



CARACTERIZAÇÃO DE DESGASTE DE BROCAS DE HSS REVESTIDAS COM AlCrN E NÃO REVESTIDAS, EM ENSAIOS DE FURAÇÃO, NA USINAGEM DE FERRO FUNDIDO NODULAR DIN GGG 50

FERNANDO MICHELON MARQUES¹, ALEXANDRE DA SILVA ROCHA², LUIZ CARLOS DE CESARO CAVALER³, ELVYS ISAIAS MERCADO CURI³

¹Faculdade SATC– Manutenção Industrial
Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos
Rua Pascoal Meller 73, Criciúma, Brasil

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Grupo de Engenharia de Superfícies – GES
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Campus do Vale, Brasil

³Faculdade SATC –Engenharia Mecânica
Laboratório de Manufatura – LAMAM
Rua Pascoal Meller 73, Criciúma, Brasil

(Recibido 18 de junio de 2014, para publicación 4 de agosto de 2014)

Resumo – O uso de revestimentos na furação de ferro fundido tem o potencial de aumentar a resistência da ferramenta a temperaturas maiores, além de possibilitar a redução ou eliminação do uso de meios lubrificantes, reduzindo o impacto ambiental. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de brocas de aço rápido AISI M2 revestidas com AlCrN pelo processo de PVD (*Physical Vapor Deposition*) no processo de furação em cheio. Para isso foram realizados ensaios de furação avaliando-se como parâmetro de quantificação do desgaste, o valor de VB_{\max} (desgaste de flanco máximo) para brocas revestidas e não revestidas, através de medidas do diâmetro dos furos realizados, ao longo da vida da ferramenta assim como também a rugosidade das superfícies usinadas. Na parte experimental, foram realizados 12 ensaios por cada tipo de broca, todos a seco. O material empregado para os testes de furação foi o ferro fundido nodular DIN GGG 50, em formatos de placas de 48 x 400 x 500 mm. De acordo com as dimensões da placa, caracteriza-se como furação profunda, haja vista que a broca possui diâmetro de 8 mm, ou seja $l/d > 5$. Os parâmetros de corte trabalhados foram: velocidade de corte (25 e 35 m/min) e avanço (0,15 e 0,25 mm/rot). Foi avaliada a resistência ao desgaste por abrasão e rendimento no comprimento usinado, comparando-se as brocas com e sem revestimento. Os resultados mostram a influência da velocidade de corte em brocas revestidas no desgaste de flanco máximo VB_{\max} . Análises via MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) e EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), revelaram a presença do desgaste adesivo contribuindo, em pequena parcela, para o desgaste ocorrido da ferramenta.

Palavras-chave – Brocas, aço rápido, revestimento, furação, ferro fundido nodular GGG50.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de revestimentos pelo processo PVD (*Physical Vapor Deposition*), tem sido muito utilizada para melhorar as propriedades mecânicas do aço-rápido, aplicados em ferramentas de corte. A Aplicação desta, se justifica pela baixa temperatura utilizada na aplicação da camada do revestimento, na faixa de 550°C, aumentando a vida e confiabilidade da ferramenta pela capacidade de trabalhos a temperaturas superiores a temperatura de revenido do aço-rápido [1].

Estudos realizados por pesquisadores mostram que a aplicação de revestimentos PVD de AlCrN são favoráveis na usinagem a seco de ferros fundidos, devido a presença de Al como elemento formador de óxidos durante o processo de usinagem, diminuindo o atrito entre o cavaco e a ferramenta, melhorando a resistência térmica da ferramenta, e aumentando assim a vida da ferramenta [2]. Os revestimentos com base no AlCr são recomendados para a usinagem de aços baixa liga, ferros fundidos e alguns aços inoxidáveis [3]. Esses recobrimentos possuem uma superfície muito lisa, promovendo o aumento da resistência à abrasão e melhoria na usinagem dos materiais, devido à facilitação da remoção do cavaco.

Tabela 1. Composição química das placas.

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Al%	Mg%	Cu%
3,649	2,641	0,329	0,038	0,003	0,032	0,013	0,016	0,038	0,019

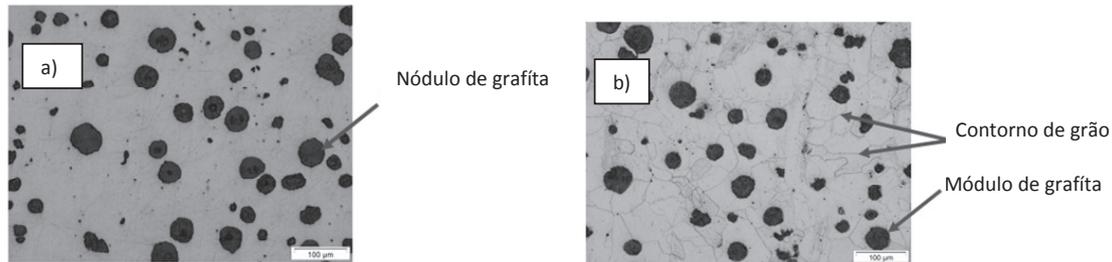


Fig. 1. Amostra de ferro fundido, a) sem ataque, ampliação de 200X b) com ataque de nital 2%, ampliação de 200X.

A opção pelo revestimento AlCrN – AlcronaTM, com alta resistência à oxidação e dureza a quente, proporciona elevada resistência ao desgaste[4]. Por apresentar excelentes resultados na usinagem em velocidades de corte muito elevadas, avaliadas entre 210 e 410 m/min. Este recobrimento permite maior vida da ferramenta mesmo em condições extremamente severas. Desta forma alcança-se menores valores de desgaste de flanco VBmax, na usinagem por furação em Ferros fundidos e aços [5], impulsionado pela presença de nódulos de grafita, que auxilia no processo de quebra do cavaco durante sua formação, reduzindo assim os esforços de corte, e acúmulo de material no gume da ferramenta [6].

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de brocas de aço-rápido AISI M2 revestidas com AlCrN (PVD) e não revestidas, na furação em cheio, a seco no ferro fundido nodular GGG50.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentando os materiais e equipamentos utilizados no trabalho, bem como os processos de obtenção de resultados, visando um melhor esclarecimento sobre as formas de obtenção de resultados concretos.

2.1. Corpos de prova

Para realização dos ensaios de furação foram fabricadas placas de ferro fundido nodular GGG50 com valores médios de dureza de 180 HB. Para a medição de dureza Brinell, utilizou-se um durômetro de bancada modelo TH 600, marca COSA, com penetrador de esfera de aço com diâmetro de 5 mm e carga de 750 kgf.

Durante o processo de fusão do ferro fundido foi retirada a amostra coquilhada para análise química pelo espectrômetro de refração marca GNR, modelo METAL LAB 75.80 J, constatando assim a composição química dentro da classe dos ferros fundidos nodulares GGG50, a tabela 1 mostra o resultado da composição química de uma das placas.

Foi realizada análise micrográfica com amostras de cada placa sem e com ataque de Nital 2% utilizando um Microscópio Óptico OLYMPUS BX51M, conforme Fig. 1 (a) e (b), respectivamente.

O resultado da análise metalográfica de uma das placas fundidas para o ensaio está representado na tabela 2.

Para cada placa foi realizada análise metalográfica para constatação da microestrutura das placas, haja visto que poderia ocorrer variação do centro para extremidades das placas de sua microestrutura, conforme tabela 2.

A possibilidade de ocorrência de coalescimento da estrutura metalográfica da mesma placa no centro em relação ao extremo não foi descartada, ocorrência esta ocasionada por possível demora no tempo de

Tabela 2. Resultado da análise do ferro fundido nodular.

Região de Análise	Grau de nodularização Mínimo: 85%	Nº. de nódulos por mm ² (informativo)	Forma e tamanho da grafita
Seção da peça	90%	71 Nód./mm ²	Forma e tamanho: VI (V)- 6(7) Matriz: Ferrítica-Perlítica
Nota: A contagem das grafitas é realizada de acordo com a Norma ABNT MB1512 e a caracterização das mesmas segundo a norma NBR 6593.			

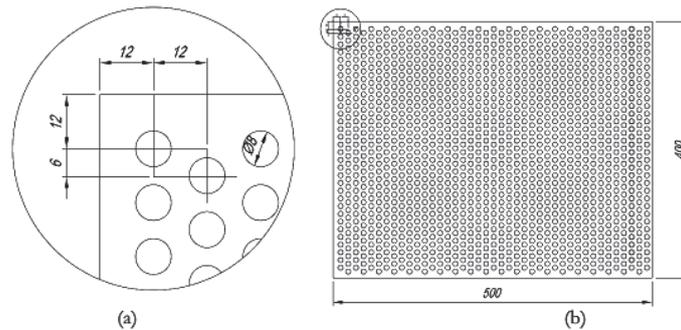


Fig. 2. Desenho das placas após furação (a) dimensões das margens e (b) dimensão das placas.

solidificação, logo, a necessidade de verificação através de microscópio, já que a estrutura metalográfica influencia de forma direta na usinabilidade dos ferros fundidos, mais até que a composição química dos ferros fundidos.

Após o processo de fundição das placas, foi realizada usinagem das faces e laterais da placa, com redução de dimensões de 10,0 mm em relação ao material fundido, com objetivo de retirada de possíveis impurezas na superfície, e garantir a usinagem em material com menor quantidade de impurezas oriundas do processo de fundição.

As placas, após todo processo de preparação, ficaram com dimensões de 500 x 400 x 48 mm, conforme Fig. 2 (b), com variação de medidas conforme a DIN 7168. A distância entre furos e distância da margem das placas descritas conforme Fig. 2 (a). O objetivo da usinagem das placas, também, foi de facilitar o processo de referência da ferramenta em suas faces para um maior aproveitamento.

2.2. Fixação das ferramentas

A fixação da ferramenta na máquina foi através de um cone porta pinça tipo BT40, utilizando uma pinça modelo ER. Para a broca procurou-se manter o batimento, concentricidade com eixo máquina, na ferramenta em uso dentro de padrões estabelecidos pela ABNT NBR 6176, mantendo o conjunto broca, cone porta pinça e eixo árvore da máquina com no máximo 0,03 mm de batimento. Os valores do batimento foram verificados com a utilização de um relógio comparador da marca Mitutoyo modelo 2046S com exatidão de 0,013 mm e graduação de 0,01 mm, utilizado junto à base magnética.

2.3. Máquina para realização de testes

O equipamento utilizado para realização dos testes foi um centro de usinagem vertical modelo Discovery 4022, marca Romi, com comando numérico computadorizado modelo Mach 9, faixa de rotação entre 10 e 6000 rpm, com potência de motor principal (eixo árvore) de 7,5 cv. O processo de batimento da broca foi realizado na própria máquina com auxílio de relógio comparador, para verificação de valores de concentricidade da ferramenta em relação ao eixo árvore, indicado na Fig. 3.

A programação foi desenvolvida utilizando ciclos fixos de furação e repetição de blocos, com objetivo de realizar a quantidade pré-estabelecida de 30 furos e parada para medição de desgaste das brocas.

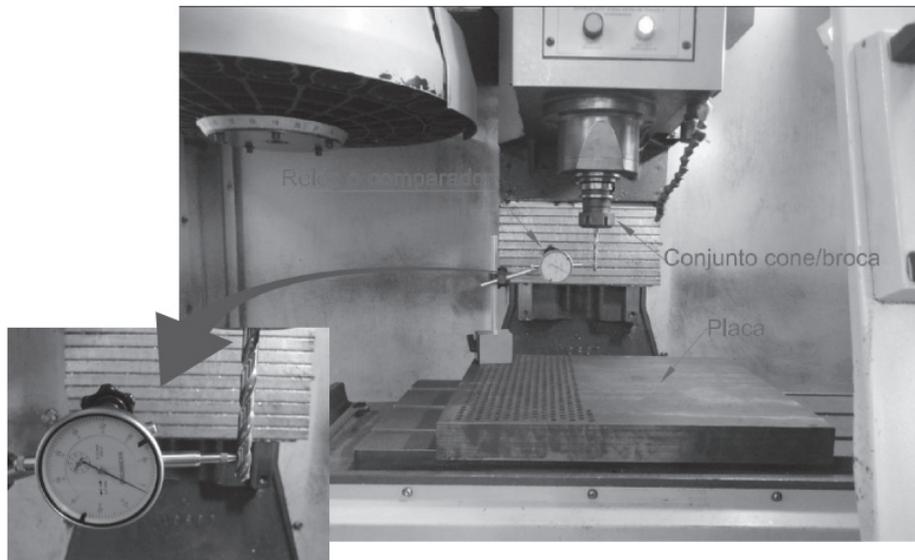


Fig. 3. Broca em processo de batimento para realização de testes de usinagem.

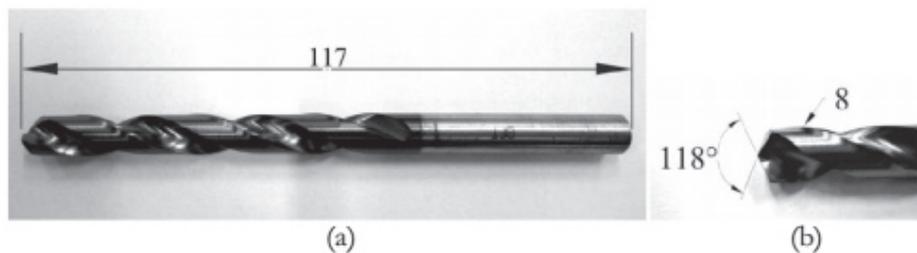


Fig. 4. Broca helicoidal conforme DIN 338 (a) comprimento total e (b) detalhe do ângulo de ponta.

2.4. Brocas utilizadas

Foram utilizadas para os ensaios de furação brocas de aço rápido classe M2, conforme a DIN 338, com dimensões de comprimento total de 117 mm, comprimento de hélice de 75 mm, Fig. 4 (a) e diâmetro de 8 mm, com tolerância dimensional h8 e ângulo de ponta 118° , conforme mostrado na Fig. 4 (b).

Para a aplicação dos revestimentos pelo processo PVD, foi encaminhado a empresa OERLIKON BALZERS, no qual foi aplicado os revestimentos em 15 brocas com o revestimento BALINIT® ALCRONA de AlCrN (Nitreto de Alumínio Cromo). As brocas após retorno do processo de tratamento superficial pelo processo PVD foram numeradas e armazenadas em recipiente com sílica para evitar possível oxidação.

Com todas as ferramentas em mãos foi realizado as primeiras imagens dos flancos das ferramentas, como forma de verificação de possível ocorrência de marcas nas regiões de corte das brocas, ou qualquer outra irregularidade que viesse a ser detectada. As brocas foram fixadas com relação de comprimento total/diâmetro (l/d) de 10, ou seja, o comprimento da broca para fora do sistema de fixação por pinça foi de 80 mm, além da relação de profundidade dos furos de 6 vezes o diâmetro da broca (48 mm), caracterizando o processo como furação profunda.

A avaliação do ensaio foi através do desgaste gerado na ferramenta após realização de um pré-determinado número de furos, igual a 128. Durante os ensaios foram determinadas quatro paradas para aquisição de imagens das ferramentas, com intuito de verificar a progressão do desgaste da ferramenta. A tabela 3 mostra a equivalência entre o número de furos e o comprimento usinado em cada parada.

Tabela 3. Equivalências entre número de furos e comprimento usinado.

Parada número	Número de furos	Comprimento usinado (mm)
1	32	1536
2	64	3072
3	96	4608
4	128	6144

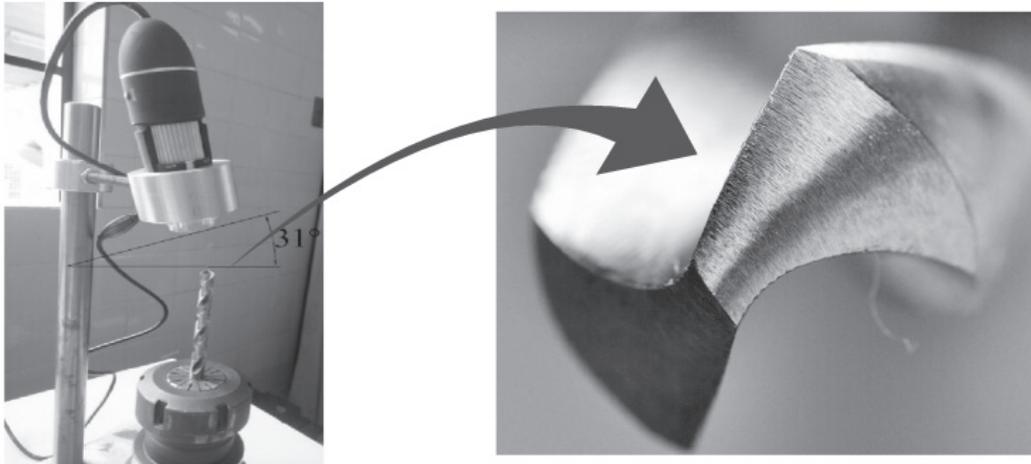


Fig. 5. Estereoscópio realizando aquisição de imagens.

2.5. Medição dos furos

Para medição dos furos foi utilizado o micrômetro interno, com faixa de medição de 6 a 8 mm, três pontas de contato e precisão de 0,001 mm.

Foi realizada medições cada 32 furos, de uma série de 128 furos previstos para cada broca, iniciando pelo furo de número 32, 64, 96, 128 respectivamente. Cada furo foi medido em seu início, meio e fim do comprimento, para leitura de possível variação dimensional. Cada ponto de medição (início, meio e fim), foi feita a medição duas vezes no mesmo ponto, com diferença de 90° em relação ao anterior, para possível leitura de ovalização do furo, que ocorresse durante a furação.

2.6. Características do estereoscópio

Para análise de desgastes das brocas revestidas, não revestidas e tratadas foi utilizado um estereoscópio óptico modelo BW1008-500X, com conexão USB e software para medição das imagens adquiridas, medição esta realizada através da conversão de pixel para milímetros, definindo assim o desgaste de flanco das brocas.

A Fig. 5 representa o sistema composto por estereoscópio acoplado na base e conectado a um computador realizando aquisição de imagens de um conjunto broca/cone de fixação na máquina. Procurou ser mantida a inclinação do aparelho em 31°, para que ficasse paralela ao gume principal da broca evitando assim o erro por distorção na aquisição de imagens.

Para todas as brocas foi realizada a aquisição de imagens antes do início dos testes de furação, e após a realização do número de furos: 32, 64, 96 e 128, respectivamente. As imagens dos gumes de cada broca foram realizadas com a montagem do conjunto broca e cone, na base do estereoscópio.

2.7. Ensaio de adesão do revestimento

Para realização do ensaio de adesão dos revestimentos, conforme a norma VDI 3198 [7]. Foram retirados corpos de prova, das brocas na parte da haste (próximos ao início do canal da broca). Os corpos de

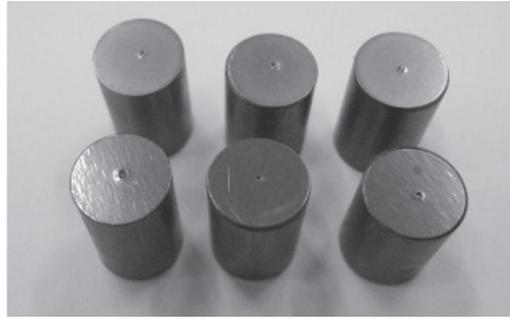


Fig. 6. Corpos de prova para ensaio de indentação.

Tabela 4. Parâmetros utilizados para os testes de usinagem.

Condição	vc =(m/min)	fn = (mm/rot)	Retração (mm)	Revest.
1	25	0,15	24	Não rev.
2	35	0,15	18	Não rev.
3	25	0,25	24	Não rev.
4	35	0,25	18	Não rev.
5	25	0,15	24	AlCrN
6	35	0,15	18	AlCrN
7	25	0,25	24	AlCrN
8	35	0,25	18	AlCrN

prova foram usinados e retificados para posterior polimento das faces conforme a Fig. 6, encaminhados a empresa OERLIKON BALZERS para aplicação do revestimento das brocas. Após aplicação de revestimento foi realizado o ensaio por Indentação Rockwell, com carga de 150 kgf. Após realização da Indentação Rockwell foi levado as amostras ao microscópio eletrônico marca OLIMPUS, modelo BX51M, para análise por comparação das marcas formadas ao redor da indentação.

2.8. Parâmetros utilizado

Para o registro da aquisição de dados de desgaste das brocas, foram determinadas duas velocidades de corte e duas variações de avanço da broca conforme a tabela 4.

O intuito da variação destes parâmetros, foi justamente identificar a melhor condição para o tipo de revestimento das brocas, comparando entre eles e com a condição da broca sem revestimento. Lembrando que todas as condições de corte foram realizadas a seco (sem lubrificação e refrigeração). O objetivo da condição de usinagem a seco foi de acelerar o processo de desgaste das ferramentas e viabilizar, através de dados concretos, o não emprego de fluidos lubri-refrigerantes.

Os parâmetros utilizados foram obtidos junto a consulta de fabricantes de brocas e o uso em indústrias metalúrgicas, que trabalham com furação utilizando brocas de aço rápido sem revestimento.

Para cada tipo de superfície da broca, realizou-se três ensaios para cada condição, totalizando o emprego estimado de 36 brocas, sem considerar possível reposição de nenhuma das brocas durante o ensaio.

Com objetivo de eliminar rebarbas do gume das brocas, originadas no processo de afiação dos gumes, foram realizadas 8 furações com 10 mm de profundidade, na própria placa de ferro fundido utilizada no ensaio. Posteriormente forem enviadas as brocas para aplicação do revestimento AlCrN, na empresa OERLIKON BALZERS.

A pré-usinagem foi para eliminar arestas indesejáveis ou fragilizadas durante o processo de afiação das ferramentas. Estas arestas seriam possivelmente removidas durante os ensaios iniciais das ferramentas, eliminando o revestimento aplicado a ferramenta em questão, deixando exposto o substrato e mascarando assim o ensaio.

A opção pela remoção de rebarbas em pré-usinagem do próprio ferro fundido nodular, surgiu após pesquisa sobre formação de gume postiço, fenômeno este dificilmente encontrado em ferros fundidos, justamente pela sua característica de rompimento dos cavacos (cisalhamento). Porém a formação de desgaste por abrasão mostra-se mais frequente, muito similar ao processo de micro-jateamento, realizados para retirada de rebarbas em ferramentas de usinagem (Rocha, 2000).

Os parâmetros utilizados para retiradas de rebarbas foram $v_c=20$ m/min e $f_n=0,1$ mm/rot, considerados baixos, com intuito de evitar desgastes desnecessários à ferramenta, ou esforços que possivelmente viriam a danificar a superfície da broca, impossibilitando a aplicação dos revestimentos.

2.9. Medição de rugosidade dos furos

Para medição de rugosidades dos furos foi utilizado um rugosímetro marca COSA (modelo SM RT 10), indicado na Fig. 7.

Foi determinado que para os mesmos furos que foram realizados as medições de diâmetro, seriam realizadas as medições de rugosidades. As medições foram realizadas com três repetições no mesmo ponto, além de medir com defasagem de 120° para cada medição de rugosidade. Foram realizadas medições no início do furo e no final, totalizando 18 medições por furo. O critério de medição adotado foi o R_a e adotado um *cut-off* igual a 0,8 mm, estes parâmetros são indicados na medição de rugosidade em furação por brocas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de indentação para atestar a qualidade do revestimento aplicado nas brocas, seguido dos ensaios de furação, realizados nas placas de ferro fundido nodular GGG50, onde foi realizado as medições de desgaste de flanco das brocas de aço rápido revestidas e sem revestimento, após da realização dos ensaios de furação, foi realizado as medições de rugosidade, pelo parâmetro R_a onde foi expresso em μm .

Em paralelo às medições de rugosidade, foram realizadas as medições dos diâmetros dos furos, com objetivo de correlacionar rugosidade com variações de diâmetro. Com intuito de atestar o revestimento que obtivesse melhor resultado, foi realizado o ensaio de fim de vida das ferramentas, para analisar a viabilidade da aplicação dos revestimentos em relação ao comprimento usinado total. Por fim fazer a análise do mecanismo de desgaste que prevaleceu para contribuir com o desgaste das ferramentas através de MEV e EDS.



Fig. 7. Rugosímetro realizando medição em furo de uma das placas de ferro fundido nodular.

3.1. Ensaio de adesão VDI

Para a confirmação da realização de forma satisfatória do revestimento pelo processo PVD, foi realizado o ensaio de adesão do revestimento no substrato através da indentação Rockwell C.

O padrão utilizado para atestar a qualidade da adesão do revestimento indica que está dentro dos padrões HF3 e HF4, satisfazendo a condição desejada.

O revestimento composto por AlCrN indicado na Fig. 8, revelou uma condição satisfatória durante a realização do ensaio de adesão estando dentro do padrão HF4. Neste ensaio visualizado com aumento de 100X, o composto apresentou trincas devido ao elemento Cr em sua composição, aumentando assim sua dureza, fragilizando a camada revestida. Pode-se avaliar que a diferença de resultados de adesão dos revestimentos não é causada pelo substrato, pois os corpos de prova foram retirados de brocas de mesmo lote de produção, com isto mesmas condições de substratos para os dois revestimentos.

3.2. Ensaios de furação

Após a realização de todos os testes com brocas revestidas e não revestidas em sua superfície, e com a aquisição de imagens durante o processo de furação para todos os parâmetros determinados anteriormente, foram montados gráficos referentes ao desgaste de flanco VB_{max} versus Comprimento usinado.

A Fig. 9 mostra os resultados do ensaio de furação para a condição de $v_c = 25$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot, para todos os tipos de brocas com ou sem revestimento.

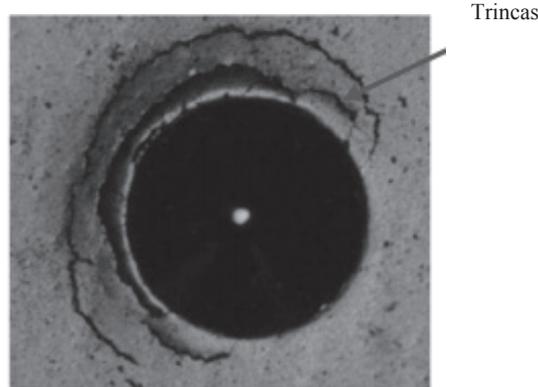


Fig. 8. Ensaio de adesão do revestimento AlCrN com aumento de 100X.

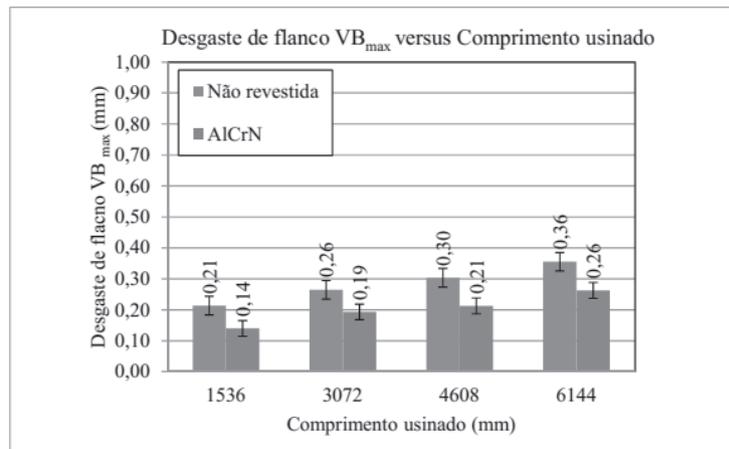


Fig. 9. Desgaste de flanco de brocas com $v_c = 25$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot.

Percebe-se que o maior desgaste de flanco ocorreu na broca não revestida, para todas as paradas de medição de desgaste, que é razoável, pois assim justifica a aplicação de revestimentos em brocas.

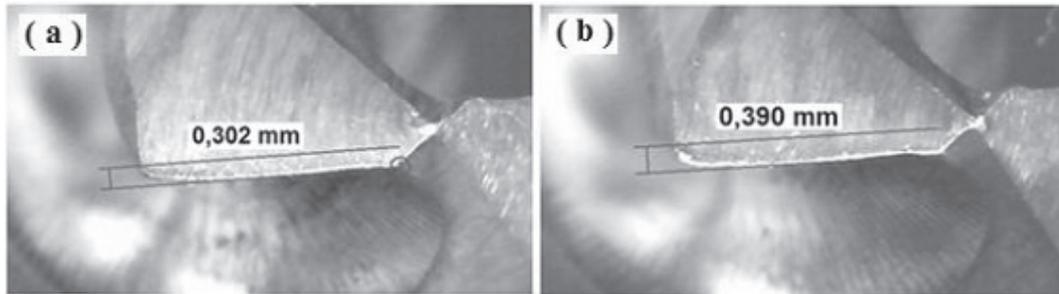


Fig. 10. Desgaste de flanco das brocas não revestidas desgastadas: (a) comprimento usinado de 3072 mm, (b) comprimento usinado de 4608 mm.

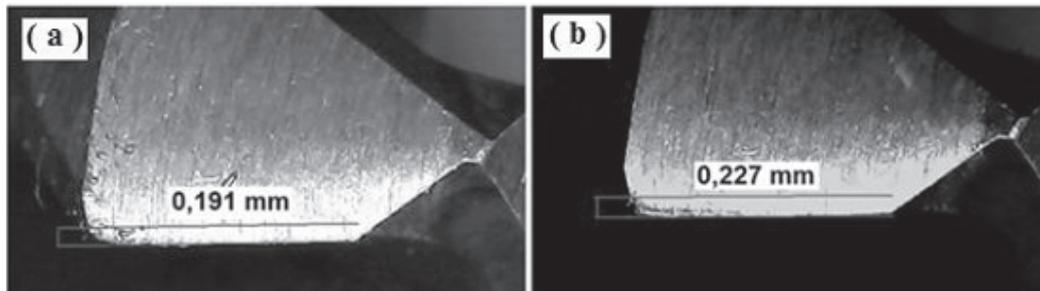


Fig. 11. Desgaste de flanco das brocas com AlCrN desgastadas: (a) comprimento usinado de 3072 mm, (b) comprimento usinado de 4608 mm.

Para as brocas revestidas, os resultados foram os melhores de modo geral, para estes parâmetros escolhidos, com menores resultados de desgaste de flanco em todos nas paradas de medição durante o processo de usinagem.

As Fig. 10 (a) e (b) mostram os flancos das brocas não revestidas com comprimento usinado de 3072 mm e 4608 mm, respectivamente.

As Fig. 11 (a) e (b) mostram os flancos das brocas desgastadas, revestidas com AlCrN no comprimento usinado de 3072 mm e 4608 mm, respectivamente.

Como pode ser percebido nas Figs 10 e 11, não ocorre a formação de APC (aresta postíça de corte), fato que é muito característico dos processos de usinagem de ferros fundidos, porém o desgaste abrasivo é fator determinante no desgaste das ferramentas neste tipo de material.

O desgaste abrasivo pode ser justificado pela presença de grafita livre, em forma de nódulos, agindo como elemento responsável pelo desgaste das ferramentas, porém, facilitador da quebra dos cavacos gerados durante o processo.

Quando alterado o valor de v_c de 25 para 35 m/min e mantido o valor de $f_n = 0,15$ mm/rot, tem-se a Fig. 12, obtiveram-se valores desgaste de flanco para as brocas não revestidas muito superiores as revestidas por PVD. O aumento da velocidade de corte proporcionou um aumento de temperatura da região de contato entre a broca e o ferro fundido, que conforme literatura obteve-se uma camada de óxido de alumínio, com características de isolamento térmico na região de corte da ferramenta, reduzindo assim o desgaste do revestimento das brocas.

A aplicação dos revestimentos reduziu o VB_{Max} em todas as paradas de medição no transcorrer do ensaio. O revestimento AlCrN manteve seu desgaste entre os níveis mais baixos dentre os ensaios, na condição de corte determinada.

As brocas não revestidas foram as que alcançaram níveis maiores de desgaste no resultado final do ensaio, fato justificado pela falha catastrófica de duas das três repetições programadas, resultado de possíveis inclusões ou regiões com características diferentes de dureza ou microestrutura, do encontrado na placa de teste. Quando ocorresse a falha catastrófica foi adotado valor igual a 1,0 na planilha para geração

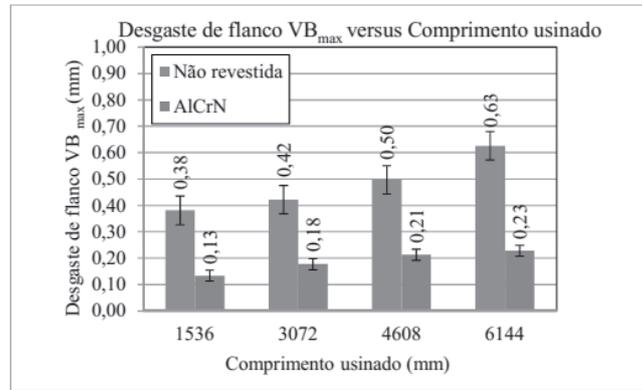


Fig. 12. Desgaste de flanco de brocas com $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot.

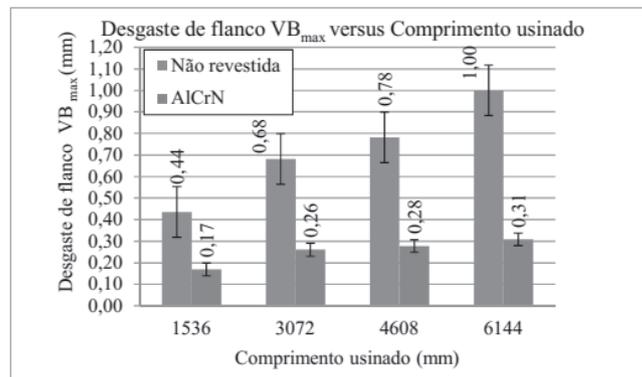


Fig. 13. Desgaste de flanco de brocas com $v_c = 25$ m/min e $f_n = 0,25$ mm/rot.

de gráficos, indicando assim um acentuado desgaste de flanco, já que os valores de gráfico são as médias de três repetições.

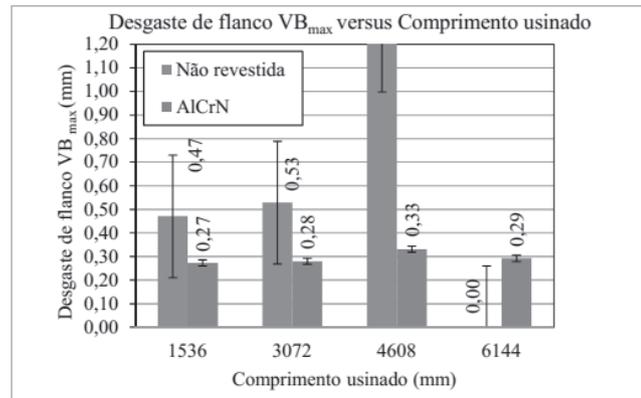
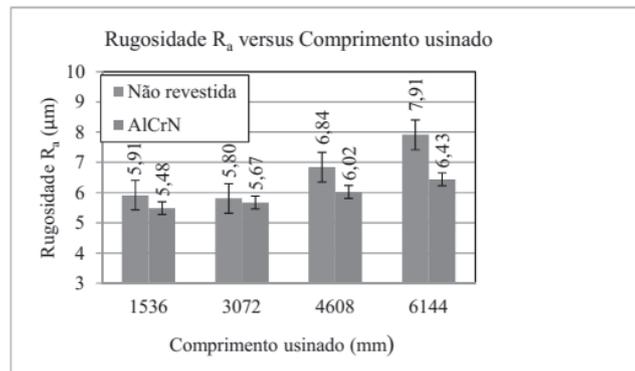
Os dados apresentados na Fig. 13 mostram o ensaio de furação com a mudança da velocidade de corte para 25 m/min e o avanço da ferramenta em 0,25 mm/rot.

O gráfico indica que dentre as revestidas e não revestidas, a não revestida obteve um maior desgaste de flanco conforme indicado na Fig. 13. A justificativa para um desgaste de flanco VB_{Max} foi o aumento do esforço de corte da broca perpendicular ao ferro fundido, ocasionado pelo aumento do avanço de corte de 0,15 para 0,25 mm/rot, ocasionando possível escorregamento da broca em relação ao centro de giro, durante o ensaio. Novamente a condição que obteve um menor desgaste de flanco foi a broca com o revestimento AICrN.

Os valores apresentados na Fig. 14 mostram a mudança de velocidade de corte de 25 para 35 m/min, com avanço de 25 mm/rot durante o ensaio de furação.

A Fig. 14 indica a condição de brocas não revestida com valores até o comprimento de 3072 mm, ocorrendo falha catastrófica a partir deste valor impossibilitando a aquisição de dados.

As brocas não revestidas obtiveram resultados chegando até o comprimento usinado de 4608 mm. A condição que melhor suportou aos esforços ocasionados pelas condições de corte, foi com o revestimento AICrN, que suportou até o fim dos testes em duas das três repetições e com baixo desgaste de flanco VB_{max} .

Fig. 14. Desgaste de flanco de brocas com $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,25$ mm/rot.Fig. 15. Rugosidade com parâmetros de $v_c = 25$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot.

3.3. Medição de rugosidade

A medição de rugosidade se fez necessária para atestar que o processo de furação estivesse dentro dos padrões IT9 [8] referentes ao grau de acabamento da superfície usinada pelo processo de furação com brocas.

A Fig. 15 mostra os valores de rugosidade média R_a nos furos realizados com parâmetros de usinagem de $v_c = 25$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot.

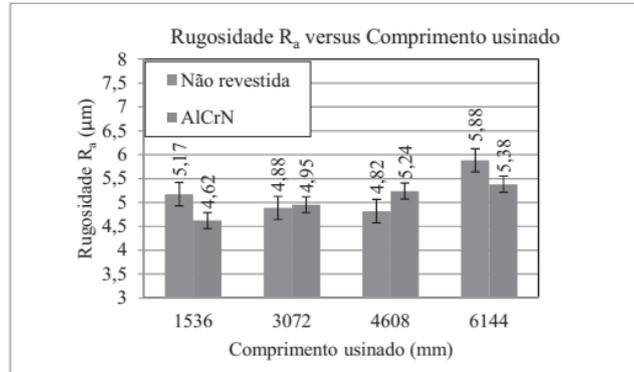
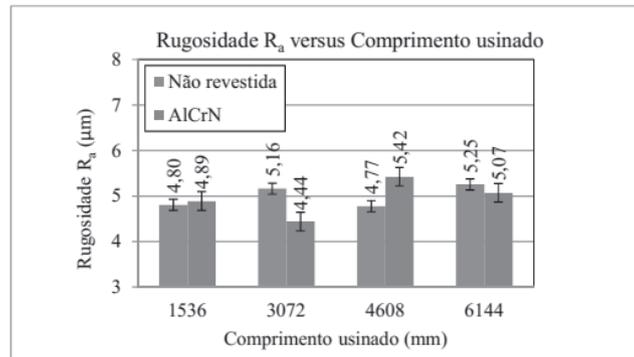
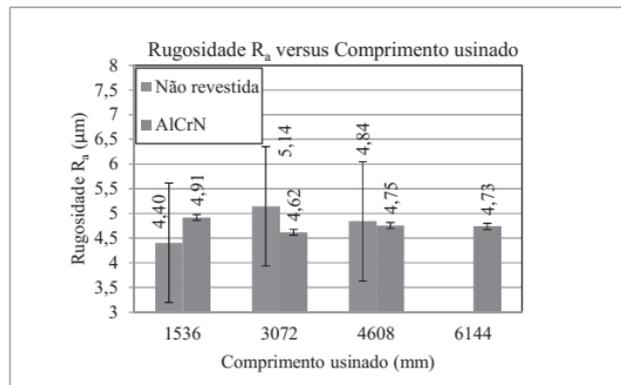
A Fig. 15 mostra que a condição de broca que melhor satisfaz o valor de rugosidade mais baixo foi a com o revestimento de AlCrN em que obteve menores resultados de rugosidade média R_a .

A partir do comprimento usinado de 4608 mm, que corresponde a 96 furos ocorreu um aumento na rugosidade dos furos, realizados pelas brocas não revestidas, podendo ser comprovados na última medição (6144 mm).

A Fig. 16 mostra os valores de R_a para mudança de velocidade de corte de 25 para 35 m/min, com avanço $f_n = 0,15$ mm/rot.

Quando ocorreu a mudança de velocidade de corte de 25 para 35 m/min, com avanço de $f_n = 0,15$ mm/rot, Fig. 16, os valores de rugosidade tomam valores diferentes, porém ainda as brocas sem revestimento continuam com valores maiores de rugosidade para a primeira medição (1536 mm) e a última medição (6144 mm).

As ferramentas com o composto AlCrN permitiram furações com grau de rugosidade IT7, satisfatório tratando-se de furação profunda e sem a existência de pré-furo.

Fig. 16. Rugosidade com parâmetros de $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot.Fig. 17. Rugosidade com parâmetros de $v_c = 25$ m/min e $f_n = 0,25$ mm/rot.Fig. 18. Rugosidade com parâmetros de $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,25$ mm/rot.

A redução da rugosidade quando ocorre a mudança da velocidade de corte de 25 para 35 m/min, pode ser explicada pelo maior número de vezes em que as guias da ferramenta passam pelo mesmo ponto do corpo de prova ocorrendo uma remoção mais efetiva de material das paredes dos furos.

A Fig. 17 mostra os resultados do ensaio de furação com a mudança dos parâmetros de v_c de 35 para 25 m/min e o aumento de f_n para 0,25 mm/rot.

Na medição realizada em 1536 mm de comprimento usinado, a rugosidade média R_a que menor ocorreu foi para a broca não revestida, seguida do revestimento AlCrN.

Devido ao aumento de f_n , as medições de rugosidade média tiveram variações acima das condições anteriores, porém ainda indicando baixo valor de rugosidade caracterizado pelo padrão IT9.

A Fig. 18 mostra os valores de rugosidade média R_a dos furos, para as condições de $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,25$ mm/rot

Quando ocorre a mudança de v_c para 35 m/min e f_n para 0,25 mm/rot, indicada na Fig. 18, considerada a condição mais severa dos ensaios, com maior esforço de corte e velocidade de corte, os revestimentos mostram-se mais efetivos quanto a valores de rugosidade média dos furos. Este fato pode ser explicado pela presença do composto Al que atua como lubrificante no estado sólido, servindo como interface cavaco/ferramenta facilitando o escoamento do cavaco e limpando a superfície interna do furo.

A condição não revestida obteve resultados inferiores porque não possuem nenhum elemento facilitador que atue como lubrificante ou no escoamento de cavacos, constatou-se não ser possível a realização das medições no comprimento 6144 mm devido a falha catastrófica das ferramentas não revestidas.

3.4. Medição dos furos

Nas medições dos furos, resultados diferentes foram encontrados com a variação de parâmetros de corte e aplicação de revestimentos. Nas ferramentas os resultados obtidos estão detalhados através de gráficos onde a variação do diâmetro dos furos está relacionada com o comprimento usinado.

A Fig. 19 mostra os valores de diâmetro obtido com $v_c = 25$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot.

De acordo com a Fig. 19, as ferramentas não revestidas obtiveram valores maiores do diâmetro dos furos, considerando que a broca possui um diâmetro de 8,0 mm com tolerância h8. O AlCrN obteve menores valores de diâmetro, sendo considerado o melhor resultado para os parâmetros utilizados.

A Fig. 20 mostra valores de diâmetro com parâmetros de corte de $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot.

Com a mudança de parâmetros de velocidade de corte de 25 para 35 m/min, indicado na Fig. 20, a sequência de resultados obtidos nos furos realizados praticamente se manteve, o melhor resultado foi obtido no AlCrN ocorrendo valores menos dispersos e próximos ao diâmetro dos gumes da broca.

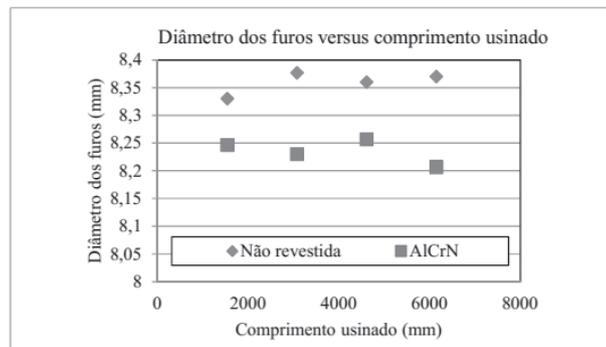


Fig. 19. Valor de diâmetro com valores de $v_c = 25$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot.

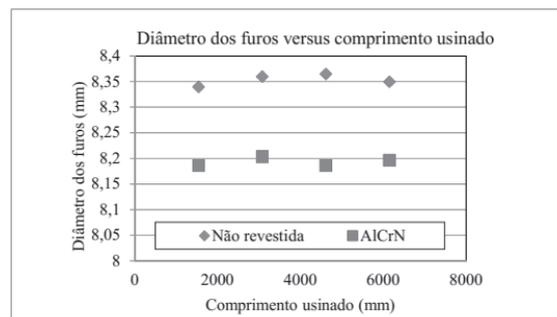


Fig. 20. Valor de diâmetro com valores de $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot.

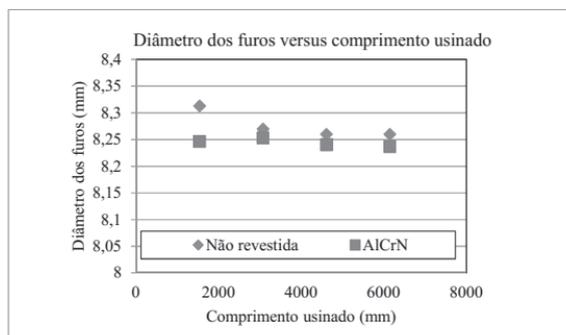


Fig. 21. Valor de diâmetro com valores de $v_c = 25$ m/min e $f_n = 0,25$ mm/rot.

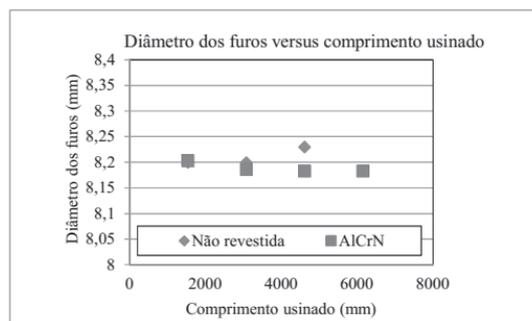


Fig. 22. Valor de diâmetro com valores de $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,25$ mm/rot.

A Fig. 21 mostra valores de diâmetro dos furos realizados com $v_c = 25$ m/min e avanço $f_n = 0,25$ mm/rot.

Quando ocorre a diminuição de v_c para 25 m/min e aumento de f_n para 0,25 mm/rot, a Fig. 21 mostra uma condição diferente das obtidas nos valores anteriores. A ferramenta não revestida ainda prevalece com valores de diâmetro maiores. No comprimento usinado de 1536 mm, mostra de forma bem clara a situação relatada anteriormente, já a partir do comprimento usinado de 3072 mm, os valores de diâmetro de furo realizado se aproximam e mantêm seus valores próximos até o comprimento usinado de 6144 mm para todos os tipos de revestimentos e não revestidas.

A Fig. 22 mostra os valores de diâmetro versus comprimento usinado com $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,25$ mm/rot.

A Fig. 22 apresenta variações de diâmetro no comprimento usinado de 1536 mm, muito semelhantes para todas as brocas ensaiadas, a partir do comprimento usinado de 3072 mm os furos realizados com brocas revestidas tiveram seus valores de diâmetro inferiores as brocas não revestidas. As brocas com AlCrN mantiveram seus valores de diâmetro similares em todo comprimento usinado.

A possível justificativa para os valores de diâmetro das brocas revestidas serem menores é a facilidade de escoamento do cavaco pela interface cavaco/ferramenta, além do menor desgaste das ferramentas, que pode ser diferente entre gumes da mesma broca, devido a possíveis inclusões e variações de estrutura metalográfica da placa onde foi realizado o ensaio. O desgaste desigual dos gumes pode ocasionar esforços desiguais da ferramenta durante o corte aumentando assim o diâmetro do furo.

3.5. Análise do desgaste e considerações finais

Após análise de todos os resultados obtidos do desgaste de flanco e número de furos, foi realizado um último ensaio de usinagem em que comparou-se a melhor condição de usinagem, a condição de corte considerada satisfatória para o ensaio de fim de vida das brocas foi de $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot, escolha em virtude dos valores obtidos nos outros gráficos, dentro de valores mínimos de diâmetro e des-

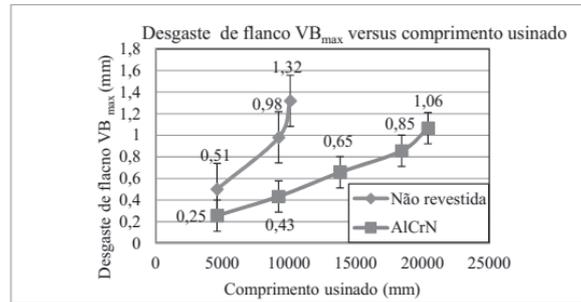


Fig. 23. Valor de diâmetro com valores de $v_c = 25$ m/min e $f_n = 0,25$ mm/rot.

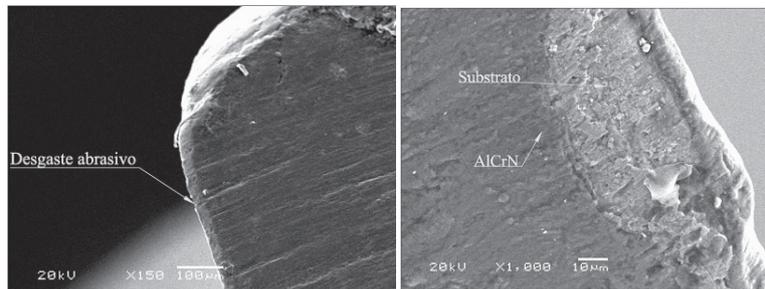


Fig. 24. Broca a) Flanco de uma das brocas com AlCrN, após teste de usinagem b) Desgaste do gume principal da ferramenta revestida com AlCrN.

gaste de flanco. A Fig. 23 mostra resultados obtidos para ensaios de fim de vida para a condição escolhida.

A Fig. 23 mostra que entre o revestimento AlCrN, e as brocas não revestidas, o revestimento apresentou menor desgaste de flanco VB_{max} , para a condição de $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot.

As brocas revestidas com AlCrN usinaram uma média de 105% mais que as não revestidas, valor determinado aproximadamente a 20400 mm, onde foi realizado a última medição de desgaste de flanco das brocas com AlCrN enquanto as brocas não revestidas chegaram a 10080 mm de comprimento usinado.

3.6. Análise da superfície das ferramentas com revestimento AlCrN

Após os ensaios de fim de vida das brocas revestidas com AlCrN foi realizado análises por MEV, para caracterização do desgaste predominante nas brocas. A Fig. 24 (a) mostra o flanco de uma broca revestida com AlCrN após teste de usinagem. A Fig. 24 (b) mostra o flanco de uma broca revestida com AlCrN, após realizar teste de usinagem com $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot. O desgaste abrasivo mostrou-se evidente no gume da ferramenta, através de riscos causados pelo fluxo de material abrasivo no revestimento da broca.

Para melhor caracterização do desgaste predominante nas brocas, a Fig. 24 (b) mostra o desgaste do gume principal de uma das ferramentas utilizadas com $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot. Nos detalhes da fig. 24 (b) observa-se o desgaste por abrasão no gume principal da ferramenta após realização dos testes de usinagem, com a remoção de revestimento e exposição do substrato da ferramenta.

Outro tipo de desgaste foi identificado no flanco da ferramenta como o desgaste por adesão, não sendo considerado como desgaste característico na usinagem de ferros fundidos.

A presença do desgaste adesivo na ferramenta justifica-se pela matriz do ferro fundido nodular ferrítica, onde a presença de ferro livre, em maior quantidade mostrou-se evidente, até mesmo durante os testes de usinagem com a formação de cavacos contínuos, observados durante os testes, em que as brocas iniciavam os furos.

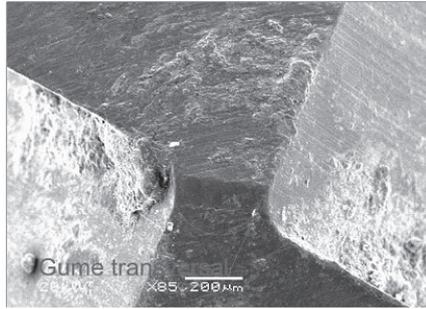


Fig. 25. Gume transversal de uma broca com AlCrN.

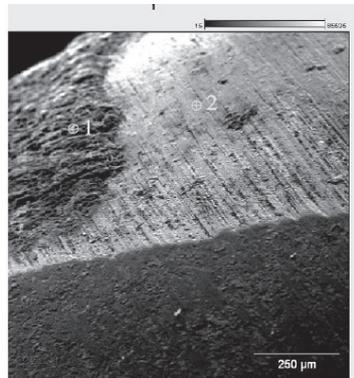


Fig. 26. Superfície da broca com material aderido.

A Fig. 25 mostra o gume transversal da broca com AlCrN, imagem obtida através de MEV.

A presença de material aderido no gume transversal da ferramenta mostrou-se evidente, Fig. 25, podendo ser caracterizado pelo encruamento do cavaco durante a usinagem. Encruamento provocado em virtude de não existir pré-furo no ensaio de furação, dificultando a saída de cavacos durante a usinagem. Outro fator a ser considerado é a baixa velocidade de corte no centro do gume transversal e a não existência de ângulo de saída de cavacos. A deformação plástica do gume por esmagamento também é justificada pela não existência de corte de material pela ferramenta durante o ensaio, já que a broca não possui área cortante no gume transversal.

Para comprovar que o material aderido na ferramenta era ferro fundido nodular e também atestar que composição química do revestimento foi realizado uma análise por espectrometria EDS, Fig. 26, que determinou os elementos presentes nos pontos 1 e 2.

A Fig. 26 mostra que ocorreu desgaste abrasivo na superfície da ferramenta, e revela material aderido na sua superfície, indicando a presença dos dois tipos de desgaste durante a usinagem do ferro fundido nodular.

Para comprovação que o material aderido na broca fosse realmente ferro fundido, foi realizado espectros dos pontos 1 e 2, Fig. 27 e 28, respectivamente.

O espectro do ponto 1, revelou que o material aderido é ferro fundido, indicado pelo ponto onde mostra a presença de ferro

(Fe) na composição química do material aderido na broca. O alto índice de alumínio (Al) estima-se sendo os apoios da placa para os testes de usinagem eram de calços de alumínio, e como as brocas realizavam furos passantes, acabaram por aderir alumínio na superfície.

O espectro do revestimento AlCrN na ferramenta está comprovado no ponto 2, Fig. 28.

O espectro do ponto 2, Fig. 28, indica desgaste do revestimento, pela presença dos elementos Cr e Fe na figura, característicos do aço rápido M2.

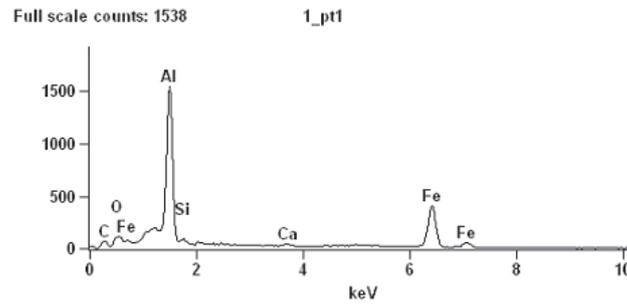


Fig. 27. Espectro do material aderido.

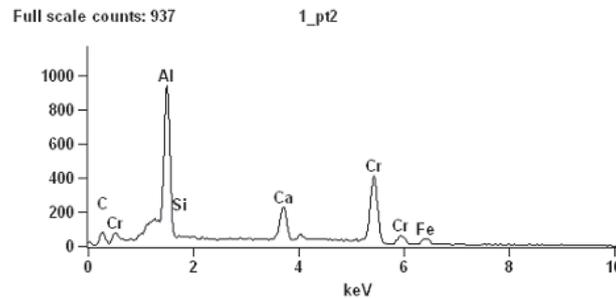


Fig. 28. Espectro da superfície desgastada.

4. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados mostram a evidência clara da influência da velocidade de corte durante o processo de furação com brocas revestidas no desgaste de flanco. Por exemplo, a condição de $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot, comparando-se brocas com e sem revestimento, verificou-se que o aumento da velocidade de corte, melhorou o desempenho, possivelmente pela formação de óxidos de alumínio que, auxiliaram na redução do processo de desgaste por abrasão do material a ser usinado na superfície da broca.

O processo de desgaste por abrasão foi bem caracterizado nos gumes principais com uma participação grande da adesão, devido as características dúcteis da matriz ferrítica do ferro fundido nodular usinado. No gume transversal das brocas não foi caracterizado desgaste abrasivo, em virtude de não ocorrer corte de material, mas sim encruamento pela baixa velocidade de corte, em relação ao gume principal.

As brocas revestidas com AlCrN foram as que alcançaram maiores comprimentos usinados, com menores desgastes de flanco em testes com comprimento usinado já pré-estabelecidos. Comparando-se com as brocas sem revestimento obtiveram um rendimento de 100%.

Este estudo contribuiu para se conhecer melhor a influência da aplicação de revestimentos em brocas no processo de furação confirmando os resultados encontrados por outros pesquisadores e ampliando a pesquisa sobre este material.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a EMPRESA DE FUNDIÇÃO NOBRE, pelo fornecimento das placas de ferro fundido, a empresa OERLIKON BALZERS pela aplicação dos revestimentos e a Faculdade SATC pela disponibilidade de seus laboratórios.

REFERENCIAS

- [1] Dobrzanski, L.A., “Fundamentals of materials science and physical metallurgy, in: Engineering Materials with Fundamentals of Materials Design.” WNT: Warszawa (2002)
- [2] Marmentini, M.M., Beltrão, P.A. de C., “Análise comparativa do desempenho de brocas helicoidais revestidas com TiAlN e AlCr na furação do aço SAE 4144 beneficiado.” Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, COBEF (2007)
- [3] Quinto, D.T., “New generation of PVD films”, *Cutting Tool Engineering Magazine*, October (2005)
- [4] Ribeiro, J.L.S., “Fresamento do aço vhsuper nos estados recozido e temperado com metal duro e cermet”, Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte: Universidade Federal De Minas Gerais (2007)
- [5] Harris, S.G, Doyle, E.D., Vlasveld, A.C., Audy, J., Quick, D., “A study of the wear mechanisms of Ti_{1-x}Al_xN and Ti_{1-x-y}Al_xCryN coated high-speed steel twist drills under dry machining conditions”, *Wear*, 723-734 (2003)
- [6] Silva, F.J., Santos, S.C., Silva, W.M., Franco, S.D., Silva, M.B., “Caracterização tribológica de revestimentos aplicados a ferramentas de corte”, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. João Pessoa (2002)
- [7] VDI, Vdi Guideline 3198. Handbuch Für Betriebstechnik. Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf (1992)
- [8] Barbosa, P.A., Furação de Ferros Fundidos Austemperados e Nodular Perlitico. Dissertação. Universidade Federal de Uberlândia (2009)

CHARACTERIZATION OF WEAR HSS DRILLS WITH COATED AlCrN AND UNCOATED IN TESTS OF DRILLING IN MACHINING OF DUCTILE CAST IRON GGG DIN 50

Abstract – The use of coatings when drilling cast iron has the potential to increase the tool wear resistance at higher temperatures and enables the reduction or elimination of the use of coolants, lubricants means reducing the environmental impact with the nonapplication thereof. The objective of this study is to evaluate the performance of high speed steel drills coated AISI M2 AlCrN by PVD process in drilling process in full. For this assays were performed as drilling evaluating wear quantization parameter, the value of VB_{máx} (maximum flank wear) for coated and uncoated drill, holes of diameter measurement performed along the tool life and surface roughness of machined surfaces. 12 trials were performed for each type of drill, all dry. The material used for drilling tests was the ductile cast iron GGG 50 DIN in formats plates 48 x 400 x 500 mm. According to the dimensions of the plate characterized as deep holes, given that the drill has a diameter of 8 mm, with L/d > 5. The cutting parameters were worked out: cutting speed (25 and 35 m / min) and feed rate (0.15 to 0.25 mm / rev.) We evaluated the resistance to abrasion and yield in length machined, comparing the drills with and without coating. The results show the influence of cutting speed drills coated in VB_{máx} maximum flank wear. SEM and EDS analysis revealed the presence of adhesive wear contributing a small portion to the tool wear occurred.

Keywords – Drill, HSS, Coating, Drilling, Ductile cast iron GGG50.