

Estudo Experimental das Deformações e Estado de Tensão em Materiais Cerâmicos Tradicionais

Davide Sighinolfi^a

^aExpert System Solutions, Modena, Itália

Resumo: Em geral as deformações dos materiais cerâmicos durante e após a queima pode ter uma origem complexa. Se os produtos são feitos de um único material, tais deformações são decorrentes principalmente de fenômenos piropásticos. No caso de materiais com multi-camadas (como a cerâmica vitrificada ou de produtos de tecnologia de dupla carga) dois fatores ainda devem ser considerados: o estado de tensão estabelecida entre as camadas, e suas diferenças de comportamento durante a sinterização. A técnica de contato óptico fornece dados experimentais de flexão durante o tratamento de aquecimento for apresentado. Combinado com os testes de dilatométrica óptica, uma investigação completa das deformações elásticas e plásticas que ocorrem em materiais cerâmicos tradicionais será possível. Estar familiarizado com o estado de tensão entre as verdadeiras camadas, desvios comuns, como problemas de planaridade e rachaduras, podem ser evitados. Os resultados obtidos mostram a possibilidade de obter informações confiáveis e diretas sobre os fenômenos de maneira diferente, que são difíceis de prever com técnicas de contato tradicionais.

Palavras-chave: *materiais cerâmicos tradicionais, deformações, estado de tensão, curva, flexibilidade.*

1. Introdução

Durante a queima, um esmalte aplicado sobre um corpo cerâmico passa por algumas transformações que podem ser simplesmente relacionados como: a perda de água, formando um dos componentes da argila, transição vítrea e amolecimento. Em correspondência a este ponto, a parte de vidro do esmalte começa a derreter, dando como resultado uma camada contínua de líquidos. Durante o resfriamento, o esmalte aumenta a viscosidade, até o esmalte torna-se rígido e começa a se contrair em simultâneo com o corpo cerâmico. Fissuras acontecem devido ao aumento do volume do corpo, devido à absorção de umidade, após a queima. O corpo, na verdade, pode mostrar uma tendência lenta mas inexorável para reagir com a água presente como a umidade no ar, que muda permanentemente suas propriedades. Este aumento dimensional de corpos cerâmicos ocorre em um período de tempo que pode variar de alguns dias a alguns anos. No passado, este fenômeno não foi compreendido e foi realmente o maior problema dos corpos cerâmicos porosos. A solução parece fácil à primeira vista: minimizar a expansão por umidade e aumentar a compressão do verniz sobre o corpo. Esta abordagem de fato deu excelentes resultados durante muitos anos, mas hoje o problema está aparecendo de novo em circunstâncias diferentes. A queima rápida agora esta dominando a tecnologia e o tempo disponível para alcançar uma estabilização ideal do corpo é reduzido a alguns minutos. O tamanho das peças está crescendo rapidamente: agora o mercado está pedindo azulejos até um metro de tamanho e superior. A espessura é para baixo ao mínimo, para salvar no custo e transporte. O valor do produto estabelece-se na riqueza da superfície e da espessura do esmalte aumentando. A perfeição geométrica é uma necessidade: as telhas são mecanicamente quadrado para dar uma aparência de mármore, como a parede. O grande problema agora é planaridade. O velho truque de aumentar o estado de compressão do verniz sobre o corpo para evitar fissuras, estava servindo bem nos azulejos antigos grossos e pequenas empresas. Agora o mesmo nível de compressão sobre o mesmo corpo e o esmalte, mas com uma dimensão muito maior, tem um efeito colateral desagradável: flexão. Para reduzir a curvatura só há uma solução: reduzir ao mínimo a quantidade de compressão. Um segundo desvio poderia aparecer em caso de uma alta tensão compressiva no esmalte: descamação. Em alguns casos,

a tendência do esmalte em se descolar o corpo, aparece acentuado no canto dos produtos em três dimensões, tais como utensílios de cozinha. O problema, agora, é saber a quantidade mínima de compressão¹. Algumas técnicas experimentais foram desenvolvidas no passado com o objetivo de verificar o nível de compressão², mas devido à sua complexidade na preparação de amostras (amostras bem formadas projetadas especificamente para o teste), tiveram uma apreciação industrial moderada. Como todos os esmaltes, como vidros, são caracterizados por uma baixa resistência ao estresse de tração, um valor um pouco de tração pode provocar sua ruptura. Se o corpo se expande, mesmo que em pequena porcentagem, o esmalte pode facilmente quebrar, a menos que seja em um estado de compressão com relação ao corpo. Neste caso, a pouca expansão do corpo reduz o estado de compressão, sem gerar uma tração perigosa. Essa tendência de reagir com a água, no decorrer do tempo, não pode ser completamente eliminada: todos os corpos de vidro apresentam esse problema. O único tipo de corpo que pode ser considerado estável com o passar do tempo é o corpo completamente sinterizado, caracterizado por uma falta de porosidade. Em caso de amostras de baixa porosidade, ela se transforma em outro parâmetro de grande interesse tecnológico: a piroplasticidade. Ela descreve a tendência do corpo em se deformar plasticamente dentro de uma faixa de temperatura, de fato durante a fase final uma fase vítrea com uma viscosidade suficientemente abundante de baixos fluxos provoca uma deformação rápida do material. Uma formulação da amostra e um ciclo de queima a fim de evitar fissuras não existem. O problema, entretanto, pode ser resolvido com êxito, estudando o estado de tensão entre o esmalte e o corpo, por meio da expansão térmica e flexão. Para solucionar problemas de planaridade, devido as deformações plásticas, durante as queimas adicionais sobre o comportamento piropástico se tornou indispensável.

2. Piroplasticidade

Tradicionais corpos cerâmicos sinterizados, como utensílios de pedra ou porcelana, submetidos a um fluxo de processo viscoso de sinterização, onde a força motriz é dada principalmente pela tensão superficial da fase líquida vítrea e a velocidade do processo

é controlado pela viscosidade da fase vítrea³. A viscosidade da fase vítrea diminui exponencialmente à medida que a temperatura aumenta de acordo com a lei de Arrhenius, acelerando o processo de sinterização. Por outro lado, o efeito de uma baixa viscosidade, é aumentar a tendência para deformar o material sob seu próprio peso (deformação piroplastica). A medição da piroplasticidade é particularmente importante para as amostras que têm de ser completamente sinterizado porque durante a fase final da queima, eles desenvolvem uma fase vítrea abundante com uma viscosidade suficientemente baixa para causar deformação rápida ao material. Materiais cerâmicos não queimados podem se comportar de maneiras muito diferentes quando submetidos ao tratamento térmico de queima. Em alguns casos, a maior velocidade de deformação é encontrado na temperatura máxima atingida no interior do forno. Em outros casos, a maior taxa de flexão ocorre quando o derretimento ocorre, então, em altas temperaturas, a tendência para dobrar cai, enquanto a fase vítrea dissolve os componentes minerais do corpo, tornando-se mais viscoso⁴. Como proposto por Sang-Ho Lee, Gary L. Messing e David Green⁵ e Auree Butchtel, Hyojin Lee, WM Carty⁶, a viscosidade pode ser calculado utilizando a fórmula que define a deformação de uma viga apoiada nas extremidades e submetido a seu próprio peso (fórmula válida quando a deformação é puramente elástica), onde a deflexão $y_{max} = \rho$ = densidade, g = aceleração da gravidade, L = distância entre os suportes, E = módulo de elasticidade, h = espessura da viga.

$$y_{max} = \frac{5\rho g L^4}{32 E h^2} \quad (1)$$

Quando a deflexão do feixe é provocada por fluxo viscoso, que aumenta em função do tempo e da razão de deformação, portanto, uma função da viscosidade (para pequenos valores de deformação do módulo de elasticidade E pode ser substituído pelo η viscosidade e y_{max} deflexão substituída pela taxa de deformação. Considerando apenas o valor máximo da deformação no centro do feixe, os resultados de viscosidade:

$$\eta = \frac{5\rho g L^4}{32 \dot{y}_{max} h^2} \quad (2)$$

Com base nas variações dimensionais (a ser medida por meio de um teste de sinterização dilatométrico) e saber a perda de ignição, o valor correto da densidade pode ser calculada e inserida nesta fórmula de viscosidade. Ela descreve a relação inversa entre a viscosidade da fase vítrea em desenvolvimento e de reagir durante o processo de sinterização e da taxa de flexão (primeira derivada da flexão absoluta) de uma amostra de suspensão.

3. Deformações em Azulejos

Em telhas de vidro ou de dupla camada, as deformações podem ser geradas a partir do comportamento diferente das duas camadas sobrepostas, tanto durante o aquecimento e resfriamento. O acoplamento de materiais com diferentes comportamentos térmicos inevitavelmente dão origem a um sistema de tensões devido à incompatibilidade térmica entre as camadas. Este problema foi abordado por Timoshenko, em 1925, quando desenvolveu uma equação que calcula a deformação de tiras bi-metálicas em função da temperatura. Ao contrário de tiras bi-metálicas, que se curvam apenas por causa das diferenças entre os coeficientes de expansão térmica dos dois metais sobrepostos, no caso de um material de cerâmica vítrea, é necessário ter em conta as transformações físicas que ocorrem no corpo da cerâmica e do vidro. O suporte cerâmico mostra as características de um sólido elástico, enquanto vidros e esmaltes apresentam um comportamento fortemente dependente

da temperatura mecânica. À temperatura ambiente, elas se comportam como sólidos elásticos, obedecendo a lei de Hooke, a temperaturas superiores as temperaturas de transição vítrea (T_g) se comportam como fluidos de plástico e sua viscosidade diminui com o aumento da temperatura, de acordo com a lei de Arrhenius. Outro ponto característico do sistema esmalte-corpo é a temperatura do acoplamento (T_c), em relação ao amolecimento do esmalte durante o aquecimento (absorção de tensões) e solidificação durante o resfriamento (construção de tensões). Como consequência direta, após o resfriamento de um sistema de tensões podem originar no interior do material, dando origem a defeitos como fissuras, descamação, ou defeitos de planaridade. O estudo das deformações e estado de tensão em um material de cerâmica vítrea, podem ser abordada sob diferentes pontos de vista, teórico ou experimental.

4. Teóricas Deformações

Acoplamento entre o esmalte e o corpo cerâmico foi estudada por Amoros, Negré, Belda e Sanchez, que usaram uma fórmula derivada da equação de Timoshenko para calcular teoricamente a curvatura induzida em uma telha cerâmica vítrea pelo estado de tensão (compressão/tração) do esmalte⁶. Eles introduziram algumas hipóteses simplificadoras: isotrópico, homogêneo, material perfeitamente elástico, há desenvolvimento de interface entre o suporte e o esmalte da temperatura, mesmo entre as camadas, a razão de módulos de elasticidade constante durante o resfriamento⁷

$$D = \frac{1}{8} \frac{L^2}{h} K_R \Delta c \quad (3)$$

onde D = deformação concebida como “desvio” [mm], L = comprimento [mm], a espessura h = [mm], C^* = diferença percentual entre as curvas dilatométricas do corpo cerâmico e o esmalte à temperatura ambiente (depois de traduzir o esmalte curva dilatométrica para que coincida com a curva do corpo de dilatometria em correspondência da temperatura de acoplamento), e

$$K_R = \frac{6(m+1)^2 mn}{m^4 n^2 + 4m^3 n + 6m^2 n + 4mn + 1} \quad \text{with } m = \frac{S_g}{S_s} \quad \text{and } n = \frac{E_g}{E_s} \quad (4)$$

onde S_s = espessura de apoio, S_g = espessura do esmalte, E_s = módulo de elasticidade de apoio, por exemplo, esmalte = módulo de elasticidade (Figura 1).

A determinação da K_R constante é muito difícil, porque é necessário conhecer os valores dos dois módulos de elasticidade e E_s . Por exemplo, além disso, o valor de C^* precisa de uma determinação experimental, porém algumas observações interessantes podem ser feitas. Com a mesma K_R e C^* (mesmo esmalte e cerâmica), a deformação é diretamente proporcional ao quadrado do comprimento da telha (L) e inversamente proporcional à espessura da telha (h). Com o comprimento da telha mesmo (L), espessura de azulejos (h) e C^* , a deformação aumentam se o módulo de apoio e diminuição da elasticidade E_s S_s espessura, uma vez que aumenta K_R se aumentar m

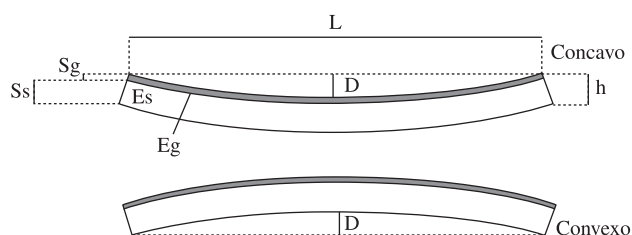


Figura 1. Quantidades usadas nas Equações 1 e 2.

ou $n (m < 1)^8$. Em uma nova publicação, Amoros e Moreno apontam que, durante a difusão de fuzilamento, e os fenômenos de dissolução entre o esmalte e o suporte para camadas ocorrer e uma interface no corpo do esmalte se desenvolve. Assim, o esmalte e o corpo não se comportam como camadas independentes por causa da presença de interface tal, que afeta as propriedades do produto final, incluindo a planaridade. Por essa razão, afirmam que o acoplamento entre o esmalte e o suporte devem ser investigado experimentalmente, usando as condições experimentais que melhor reproduzem os industriais⁹.

5. Método Experimental

Considerando os limites para determinar teoricamente o comportamento de flexão de um material de um verniz cerâmico, métodos experimentais são de fundamental importância para o estudo das deformações induzidas pelo estado de tensão estabelecido entre o verniz e o suporte cerâmico. Entre elas, técnicas ópticas permitem caracterizar o comportamento do material durante a queima e resfriamento, sem entrar em contato com a amostra e, portanto, sem interferências causadas pelo sistema de medição, obtendo uma boa compreensão do comportamento do material real, em um ciclo de queima industrial real. O instrumento utilizado neste trabalho para estudar as deformações e o estado de tensão em materiais cerâmicos é o flexímetro óptico. Uma barra pequena amostra é suspensa entre duas hastes com 70 mm espaçadas, enquanto os quadros da câmara no centro da amostra, o que se move para baixo ou para cima durante o tratamento térmico (Figura 2a,b). O sistema óptico iluminado, fornecem imagens das últimas centenas de alguns microns a parte central da amostra através de um microscópio de alta ampliação e uma câmera digital. O feixe de luz azul que ilumina o centro da amostra tem um comprimento de onda de 478 nm e que permitem chegar a resolução óptica de $0,5 \mu.\text{pixel}^{-1}$ da câmera digital. A curva obtida com este instrumento permite identificar a temperatura do acoplamento entre o esmalte e o corpo cerâmico, para obter informações sobre a planaridade da amostra e comportamento pirolástico, para estudar qualitativamente o estado de tensão estabelecida entre o esmalte e o corpo.

6. Resultados e Discussões

O objetivo do procedimento experimental proposto é a aplicação desta nova técnica óptica para investigar o comportamento térmico de alguns corpos de porcelanato durante a queima e apresentar um estudo completo do nível de estresse em uma cerâmica com dupla

camada. As amostras são $85 \times 5 \times 5$ mm de barras feitas de corpos verdes pressionados (400 kg.cm^{-2}) para a análise pirolástica, e amostras Monoporosas de verniz queimado, cortado diretamente de peças industriais. Amostras verdes foram inicialmente secas em estufa a $150 \text{ }^\circ\text{C}$ por 2 horas. Na Figura 3, parece evidente o efeito de uma composição corporal diferente sobre o comportamento pirolástico. Duas amostras de porcelana foram submetidas a um tratamento térmico que consiste em uma taxa de aquecimento de $30 \text{ }^\circ\text{C/min}$, a primeira permanência de 5 minutos a $1.220 \text{ }^\circ\text{C}$ e um segundo de permanência de 5 minutos a $1.230 \text{ }^\circ\text{C}$ (curva vermelha). As duas curvas obtidas representam a flexão expressa em microns e são sobrepostas no mesmo gráfico, a fim de fazer uma comparação. A Técnica de Porcelana 1 (curva verde) mostra uma dobra final de mais de 6 mm, e a taxa de deformação máxima (curva com círculos verdes) é encontrado em correspondência com a temperatura máxima ($1.230 \text{ }^\circ\text{C}$). A Técnica de Porcelana 2 (curva azul) mostra um final de dobra inferior a 3 mm e a velocidade de flexão máxima (curva azul com círculos) está no início a $1220 \text{ }^\circ\text{C}$. O fabricante deve prestar mais atenção para o problema de deformação no início da permanência primeira ($1220 \text{ }^\circ\text{C}$) durante a queima de porcelana 2, enquanto no caso da porcelana 1, deformações devem ser tomadas sob controle na temperatura máxima ($1230 \text{ }^\circ\text{C}$).

Diferentes informações, estão disponível na Figura 4, quando um ciclo de duas formas de aquecimento (com $20 \text{ }^\circ\text{C/min}$, como taxa de aquecimento e resfriamento lento) tem sido aplicado a uma amostra de verniz Monoporoso: os valores absolutos de flexão permanecem dentro de cem microns porque até a fusão do esmalte (durante o aquecimento) e da temperatura do acoplamento (durante o resfriamento), a flexão ocorre principalmente devido a uma diferença de expansão térmica (que é a deformação elástica), entre as camadas. A flexão de queda na parte inicial da curva é devido às diferenças entre os coeficientes de expansão térmica do esmalte e do corpo: o corpo tem mais CTE em comparação com o esmalte, ele será submetido a uma maior expansão, tornando-se mais do que o esmalte. O modelo consta como côncavo. A curva mostra um pico negativo em $600 \text{ }^\circ\text{C}$, após a transição de quartzo α - quartzo β ocorrem no corpo de cerâmica: em correspondência a este ponto a diferença entre as curvas de expansão térmica do esmalte e o corpo está no máximo, até porque o esmalte irá sofrer a transição do vidro. No início da fase de resfriamento, o esmalte está líquido e segue a contração do corpo, sem tensões em desenvolvimento. Na $697 \text{ }^\circ\text{C}$, é possível identificar a temperatura do acoplamento (T_c). O esmalte se tornou rígido o suficiente para acumular tensões, causando a flexão

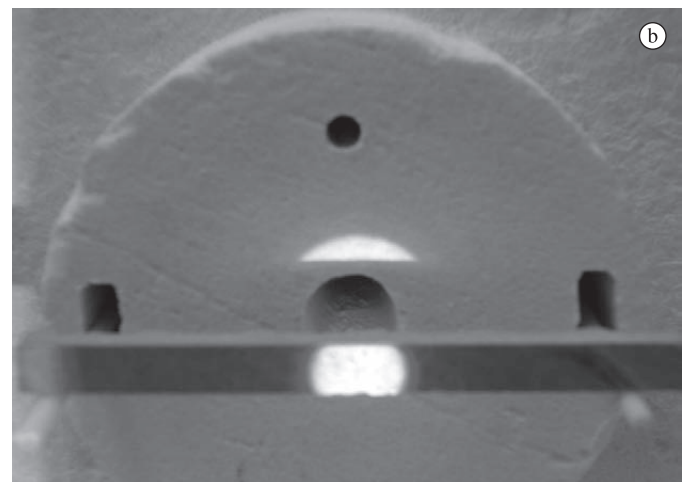
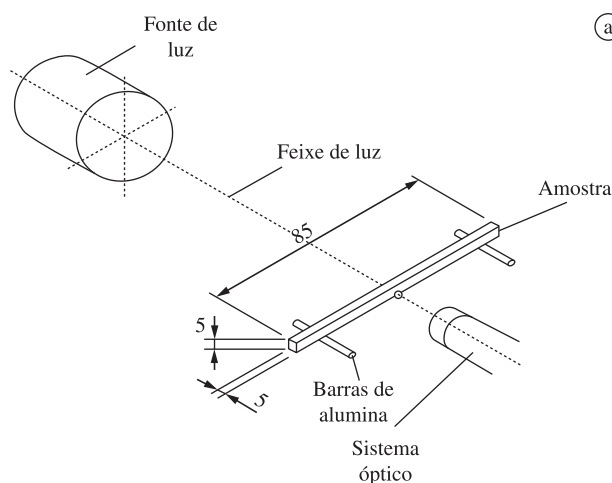


Figura 2. a) Esquema do flexímetro óptico; b) Amostra dentro do forno.

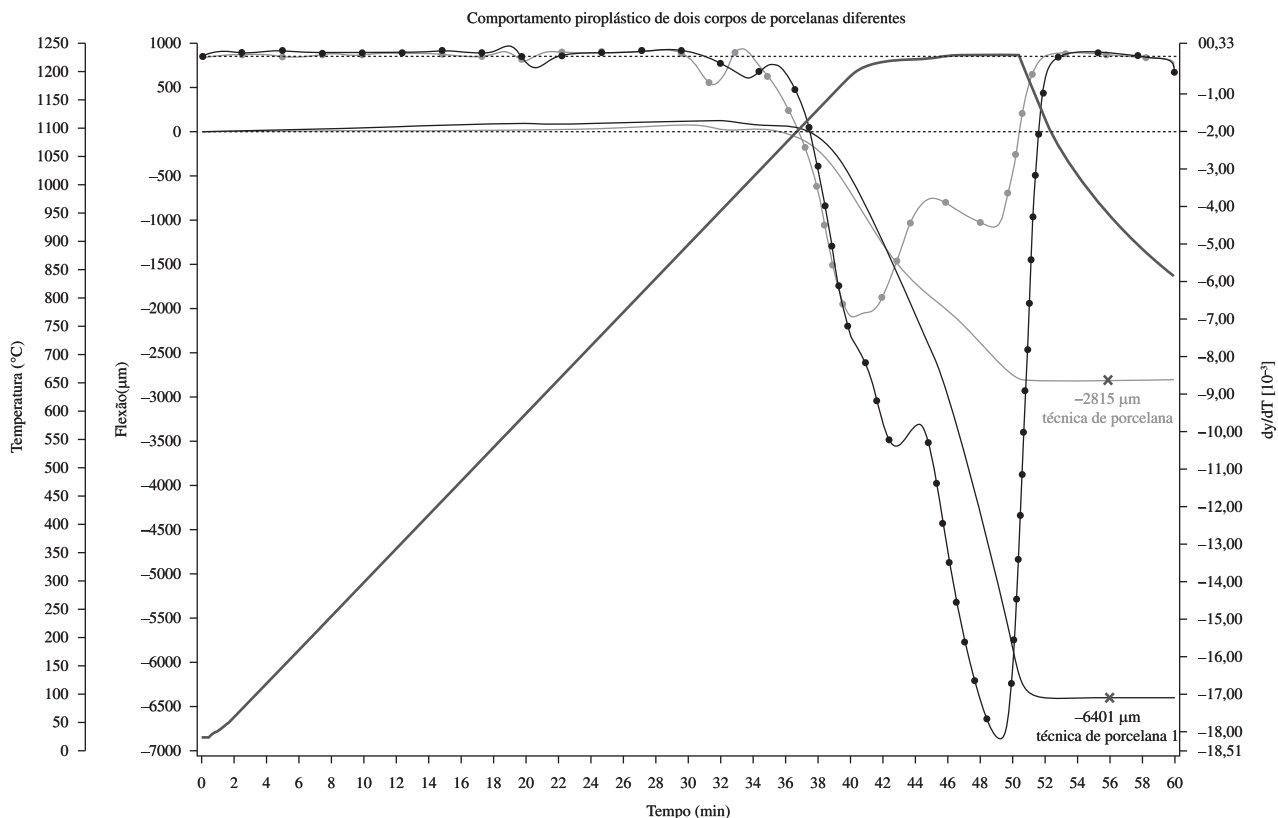


Figura 3. Curvas de flexão de 2 técnicas de amostras de porcelana.

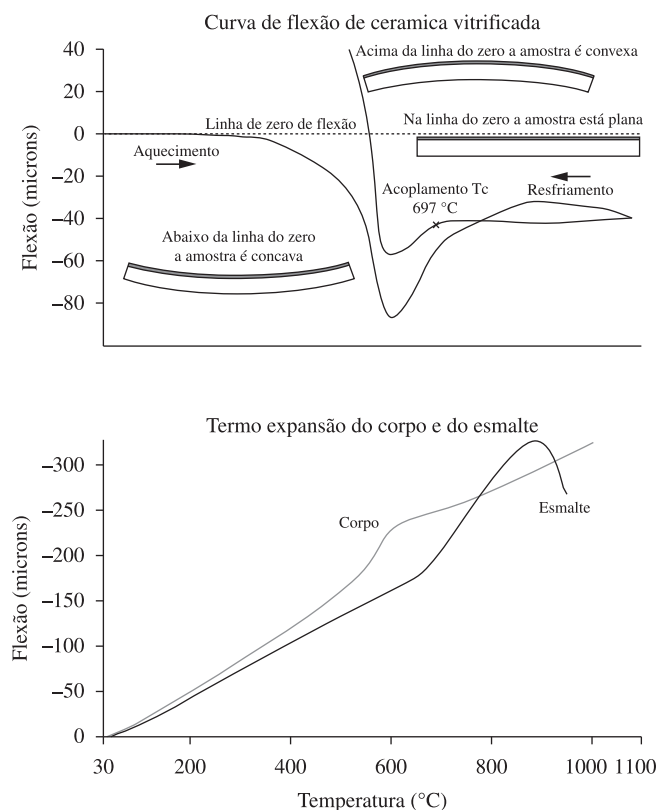


Figura 4. Interpretação da curva de flexão.

da amostra. Neste exemplo, é mais fácil identificar a temperatura do acoplamento durante o resfriamento, pois uma rápida variação de inclinação na curva de flexão ocorre.

Durante a fase de aquecimento, a temperatura do acoplamento é menos evidente e mais difícil de ser identificada. Também é possível ver que a curva está abaixo da linha zero (amostra côncava), durante a fase de aquecimento geral e para uma parte da fase de resfriamento (de 1100 até 550 °C). Neste ponto, alguém poderia perguntar por que, se assumirmos que, para temperaturas mais elevadas do que o T_c o esmalte não é capaz de criar tensão, em tal intervalo o azulejo está côncavo e não plano como se pode esperar. Para dar uma resposta a esta questão, um modelo simples foi desenvolvido: um sistema plano, composto por uma mola (esmalte) e uma placa fina (corpo) estão associados à barra de azulejos. Dois casos (tensão da mola e na compressão da mola), foram analisados.

Observando a Figura 5, é possível perceber que, se a mola de compressão for desacoplada da placa, a curva da placa fica para baixo (sistema côncavo) porque era a compressão das molas, mantendo o sistema plano. Se a mola em tensão é desligada da placa, a curva da placa fica para cima (sistema convexo) porque era a tensão da mola que mantinha o sistema plano. Por analogia com este sistema, se o esmalte está inicialmente em um estado de compressão, quando for ateadado fogo a amostra da telha vitrificada será submetida a temperaturas superiores a T_c , uma deformação côncava ocorre na telha, se o esmalte está inicialmente em um estado de tração, quando for ateadado fogo na amostra da telha vitrificada será submetida a temperaturas superiores a T_c , uma deformação convexa ocorre na telha. A Figura 6 representa a comparação entre duas curvas de flexão, obtidas para duas amostras diferentes de azulejos. Para $T > T_c$, a curva vermelha estará certamente acima da linha zero: isto significa que o esmalte estava em um estado de tração. A curva verde, para $T > T_c$, estando abaixo da linha zero: o esmalte estava em um

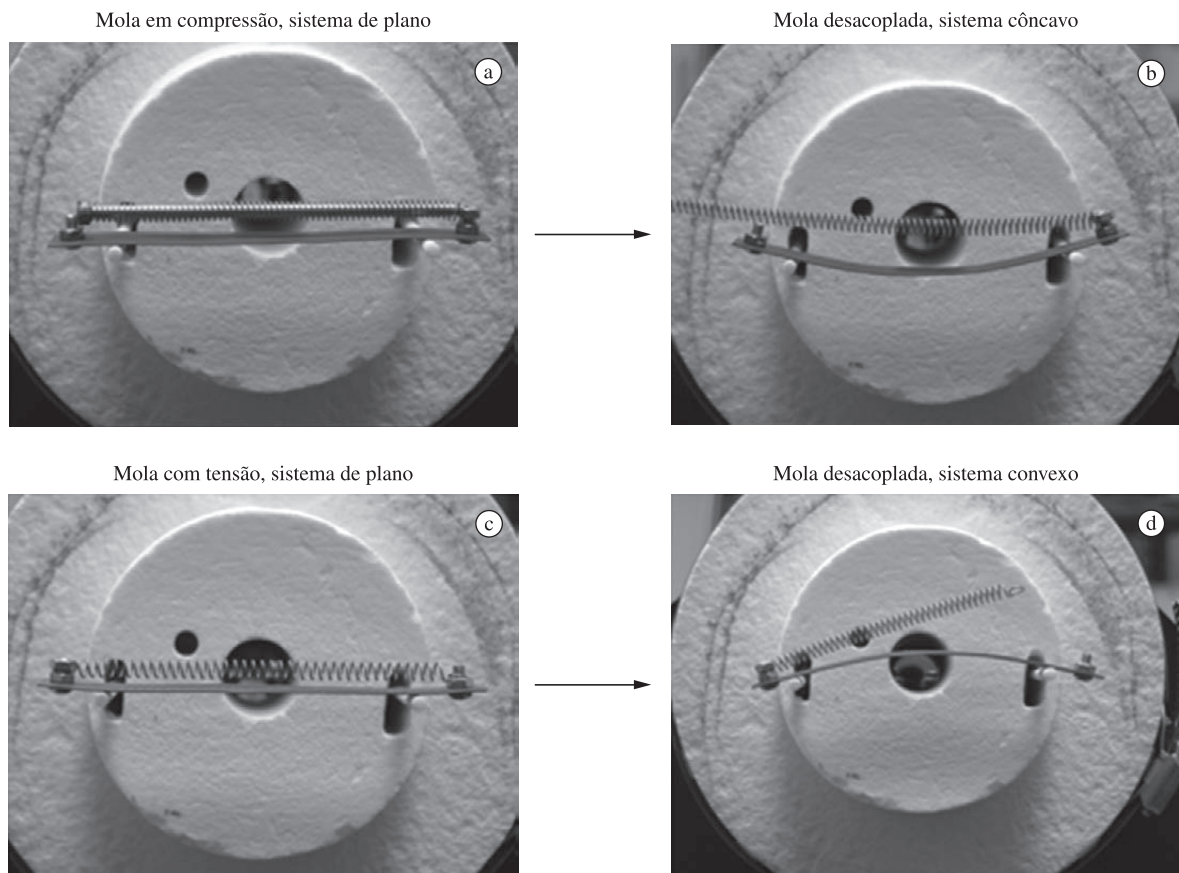


Figura 5. O modelo de placa-mola associada ao esmalte da telha.

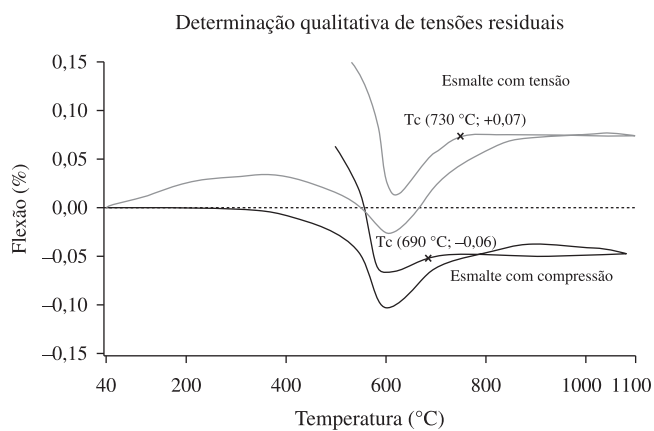


Figure 6. Comparação entre as curvas de flexão e duas amostras de ajulezinhos queimados para estudo da qualidade do seus estados de tensão.

estado de compressão. Um estudo quantitativo do estado de tensão estabelecida entre o esmalte e o corpo, após a queima, no entanto, fundamental para evitar alguns problemas frequentes que ocorrem em produtos de vidro, por exemplo, a planaridade tardia, fissuras ou defeitos graves. Para obter o resultado final, é necessário traduzir a curva de expansão térmica do esmalte para que coincida com a curva de expansão térmica do corpo na correspondente temperatura de acoplamento¹⁰. As duas curvas, após a tradução, não coincidem mais na origem (temperatura ambiente). Esta diferença é realmente a tração ou compressão, estabelecida entre o esmalte e o corpo imediatamente após a queima. A partir deste momento, o corpo começa a reagir com a umidade do ar, aumentando seu volume.

Este é um fenômeno hidrotermal, que é favorecido pela presença de umidade e altas temperaturas. Este processo de reidratação, no caso das telhas já foram colocados no chão, podem exigir alguns anos, mas pode ser também artificialmente acelerado pelo aumento da pressão do vapor de água e da temperatura. Executando um teste de autoclave a alta temperatura e pressão, o processo pode ser concluído em poucas horas. A medição do percentual de expansão, devido à adsorção de água, deve ser comparado com a medição do percentual de compressão da camada de esmalte em relação ao corpo. Se o valor de expansão após o ensaio de autoclave é menor do que o nível de compressão estabelecida entre o esmalte e o corpo, então o produto não corre o risco de ter fissuras posteriores.

Ambas as curvas de flexão na Figura 6 mostram, durante o processo de resfriamento, um aumento na convexidade, que descreve claramente a final sem zero de stress na inter-camada. De fato, uma situação de estresse zero, seria alcançado para dobrar as curvas com um zero à flexão no final do processo de resfriamento também. Um estudo aprofundado dos fenômenos envolvidos com o nível de stress final, especialmente necessária para o tamanho grande e com telhas de espessura reduzida, devendo ter em conta o efeito da taxa de resfriamento sobre o volume específico de fases vítreas¹¹. Figura 7 mostra os dados de expansão de um esmalte cerâmico fundido durante um processo industrial, submetido a um teste de dilatação nos dois sentidos a 10 °C/min (tanto para aquecimento e arrefecimento). Durante uma contração de resfriamento vítreo ocorre devido ao rearranjo dos diversos elementos estruturais, este produto rapidamente, enquanto a viscosidade é baixa. Na região da temperatura de transformação, no entanto, rearranjos requerem tempos mensuráveis e se a taxa de resfriamento é alta (como que ocorreu durante o ciclo de fusão rápida deste esmalte), os maiores elementos estruturais não podem seguir ainda mais cedo, e mesmo

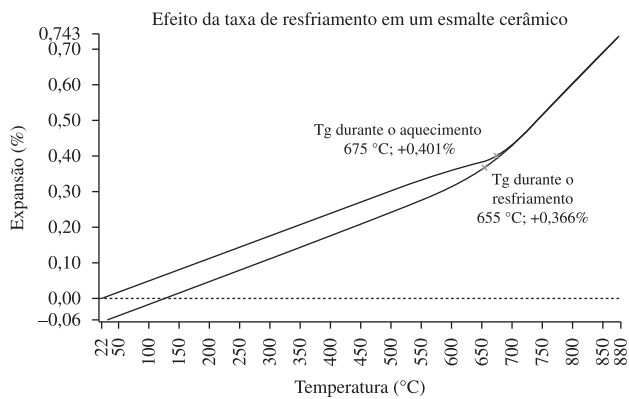


Figura 7. Efeitos da taxa de resfriamento com volume específico e Tg do verniz cerâmico.

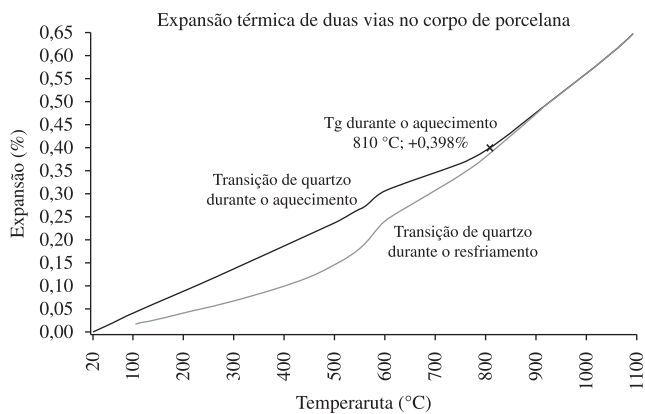


Figure 8. Dois caminhos de dilatação de porcelana de utensílios de pedra com corpo queimado; o dilatômetro Óptico Misura® detecta o Tg da fase vítrea e o incremento na densidade.

os menores se tornam imóveis mais cedo: a região de transformação é deslocada para temperaturas mais elevadas. Durante o segundo resfriamento, a uma taxa baixa, a transformação está localizada em uma temperatura mais baixa. Esta diferença de densidade em vidro justifica a histerese gravada em curvas de flexão. A situação se torna ainda mais complicada, no caso de amostras de porcelanas, utensílios de pedra, onde 50% é usado em composições de queima rápida e uma fase vítrea é abundante, portanto, produzidos durante a sinterização. A utilização de um dilatômetro óptico faz com que seja possível identificar a sua temperatura de transição e os efeitos da taxa de resfriamento sobre o volume específico também. Parece evidente na Figura 8 como esta técnica de medição é capaz de mostrar o real comportamento térmico da fase vítrea contida em um corpo de porcelana; dilatômetros tradicional não podem empurrar acima da faixa de transição vítrea e medir com precisão o histerese em dois sentidos (variação de volume específico devido às diferentes taxas de resfriamento) em caso de deformações viscosas na amostra. Durante o aquecimento do corpo se expande de forma linear até a transição de quartzo α , β , cujo efeito foi registrado em 573 °C, em seguida, ele continua se expandindo ao longo de uma linha reta.

No caso de corpos porosos, sem fase de sinterização viscosa, o CTE não mudaria muito acima da transição de quartzo, mas para o corpo da porcelana e líquido mais denso aglomerado, a transição vítrea será efetivamente registrado. Durante o resfriamento lento após o efeito do ciclo de queima rápida antes aparece, evidentemente, como uma diminuição no volume específico sobre o vidro do final.

7. Conclusão

O comportamento de cerâmicas tradicionais é demasiado complexo para ser entendido teoricamente, a partir dos parâmetros termo-físicas dos componentes individuais, uma vez que existem muitas dificuldades, como o desenvolvimento de novas fases durante o processo. As dimensões dos revestimentos cerâmicos aumentam, a redução de sua espessura e da utilização de ciclos de queima rápida, que são fatores que requerem um controle preciso de planaridade. Nos azulejos porosos, a quantidade de compressão no esmalte, deve ser reduzido ao mínimo, a fim de evitar problemas de fissuras e, ao mesmo tempo evitar o efeito colateral desagradável da flexão. Neste campo, o método experimental com base nos resultados ópticos do flexímetro provou ser uma ajuda válida para o estudo das deformações e estado de tensão em materiais de cerâmica vitrificadas.

Referências

- PAGANELLI, M.; SIGHINOLFI, D. The optical fleximeter to study deformations on ceramics. *Industrial Ceramics*, v. 29, p. 1-6, 2009.
- PETERSON, M. et al. Evaluation of the Steger method in the determination of ceramic-glaze joining. *Materials Science and Engineering A*, v. 466, p. 183-186, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2007.02.046>
- PAGANELLI, M. Using the optical dilatometer to determine sintering behaviour. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 81, n. 11, p. 25-30, 2002.
- PAGANELLI, M.; VENTURELLI, C. The measurement of behaviour of ceramic materials during heat treatment. *Ceramic forum international - CFI / Ber DKG, Process engineering*, v. 86, n. 6, p. E37-E40, 2009.
- LEE, S-H.; GARY, L. M.; GREEN, D. Bending creep test to measure the viscosity of porous materials during sintering. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 86, n. 6, p. 877-882, 2003. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03391.x>
- TIMOSHENKO, S. Analysis of bi-metal thermostats. *Journal of the Optical Society of America*, v. 11, p. 233-233, 1925. <http://dx.doi.org/10.1364/JOSA.11.000233>
- BUTCHTEL, A.; LEE, H.; CARTY, W. M. Pyroplastic deformation: applying MOR stress concept to ware design. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, v. 24, n. 2, p. 181, 2003. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470294796.ch23>
- AMOROS, J. L. et al. Acordo Esmalte-Suporte (I): A Falta de Acordo como Causa do Empenamento. *Cerâmica Industrial*, v. 1, n. 04-05, p. 6-13, 1996.
- AMOROS, J. L. et al. Acuerdo esmalte-soporte (IV): Naturaleza de la interfase esmalte-soporte. *Tecnica Ceramica*, n. 181, p. 138-145, 1990.
- PAGANELLI, M.; SIGHINOLFI, D. Delayed crazing resistance of glazed ceramics materials. *Ceramic forum international - CFI / Ber DKG, Process engineering*, v. 85, n. 1-2, p. E12-E15, 2008.
- SIGHINOLFI, D. Thermal expansion investigations on glasses used in ceramic industry. *Ceramic forum international - CFI / Ber DKG, Process engineering*, v. 87, n. 6-7, 2010.