

Análise e Medida de Fatores que Afetam as Curvaturas Retardadas em Porcelanato

V. Cantavella^a, J. García-Ten^a, E. Sánchez^a,
E. Bannier^a, J. Sánchez^b, C. Soler^b, J. Sales^b

^aInstituto de Tecnología Cerámica – ITC, Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas – AICE, Universitat Jaume I, Castellón, España

^bTaulell, S.A. Tau Cerámica, Castellón, España

*e-mail: cantave@itc.uji.es

Resumo: Os revestimentos cerâmicos de porcelanato, tanto os esmaltados como os não esmaltados, apresentam um fenômeno conhecido como “curvaturas retardadas”, que consiste na mudança de curvatura das peças depois da saída do forno. Este fenômeno é mais problemático a medida de aumentam as dimensões das peças. Neste trabalho se quantificou a variação da curvatura ao longo do tempo em peças industriais de porcelanato esmaltado, observando-se que a curvatura parece apresentar uma evolução em um sentido (habitualmente em direção ao sentido côncavo, ou em forma de barco) para, após transcorrido certo tempo, inverter esta tendência. A cinética deste processo foi parametrizada considerando que existem dois mecanismos, simultâneos e antagônicos, com cinéticas diferentes. As análises teóricas apontam que somente existem dois fatores que podem produzir curvaturas retardadas: as tensões residuais e a expansão dos suportes. Em ambos os casos é necessário condições adicionais para que as curvaturas efetivamente se manifestem: Deste modo, por exemplo, a presença de tensões residuais não é sinônimo de curvaturas retardadas, mais sim um mecanismo adicional que permita a liberação progressiva destas tensões; este mecanismo é chamado de fluência. Além disso é necessário que o perfil de tensões residuais não seja simétrico em relação ao plano central da peça. No que diz respeito a expansão dos suportes, também são necessárias condições especiais para que estas possam provocar curvaturas retardadas; em particular, é necessário que estas sejam diferentes nas duas faces da peça (face lisa e tardez). Uma expansão uniforme provocaria uma leve mudança dimensional, mas não uma curvatura retardada, nem mesmo para peças esmaltadas. A medida dos fatores que influenciam sobre as curvaturas retardadas é complexa pois requer o emprego de técnicas diferentes das habitualmente empregadas para a caracterização de revestimentos cerâmicos. Foram criados, especialmente para este trabalho, procedimentos para a medida dos diferentes fatores que produzem as curvaturas retardadas e se estudou a influencia de algumas variáveis sobre estes fatores.

Palavras-chave: *porcelanato, curvatura retardada, tensões residuais.*

1. Introdução

Uma significativa porcentagem de revestimentos cerâmicos, independentemente de sua porosidade, apresentam o fenômeno chamado de “curvaturas retardadas”. Este consiste na mudança de curvatura das peças após a sua saída do forno durante um período de tempo que pode chegar a alcançar varias semanas ou meses.

Mesmo que as curvaturas retardadas não sejam desconhecidas para o setor cerâmico, atualmente devido ao aumento nas dimensões das peças fabricadas, isso pode representar um sério problema. A presença de curvaturas retardadas origina problemas durante a fase de classificação e sobre a qualidade do produto final. É necessário conhecer a curvatura final que alcançará a peça com o objetivo de estabelecer com que curvatura devem sair do forno, na tentativa de se estabelecer critérios para sua classificação.

As curvaturas retardadas em revestimentos porosos ou azulejos apresentam uma tendência de se tornarem côncavas com o tempo, possivelmente como consequência da expansão que apresentam os suportes devido a sua elevada porosidade (que permite a absorção de água) e a presença de fases que se expandem ao hidratar-se^{1,2}.

Em porcelanato, tanto esmaltado como não esmaltado, este comportamento é particularmente surpreendente. Já que a curvatura parece mostrar uma evolução em um sentido (habitualmente o sentido côncavo), para depois de passado certo tempo, inverter esta tendência. A mudança na evolução da curvatura, unido à baixa porosidade do porcelanato (absorção de água inferior a 0,5%) e a baixa proporção de fases hidratáveis presentes nas peças queimadas indicam que a causa para este comportamento é muito mais complexa.

Neste trabalho se estuda os fatores que podem afetar o desenvolvimento de curvaturas retardadas em peças de porcelanato, tanto de forma direta como indireta. Muito trabalho ainda precisa ser feito no campo das curvaturas retardadas, mas os resultados obtidos permitem estabelecer as bases para estudos mais sistematizados.

2. Medida da Evolução da Curvatura com o Tempo

O primeiro passo no estudo das curvaturas retardadas em peças de porcelanato foi a quantificação da magnitude e da cinética das curvaturas.

Os ensaios consistiram na medida da flecha de curvatura no centro da peça (δ_c) à diferentes instantes, usando um relógio comparador colocado sobre um suporte com três pontos de apoios (Figura 1). A flecha se determinou para cada diagonal e se calculou uma média. É importante começar a realização destas medidas imediatamente após a queima em forno industrial, dado que nestes momentos é quando a evolução da curvatura tende a ser mais rápida.

Na Figura 2 é mostrada a evolução da curvatura com o tempo durante um período de 13 dias para peças de porcelanato esmaltado de 450 x 450 mm de um mesmo modelo (Modelo-1) utilizando duas composições de suporte diferentes. Pode-se observar que enquanto a curvatura das peças conformadas a partir do pó atomizado 1 (peça 1) saem do forno com uma curvatura convexa (0,22 mm de flecha) que praticamente permanece invariável com o tempo, a curvatura da peça

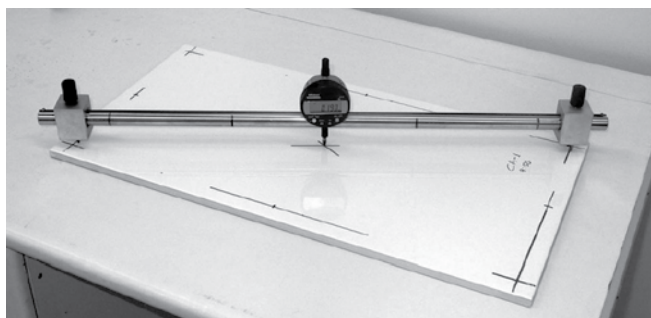


Figura 1. Dispositivo utilizado para medir a flecha de curvatura das peças industriais.

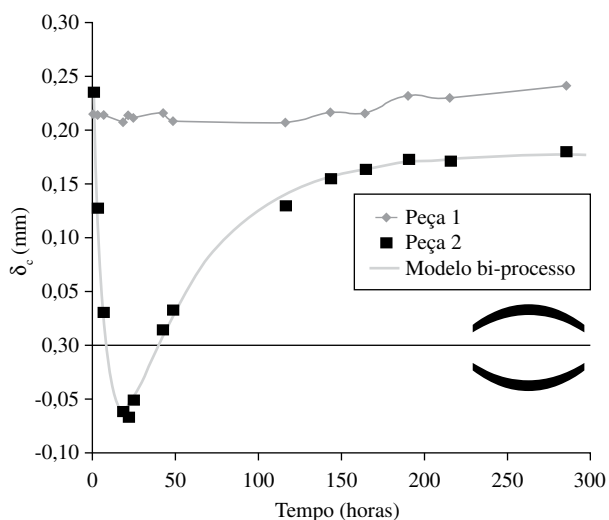


Figura 2. Evolução da flecha de curvatura das peças industriais. Modelo 1.

obtida a partir do pó atomizado 2 (peça 2) apresenta uma curvatura convexa de 0,24 mm na saída do forno, que diminui rapidamente e adquire uma curvatura côncava em 20 horas ($\delta_c = -0,06$ mm). Após este tempo a curvatura da peça evolui mais lentamente no sentido contrário até que praticamente se estabiliza aos 8-10 dias ($\delta_c = 0,17$ mm).

O comportamento descrito anteriormente é o que se observa habitualmente nas peças de porcelanato esmaltado, mudando apenas a magnitude dos valores da flecha de curvatura e a velocidade de evolução em função dos vários fatores como o tipo de modelo, pó atomizado, ciclo de queima, temperatura máxima, condições ambientais, etc.

A evolução da curvatura com o tempo descrita sugere que a peça está submetida a dois fenômenos opostos: um mais rápido que tende a diminuir a flecha de curvatura e outro mais lento que tende a aumentar. Assim, se pode descrever que a evolução global da curvatura se deve à soma destes dois fenômenos. Matematicamente esta decomposição pode-se fazer da seguinte forma:

$$\delta_c = A_1 (1 - e^{-t/\tau_1}) + A_2 (1 - e^{-t/\tau_2}) \quad (1)$$

onde: o termo $A_1 (1 - \exp(-t/\tau_1))$ corresponde ao primeiro processo e $A_2 (1 - \exp(-t/\tau_2))$ ao segundo. O parâmetro τ é uma constante de tempo relacionada com a cinética do processo, enquanto que A indica a flecha de curvatura máxima que cada um dos processos atinge. Na Figura 2 se representa esta equação para a peça 2 (linha modelo bi-processo). Pode-se observar que a equação proposta descreve adequadamente a mudança de curvatura com o tempo. A Figura 3 ilustra a contribuição de cada fenômeno no processo global.

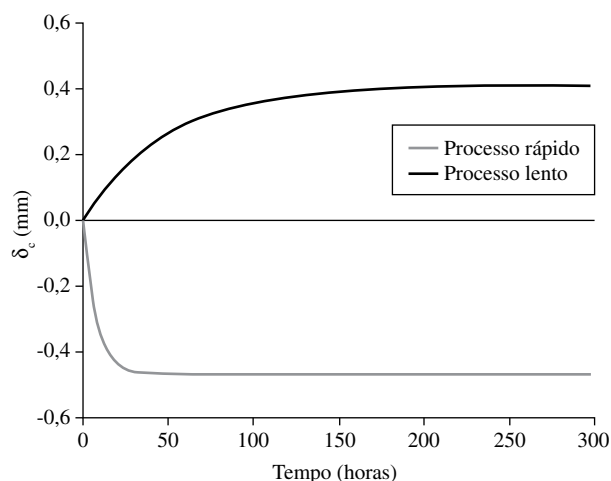


Figura 3. Contribuição dos dois processos. Modelo-1, Peça 2.

A decomposição da evolução da curvatura em dois processos não dá uma indicação a respeito das causas que originam as mesmas; simplesmente é uma quantificação e parametrização do processo, que podem simplificar a análise da influência que possa ter as diferentes variáveis que influenciam.

3. Fatores que Afetam as Curvaturas Retardadas

Os fatores que afetam as curvaturas retardadas das peças podem-se agrupar em fatores diretos e indiretos. Os primeiros se caracterizam por ser os principais causadores das curvaturas retardadas; os segundos podem influenciar nas curvaturas retardadas porque atuam sobre algum fator direto ou porque modificam a evolução da curvatura retardada (mas não são os que as geram).

3.1. Fatores diretos

Para que uma peça queimada modifique sua curvatura com o tempo e necessário que exista uma mudança nas dimensões de alguma de suas camadas em relação à outra, como poderia ser o caso da expansão do suporte de uma peça esmaltada, ou que se exerça uma força sobre ela. Este último caso pode ocorrer quando existe uma relaxação das tensões residuais presentes na peça.

Deste modo, basicamente existem dois fatores que podem causar as curvaturas retardadas: a expansão dos suportes e a relaxação de tensões residuais. Todos os demais fatores são indiretos.

3.1.1. Expansão dos suportes

Em uma peça esmaltada, a expansão do suporte pode conduzir a aparição de curvaturas retardadas, assim como se mostra na Figura 4. Esta mudança é muito similar à mudança de curvatura que se produz durante o resfriamento dentro do forno, devido ao acoplamento entre as camadas de esmalte e suporte como conseqüências das diferenças entre os coeficientes de expansão térmica de ambas as camadas. Neste caso a expansão do suporte conduzirá a obtenção de uma curvatura côncava, supondo que a peça inicialmente é plana e que o esmalte praticamente não expande.

Uma vez identificado um dos fatores que pode causar a curvatura retardada é necessário verificar se os suportes de porcelanato expandem. Mesmo que seja bem conhecido que os suportes de azulejos apresentam apreciável expansão por umidade, que pode chegar a produzir problemas de gretagem do esmalte em condições limite, esta propriedade comumente não se mede em porcelanato devido a inexistência de problemas de gretagem nestes produtos e sua reduzida porosidade.

3.1.1.1. Procedimento de medida

A curvatura retardada já pode ser observada imediatamente após as peças saírem do forno, por isso é necessário projetar e colocar em funcionamento um procedimento de ensaio que permita determinar como os suportes expandem durante este período de tempo. A principal dificuldade na execução dessa medida estava relacionada com a variação de temperatura durante o ensaio, o que pode afetar de forma considerável a precisão das medidas. Para resolver estas dificuldades foi construído um dispositivo, mostrado na Figura 5, que é capaz de auto-compensar as mudanças de temperaturas que são proporcionadas pelas peças quentes.

3.1.1.2. Resultados

Na Figura 6 é apresentada a evolução da expansão de um suporte de porcelanato após a saída do forno industrial. Observa-se que nos instantes iniciais a expansão é muito rápida, estabilizando-se a partir de 96 horas em torno de 0,18%. Este resultado depende da composição utilizada e da temperatura máxima de queima, porém, pode-se considerar como um resultado representativo para estes tipos de suportes (porcelanato). Com fins comparativos, cabe indicar que a expansão de suportes de azulejo de queima branca pode estar por volta de 0,35%. O qual difere somente um Fator 2 com relação ao valor que apresenta o porcelanato.

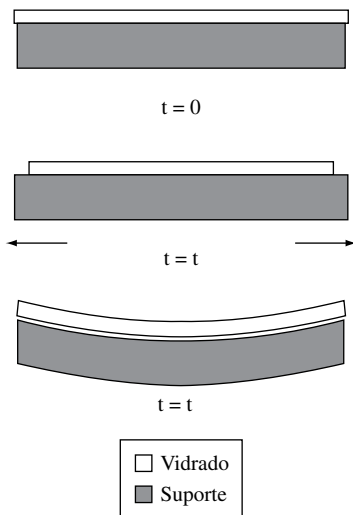


Figura 4. Representação esquemática da curvatura retardada originada pela expansão do suporte.

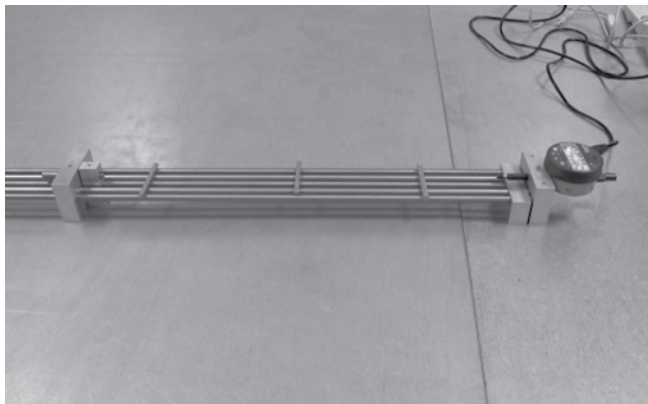


Figura 5. Dispositivo auto-compensador de temperatura para medir a expansão do suporte.

A expansão dos suportes, por si só, é insuficiente para explicar as curvaturas retardadas. Como foi indicado anteriormente, é necessária a presença de outra camada que não se deforme. Este papel poderia estar relacionado com a camada de esmalte nos produtos esmaltados; por outro lado, há revestimentos cerâmicos de porcelanato não esmaltado que também apresentam o problema de curvaturas retardadas. Por outro lado, a espessura da camada de esmalte, no caso de peças de porcelanato, normalmente é pequena (em torno de 100 μm), por conseqüência a curvatura gerada também é pequena. Na Figura 7, é mostrado o valor da flecha de curvatura que um revestimento cerâmico de 410 x 410 mm apresentará, calculada a partir da expansão típica de um suporte de porcelanato, e considerando o acoplamento com o esmalte. Como se pode observar, a expansão do suporte não é suficiente, em geral, para explicar as curvaturas retardadas, porém em alguns casos possa exercer certo papel.

Anteriormente foi considerado que a expansão do suporte é uniforme ao longo de sua espessura. Se existisse uma diferença de expansão do suporte entre a superfície e a base se poderia justificar parte da curva retardada, tanto em produtos esmaltados como nos não esmaltados. Assim, por exemplo, uma diferença de 0,1% na expansão de uma peça de tamanho 410 x 410 mm poderia provocar uma curva retardada, expressada como uma flecha, de uns 0,3 mm. Mesmo quando a expansão total de ambas as faces for a mesma, uma diferença na cinética da expansão poderia provocar mudanças no sentido da curva, similares aos observados em peças cerâmicas industrializadas. Ainda que existam indícios que apontem a possível existência desta diferença, não há resultados conclusivos sobre este ponto.

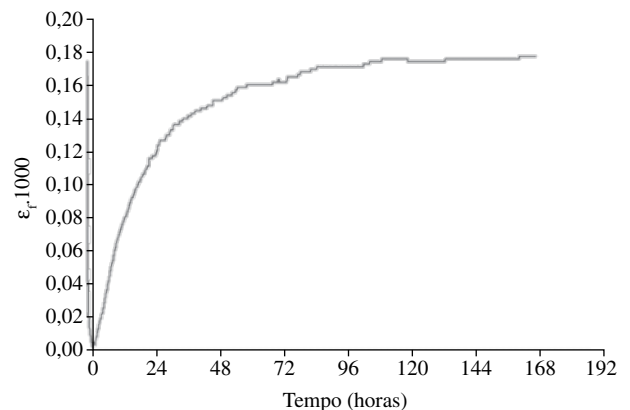


Figura 6. Evolução da expansão de um suporte de porcelanato em função do tempo.

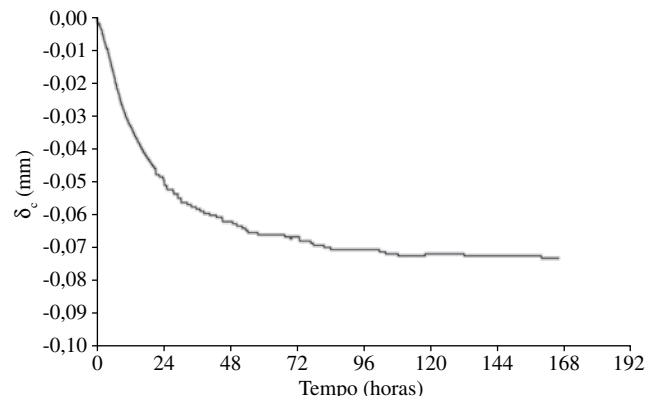


Figura 7. Curvatura retardada provocada pela expansão do suporte em porcelanato.

3.1.2. Relaxação de tensões residuais

Um das hipóteses utilizadas para explicar as curvaturas retardadas é a presença de tensões residuais nos revestimentos cerâmicos. Se estas tensões relaxam por algum mecanismo, como a fluência, poderia conduzir a variações em sua curvatura.

No entanto a existência de um perfil de tensões residuais não é sinônimo de curvaturas retardadas. É necessário, além disso, que este perfil seja assimétrico e que exista fluência. Com relação à assimetria do perfil de tensões, cabe indicar que um perfil simétrico significa que a tensão é a mesma nas duas faces, portanto a peça não terá tendência a curvar para nenhum dos dois lados. A existência de tensões residuais nos revestimentos cerâmicos pode originar-se por duas causas: (1) por esfriamento rápido da peça dentro do forno industrial, associadas aos gradientes térmicos dentro da peça; e (2) as produzidas pelo acoplamento entre o suporte e o esmalte. As primeiras são as que habitualmente assumem maior magnitude que as originadas pelo acoplamento esmalte/suporte. Isso é devido a espessura do esmalte ser muito inferior a do suporte e que o módulo de elasticidade do suporte é relativamente elevado comparado com o esmalte.

3.1.2.1. Medidas das Tensões Residuais

3.1.2.1.1. Procedimento de Medida

As tensões residuais no suporte originadas por gradientes térmicos foram medidas utilizando o processo denominado “relação de deformação por corte” (*strain relaxation slotting method*: SRSM). Este procedimento consiste em aderir uma *strain-gauge* na parte inferior da peça sem esmalte (Figura 8) e em seguida fazer cortes de profundidades (a_i) crescentes desde a superfície superior, cortando a deformação registrada pela *strain-gauge* (ϵ_{g_i}) (Figura 9).

Para poder calcular o perfil de tensões residuais é necessário conhecer a relação entre $\epsilon_g(a_i)$ e a tensão em cada ponto do interior da peça. Esta relação vem determinada por “fatores de calibração”, que devem ser calculados teoricamente para cada geometria mediante um método numérico (neste caso foi utilizado o método dos elementos finitos). Finalmente, uma vez conhecido os fatores de calibração é possível calcular o perfil de tensões.

Em alguns casos, com o objetivo de melhorar a precisão do método, utilizam-se duas *strain-gauges*, uma na superfície inferior e outra na superior, em um ponto próximo da zona do corte (Figura 10).

3.1.2.1.2. Resultados

Na Figura 11 é apresentado os valores de deformação medida por ambas as *strain-gauges* (losango e triângulo) e a curva de ajuste obtida a partir do cálculo por elementos finitos. A peça analisada foi um revestimento queimado em condições industriais. Observa-se que à medida que se incrementa a profundidade do entalhe, aumenta a deformação medida pelas *strain-gauges*. A *strain-gauge* situada no lado superior (início do corte) é muito sensível no início do corte (valores baixos de a), mas à medida que aumenta a profundidade do entalhe, esta rapidamente perde sensibilidade e passa a ser mais relevante a *strain-gauge* posicionada na superfície inferior.

A partir dos dados da Figura 11 pode-se determinar os perfis de tensões residuais para dois modelos de porcelanato esmaltado (Modelo - 1 e Modelo - 2), que se observa na Figura 12. O valor $\xi = -1$ corresponde à superfície inferior e $\xi = +1$ à superfície superior (face lisa). Em ambos os casos o perfil mostra tensões negativas (compressão) na superfície e positiva (tração) no centro. Este corresponde a um perfil típico de material temperado.

O Modelo-1 possuía tensões similares às do Modelo-2 na metade inferior da peça, mas levemente superior na metade superior; na média, se poderia afirmar que o Modelo-1 estava ligeiramente mais tensionado que o Modelo-2 e que seu perfil era mais simétrico. Experimentalmente se comprovou que o Modelo-1 não possuía a

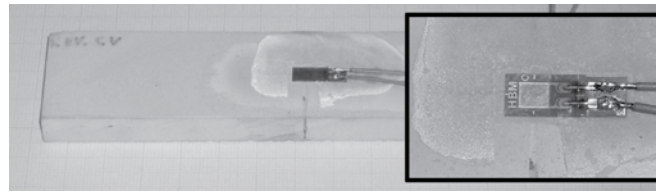


Figura 8. Ensaio de medida das tensões residuais e detalhe da *strain-gauge*.

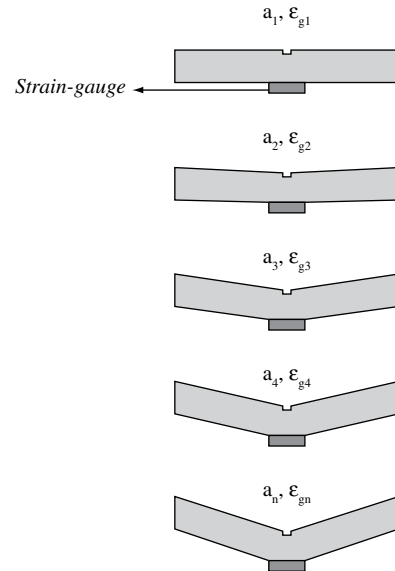


Figura 9. Representação esquemática do fundamento do método empregado para medir as tensões residuais.

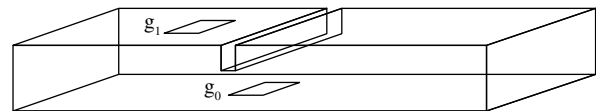


Figura 10. Localização das *strain-gauges* na superfície inferior (g_0) e superior (g_1).

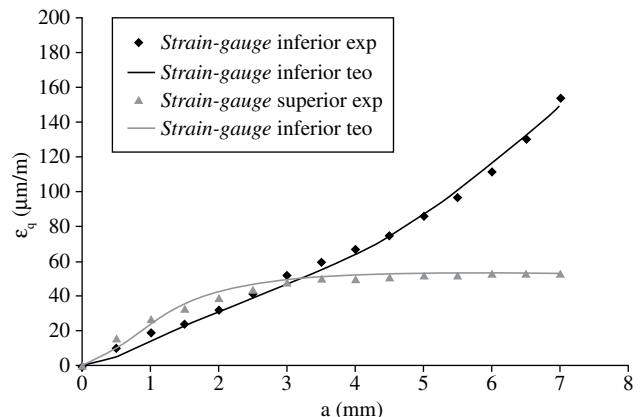


Figura 11. Deformação experimental e ajuste para uma peça de porcelanato.

tendência de apresentar problema de curvaturas retardadas, ao passo que o Modelo-2 possuía. Este resultado parece estar de acordo com o indicado anteriormente sobre a relação entre a simetria do perfil de tensões e das curvaturas retardadas. Em todo caso, para estabelecer conclusões definitivas seria necessário um maior aprofundamento sobre as medidas, analisando um maior número de peças.

3.1.2.2. Medida da Fluência

As tensões residuais, por si só, não provocam curvaturas retardadas, ainda que sejam altamente assimétricas. É necessário que exista um mecanismo em que a peça possa liberar estas tensões. Este mecanismo se conhece como fluência e, como no caso das tensões residuais, é necessário verificar se as peças de porcelanato apresentam este comportamento.

3.1.2.2.1. Procedimento de medida

Para medir a fluência utilizou-se o dispositivo mostrado na Figura 13. O dispositivo é composto por uma ponte de flexão sobre o qual se situa o corpo-de-prova a se analisar. Posteriormente se aplica uma carga constante, mediante massas, e se registra a deformação do corpo-de-prova utilizando um medidor de deslocamento (LVDT).

3.1.2.2.2. Resultados

A Figura 14 mostra os resultados obtidos. Observa-se que a deformação não é zero, o que indica que existe certa fluidez. Além disso, se distingue duas regiões uma inicial, no qual a velocidade de deformação vai diminuindo (fluidez primária), e uma segunda em que a inclinação é constante (fluidez secundária). Este comportamento se pode modelar empregando o modelo viscoelástico mostrado na Figura 15. A partir desse modelo é possível estabelecer a seguinte relação entre a flecha e o tempo:

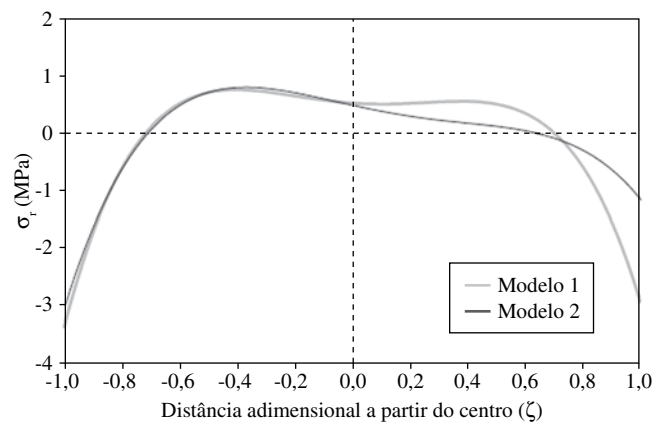


Figura 12. Perfil de tensões residuais para o Modelo-1 e Modelo-2.

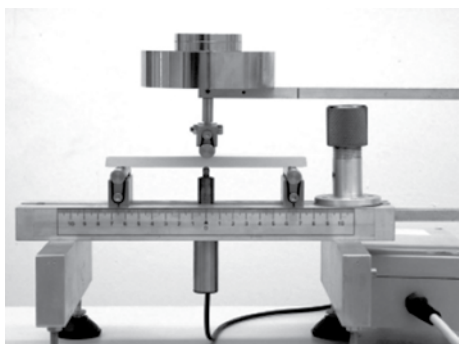


Figura 13. Dispositivo empregado para medir a fluidez

$$\delta_c = \frac{S^2 \sigma_m}{18h\eta} (\tau_D (1 - e^{-t/\tau}) + t) \quad (2)$$

onde X = tensão máxima aplicada (Pa); X = espessura do corpo-de-prova; X = viscosidade (ver Figura 15) (Pa. s); X = viscosidade (Figura 15) (Pa. s); X = módulo de cisalhamento (Pa); X = quociente (s); e X = Constante de tempo que indica a cinética do processo.

O resultado da aplicação da Equação 2 é mostrado na Figura 14, comprovando-se que foi possível reproduzir corretamente os resultados experimentais.

3.2. Fatores Indiretos

As características dos materiais empregados na fabricação de porcelanato (pós atomizados, esmaltes, etc.) junto com variáveis do processo, definem as características dos revestimentos cerâmicos, como se observa no esquema da Figura 16. Estes fatores, ainda que não sejam responsáveis diretos pela curvatura retardada, podem exercer em alguns casos, uma enorme influência sobre elas. Nesta seção analisam-se em primeiro lugar estes fatores, para posteriormente mostrar alguns exemplos da influência que exercem tanto sobre a curvatura retardada como sobre os fatores que a originam.

3.2.1. Fatores que afetam a expansão do suporte

A expansão dos suportes por ação da umidade é uma característica conhecida, existindo procedimentos normatizados para sua medida. Habitualmente, os valores de expansão por ação da umidade, em autoclave com ciclos de pressão de vapor de 5 horas a 10 bar, normalmente apresentam 0,6 e 1,0‰ para suportes de azulejos, reduzindo-se até valores inferiores a 0,3‰ para suportes de baixa absorção de água.

A expansão por umidade dos produtos cerâmicos porosos (louças e porcelana) foi amplamente estudada por sua relação com os defeitos de gretagem do vidro. Para estes produtos a origem da expansão por umidade dos suportes cerâmicos é a adsorção química

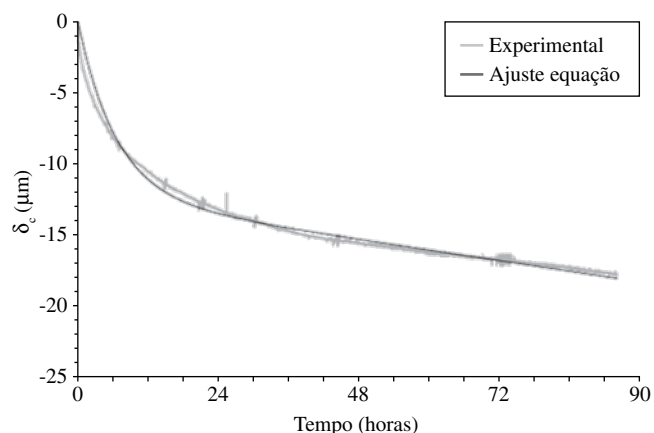


Figura 14. Deformação de um corpo-de-prova de porcelanato sob aplicação de uma carga.

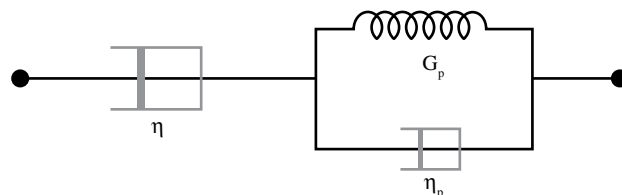


Figura 15. Modelo viscoelástico linear empregado para modelar a fluência.

e física de moléculas de água sobre as valências livres existentes nas fases hidratáveis presentes nas peças queimadas (fases vítreas e em especial fases amorfas provenientes da desidroxilação dos minerais argilosos)³. Por este mecanismo, a expansão depende principalmente da estrutura porosa da peça (que define a maior ou menor acessibilidade por parte da água)¹ e da natureza e conteúdo de fases presentes na peça queimada². Estas características estão muito influenciadas pela composição mineralógica da composição utilizada, seu tamanho de partícula e da etapa de queima⁴. Assim, à medida que aumenta a fundência da composição do suporte e a temperatura de queima ou tempo de permanência, diminui a expansão por umidade destes suportes devido à redução de sua porosidade e de seu conteúdo em fases hidratáveis⁵.

No caso das peças de muito baixa porosidade, como o porcelanato, não se encontrou trabalhos que abordam esse tema, devido provavelmente a menor expansão e ausência de defeitos de gretagem dos produtos. Entretanto, e apesar do objetivo deste trabalho não ser determinar o motivo da expansão que sofrem as peças de porcelanato na saída do forno (adsorção de umidade ou outros), é provável que os fatores que influenciam sobre a expansão por umidade nas peças porosas também o façam no caso das peças de porcelanato.

3.2.2. Fatores que afetam as tensões residuais

Ao alcançar a temperatura máxima de queima, os revestimentos cerâmicos de porcelanato estão formados por uma grande quantidade de fase líquida, quartzo e albita residual e, em certos casos, mulita⁽⁶⁾. Neste estado, a peça é capaz de relaxar qualquer tensão que se exerça sobre ela, já que apresenta uma elevada deformabilidade. É durante a fase de resfriamento quando se originam as tensões residuais nos revestimentos cerâmicos, seja por desajustes no acoplamento entre as camadas de suporte e de esmalte ou pelas contrações diferenciais que surgem como consequência da maior velocidade de resfriamento entre a periferia e o centro da peça. Assim, pode-se dizer que os fatores que determinam as tensões residuais nas peças de porcelanato são: (1) a expansão térmica, módulo de elasticidade e espessuras relativas do suporte e esmalte; e (2) a velocidade de resfriamento do suporte.

Observou-se que o aumento do desacordo da expansão térmica de ambas as faces, assim como o aumento na espessura do esmalte aumentam as tensões residuais. Deste modo, à medida que o resfriamento é mais rápido, aumenta o gradiente de temperatura no interior da peça⁷, o que conduz a diferença na velocidade de contração ao longo de sua seção transversal. Isso provoca um perfil de tensões no interior da peça que é maior à medida que aumenta a velocidade de resfriamento⁸. Porém, quando a velocidade de resfriamento não é igual por ambas as faces o perfil das tensões que se estabelece não é simétrico, como se verá mais adiante.

3.2.3. Fatores que afetam a fluência

Os fatores que atuam sobre a fluência das peças de porcelanato devem estar associados a sua microestrutura. Na Figura 17 está mostrada a seção de uma peça de porcelanato observado por um microscópio eletrônico de varredura. Ela está formada por uma matriz vítrea na qual existem numerosos poros e microfissuras. Os poros presentes podem apresentar formas arredondas e são provenientes da decomposição de certas impurezas, assim como da porosidade de elevado tamanho presente na peça crua⁹. A origem das microfissuras é variável, destacando os desacordos existentes entre as partículas de quartzo residual e a matriz vítrea⁸ e as zonas de união entre os grânulos de pó atomizado que não são deformados na sua totalidade durante a prensagem¹⁰.

A fluência em peças de porcelanato é causada muito provavelmente pelo crescimento de microfissuras existentes na peça quando esta se encontra submetida a um esforço de tração, assim os fatores que as originam serão aqueles que determinam a fluência nesse tipo de revestimento cerâmico. Foi comprovado que um aumento na quantidade de quartzo assim como no tamanho de partícula deste, origina uma microestrutura com uma maior quantidade de microfissuras, o que provavelmente aumentará a fluência das peças. Este fenômeno também pode acontecer quando o grau de moagem da composição é insuficiente.

3.2.4. Influência da coloração a seco sobre a fluência.

Foram realizados ensaios de fluência sobre corpos-de-prova obtidos a partir de revestimentos cerâmicos industriais de porcelanato esmaltado cuja única diferença era a utilização de um pó atomizado colorido a seco e sem colorir. Os corpos-de-prova tinham dimensões de 220 x 20 mm e foram desgastados na parte inferior para eliminar o tardez.

A espessura média desses corpos de prova foi de 6,4 mm e a carga aplicada de 29 MPa. Na Figura 18 observa-se que ambos os corpos-de-prova experimentam uma deformação com o tempo (fluência), que é muito rápida no início do ensaio e vai se estabilizando progressivamente com o tempo. Percebe-se que a peça que foi pigmentada a seco apresenta uma deformação bastante superior à peça sem pigmento, o que indica que a capacidade para deformar diante de uma tensão dada é muito superior nas peças com pigmento.

Ainda que neste trabalho não se tenha estudado a origem desta diferença, o motivo pelo qual a peça colorida apresenta uma fluência superior pode relacionar-se com a microestrutura que apresenta este tipo de revestimento, em que as partículas de pigmento se concentram em determinadas áreas da peça (as áreas de contato entre os grânulos do pó atomizado¹¹). Estas áreas podem atuar como defeitos iniciadores de microfissuras quando se utilizam elevadas porcentagens de pigmentos, cujo crescimento diante da aplicação de uma determinada tensão poderia ser a origem da maior fluência observada.

Fatores indiretos

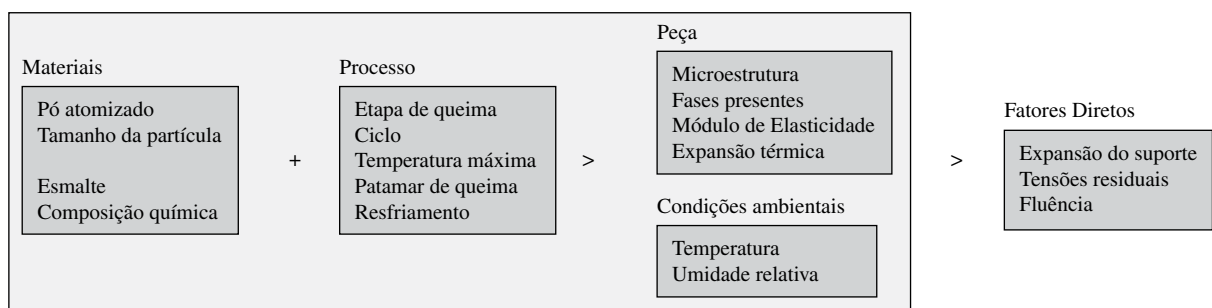


Figura 16. Fatores que afetam as curvaturas retardadas.

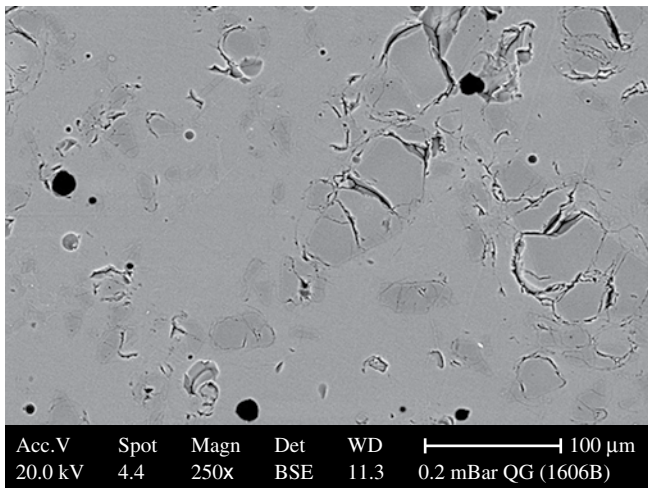


Figura 17. Seção transversal de uma peça de porcelanato

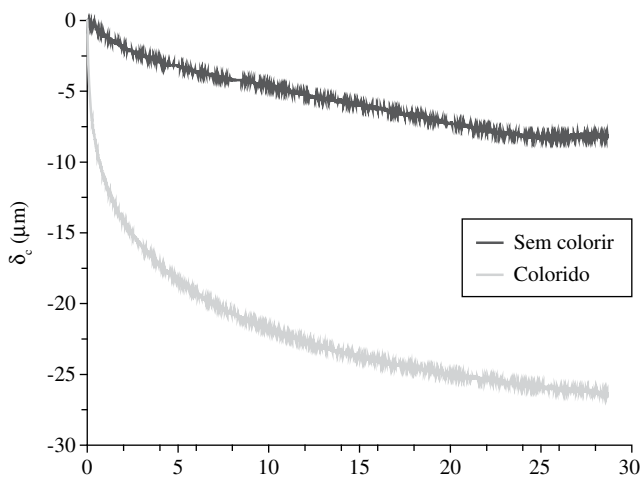


Figura 18. Influência da coloração à seco do pó atomizado sobre a fluência

A partir desses resultados não se pode concluir-se diretamente que as peças esmaltadas a seco irão apresentar maiores problemas de curvaturas retardadas, sendo que isto dependerá dos outros fatores também implicados. Visto que existem modelos esmaltados a seco que não apresentam curvaturas retardadas. No entanto, frente à existência de tensões residuais assimétricas nos revestimentos, e a igualdade de outros fatores, aqueles revestimentos que apresentarem uma maior fluência terão mais possibilidades de mudar sua curvatura com o tempo.

3.2.5. Influência da presença de esmalte sobre a curvatura retardada

A Figura 19 mostra a evolução da flecha de curvatura com o tempo para revestimentos de porcelanato esmaltado, de 300 x 600 mm, com o suporte colorido a seco, com e sem a presença de esmalte. Pode-se observar que enquanto o revestimento com esmalte apresenta uma evolução da curvatura qualitativamente similar à mostrada na seção 2, o suporte sem esmalte segue uma evolução oposta. É interessante destacar o tempo para o qual se observa a curvatura mínima na peça com esmalte (24 horas, 0,37 mm) praticamente coincide com o tempo para que se detecte a máxima curvatura no esmalte (23 horas, 1,02 mm).

As causas deste comportamento podem ser devido à existência de velocidades de expansão diferentes entre a base e a superfície superior, dado que os revestimentos são fabricados com o mesmo

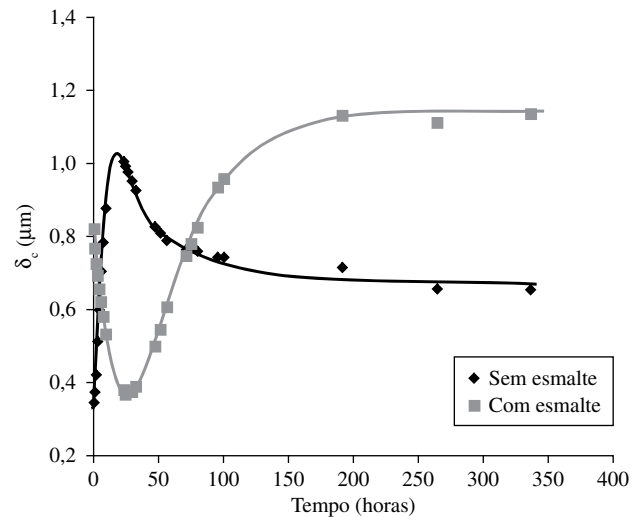


Figura 19. Evolução da flecha de curvatura de revestimentos cerâmicos com e sem esmalte.

ciclo e, portanto, as tensões residuais devido ao resfriamento devem ser similares.

Este mesmo comportamento também se observou em peças de porcelanato não esmaltado, o que parece indicar uma enorme influência exercida pelo esmalte sobre a evolução da curvatura com o tempo.

3.2.6. Influência da fase de resfriamento

A fase de resfriamento nos fornos à rolo industriais se caracteriza por apresentar um primeiro trecho de resfriamento à elevada velocidade que se realiza mediante a injeção de ar à temperatura ambiente no interior do forno. Este tipo de resfriamento gera elevados gradientes de temperatura entre a superfície e o interior do revestimento, o que conduz à existência de tensões residuais que podem originar as curvaturas retardadas.

Nesta seção estudou-se a influência do resfriamento sobre as tensões residuais do suporte. Para isso utilizou-se corpos-de-prova de 150 x 30 mm obtidos a partir de peças industriais cruas de porcelanato esmaltado, queimadas em um forno elétrico de laboratório a 1200 °C, durante 6 minutos e resfriou-se fora do forno de duas formas diferentes:

- Resfriamento simétrico: com a peça na posição vertical. Ambos os lados da peça resfriaram igualmente; e
- Resfriamento assimétrico: com a peça na posição horizontal sobre um refratário. Neste caso o resfriamento acontece basicamente na parte superior.

Na Figura 20 mostra-se o perfil de tensões para os dois corpos-de-prova resfriados de forma diferente. Observa-se que em ambos os casos as duas superfícies da peça se encontram submetidas a uma tensão de compressão, enquanto o interior da peça está tracionado, situação habitual nos materiais cerâmicos. Também se observa que o resfriamento influi consideravelmente sobre o perfil das tensões. Assim, quando o corpo de prova se esfria por igual por ambas as faces (peça resfriada em posição vertical) o perfil das tensões é simétrico, enquanto a que foi resfriada em posição horizontal sobre o refratário (esfriamento assimétrico) tem um perfil não simétrico. Estes resultados confirmam que as diferenças na velocidade de esfriamento pela parte superior e inferior da peça podem conduzir a perfis de tensões assimétricos.

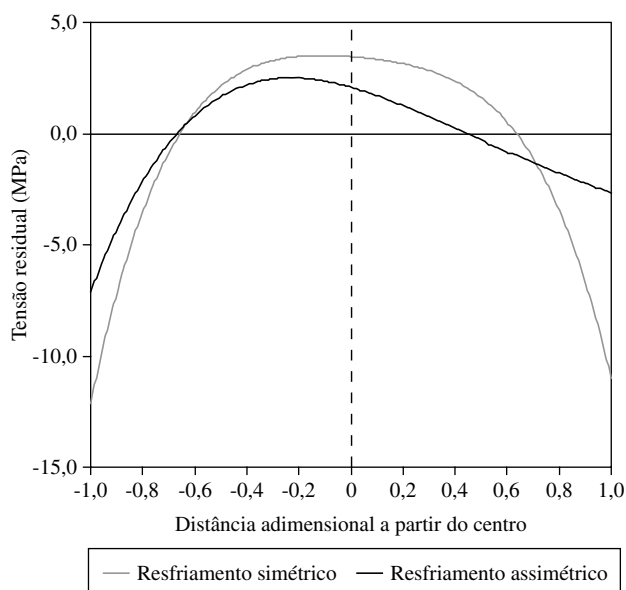


Figura 20. Perfil de tensões residuais em função do tipo de resfriamento.

4. Conclusão

Neste trabalho se estudou os fatores que podem interferir nas curvaturas retardadas de revestimentos cerâmicos de porcelanato, obtendo-se as seguintes conclusões:

Quantificou-se a variação da curvatura com o tempo nas peças industriais observando que há uma mudança em sua tendência (côncava - convexa). Isso significa que existem dois mecanismos, simultâneos e antagônicos, com cinéticas diferentes, que influem sobre o processo.

As análises teóricas indicam que existem apenas dois fatores que podem produzir as curvaturas retardadas: a expansão dos suportes e as tensões residuais. Em ambos os casos são necessárias circunstanciais adicionais para que apareçam as curvaturas retardadas; assim torna-se necessário que a expansão seja diferente pelo tardoz e pela superfície lisa. Uma expansão uniforme, provocaria uma rápida mudança dimensional, mas não uma curvatura retardada significativa, nem se quer com a presença de esmalte. No caso das tensões residuais, o perfil das tensões deve ser assimétrico e deve haver um mecanismo que permita sua liberação (fluência).

A medida dos fatores que afetam as curvaturas retardadas é complexa, porque requer o uso de técnicas diferentes das usadas habitualmente na caracterização de revestimentos cerâmicos. Foram criados e executados procedimentos para medir os diferentes fatores que produzem as curvas retardadas. Projetou-se um dispositivo auto-compensador de temperatura para medir a expansão dos suportes; foi aplicado o método denominado “relação de deformação por corte” (*Strain Relaxation Slotting Method - SRSM*) para medir as tensões residuais em peças de porcelanato e utilizou-se ensaio de flexão em 3 pontos com aplicação de uma carga constante durante vários dias, com o objetivo de confirmar a presença de fluência nos suportes de porcelanato.

Comprovou-se que os suportes de porcelanato experimentam uma expansão em sua saída do forno. Estes suportes apresentam, além disso, tensões residuais e fluência, o que poderia justificar a existência das curvaturas retardadas.

Realizaram-se experimentos, alterando o tipo de pó atomizado, eliminando o esmalte e modificando o resfriamento. Estes experimentos permitiram dispor de uma primeira informação sobre a influência das características do material e do processo de fabricação sobre a fluência, tensões residuais e a curvatura retardada.

Ainda que reste muito trabalho a ser realizado no campo das curvaturas retardadas, os resultados obtidos permitem fundamentar as bases para seu estudo mais sistemático.

Referências

- Vasic, R. M. Influence of pore size distribution of frost resistance and moisture expansion of bricks. *IMS Instit. Bull.*, v. 7, p. 15-18, 1992.
- Segadães, A. M.; Carvalho, M. A.; Ferreira, H. C. Using phase diagrams to deal with moisture expansion. *Ceram. Int.*, v. 29, n. 8, p. 947-954, 2003.
- Smith, A. N. Investigations on the moisture expansion of porous ceramic bodies. *Trans. Br. Ceram. Soc.*, v. 54, n. 5, p. 300-318, 1955.
- Schurecht, H. G.; Pole, G. R. Effect of water in expanding ceramic bodies of different compositions. *J. Am. Ceram. Soc.*, v. 12, p. 596-604, 1929.
- Harrison, R.; Dinsdale, A. The effect of temperature and pressure on moisture expansion. *Trans. Br. Ceram. Soc.*, v. 63, p. 63-75, 1964.
- Sánchez, E.; Orts, M. J.; García-Ten, J.; Cantavella, V. Porcelain tile composition effect on phase formation and end products. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, v. 80, n. 6, p. 43-49, 2001.
- Cantavella, V.; Moreno, A.; Mezquita, A.; Llorens, D.; Barberá, J.; Palanques, A. Distribución de temperaturas en el interior de una pieza durante la cocción industrial. In: congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico, qualicer 2006, IX., Castellón: Cámara oficial de comercio, industria y navegación, 2006. pp. P.BC151-P.BC164.
- Noni Jr., A.; Hotza, D.; Cantavella, V.; Sánchez, E. Influencia del enfriamiento de la etapa de cocción sobre las propiedades mecánicas del gres porcelánico. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, v. 46, n. 4, p. 163-170, 2007.
- Amorós, J. L.; Orts, M. J.; García-Ten, J.; Gozalbo, A.; Sánchez, E. Effect of green porous texture on porcelain tile properties. *J. Eur. Ceram. Soc.*, v. 27, p. 2295-2301, 2007.
- García-Ten, J.; Sánchez, E.; Mallo, G.; Jarque, J. C.; Arroyo, A. Influence of operating variables on spray-dried granule and resulting tile characteristics. *Key Eng. Mater.*, 264-268, p. 1499-1502, 2004.
- García-Ten, J.; Sánchez, E.; Quereda, P.; Saburit, A.; Sánchez, J.; Sales, J.; Soler, C. Influencia del coloreado en seco en el comportamiento mecánico de piezas crudas de gres porcelánico. In: CARDA CASTELLÓ, J.B. *Ciencia y tecnología de los materiales cerámicos y vítreos en el nuevo milenio*. Libro de resúmenes de los trabajos presentados a la XLVI reunión anual de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Castellón: Faenza editrice ibérica, 2006. pp. 42.