

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE FERRAMENTA DE CORTE CERÂMICA TEXTURIZADA NA USINAGEM DE FERRO FUNDIDO CINZENTO

Pedro Gustavo Solera Noveleto, pedronoveleto@gmail.com¹

Marcelo Bertolete Carneiro, bertolete@sc.usp.br^{1,4}

Patrícia Alves Barbosa, patricia.a.barbosa@ufes.br^{2,4}

Álison Rocha Machado, alissonm@mecanica.ufu.br^{3,6}

Ricardo Elgul Samad, resamad@ipen.br⁴

Nilson Dias Vieira Júnior, nilsondv@ipen.br⁴

Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br⁴

Amélia Almeida, amelia.almeida@tecnico.ulisboa.pt⁵

¹Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Produção, 13566-590, São Carlos/SP

²Universidade Federal do Espírito Santo – Centro Tecnológico – Departamento de Engenharia Mecânica, 29075-910, Vitória/ES

³Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica, 38408-902, Uberlândia/MG

⁴Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Centro de Lasers e Aplicações, 05508-000, São Paulo/SP

⁵Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, 1049-001, Lisboa/Portugal

⁶Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUC-PR, Curitiba/PR

Resumo: Lasers de pulsos ultracurtos têm sido utilizados como uma tecnologia de fabricação que tem possibilitado modificações nas superfícies de saída de ferramentas de corte por meio da texturização. Este tipo de laser é capaz de produzir uma ablação muito mais precisa do que os lasers convencionais, uma vez que a duração de seus pulsos é menor do que o período de vibração térmica da rede cristalina, o que minimiza a zona afetada pelo calor e preserva as propriedades do material. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de ferramentas de corte de cerâmica branca texturizadas com lasers de pulsos ultracurtos. A superfície de saída das ferramentas foram texturizadas em dois padrões, variando o passo entre os canais. Ensaios de torneamento cilíndrico externo em ferro fundido cinzento foram executados com ferramentas texturizadas e não texturizadas (referência) para comparação de efeitos, mantendo as condições de corte constantes. Os esforços de corte, a rugosidade da peça e a integridade das ferramentas foram as variáveis de saída monitoradas. Os resultados mostraram que não houve diferença entre as ferramentas testadas.

Palavras-chave: Texturização, Laser de pulsos ultracurtos, Usinagem, Cerâmica branca, Ferro fundido cinzento.

1. INTRODUÇÃO

As ferramentas de corte de material cerâmico são utilizadas em operações de desbaste e acabamento, caracterizando-se, respectivamente, por altas taxas de remoção e altas velocidade de corte, sendo aplicadas, principalmente, no corte contínuo de ferros fundidos, aços endurecidos e superligas (Komanduri; Samanta; 1989). As cerâmicas podem ser definidas como compósitos de elementos metálicos e não metálicos, geralmente, encontrados na forma de óxidos, nitretos e carbonetos, com ligações atômicas podendo ser desde puramente iônicas até covalentes (Callister, 2001). Devido às suas propriedades físicas e químicas, as cerâmicas se tornam um material desejável como ferramenta de corte, porque possuem elevada dureza, inércia química e resistência ao desgaste a altas temperaturas (Komanduri; Samanta; 1989; Trent; Wright, 2000; Machado et al., 2015).

Na usinagem dos metais as cerâmicas são divididas em dois grupos, a base de: alumina (Al_2O_3) ou nitreto de silício (Si_3N_4) (Trent; Wright, 2000; Machado et al., 2015). A cerâmica branca, que faz parte deste trabalho, é feita a partir de alumina e possui adição de zircônia (ZrO_2), que possibilita o aumento da sua tenacidade por meio de um mecanismo de transformação de fase, na qual a zircônia metaestável tetragonal sob ação de um campo de tensão, se transforma em monocíclica estável, com grande mudança de volume, gerando assim tensões compressivas, que dificultam a propagação da trinca (Ezugwu; Wallbank, 1987; Komanduri; Samanta; 1989; Hutchings, 1992; Meyers; Chawla, 2009).

A aplicação do laser em ferramentas de corte para além de impressão de códigos é recente, porém alguns estudos têm se dedicado a avaliar as mudanças tribológicas na interface cavaco-ferramenta. Kawasegi et al. (2009); Sugihara; Enomoto (2009); Xie et al. (2013); Zhang et al. (2015) citam que texturizar a região da superfície de saída em uma escala nano ou micrométrica é um meio efetivo de melhorar o desempenho da ferramenta, diminuindo o atrito, ou seja, facilitando o movimento de saída do cavaco, conseqüentemente, diminuindo a força de usinagem e o desgaste da

ferramenta. Ensaios tribológicos em superfícies texturizadas ratificam o conceito de que a texturização influencia no comportamento tribológico da superfície, diminuindo o atrito e aumentando a resistência ao desgaste (Segu, et al., 2013; Shum et al., 2013; Youqiang et al., 2013).

Todavia, utilizar lasers para texturizar cerâmicas, que possuem a característica de serem pouco resistentes ao choque térmico, parece ser algo inviável ou pouco promissor. Entretanto, no decorrer dos últimos anos, o uso de lasers de pulsos ultracurtos na microusinagem tem demonstrado possibilidades de avanços tecnológicos no processo de fabricação, especialmente no que se refere à texturização. Lasers de pulsos ultracurtos, como os de femtossegundos, caracterizam-se por serem de elevada intensidade, terem pulsos de breve duração (10^{-13} a 10^{-15} s), que são mais curtos do que o período de vibração térmica da rede cristalina, o que permite minimizar a zona afetada pelo calor (ZAC), a transferência de calor para o volume do material, bem como, as trincas de origem térmica (Wang et al., 2010; Samad et al., 2012).

Portanto, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo exploratório da aplicação de um laser de pulsos ultracurtos para texturizar ferramentas de corte de cerâmica branca, avaliando o desempenho da ferramenta, por meio dos esforços de corte, rugosidade da peça e integridade da ferramenta, em ensaios de torneamento cilíndrico externo.

2. METODOLOGIA

Ferramentas de cerâmica branca, classe Sandvik CC620, com geometria SNGN 120708, tiveram suas superfícies de saída ($A\gamma$) texturizadas por um laser de femtossegundos de Ti:Safira, modelo Femtopower Compact Pro HR/HP (Femtolasers). A condição de ablação foi mantida constante em 40 μ J de energia por pulso, 30 fs de duração dos pulsos, com 785 nm de comprimento de onda no centro da banda de emissão, 4 kHz de taxa de repetição e fazendo uso de uma lente de 38 mm de distância focal para focar o feixe de laser. A área texturizada foi de 2,5 mm². A Figura (1) ilustra esquematicamente uma ferramenta texturizada e o perfil da textura. Foram idealizados dois modelos de textura, denominados de 1 e 2, na forma de canais paralelos à aresta principal de corte. Os modelos de textura se distinguiram pelo passo entre os canais (dimensão B, Fig. (1)) de 83 e 103 μ m, respectivamente. Os perfis ablaçionados foram caracterizados em um microscópio confocal laser, LEXT OLS4100 (Olympus), de acordo com os seguintes parâmetros: A – Profundidade do vale; B – Passo e C – Crista.

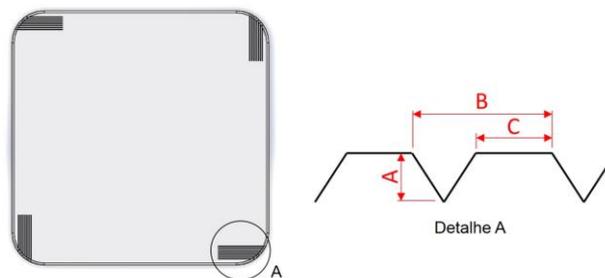


Figura 1. Desenho esquemático da ferramenta e do perfil da textura (A – Profundidade; B – Passo e C – Crista).

Testes de torneamento cilíndrico externo foram executados à seco em um torno CNC GL 240M (Romi). A peça de trabalho foi uma barra cilíndrica de ferro fundido cinzento, FC250 (Tupy S.A.), com dureza média de 200 HB 5/750. As ferramentas foram montadas em um suporte CSRNL 2525M 12-4 (Sandvik), que conferiu uma geometria de corte com ângulo de posição (χ_r) de 75°, ângulo de saída (γ_o) de -6°, ângulo de folga (α_o) de 6° e ângulo de inclinação (λ_s) de -6°. As condições de corte foram mantidas constantes em $vc = 400$ m/min; $f = 0,20$ mm/volta; $ap = 2,0$ mm e $L_f = 15$ mm (percurso de avanço), sabendo-se que houve réplica para cada teste.

As variáveis de entrada do estudo foram as diferentes condições de $A\gamma$. Dessa forma, foram testadas duas ferramentas texturizadas (Modelo 1 e 2) e uma de referência (sem textura). As variáveis de saída foram as componentes ortogonais de força de usinagem (F_x , F_y e F_z), ver Fig. (2), a sua resultante (F_R), os parâmetros de rugosidade da peça (R_a e R_z) e a integridade das ferramentas. Os valores das forças foram obtidos durante os testes de torneamento com o auxílio de um dinamômetro piezoelétrico, modelo 9121, um amplificador de sinais, modelo 5019B, ambos Kistler, e um software analisador de sinais LabVIEW 7.1 (National Instruments). Os valores de rugosidade foram obtidos com um rugosímetro, modelo SJ-201 (Mitutoyo), com comprimento de amostragem (cut-off) de 0,8 mm, conforme ABNT NBR ISO 4288:2008.



Figura 2. Componentes ortogonais de força de usinagem (F_x , F_y e F_z).

3. RESULTADOS

A Figura (3) apresenta os dois modelos de texturas executados na superfície de saída das ferramentas de corte. Em (a) tem-se o inserto texturizado com passo entre canais de $83 \mu\text{m}$ (Modelo 1) e em (b) tem-se o inserto com passo de $103 \mu\text{m}$ (Modelo 2). Observa-se que os canais estão paralelos entre si, porém ficaram ligeiramente inclinados em relação à aresta principal de corte. Isso se deve a pequena dimensão ablacionada, aliada à imprecisão do posicionamento das ferramentas na mesa CNC do sistema de processamento por laser. A análise microscópica também mostrou a ausência de defeitos como lascas ou trincas nas regiões adjacentes à textura, assim como citado por Wang et al. (2010) e Samad et al. (2012).

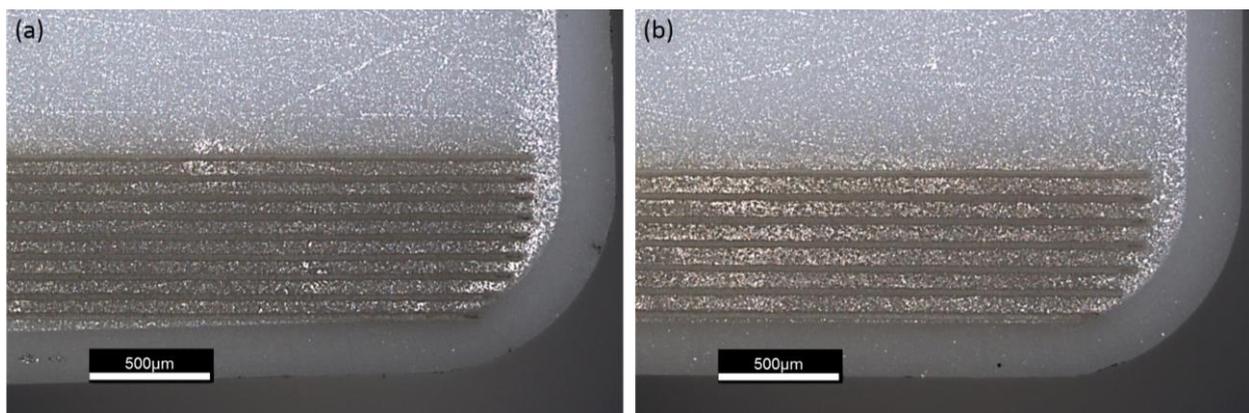


Figura 3. Micrografia da superfície de saída dos insertos texturizados. (a) Inserto com textura modelo 1; (b) Inserto com textura modelo 2.

Com auxílio do microscópio confocal, que possui uma unidade laser que permite fazer medidas precisas da superfície, foi possível mensurar os aspectos das texturas. A Tabela (1) apresenta a média e o desvio-padrão da profundidade dos vales (A), passo entre canais (B) e crista da textura (C), conforme Fig. (1), para os dois padrões de textura.

Tabela 1. Resultado da caracterização das texturas.

| Padrão de Textura | Profundidade (A) [μm] | Passo (B) [μm] | Crista (C) [μm] |
|-------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Modelo 1 | $21,62 \pm 3,00$ | $83,53 \pm 1,94$ | $52,03 \pm 3,67$ |
| Modelo 2 | $23,67 \pm 3,44$ | $103,32 \pm 2,18$ | $71,27 \pm 2,58$ |

Os resultados da caracterização apresentados na Tab. (1) mostram a precisão do laser utilizado. Como as condições de operação do laser foram mantidas constantes, observou-se uma variação de apenas $2 \mu\text{m}$ na média das profundidades dos canais entre os dois padrões de textura. Quanto ao passo, o CNC da mesa de fixação das amostras também se mostrou bastante preciso, a média dos desvios ficou em torno de $2,1 \mu\text{m}$. Finalmente, a crista do segundo padrão de textura foi 37% maior do que a do primeiro, o que teoricamente significa uma área de contato cavaco-ferramenta maior.

Os resultados médios das componentes ortogonais de força são apresentados na Fig. (4).

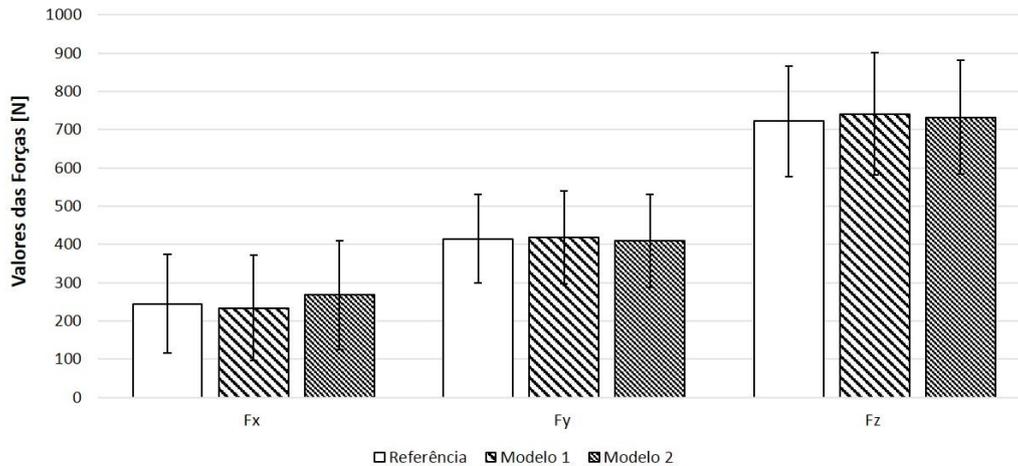


Figura 4. Resultado das componentes de força para as ferramentas de referência e modelos de textura 1 e 2.

Ao observar os valores médios das forças com os seus respectivos desvios-padrão, conclui-se que não houve diferença entre as ferramentas texturizadas e não-texturizadas. A análise fica mais evidente a partir da Fig. (5), que apresenta a resultante das componentes (forças de usinagem) para os três tipos de ferramenta testados.

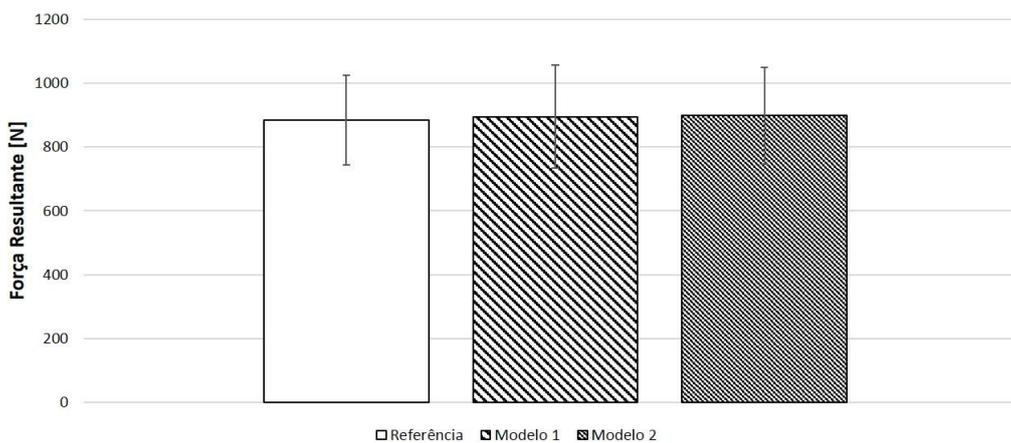


Figura 5. Gráfico comparativo da força resultante para as três ferramentas testadas.

Kawasegi et al. (2009), Xie et al. (2013) e Barbosa et al. (2015) estudaram os efeitos da texturização em ferramentas de metal duro. Todos os autores observaram redução nas componentes da força de usinagem e relataram material da peça aderido nos canais da textura. Barbosa et al. (2015) citam que o material aderido provoca alteração tribológica na interface cavaco-ferramenta, promovendo o fenômeno observado. De fato, a literatura de tribologia (Gählin; Jacobson, 1999) cita que quando o material da peça adere sobre um meio abrasivo, ocorre a redução da sua abrasividade, conseqüentemente, redução do atrito, do carregamento e do desgaste. É importante citar que os autores usinaram materiais dúcteis, que formavam cavacos longos, possivelmente, permitindo a suficiente aderência de material sobre a superfície de saída texturizada das ferramentas, promovendo a redução das forças. No presente estudo, o material da peça utilizado (ferro fundido cinzento) gera uma classe de cavaco descontínuo, de forma fragmentada a até agulha. Provavelmente, esse tipo material frágil não permite a deformação do cavaco a ponto de ancorar quantidade suficiente para alterar o sistema tribológico e, assim, modificar as dimensões das zonas de cisalhamento primário e secundário, causando a redução das componentes das forças de usinagem.

A Figura (6) relaciona os padrões de texturas com a rugosidade deixada na peça, por meio dos parâmetros Ra e Rz.

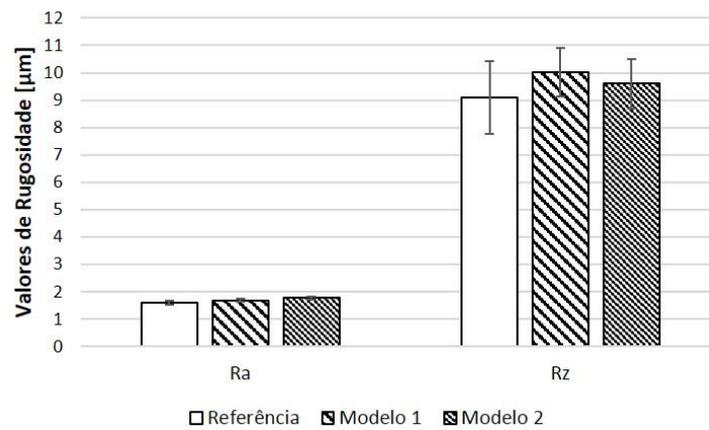


Figura 6. Resultados de rugosidade.

Pela figura observa-se que não houve diferença entre as ferramentas para os parâmetros de rugosidade avaliados, pois os valores médios obtidos com as ferramentas texturizadas estão dentro do desvio-padrão da ferramenta de referência. Ao analisar o comportamento da componente de força ortogonal, F_x , da Fig. (4), que está relacionada à força passiva que, por sua vez, influencia a rugosidade, observa-se que os valores médios da componente para as ferramentas testadas se mantêm muito próximos, então, se conclui que os resultados de rugosidade estão coerentes. Diferentemente dos resultados aqui encontrados, Barbosa et al. (2015) observaram redução nos valores de rugosidade para os parâmetros Ra entre 30-40% e Rz entre 26-30%, para ferramentas de metal duro texturizadas, usinando material de peça que gerava cavaco longo.

A Figura (7) apresenta da esquerda para a direita a superfície de saída (A_γ) e o flanco das ferramentas, após os ensaios de usinagem.

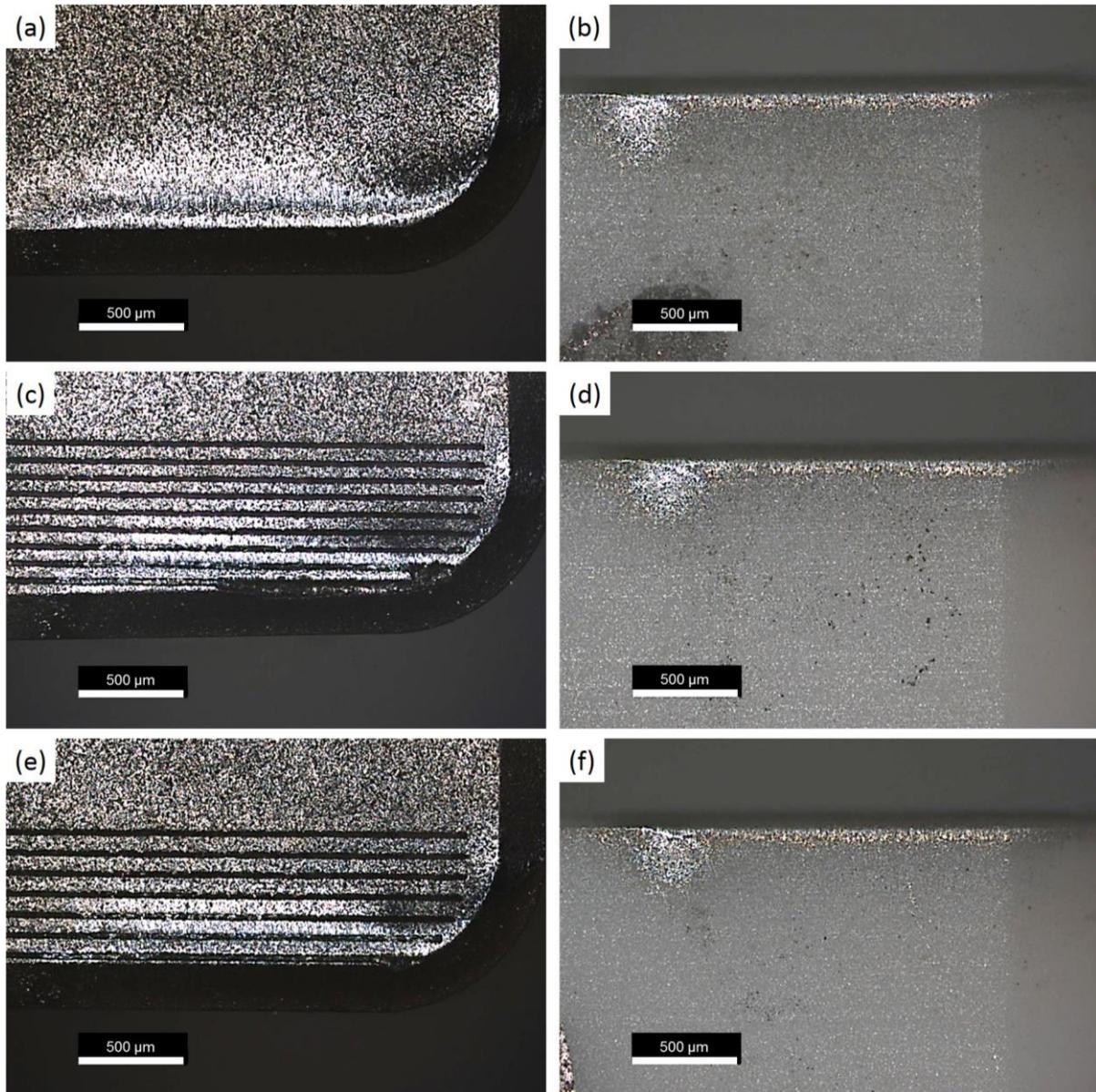


Figura 7. Desgaste das ferramentas. (a) e (b) Referência; (c) e (d) Modelo 1; (e) e (f) Modelo 2.

A Figura (7a) mostra a $A\gamma$ da ferramenta de referência, em que se nota uma pequena região brilhante acima da borda do chanfro da aresta principal de corte, que é um indicativo de material aderido. Posterior a ela, na direção de saída do cavaco, o padrão da superfície se altera, onde acredita-se que esteja relacionado a região de escorregamento. A Figura (7c) apresenta pequenos lascamentos na primeira e na segunda cristas da textura a partir da aresta de corte. Uma avaria ainda menor é observada na Fig. (7e), na primeira crista. Os lascamentos citados nas ferramentas texturizadas, se devem à pequena dimensão da primeira crista (inferior ao padrão, C, Fig. (1)), em ambas as texturas. A ligeira inclinação da textura em relação a aresta de corte, como comentado na Fig. (3), também pode ter contribuído para este lascamento, sendo possível remediar. Nota-se pela Fig. (7b,d,f) que o desgaste de flanco para todas as ferramentas é semelhante, com valor de VB_B muito pequeno, em torno de $50 \mu\text{m}$. Ao analisar o conjunto dos resultados, força e rugosidade, nota-se que mesmo tendo ocorrido os pequenos lascamentos das texturas, o desempenho destas ferramentas durante a usinagem não foi diferente em relação à de referência. Estes resultados podem ser atribuídos ao tipo de material usinado, ferro fundido cinzento, que é frágil e desenvolve cavaco da classe descontínua, de modo que as características topográficas da superfície de saída das ferramentas não interferiram no processo de formação do cavaco, nas condições de corte aqui testadas.

4. CONCLUSÕES

O laser de femtossegundos foi capaz de promover a texturização das ferramentas cerâmicas sem causar defeitos aparentes, como trincas e lascamentos. Os resultados sugerem que os modelos de texturas não modificaram o comportamento das ferramentas texturizadas em relação à de referência, no torneamento do ferro fundido cinzento FC 250, nas condições de corte testadas, para as variáveis de saída analisadas, forças de corte e rugosidade. Finalmente, o desgaste de flanco observado foi semelhante para todas as ferramentas. No entanto, foram observados alguns lascamentos na primeira e segunda cristas da textura, a partir da aresta principal de corte, tendo como possível causa a dimensão reduzida da primeira crista e o erro de posicionamento da ferramenta durante a texturização.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (405707/2013-4; 150490/2014-3 e 150188/2015-3), à FAPESP (2013/26113-6) e à USP (83-1/1046/2016 PUB) pelo fomento à pesquisa, e à Tupy S.A. pela doação do material da peça de trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR ISO 4288, 2008, “Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil-regras e procedimentos para avaliação de rugosidade”, 10 p.
- Barbosa, P.A.; Bertolete, M.; Samad, R.E.; Vieira Junior, N.D.; Machado, I. F.; Machado, A.R.; Vilar, R.M.C.S. and Rossi, W., 2015, “Investigation of Femtosecond Laser Texturing in Cemented Carbide Cutting Tools”, Proceedings of Lasers in Manufacturing Conference, Munich, Germany.
- Callister, W.D.Jr., 2001, “Fundamentals of materials science and engineering”, John Wiley & Sons, 5th Edition, New York, 524 p.
- Ezugwu, E.O. and Wallbank, J., 1987, “Manufacture and properties of ceramic cutting tools: A review”, *Material Science and Technology*, v. 3, pp. 881-887.
- Gählin, R.; Jacobson, S., 1999, “The particle size effect in abrasion studied by controlled abrasive surfaces”, *Wear*, 224, pp. 118-125.
- Hutchings, I.M., 1992, “Tribology: friction and wear of engineering of materials”, Arnold, London, 272 p.
- Kawasegi, N.; Sugimori, H.; Morimoto, H.; Morita, N. and Hori, I., 2009, “Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior”, *Precision Engineering*, 33, pp. 248-254.
- Komanduri, R.; Samanta, S.K. 1989. “Ceramics”, *ASM Handbook. Machining*, ASM International, Vol. 16, pp. 98-104.
- Machado, A.R.; Abrão, A.M.; Coelho, R.T. e da Silva, M.B., 2015, “Teoria da usinagem dos materiais”, Editora Edgard Blücher, 2ª Edição, São Paulo, 371 p.
- Meyers, A.M. and Chawla, K.K., 2009, “Mechanical behavior of materials”, Cambridge University Press, Cambridge, 856 p.
- Samad, R.E.; Machado, L.M.; Junior, N.D.V. and de Rossi, W., 2012, “Ultrashort laser pulses machining. In *Laser Pulses – Theory, technology and applications*”, Prof. Igor Peshko, editor, InTech, pp.143-174.
- Segu, D.Z., Choi, S.G., Choi, J-h and Kim, S.S., 2013, “The effect of multi-scale laser texturing surface on lubrication regime”, *Applied Surface Science*, Vol. 270, pp. 58-63.
- Shum, P.W., Zhou, Z.F. and Li, K.Y., 2013, “Investigation of the tribological properties of the different textured DLC coatings under reciprocating lubricated conditions”, *Tribology International*, Vol. 65, pp. 259-264.
- Sugihara, T. and Enomoto, T., 2009, “Development of a cutting tool with a nano/micro-textured surface – Improvement of anti-adhesive effect by considering the texture patterns”, *Precision Engineering*, 33, pp. 425-429.
- Trent, E.M. and Wright, P.K., 2000, “Metal cutting”, Butterworth-Heinemann, 4th Edition, Boston, 446 p.
- Xie, J.; Luo, M.J.; Wu, K.K.; Yang, L.F. and Li, D.H., 2013, “Experimental study on cutting temperature and cutting force in dry turning of titanium alloy using a non-coated micro-grooved tool” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 73, pp. 25-36.
- Youqiang, X., Jianxin, D., Xiuting, F. and Sheng, Y., 2013, “Effect of laser surface texturing on Si₃N₄/TiC ceramic sliding against steel under dry friction”, *Materials and Design*, Vol. 52, pp. 234-245.
- Wang, X.C., Zheng, H.Y., Chu, P.L., Tan, J.L., The, K.M., Ang, B.C.Y. and Tay, G.H., 2010, “High Quality Femtosecond Laser Cutting of Alumina Substrates” *Optics and Laser in Engineering*, Vol. 48, pp. 657-663.
- Zhang, K., Deng, J., Xing, Y., Li, S. and Gao, H., 2015, “Effect of microscale texture on cutting performance of WC/Co-based TiAlN coated tools under different lubrication conditions”, *Applied Surface Science*, Vol. 326, pp. 107-118.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EVALUATION OF TEXTURED CERAMIC TOOL PERFORMANCE IN MACHINING OF GREY CAST IRON

Pedro Gustavo Solera Noveleto, pedronoveleto@gmail.com¹

Marcelo Bertolete Carneiro, bertolete@sc.usp.br^{1,4}

Patrícia Alves Barbosa, patricia.a.barbosa@ufes.br^{2,4}

Álison Rocha Machado, alissonm@mecanica.ufu.br^{3,6}

Ricardo Elgul Samad, resamad@ipen.br⁴

Nilson Dias Vieira Júnior, nilsondv@ipen.br⁴

Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br⁴

Amélia Almeida, amelia.almeida@tecnico.ulisboa.pt⁵

¹School of Engineering of São Carlos – University of São Paulo, 13566-590, São Carlos/SP, Brazil

²Federal University of Espírito Santo – Department of Mechanical Engineering, 29075-910, Vitória/ES, Brazil

³Federal University of Uberlândia, Faculty of Mechanical Engineering, 38408-902, Uberlândia/MG, Brazil

⁴Nuclear and Energy Research Institute – Center for Laser and Applications, 05508-000, São Paulo/SP, Brazil

⁵Instituto Superior Técnico – University of Lisbon, 1049-001, Lisboa/Portugal

⁶Mechanical Engineering Graduate Program, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 80215-901, Curitiba/PR, Brazil

Abstract: *Ultrashort-pulse lasers have been used as a manufacturing technology that allows modifying the rake surfaces of cutting tools by means of texturing. This type of laser has an ablation more accurate than conventional lasers, since the time duration of pulses is shorter than the thermal vibration period of the material lattice, which minimize the heat affected zone and preserve the surrounding material properties. In this context, the aim of this work is to evaluate the performance of white ceramic tools textured by ultrashort laser pulses. The rake face of tools were textured in two patterns, varying the pitch between grooves. External cylindrical turning tests were carried out in grey cast iron with textured and non-textured (reference) tools for comparison. The cutting conditions were kept constant. Cutting forces, surface roughness and tool wear were the output variables monitored. The results showed that there was not performance difference among the cutting tools tested.*

Keywords: *Texturing, Ultrashort laser pulses, Machining, White ceramic, Grey cast iron.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.