

Estudo das Propriedades Mecânicas de um Revestimento Cerâmico Multicamadas

**Fernanda de Oliveira^{a,b}, Jéssica Pian^{a,b}, Monik Meura Manarin^{a,b},
Nayadie Jorge Lóh^{a,b}, Patricia Oliveira^{a,b}, Suellen Guollo^{a,b}, Reginaldo Tassi^a,
Maykon Cargnin^a, Claudio Modesto^a, Agenor De Noni Junior^{a*}**

^aInstituto Maximiliano Gaidzinski – IMG, Rua Dr. Edson Gaidzinski, 352,
88845-000, Cocal do Sul, Santa Catarina, Brasil.

^bAlunos do curso técnico de cerâmica

*e-mail: agenor@imgnet.org.br

Resumo: As placas cerâmicas esmaltadas, destinadas à construção civil, são constituídas por um suporte espesso, uma fina camada de engobe e esmalte. Portanto, são materiais multicamadas. Porém, essa sobreposição de materiais não objetiva o aprimoramento das propriedades mecânicas. Estudou-se o comportamento da resistência mecânica a flexão de placas de porcelanato obtidas com diferentes configurações multicamadas, contendo de 2 até 5 camadas. Empregou-se duas composições de porcelanato com diferentes coeficientes de expansão térmica para gerar tensões residuais após a queima. As perdas ou ganhos na resistência mecânica estiveram atrelados ao desenvolvimento de tensões de tração ou compressão na superfície, respectivamente. Os resultados experimentais foram comparados com as estimativas teóricas do desenvolvimento de tensões. Embora os resultados experimentais não puderam ser previstos pelo modelo teórico empregado, as tendências de comportamento apresentaram correlações positivas. O maior incremento de resistência mecânica foi obtido com duas camadas, 91 MPa, contra 73 MPa dos respectivos monólitos.

Palavras-chave: multicamadas, porcelanato, resistência mecânica, tensões residuais.

1. Introdução

As placas cerâmicas destinadas ao revestimento de pisos e paredes na construção civil são constituídas na sua maioria por um suporte espesso, uma fina camada de engobe e uma fina camada de esmalte. Neste sentido estes materiais podem ser considerados como sendo multicamadas. O papel dessas duas últimas camadas é fundamentalmente estético. O fato da camada de esmalte ser impermeável e com boa inércia química também proporciona uma importante função de higiene aos ambientes. O suporte espesso tem como principal função proporcionar resistência mecânica ao conjunto. Do modo pelo qual este produto está concebido, a interação física existente entre estas camadas não proporciona nenhum efeito marcante sobre a resistência mecânica do conjunto.

Em função da natureza frágil dos materiais cerâmicos durante a fratura, sua utilização como componentes estruturais é limitada¹. Por outro lado, componentes cerâmicos constituídos por camadas alternadas de dois diferentes tipos de materiais podem mudar o modo de propagação da fratura, deixando de ser puramente frágil¹. As aplicações estudadas para estes tipos de materiais compósitos estão voltadas para a cerâmica técnica^{1,2}. No caso dos revestimentos cerâmicos ainda são raros os trabalhos de pesquisa. As possibilidades industriais para produção em escala também constituem um importante gargalo.

Dentre os diversos tipos de revestimentos cerâmicos, o porcelanato tem se destacado devido às suas ótimas características técnicas e estéticas³. Estas características são obtidas principalmente pela porosidade baixa (5-8%) e elevada quantidade de fase vítrea em comparação com as outras classes de produtos⁴.

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento mecânico de porcelanato configurado com estruturas multicamadas em comparação aos correspondentes materiais monolíticos que compõem as camadas.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Comportamento mecânico

A resistência mecânica corresponde à máxima tensão por unidade de área suportada por um componente sem quebrar, quando submetida a uma determinada carga. As principais formas de sollicitação mecânica de um material são: tração, compressão, flexão, torção e cisalhamento⁵.

A resistência mecânica de um produto depende do tipo de material, de sua microestrutura e do processo de fabricação. Estas variáveis determinam a quantidade de energia absorvida até a fratura, o modo de propagação da fratura e o tamanho dos defeitos naturais.

A Figura 1 representa qualitativamente o comportamento típico de um material cerâmico que se rompe de modo frágil. Como pode ser observado ao aplicar determinada tensão sobre o material, o mesmo sofre uma conseqüente deformação. A constante de proporcionalidade entre tensão e deformação corresponde ao módulo de elasticidade. Quando a tensão atinge valores capazes de produzir o crescimento do tamanho dos defeitos o material se rompe de modo catastrófico^{2,5}.

Já no caso dos materiais cerâmicos multicamadas, apesar da natureza intrinsecamente frágil de cada camada individualmente, quando a tensão supera o limite de resistência mecânica, a frente propagação da fratura, que tem início da primeira camada, se dissipa quando atinge as camadas adjacentes. Este efeito, registrado por uma curva de tensão vs. deformação, resulta num comportamento conforme representado Figura 2. Se comparado com o material monolítico, a fratura requer uma maior deformação total. Desta forma há uma melhoria nas suas propriedades mecânicas, tornando o processo de fratura mais previsível. A curva na forma de degrau, depois de atingido o limite de resistência mecânica da primeira camada, corresponde a fratura sucessiva das demais camadas^{1,2}.

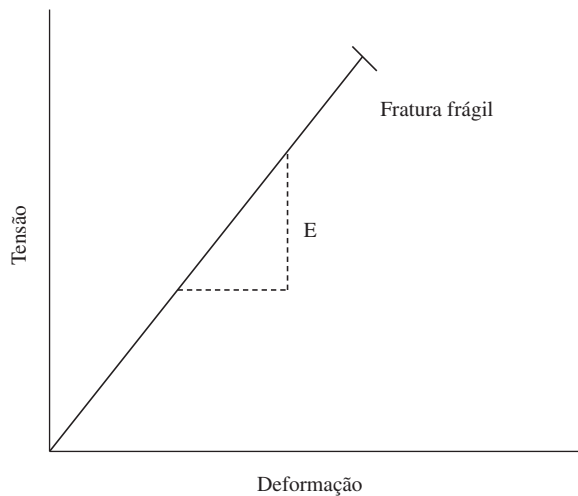


Figura 1. Gráfico tensão-deformação típica de uma ruptura frágil.

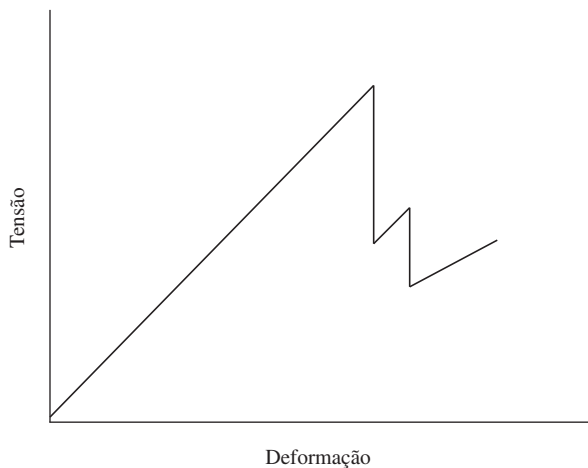


Figura 2. Gráfico de deformação de um revestimento multicamadas (adaptado de Lange⁶).

2.2. Tensões residuais entre as camadas

As tensões residuais correspondem a um estado de tensões no material sem aplicação de cargas externas ou outras fontes de tensões (gradientes térmicos, por exemplo). No caso dos materiais multicamadas, são originadas tensões residuais entre as camadas adjacentes. A origem está associada à diferença entre os coeficientes de expansão térmica que proporciona contrações diferenciais entre as camadas. Todo estado de tensões residuais se encontra em equilíbrio de força e momento. Dessa forma, as camadas de um dos materiais estarão sob tração enquanto as outras camadas do outro material estarão sob compressão.

A Figura 3a representa a contração térmica ocorrida durante o resfriamento do material, imaginado que as camadas não estejam mecanicamente acopladas. As camadas do material com maior coeficiente de expansão térmica, camada externa, contrairão mais que as outras camadas. No entanto, as camadas estão acopladas mecanicamente e o resultado final é que todas as camadas contrairão da mesma forma, Figura 3b. Assim, as camadas externas estarão com um tamanho maior do que o normal (Figura 3a), resultando no desenvolvimento de tensões de tração. A camada interna, ao contrário estará menor do que o normal (Figura 3a), resultando no desenvolvimento de tensão de compressão⁶.

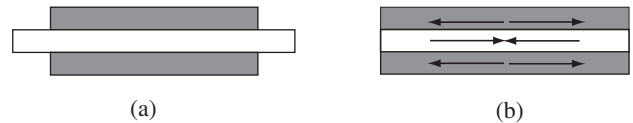


Figura 3. Representação esquemática do desenvolvimento de tensões residuais durante o resfriamento.

As tensões residuais de compressão são geralmente benéficas em relação à resposta mecânica do material a um esforço de tração, já que se opõe ao sentido do carregamento e do crescimento da trinca. Por outro lado, as tensões residuais de tração afetam negativamente a integridade estrutural do material^{1,2}. O desenvolvimento de tensões residuais em camadas de esmalte, por exemplo, também segue os mesmos princípios⁷.

Para um arranjo de camadas simétrico, as tensões originadas na interface das camadas podem ser estimadas através da Equação 1². Esta equação relaciona a diferença entre os coeficientes de expansão térmica linear (α), o intervalo de resfriamento (ΔT), as constantes elásticas (E'), a espessura (t) e o número de camadas (n) existente no material.

$$\sigma_1 = \frac{E'_1 \cdot \Delta e}{1 + \frac{(n+1) \cdot t_1 \cdot E'_1}{(n-1) \cdot t_2 \cdot E'_2}} \quad (1)$$

$$E' = \frac{E}{(1 - \nu)} \quad (2)$$

$$\Delta e = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \quad (3)$$

onde: E , é o módulo de elasticidade; ν , coeficiente de Poisson.

3. Procedimento Experimental

3.1. Caracterização das massas

Foram coletadas amostras de duas massas industriais de porcelanato, denominadas massa A (mA) e massa B (mB), produzidas na empresa Eliane Revestimentos Cerâmicos. Foram preparados vinte cinco corpos-de-prova de cada massa através de prensagem uniaxial em molde de 80 x 20 x 6 mm, a 40 MPa e 6% de umidade. Após a secagem em estufa laboratorial à 110 °C, os corpos-de-prova foram queimados em forno a rolo laboratorial com ciclo de 60 minutos, temperatura máxima de queima de 1160 à 1200 °C, em intervalos de 10 °C.

Determinou-se a densidade aparente queimado, pelo método do empuxo de mercúrio, e a absorção de água por imersão por 2 horas em água fervente. O objetivo deste ensaio foi determinar a temperatura ideal de queima, na qual, ambas as massas atingissem absorção de água igual a zero.

Uma amostra dos corpos-de-prova queimados na temperatura ideal foi submetido ao ensaio de dilatação térmica linear em dilatômetro Netzsch 402EP até 950 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

3.2. Obtenção dos materiais multicamadas

A confecção dos corpos-de-prova multicamadas foi realizada por prensagem. As dimensões do molde, pressão e umidade foram as mesmas apresentadas na seção anterior. A produção efetiva das camadas do material foi realizada durante o preenchimento do pó atomizado no molde. Os corpos-de-prova possuíam um total de 5 camadas, com 4 g de pó cada, que eram preenchidas e niveladas uma a uma. A representação e nomenclatura das diferentes configurações

rações produzidas estão apresentadas na Figura 4. Com relação a nomenclatura, o número representa a quantidade de camadas e a letra representa a massa exposta na superfície. No caso da configuração com duas camadas, a letra representa o lado que foi solicitado por tração durante o ensaio de resistência mecânica a flexão por três pontos. Particularmente nesse caso o preenchimento do molde da prensa foi realizado em duas etapas, cada camada com 10 g.

Os corpos-de-prova devidamente secos em estufa foram queimados em forno laboratorial a rolo, a uma temperatura máxima de 1200 °C e com um ciclo de sessenta minutos. Os corpos queimados foram submetidos ao ensaio de resistência mecânica a flexão em três pontos de apoio em crômetro digital Gabrielle CRAB 424.

4. Resultados e Discussões

4.1. Determinação da temperatura ideal de queima

O gráfico da Figura 5 mostra a evolução da densidade aparente queimado e absorção de água em função da temperatura de queima para as duas massas. O resultado mais relevante diz respeito aos valores de absorção de água. Observa-se que desde 1160 °C os corpos-de-prova confeccionados com a massa A já apresentavam valores de absorção de água próximo de zero, o que somente ocorreu a 1200 °C com a massa B. Assim, 1200 °C corresponde a temperatura ideal de queima para os corpos-de-prova multicamadas. Após a queima

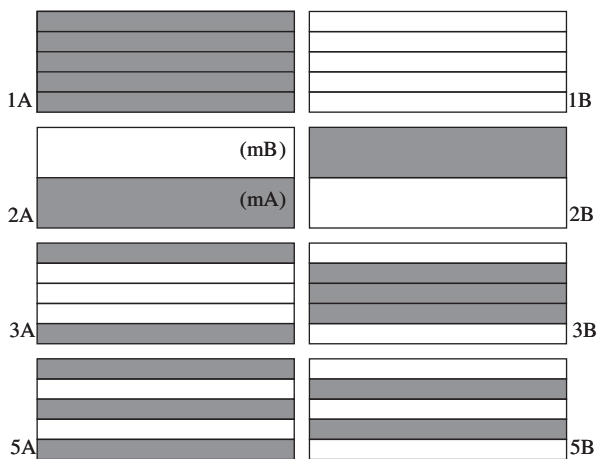


Figura 4. Representação e nomenclatura dos corpos-de-prova multicamadas confeccionados.

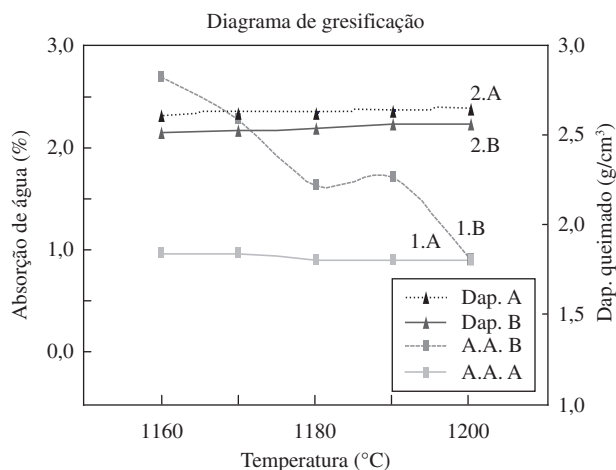


Figura 5. Evolução da absorção de água das massas A (1.A) e B (1.B) e densidade aparente (2.A) e 2.B) em função da temperatura de queima.

nessa temperatura, o produto pode ser considerado um porcelanato técnico (absorção de água <0,1%). Importante ressaltar que nessa temperatura nenhuma das massas atingiu a zona de expansão, onde a densidade aparente começa a diminuir em função da temperatura de queima.

4.2. Curva de expansão térmica linear

O gráfico da Figura 6 apresenta a curva de expansão térmica linear das massas A e B. Observa-se que, durante o resfriamento, a partir de aproximadamente 750 °C (temperatura abaixo da qual a matriz vítrea assume um comportamento rígido) a massa A apresenta uma menor contração térmica. Como consequência, as camadas do material formadas pela massa A estarão sob esforço de compressão, ao passo que as camadas formadas pela massa B estarão sob esforço de tração.

4.3. Estimativa da tensão residual teórica

A Figura 7 apresenta as fotografias dos materiais multicamadas obtidos após a queima. A espessura total dos corpos-de-prova ficou em aproximadamente 5 mm. As espessuras de cada camada, dessa forma, foi determinada considerando as mesmas proporções das configurações apresentadas na Figura 4. Por exemplo, cada camada da configuração 5A ou 5B possui aproximadamente 1 mm.

As tensões residuais das configurações com 3 e 5 camadas podem ser estimadas com a Equação 1 por serem arranjos simétricos. Para o arranjo com 3 camadas esperam-se o desenvolvimento de tensões de aproximadamente +28 MPa (nas camadas com a massa B) e -28 MPa (nas camadas com a massa A), para o arranjo com 5 camadas, +16 MPa e -16 MPa. Nos cálculos foram considerados o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson como sendo 52 GPa e 0,2 respectivamente⁴.

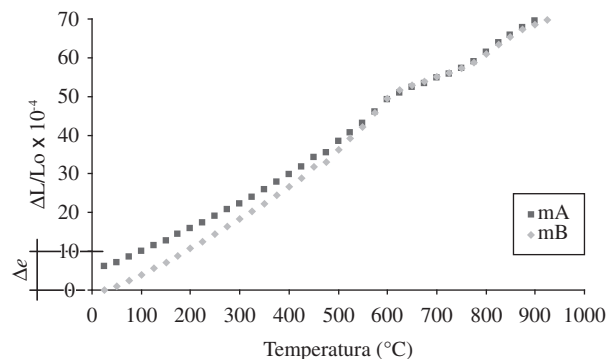


Figura 6. Curva de expansão térmica linear das massas A e B.

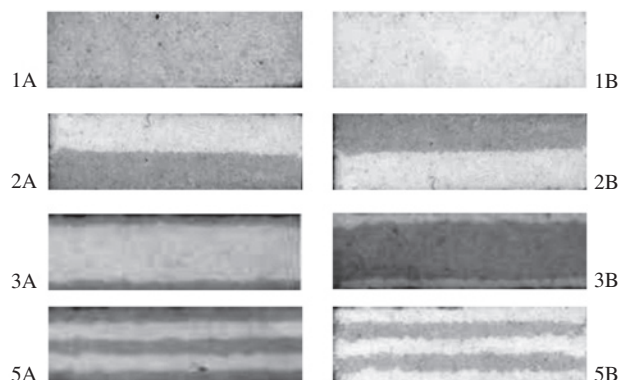


Figura 7. Fotografias dos materiais multicamadas obtidos após a queima.

4.4. Resistência mecânica a flexão

A Figura 8 apresenta os resultados de resistência mecânica a flexão para todas as configurações preparadas. Os corpos-de-prova confeccionados individualmente com as massas A e B (monólitos), resultaram em valores muito próximos, 70 e 73 MPa, respectivamente. Industrialmente estas massas desenvolvem resistência mecânica média de 63 e 56 MPa, respectivamente. Esta diferença é explicada devido as maiores dimensões das peças industriais e as particularidades próprias de cada processo de fabricação.

O desempenho mecânico dos corpos-de-prova com 3 e 5 camadas, com a massa B na superfície, apresentaram valores de resistência média de 40 e 52 MPa, respectivamente. Estes decréscimos acentuados são explicados pelo desenvolvimento das tensões residuais de tração na superfície, estimados em 28 MPa e 16 MPa. De fato, a resistência para a configuração com 3 camadas reduziu aproximadamente 33 MPa e com 5 camadas, 19 MPa. O modelo da Equação 1 pode prever com bom nível de concordância os resultados experimentais para esta situação.

O modelo falha quando a massa A, que desenvolve tensão de compressão, esta localizada na superfície. Deveriam ser esperados incrementos mais significativos na resistência, o que não foi observado, Figura 8. Mesmo assim observa-se incremento de ordem de 5 e 4 MPa, como consequência da presença das tensões residuais de compressão.

Uma análise na superfície de fratura não sugere que tenha ocorrido um mecanismo de bifurcação da frente de propagação da fratura conforme indicado na Figura 2. Os fatores podem estar relacionados principalmente pela baixa porosidade e elevada espessura das camadas que deveriam proporcionar este efeito⁶.

O resultado mais significativo de incremento de resistência mecânica foi obtido para a configuração com duas camadas, quando a superfície solicitada no ensaio de flexão era composta pela massa B, 91 MPa. Quando a superfície solicitada era composta pela massa A, houve um decréscimo na resistência, 64 MPa. Esse resultado é oposto à tendência de desenvolvimento de tensões de tração e compressão nas interfaces, respectivamente.

A Figura 9 é uma representação qualitativa do estado de tensões gerado no interior do material. Tomando como base a camada mA, ela desenvolve tensão de compressão na interface com a camada mB. Ao longo da camada mA, em direção à superfície, a tensão de compressão vai perdendo intensidade e na superfície desenvolve tensão de tração. Quanto este lado está sendo solicitado no ensaio de flexão, ou seja, quanto é o lado voltado para baixo, resulta em resistência menor. O contrário ocorre com o lado da camada mB. Em função desse estado de tensão resultante, as peças não se apresentaram empenadas, mesmo não sendo um arranjo simétrico.

5. Conclusão

O estudo demonstrou que é possível a obtenção de porcelanato multicamadas pelo método da compactação a partir do pó, com carregamento simples do molde da prensa. Mesmo que as camadas sejam formadas por composições de massas diferentes, pode-se determinar uma temperatura na qual ambas sejam consideradas porcelanato sem que atinjam a zona de expansão.

As tensões residuais geradas durante o resfriamento são provocadas pelo uso de massas com coeficientes de expansão térmica distintas. Quando a superfície solicitada encontra-se em regime de tensões de compressão observa-se incremento na resistência mecânica. O contrário se observa quando o regime de tensões é de tração.

A previsão teórica das tensões residuais, com o modelo empregado, demonstrou maior concordância com os resultados de resistência mecânica quando o regime de tensões na superfície era de tração, ocasionando acentuada diminuição na resistência. Com 3 e 5 camadas

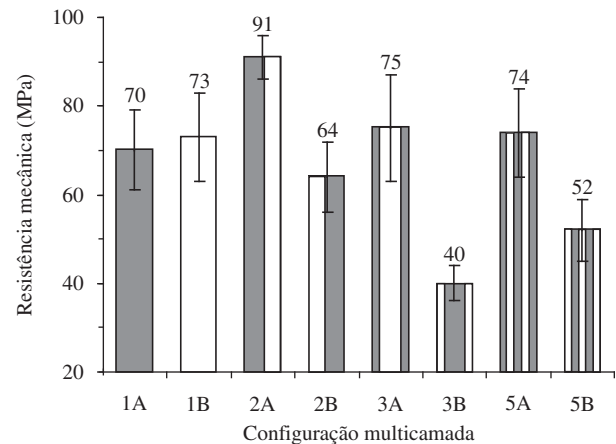


Figura 8. Resistência mecânica a flexão para os monólitos e configurações multicamadas estudadas.

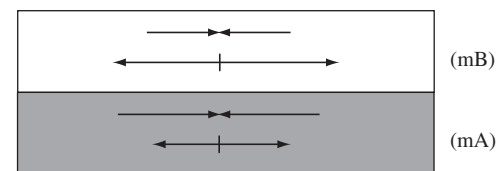


Figura 9. Representação esquemática do estado de tensões desenvolvida na configuração com camada dupla.

não se obtiveram melhorias significativas na resistência mecânica quando as tensões na superfície eram de compressão.

A configuração com duas camadas apresentou os melhores resultados de incremento de resistência mecânica, o que sugere que tenham sido geradas tensões de compressão, na ordem de 18 MPa. Por se tratar de um arranjo simples, ele apresenta boas perspectivas de aplicação industrial para a produção de porcelanato multicamada com propriedades melhoradas.

Referências

- Portu, G. M. L. **Lamination process to obtain structure with tailored residual stress distribution**. Summer school of SICMAC - Layered, functional gradient ceramics and thermal barrier coatings: design, fabrication and application, Minorca Island, Spain, p. 39-49, 2006.
- Lube, T. **Mechanical properties of ceramic laminates**. Summer school of SICMAC - Layered, functional gradient ceramics and thermal barrier coatings: design, fabrication and application, Minorca Island, Spain, 151-160, 2006.
- Menegazzo, A. P. M.; Paschoal, J. O. A.; Andrade, A. M.; Carvalho, J. C.; Gouvêa, D. Avaliação da Resistência Mecânica Módulo de Weibull de Produtos Tipo Grês Porcelanato e Granito. *Cerâmica Industrial*. v. 7, n. 1, p. 24-25, 2002.
- De Noni Jr., A.; Hotza, D.; Cantavella, V.; Sánchez, E. **Estudo das propriedades mecânicas de porcelanato através da avaliação de tensões residuais microscópicas e macroscópicas originadas durante a etapa de resfriamento do ciclo de queima**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2007.
- Callister, W. D. Jr. **Materials Science and Engineering: an Introduction**. 6. ed. Wiley, New York, 2005.
- Lange, L. L. **Stresses and crack extension in multi-layered ceramic composites**. Summer school of SICMAC - Layered, functional gradient ceramics and thermal barrier coatings: design, fabrication and application, Minorca Island, Spain, p. 11-27, 2006.
- Amorós, J. L.; Negre, F.; Belda, A.; Sánchez, E. Acordo esmalte-suporte: a falta de acordo como causa do empenamento. *Cerâmica Industrial*. v. 1, n. 4/5, 1996.