



AVALIAÇÃO DE DESGASTES E MECANISMOS DE DESGASTES DE BROCAS DE METAL DURO REVESTIDAS POR TiN E TiAlN NA FURAÇÃO DO AÇO ABNT 1045

Matheus Pereira Carvalho, mpc.ptu@hotmail.com

Éder Silva Costa, edercosta@ufu.br

Augusto César Santos Peixoto, augusto-csp@hotmail.com

Felipe Chagas Rodrigues de Souza, felipechagaslepu@gmail.com

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica, Uberlândia – MG

Resumo.

O processo de furação é utilizado na grande maioria das peças fabricadas, seja com objetivo de fixação, lubrificação, ou alívio de tensão. Durante o corte as ferramentas aquecem e sofrem altos desgastes, a fim de minimizar esses efeitos são utilizados fluidos de corte. Também é importante conhecer o desempenho de brocas, quanto ao seu revestimento, pois o mesmo possibilita usinar com grandes avanços e velocidades de corte. O presente trabalho avaliou a vida e os mecanismos de desgaste de brocas de metal duro integral revestidas TiN e TiAlN na furação do aço AISI 1045, em três velocidades de corte 60, 120 e 180 m/min, com aplicação de fluido de corte Blasocut BC 40 NF na forma de mínima quantidade de lubrificação (MQL) vazão $74,07 \pm 0,26$ ml/h e na forma de jorro o fluido ME-1 com concentração 5% e vazão $1268,95 \pm 117,55$ l/h. O desgaste das brocas com revestimento TiAlN apresentou melhores resultados do que o TiN para os casos analisados, exceto para a velocidade de corte em 120 m/min com aplicação de jorro. No que se refere ao mecanismo de desgaste predominou para os dois tipos de revestimentos a adesão, seguido de arrancamento de material e a abrasão.

Palavras chave: *Processo de furação. Revestimento TiN e TiAlN. Fluido de corte. Desgaste. Mecanismos de desgaste.*

1. INTRODUÇÃO

Pelo fato de a grande maioria das peças produzidas possuírem ao menos um furo, o processo de furação é um dos processos mais utilizados na indústria de manufatura (Smith, 2008). Em geral, as peças são furadas em cheio ou tem seus furos aumentados pelo processo de furação (Diniz, et al., 2008). Por esse motivo é de bastante importância conhecer o desempenho de brocas, quanto ao material, revestimento, entre outros fatores. Esses conhecimentos são importantes para maior eficiência e previsibilidade do processo e, obviamente, está relacionado com maior produção e produtividade. Para tal, são usadas brocas com tecnologia em revestimentos com elevada resistência ao desgaste e no próprio material da broca. A combinação entre substrato e revestimentos apropriados, proporcionará usinar em menor tempo, pois permite que sejam usados grandes avanços e velocidades de corte.

Segundo Ferraresi (2003) a furação é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de um furo, geralmente cilíndrico, numa peça, com auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante com movimento de corte circular. Dentre as várias peculiaridades do processo, uma interessante é que a velocidade de corte não é uniforme, variando de zero no centro do furo até máximo na periferia, de forma que na região central o material não é usinado, mas sim conformado. Além disso, a geração de cavaco é de difícil observação, o fluido de corte, chega com dificuldade à aresta da ferramenta, onde é mais necessário, existindo assim uma distribuição inadequada de calor na região de corte ocorrendo atrito e desgaste pronunciado (Costa, 2004; De Castro, 2001).

Estima-se que a furação represente 30% de todas as operações de usinagem e 75% do volume de material removido na usinagem (Castillo, 2005). Apesar de sua importância tal processo recebeu poucos avanços nos últimos anos. Enquanto se desenvolvem com certa rapidez ferramentas com materiais novos para processos como torneamento e fresamento, como é o caso do cerâmico, nítreto de boro cúbico e diamante, na furação estes materiais são raramente empregados e a ferramenta mais utilizada ainda é a broca helicoidal de aço rápido, seguida da broca de metal duro (Diniz, et al., 2008). Esta dificuldade em acompanhar a evolução tecnológica deve-se em partes pelas condições severas nas quais o processo de furação é executado. Podemos citar as seguintes particularidades (Klocke, 2011):

- Variação na velocidade de corte: de zero no centro do furo a um valor máximo na periferia;
- Dificuldade de remoção de cavacos;
- Distribuição inadequada de calor na região de corte;
- Desgaste acentuado nas quinas com cantos vivos;

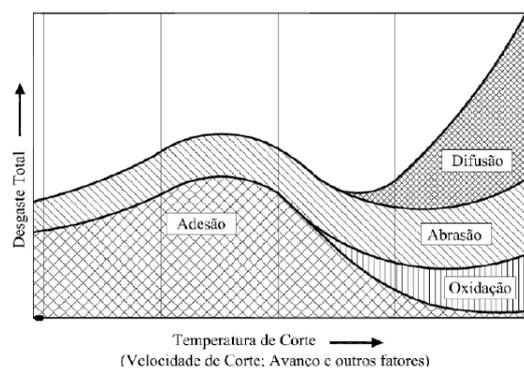
- Atrito entre as guias, parede do furo e o próprio cavaco;

Os desgastes na ferramenta de corte são uma das causas de paradas indesejadas de máquina na indústria e a troca de ferramenta. Esses desgastes podem ser minimizados alterando os parâmetros de usinagem, reduzindo assim sua ocorrência.

Solicitações mecânicas, térmicas e tribológicas decorrentes dos processos de usinagem levam a desgastes e sobrecarga mecânicas e térmicas dos gumes de ferramentas de corte, que podem resultar em sinais típicos de desgaste como, desgaste de cratera, de flaco, lascamentos de várias dimensões ou deformações plásticas (Castillo, 2005). Os diversos mecanismos de desgaste agem simultaneamente, de forma que tanto sua causa como seu defeito dificilmente podem ser distinguidos entre si, resultando em uma complexa interação de vários fatores de desgaste (Konig, et al., 1997).

A Fig. 1 apresenta um diagrama clássico, onde a importância dos quatro principais mecanismos de desgastes é ilustrada em função da temperatura de corte. Em baixas temperaturas, predomina o mecanismo de adesão atuando em conjunto com a abrasão. Em temperaturas elevadas, a adesão perde lugar aos mecanismos de difusão e oxidação (Klauber, 2009).

Figura 1. Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte (Konig, et al., 1997)



- **Abrasão Mecânica:** a abrasão mecânica é uma das principais causas de desgaste da ferramenta. O desgaste gerado pela abrasão é intensificado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte que reduz a dureza da ferramenta. Com isso, partículas da ferramenta são arrancadas à alta pressão e temperatura, em razão do atrito entre ferramenta e peça. Assim, quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior será sua resistência ao desgaste por abrasão. Trent (2000) relata que o desgaste por abrasão é possível responsável por atrito durante o corte por cisalhamento de material, ocasionando vibração, que posteriormente origina a falha catastrófica de ferramentas.

- **Difusão:** a difusão entre ferramenta e cavaco é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal a outro, dependendo da temperatura, da duração do contato e da afinidade físico-química dos dois metais envolvidos na zona de fluxo (zona de cisalhamento secundário). A difusão é responsável, sobretudo pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte.

- **Oxidação:** a exposição a alta temperatura e a presença de ar e água (contida nos fluidos de corte) gera oxidação para a maioria dos metais. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades de contato cavaco/ferramenta, em virtude do acesso do ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe.

- **Aderência:** se duas superfícies metálicas são postas em contato sob cargas moderadas, sob baixas temperaturas e baixa velocidade de corte, forma-se entre elas um extrato metálico que provoca aderência. A resistência desse extrato é elevada a tal ponto que, na tentativa de separar as superfícies, ocorre ruptura em um dos metais e não na superfície de contato. Assim, partículas da superfície de um metal migram para a superfície de outro.

Os materiais mais utilizados na fabricação das brocas destacam-se o aço-rápido (HSS) e o metal duro. As brocas de aço-rápido respondem por pelo menos 80% das ferramentas utilizadas na furação (De Castro, 2001). Em operações onde se exigem elevadas dureza e resistência ao desgaste, as brocas de aço-rápido recebem normalmente revestimentos de TiAlN, TiCN ou TiN.

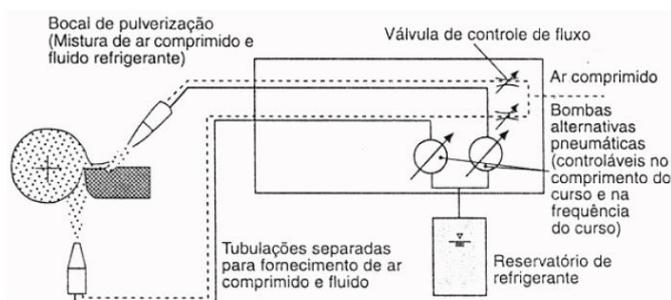
Revestimentos de TiN obtidos por deposição física de vapor em baixas temperaturas resultam em notável resistência ao desgaste em corte contínuo de aços não ligados e ligados. Baixas temperaturas de deposição também podem ser obtidas usando deposição química de vapor assistida por plasma (RICHTER et al., 1996). Dentre todos os revestimentos, o TiN é favorecido pela sua dureza elevada e pela aparência dourada, seja produzido por PVD (*Physical Vapor Deposition*) ou CVD (*Chemical Vapor Deposition*); é ainda o revestimento de maior abrangência de aplicação industrial variando de máquinas ferramentas, componentes mecânicos a elementos decorativos (Su, 1997). Há uma espessura ótima do revestimento de TiN depositado em ferramentas de aço rápido por PVD que é de 2,8 μm na usinagem de aço de corte livre. Um aumento na espessura do revestimento para 4,1 μm por CVD não produz uma significativa melhoria no desempenho da ferramenta (Malik, 2000).

O revestimento de TiAlN é uma evolução do largamente utilizado revestimento de nitreto de titânio. O revestimento de TiAlN pode somente ser produzido por processos que geram a formação de um plasma para que ele seja depositado como uma fase cristalográfica metaestável. Baseado em diferentes parâmetros como a composição do material alvo, a taxa de evaporação e dos parâmetros de ionização do plasma, parte do titânio pode ser substituído pelo alumínio em diferentes níveis. Os revestimentos de TiAlN são basicamente depositados pela evaporação do material alvo Ti-Al usando o gás reativo nitrogênio. Em diferentes testes de avaliação do revestimento de TiAlN quando comparado com o revestimento de nitreto de titânio, ele mostrou superior resistência à oxidação (Tönshoff et al., 1997).

Os fluidos de corte surgiram com o objetivo final de reduzir o custo de usinagem pela redução do desgaste da ferramenta, além de aumentar a taxa de produção pelo emprego de maiores velocidades e avanços no corte (Costa, 2004). Os fluidos de corte desempenham um papel fundamental no processo de usinagem, uma vez que influenciam diretamente na temperatura de usinagem e no atrito gerado na interface cavaco ferramenta, propiciando redução do desgaste da ferramenta e melhorando a qualidade da superfície usinada (Machado et al., 2009).

A técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL), Fig. 2, pode ser definida como a pulverização de uma quantidade mínima de lubrificante assistida por um fluxo de ar comprimido (Heisel et al., 1998). Segundo Sahn e Schneider (1996) a vazão do sistema MQL varia, geralmente, de 10 a 250 ml/h, e opera a uma pressão de 0,4 a 0,6 MPa. Estas quantidades mínimas de fluido são suficientes para reduzir substancialmente o atrito na ferramenta e evitar a aderência de material, já que a área de contato cavaco-ferramenta é muito pequena e sugere-se que a vazão de fluido necessária para promover a ação lubrificante seja também pequena (Costa, 2004). A usinagem com MQL surge como alternativa quando a usinagem a seco for inviável.

Figura 2. Diagrama esquemático de um sistema de MQL com o princípio de pressão (Adaptado Da Silva, 2010)



2. METODOLOGIA

Este trabalho é baseado em ensaios experimentais de furação foram feitos em um centro de Usinagem Vertical CNC, modelo Discovery modelo 760 - ROMI, com 9kW do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem. Foram realizadas repetições para todos os ensaios o número de repetições foi igual a 3 vezes, com o objetivo de adquirir uma maior confiabilidade e segurança dos dados levantados.

A preparação da amostra de aço ABNT 1045 para a análise da microestrutura foi feita conforme procedimento usual com lixamento progressivo, polimento e ataque com reagente Nital na concentração de 10%. A imagem foi registrada com uma câmera Olympus QColor3, acoplada a um microscópio Olympus BX 51M. O resultado mostrado na Fig. 3 apresenta microestrutura ferrita mais perlita.

Figura 3. Microestrutura do corpo de prova aço ABNT 1045. Ataque: Nital 10%, 50x (Autor, 2019)



Foram realizados ensaios no Laboratório de Tribologia e Materiais, da Faculdade de Engenharia Mecânica, para medições de microdureza no material, resultando em valores médios de 249 HV. As brocas utilizadas nos ensaios são mostradas na Fig. 4. Os revestimentos utilizados apresentam as seguintes propriedades médias:

- TiN: nanodureza = 24 GPa; Coeficiente de atrito = 0,55; Máxima temperatura de trabalho = 600 °C;

- TiAlN: nanodureza = 28 GPa; Coeficiente de atrito = 0,6; Máxima temperatura de trabalho = 700 °C.

Figura 4. Brocas utilizadas no projeto revestidas por TiN, lado esquerdo, e TiAlN, lado direito (Autor, 2019)



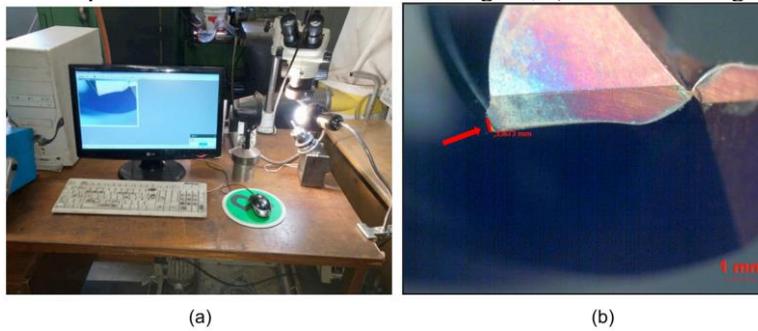
As brocas adquiridas comercialmente, em metal duro de 8 mm de diâmetro com grãos ultrafinos, e com dois tipos de revestimentos: TiN e TiAlN. Os parâmetros de entradas será velocidade de corte (V_c) de 60, 120 e 180 m/min, sendo avanço (f) e profundidade de corte (a_p) mantidos constantes, respectivamente em 0,1 mm/rev.z e 4 mm. Os ensaios serão avaliados fluidos de corte aplicado nas formas de jorro (gravidade) e MQL (mínima quantidade de lubrificante). Os furos serão cegos e realizados na razão $L/D = 3$, ou seja, com profundidades de 24 mm. Frequentemente na literatura científica encontram-se referências que colocam a relação $L/D = 3$, como interface, ou relação divisória, entre furos de baixa profundidade (rasos) e de alta profundidade (profundos). Na Tab. 1 a seguir mostra a planilha de testes.

Tabela 1. Número dos testes e respectivas condições de corte

Variáveis de Entrada			
Nº	Fluido de Corte	Velocidade de Corte [m/min]	Revestimento
1	MQL	60	TiN
2	MQL	120	TiN
3	MQL	180	TiN
4	MQL	60	TiAlN
5	MQL	120	TiAlN
6	MQL	180	TiAlN
7	Jorro	60	TiN
8	Jorro	120	TiN
9	Jorro	180	TiN
10	Jorro	60	TiAlN
11	Jorro	120	TiAlN
12	Jorro	180	TiAlN

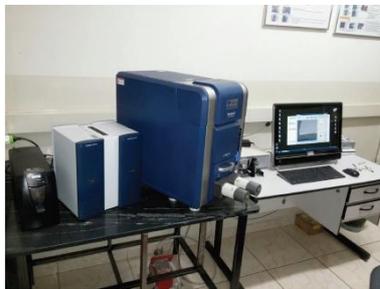
Para os testes em que se usou fluido em jorro utilizou-se o fluido ME-1 na concentração 5%, na forma de jorro com uma vazão $1268,95 \pm 117,55$ l/h. Para aplicação com a técnica MQL, foi utilizado aparelho pulverizador do fluido, modelo O2AO-STD fabricado pela ITW Fluid Products Group, funcionava com um fluxo contínuo de ar comprimido, ajustado em torno de 80 psi (0,55 MPa) com vazão de $74,07 \pm 0,26$ ml/h. Na Fig. 5 mostra-se o sistema de medição de desgaste e de observação das brocas desgastadas. O sistema é composto de microscópio ótico, placa de aquisição de sinais, computador e programa de análise de imagens.

Figura 5. a) Microscópio ótico e sistema de análise de imagens; b) ferramenta desgastada (Autor, 2019)



Na Fig. 6 mostra-se o sistema de medição de desgaste composto de microscópio eletrônico de varredura, placa de aquisição de sinais, computador e programa de análise de imagens. Conseguem-se excelentes imagens com ampliações de até 25.000X. Neste trabalho utilizou-se máximas ampliações de 800X, o que por meio de microscopia ótica não seria tão eficaz, pois a sua profundidade de campo é reduzida quando se comparado com a microscopia eletrônica de varredura.

Figura 6. Microscópio eletrônico de varredura (Autor, 2019)

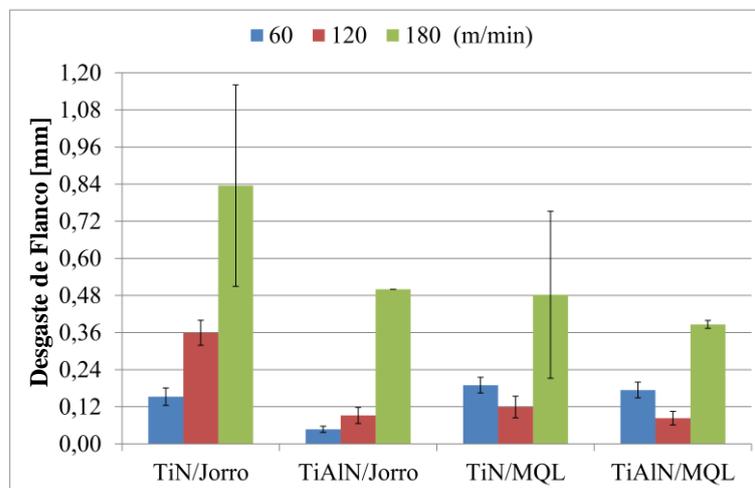


3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ANALISE GRÁFICA DOS DESGASTE DA BROCA

Na Fig. 7 mostra-se em único gráfico os comportamentos das brocas quanto ao desgaste de flanco (dominante nas ferramentas) em função da velocidade de corte, dos fluidos e dos dois tipos de revestimentos avaliados. Em cada barra vertical, se mostra o valor médio e sua dispersão em torno da média, medido por meio do desvio padrão entre os três testes realizados em cada condição.

Figura 7. Desgaste das brocas mostrado em função da velocidade de corte, do tipo de revestimento e dos dois métodos de aplicação de fluidos de corte (Autor, 2019)



Analisando este gráfico, observa-se se que o aumento da velocidade de corte apresenta forte tendência de se aumentar o nível de desgaste, devido à elevação do calor gerado e consequentemente da temperatura da interface cavaco-ferramenta, corroborando com o surgimento e fortalecimento dos mecanismos termicamente ativados, como difusão e adesão.

Agora analisando a influência do fluido de corte para a ferramenta revestida por TiN, observa-se que jorro mostrou se mais eficaz do que MQL, com exceção na velocidade de 180 m/min, mostrando que em elevadas velocidades de corte o filme formado pelo óleo vegetal utilizado, conseguiu reduzir o coeficiente de atrito, reduzindo o calor gerado, a temperatura na interface e consequentemente protegendo a ferramenta de corte e reduzindo o desgaste de flanco. Comportamento praticamente similar se observa com as ferramentas revestidas por TiAlN.

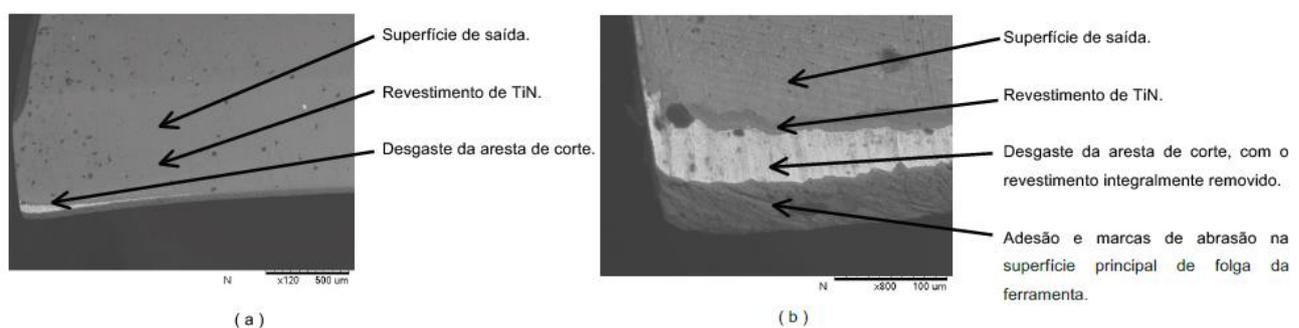
Com relação ao tipo de revestimento, observa-se que o TiAlN apresentou melhores resultados do que o TiN, de forma geral. O TiAlN apresenta elevada resistência a temperaturas até 700 °C, mantendo-se estável, enquanto o TiN tende a se dissociar com temperaturas em torno de 600 °C. Com relação ao coeficiente de atrito com o aço, os dois revestimentos apresentam valores muito próximos: 0,55 para o TiN e 0,6 para o TiAlN, valores estes obtidos em ensaios padronizados e a seco, ou seja, sem a presença de qualquer produto interfacial que reduza as tensões de cisalhamento, como fluidos de corte. Outro fator favorável ao TiAlN é a sua superior propriedade mecânica, como nanodureza. Por outro lado, o seu desempenho não pode ser mencionado como superior somente pelas suas propriedades, pois depende de outras condições intrínsecas ao sistema tribológico, como presença de cargas cíclicas, impactos e mesmo a sua coesão com a matriz da ferramenta pode influenciar o seu comportamento.

Comparando-se os dois tipos de fluidos e sistemas de aplicação fica evidente que o fluido aplicado em alta vazão, jorro, se mostrou mais eficaz em baixas e médias temperaturas, entretanto em elevadas temperaturas o seu desempenho foi inferior à condição de MQL. Aqui vale ressaltar que os fluidos são diferentes, embora ambos sejam de origem vegetal, o fluido na condição de jorro é aplicado misturado com água, na concentração de 5%, o que lhe confere excelentes propriedades refrigerantes. Já o fluido em MQL, é aplicado puro, pulverizado em vazões em torno de 50 a 70 ml/h o que lhe confere basicamente características lubrificantes, pois é aplicado misturado com ar comprimido, com reduzidas características refrigerantes. Portanto, o que se observou foi que em elevadas velocidades este fluido em MQL foi mais eficaz em reduzir o atrito, a geração de calor e a temperatura na interface do que o fluido aplicado em jorro.

3.2 ANÁLISES DE DESGASTE E MECANISMOS DE DESGASTE

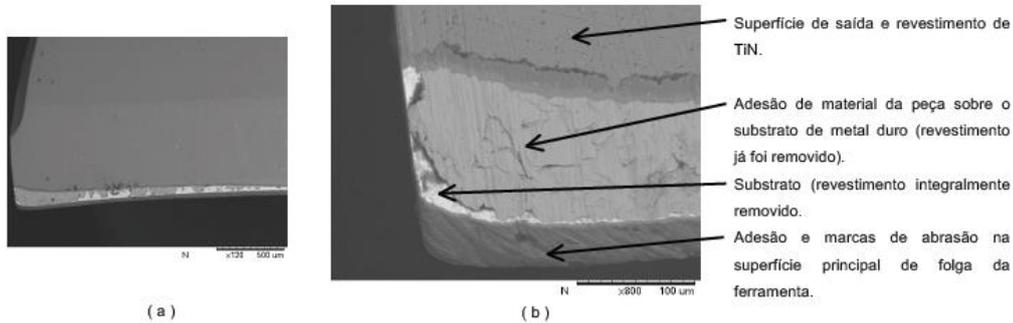
Mostramos a seguir a análise de desgaste e dos mecanismos de desgastes para os principais testes feitos. Nas figuras a seguir mostram-se as fotografias retiradas no microscópio eletrônico de varredura, com o objetivo de se avaliar os tipos e mecanismos de desgaste dominantes nos revestimentos e materiais de revestimentos avaliados, na furação do aço AISI 1045. Em todas essas figuras a parte “a”, mostra amplificação de 120X enquanto na parte “b” mostra a área desgastada com ampliação maior, de 800X, evidenciando melhor essas áreas e facilitando a visualização dos tipos e mecanismos de desgaste em cada situação avaliada. Ao lado de cada figura são realizados comentários sobre os tipos e mecanismos de desgaste dominantes.

Figura 8. $vc=60$ m/min; $f=0,1$ mm/rev; $ap= 4$ mm; fluido aplicado em jorro; ferramenta revestida por TiN, a) ampliação de 120X e b) ampliação de 800X. Furos realizados = 164 (Autor, 2019)



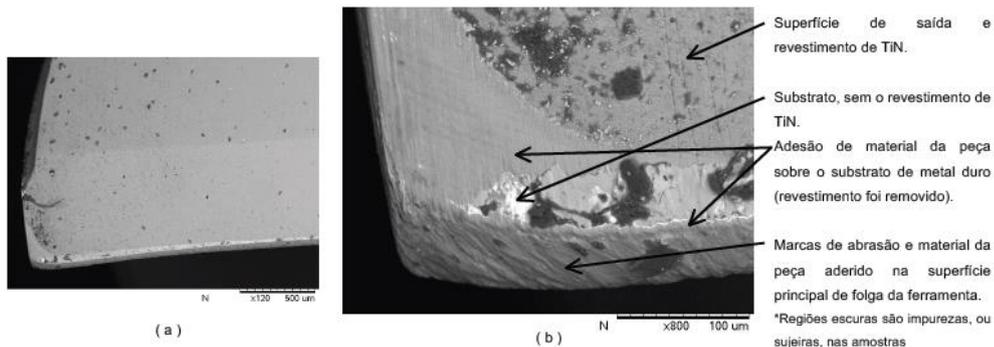
Na Fig. 8 mostram-se duas figuras, com diferentes ampliações, de ferramentas de TiN, a 120 m/min, fluido aplicado em jorro e depois de realizados 164 furos. Na parte “b” desta figura, com ampliação de 800X observa-se as superfícies de saída e de folga já desgastadas. A camada revestida por TiN foi totalmente removida deixando o substrato (WC + Co + TiC + TaC) expostos e devido à boa afinidade química com o Fe e o C do aço, às elevadas temperaturas na interface, o material da peça se adere. Entretanto esta adesão não é permanente, pois periodicamente esta camada é renovada e juntamente com a que se desprende, partículas do substrato são removidas, intensificando o desgaste da ferramenta. Observa-se também, principalmente na superfície de folga, onde acontece o desgaste de flanco, presença de sulcos, caracterizando a abrasão, promovida por carbonetos duros presentes no aço AISI 1045, que também promove retirada de material da peça.

Figura 9. $v_c=120$ m/min; $f=0,1$ mm/rev; $a_p= 4$ mm; fluido aplicado em jorro; ferramenta revestida por TiN, a) ampliação de 120X e b) ampliação de 800X. Furos realizados = 164 (Autor, 2019)



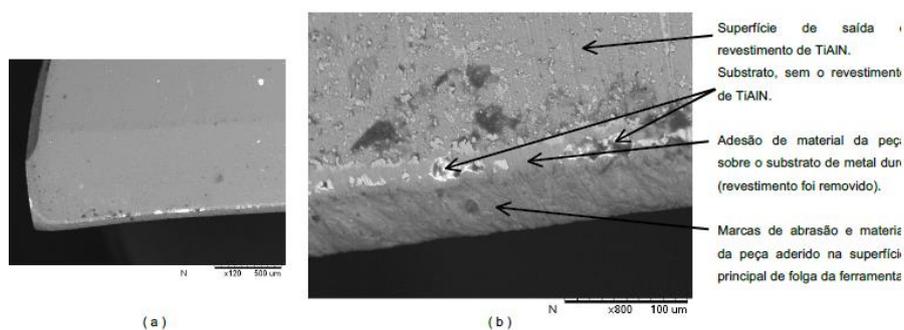
Observam-se na parte “b” da fig. 9, fortes evidências de adesão e de abrasão. Como dito anteriormente, a camada de material aderida na ferramenta é frequentemente renovada. Este fenômeno de adere e arranca, continuamente, denominado na literatura por Hutchings (1995) e Zum Gahr (1987) por “stick-slip” e por Trent (1991) por “attrition” é evidente e promove o desgaste da ferramenta de forma rápida e intensiva.

Figura 10. $v_c=180$ m/min; $f=0,1$ mm/rev; $a_p= 4$ mm; fluido aplicado em MQL; ferramenta revestida por TiN, a) ampliação de 120X e b) ampliação de 800X. Furos realizados = 33 (Autor, 2019)



Observa-se na parte “b” da Fig. 10 fortes evidências de adesão e de abrasão. Há também uma ampla área clara, que é o substrato da ferramenta, sem camada de material da peça aderido, evidenciando um desgaste severo. As manchas escuras na figura são contaminantes/sujeiras, que não foram totalmente removidas durante o processo de limpeza com ultra-som, antes de se analisar no MEV.

Figura 11. $v_c=120$ m/min; $f=0,1$ mm/rev; $a_p= 4$ mm; fluido aplicado em MQL; ferramenta revestida por TiAlN, a) ampliação de 120X e b) ampliação de 800X. Furos realizados = 164 (Autor, 2019)



Observa-se na parte “b” da fig. 11, fortes evidências de adesão e de abrasão. Observa-se também ampla área clara, que é o substrato da ferramenta, sem camada de material da peça aderido. As manchas escuras na figura são contaminantes/sujeiras, que não foram totalmente removidas durante o processo de limpeza com ultra-som, antes de se analisar no MEV.

3. CONCLUSÕES

Depois de desenvolvido este projeto, chegou-se às seguintes conclusões:

- A velocidade de corte de 180 m/min é crítica para todas as condições não seria o ideal para usinar com as brocas selecionadas para os testes em especial revestida por TiAlN;
- A velocidade de 120 m/min obteve um bom desempenho se comparado com as outras velocidades e seria a ideal para a furação em um processo, pelo fato de apresentar bons resultados e o tempo de furação ser rápido, essa velocidade está dentro da faixa indicada pelo fabricante;
- As formas de desgaste dominantes foram flanco (superfície de folga da ferramenta) e cratera (superfície de saída da ferramenta);
- Os mecanismos de desgaste dominantes para os dois tipos de revestimentos avaliados foram a adesão, seguido de arrancamento de material e a abrasão;
- As ferramentas de TiAlN apresentaram lascamentos da camada revestida, expondo o substrato imediatamente à adesão de material da peça;
- Não houve considerável alteração no sistema tribológico, alterando-se o tipo de revestimento, o fluido, ou o método de aplicação, pois os tipos e mecanismos de desgaste permaneceram os mesmos em todas as situações investigadas;

4. REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 6163, 1980 - Brocas helicoidais - Termos, definições e tipos.
- Castillo, W.J.G., Furação Profunda do Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-duro com Canais Retos. Tese de M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2005.
- Costa, E. S. Furação de Aços Microligados com Aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de Corte-MQF. 2004. 311f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Da Silva, H. A. Influência do Ciclo de Furação na Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento GH190. 2010. 169 f. Dissertação de Mestrado - Universidade de Uberlândia, Uberlândia.
- De Castro, P. R. A. Aspectos Tecnológicos da Usinagem a Seco e com MQF de Corte na Furação com Broca Helicoidal. 2001. 178 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Diniz, A.E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N.L. “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”. São Paulo: Artliber, 2015.
- Ferraresi, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. 11.ed. São Paulo: Blucher, 2003. 288p.
- Hsieh, J.H.; et al. 1998. Deposition and characterization of TiAlN and multi-layered TiN/TiAlN coatings using unbalanced magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, v.108–109, p.132–137.
- Klauberger, A. L. “Aplicação de Mínimas Quantidades de Fluidos de Corte nos Processos de Furação e Rosqueamento Interno de Eixos para Motores Elétricos”. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- Klocke, F. *Manufacturing Processes 1: Cutting*. Berlin: Springer, 2011. 506 p.
- König, W. e KLOCKE, F. “Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren”. 5. Berlin: Springer, 1997.
- Machado, A. R. et al. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. São Paulo: Edgard Blücher, 2009. 384 p.
- Malik, H.I.; MGALOBILISHVILI, R.; MILLS, B. 2000. Effect of TiN coating thickness on performance of HSS cutting tools when machining free cutting steels. *Journal of Materials Science Letters*, v.19, p.1779 – 1781
- Miranda, G. W. A. Uma Contribuição ao Processo de Furação sem Fluido de Corte com Broca de Metal Duro Revestida com TiAlN. 2003. 260 f. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Richter, V., et al. 1996. Characterisation and wear behaviour of TiN- and TiCxNi_{1-x} - coated cermets. *Materials Science and Engineering A*, v.209, p.353-357.
- Sahm, D. and Schneider, 1996, “A Produção sem Refrigeração é Interessante e Deve ser mais Conhecida”, *Máquinas e Metais*, Editora Aranda, agosto, pp 38-55.
- Smith, G. T. “Cutting Tool Technology: Industrial Handbook”. Girona: Springer, 2008.
- Su, Y.L.; et al. 1997. Comparison of tribological behavior of three films - TiN, TiCN and CrN - Grown by physical vapor deposition. *Wear*, v.213, n.1-2, p.165-174.
- Tönshoff, H.K.; et al. 1997. Wear mechanisms of (Ti_{1-x}Al_x)N coatings in dry drilling. *Surface And Coatings Technology*, v.94-95, p.603-609.
- Trent, E. M. e WRIGHT, P. K. “Metal Cutting”. 4th: Burtterworth Heinemann, 2000.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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