

RELAÇÃO ENTRE OXIDAÇÃO DO CAVACO E TEMPERATURA DE CORTE NO FRESAMENTO DE AÇOS PARA MOLDES E MATRIZES

Daniel de Carvalho Secco

Universidade de São Paulo, EESC
secco.daniel@ifsp.edu.br

Alessandro Roger Rodrigues

Universidade de São Paulo, EESC
roger@sc.usp.br

Renato Goulart Jasinevicius

Universidade de São Paulo, EESC
renatogj@sc.usp.br

Paulo Sérgio Pizani

Universidade Federal de São Carlos, UFSCar
pizani@df.ufscar.br

Resumo. A variação da cor dos cavacos, resultado de tipos e espessuras de diferentes óxidos de ferro, trata-se de um fenômeno intrínseco ao corte, revelando o fluxo térmico durante a usinagem. Para isso, propõem-se nesta pesquisa compreender a formação de óxidos em cavacos e obter, a partir desta análise, uma relação entre as cores dos mesmos com o comportamento térmico durante o fresamento de topo de um aço para moldes e matrizes. Para este fim, a cor dos cavacos foi relacionada ao desgaste de flanco primário da ferramenta de metal duro, variando-se três meios: a seco, com fluido convencional e criogênico. Nas condições a seco e criogênica, observou-se muita semelhança das cores e, consequentemente, dos tipos de óxidos formados, sugerindo temperaturas de corte próximas nas duas condições. Já com fluido convencional, a variação de cores dentro de um mesmo ciclo de usinagem (mesmo cavaco) evidenciou grande instabilidade térmica, que levou ao breve fim da vida da ferramenta nesta condição comparada às outras. Por meio da análise das cores dos cavacos, associada à caracterização dos óxidos por Microespectroscopia Raman, foi possível identificar o efeito das diferentes condições de refrigeração no fluxo térmico durante a usinagem.

Palavras chave: Fresamento, Cor do cavaco, Temperatura, Óxidos.

1. INTRODUÇÃO

Dentre as inúmeras técnicas de análise da temperatura de corte, a coloração dos cavacos é frequentemente adotada como um parâmetro qualitativo desta mesma temperatura. Sua análise, quase sempre, serve apenas como indicador do quão intenso foi o calor na zona de corte (Chen *et al.*, 2013; An *et al.*, 2014; Boyd; Veldhuis, 2017). No entanto, a alteração da cor dos cavacos é um fenômeno intrínseco ao corte e, por sua vez, pode representar com fidelidade o comportamento térmico na região de corte, mesmo em condições que dificultam a análise térmica, como por exemplo, sob aplicação de fluidos convencionais, criogênicos, ou em processos de corte interrompidos. O aumento da temperatura de corte é reflexo de um aumento da energia despendida para realizar o processo de corte, energia essa essencial para a ativação do processo difusivo de íons do material metálico que vão se combinar com íons de oxigênio atmosférico, formando uma ou mais camadas óxidas sobre a superfície do cavaco, que causam, assim, uma alteração da sua cor original.

Sob condições isotérmicas, a uma faixa de temperatura de 700 a 1250 °C, em materiais ferrosos, é comum a formação de três tipos de óxidos de ferro: uma espessa camada, em contato com o metal, de wustita – FeO (azul/preto), uma fina camada intermediária de magnetita - Fe₃O₄ (preto) e uma externa, extremamente fina, de hematita - Fe₂O₃ (marrom/vermelho). Nestas condições, a espessura destes óxidos mantém-se na proporção aproximada de 95/4/1, respectivamente (Paidassi, 1958). Esta proporção reflete o fato de que o coeficiente de difusão do ferro na wustita é muito maior do que na magnetita, e que a difusão do ferro e do oxigênio na hematita é extremamente lento (Chen; Yuen, 2003). O comportamento dos óxidos em ferro puro ou aços baixa-liga, sob condições isotérmicas, a temperaturas na faixa de 570 – 700 °C, difere muito em cada caso, a depender da temperatura e tempo de oxidação (Chen; Yuen, 2002), material e preparação da amostra (Caplan; Cohen, 1966). Abaixo de 570 °C a wustita é termodinamicamente instável e,

comumente, formam-se apenas hematita e magnetita. Abaixo desta temperatura, sob condições isotérmicas, normalmente se observa a decomposição da wustita nos seus óxidos superiores (Chen; Yuen, 2003): magnetita e hematita.

Estes fenômenos são comumente observados em processos de oxidação isotérmica, no qual a formação do óxido dá-se de forma controlada. No entanto, em processos fora do equilíbrio, como na usinagem, com altas taxas de deformação, aquecimento e resfriamento, a formação e crescimento dos óxidos difere dos encontrados na oxidação isotérmica. Em processos de laminação com resfriamento contínuo, por exemplo, quanto maior a taxa de resfriamento, menor a espessura da camada de óxido (Chen; Yuen, 2002). Durante a formação do cavaco, praticamente toda energia consumida no corte é conduzida pelo cavaco, que sofre, quase instantaneamente, oxidação e, por sua vez, alteração de sua cor original. Sendo assim, este trabalho investigou os fenômenos térmicos que governam a formação dos óxidos em cavacos e, portanto, a alteração de sua cor, a fim de monitorar a temperatura de corte e sua oscilação durante processo de usinagem com ferramenta de geometria definida.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Ensaio de fresamento de topo foram realizados em um centro de usinagem ROMI, modelo Discovery 560, com velocidade de corte de 270 m/min, avanço por dente de 0,12 mm, profundidade de usinagem de 1,0 mm e penetração de trabalho de 17,5 mm. O material usinado trata-se do aço comercial Villares VP100, utilizado na fabricação de moldes, com dureza média de 33 HRC e composição (% em peso) de 0,22 C, 1,90 Mn, 0,58 Cr, 0,25 Mo, 0,40 Ni, 0,40 Si. Foram utilizados insertos de metal duro com revestimento de (Ti,Al)N em um porta-fresa de 25 mm de diâmetro. O efeito do desgaste da ferramenta e do meio (a seco, com fluido emulsionável e criogênico) foi confrontado com as cores dos cavacos obtidos. Como fluido criogênico foi adotado o nitrogênio líquido armazenado em um *dewar* de 50 l, lançado na região de corte a uma pressão de 11 psi (75,8 kPa) e temperatura de -175 °C. Como fluido emulsionável utilizou-se um fluido de base mineral, semissintético, a uma concentração de 8% em água.

Para análise da cor dos cavacos, foi preciso alinhá-los e, para melhor interpretação das cores, as imagens foram feitas com um microscópio digital de 2 megapixels sob luz branca. Cavacos que não sofreram oxidação durante os ensaios foram selecionados para testes *ex-situ* em um forno cilíndrico vertical para análise de sua coloração sob diferentes temperaturas. Estes cavacos foram expostos a temperaturas de 600, 700, 800, 850, 900 e 950 °C por 3 segundos. As diferentes cores geradas foram analisadas e comparadas com os cavacos de diferentes colorações obtidos durante os ensaios de fresamento. A caracterização dos óxidos nos cavacos foi feita em um Microespectroscópio Raman (Horiba, Labram HR evolution), com uma potência de 14,7 mW, 1 µm de diâmetro do *spot* e um tempo de análise de 60 s.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 observa-se a curva de evolução do desgaste de flanco primário da ferramenta com o tempo de corte no processo de fresamento a seco, com fluido e criogênico. No interior do gráfico apresenta-se a variação de cor e forma dos cavacos no meio e no fim da vida da ferramenta de corte para os três meios utilizados.

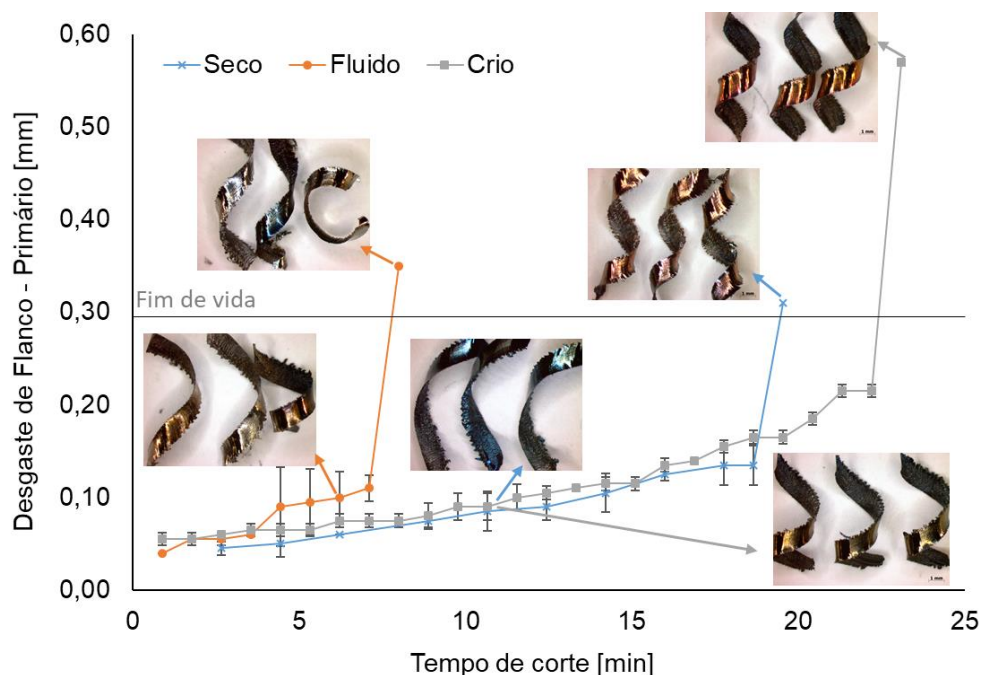


Figura 1. Curva de evolução do desgaste de flanco primário com o tempo de corte.

Em todas as condições houve uma progressão contínua do desgaste da ferramenta, mas uma avaria abrupta a partir de determinado tempo de corte levou ao fim da vida da ferramenta (último ponto de cada condição após a vida de 0,3 mm). Este fenômeno sugere uma grande instabilidade térmica nos três casos, mas, especialmente, na condição com fluido convencional em que o tempo de corte foi aproximadamente 160% menor do que nas condições a seco e criogênica (Secco *et al.*, 2017). Esta instabilidade térmica na condição com fluido ficou evidente ao se analisar a cor e forma dos cavacos no interior do gráfico da Figura 1. Com base apenas na Figura 2, nota-se que nas condições a seco e criogênica, os cavacos apresentaram cor semelhantes, seja no início, meio e fim da vida da ferramenta, o que revela que a temperatura nos cavacos destas condições atingiu valores semelhantes. A princípio os cavacos apresentaram tons de azul claro/dourado, e com o desgaste da ferramenta tornaram-se marrom. Enquanto isso, os cavacos da condição com fluido, mesmo dentro de um mesmo ciclo de usinagem (único cavaco), apresentaram cores variadas: prata, azul, dourado e roxo (Figura 2).

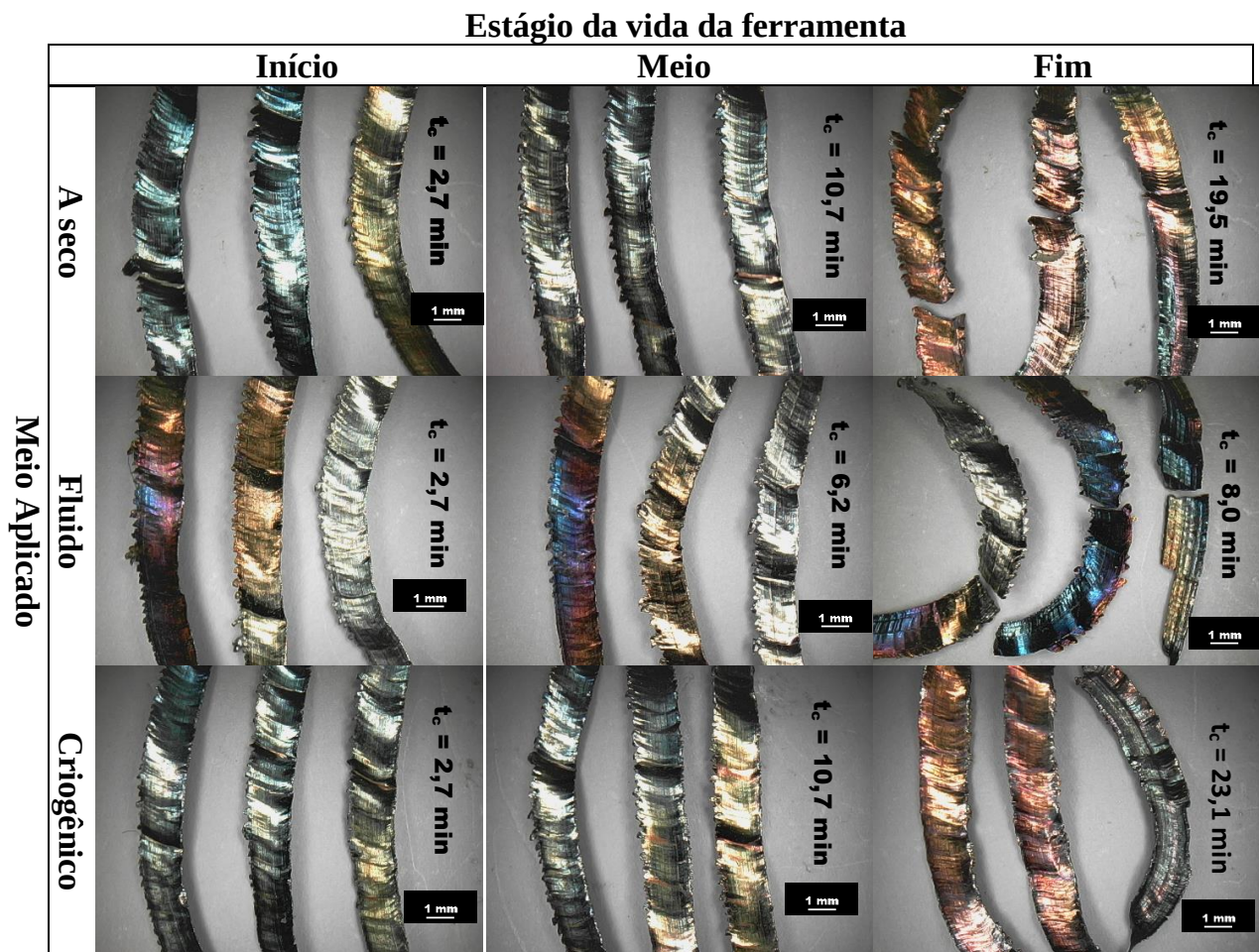


Figura 2. Variação da cor dos cavacos com os estágios de vida da ferramenta e meio lubrificadorrefrigerante aplicado.

A variação da cor dos cavacos se deve à formação de tipos e espessuras distintas de óxidos de ferro nos cavacos, que estão intrinsicamente ligados à temperatura de corte (Venkatesh *et al.*, 1993). Sendo assim, a variação de cor revela também variação térmica. Utilizando a microespectroscopia Raman foi possível caracterizar os tipos de óxidos referentes a diferentes cores encontradas em um dos cavacos da condição com fluido (Figura 3).

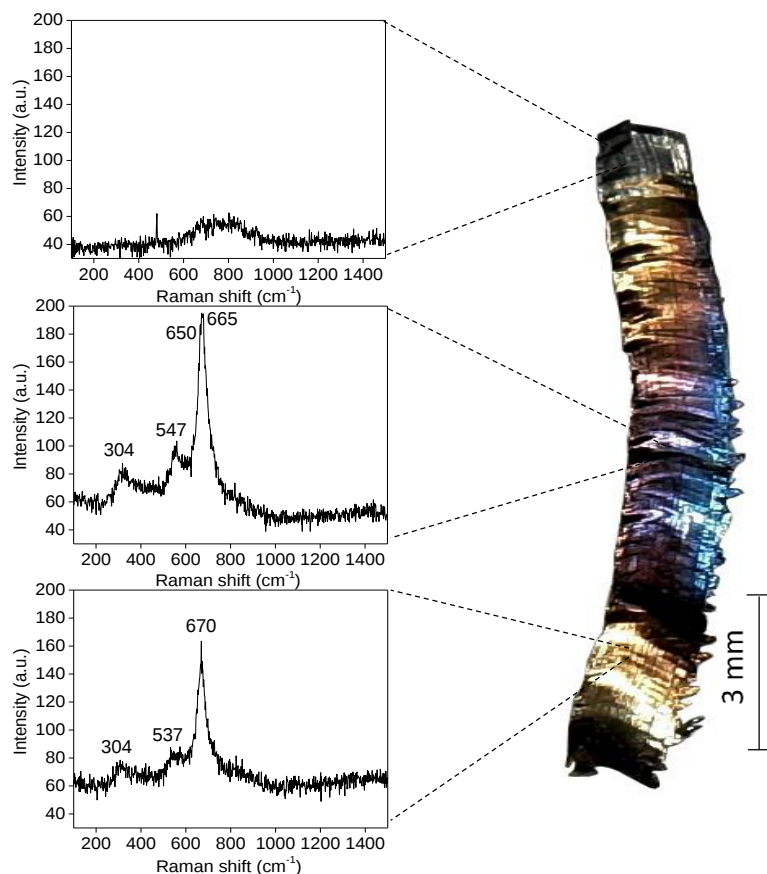


Figura 3. Espectros Raman ao longo do comprimento de um único cavaco (condição com fluido convencional).

Nota-se na Figura 3 uma combinação de cores que revela diferentes espectros, dependendo da região em que se faz as análises. Na região prata (porção superior na imagem do cavaco), o espectro revela que não houve formação de óxido, enquanto a posição dos picos dos espectros realizados nas cores dourado (inferior) e azul/roxo (meio), apresentam basicamente uma combinação entre wustita e magnetita (Tabela 1). A wustita, encontrada na natureza com a coloração azul, só se forma a temperaturas acima de 570 °C (Zhang; Guo, 2009). Sendo assim, verifica-se que regiões deste cavaco (Figura 3) ultrapassaram 570 °C enquanto outras regiões, como a de coloração prata, não atingiram este valor. Esta flutuação térmica está associada com a capacidade de penetração do fluido na região de corte, que varia ao longo da formação do cavaco, dependendo das condições de escoamento do fluido, do contato cavaco-ferramenta e da temperatura de corte (Smith *et al.*, 1988).

Tabela 1. Microespectroscopia Raman tipicamente encontrada em materiais ferrosos.

Óxido	Espectros Raman (cm ⁻¹)							Referência
Magnetita	304	537/547	665/670	-	-	-	-	Este trabalho
Magnetita	310	530	667	-	-	-	-	(Markovski et al., 2017)
Magnetita	310	540	670	-	-	-	-	(Hanesch, 2009)
Magnetita	302	534	663	-	-	-	-	(De Faria et al., 1997)
Wustita	-	-	650	-	-	-	-	Este trabalho
Wustita	-	595	-	-	-	-	-	(Liu et al., 2017)
Wustita	-	-	654	-	-	-	-	(De Faria, 1997)
Wustita	450	-	650	-	-	-	-	(Thibau, 1978)

A partir de cavacos pratas (sem presença de óxido) sob diferentes temperaturas, por 3 segundos em forno, observa-se como ocorre a variação de cor nos cavacos (Figura 4). Com o aumento da temperatura, a cor dos cavacos foram: dourado (600 °C), dourado + roxo (700 °C), azul escuro + roxo (800 °C), azul claro + cinza (850 °C), cinza (900 °C) e cinza (950 °C). Considerando a usinagem de aços baixa-liga, outros autores identificaram também uma sequência semelhante de cores dos cavacos com o aumento da temperatura (An *et al.*, 2014; Boyd; Veldhuis, 2017; Venkatesh *et al.*, 1993; Zhang; Guo, 2009). Não é possível fazer uma correlação direta entre as cores obtidas neste ensaio estático (Figura 4) com as cores obtidas no fresamento (Figura 2), uma vez que os tempos de oxidação são diferentes, e influenciam a formação de óxidos. No entanto, com base nas cores de cavacos identificados na condição com fluido convencional (Figura 3), comparativamente às cores identificadas nos cavacos expostos em forno (Figura 4), é possível indicar que a amplitude de variação da temperatura no cavaco da condição com fluido chega a ser de 200 °C.

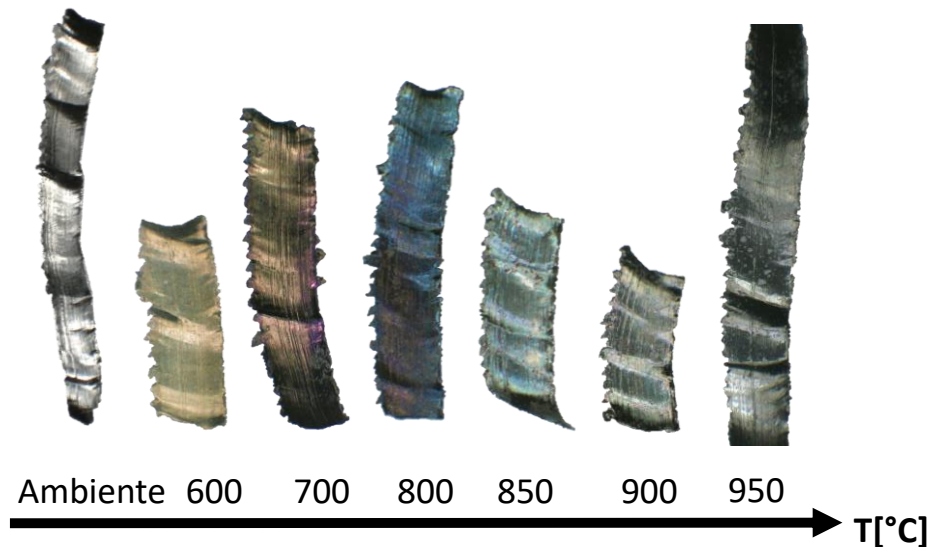


Figura 4. Variação da cor dos cavacos com a temperatura.

3. CONCLUSÃO

A análise visual da cor dos cavacos associada à caracterização dos óxidos permitiu melhor compreensão do fluxo térmico durante a usinagem, mesmo para condições de difícil acessibilidade como a criogênica e com fluido convencional.

Similares cores e tipos de óxidos entre os cavacos das condições a seco e criogênica revelaram que, apesar do efeito de refrigeração deste na região de corte, as temperaturas nos cavacos das duas condições foram semelhantes, efeito provável do aumento da resistência do material da peça, o que justifica os tempos de vida da ferramenta semelhantes nas duas condições.

As oscilações de cores nos cavacos, em um ciclo de usinagem, na condição com fluido convencional comprovam o fenômeno de variação térmica de até 200 °C causado pela acessibilidade limitada do fluido de corte durante alguns períodos do corte da ferramenta, responsável pelo rápido fim de sua vida comparado às outras condições.

4. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de doutorado, e ao Departamento de Física da Universidade Federal de São Carlos, que na pessoa do Professor Paulo Sérgio Pizani, realizou e analisou os ensaios de Microspectroscopia Raman.

5. REFERÊNCIAS

- An, Q. et al., 2014. Experimental investigation on hard milling of high strength steel using PVD-AlTiN coated cemented carbide tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol.. 43, p. 94–101.
- Boyd, J. M.; Veldhuis, S. C., 2017. Manifestations of reduced tool-chip friction during turning of AISI 1045 steel with PVD-coated carbide inserts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.. 91, n. 1–4, p. 687–698.
- Caplan, D.; Cohen, M., 1966. Effect of Cold Work on the Oxidation Iron from 400-650 °C. *Corrosion Science*, Vol. 6, February, p. 321–335.
- Chen, R. Y.; Yuen, W. Y. D., 2002. Oxidation of low-carbon, low-silicon mild steel at 450-900°C under conditions relevant to hot-strip processing. *Oxidation of Metals*, Vol. 57, n. 1–2, p. 53–79.
- Chen, R. Y.; Yuen, W. Y. D., 2003. Review of the High-Temperature Oxidation of Iron and Carbon Steels in Air or Oxygen. v. 59, n. 1.
- Chen, X. et al., 2013. Investigation on the chip formation concerning tool inclination angles in ball end milling of H13 die steel. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 228, n. 3, p. 337–355.
- De Faria, D. L. A.; Silva, S. V.; De Oliveira, M. T., 1997. Raman microspectroscopy of some iron oxides and oxyhydroxides. *Journal of Raman Spectroscopy*, v. 28, n. February, p. 873–878.
- Hanesch, M., 2009. Raman spectroscopy of iron oxides and (oxy)hydroxides at low laser power and possible applications in environmental magnetic studies. *Geophysical Journal International*, Vol. 177, n. 3, p. 941–948.
- Paidassi, J., 1958. The kinetics of the air oxidation of iron in the range 700 - 1250°C. It. *Acta Metallurgica*, Vol. 6, n. 3.
- Liu, A. et al., 2017. Evolution of nanoscale zero-valent iron (nZVI) in water: Microscopic and spectroscopic evidence on the formation of nano- and micro-structured iron oxides. *Journal of Hazardous Materials*, v. 322, p. 129–135.
- Markovski, C. et al., 2017 Abiotic versus biotic iron mineral transformation studied by a miniaturized backscattering Mössbauer spectrometer (MIMOS II), X-ray diffraction and Raman spectroscopy. *Icarus*, Vol. 296, p. 49–58.
- Secco, D.; Rodrigues, A.; Matsumoto, H., 2017. Fresamento de aço para moldes e matrizes em condições criogênicas. In *Proceedings of the IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF2017*. Joinville, Brazil.
- Smith, T.; Naerheim, Y.; Lan, M. S., 1988. Theoretical analysis of cutting fluid interaction in machining. *Tribology International*, Vol. 21, n. 5, p. 239–247.
- Thibreau, R. J.; Brown, C. W.; Heidersbach, R. H., 1978. Raman Spectra of Possible Corrosion Products of Iron. *Applied Spectroscopy*, Vol. 32, n. 6, p. 532–535.
- Venkatesh, V. C. et al., 1993 A Study of Chip Surface Characteristics during the Machining of Steel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 42, n. 1, p. 631–636.
- Zhang, S.; Guo, Y. B., 2009. An experimental and analytical analysis on chip morphology, phase transformation, oxidation, and their relationships in finish hard milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, n. 11, p. 805–813.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Relationship between Chip Oxidation and Cutting Temperature when Milling Die and Mold Steels

Daniel de Carvalho Secco

University de São Paulo, EESC
secco.daniel@ifsp.edu.br

Alessandro Roger Rodrigues

University of São Paulo, EESC
roger@sc.usp.br

Renato Goulart Jasinevicius

University of São Paulo, EESC
renatogj@sc.usp.br

Paulo Sérgio Pizani

Federal University of São Carlos, UFSCar
pizani@df.ufscar.br

Abstract. Chip color variation resulting from types and thicknesses of different iron oxides is a phenomenon intrinsic to the cut, revealing the thermal flux during machining. Hereupon, this paper proposes to understand the formation of oxides in chips and to obtain a relationship between the chip colors and the thermal behavior when milling mold and die steels. For this purpose, the chip color was related to the main flank wear of the carbide tool, varying three conditions: dry, wet and cryogenic cooling. In dry and cryogenic conditions, similar chip colors and types of oxides have indicated close cutting temperatures. Otherwise, in wet condition, the chip color variation in a unique machining cycle (single chip) has evidenced great thermal instability that led to the brief end of the tool life in this condition compared to others. By analyzing the chip colors associated with the oxides' characterization by Raman microspectroscopy, the effect of different cooling conditions on the thermal flux during the machining was able to identify.

Keywords: Milling, Chip color, Temperature, Oxide

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.