

COBEF2017-1298

AVALIAÇÃO DO USO DE FERRAMENTAS DE NITRETO DE SILÍCIO REVESTIDAS E NÃO REVESTIDAS NA USINAGEM DOS FERROS FUNDIDOS VERMICULAR E CINZENTO

Fabio Antonio Xavier, f.xavier@ufsc.br¹

Lourival Boehs, boehs.l@ufsc.br¹

Wilson Luiz Guesser, wguesser@tupy.com.br²

Eberhard Abele, info@ptw.tu-darmstadt.de³

¹Universidade Federal de Santa Catarina, CTC, Caixa Postal 476 – Campus Universitário – Trindade – CEP 88040-900 – Florianópolis/ SC – Brasil,

²Universidade do Estado de Santa Catarina,

³Technische Universität Darmstadt-TU-Darmstadt

Resumo: A utilização do ferro fundido vermicular (FV) é de extrema importância na indústria automotiva, sendo utilizado na fabricação de blocos e cabeçotes de motores, principalmente para motores diesel. Apesar dos significativos desenvolvimentos em materiais para ferramenta de corte e no próprio FV, a sua usinabilidade é ainda extremamente baixa quando comparado com o ferro fundido cinzento (FC-250), principalmente em operações de usinagem de corte contínuo como o mandrilamento. Este fato tem motivado inúmeras pesquisas na sua usinagem e gerado grandes avanços, porém, ainda não se dispõe de materiais de ferramentas de corte capazes de alcançar os mesmos tempos e custos verificados na usinagem do FC com ferramentas de nitreto de silício (Si_3N_4). Neste contexto, o presente trabalho consistiu na realização de ensaios de torneamento de longa duração para analisar o desgaste das ferramentas de nitreto de silício revestidas ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$) e não revestidas na usinagem do FV-450 e do FC-250. Além disso, foram realizados ensaios de bancada para análise da interação química entre o Si_3N_4 com o FV-450 e o FC-250. Com base nesses experimentos pôde-se encontrar como causa da grande diferença do comportamento do desgaste do Si_3N_4 na usinagem do FV-450 e FC-250 os fenômenos térmicos, químicos e mecânicos que ocorrem na interface cavaco/ferramenta. As reações triboquímicas que ocorrem na usinagem do FV-450 favorecem o desgaste da ferramenta, enquanto que na usinagem do FC-250 há a ocorrência de uma camada protetora sobre a ferramenta.

Palavras-chave: Ferro fundido vermicular, Ferro fundido cinzento, Nitreto de silício, Reações triboquímicas.

1. INTRODUÇÃO

A escassez das tradicionais fontes de energia fósseis, principalmente o petróleo, e a conscientização da sociedade sobre o aquecimento global têm impulsionado o desenvolvimento e o emprego de tecnologias que melhorem o desempenho e a eficiência dos motores de combustão interna, como o uso de injeção direta, turbo compressores e downsizing (aumento da potência e diminuição do volume e da massa do motor). Como vantagens da elevação da pressão da queima do combustível podem ser citados a maior eficiência da combustão, o aumento do rendimento, a redução da emissão de poluentes e o regime de trabalho mais silencioso. Por sua vez, a elevação da pressão da queima do combustível implica um aumento do carregamento mecânico do bloco de motor (Dawson, 2002).

O ferro fundido cinzento (FC), material tradicionalmente usado na fabricação de blocos de motores diesel, nos atuais níveis do seu desenvolvimento, somente suportaria as solicitações dos esforços do aumento da pressão da queima do combustível através do aumento da área da seção do material, situação esta indesejada.

Por sua vez, o ferro fundido vermicular (FV), com suas propriedades mecânicas intermediárias às do FC e do ferro fundido nodular, é a melhor opção técnica para a construção dos blocos de motores a diesel, (Guesser; Guedes, 2016), porém sua usinabilidade em relação ao FC é muito baixa, principalmente em processos de corte de operações de corte contínuo (Xavier, 2012).

Na usinagem do FC, a utilização de cerâmicas à base de nitreto de silício (Si_3N_4) permite trabalhar em processos de torneamento e mandrilamento com velocidades na ordem de 400 a 800 m/min, com elevadas taxas de remoção e vida da ferramenta (Xavier, 2012). Estes resultados são bem diferentes dos observados na usinagem do ferro fundido vermicular, em que as vidas não chegam a 5% do valor obtido durante a usinagem do ferro fundido cinzento (Sahm; Abele; Schulz, 2002; Xavier, 2003), gerando grande demanda por entender os mecanismos de desgastes para possibilitar o desenvolvimento de novos materiais mais resistentes a esses mecanismos.

Neste contexto, o presente trabalho consistiu na realização de ensaios de torneamento de longa duração para analisar o desgaste das ferramentas de nitreto de silício revestidas ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$) e não revestidas na usinagem do FV-450 e do FC-250. Além disso, foram realizados ensaios de bancada para análise da interação química entre o Si_3N_4 com o FV-450 e o FC-250.

2. MÉTODOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os corpos de prova em FC e FV foram fornecidos pela empresa Tupy S.A e tiveram sua forma definida, buscando garantir a semelhança microestrutural, as propriedades mecânicas e as dimensões verificadas nos blocos de motores. A composição química dos ferros fundidos vermicular (FV-450) e cinzento (FC-250) atende as normas ABNT FC-250 e ISO 16612/JV/450/S.

Os resultados da caracterização microestrutural do FC mostram uma liga com matriz perlítica, espaçamento das lamelas de perlita entre 0,473-0,915 μm , com grafita com forma I, tipo A e tamanho entre 4 e 5. Já o FV apresentou uma matriz perlítica com 2% ferrita, espaçamento entre lamelas de perlita entre 0,337 e 0,957 μm , grafita na forma 3 e 6, com 6% de nódulos e 86% grafitas apresentaram um tamanho classificado entre 6 e 8.

Quanto às propriedades mecânicas do FC e do FV, estas são sumarizados na Tab. (1).

Tabela 1. Caracterização da microdureza, dureza macro e resistência à tração do ferro fundido cinzento.

Material	Microdureza da Perlita [HV 01]	Dureza Brinell [HB]	Resistência à Tração [MPa]
Ferro fundido cinzento	296 a 335 HV	216	306
Ferro fundido vermicular	321 a 350 HV	263	515

Para os ensaios de torneamento foram utilizadas ferramentas de nitreto de silício revestidas e não revestidas, possuindo ambas o mesmo substrato, com um tamanho médio do grão de 2 μm . Os dados da caracterização microestrutural da ferramenta de nitreto de silício podem ser vistos na Tab. (2).

Tabela 2. Caracterização do substrato da ferramenta de nitreto de silício.

Substrato	Tipo	Ligante [%]	Densidade [g/cm ³]	Dureza [HV10]	Tenacidade [M $\text{pam}^{1/2}$]
105	$\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$	5,5	3,23	1620	7,0

Além da realização dos ensaios com ferramentas de nitreto de silício não revestida, foram realizados ensaios com ferramentas de nitreto de silício revestidas com $\text{Al}_2\text{O}_3\text{+TIN}$. A espessura da camada de cada revestimento é de aproximadamente 2 μm e foram produzidos pelo processo de deposição através de fase vapor (CVD).

As ferramentas cerâmicas utilizadas na pesquisa possuíam geometria CNMX120712 SN e foram ensaiadas utilizando um suporte CCLNL 25x25 M12 M7. Como parâmetros de corte para os ensaios com FV e ferramentas de nitreto de silício revestida e não revestida utilizou-se velocidade de corte de 400 m/min, profundidade de corte de 2 mm e avanço de 0,4 mm. Já para os ensaios de usinagem do FC com ferramenta de nitreto de silício sem revestimento utilizou-se como parâmetros velocidade de corte de 800 m/min, avanço de 0,4 mm e profundidade de corte de 2 mm.

A realização dos ensaios de usinagem do ferro fundido cinzento com ferramentas cerâmicas de nitreto de silício teve o objetivo de servir como referencial para avaliar o comportamento das ferramentas cerâmicas na usinagem do ferro fundido vermicular. Essa escolha ocorreu por dois motivos: a ampla utilização do ferro fundido cinzento na indústria e o interesse desta pesquisa em verificar como se desenvolve o desgaste da ferramenta cerâmica de nitreto de silício durante a usinagem do ferro fundido cinzento.

Os ensaios de torneamento de desgaste e medição de força foram efetuados no *Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen – PTW* (Instituto para o Gerenciamento da Produção, Tecnologia e Máquinas-Ferramentas), em um torno da marca Boehringer, modelo VDF 180 C_U/DL 1000, com comando CNC Philips 3580 e potência disponível de 25 kW.

A medição das forças de usinagem foi feita com um dinamômetro tipo 9067B da firma Kistler. Foram adquiridos sinais nas direções X, Y e Z.

A medição do desgaste deu-se no flanco principal da ferramenta através da largura máxima do desgaste de flanco VB_{max} e do desgaste de flanco VB_B . Como critério para fim de vida, considerou-se um VB_{max} de 0,6 mm.

O progresso do desgaste foi documentado por meio de um microscópio de ferramentaria modelo MVP250, da empresa OGP, dotado de uma câmera digital para aquisição de imagens.

Informações sobre a difusão entre a ferramenta e a peça são muito difíceis de serem obtidas em testes de usinagem, pois as evidências da interação geralmente são removidas com os cavacos. Para entender melhor o processo de desgaste químico das ferramentas de nitreto de silício e avaliar as interações químicas que ocorrem entre essas e os ferros fundidos vermicular e cinzento durante a usinagem, buscou-se simular em ensaios de bancada as condições de usinagem, elevada temperatura e pressão de contato entre os pares.

Para analisar as interações químicas entre as ferramentas cerâmicas revestidas ($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$) e não revestidas (Si_3N_4) em contato com os ferros fundidos vermicular e cinzento, em alta temperatura e sob atmosfera controlada foram produzidos pares de amostras dos ferros fundidos. Os pares possuíam dimensões de $12,7 \times 12,7 \times 4$ mm (área de contato = $161,29 \text{ mm}^2$) foram polidos e logo após limpos com acetona em um aparelho de ultrassom. Posteriormente, eles foram montados em uma matriz de aço inoxidável ABNT 304 e submetidos às temperaturas de 900 e 1100 °C, sob alto vácuo, por um tempo de 5 horas.

Para assegurar o contato e a pressão na superfície de contato dos pares, a matriz foi parafusada com nove parafusos em aço inox ABNT 304 M10, aplicando um torque de 40 Nm em cada parafuso.

Os ensaios foram realizados em um forno modelo HTK 8 MO da firma GERO Hochtemperaturöfen GmbH. Esse forno permite atingir temperaturas na ordem de 1600 °C e vácuo na ordem de 2×10^{-5} mBar.

Após a realização dos ensaios, os pares foram retirados da matriz, embutidos, polidos e analisados no microscópio eletrônico de varredura. Aqui realizou-se a análise micrográfica e química para a caracterização das interações químicas.

Para a análise das ferramentas foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura da marca Philips, modelo XL 30. A identificação dos elementos químicos se deu mediante de um detector de fluorescência de raio-X (EDAX TM DX4) integrado ao microscópio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios realizados com a ferramenta Si_3N_4 sem revestimento na usinagem do ferro fundido vermicular mostram que na condição ensaiada a usinagem do ferro fundido vermicular é praticamente inviável, apresentando um desgaste extremamente prematuro. Em todas as repetições ensaiadas a ferramenta apresentou uma vida de aproximadamente 1 (um) minuto, perfazendo somente dois passes ou um comprimento de corte equivalente a 420 m (Fig. (1a)). A alta taxa de desgaste da ferramenta de nitreto de silício é refletida diretamente nas medições das forças de corte, onde logo após o primeiro passe as forças de avanço e passiva são maiores que o valor da força de corte (Fig. (1b)).

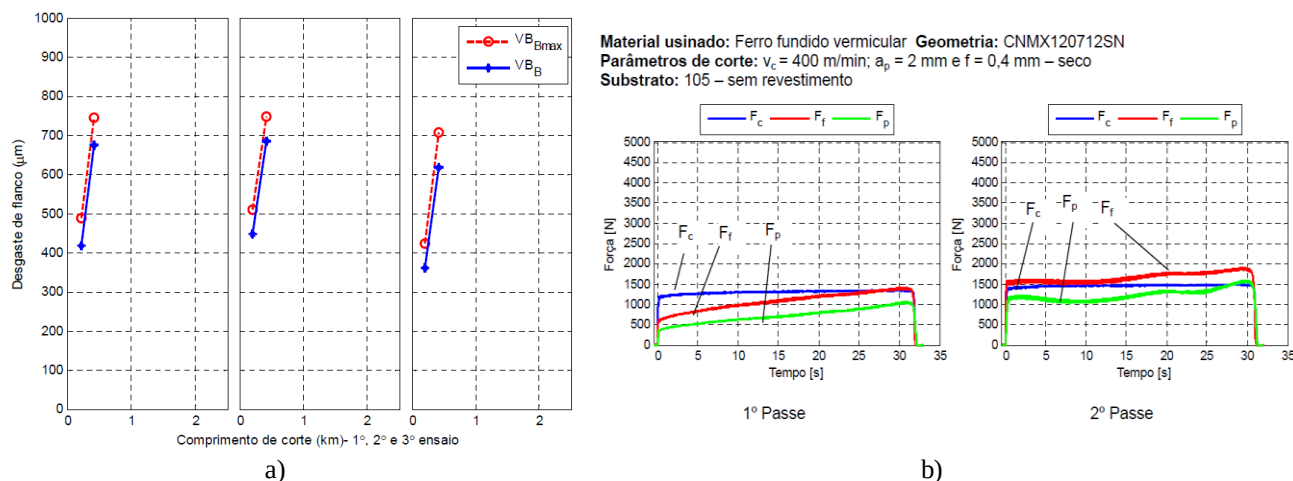


Figura 1. Curvas de desgaste e de esforços de usinagem durante a usinagem do FV com ferramentas Si_3N_4 não revestidas: a) Degaste de flanco e b) Caracterização das forças de corte.

A utilização da ferramenta de nitreto de silício revestida com camadas de Al_2O_3 e TiN, ambas com espessuras médias na ordem de $2 \mu\text{m}$, trouxe melhoras significativas na vida da ferramenta em relação às ferramentas com o mesmo substrato não revestidas. Em relação à essas ferramentas, a vida da ferramenta revestida com dupla camada de revestimento quintuplicou.

Como pode ser visto na Fig. (2a), constata-se que o desenvolvimento das curvas de desgastes foi mais ameno, apresentando a tendência de formação das três regiões clássicas de desenvolvimento descritas por Zum Gahr (1987) e Paucksch (1996): período ameno (0,5 km), período constante (0,5 até 1,5 km) e o período de colapso (acima de 1,8 km).

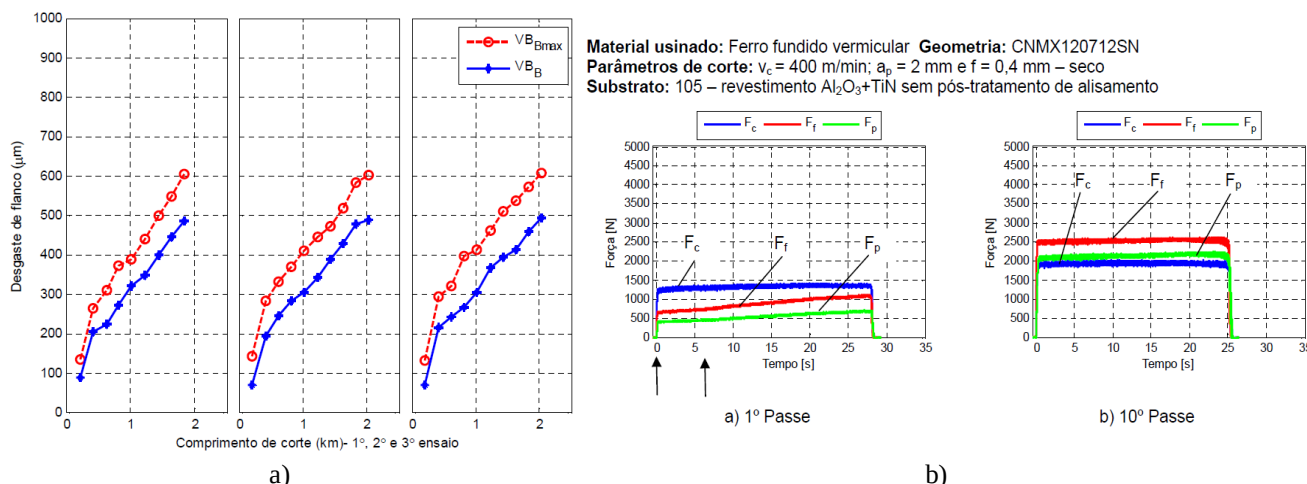


Figura 2. Curvas de desgaste e de esforços de usinagem durante a usinagem do FV com ferramentas Si_3N_4 revestidas (Al_2O_3+TiN): a) Degaste de flanco e b) Caracterização das forças de corte.

O comportamento da ferramenta de Si_3N_4 revestida com Al_2O_3+TiN em relação às outras ferramentas não revestidas aqui ensaiadas pode ser explicado em função da dupla camada de revestimento empregada sobre ela. O TiN apresenta como vantagens, elevada dureza, elevada resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito. Já o óxido de alumínio possui elevada resistência ao desgaste abrasivo e difusivo (Pauksch, 1996; König; Klocke, 2002; Tönshoff; Denkena, 2004). Assim, a proteção do substrato da ferramenta contra abrasão e difusão e a redução do coeficiente de atrito são aumentadas pela dupla camada de revestimento. A camada dupla de revestimento protege a ferramenta por mais tempo, pois a remoção do revestimento ocorre de uma maneira gradual, primeiro o nitreto de titânio e posteriormente o revestimento de óxido de alumínio.

O efeito positivo da dupla camada de revestimento é reforçado quando é analisado o desenvolvimento das forças de usinagem. Na Figura (2b-a) são diagramadas as forças de usinagem para o primeiro passe na usinagem do ferro fundido vermicular. Aqui se observa, na região indicada pelas setas, que, por um curto período de tempo, as forças de avanço e passiva se mantiveram em um patamar constante. Após essa faixa de tempo especificada, aproximadamente 7,5 segundos, vê-se um aumento linear das forças de avanço e de corte.

A faixa em que as componentes da força de usinagem não aumentaram de valor corresponde ao período em que o revestimento não foi removido do flanco e da face da ferramenta. Isso mostra que a deposição de revestimentos mais duros, com melhores propriedades tribológicas e estabilidade química que o substrato, é um caminho para a redução do desgaste das ferramentas de nitreto de silício durante a usinagem do ferro fundido vermicular. Esse comportamento foi observado em todas as repetições com as ferramentas revestidas.

Após a remoção do revestimento da ferramenta descrito anteriormente, todas as componentes da força de usinagem aumentaram de valor, refletindo o aumento na intensidade da taxa de desgaste da ferramenta até o momento da falha da ferramenta de corte, como mostra a Fig. (2b-b). Nesta figura, é observado que as forças passiva e de avanço ultrapassam os valores da força de corte.

Apesar da melhora significativa obtida na vida da ferramenta de Si_3N_4 revestida com Al_2O_3 em relação à ferramenta não revestida, a sua utilização em processos comerciais continua impedida pela sua reduzida vida.

A realização dos ensaios de usinagem do FC com ferramentas cerâmicas de nitreto de silício mostram que para as condições aqui ensaiadas, diferentemente do verificado na usinagem do FV, a utilização da ferramenta cerâmica na usinagem do FC é altamente recomendada. Mesmo com o dobro da velocidade de corte, a ferramenta foi capaz de perfazer 100 passes, totalizando 20 km de comprimento de corte e, mesmo assim, não alcançou o critério de fim de vida estabelecido, demonstrando um excelente desempenho, como mostra a Fig. (3a).

O bom resultado pode ser verificado no acompanhamento do desenvolvimento das forças de usinagem durante o primeiro e o centésimo passe. Na Figura (3b) observa-se claramente a constância da força de corte em relação às forças passiva e de avanço. No caso da força de avanço, essa apresenta, durante o centésimo passe, um valor 63% superior ao seu valor médio medido durante o primeiro passe. Já para o caso da força passiva, o aumento foi na ordem de 55%, bem menor que o incremento observado com as mesmas ferramentas quando usinando o FV.

As análises da ferramenta de nitreto de silício não revestida realizadas no microscópio eletrônico de varredura após a usinagem do FC (Fig. (4a)) revelam claramente a formação de uma camada recobrindo parte da ferramenta. Essa camada se estende da face da ferramenta até o flanco principal e secundário da ferramenta, recobrindo toda a sua quina. A área que a camada recobre corresponde à espessura do cavaco.

Ainda analisando Fig. (4a) é possível perceber que a camada aderida apresenta uma elevada espessura. A espessura da camada pode ser observada na região final dela, onde fica clara a diferença de altura entre o relevo da face da ferramenta, sem a camada aderida, e a região recoberta pela camada aderida. Além da diferença de altura entre o plano

da face da ferramenta e a camada aderida, é possível notar também que a camada aderida é formada pela sobreposição de camadas, apresentando uma morfologia com aspecto liso. O aspecto liso da camada aderida é causado pelo movimento de escoamento do cavaco sobre esta superfície.

Essa camada é formada devido à presença de inclusões de sulfeto de manganês (MnS) contidas na matriz do ferro fundido cinzento. O mecanismo de formação de cavaco do FC, tipo frágil, que gera uma intermitência no contato com a ferramenta, facilita a adesão das inclusões de MnS sobre a ferramenta. Além disso, a intermitência do processo de formação do cavaco típica da usinagem do FC reduz o tempo de contato do cavaco com a ferramenta, o que por sua vez reduz a temperatura da ferramenta. Sobre esse efeito, ensaios de torneamento do FV auxiliados por ultrassom mostraram resultados positivos e aumentaram significativamente a vida das ferramentas de CBN (Guo et al., 2013), o que comprova tal teoria.

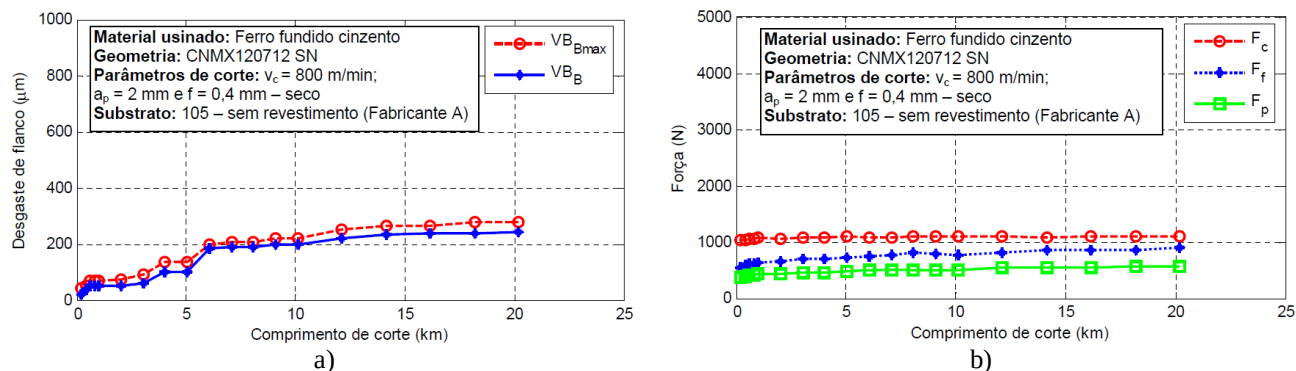


Figura 3. Curvas de desgaste e de esforços de usinagem durante a usinagem do FV com ferramentas Si_3N_4 revestidas ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$): a) Degaste de flanco e b) Caracterização das forças de corte.

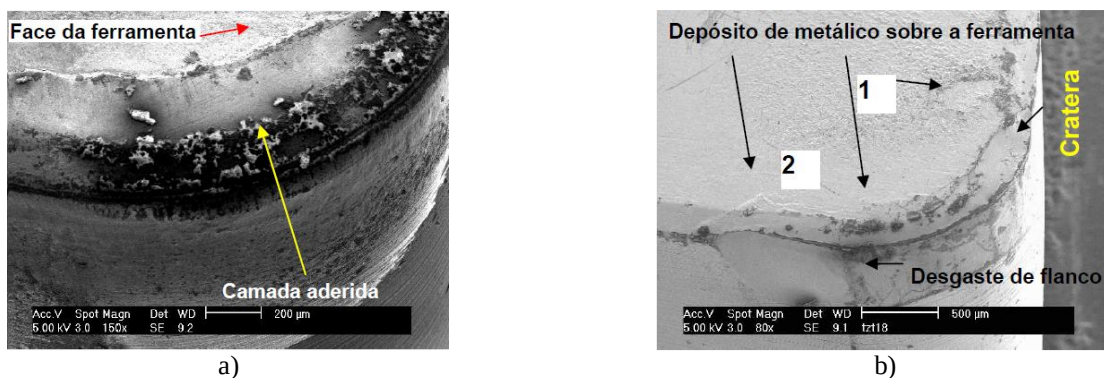


Figura 4. Caracterização do desgaste da ferramenta: a) Usinagem do FC com Si_3N_4 não revestido e b) Usinagem do FV com Si_3N_4 não revestido.

As análises realizadas nas ferramentas de Si_3N_4 sem revestimento, utilizadas na usinagem do FV não apresentaram a formação de tal camada aderida, conforme pode ser observada na Fig. (4b).

Os ensaios de difusão química do FV e FC com as ferramentas de silício revestidas e sem revestimento serviram para determinar como se desenvolve o desgaste químico das ferramentas na usinagem, porém de forma estática, e sem os esforços mecânicos do processo de usinagem.

A realização dos ensaios de interação química estática entre o nitreto de silício não revestido e os ferros fundidos cinzento e vermicular, ensaios FC/ $\text{Si}_3\text{N}_4/1.100$ e FV/ $\text{Si}_3\text{N}_4/1.100$, respectivamente, é esclarecedora, pois na condição testada ocorreu a formação de fase líquida entre o nitreto de silício e os ferros fundidos, como pode ser observada na Fig. (5a) e Fig. (5b).

A formação da fase líquida pode ter ocorrido por duas causas: a primeira é que a difusão dos elementos silício e ferro fez com que, na região da interface entre a cerâmica e os ferros fundidos vermicular e cinzento, fosse atingido o ponto do eutético dos ferros fundidos, que possui temperatura de fusão na ordem de 1.140°C , coexistindo austenita e fase líquida (Callister, 2003). A segunda hipótese é a formação de um composto ferro-silício na interface que, de acordo com Heikinheimo et al. (1997), em temperaturas próximas a 1.200°C , formam a fase líquida do eutético.

Brinksmeier e Bartsch (1988), simulando o carregamento térmico da usinagem sob ferramentas de nitreto de silício, observaram a formação de fase líquida na ferramenta de nitreto de silício. Segundo Brinksmeier e Bartsch (1988), se

este mecanismo ocorresse durante a usinagem utilizando o nitreto de silício, a superfície lisa verificada nas ferramentas desgastadas seria causada pelo espalhamento da fase fundida pelo cavaco sobre a ferramenta.

A realização dos ensaios com ferramentas cerâmicas de nitreto de silício revestidas, $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$, reforça o conhecimento da função protetora dos revestimentos e traz informações complementares de como se desenvolve o desgaste da ferramenta revestida durante a usinagem dos ferros fundidos vermicular e cinzento. A Figura (6) mostra as micrografias dos pares FC/ Si_3N_4 /1.100 e FV/ Si_3N_4 /1.100.

Pode-se verificar que a interação da ferramenta revestida com os ferros fundidos vermicular e cinzento é limitada à camada mais externa de revestimento, a do nitreto de titânio. Essa camada de revestimento sofreu o ataque mais severo da frente de difusão, sendo parcialmente dissolvida pela matriz do ferro. Outro fator que reduz a taxa de desgaste das ferramentas revestidas utilizadas neste ensaio é a segunda camada de revestimento de Al_2O_3 , pois devido a sua maior estabilidade química, e por ela estar protegida pela camada externa de nitreto de titânio, ela evita o avanço da frente de difusão que dissolveu o nitreto de titânio, protegendo assim o substrato de nitreto de silício por mais tempo.

Em se tratando do ferro fundido cinzento, a utilização de ferramentas de nitreto de silício revestidas e não revestidas para a sua usinagem é amplamente recomendada, pois essas alcançam vidas extremamente elevadas em relação às vidas obtidas usinando o ferro fundido vermicular.

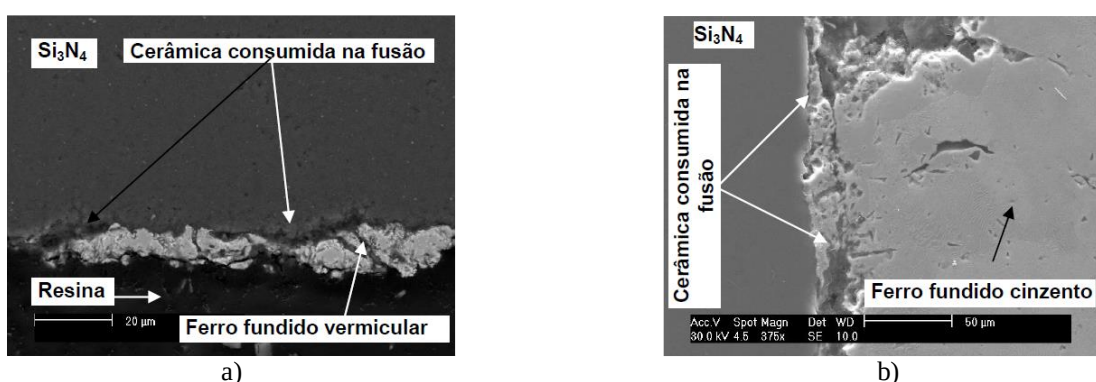


Figura 5. Análise micrográfica dos ensaios de interação química na temperatura de 1.100 °C: a) FV com Si_3N_4 ; e b) FC com Si_3N_4 .

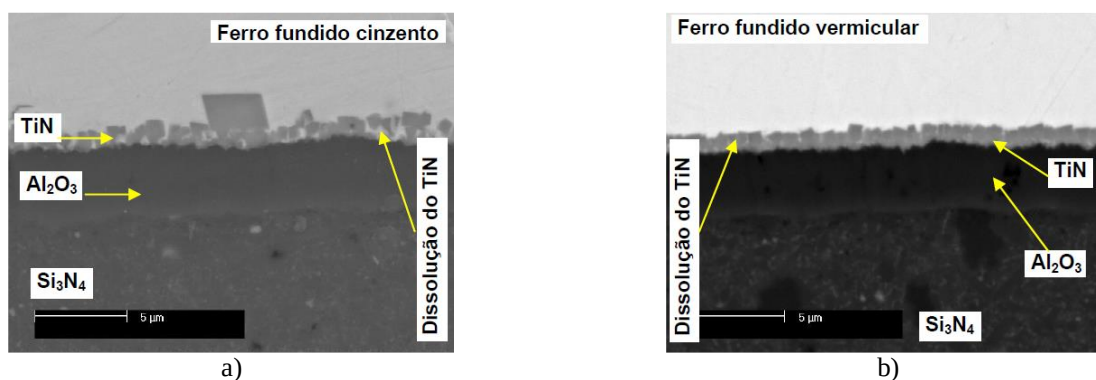


Figura 6. Análise micrográfica dos ensaios de interação química na temperatura de 1.100 °C: a) FC com Si_3N_4 revestido; e b) FV com Si_3N_4 .

Como principais causas para o melhor desempenho das ferramentas de nitreto de silício usinando o ferro fundido cinzento são apresentadas a menor resistência mecânica dessa liga; a sua forma da grafita, que influencia no mecanismo de formação de cavaco deixando-o intermitente; e as inclusões de MnS.

Tais diferenças facilitam a formação de uma camada protetora sobre a face da ferramenta de nitreto de silício que usina o ferro fundido cinzento. A camada apresenta grande quantidade de manganês e enxofre, elementos que compõem o sulfeto de manganês (Xavier, 2009). Essa camada aderida age como uma barreira contra os mecanismos de desgaste abrasivo, difusivo e de adesão que ocorrem durante a usinagem. A proteção ocorre de duas formas: na primeira, ela isola a ferramenta de nitreto de silício; na segunda, ela age como um meio lubrificante, fazendo com que o cavaco deslize melhor sobre a ferramenta, diminuindo assim o atrito e o calor gerado na face da ferramenta (Xavier, 2009).

A ausência da formação desta camada protetora na ferramenta de nitreto de silício durante a usinagem do FV aparece como a principal causa da diferença de comportamento desta em relação ao FC. Assim, em função das elevadas temperaturas e da elevada afinidade química entre o ferro e o silício, ocorre a formação de produtos de pouca resistência

mecânica, como os silicetos e silicatos (Xavier, 2009). Devido a sua pouca resistência mecânica, esses produtos são facilmente removidos pelos esforços de usinagem, explicando a formação de cratera e micro-sulcos que estas ferramentas apresentam após a usinagem do ferro fundido vermicular.

4. CONCLUSÕES

Após a realização de ensaios de torneamento a seco do FC e FV com ferramentas de nitreto de silício, com e sem revestimento, as seguintes conclusões podem ser efetuadas:

As ferramentas de nitreto de silício não revestidas se mostram inviáveis para a usinagem do ferro fundido vermicular nas condições testadas nesta pesquisa, apresentando elevadas taxas de desgaste, perfazendo somente dois passes por gume testado.

A utilização de revestimento de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ melhorou o desempenho da ferramenta significativamente, quintuplicando a vida da ferramenta. Isso mostra que o revestimento protege o substrato da ferramenta, retardando a ação dos mecanismos de desgastes atuantes, principalmente difusão e abrasão.

O emprego do nitreto de silício na usinagem do ferro fundido cinzento se mostrou amplamente viável, alcançando vidas elevadas nas ferramentas, aliadas a alta produtividade. Nesta pesquisa foram praticadas, com sucesso, velocidades de corte duas vezes maiores em relação ao ferro fundido vermicular

Dentre as causas das discrepâncias existentes entre a usinagem dos dois tipos de ferros fundidos destaca-se a força de corte. Sob as mesmas condições de corte, as forças de usinagem para o ferro fundido vermicular foram em média 20% maiores que as medidas para o ferro fundido cinzento.

Os experimentos de difusão realizados em ambientes com temperatura e atmosfera controlada mostraram que as ferramentas de nitreto de silício, revestidas e não revestidas, reagem praticamente da mesma forma e intensidade com os ferros fundidos vermicular e o cinzento, resultando numa profundidade de interação bem similar para ambos os pares. Isso permite concluir que as diferenças nos desgastes das ferramentas são fortemente dependentes da forma de contato cavaco/ferramenta, isto é, do mecanismo de formação de cavaco, da temperatura e das reações triboquímicas que podem acontecer na interface cavaco-ferramenta-peça.

Ainda sobre os ensaios de interação química estática foi identificada a formação de fase líquida na temperatura de 1.100°C . Ademais, os ensaios de interação química comprovaram que os fenômenos na interface cavaco/ ferramenta (formação e tipo da camada aderida) durante a usinagem dos ferros fundidos vermicular e cinzento são de extrema importância na vida da ferramenta, uma vez que os dois tipos de ferro fundido apresentaram comportamentos semelhantes nos experimentos de interação química.

A grande diferença verificada na usinagem dos ferros fundidos aqui estudados é a presença de uma camada de material aderido sobre a ferramenta, formada basicamente por manganês e enxofre na usinagem do ferro fundido cinzento. A camada que se forma sobre a ferramenta protege-a de duas maneiras: agindo como uma barreira contra as reações triboquímicas; atuando como um lubrificante sólido, facilitando o deslizamento do cavaco sobre a face da ferramenta.

5. AGRADECIMENTOS

O autor agradece a empresa Tupy S.A., Ceratizit AG, DAAD, CAPES, IPEN, POSMEC-UFSC e PTW-TU-Darmstadt pelo suporte na realização desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Brinksmeier, E.; Bartsch, S., 1988, Ceramic Tools – Material Characteristics and Load Types Determine Wear Mechanisms. Anais do CIRP (S.I.). Vol. 37. 1.
- Callister Jr., W. D., 2003, "Materials Science and Engineering: An Introduction". 6. ed. [S.I.]: John Wiley & Sons, Inc., 2003. ISBN 0-471-22471-5.
- Dawson, S., 2002, "Practical applications for Compacted Graphite Iron". Proceedings of Compacted Graphite Iron – Machining Workshop, 5., 2002. Darmstadt. Anais... Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools.
- Guesser, L. W.; Guedes, L. C., 2016, "The New Generation of Engines and the Challenges for the Foundry Industry". In: XXIV Simpósio de Engenharia Automotiva - AEA, 2016, São Paulo.
- Guo, Y., Stalbaum, T., Mann, J., Yeung, H., Chandrasekar, S., 2013, „Modulation-assited high speed machining of compacted graphite iron (CGI)“. Journal of Manufacturing Processes, Vol. 15, pp. 426-431.
- Heikinheimo, E. et al., 1997, "Chemical Interaction Between Fe and Silicon Nitride Ceramic". Journal of the European Society, vol. 17, p. 25-31.
- König, W.; Klocke, F., 2002, "Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen, Bohren". 7. ed. Berlin; Heidelberg, New York: Springer Verlag, 471 p. ISBN3-540-43304-x.
- Paucksch, E., 1996, "Zerspantechnik". 11. Auflage. Wiesbaden. Vieweg, 404p.

- Sahm, A.; Abele, E.; Schulz, H. "State of the art in CGI machining". In: Compacted Graphite Iron – Machining Workshop, 5. 2002. Anais... Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools.
- Tönshoff, H. K.; Denkena, B., 2004, "Spanen: Grundlagen". 2. ed. Berlin; Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2004. 417 p. ISBN 3-540-00588-9.
- Xavier, F. A., 2003, "Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-duro, Cerâmica e CBN". 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Xavier, F. A., Boehs, L., Guesser, W. L., Abele, E. 2012, „Aspectos Tecnológicos da Usinagem dos Ferros Fundidos Vermicular e Cinzento com Ferramentas de Si_3N_4 ”. Anais: VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2012, São Luiz – Maranhão.
- Xavier, F. A., 2009, “Estudo dos Mecanismos de Desgaste em Ferramentas de Nitreto de Silício Aplicadas no Torneamento dos Ferros Fundidos Vermicular e Cinzento”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Zum Gahr, K. H., 1987, "Microstructure and Wear of Materials" – Tribology series, 10. Amsterdam.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

Os trabalhos escritos em português ou espanhol devem incluir (após direitos autorais) título, os nomes dos autores e afiliações, o resumo e as palavras chave, traduzidos para o inglês e a declaração a seguir, devidamente adaptada para o número de autores.

TECHNOLOGICAL EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF SILICON NITRIDE COATED AND UNCOATED TOOLS BY MACHINING OF COMPACTED GRAPHITE IRON AND GREY CAST IRON

Abstract: *The use of compacted graphite iron (CGI) is very important in the automotive industry and its application is increasing, being used in the manufacture of engine blocks and cylinder heads, mainly for diesel engines. Despite significant developments in materials for cutting tools and on the CGI itself, the machinability of CGI is still extremely low when compared to the grey cast iron (CI-250), mainly in continuous cutting machining operations like cylinder boring. This fact has motivated extensive research to improve the CGI's machinability and generated great advances. However, there is no available cutting tool material capable to achieve a similar tool life and costs in machining of CGI as verified when machining CI i.e. with silicon nitride (Si_3N_4). In this context, the present study carried out turning tests to analyze the wear of silicon nitride coated ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$) and uncoated tools during the machining of FV-450 and FC-250. In addition, chemical interaction tests were realized to analyze the chemical interaction between the Si_3N_4 with FV-450 and FC-250. Based on these experiments could be found that the cause of the great difference of wear behavior of Si_3N_4 when machining the FV-450 and FC-250 are the thermal, chemical and mechanical phenomena that occur in the chip/tool interface. Tribochemical reactions that occur during the machining of the FV-450 promote the tool wear, while during the machining of FC-250 these reactions build up a protective layer on the tool.*

Keywords: CGI, Grey Cast Iron, Silicon Nitride, Tribochemical Reactions.