

Influência das Tensões Residuais Macroscópicas no Comportamento de Fratura de Porcelanatos Submetidos à Carga de Flexão

D.G.G. Delavi^{a*}, J. García-Ten^b, A. Saburit^b, A. Escrig^b, A. De Noni Jr^c, D. Hotza^a

^a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC, Brasil

^b Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas – AICE, Instituto de Tecnología Cerámica – ITC, Universitat Jaume I – UJI, Castellón, Espanha

^c Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, SC, Brasil

*e-mail: deysegonzaga@hotmail.com

Resumo

Este estudo discute o comportamento de fratura de porcelanatos industriais submetidos à carga de flexão. Diferentes magnitudes de tensões residuais foram geradas com a utilização de ciclos de queima com distintas velocidades de resfriamento. A tensão residual macroscópica foi determinada pelo método SRSM. Através do ensaio de flexão foi possível observar que os porcelanatos submetidos a resfriamentos rápidos (mais tensionados) desenvolveram fraturas irregulares.

Palavras-chave: tensão residual, porcelanato, fratura.

1. Introdução

O porcelanato é um produto de alto rendimento que consiste basicamente em uma abundante matriz vítrea (50-65%), quartzo (10-25%), mulita (<10%) e feldspatos não fundidos (0-10%)¹⁻³. Ainda que estas composições se assemelhem às composições de porcelanas, o processo de fabricação se difere consideravelmente na fase da queima. Os ciclos de queima dos porcelanatos são muito mais rápidos (40-60 min) que os ciclos de queima das porcelanas típicas (12-24 h)⁴.

O crescente desenvolvimento dos materiais cerâmicos e a alta competitividade entre os fabricantes ocasiona buscas pela redução dos custos de produção sem prejudicar os padrões de qualidade⁵. A queima é a etapa principal da rota tecnológica de fabricação de revestimentos cerâmicos e vem passando nos últimos anos por constantes modificações, com redução cada vez mais significativa dos ciclos de queima levando a um incremento na produtividade⁶.

Vários autores^{3,7-11} demonstram que o resfriamento rápido gera tensões residuais nas peças. Estas tensões podem originar o aumento da degradação microestrutural e afetar a resistência mecânica das peças. Podem ainda comprometer o desempenho durante operações de corte para a instalação dos revestimentos e fazer com que as peças fraturem segundo trajetórias não desejadas e aleatórias, conforme mostrado na Figura 1.

Essas tensões podem ser de dois tipos: (1) decorrentes de diferença do coeficiente de expansão térmica entre o suporte e o esmalte⁷; (2) decorrentes de gradiente térmico ao longo da espessura devido a elevada taxa de resfriamento e a grande quantidade de fase líquida^{8,9}.

Recentemente, Ke et al.¹⁰ estudaram os defeitos de corte que eram recorrentes em linha de produção industrial. Concluíram que uma mudança no ciclo de queima de 40 para

60 min reduziu o índice de cortes que originavam fratura de 37% para aproximadamente 3%. Segundo os autores, o dano microestrutural provocado pelo desprendimento das partículas de quartzo afeta significativamente as tensões residuais macroscópicas e o comportamento frente ao corte dos porcelanatos estudados.

Outros autores avaliaram a influência das tensões residuais sobre o comportamento frente ao corte de diversos tipos de materiais¹²⁻¹⁴ e ferramentas¹⁵⁻¹⁷. Dentre os materiais cerâmicos, os laminados vêm sendo amplamente estudados, em particular em relação a modo de propagação de trincas e modelagem por elementos finitos para explorar a causa das fraturas¹⁸⁻²¹.

Com relação às ferramentas, destaca-se a utilização de laser de CO₂. No entanto, o maior problema para a popularização deste método é a formação de trincas devido ao gradiente de temperatura na superfície de corte, gerando diferentes taxas de retração na superfície do corte e do esmalte²²⁻²⁵.

Apesar dos vários estudos sobre tensões residuais e ferramentas de cortes, não foram encontrados na literatura ensaios normativos para determinar o comportamento frente ao corte para materiais cerâmicos ou similares.

Este estudo descreve os resultados de uma avaliação do desempenho em condição de fratura de revestimento cerâmico do tipo porcelanato quando submetido a ensaio mecânico de flexão em três pontos. Esse procedimento visou simular um cortador manual de revestimentos e ainda correlacionar a influência das tensões residuais de gradiente térmico. Com isto, espera-se contribuir para melhorar o conhecimento desses materiais frente ao corte e possivelmente auxiliar na definição de uma normativa para avaliar tal comportamento. O objetivo é determinar se

as fraturas das peças durante a instalação são ocasionadas por defeitos do produto ou por manipulação inadequada do instalador.

2. Material e Métodos

Para o estudo foi utilizado um porcelanato industrial cru, não esmaltado, com espessura de 9,1 mm, denominado P5. A composição química da massa está apresentada na Tabela 1.

A peça crua foi cortada em tamanhos de 17×17 cm, e queimada até a temperatura de 1207 °C, correspondente à máxima densificação. Para todas as condições deste estudo utilizou-se a velocidade de aquecimento de 70 °C/min, entre 25 e 500 °C, de 25 °C/min, entre 500 e 1207 °C e tempo de permanência na temperatura máxima de 6 min.

Foram utilizados dois resfriamentos distintos como representados na Figura 2:

- P5-Lento: resfriamento controlado dentro do forno com velocidade de resfriamento de 10 °C/min;
- P5-600 °C: resfriamento tipo *quenching* na máxima temperatura, produzindo um resfriamento fora do forno até 600 °C, seguido de patamar dentro



Figura 1. Cortes defeituosos em porcelanatos: (a) com cortador manual e (b) com cortador de disco a úmido.

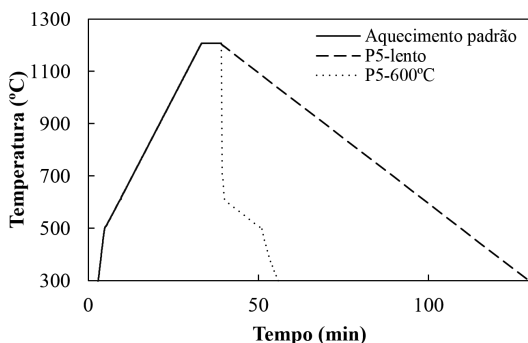


Figura 2. Representação dos ciclos de queima empregados no estudo (—) aquecimento padrão; (---) P5-Lento e (···) P5-600 °C.

Tabela 1. Composição química da massa do porcelanato utilizado (% em massa).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	PPC*
%	68,7	19,2	0,64	0,58	0,58	4,27	0,69	<0,01	0,16	3,47

*Perda por calcinação a 1000 °C.

do forno entre 600-500 °C, com velocidade de 10 °C/min. Este procedimento foi realizado para evitar significativos gradientes térmico durante a transformação alotrópica do quartzo (573 °C). Após, o resfriamento seguiu dentro do forno com ventiladores ligados.

Com os resfriamentos propostos, procurou-se formar dois grupos com diferentes perfis de tensões e então verificar a influência dessas tensões no comportamento de fratura.

Com o intuito de verificar se a transformação alotrópica do quartzo influi sobre as tensões residuais finais da peça, foram queimados corpos de provas de 2×8 cm, nas condições descritas anteriormente e então resfriados de modos distintos:

- P5-Rápido: resfriamento tipo *quenching* na máxima temperatura, produzindo um resfriamento fora do forno, ao ar livre sobre a bancada.
- P5-600 °C: resfriamento tipo *quenching* na máxima temperatura, produzindo um resfriamento fora do forno até 600 °C, seguido de patamar dentro do forno entre 600-500 °C, com velocidade de 10 °C/min. Este procedimento foi realizado para evitar significativos gradientes térmico durante a transformação alotrópica do quartzo (573 °C). Após, o resfriamento seguiu dentro do forno com ventiladores ligados.

As tensões residuais foram medidas utilizando o método “relaxação de deformações por corte incremental”⁹. Para tal, a peça queimada foi cortada em corpos de prova de 2×8 cm. Cada corte sucessivo (disco de cobre diamantado, espessura de 300 μm) correspondeu a um avanço de 0,5 mm de profundidade. Para cada corte, a leitura da deformação se realizava após 10 min (tempo para estabilização da leitura da deformação). O extensômetro (HBM® com tamanho de grelha 3 mm) foi preso à superfície inferior do corpo de prova conforme procedimento indicado pelo fabricante.

O ensaio de fratura consistiu em realizar uma força de flexão em três pontos, no extremo do corpo de prova. O ensaio faz uso de uma máquina universal de ensaios (Instron, 5889) onde foi montada a configuração mostrada na Figura 3. Esta configuração se assemelha a um cortador manual de revestimentos do tipo “rubi”, utilizado para a realização de cortes no produto acabado. Foram ensaiadas 15 peças do resfriamento P5-600 °C e 15 peças do resfriamento P5-Lento. A avaliação do comportamento foi realizada mediante contagem do número de peças que apresentavam fratura não retilínea, correspondendo a desvios maiores de 3 cm.

Para realizar o ensaio, foi utilizado célula de carga de 10 kN e ponte de flexão com espaçamento entre apoios

de 13 cm. Sobre a máquina foi colocada uma mesa de ensaios adaptada com um apoio central que atua como ponto de flexão e apoio do corpo de prova. Com as peças devidamente centralizadas sobre o apoio central, a força era aplicada, na parte superior da peça, através da ponte de flexão.

O módulo de elástico (E) foi medido pelo método não destrutivo Grindosonic e a rugosidade foi avaliada com rugosímetro Hommelwerkr (T8000). Para o cálculo dos parâmetros foi utilizado um *cut-off* de 0,8 mm.

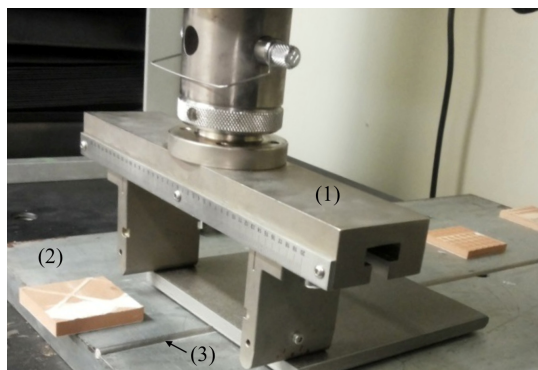


Figura 3. Montagem da máquina universal de ensaios: (1) ponte de flexão; (2) mesa de ensaios e (3) apoio central.

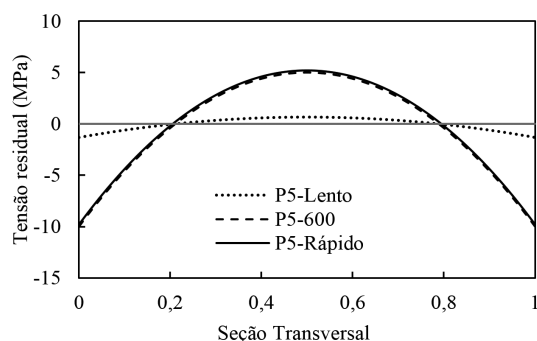


Figura 4. Perfil de tensões para os resfriamentos P5-Lento (...), P5-600 °C (- -) e P5-Rápido (—).

3. Resultados e Discussão

A Figura 4 apresenta o resultado dos perfis de tensões gerados nas peças para os diferentes resfriamentos aplicados. Para os perfis dos resfriamentos P5-600 °C e P5-Rápido, não é possível fazer distinção entre os perfis de tensões gerados. Isso demonstra que as tensões residuais finais da peça são geradas em temperatura superiores a 600 °C e que a transformação alotrópica do quartzo não influencia nas tensões residuais finais da peça.

Comportamento semelhante foi observado por Dal Bó et al.⁸, ao avaliar a influência do tamanho e da fração volumétrica de quartzo nas tensões residuais de uma matriz vítrea de albita com partículas de quartzo. Segundo os autores, cerca de 70% da tensão residual final das peças foi gerada em um intervalo de temperatura entre 850 a 750 °C. Tais tensões podem ser alteradas pelo tamanho e fração volumétrica das partículas de quartzo e pela velocidade de resfriamento.

Os resfriamentos P5-Lento e P5-600 °C geraram dois grupos de estudos denominados “não tensionadas” e “tensionadas”, respectivamente. Nesses casos, é notável a diferença no perfil de tensões residuais entre os dois grupos, provocado pelo gradiente térmico na etapa do resfriamento entre 1207-600 °C. Para ambos resfriamentos, os corpos-de-prova apresentaram tensões de compressão na superfície e de tração no centro. Os corpos-de-prova submetidos ao resfriamento P5-Lento apresentam tensões residuais cerca de 90% menores que os submetidos ao resfriamento P5-600 °C.

No ensaio de flexão, os corpos-de-prova não tensionados (P5-lento) apresentaram uma fratura retilínea ao longo da peça. Nos corpos-de-prova mais tensionados (P5-600 °C), essa fratura dá lugar a uma fratura não retilínea, como pode ser visto na Figura 5.

Para o resfriamento rápido, o percentual de peças com corte inadequado (fraturas não retilíneas) é elevado, alcançando 76% das peças ensaiadas; enquanto que com o resfriamento lento, o percentual de peças com este comportamento é de 7%.

As peças que mostraram uma fratura não retilínea correspondem a um comportamento não desejado.

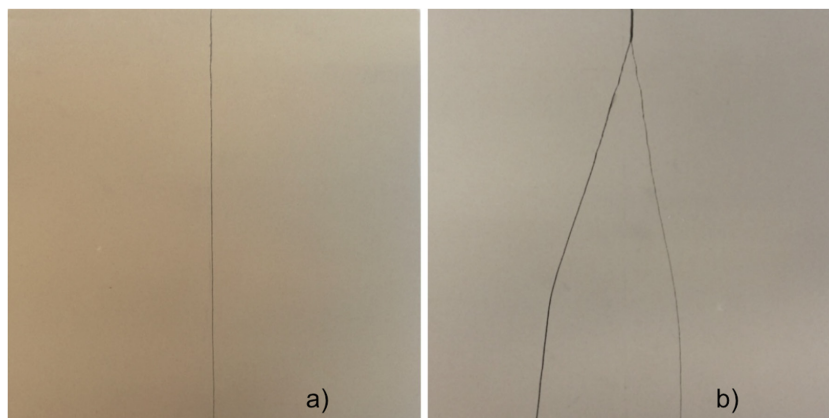


Figura 5. Comportamento de fratura para (a) P5-Lento e (b) P5-600 °C.

Durante sua instalação, através de cortes e perfurações, tal comportamento pode representar perda de material.

A Figura 6 é o resultado da curva de tensão-deformação de uma peça tensionada (P5-600 °C) e uma peça não tensionada (P5-lento). Observa-se que a peça tensionada apresenta maior tensão necessária para fratura (~24% superior), porém uma deformação inferior (~10%). Como $\sigma = E \cdot \epsilon$, verifica-se um maior módulo elástico para a peça tensionada. Os ensaios laboratoriais confirmam que P5-600 °C apresenta um módulo elástico levemente superior ao P5-Lento, 72 e 69 GPa, respectivamente. A energia de deformação, representada pela área sob a curva tensão-deformação foi semelhante para ambos os grupos de peças ~0,35 e ~0,30 J para P5-600 °C e P5-Lento respectivamente. Quanto menor a tenacidade do material, menor será a capacidade de “absorver” a energia imposta pela força, logo com a fratura do material há maior liberação energia, gerando uma fratura não retilínea.

A resistência mecânica medida entre os dois grupos foi de 73 e 80 MPa, para P5-Lento e P5-600 °C respectivamente. Houve um incremento de 7 MPa. As tensões residuais

medidas na superfície foram de -1,3 e -9,8 MPa, para P5-Lento e P5-600 °C respectivamente, uma diferença de 8,5 MPa. De Noni et al.^{9,26} mostraram que em poucas condições de microestrutura e resfriamento, a tensão residual de compressão converte-se em incremento na resistência mecânica. Isso se deve ao aumento de degradações na microestrutura do material, representado pelo aumento do tamanho do defeito natural. Para os resultados do presente estudo, observa-se que o incremento da resistência mecânica foi de aproximadamente 85% do valor gerado de tensão residual na superfície. Este resultado é compatível os dados publicados por De Noni Junior et al.^{9,26}. Desse modo, é possível inferir que houve certa degradação da microestrutura da peça.

As rugosidades médias (Ra) de ambas as amostras não apresentaram diferença significativa, $7,2 \pm 0,8 \mu\text{m}$ para P5-Lento e $6,8 \pm 0,8 \mu\text{m}$ para P5-600 °C (Figuras 7 e 8). Isso sugere que, a nível microestrutural, a fratura ocorre segundo mecanismos semelhantes.

4. Conclusão

- Há uma relação entre o comportamento de fratura, a velocidade de resfriamento e as tensões residuais presentes em peças de porcelanato. Com a modificação dos resfriamentos a altas temperaturas é possível alterar os níveis de tensões residuais. Um resfriamento mais lento não gera gradientes térmicos tão significativos correspondendo a um corpo de prova com menores tensões residuais. Nesse caso, as peças exibem fraturas retilíneas quando comparadas com corpos-de-prova mais tensionados.
- O procedimento proposto para avaliar o comportamento de fratura, baseado no método de flexão por 3 pontos, permite diferenciar de forma semiquantitativa o comportamento de fratura de porcelanatos. Pode ser utilizado como uma ferramenta comparativa entre os níveis de tensões residuais entre corpos de provas que potencialmente causariam problemas em procedimentos de corte.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à equipe do Instituto de Tecnología Cerámica (ITC), Espanha. Este trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pela Comunidade Valenciana, Espanha.

Referências

1. BAUCIA JUNIOR, J. A. et al. Estudo de fundentes alternativos para uso em formulações de porcelanato. *Cerâmica*, v. 56, 262-272, 2010.
2. COTO, B. et al. Influences of turning parameters in surface residual stresses in AISI 4340 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 53, n. 9-12, p. 911-919, 2011. Disponível em: <<http://www.scopus.com/>

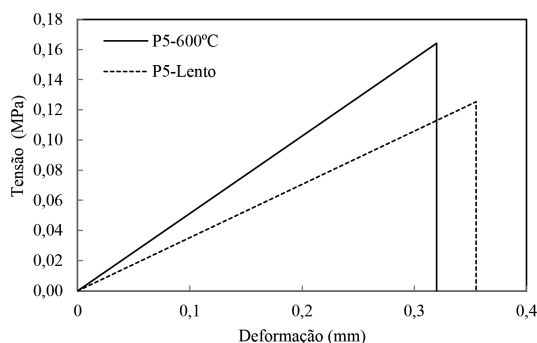


Figura 6. Comportamento tensão-deformação do ensaio de flexão. Fonte: Elaborado pelo autor.

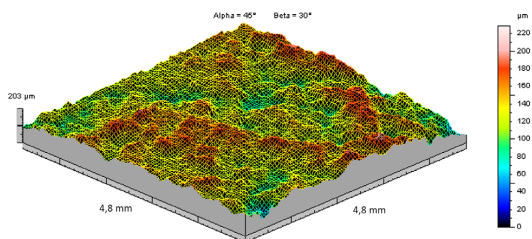


Figura 7. Topografia para P5-Lento.

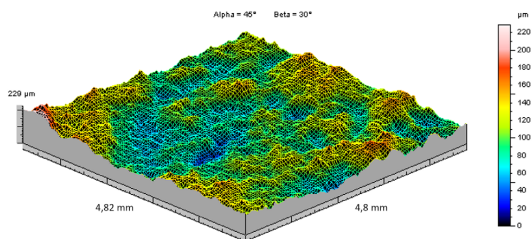


Figura 8. Topografia para P5-600 °C.

- inward/record.url?eid=2-s2.0-79953030085&partnerID=40&md5=829a9aea1027783d33d31bb958dccc70>. Acesso em: 26 fev 2015.
3. DE NONI JUNIOR, A. et al. Analysis of the development of microscopic residual stresses on quartz particles in porcelain tile. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 28, n. 14, p. 2629-2637, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221908001994>>. Acesso em: 26 fev 2015.
 4. SÁNCHEZ, E. et al. Porcelain tile: almost 30 years of steady scientific-technological evolution. **Ceramics International**, v. 36, n. 3, p. 831-845, 2010. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-76449094250&partnerID=40&md5=45d53505223cdd63dc064f973a467fba>>. Acesso em: 13 out 2015.
 5. HOFFMANN, F. S., SANTOS, G., MORELLI, M. R. Estudo de fundente e argilito com potencial para uso em formulações de porcelanato. **Cerâmica**, v. 58, n. 346, p. 174-185, 2012.
 6. PINTO, M. F., SOUSA, S. J. G., HOLANDA, J. N. F. Efeito do ciclo de queima sobre as propriedades tecnológicas de uma massa cerâmica vermelha para revestimento poroso. **Cerâmica**, v. 51, n. 319, p. 225-229, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132005000300009&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 21 dez 2015.
 7. BANNIER, E. et al. Delayed curvature and residual stresses in porcelain tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 33, n. 3, p. 493-501, 2013. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84870294984&partnerID=40&md5=59f3b74fecdd366fe6abe05a1f5876f>>. Acesso em: 11 fev 2016.
 8. DALBÓ, M. et al. Modelización mecánica del enfriamiento rápido en sistemas tipo grés porcelánico. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 51, 95-102, 2012.
 9. DE NONI JUNIOR, A. et al. Influence of macroscopic residual stresses on the mechanical behavior and microstructure of porcelain tile. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 28, n. 13, p. 2463-2469, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221908001246>>. Acesso em: 26 fev 2015.
 10. KE, S. et al. Effect of microstructure on cutting processability of porcelain tile subjected to different firing cycles. **Ceramics International**, v. 39, n. 7, p. 7943-7949, 2013. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84880302172&partnerID=40&md5=833b9e49d938cccd3974a1ef2f1bb82>>. Acesso em: 18 set 2015.
 11. MAGAGNIN, D. et al. Effect of kaolinite, illite and talc on the processing properties and mullite content of porcelain stoneware tiles. **Materials Science and Engineering: A**, v. 618, p. 533-539, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092150931401154X>>. Acesso em: 03 abr 2015.
 12. MOHD SAFFE, S. N. B., NAGAMACHI, T., ONA, H. Residual stress around cut end of hat steel channel by roll forming. **Procedia Engineering**, v. 81, p. 239-244 2014.
 13. NISAR, S. et al. Effect of thermal stresses on chip-free diode laser cutting of glass. **Optics and Laser Technology**, v. 41, n. 3, p. 318-327, 2009. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-57049141632&partnerID=40&md5=43d135e73b9fe804c89c37056f32ae50>>. Acesso em: 24 ago 2016.
 14. YURDAKUL, M. Effect of cutting parameters on consumed power in industrial granite cutting processes performed with the multi-disc block cutter. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 76, p. 104-111, 2015. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84925299877&partnerID=40&md5=266fc61c332887a90c479578a6098df8>>. Acesso em: 12 fev 2016.
 15. CHEN, C. R., BERMEJO, R., KOLEDNIK, O. Numerical analysis on special cracking phenomena of residual compressive inter-layers in ceramic laminates. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 77, n. 13, p. 2567-2576, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001379441000305X>>. Acesso em: 12 fev 2016.
 16. MASMIATI, N., SARHAN, A. A. D. Optimizing cutting parameters in milling end milling for minimum surface residual stress - Taguchi approach. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 60, p. 267-275, 2015. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84909950027&partnerID=40&md5=c4ba4b235d346b962cf35daef28c95dc>>. Acesso em: 26 fev 2015.
 17. WANG, J., FANG, F., ZHANG, X. An experimental study of cutting performance on monocrystalline germanium after ion implantation. **Precision Engineering**, v. 39, p. 220-223, 2015. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84910154410&partnerID=40&md5=b6e18b40fef78a1e6ab3bc11202dbada>>. Acesso em: 12 mar 2015.
 18. BERMEJO, R. et al. Optimal strength and toughness of Al₂O₃-ZrO₂ laminates designed with external or internal compressive layers. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 28, n. 8, p. 1575-1583, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095522190700581X>>. Acesso em: 12 mar 2015.
 19. HBAIEB, K., MCMEEKING, R. M., LANGE, F. F. Crack bifurcation in laminar ceramics having large compressive stress. **International Journal of Solids and Structures**, v. 44, n. 10, p. 3328-3343, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768306003842>>. Acesso em: 03 set 2015.
 20. KOTOUL, M., SEVECEK, O., VYSLOUZIL, T. Crack growth in ceramic laminates with strong interfaces and large compressive residual stresses. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 61, p. 40-50, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844212000663>>. Acesso em: 03 set 2015.
 21. PASCUAL, J., LUBE, T., DANZER, R. Fracture statistics of ceramic laminates strengthened by compressive residual stresses. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 28, n. 8, p. 1551-1556, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221907005833>>. Acesso em: 19 ago 2014.
 22. HO, C. Y. et al. Temperature history for cutting of ceramics preheated by a CO₂ laser. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 192-193, p. 525-531, 2007. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-34547534069&partnerID=40&md5=4cd739afee3d8d55da9f979864e487ef>>. Acesso em: 19 ago 2014.
 23. YAN, Y. et al. CO₂ laser peeling of Al₂O₃ ceramic and an application for the polishing of laser cut surfaces. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 33, n. 10, p. 1893-1905, 2013. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84876697450&partnerID=40&md>

- 5=c327341c2e0adfb3e5abab25a69fe084>. Acesso em: 12 fev 2016.
24. YILBAS, B. S., AKHTAR, S. S., KARATAS, C. Laser cutting of rectangular geometry into alumina tiles. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 55, p. 35-43, 2014. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84887340492&partnerID=40&md5=92978fdb9848c5108d6fd5a39daa17e9>>. Acesso em: 21 dez 2015.
25. WU, Z. et al. Hybrid CO2 laser/waterjet (CO2-LWJ) cutting of Polycrystalline Cubic Boron Nitride (PCBN) blanks with phase transformation induced fracture. **Optics and Laser Technology**, v. 70, p. 39-44, 2015. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84922847386&partnerID=40&md5=f77cb746a41057fe124a8e1d5fd03262>>. Acesso em: 24 mar 2015.
26. DE NONI JUNIOR, A. et al. Influence of composition on mechanical behaviour of porcelain tile. Part III: Effect of the cooling rate of the firing cycle. **Materials Science and Engineering: A**, v. 528, n. 9, p. 3330-3336, 2011. ISSN 0921-5093. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509310014942>>. Acesso em: 03 set 2015.