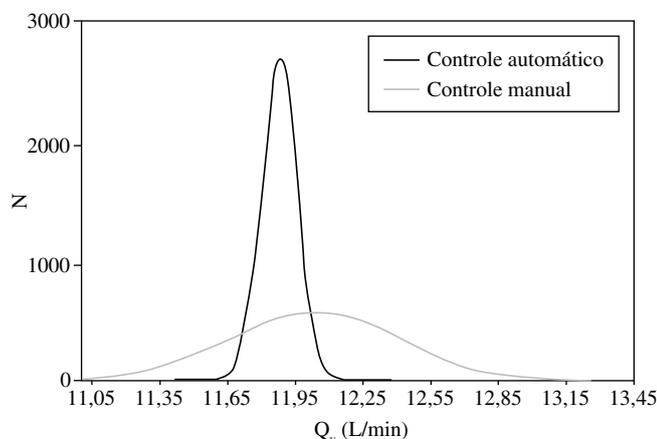


Figura 10. Distribuição de vazões volumétricas de esmalte com controle manual e automático.

Os benefícios de detectar peças incorretamente decoradas na linha de esmaltação são óbvios: somente passam para a etapa seguinte (queima) as peças perfeitas, se economiza esmalte e energia, aumentam a produção e a porcentagem de peças de maior qualidade, etc. Entretanto, a inspeção visual nesta etapa do processo enfrenta muitas dificuldades. A primeira delas é a presença do pó e da água, o que obriga proteger todos os sistemas. A segunda delas é a dificuldade de detectar os defeitos nas peças cruas. A técnica é promissora, porém está em fase de teste.

2.6. Queima

A queima é uma das etapas mais importantes do processo cerâmico já que nela se conferem às peças suas características técnicas e estéticas finais e ainda é a etapa térmica de maior consumo energético. As variáveis do forno sobre as quais é possível atuar e que determinam tanto as características das peças como o consumo do mesmo, são: a distribuição da temperatura tanto longitudinal como transversal, a pressão e a composição dos gases no interior do mesmo, fundamentalmente a quantidade de oxigênio. Trata-se, utilizando a linguagem de controle, de um sistema com parâmetros distribuídos em que se deve controlar as curvas completas e não unicamente um único valor das mesmas.

Em geral, tem havido tentativas de controlar a curva de pressões e inclusive a porcentagem de oxigênio dos gases no interior do forno^{25,26}, somente a temperatura é medida e controlada de forma contínua ao longo do mesmo (curvas de queima). Apesar disso, muitas vezes esta medida é insuficiente e as diferenças de temperatura ao longo do forno (distribuição transversal) são importantes. Existem equipamentos que permitem medir a distribuição transversal de temperatura; dentre estes os mais conhecidos são o rolo multitermopar²⁷ e a sonda de temperatura Datapaq.

O rolo multitermopar externamente tem a aparência de um rolo metálico convencional, porém no seu interior dispõe de vários termopares (Figura 11) com o quais é possível medir o perfil transversal em uma zona do forno, na parte inferior e continuamente (Figura 12). Qualquer mudança ou manobra no forno (modificação da temperatura de confiança, pressão de ar, diâmetro ou tipo dos queimadores, etc.) afeta o perfil de temperatura e, mediante este sistema, é possível analisar imediatamente esta influência. Quando se deseja estudar outra zona do forno deve-se somente mudar a posição do rolo.

A sonda de Datapaq informa sobre a curva de temperatura completa, em diferentes posições ao longo do forno e em algumas

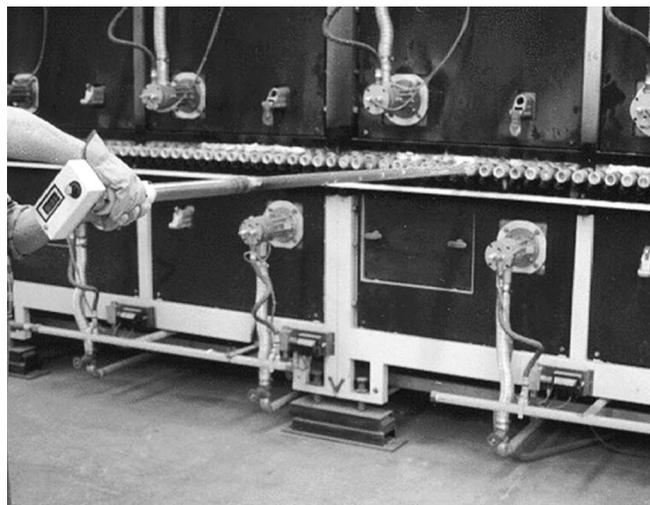


Figura 11. Medida de gradientes transversais de temperatura com o rolo multitermopar.

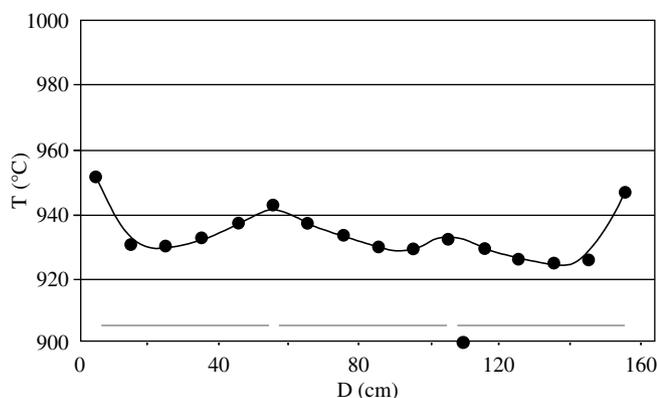


Figura 12. Gradientes transversais de temperatura no interior do forno.

determinadas condições de operação do mesmo. Consiste num dispositivo eletrônico convenientemente isolado termicamente, no qual é conectada uma série de termopares que se situam sobre as peças. O conjunto é introduzido no interior do forno e com ele se obtém a distribuição de temperatura de forma análoga a sonda utilizada nos secadores, conforme comentado anteriormente. Dependendo do posicionamento dos termopares pode-se registrar a temperatura das superfícies superior e inferior da peça. Os principais inconvenientes do equipamento são: a preparação da medida, que é trabalhosa, e a dificuldade de garantir que a introdução da sonda não perturbe muito a distribuição de temperaturas, em particular que não se crie nenhum “oco” no forno.

Contudo, as curvas de temperatura, pressão e porcentagem de oxigênio não são as variáveis do produto queimado. As variáveis que realmente devem ser controladas são as dimensões (calibres e esquadros), curvaturas e aspecto visual (tonalidades, defeitos superficiais e quebras). O problema em muitos casos é a medida contínua destas propriedades na saída do forno, devido às elevadas temperaturas que têm as peças neste ponto e/ou ao fato de que algumas destas propriedades podem sofrer mudanças com o tempo.

Atualmente existem dispositivos para a medida contínua das dimensões e, a princípio, seria possível obter informação do aspecto visual. Têm sido realizados também trabalhos nos quais se estuda a relação entre as variáveis térmicas e as curvaturas²⁸. Todavia, se dispõe de recursos técnicos capazes de medir continuamente as propriedades dos revestimentos queimados na saída do forno e é conhecida, em muitos casos, a zona do forno que incide sobre a característica final do produto, não sendo obtido um controle automático do mesmo. O maior problema consiste em definir as variáveis sobre as quais atuar e os “efeitos secundários” destas atuações. Assim, por exemplo, a modificação da temperatura em uma zona do forno para corrigir calibres poderia afetar a tonalidade das peças. O controle das curvaturas, especialmente das irregulares, é mais complexo^{29,30,31}.

2.7. Classificação

A classificação é uma das etapas que ultimamente tem sofrido mudanças mais significativas desde o ponto de vista do controle automático. A chegada dos primeiros equipamentos de classificação automática (*Surface Inspection e Massen*^{32,33}) tem feito com que muitos fabricantes de maquinários ofereçam seus próprios equipamentos de classificação. Vários fatores têm provocado o recente êxito destes tipos de equipamentos: desenvolvimento de ordenadores rápidos, complexos programas de computador e câmaras de alta resolução.

A classificação de revestimentos cerâmicos é um processo complexo porque leva em conta uma série de apreciações, sobretudo, estéticas, que são dificilmente quantificáveis em termos matemáticos,

compreensíveis para um computador. Na atualidade, para determinados tipos de modelos, os erros dos sistemas de classificação automáticos são inferiores aos cometidos pelo pessoal de classificação, o qual, devido a fadiga provocada pelo trabalho, não pode discernir os defeitos cromáticos após um período curto de trabalho.

2.8. Situação geral

Na Tabela 1 resume-se a situação da medida e automatização nas diferentes etapas do processo de fabricação de revestimentos cerâmicos. Na mesma, nota-se que o grau de automatização não é igual em todas as etapas do processo de produção, como foi comentado anteriormente.

Em algumas delas ainda não é possível a medida contínua da variável a se controlar (por exemplo, o resíduo durante a moagem), passo prévio para abordar a automatização. Nestes casos é necessário um esforço adicional I+D para encontrar o elemento sensor adequado para medir e, posteriormente, abordar o controle automático da operação.

Em outros casos já é possível a medida contínua da variável porque não se conseguiu manter os valores especificados de forma automática; o caso, por exemplo, da temperatura e umidade das peças na saída do secador. Nestes casos o esforço realizado é menor que no caso anterior, já que a tecnologia de medida é conhecida.

Finalmente, em algumas etapas se conseguiu controlar de forma automática uma das variáveis mais interessantes; por exemplo, o caso do secador das suspensões por atomização, no qual é possível, de forma automática controlar o valor do conteúdo em umidade do pó das prensas. Entretanto, na maioria dos casos, o grau de implantação dos sistemas de controle em escala industrial é muito baixo, como se observa na Tabela 1. Existe, portanto, uma oportunidade de implantar controles automáticos em muitas das etapas do processo de produção. Não se pode deixar de aproveitar esta oportunidade já que, além de gerar informações sobre o seu desenvolvimento, o controle automático contribuirá para a diminuição dos custos de produção e aumentará a qualidade do produto final, incrementando a competitividade das empresas.

3. Controle Automático da Operação de Prensagem: uma Realização já Implantada em Escala Industrial

No último capítulo deste trabalho será analisado com certo detalhe um exemplo prático e recente de controle automático das variáveis de produto. O estudo que será apresentado aborda o controle automático da densidade aparente dos suportes de grês porcelanato na saída da prensa.

Para alcançar este objetivo foi necessário completar cada uma das seguintes etapas: delineamento do problema, conhecimento do processo, seleção de instrumentação adequada, comprovação da eficiência da instrumentação escolhida e implementação, e validação em escala industrial do sistema de controle.

3.1. Delineamento do problema

3.1.1. Problemática associada a presença de calibres

O defeito mais importante associado à falta de estabilidade dimensional dos revestimentos cerâmicos é a presença de calibres, os quais supõem uma falta de estabilidade dimensional entre diferentes peças de um mesmo produto.

A classificação do produto final se divide em quatro: aspecto superficial, curvatura, tonalidade e tamanho do calibre. Se for admitida a existência de três classes para o aspecto superficial das peças (primeira, segunda e tipo único), dois para a tonalidade e três para o tamanho, o número total de classes por modelo é de 13. Se a isto se

Tabela 1. Estado da arte sobre a medida e controle das variáveis do produto nas diferentes etapas da fabricação de revestimentos cerâmicos.

Etapa	Variáveis medidas	Medida*	Tecnologia de medida contínua	Variável manipulada	Manipulação*	Grau de implantação
Moagem	Densidade da suspensão	A	Sensor de efeito Coriolis	Vazão de água	A	Baixo
	Viscosidade da suspensão	A	Sensor vibrante	Vazão de defloculante	M	-
	Resíduo	M	-	Várias	M	-
Atomização	Vazão da suspensão	A	Sensor eletromagnético	Pressão das bombas	M	-
	Umidade do pó atomizado	A	Sensor de infravermelho	Válvula do queimador - temperatura dos gases	A	Médio
Prensagem	Umidade do suporte	A	Sensor de infravermelho	Pressão máxima	A	Baixo
	Densidade aparente do suporte	M	-	Pressão máxima	M	-
Secagem	Temperatura do suporte	A	Pirômetro óptico	Temperatura - distribuição dos gases	M	-
	Umidade do suporte	A	Sensor de radiofrequência	Temperatura dos gases - ciclo de secagem	M	-
Esmaltação	Vazão do esmalte	A	Sensor eletromagnético	Abertura da válvula	A	Baixo
	Densidade do esmalte	M	-	Quantidade de água	M	-
	Viscosidade do esmalte	M	-	Quantidade de água-adi-tivos	M	-
Decoração	Aspecto visual da peça decorada	A/M**	Câmara CCD	Várias	M	-
	Várias	M	-	Várias	M	-
Queima	Dimensões da peça	A	CCD linear	Temperatura - outras	M	-
	Curvatura da peça	A	Telômetros laser e ultra-sons	Temperatura - outras	M	-
	Aspecto visual da peça	M	-	Temperatura - ciclo-ar queimadores	M	-
Classificação	Dimensões e curvatura da peça	A	CCD linear e telômetros	---	A	Alto
	Aspecto visual da peça	A/M***	Câmaras CCD	---	A	Médio

* A: Automática; M: Manual; ** a inspeção automática na linha de decoração se encontra em uma fase incipiente de desenvolvimento; e ***em alguns casos a classificação automática não é completamente confiável

adiciona a grande variedade de modelos fabricados por uma empresa, se tem uma situação na qual o número de referências a administrar é muito elevado.

A existência de calibres diminui a margem de benefícios; com efeito, o material que não é do tamanho desejado, às vezes, não é comercializado com facilidade ou deve ser comercializado a um preço inferior, sendo o custo para produzi-lo idêntico ao de tamanho desejado. Adicionalmente, a diminuição do número de calibres facilita a manipulação do produto acabado, reduz o espaço destinado ao armazenamento, diminui a possibilidade de reclamação por tamanhos (o qual incide negativamente sobre a imagem da empresa à margem de ocasionar gastos adicionais diretos) e reduz as possibilidades de engano nos pedidos. Deste modo, um controle restrito das dimensões resulta em economia de abrasivos de retificação.

3.1.2. Origem dos calibres

Em trabalhos de pesquisas anteriores^{34,35,36} é relatado que a falta de estabilidade dimensional dos revestimentos cerâmicos é provocada pelo incorreto desenvolvimento das operações de prensagem e/ou queima. No caso do grês porcelanato os calibres devem-se, fundamentalmente, às variações de compacidade média a seco, que podem existir entre os suportes à verde, já que estas diferenças não podem ser corrigidas durante a queima³⁷. A operação de prensagem adquire uma relevância especial no caso de placas maiores de grês porcelanato, sendo também importante nas peças de pisos, e evidentemente muito maior que nos azulejos, para os quais o tamanho final é praticamente independente da densidade aparente dos suportes.

A umidade do pó das prensas apresenta variações que podem provocar diferenças de densidade aparente média a verde nas peças, e que, portanto, podem originar a aparição de calibres no produto final.

3.2. Conhecimento do processo: relação entre variáveis.

Durante a queima, as peças de grês porcelanato experimentam uma diminuição de seu tamanho, à medida que se reduz sua porosidade aberta. O valor da retração linear alcançada pela peça durante a queima determina seu tamanho final e depende exclusiva e linearmente da densidade aparente à seco e à verde do suporte. Em trabalhos anteriores³⁷ foi constatado que, para a absorção de água requerida pelas peças de grês porcelanato (inferior a 0,01%), sua retração linear é praticamente independente da temperatura máxima de queima. Dessa forma, a retração linear de uma composição poderá ser estimada a partir da densidade aparente a seco e a verde dos suportes de acordo com a seguinte equação:

$$CL = mD_{ap} + n \quad (1)$$

onde CL = retração linear (%); D_{ap} = densidade aparente a seco do suporte (kg/m^3); e m e n = parâmetros empíricos do ajuste

A Equação 1 constitui o diagrama de gresificação generalizado das composições de grês porcelanato. Este diagrama permite conhecer o valor da densidade aparente objetivo, de peças que apresentam um determinado tamanho, assim como, a margem máxima de variação de densidade aparente a seco permitida, para não possuir calibres. Na Figura 13, são apresentados os resultados experimentais e os calcula-

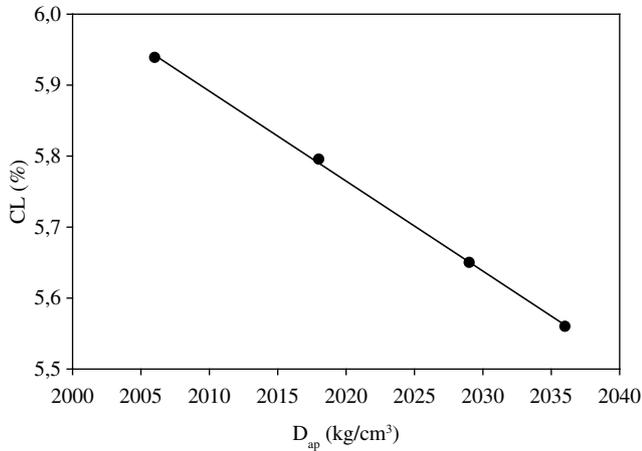


Figura 13. Diagrama de gresificação industrial de uma composição de grês porcelanato.

dos segundo a Equação 1 (linha contínua), onde se observa uma boa correlação entre os valores experimentais e os teóricos.

A segunda parte da caracterização consiste em estabelecer a relação entre a pressão de prensagem, a umidade do pó das prensas e a densidade aparente a seco das peças conformadas (diagrama de compactação). Para obter o diagrama de compactação de um pó atomizado foram conformados corpos de prova cilíndricos em uma prensa hidráulica de laboratório em diferentes condições de pressão e umidade. Os corpos de prova foram secos em estufa de laboratório a 110 °C até apresentarem peso constante e, posteriormente, suas densidades aparentes foram determinadas por imersão em mercúrio.

Os resultados experimentais se ajustam a uma equação do tipo:

$$D_{ap} = (aH + b) \ln p + cX + d \quad (2)$$

onde D_{ap} = densidade aparente dos corpos de prova a verde e secos (kg/m^3); H = umidade do pó atomizado medida em base seca (%); P = pressão máxima de prensagem (kgf/cm^2); e a , b , c e d = parâmetros empíricos de ajuste obtidos no laboratório

Na Figura 14 podem ser observados os resultados experimentais e os calculados segundo a Equação 2 (linhas contínuas), onde nota-se uma boa correlação entre os valores experimentais e teóricos.

3.3. Seleção e validação da instrumentação empregada

Os trabalhos foram desenvolvidos em uma prensa hidráulica que habitualmente é utilizada para realizar a conformação dos suportes de revestimentos cerâmicos. A medida contínua da umidade do pó das prensas foi realizada utilizando um sensor que se baseia na absorção da radiação infravermelha por parte das moléculas de água contidas em um sólido³⁸ (Figura 15).

O equipamento foi calibrado nas condições reais de operação para estabelecer uma relação entre o sinal proporcionado por ele e a umidade real do suporte prensado. O desvio típico dos valores estimados a partir da calibração, para um intervalo de confiança de 85%, é de 0,1%, suficiente para a precisão requerida na hora de abordar o controle automático da operação de prensagem.

Na Figura 16 é apresentado o diagrama de blocos do controle preventivo desenhado para a realização da automatização da operação de prensagem. A umidade dos revestimentos cerâmicos na saída da prensa (H) é medida mediante um sensor de infravermelho. O valor medido (H_m) é enviado ao ordenador, que dispõe também da densidade objetivo ($D_{ap,obj}$). A partir de H_m , $D_{ap,obj}$ e do diagrama de compactação, o ordenador estima uma pressão máxima de confiança, que é enviada ao ordenador da prensa.

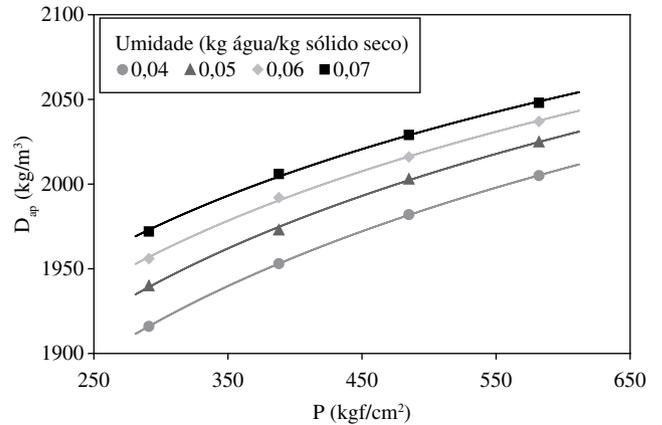


Figura 14. Diagrama de compactação em laboratório de uma composição de grês porcelanato.

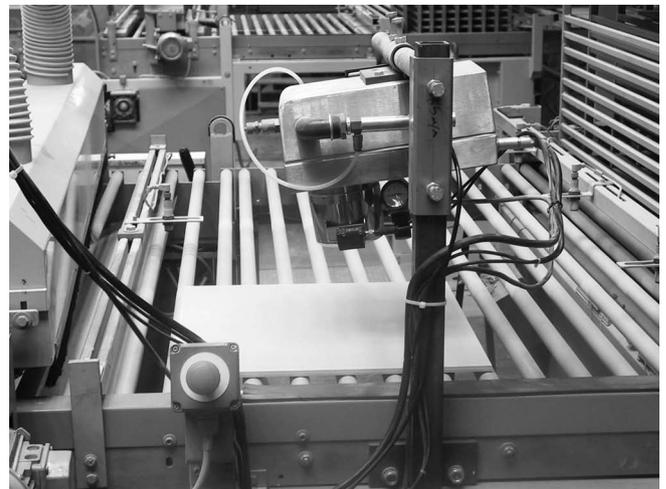


Figura 15. Medida contínua da umidade dos suportes recém prensados.

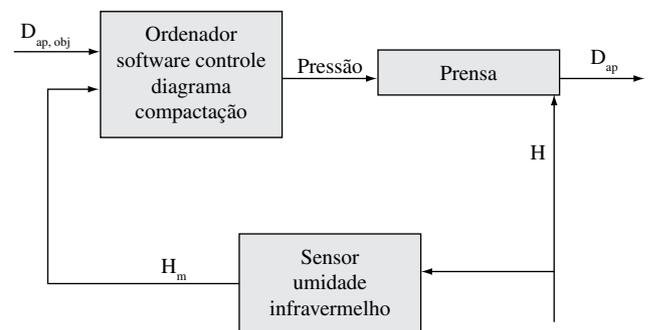


Figura 16. Diagrama de blocos do controle preventivo.

Na Figura 17 é ilustrada a interface de usuário do software de controle. Nela é possível notar um grupo denominado “Dados”, onde se visualiza, para cada uma das peças que passa embaixo do sensor, sua umidade (“Humedad”), a pressão máxima de prensagem medida pela prensa (“Pres.med.”), a densidade aparente estimada pelo diagrama de compactação industrial (“Dens.Sec.”), a densidade aparente objetivo (“Dens.Obj.”) e a pressão estimada de prensagem calculada pelo programa (“Pres.est.”) para manter constante a densidade aparente a seco dos suportes recém prensados.

Por outro lado, no grupo “Acción” existem dois botões destinados a iniciar e parar o sistema de aquisição de dados e um terceiro

botão habilitado para ativar ou desativar o controle automático da operação de prensagem.

Antes de implantar o sistema de controle preventivo foi necessário verificar a validade do sistema para estimar a densidade aparente dos suportes. Para isto foi escolhido um seguimento da densidade aparente estimada pelo sistema (D_{ap} estimada) e a medida pelo método de imersão em mercúrio, considerando-se como real esta última (D_{ap} real) (Figura 18). O erro obtido para um intervalo de confiança de 95% foi de $\pm 4 \text{ kg/m}^3$ (barra da Figura 18). Esta precisão é considerada suficiente já que, em trabalhos anteriores foi comprovado que a margem máxima de variação da densidade aparente para que não apareçam calibres em peças de grês porcelanato é de $\pm 10 \text{ kg/m}^3$.

3.4. Implementação em escala industrial: validação do sistema de controle

Como foi indicada anteriormente, a principal causa da oscilação dos valores de densidade são as variações de umidade do pó atomizado. Na Figura 19 é revelada a evolução da umidade dos suportes recém prensados durante 16 horas (eixo da esquerda). As zonas do gráfico onde não há continuidade nas curvas (espaços) correspondem a períodos de parada da prensa. Foram traçados limites de especificação fixados a partir do valor médio da umidade registrado durante

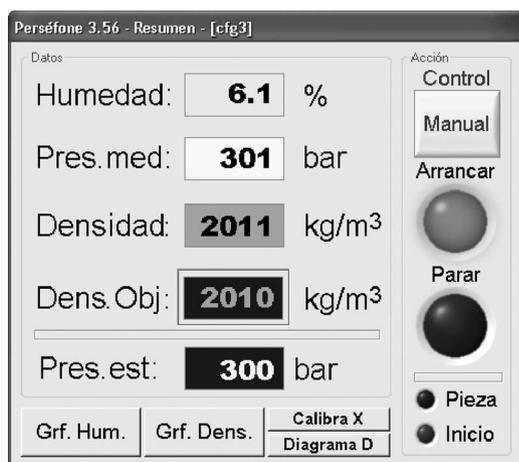


Figura 17. Interface de usuário da aplicação de controle de densidade aparente.

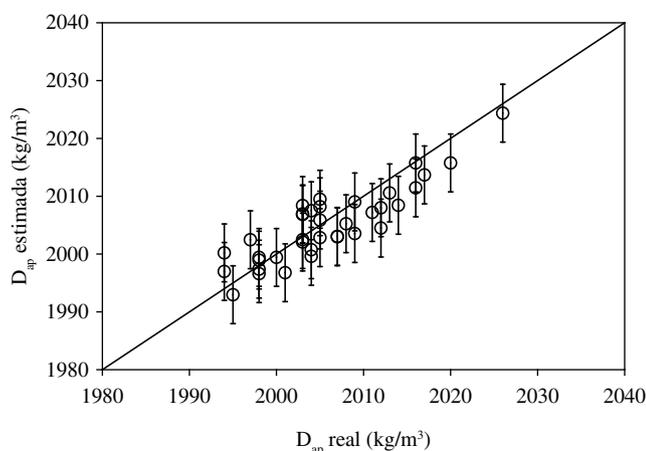


Figura 18. Estimação da densidade aparente dos suportes recém prensados mediante o diagrama de compactação industrial.

o período analisado. Estes limites representam a variação máxima que pode alcançar o conteúdo de umidade do suporte sem que apareçam os calibres, de acordo com as tolerâncias permitidas para o tipo de produto fabricado. Nesta figura observa-se que o conteúdo em umidade dos suportes durante o período analisado, se encontra dentro dos limites de especificação.

Não obstante o sistema de controle desenhado compensa as variações no conteúdo de umidade modificando a pressão máxima de prensagem, para manter constante a densidade aparente do suporte. A Figura 19 ilustra a evolução da pressão de prensagem (eixo da direita), calculada a partir da umidade e da Equação 2. Nota-se como, à medida que a umidade diminui, é necessário incrementar a pressão de prensagem.

Na Figura 20 encontra-se a classificação das peças fabricadas nas condições de pressão e umidade observadas na Figura 19. Nota-se que todas as peças produzidas são do mesmo calibre e que a distribuição de tamanhos se encontra praticamente centrada próxima ao calibre central (calibre A), indicando a eficácia do sistema de controle da prensa desenhado para manter constante a densidade aparente média dos suportes recém compactados.

A utilização do sistema de controle automático durante 6 meses melhorou em 17% a porcentagem de calibre central em relação ao

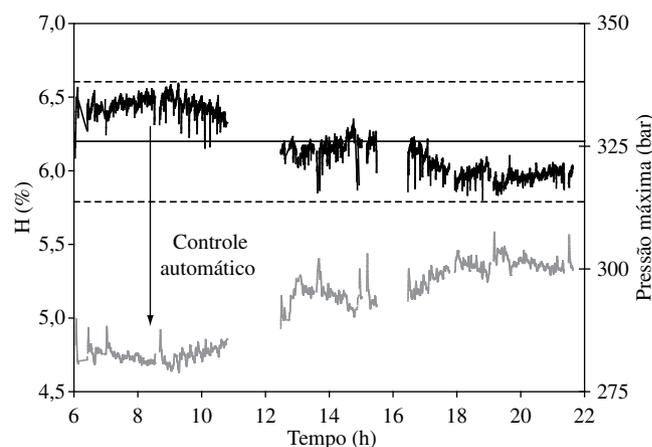


Figura 19. Evolução da umidade dos suportes recém prensados e da pressão máxima de compactação, modificada pelo sistema de controle para manter a densidade aparente constante.

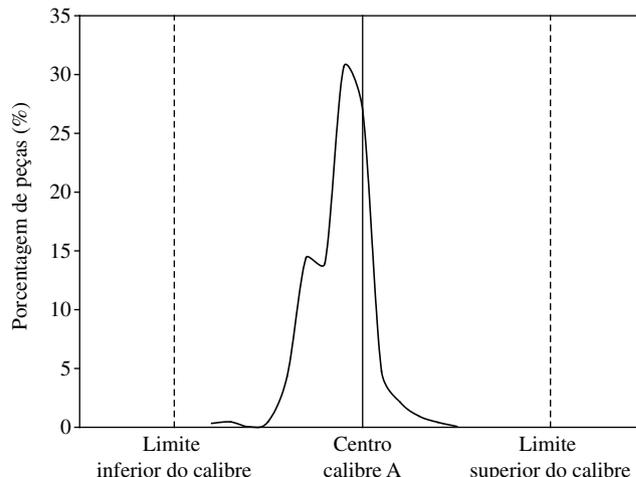


Figura 20. Classificação por tamanhos das peças fabricadas com o sistema de controle automático ativo (3000 m², de tamanho nominal 45 x 67,5 cm).

controle habitual (manual), passando de um valor médio de 75% à 92%, melhorando, em geral, a classificação do produto final. Com efeito, como pode ser visto na Figura 21, onde é comparada a qualidade da classificação obtida com e sem o sistema de controle automático, se observa uma importante melhora. As produções com 3 ou mais calibres praticamente desaparecem já que sofrem redução de 24% para 5%, enquanto que tem aumentado até 65% a proporção de partidas com mais de 95% de suas peças no calibre desejado. Quando operando de forma habitual, somente era atingido 6% de produções com este requisito. Finalmente deve-se ressaltar que as produções com calibre único, passaram de 6 para 30% (aumento de 5 vezes).

Atualmente, o sistema de controle descrito é utilizado a mais de um ano em todas as prensas nas quais a empresa fabrica grês porcelanato. Neste período, o percentual médio do calibre central para todas as produções fabricadas tem se situado em torno de 90%, sendo observada uma ligeira diminuição do percentual de calibre central ao aumentar o número de peças prensadas por batidas, isto é quanto se tratam de peças pequenas. O sistema proposto está sendo implantado em prensas que fabricam peças de piso e de azulejo, tanto de base branca como de base vermelha, e passa neste momento, por um processo de avaliação dos resultados obtidos.

A experiência prática tem demonstrado a eficácia do sistema de controle de densidade aparente através da medida de umidade e conveniente modificação da pressão máxima. Esta experiência é uma proposta madura e demonstrável do ITC ao setor cerâmico, sobre o quadro da otimização do processo de fabricação.

Agradecimentos

Através deste trabalho buscou-se dar uma visão geral da situação atual e das perspectivas do futuro da instrumentação e do controle automático no processo de fabricação de revestimentos cerâmicos. A maior parte dos estudos relatados neste trabalho foi desenvolvida pelo ITC, em colaboração com diferentes empresas do setor cerâmico. Portanto, os agradecimentos são para o pessoal do ITC que participou direta ou indiretamente nos mesmos, assim como para as empresas e órgãos estatais que, com o apoio econômico, possibilitaram que pequenas idéias se transformassem em produtos úteis para os fabricantes de revestimentos cerâmicos.

Em especial os agradecimentos vão para os colegas do ITC, José Luís Amorós, Domingo Llorens, Vicente Cantavella e Juan Boix, que com seus comentários, discussões e sugestões, facilitaram a elaboração deste trabalho.

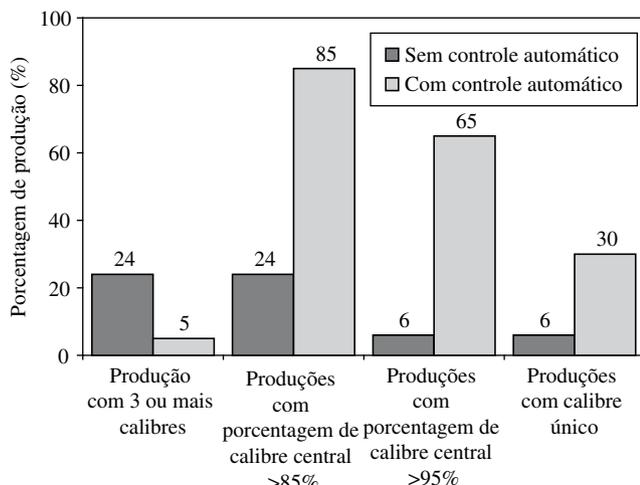


Figura 21. Análise da qualidade das classificações (grês porcelanato com formato 45 x 67,5 cm).

Referências

1. Reh, H.; Krozingen, B. Process technology in whitewares. **Cfi Ber DKG**, v. 75, n. 10, p. 7-11, 1998.
2. Peña Diez, J. L. La simulación dinámica en el control de procesos. **Ingen. Quím.**, n. 348, p. 139-145, 1998.
3. Marlin, T. E. **Process control: Designing processes and control systems for dynamic performance**. New York: McGraw-Hill, 1995, p. 745-773.
4. Jarque, J. C. et al. Comportamiento de composiciones cerámicas frente al secado en condiciones industriales. In: CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO, QUALICER 2002, VII., Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2002. Vol.II, p. PGI365-PGI384.
5. Amorós, J. L. et al. Mejora de la estabilidad dimensional de piezas de grés porcelánico a través de la medida en continuo de la humedad de los soportes prensados. **Cerám. Inf.**, n. 311, p. 117-126, 2004.
6. Amorós, J. L. Vidriados para pavimentos y revestimientos cerámicos. Evolución y perspectivas. In: CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO, QUALICER 1992, II., **Actas...** Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 1992. pp. 73-103.
7. Blasco, A.; Enrique, J. E.; Arrébola, C. Los defloculantes y su acción en las pastas cerámicas para atomización. **Cerám. cristal**, n. 98, p. 37-41, 1986.
8. Sánchez, E. et al. Control de la operación de molienda en continuo. In: QUALICER 2002: CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO, VII., **Actas...** Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2002. Vol.I, pp. GI219-GI236.
9. Moschini, M. et al. Medida en línea de la densidad y viscosidad de la barbotina. In: QUALICER 2004: CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO, VIII., Castellón: Cámara oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2004. Volumen I, pp. GI67-GI80.
10. Amorós, J. L. **Pastas cerámicas 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) Valencia: Universidad, 1987, p. 61.
11. Amorós, J. L. et al. La operación de prensado en la fabricación de pavimento por monococción. I Influencia de la naturaleza del polvo de prensas sobre las propiedades de la pieza en crudo. **Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio**, v. 27, n. 5, p. 273-282, 1988.
12. Amorós, J. L. et al. La operación de prensado de pavimentos por monococción. II Influencia de la naturaleza del polvo de prensas sobre las propiedades de la pieza en cocido. **Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio**, v. 29, n. 3, p. 151-158, 1990.
13. Negre, F. et al. Estudio de la operación de secado por atomización de polvos cerámicos a escala industrial, su control y automatización. **Téc. Cerám.**, n. 228, p. 736-744, 1994.
14. Jarque, J. C. et al. Control automático de la humedad en una instalación de secado por atomización. In: CONGRESO NACIONAL DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE CERÁMICA Y VIDRIO: ONDA, XL., 8-11 de noviembre, 2000: programa y libro de resúmenes. Castellón: SECV, 2000.
15. Escardino, A. et al. Cinética de la oxidación de la materia orgánica en productos cerámicos prensados. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE CERÁMICA, VIDRIO Y REFRACTARIOS, I., Arganda del Rey: Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 1983. pp. 317-329.
16. Enrique, J. E. et al. Alternativas al método de inmersión en mercurio para la determinación de la densidad aparente de baldosas cerámicas. **Téc. Cerám.**, n. 250, p. 18-27, 1997.
17. Cantavella, V. et al. 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: CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO, IX., Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2006. [aceptado]

18. Amorós, J. L. et al. Medida no destructiva de la densidad aparente de piezas en crudo mediante absorción de rayos X. In: QUALICER 2006: CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO, IX., Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2006. [aceptado]
19. Marchetti, B.; Revel, G. M. Medida en línea de la densidad en crudo de baldosas cerámicas: análisis de incertidumbre. In: QUALICER 2002: CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO, VII., Castellón: Cámara oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2002. Vol. I, pp. GI11-GI23.
20. Blasco, A. et al. Experimental Study of the determination of dry compaction of ware shaped by unidirectional pressing, in continuous operation and in true time. **Tile Brick Int.**, v. 8, n. 6, p. 424-438, 1992.
21. Mallol, G. et al. Estudio de la operación de secado de los soportes de las baldosas cerámicas en secaderos verticales. In: QUALICER 2002: CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO, VII., Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2002. Vol.II, pp. PG1329-PG1348.
22. Jarque, J. C. **Estudio del comportamiento mecánico de soportes cerámicos crudo:** Mejora de sus propiedades mecánicas. Tesis (Doctoral) - Universitat Jaume I de Castelló. Castelló, 2001.
23. AICE. Dispositivo y método de control automático de aportación de fluidos. ES 2165760, 2003-06-16.
24. COE, S. The automatic inspection of ceramic tiles between press and kiln. **CFI Ceram forum int.**, v. 79, n. 11, p. E11-E13, 2002.
25. Blasco, A. et al. Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato (I). Curva de presiones. **Téc. Cerám.**, n. 206, p. 585-593, 1992.
26. Blasco, A. et al. Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato (II). Caudal de aire de combustión. **Téc. Cerám.**, n. 218, p. 716-729, 1993.
27. Ferrer, C. et al. Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato. III Medida de gradientes transversales de temperatura. **Téc. Cerám.**, n. 227, p. 653-662, 1994.
28. Jarque, J. C. et al. Influencia de las condiciones de operación del horno de rodillos sobre la curvatura de las piezas. **Téc. Cerám.**, n. 303, p. 685-687, 2002.
29. Amorós, J. L. et al. Estabilidad dimensional en piezas de monococción porosa. In: QUALICER 1992: CONGRESO MUNDIAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJO Y DEL PAVIMENTO CERÁMICO, II., Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 1992. p. 347-376.
30. Cantavella, V. Simulación de la deformación de baldosas cerámicas durante la cocción. Tesis (Doctoral) - Castelló: Universitat Jaume I, 1998.
31. Amorós, J. L. et al. Acuerdo esmalte-soporte (I) Causas y factores de los que depende. **Téc. Cerám.**, n. 178, p. 582-592, 1989.
32. Massen, R.; Franz, T. The quality of automatic tile quality inspection systems. **Cfi ber. DKG**, n. 78, p. 1-2, E15-E17, 2001.
33. COE, S. Automatic tile inspection. **Int. Ceram.**, v. 1, n. 33, p. 35, 2000.
34. Orts, M. J. **Sinterización de piezas de pavimento gresificado.** Tesis (Doctoral) - Valencia: Universitat de Valencia, 1991.
35. Escardino Benlloch, A.; Amorós Albaro, J.I.; Enrique Navarro, J.e. Estudio de pastas de gres para pavimentos. **Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.**, v. 20, n. 1, p. 17-24, 1981.
36. Amorós Albaro, J. L. et al. Control de la compactación durante el proceso de fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos. **Téc. Cerám.**, n. 118, p. 1307-1314, 1983.
37. Amorós, J. L. et al. Mejora de la estabilidad dimensional de piezas de gres porcelánico a través de la medida en continuo de la humedad de los soportes prensados. **Ceram. Inf.**, n. 311, p. 117-126, 2004.
38. Mallol, G. et al. Medida en continuo de la humedad de los soportes cerámicos prensados. **Ceram. Inf.**, n. 289, p. 81-90, 2002.