

Melhoria da Estabilidade Dimensional de Peças de Grês Porcelânico Através da Medida Contínua da Umidade dos Suportes Prensados

**Jose Luis Amorós^a, José Gustavo Mallo^{a*}, Ana Mezquita^a,
Domingo Llorens^a, Fernando Castro Lopes^b,
José Antonio Cerisuelo^c, Miguel Vargas^c**

^a*Instituto de Tecnología Cerámica. Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas. Univesitat Jaume I. Castellón. Espanha*

^b*Sistemas de Control en Línea, S.A.*

^c*Zirconio, S.A.*

e-mail: gustavo@itc.uji.es

Resumo: A aparição de maiores problemas de calibre em peças de grês porcelânico de grande formato em relação aos outros tipos de pisos tem sido detectada. Foram estudados, em peças de grês porcelânico, de piso de massas vermelha e de piso de massa branca, os efeitos que as variáveis de prensagem exercem em seus comportamentos durante a etapa de queima. Os resultados ressaltam a grande importância que a operação de prensagem tem na manutenção de um determinado calibre em peças de grês porcelânico. Como consequência, é proposto um sistema de controle efetivo desta operação, baseado na modificação de pressão máxima de compactação para corrigir as variações de umidade do pó atomizado, que deve ser medida continuamente nas peças prensadas. A medida contínua da umidade das peças na saída da prensa é baseada na absorção de parte de uma radiação infravermelha pela água presente no suporte recém prensado. A validade deste procedimento foi comprovada e se constatou, em escala industrial, que as flutuações máximas de umidade em condições habituais de fabricação, em algumas ocasiões, são superiores à variação permissível para esta variável, o que exige uma modificação apropriada da pressão de compactação para manter a compacidade da peça crua dentro das margens adequadas para se obter um único calibre.

Palavras-Chaves: *revestimentos cerâmicos, controle dimensional, processamento*

1. Introdução

Os defeitos mais comuns associados à falta de estabilidade dimensional dos revestimentos cerâmicos são os calibres e a falta de esquadro, levando a uma importante perda da qualidade do produto final. Os calibres surgem da falta de estabilidade dimensional entre as peças, isto é, revestimentos que deveriam ter o mesmo tamanho não os têm. A falta de esquadro são defeitos que afetam as dimensões de cada peça e correspondem à falta de ortogonalidade entre os lados da mesma. Em numerosos trabalhos de pesquisa¹⁻⁷ foram demonstrados que a falta de estabilidade dimensional dos revestimentos cerâmicos se deve a um incorreto desenvolvimento das etapas de prensagem e/ou queima.

Na verdade, a falta de estabilidade dimensional em peças de azulejo (revestimento poroso)⁷, se deve fundamen-

talmente à falta de uniformidade da distribuição das temperaturas nas zonas de pré-aquecimento do forno (entre 800 e 950 °C), sendo praticamente independente da porosidade das peças cruas. Industrialmente, um controle adequado da composição do suporte e da distribuição da temperatura nesta zona do forno permitem obter peças de azulejo sem defeitos dimensionais.

Nos casos dos pavimentos não-porcelânicos (habitualmente denominados “grês de massa vermelha ou branca”, em função da cor do suporte queimado), a falta de estabilidade dimensional se deve tanto a variações na porosidade das peças cruas como a heterogeneidades na distribuição da temperatura máxima durante a queima¹⁻⁶. Um controle exaustivo da porosidade das peças cruas durante a

prensagem⁸⁻¹¹ permite obter peças com o mesmo calibre, sempre que o funcionamento do forno seja adequado. No caso em que não seja conseguida uma uniformidade da porosidade desejada nas peças cruas, sempre é possível modificar a temperatura máxima de queima para obter o mesmo calibre, devido à capacidade destes materiais modificarem a sua retração linear com a temperatura.

Foi constatada a existência de maiores problemas de estabilidade dimensional (principalmente de calibre) em peças de grês porcelânico de grande formato, em relação aos outros tipos de pavimento, devido fundamentalmente aos fatos da porosidade final deste produto ser menor e sua compacidade mais baixa. Estes problemas são difíceis de evitar na prática, visto que o comportamento destes tipos de materiais de porosidade muito baixa na temperatura máxima de queima, difere do comportamento dos pavimentos não-porcelânicos, sendo a retração de queima praticamente insensível às modificações da temperatura máxima de queima. Na prática, se o produto final é retificado e polido, os problemas de estabilidade dimensional podem ser sanados. Entretanto, o polimento e a retificação das peças de piso porcelânico esmaltado, cuja produção é cada vez maior na Espanha, supõe a incorporação de uma nova etapa no processo produtivo, aumentando consideravelmente o custo do produto.

2. Objetivos

Uma série de experimentos em laboratório e em escala industrial foram realizados com os seguintes objetivos:

- Estudar o efeito sobre que as variações da compacidade dos suportes crus e a temperatura máxima de queima exercem na estabilidade dimensional dos pisos cerâmicos, com vistas a comparar a sensibilidade destes materiais às alterações destas variáveis.
- Determinar o intervalo máximo permitido de variação da densidade aparente a cru dos suportes (ΔD_{ap}^*) e da umidade do pó atomizado nas prensas (ΔU^*), para conseguir um único calibre em função do tipo de produto, seu tamanho, tolerância de calibre e funcionamento do forno.
- Desenvolver e tornar apto para escala industrial um sistema confiável de medida contínua da umidade dos suportes na saída da prensa, com vistas a melhorar o controle de operação de prensagem

3. Materiais, Equipamentos e Procedimento Experimental

Para a realização dos ensaios de laboratório foram utilizadas três composições industriais para a fabricação de pisos: uma para pavimento gresificado de massa branca (B), outra de pavimento gresificado de massa vermelha (V) e, a terceira, de grês porcelânico (P). Sobre estas composições foram realizados ensaios oportunos no laboratório para determinar seus diagramas de compactação e de gresificação¹².

Para a determinação da umidade das peças recém compactadas foi utilizado um sistema de medida da umidade por infravermelho^{14,16}. O sistema permite a medida, continuamente e em tempo real, da umidade de cada uma das peças prensadas. Os valores são armazenados em um computador para posterior análise, sendo o sistema de medidas calibrado em laboratório em condições estáticas. Posteriormente, o sistema foi instalado em uma prensa industrial e ajustou-se a calibração obtida no laboratório.

Os experimentos em escala industrial foram realizados em uma prensa hidráulica¹³ das habitualmente utilizadas no prensado dos suportes de revestimentos cerâmicos. As medidas foram feitas nos suportes de grês porcelânico esmaltado.

4. Resultados Obtidos

4.1. Sensibilidade dos Diferentes Tipos de Pisos à Aparição de Calibres. Análise Comparativa

Na Fig. 1 são representados os diagramas de gresificação correspondentes aos materiais P, B e V, prensados para diferentes densidades a cru. Os resultados foram ajustados a uma equação polinomial do tipo:

$$AA \text{ ou } RL = (A * D_{ap} + B) * T^2 + (C * D_{ap} + D) * T + E * D_{ap} + F \quad (1)$$

onde:

AA = absorção de água do produto final (%);

RL = retração linear de queima (%);

D_{ap} = densidade aparente dos suportes crus e secos (g/cm^3);

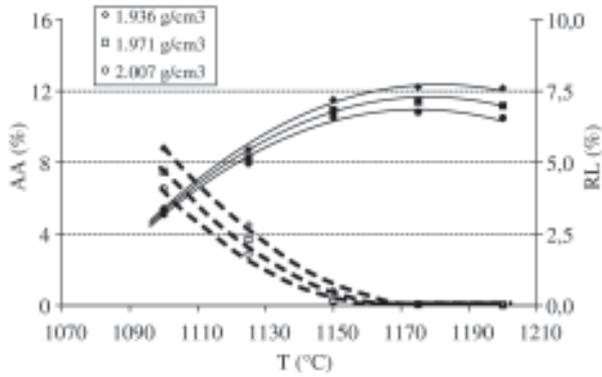
T = temperatura máxima de queima ($^{\circ}C$);

A, B, C, D, E e F = parâmetro empíricos de ajuste.

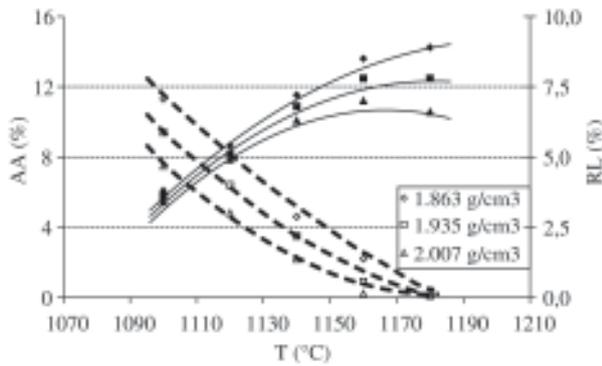
Como pode ser comprovado na Fig. 1, os valores calculados (linhas) se ajustam bem aos experimentais. A forma destas curvas é a habitual para estes tipos de composições^{2,4}.

A partir destas equações se determinou, para cada material e em função da absorção de água, a variação da retração linear com a temperatura máxima de queima, mantendo constante a compacidade ($(\frac{RL}{T})_{D_{ap}=cte}$) e, com a densidade aparente, mantendo constante a temperatura máxima de queima ($(\frac{RL}{D_{ap}})_{T=cte}$). Os resultados são detalhados na Fig. 2. Observa-se que a forma destas curvas são semelhantes para os diferentes tipos de produtos, reduzindo-se o efeito da temperatura máxima de queima na retração linear conforme a porosidade diminui (curva contínua). Ao contrário, o efeito da densidade aparente da peça prensada na retração linear aumenta conforme se reduz a porosidade (curva descontínua).

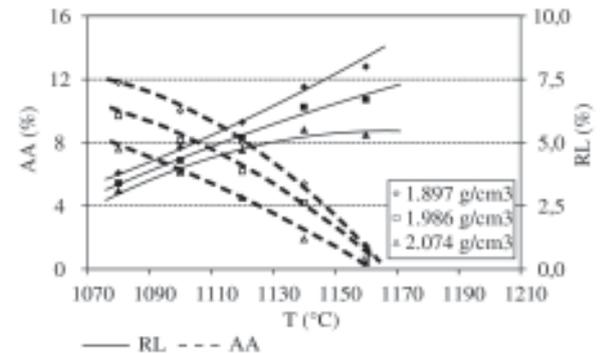
Se comprova que, para as condições de operação e as porosidades finais habituais para cada tipo de produto (área rayada), a retração linear do grês porcelânico é muito sensível à variação da compacidade a cru da peça e praticamente insensível às modificações na temperatura máxima de queima (Fig. 2a). Ao contrário, a retração linear dos outros materiais é bastante sensível às modificações da temperatura máxima de queima (Figs. 2b e 2c). Isto possibili-



(a)



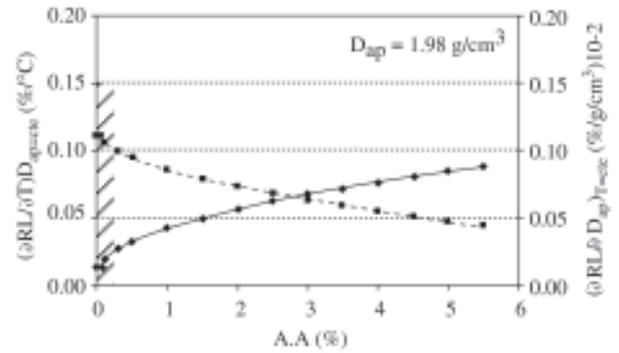
(b)



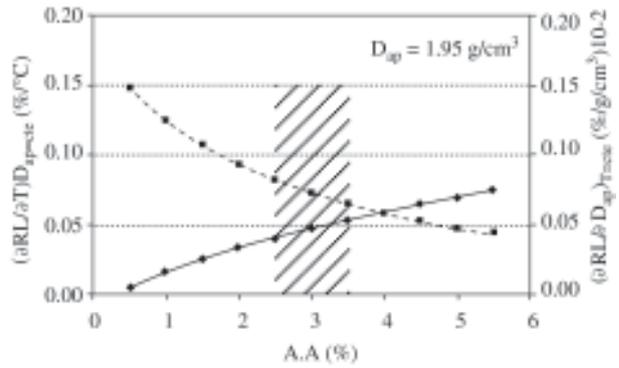
(c)

Figura 1. Diagramas de gresificação do: a) grês porcelânico; b) pavimento branco; c) pavimento vermelho.

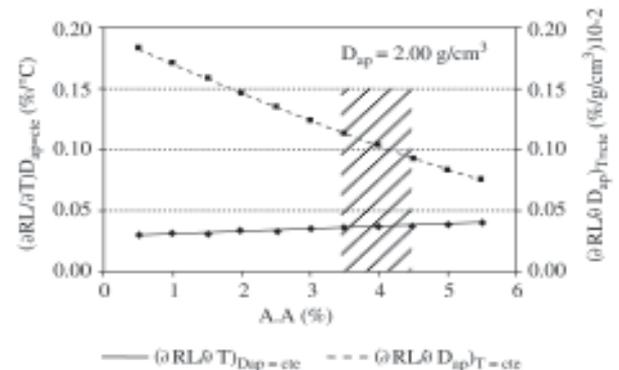
ta que uma modificação conveniente da temperatura máxima de queima corrija o efeito do desvio da compactidade da peça crua, mantendo o calibre desta. Ao contrário, a maior sensibilidade destes materiais à temperatura máxima de queima exige um controle mais exaustivo da homogeneidade desta variável na seção do forno, maior que no caso do grês porcelânico. No que diz respeito à sensibilidade da retração linear às variações de densidade aparente, se comprova que são bastante similares nos três materiais.



(a)



(b)



(c)

Figura 2. Sensibilidade do: a) grês porcelânico; b) pavimento branco; c) pavimento vermelho, às variações da densidade aparente e da temperatura máxima de queima.

4.2. Variação Máxima Permitida da Densidade Aparente (ΔD_{ap}^*) Durante o Processo de Fabricação

Para calcular ΔD_{ap}^* é necessário conhecer a equação que relaciona a retração linear de queima com a compactidade da peça crua e a temperatura máxima de queima (Eq. 1) e o valor da variação máxima permitida da retração linear (ΔRL^*). O cálculo desta última parte pode ser realizado utilizando a expressão:

Tabela 1. Variação máxima permitida da compactidade das peças cruas, ΔD_{ap}^* (g/cm³)10³.

Tolerância de calibre (mm)	Formato (cm × cm)	$\Delta T^* = 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$			$\Delta T^* = 3 \text{ }^\circ\text{C}$		
		V	B	P	V	B	P
1	30 × 30	25	35	26	20	24	24
	40 × 40	17	23	19	12	13	17
	60 × 60	10	12	12	4	2	10
1,5	30 × 30	40	55	40	35	45	38
	40 × 40	29	39	30	23	29	28
	60 × 60	17	23	19	12	13	17

$$(\Delta RL^*) = t^* (100 - RL) / L_f \quad (2)$$

onde:

ΔRL^* = retração linear máxima admissível (%);

t = diferença máxima que podemos admitir no tamanho de duas peças para considerá-las do mesmo calibre (tolerância de calibre) (mm);

L_f = comprimento nominal final da peça (mm);

RL = retração linear (%).

Derivando a Eq. 1 e transformando os termos diferenciais em incrementos finitos, resulta uma expressão que relaciona a alteração da retração linear da peça da peça durante a queima (ΔRL) devido às possíveis oscilações da densidade aparente das peças secas (ΔD_{ap}) e da temperatura máxima efetiva de queima (ΔT) (Eq. 3).

$$\Delta RL = [(A^*D_{ap} + B)^*2^*T + (C^*D_{ap} + D)]^* \Delta T + (A^*T^2 + C^*T + E)^* \Delta D_{ap} \quad (3)$$

Se nesta expressão se substitui T e D_{ap} pela temperatura máxima de queima (T_0) e pela densidade aparente da peça crua (D_{ap0}) nominais, enquanto DRL é substituída pelo incremento máximo permissível (DRL^*), definido pela Eq. 2 e DT por DT^* , oscilação máxima da temperatura efetiva de queima, da equação anterior se obtém:

$$\Delta D_{ap}^* = \{ \Delta RL^* - [(A^*D_{ap0} + B)^*2^*T_0 + (C^*D_{ap0} + D)]^* \Delta T^* \} / (A^*T_0^2 + C^*T_0 + E) \quad (4)$$

Esta expressão permite calcular a máxima diferença que pode existir entre a densidade aparente média das distintas peças que são introduzidas no forno para que não existam calibres, em função da máxima variação de retração linear permitida (ΔRL^*) e das diferenças na temperatura máxima efetiva de queima (ΔT^*) que podem ser produzidas entre as peças nesta operação. Os valores de ΔT^* dependem exclusivamente das características do forno e de seu funcionamento (possíveis gradientes transversais de temperatura e/ou flutuações da temperatura pontual ao longo do tempo).

4.2.1. Efeito das diferentes variações de operação sobre ΔD_{ap}^*

A Tabela 1 apresenta os valores de ΔD_{ap}^* , calculados

à partir da Eq. 4, para diferentes tipos de produtos, tamanhos finais das peças, tolerâncias de calibre e variações máximas da temperatura efetiva de queima (ΔT^*). Os cálculos foram realizados para as absorções de água usuais em cada caso (4% para pavimento vermelho (R), 3% para o pavimento branco (B) e 0,05% para o grês porcelânico (P)). Os valores de ΔT^* foram escolhidos com base no aparecimento ou não de calibres ao longo da seção do forno. Foi possível constatar que um $\Delta T^* = 3 \text{ }^\circ\text{C}$ corresponde a um funcionamento deficiente do forno, ao passo que $\Delta T^* = 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ deve ser considerado normal. Obviamente $\Delta T^* = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ corresponderia ao funcionamento ideal.

Dos resultados da Tabela 1 se deduz que, para as três composições, ΔD_{ap}^* se reduz com o aumento do formato, a diminuição da tolerância do calibre e o aumento de ΔT^* , como era previsto. Observa-se que, para grandes formatos e funcionamento norma do forno, ΔD_{ap}^* das três composições é muito parecida. Para estes tamanhos, se aumentarmos ΔT^* , ΔD_{ap}^* do grês porcelânico será maior que a dos piso vermelho e branco, devido ao maior efeito da temperatura máxima de queima sobre a retração linear destas últimas.

Aparentemente estes resultados parecem dizer que, para grandes formatos, a dificuldade de produzir grês porcelânico é praticamente a mesma, no caso de funcionamento normal do forno, do que para fabricar outros materiais, e até menor se aumentarmos ΔT^* . Na verdade, isto não está certo, já que a maior sensibilidade de retração linear das composições de piso branco e vermelho à temperatura máxima de queima faz com que possam ser corrigidas eventuais flutuações da compactidade média das peças, coisa que não é possível no caso do grês porcelânico, dificultando sua fabricação pelo surgimento de mais calibres.

Ainda que as variações de densidade aparente possam ser corrigidas durante a etapa de queima para os casos de pisos branco e vermelho, dada a sensibilidade destas composições à temperatura máxima de queima, a redução de ΔD_{ap}^* é tão acentuada que, quando se aumenta o formato, é necessário, se deseja-se produzir estes tamanhos sem aumentar a tolerância do calibre, dispor de uma elevada homogeneidade da temperatura na zona de queima.

4.3. Variação Máxima Permitida da Umidade (ΔU^*) Durante a Operação de Prensagem

Visando a determinar ΔU^* para os diferentes materiais estudados e pressões de compactação utilizadas, foram obtidos os diagramas de compactação, ajustando os resultados experimentais a uma equação do tipo:

$$D_{ap} = (a \cdot U + b) \cdot \log(P) + c \cdot U + d \quad (5)$$

onde:

D_{ap} = densidade aparente dos suportes crus e secos (g/cm^3);

U = umidade do pó das prensas em base seca (%);

P = pressão máxima de compactação (kg/cm^2);

a, b, c e d = parâmetros empíricos de ajuste.

Na Fig. 3 são representados os resultados experimentais e calculados segundo a Eq. 5 (linha contínua), sendo o ajuste entre ambos muito bom. Se comprova que, em condições de pressão e umidade iguais, as peças de piso vermelho são muito mais densas que as de grês porcelânico e piso branco. Além disto, o efeito da umidade na compacidade das peças é muito maior para as composições de piso vermelho. Este comportamento se deve tanto à diferença naturais e à porcentagem de partículas coloidais, como à distribuição granulométrica das partículas mais grossas (quartzo, feldspato, etc.)^{1,8}.

Seguindo um procedimento análogo ao apresentado na seção 4.2, foram obtidas as expressões analíticas que relacionam ΔU^* com a variação máxima da densidade aparente (ΔD_{ap}^*) e com a variação máxima da pressão efetiva de compactação (ΔP^*). Foi estimado um valor para este último parâmetro de 10 kg/cm^2 , baseando-se nas diferenças de compacidade que podem ser encontradas entre as compacidades médias das diferentes peças de uma mesma prensada e entre prensadas distintas, sem que se altere a umidade do pó das mesmas.

4.3.1. Efeito das diferentes variáveis de operação no ΔU^*

Os valores de ΔU^* foram calculados para os distintos materiais estudados modificando o formato, a tolerância no calibre e a homogeneidade da temperatura máxima de queima (ΔT^*). Os resultados são mostrados na Tabela 2.

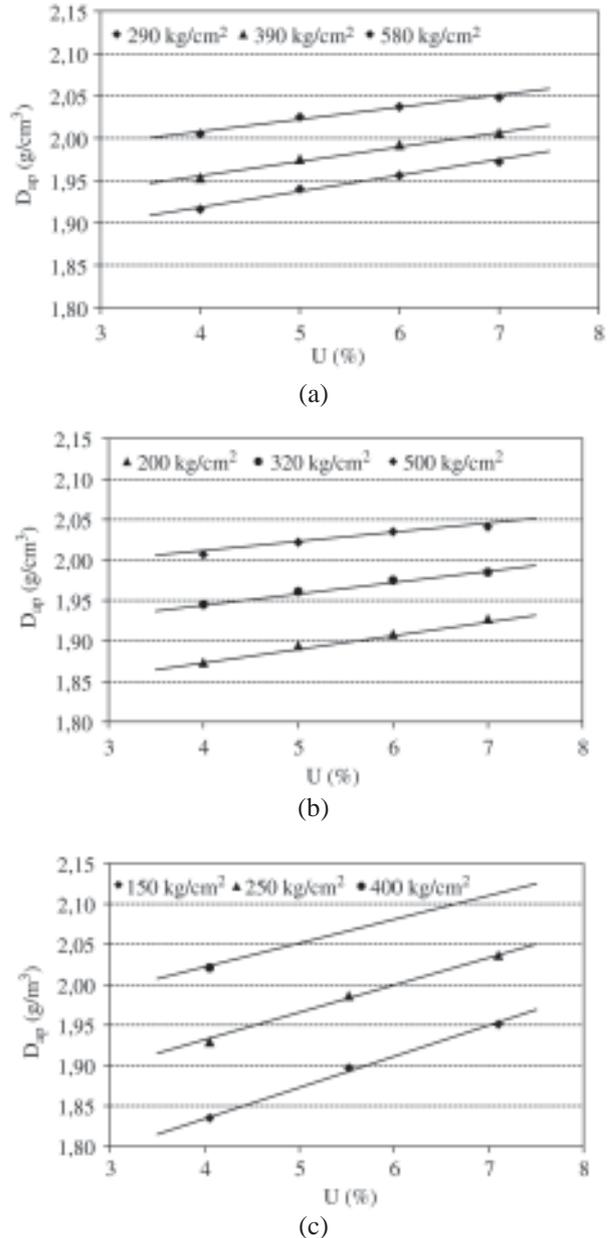


Figura 3. Diagramas de: a) compactação do grês porcelânico; b) pavimento branco; c) pavimento vermelho.

Tabela 2. Variação máxima permitida da umidade da pó das prensas, (ΔH^* (%)).

Tolerância de calibre (mm)	Formato (cm × cm)	$\Delta T^* = 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$			$\Delta T^* = 3 \text{ }^\circ\text{C}$		
		V	B	P	V	B	P
1	30 × 30	0,6	2,0	1,4	0,4	1,3	1,2
	40 × 40	0,3	1,2	0,9	0,2	0,6	0,8
	60 × 60	0,1	0,5	0,5	-	-	0,4
1,5	30 × 30	1,0	3,4	2,2	0,9	2,8	2,1
	40 × 40	0,7	2,3	1,6	0,5	1,7	1,5
	60 × 60	0,3	1,2	0,9	0,2	0,6	0,8

Dos resultados da tabela anterior se infere que, para os três materiais analisados, ΔU^* se reduz com o aumento do tamanho final das peças. Ainda, a variação máxima permitida da umidade é muito menor para as peças de piso vermelho (V) que para as peças dos outros materiais. Apesar da restrição destes resultados, especialmente para o grês vermelho, já que seria praticamente impossível obter peças de um único calibre para formatos grandes, o fato da retração linear deste tipo de material poder ser alterada modificando a temperatura máxima de queima, se for necessário, permite que se produzam peças de grande tamanho e com um calibre majoritário. O mesmo pode ser dito para os pisos brancos (B).

Contrariamente, o grês porcelânico apresenta uma problemática distinta; ainda que apresente um ΔU^* superior ao da composição de piso vermelho, o que sugere uma menor tendência à aparição de calibres por este conceito, as alterações de tamanho que podem ser produzidas como consequência das diferenças na compacidade a cru não podem ser corrigidas na fase da queima, já que o efeito da temperatura na retração linear, para valores de absorção de água muito baixos, é praticamente nulo. Como consequência, para estes materiais, a fabricação de peças de grande formato requer um aumento na tolerância do calibre.

4.4. Medidas Contínuas da Umidade dos Suportes Recém Prensados

Os fatos anteriormente expostos apontam para a necessidade de modificação da pressão de compactação para manter a compacidade a cru das peças quando se varia a umidade do pó das prensas acima de ΔU^* , especialmente para peças de grês porcelânico, se deseja-se manter o calibre. Em outros casos se pode atuar, para obter um único calibre, modificando a retração de queima ao variar adequadamente a temperatura máxima de queima. Para conseguir de maneira efetiva uma compacidade da peça mais ou menos constante é imprescindível, supondo um bom funcionamento da prensa, que as variações de umidade do pó das prensas sejam inferiores a ΔU^* ou que se conheça, de forma contínua, esta variável para modificar convenientemente a pressão de compactação. Em ambos os casos é imprescindível medir a umidade do pó das prensas de forma contínua.

Neste trabalho foi desenvolvido e produzido um sistema capaz de medir esta variável continuamente, utilizando um medidor de umidade, modelo MM710 da marca Infrared Engineering, baseado na absorção da radiação infravermelha por parte das moléculas de água contidas em um sólido^{14,16}. O sistema já é utilizado com êxito para a medida da umidade do pó atomizado à saída do atomizador e permite controlar de forma automática a operação de secagem por atomização de suspensões cerâmicas¹⁵. Porém, dada a particularidade da nova aplicação, considerou-se oportuno realizar uma série de experimentos prévi-

os à instalação do equipamento na prensa industrial.

4.4.1. Experimentos em escala de laboratório. Produção do equipamento

4.4.1.1. Medida contínua da umidade dos suportes em condições estáticas. Incidência de diferentes condições de operação sobre a medida da umidade

Para poder produzir o equipamento se realizou um experimento em laboratório consistindo em registrar simultaneamente a perda de massa de um suporte recém prensado em condições ambientais e o sinal elétrico proporcionado por um sensor, durante um tempo suficiente para permitir a secagem do suporte até alcançar a umidade de equilíbrio com o ambiente. Para isto, foi situado um suporte úmido sobre uma balança, com o sensor de umidade orientado para a superfície do mesmo (Fig. 4). Esta montagem permitiu realizar uma leitura simultânea da perda de massa do suporte e do valor gerado pelo equipamento.

Na Fig. 5 estão representadas as leituras do medidor de umidade durante o experimento, em função da umidade real do suporte. Observa-se que a relação entre as duas variáveis é praticamente linear, o que demonstra a capacidade do equipamento para medir a umidade de maneira contínua.

Este mesmo experimento foi repetido para diferentes valores de umidade relativa (desde 60% até 45%) e de temperatura (desde 25 °C até 40 °C) do ar ambiente, obtendo-se uma correlação similar à da Fig. 5, o que demonstra que, no intervalo estudado, a medida de umidade com o sensor é independente destas variáveis.

Não obstante, o sensor de infravermelhos dispõe de um sistema de refrigeração autônomo que permite manter seus elementos internos a uma temperatura constante, compensando desta maneira a possível influência da temperatura ambiente e do aquecimento dos dispositivos do siste-

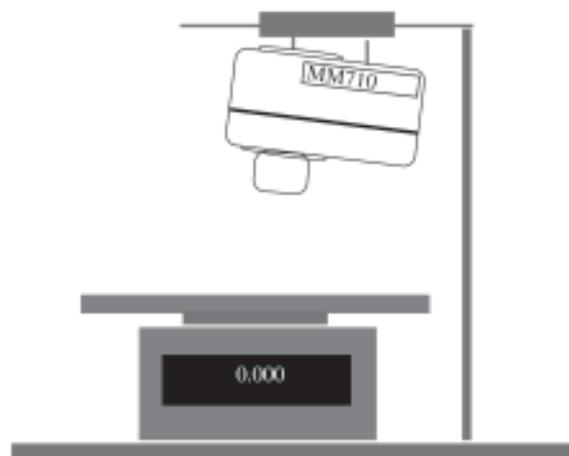


Figura 4. Medida da umidade do suporte em condições estáticas.

ma com o tempo de funcionamento do equipamento, sobre a medida da umidade. Para analisar a influência da incidência da temperatura interna na leitura do sensor e verificar o funcionamento do equipamento no caso do sistema de refrigeração não funcionar corretamente, realizou-se um experimento semelhante ao anterior, desconectando o sistema de refrigeração. Durante o mesmo, a temperatura do sensor aumentou 10 °C mas a correlação entre o sinal registrado e a umidade do suporte durante a secagem foi similar à apresentada na Fig. 5, o que demonstra a estabilidade do sensor ainda que sem o funcionamento do sistema de refrigeração, ao menos para uma variação da temperatura do equipamento da ordem de 10 °C.

4.4.2. Experimento em escala industrial

4.4.2.1. Instalação do sistema na indústria

Uma vez realizada a viabilidade do equipamento em escala de laboratório, procedeu-se à sua instalação em uma indústria. O equipamento foi situado imediatamente depois da prensa, mais exatamente atrás do volteador e antes da entrada dos suportes recém prensados no secador (Fig. 6). A área de medida do sensor é uma circunferência de 50 mm de diâmetro.

O sistema de medida dispõe de uma série de fotocélulas que proporcionam informação ao sensor sobre a presença de peças em seu campo de medida de modo que, se não passam peças sob o sensor, este não gera sinal. Quando se detecta a entrada de uma peça no campo de medida, o sensor começa a medir com uma velocidade máxima de dez medidas por segundo, de modo que o sistema seja capaz de

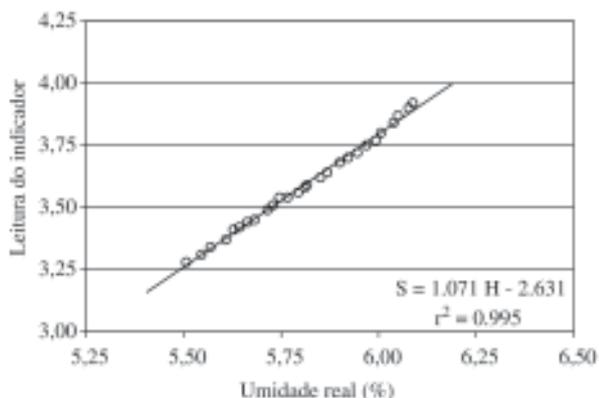


Figura 5. Relação entre a umidade do suporte e a leitura do sensor.

proporcionar, em função do formato da peça e de sua velocidade de passagem sob o sensor, vários valores de umidade para cada peça. Foi desenvolvido um software que permite fazer uma média dos valores de umidade medidos pelo sensor para cada peça, tomando este valor médio como a umidade da peça.

4.4.2.2. Calibração do sistema

Uma vez situado o equipamento na instalação industrial, procedeu-se à realização da calibração do mesmo em condições reais de operação. Para tal, deve-se estabelecer a relação entre a umidade real das peças secadas em estufa e o sinal do sensor.

Para realizar a calibração, comprovou-se previamente que a umidade das peças prensadas determinadas por secagem em estufa coincidia com a do pó atomizado que estava alimentando as prensas neste momento (Tabela 3). Como se infere dos resultados obtidos, os valores são muito parecidos, sendo ligeiramente inferior a correspondente à umidade do suporte prensado, devido provavelmente ao tempo transcorrido desde a extração do molde da prensa até o momento da pesagem.

Este fato permitiu utilizar o valor da umidade do pó atomizado como o valor real da umidade dos suportes, facilitando o processo de calibração. Efetivamente, medir a umidade por secagem em estufa dos suportes é muito mais tedioso do que medir a umidade secando em estufa o pó atomizado, devido à sua elevada compacidade, o que au-

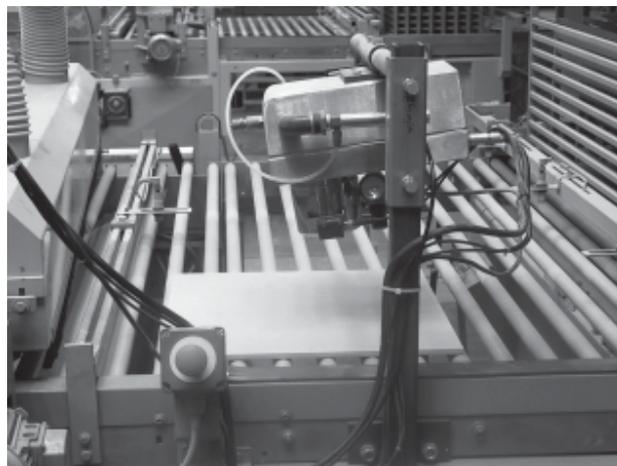


Figura 6. Visão do equipamento de medida de umidade dos suportes na linha de produção.

Tabela 3. Comparação entre a umidade do pó das prensas e a dos suportes prensados (%).

Umidade do pó das prensas	6,1	6,1	6,1	5,8	5,8	6,4	6,3	6,3
Umidade dos suportes	6,0	6,1	6,0	5,7	5,7	6,3	6,3	6,3

menta o tempo de secagem, à necessidade de dispor de uma balança ao lado da prensa para pesar o suporte imediatamente após a prensagem, ainda que o pó atomizado possa ser recolhido em uma bolsa plástica sem perder a umidade, e à dificuldade de manejar as peças recém prensadas, tanto por seu tamanho como pela sua baixa resistência mecânica, o que faz com que as chances de quebra das mesmas sejam elevadas.

A calibração do sensor industrial foi então realizada a partir da umidade do pó atomizado que alimenta a prensa e do valor indicado pelo equipamento na passagem do suporte prensado sob o leitor. Os valores de umidade real medidos e os registrados pelo equipamento de infravermelhos são representados na Fig. 7.

Nesta figura se observa que os valores se ajustam bem a uma linha reta, cuja equação é:

$$U = 0,949 \cdot S + 1,932 \quad r^2 = 0,927 \quad (6)$$

onde:

U = umidade do suporte (%)

S = leitura do indicador

O desvio típico dos valores medidos em relação aos estimados a partir desta regressão, para um intervalo de confiança de 85%, é de 0,10%, suficiente para a precisão necessária, motivo pelo qual se utilizará a Eq. 6 como reta de calibração do sensor de umidade.

Esta reta de calibração foi obtida para um pó das prensas utilizado na fabricação de peças de grês porcelânico esmaltado sem corantes na massa. Foi comprovado que, ao adicionar pequenas proporções de pigmento (< 0,5% em massa), a reta de calibração se mantém. Entretanto, para outros tipos de composições ou para proporções superiores de pigmento, deve ser obtida outra reta de calibração correspondente, já que a absorção da radiação infravermelha é influenciada pela composição química do sólido e pela sua cor. Assim mesmo, foi constatado que as possíveis modificações que podem ser produzidas na coloração e/ou na com-

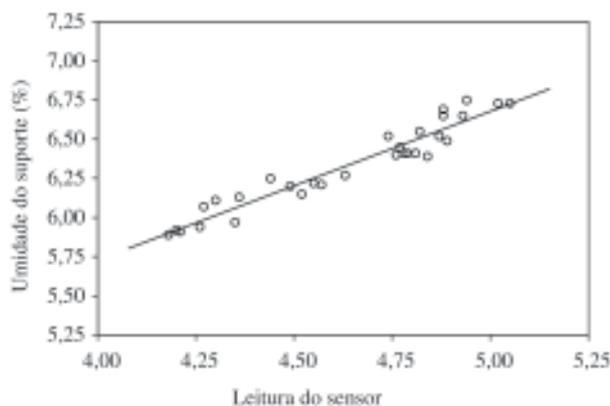


Figura 7. Calibração do sensor de umidade por infravermelho.

posição química do pó das prensas com o tempo, dado ao caráter natural da maior parte das matérias-primas de sua composição, afetam a reta de calibração, devendo ser corrigida de acordo com as variações detectadas.

4.4.2.3. Influência da compactidade da peça na medida de sua umidade

Nesta seção se pretende comprovar se alterações na compactidade da peça modificam o valor da medida da umidade com o sensor de infravermelho. Para tal, foram prensados suportes a diferentes pressões durante um período de tempo no qual a umidade do pó das prensas permaneceu constante.

A Fig. 8 representa a umidade medida pelo sensor de infravermelho em função da compactidade da peça. Apesar da umidade real do pó das prensas permanecer constante, a medida pelo sensor de infravermelhos é maior quando se aumenta a compactidade da peça.

Este comportamento é devido à secagem do suporte desde a prensa até quando passam sob o sensor e ao efeito da compactidade do suporte sobre o mecanismo de secagem. Efetivamente, a etapa que controla a secagem das peças é a difusividade da água desde o interior da peça até a superfície da mesma, e o parâmetro que caracteriza este comportamento é o coeficiente de difusão, cujo valor aumenta com o aumento da compactidade da peça. Como resultado disto, ao aumentarmos a compactidade da peça, o processo de secagem da mesma é mais lento e a umidade que a peça tem no momento que passa sob o elemento de medição é maior, ainda que sua umidade inicial seja a mesma.

Para reduzir este efeito na medida do possível, se aconselha situar o sistema de medida da umidade o mais próximo possível da saída da prensa. Em qualquer caso, o efeito desta variação sobre a medida da umidade é muito pequeno ($4,31\%/(g/cm^3)$) para a composição estudada e pode ser corrigido a partir do ajuste dos dados experimentais apresentados na Fig. 8.

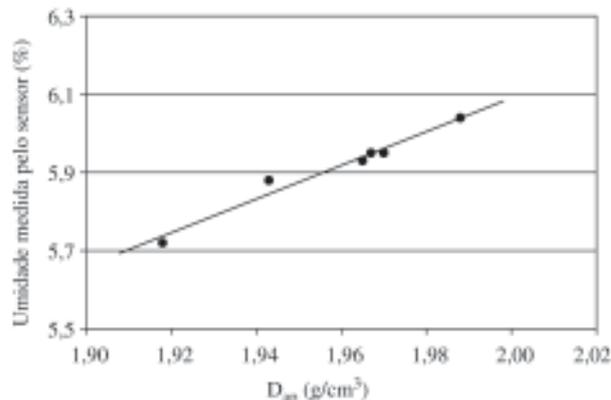


Figura 8. Influência da compactidade da peça na medida da umidade.

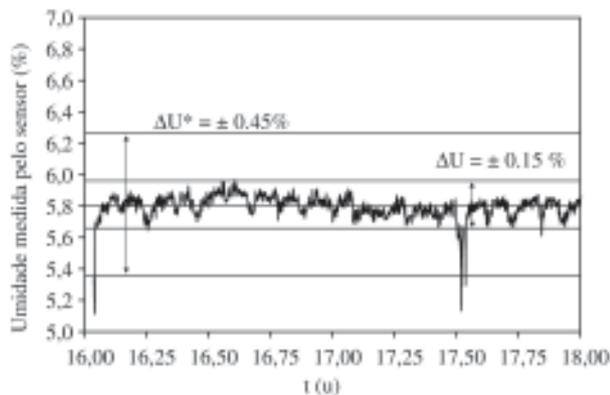


Figura 9. Evolução da umidade dos suportes recém prensados.

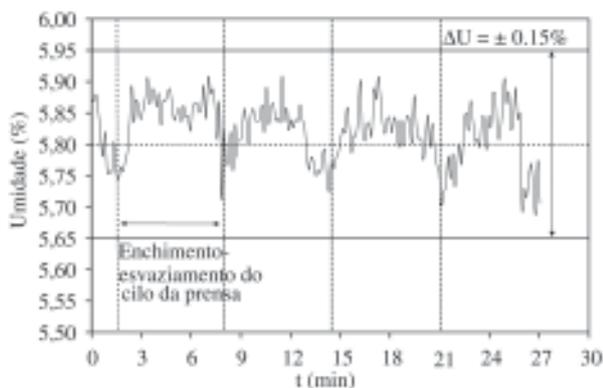


Figura 10. Variações de umidade devidas aos ciclos de enchimento do silo (tolva).

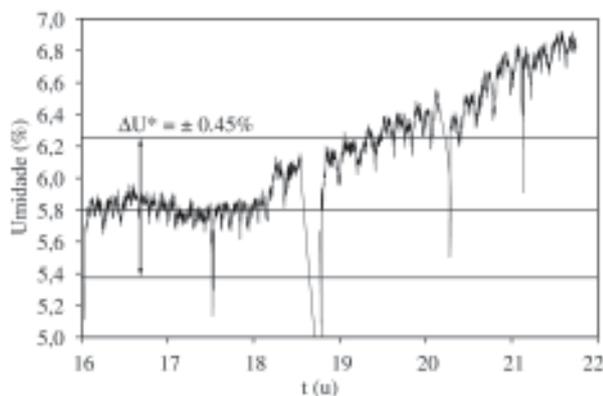


Figura 11. Evolução da umidade de prensagem em condições de aparição de calibres.

4.4.2.4. Medida contínua da umidade de prensagem. Análises de casos reais

Com o sistema de medida devidamente calibrado, foi

realizado um acompanhamento da evolução da umidade dos suportes recém prensados à saída da prensa com o tempo, sendo apresentados a seguir alguns dos resultados mais interessantes.

Na Fig. 9 está representada a evolução da umidade dos suportes recém prensados durante 2 h, em condições normais de funcionamento da prensa. Na mesma figura se pode observar que, durante o período analisado, a umidade se manteve praticamente constante em torno de 5,8%, com uma variação máxima de $\pm 0,15\%$, inferior ao valor máximo permitido de variação da umidade calculada para este tipo de produto (grês porcelânico esmaltado), tamanho final das peças ($45 \times 67,5$ cm) e tolerância de calibre considerada (1,5 mm), que é $\pm 0,45\%$.

Se analisarmos com maior detalhe os valores experimentais da Fig. 9, centrando a atenção em um período de tempo mais curto (30 min), se obtém a Fig. 10. Na mesma se observa que, em condições normais de funcionamento da prensa, a variação da umidade de prensagem com o tempo é cíclica, coincidindo a frequência destes ciclos com o tempo enchimento-esvaziamento do silo (tolva) que alimenta o pó atomizado da prensa. O fato do enchimento do silo (tolva) não ser contínuo faz com que o tempo de permanência do pó atomizado no mesmo seja distinto e sua umidade se modifique conforme vá saindo do silo (tolva), devido à secagem do mesmo. Estas flutuações são intrínsecas do processo de enchimento-esvaziamento do silo (tolva) e, no que é possível ser feito, podemos estabelecê-las como $\pm 0,15\%$, ainda que este valor dependerá, fundamentalmente, das características do silo (tolva) (tamanho, se é coberto ou não, etc.) e de sua gestão (tempo de enchimento, etc.).

Na Fig. 11 está representada a evolução da umidade de prensagem durante 6 h, sendo as duas primeiras as observadas na Fig. 9. Nota-se que, a partir de um certo tempo (18 h), a umidade de prensagem começa a aumentar lenta porém continuamente. Durante aproximadamente uma hora e meia a umidade aumenta mas se mantém abaixo de ΔU^* , porém, transcorrido este tempo, a umidade de prensagem continua aumentando, situando-se acima da variação máxima permitida e provocando a existência de calibres no produto final.

Com base nos resultados obtidos, é proposto um sistema de controle automático da prensa que permita, a partir da medida contínua da umidade de prensagem e do conhecimento de ΔU^* , corrigir de modo automático a pressão máxima de compactação, de acordo com os diagramas de compactação do pó, e reduzir os calibres no produto final, ao manter constante a compactidade do suporte cru (Fig. 12).

5. Conclusões

Do trabalho realizado podem ser extraídas as seguintes conclusões:

- Os calibres das peças de grês porcelânico são devi-

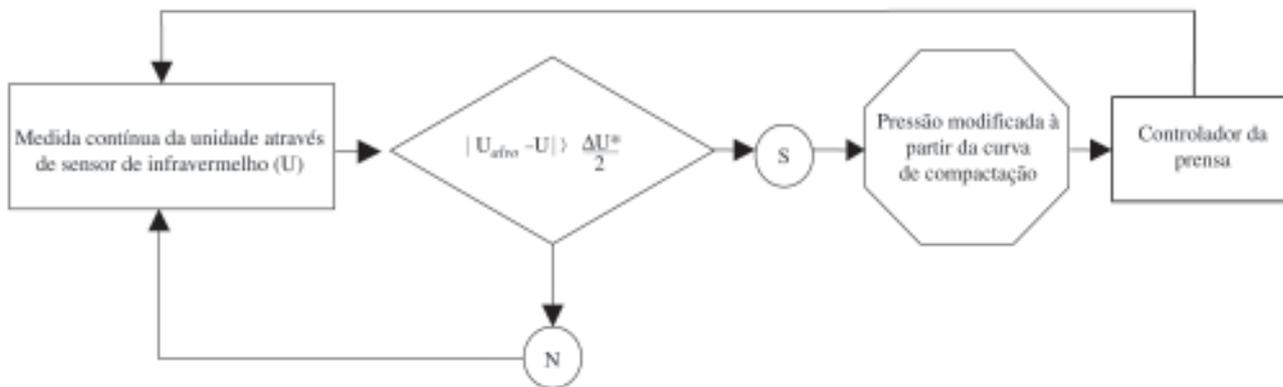


Figura 12. Esquema de controle automático proposto para a operação de prensado.

dos, fundamentalmente, a variações da compactidade média dos suportes crus já que, ao contrário dos outros pisos, estas variações não podem ser corrigidas na etapa da queima, devido à baixa sensibilidade de retração linear destes tipos de materiais com a temperatura máxima de queima.

- Para obter peças de grês porcelânico do mesmo tamanho é necessário, em condições de funcionamento correto da prensa, que a umidade do pó das prensas se mantenha constante ou que as flutuações sejam conhecidas em tempo real para modificar convenientemente a pressão máxima de compactação, especialmente para grandes formatos, pois a tolerância máxima de variação destes produtos é muito baixa ($\Delta U^* < \pm 0,5\%$).
- A umidade de prensagem pode ser medida continuamente e com suficiente precisão, mediante o sistema utilizado neste trabalho, baseado em um sensor de infravermelho, o que possibilita o controle automático da prensa para manter constante a compactidade média dos suportes, reduzindo os calibres particularmente e peças de grês porcelânico.

Referências

1. Amorós, J.L.; *Pastas cerámicas para pavimentos de monococción. Influencia de las variables de prensado sobre las propiedades de las piezas en crudo y sobre su comportamiento durante el prensado y la cocción*. Tesis doctoral. Universitat de València, 1987.
2. Bagán, V.; *Efecto de las condiciones de operación, en las distintas etapas del proceso, sobre las propiedades y características del pavimento de muy baja porosidad*. Tesis doctoral. Universitat de València, 1991.
3. Orts, M.J.; *Sinterización de piezas de pavimento gresificado*. Tesis doctoral. Universitat de València, 1991.
4. Escardino Benlloch, A.; Amorós Albaro, J.I.; Enrique Navarro, J.E. Estudio de pastas de gres para pavimentos. *Bl. Soc. Ceram. Vidr.*, v. 20, n. 1, p. 17-24, 1981.
5. Amorós, J.L.; Blasco, A.; Beltrán, V.; Negre, F.; Arrébola, C. Pastas de gres de monococción. Influencia de las Variables del proceso en la calidad del producto acabado. *Técnica Cerámica*, v. 120, p. 1368-1384, 1984.
6. Bagán, V.; Enrique, J.E.; Mallol, G.; Sánchez, E.; Gres porcelánico. Influencia de las variables de proceso sobre la calidad del producto acabado. *Cerámica Información*, 161, 37-46, 1990.
7. Amorós, J.L.; Escardino, A.; Sanchez, E.; Zaera, F.; Stabilità delle dimensioni nelle piastrelle porose monocotte. *Cerámica Informazione*, v. 324, p. 56-67, 1993.
8. Amoros, Albaro, J.I.; Blasco Fuentes, A.; Enrique Navarro, J.E.; Beltran Porcar, V.; Escardino Benlloch, A. Variables En La compactacion de soportes cerámicos de pavimento y revestimiento. *Técnica Cerámica*, v. 105, p. 792-812, 1982.
9. Técnicas experimentales del control de la compactacion de pavimentos y revestimientos cerámicos. *Tecnica cerámica*, v. 116, p. 1234-1246, 1983.
10. Amoros Albaro, J.I.; Escardino Benloch, A.; Beltran Porcar, V.; Enrique Navarro, J.E.; Control de la compactacion durante el proceso de fabricación de pavimentos y revestimentos cerámicos. *Técnica cerámica*, v. 118, p. 1307-1314, 1983.
11. Blasco, A.; Llorens, D.; Mallol, G.; Jarque, J. C. 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.
12. Amoros, J.L.; Sanchez, E.; Garcia Ten, J. *et al. Manual para el control de la calidad de las materias primas arcillosas*. Ed. Instituto de Tecnología Cerámica- AICE, ISBN, 84-923176-1-2, 1998.
13. Sánchez, J.; Portoles, J.; Negre, F.; Mallol, G.; Monzó, M.; Monfort, E.; Estudio de la dinámica del ciclo de prensado y su influencia sobre la compactación de baldosas cerámicas mediante la sensorización de una prensa industrial. *Cerámica Información*, v. 204, p. 27-37, 1994.
14. Negre, F.; Jarque, J. C.; Mallol, G.; Saéz, M. Determinación en contínuo y en tiempo real de la humedad del povo cerámico por atmización. *Tecnica Cerámica*, v. 200, p. 34-42, 1992.
15. Negre, F.; Jarque, J.c.; Feliu, C.; Enrique, J.E. Estudio de la operación de secado por atomización de polvos cerámicos a escala industrial, su control y automatización. *Técnica Cerámica*, v. 228, p. 736-744, 1994.
16. Mallol, G.; Llorens, D.; Feliu, C. Castro, F.; Medida em contínuo de la humedad de los soportes cerámicos prensados, *Cerámica Informazion*, v. 289, p. 81-90, 2002.