



## INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA EMISSÃO ACÚSTICA E CORRENTE DO MOTOR NA FURAÇÃO

### **Jalon de Moraes Vieira**

Universidade Federal de Juiz de Fora/CTU, Departamento de Mecânica  
Av. Bernardo Mascarenhas, 1283 – Fábrica, 36080-001 – Juiz de Fora, MG.

### **José Roberto Tavares Branco**

Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), Laboratório de Recobrimentos  
Av. José Cândido da Silveira, 2000 – Cidade Nova, 31170-450 - Belo Horizonte, MG.

### **Alexandre Mendes Abrão**

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica  
Av. Antônio Carlos 6627, Cidade Universitária, 31270-501 – Belo Horizonte, MG

### **Geraldo Magela de Azevedo**

Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), Laboratório de Recobrimentos  
Av. José Cândido da Silveira, 2000 – Cidade Nova, 31170-450 Belo Horizonte, MG.

### **Rodrigo Carvalho**

Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), Laboratório de Recobrimentos  
Av. José Cândido da Silveira, 2000 – Cidade Nova, 31170-450 Belo Horizonte, MG.

**Resumo.** *A utilização de revestimentos finos processados por deposição física de vapores assistida por plasma em ferramentas de corte tem proporcionado um melhor desempenho durante processo de usinagem, maior produtividade e conseqüentemente redução dos custos do processo. Devido a grande importância da furação como processo de fabricação, inúmeras pesquisas tem sido direcionadas ao seu estudo. Testes de furação apresentam-se como um bom qualificador de ferramentas de corte, revestimentos duros e fluidos de corte. Brocas de aço rápido M2 não revestidas e revestidas com nitreto de titânio (TiN) foram utilizadas durante furação do aço para trabalho a frio AISI D3. Os testes foram monitorados através de emissão acústica, parâmetros marse e frequência, usando-se para isto sensores com faixa de trabalho de 10 a 100kHz. Foram monitorados também o desgaste da ferramenta e a corrente elétrica consumida pela máquina durante processo. Os resultados mostram uma superioridade na vida da ferramenta quando utilizou-se brocas revestidas com TiN e que o parâmetro de emissão acústica frequência e a corrente do motor apresentam uma estreita relação com o desgaste da ferramenta.*

**Palavras-chave:** Furação, Revestimentos de TiN, Emissão acústica

## 1. INTRODUÇÃO

O desempenho de materiais para ferramentas de corte normalmente é avaliado por testes comparativos de corte. Os processos de usinagem tiveram um grande avanço em suas velocidades de corte usuais de 3 a 5m/min com ferramentas de aço carbono e 20 a 30m/min com ferramentas de aço rápido nas primeiras décadas deste século, para 3000 a 5000m/min com a maioria das modernas ferramentas de PCD, atualmente. Porém, este progresso não teria ocorrido sem um crescimento na demanda dos novos materiais com alta resistência ao corte. Na verdade ocorreu um desenvolvimento simultâneo de ferramentas de corte, processos de usinagem e máquinas ferramentas satisfazendo as exigências oriundas dos novos materiais de trabalho e necessidade de aumento de produtividade.

Buscando-se obter maior produtividade, engenharia de superfície e tecnologia de recobrimentos tem viabilizado alternativas competitivas pois operações de corte tem considerável significado na indústria moderna. Nos últimos 30 anos o desenvolvimento de tecnologias de filmes finos para ferramentas de corte tem evoluído constantemente. Inicialmente as ferramentas de metal duro revestidas por CVD (Chemical Vapour Deposition) tiveram a sua introdução no mercado. Em 1979 foi a vez de ferramentas de aço rápido serem revestidas pelo processo PVD e não pelo processo CVD. Vantagens de processos PVD para ferramentas de corte de aço rápido incluem: Baixa temperatura de operação, mínima ou nenhuma distorção da peça, flexibilidade para controle de deposição e morfologia e melhor adesão e acabamento superficial (Tonshoff & Mohfeld, 1998).

Entre os revestimentos duros produzidos por PVD para ferramentas de corte destaca-se o TiN não só pela significativa melhoria de performance que proporciona e economicidade com que pode ser produzido como também por sua cor dourada de grande aceitação pelos usuários. Esta cerâmica apresenta baixo coeficiente de fricção contra aço e várias outras ligas metálicas. Sua dureza alcança 2300 HV e sua afinidade por ferro é muito pequena. Com a adição de carbono à estrutura do TiN sua dureza é aumentada chegando a 3000 HV, o que promove aumento de resistência a abrasão e melhoria de performance (Tangena, 1987).

Nos dias de hoje é cada vez maior o interesse por unidades de produção automatizadas e para tanto interessa monitorar entre outros processos, desgaste da ferramenta em tempo real. Medidas da potência do motor, torque, análise de sinais de vibração e análise espectral de som, são algumas das técnicas usadas para monitorar desgaste (Byrne *et al.* 1995). A emissão acústica é um importante fenômeno que ocorre durante a deformação do material, corte de metais e processos tribológicos. Nestes últimos anos a EA tem se tornado uma técnica promissora e tem sido vastamente usada para monitoramento de processos tribológicos e fabricação devido ao seu potencial benéfico sendo diretamente usada para relacionar os eventos do processo. Entretanto, um processo de usinagem é uma combinação dinâmica de processos tribológicos e de corte e a emissão acústica produzida no processo é muito complexa devido a fratura do material, formação do cavaco, desgaste e atrito. Especificamente no processo de furação as características da emissão acústica apresentam diferenças em relação a outros processos de usinagem, tais como torneamento, fresamento e retificação, pois neste apresentam-se também como fontes de ruídos o entrelaçamento e quebra do cavaco nos canais da broca e o contato da broca com as paredes do furo.

## 2. PVD

O processo de deposição de revestimentos por física de vapores (PVD) necessita que vapores do material a ser depositado sejam criados (via sputtering ou evaporação) e posteriormente condensados sobre a superfície do substrato para que o revestimento seja formado (Metals Handbook, 1982).

De uma forma simplificada, pode-se dividir o processo de PVD em três etapas:

- 1) Criação da fase vapor do material que será depositado sobre o substrato.
- 2) Transporte do material da fonte de vapor até o substrato – Nesta fase o material em forma de vapor é transportado da fonte até o substrato com ou sem colisões entre átomos e moléculas. Durante o transporte, parte do material em forma de vapor pode ser ionizado pela ação de um plasma.
- 3) Crescimento do revestimento sobre o substrato – Este processo envolve a condensação do vapor sobre o substrato e a subsequente formação do revestimento pelo processo de nucleação e crescimento. Os processos de nucleação e crescimento podem ser muito influenciados por bombardeamento iônico do revestimento em formação resultando em mudanças na microestrutura, composição e tensões residuais.

Para processos de usinagem deseja-se que o par substrato/revestimento apresente propriedades tais como mostradas na Figura 1.

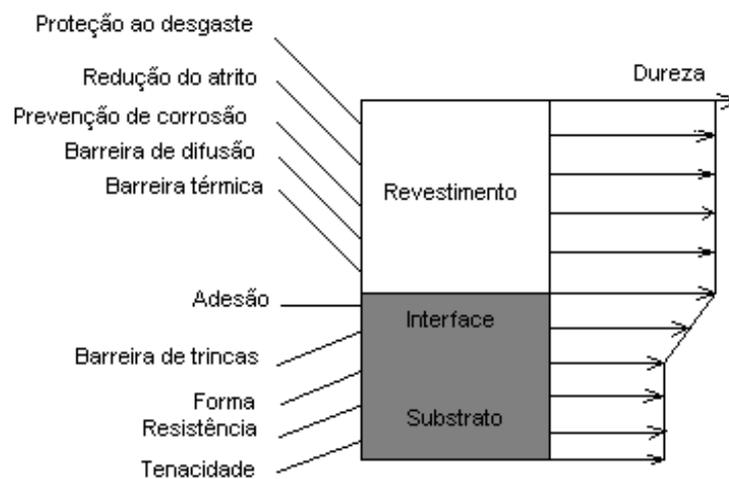


Figura 1 - Requisitos necessários para revestimentos duros.

O grau de controle de cada uma dessas três etapas determina a versatilidade ou flexibilidade do processo de deposição. As técnicas de PVD são usadas num largo campo de aplicações desde revestimentos decorativos, revestimentos magnéticos, revestimentos ópticos, revestimentos lubrificantes, revestimentos ultraduros e até revestimentos supercondutores de alta temperatura crítica. A espessura dos revestimentos varia de poucos angstroms até dezenas de micra. Um grande número de materiais inorgânicos (metais, ligas e compostos) bem como alguns materiais orgânicos podem ser depositados através das técnicas de PVD.

### 3. MONITORAMENTO DOS PROCESSOS DE USINAGEM

O monitoramento dos processos de usinagem é uma das ferramentas de otimização dos mesmos, e portanto, vem despertando interesse crescente dos pesquisadores, engenheiros e técnicos do meio. O monitoramento se aplica, segundo Dornfeld *et al.* (1993), nos seguintes elementos do processo:

- Nas máquinas, para diagnósticos e monitoramento de desempenho.
- Nos processos propriamente ditos, para melhor compreensão do mecanismo de formação do cavaco, monitoramento das temperaturas e consumo de energia, entre outros.
- Nas ferramentas, para verificar posicionamento, estado de afiação, alinhamento, lubrificação, etc.

- Nas peças, para monitoramento da geometria e dimensão, rugosidade superficial, tolerâncias e danos térmicos.

O monitoramento das máquinas ferramentas tem como objetivo aumentar a confiabilidade das mesmas, detectando tanto as falhas catastróficas onde o processo precisa ser paralisado, quanto as degradações dos subsistemas que compõem o processo gerando um indicador do momento em que tais degradações atinjam um nível crítico.

Dornfeld *et al.* (1993), apresentam diversas características dos sistemas de monitoramento que possibilitam a classificação dos mesmos. Dentre eles destacam-se, tempo de resposta (resposta em tempo real ou após o ciclo), necessidade de contato entre o sensor e o componente monitorado, tipo de medição (direta, que mede a característica propriamente dita, como por exemplo, o diâmetro em uma operação de torneamento ou a medida ótica do desgaste da ferramenta ou indireta, que possibilita a inferência da característica de interesse) e finalidade (o sistema de monitoramento controla o processo ou fornece diagnósticos da máquina).

Os sensores disponíveis para aplicação em máquinas ferramentas possuem a capacidade de detectar: fogo/fumaça, nível de som, imagem, temperatura, contato, desgaste da ferramenta (através da dimensão da mesma), vibração mecânica, limites de curso, força, danos na ferramenta, força/torque, deformações térmicas, rugosidade da superfície usinada, emissão acústica do processo, velocidade de avanço da ferramenta, umidade, pressão (Byrne *et al.* 1995).

## 6. MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes de desgaste e vida das ferramentas, testes para aquisição da corrente elétrica que passa através do cabo de alimentação principal da máquina operatriz e testes para análise da emissão acústica foram executados em furadeira radial Nardini, modelo FRN-40 instrumentada. As barras de aço para trabalho a frio D3 foram usinadas sendo que cada furo era executado sequencialmente ao outro até atingirem o critério de fim de vida da ferramenta pré-estabelecido ( $VB_{máx} = 0,8\text{mm}$ ). Utilizou-se este parâmetro pois foi o que predominou em todos os testes. O desgaste foi medido utilizando-se uma lupa adaptada para medir o desgaste de flanco das brocas com resolução de 0,02mm. Ensaios de repetibilidade foram realizados para se verificar a validade dos resultados obtidos com relação a todos os parâmetros investigados.

Os testes para aquisição de corrente elétrica que passa através do cabo de alimentação principal do motor da furadeira, foram realizados usando um transdutor de natureza resistiva denominado Shunt que responde linearmente a um sinal de corrente através de um sinal de tensão. O Shunt utilizado durante realização dos experimentos fornece uma leitura de 150mV para uma corrente de 30 A (30 A – 150mV). O sinal de tensão obtido no Shunt foi amplificado e lido através de uma placa de aquisição de dados da National Instruments modelo AT-MIO-16E-2. Sistema similar a este foi usado por Vieira (1997), na qual foi monitorado a corrente dos motores de uma máquina ferramenta em operações de fresamento, utilizando porém, um sensor de corrente Hall.

O sistema de aquisição de dados usado para monitorar a emissão acústica apresenta faixa de frequência de trabalho de 10-100kHz para o acelerômetro. Utilizou-se para os experimentos um cartão processador de sinais digital AEDSP-31/16 da Physical Acoustics Corporation conectado a um computador 486Dx66-MHz. O sensor de emissão acústica foi posicionado junto a peça e o sinal deste foi pré-amplificado 100 vezes (40dB).

Durante os ensaios foram realizados furos com 15mm de profundidade. Utilizou-se para os testes uma velocidade de corte de 32m/min (1700rpm), com taxa de avanço de 0,13mm/volta. O fluido de corte utilizado foi um sintético com concentração de 5% aplicado sobre a região de corte a uma vazão de 3,5l/min.

## 7. RESULTADOS E ANÁLISES

### 7.1 Corrente elétrica do motor e desgaste da ferramenta

Os valores médios da corrente do motor e as medidas do desgaste da broca para cada furo foram plotados, Figuras 3 e 4 respectivamente, em função do número total de furos executados pelas brocas revestida e não revestida.

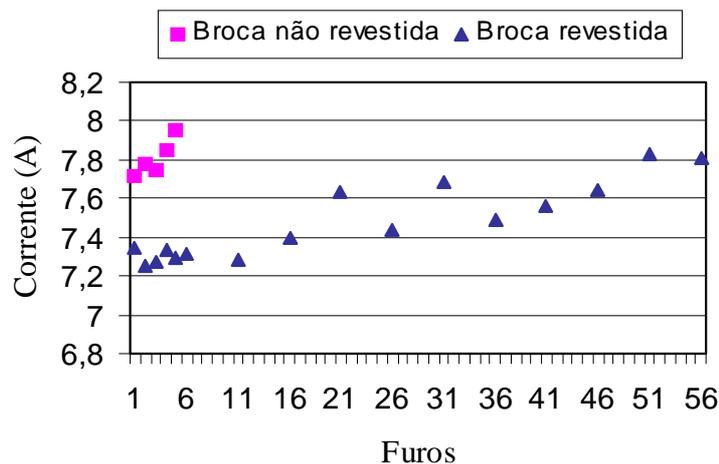


Figura 3 - Influência do tempo de usinagem na corrente média quando do uso de brocas revestidas e não revestidas.

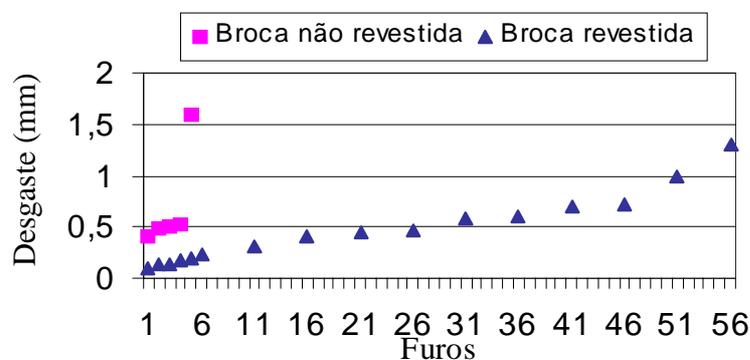


Figura 3 - Influência do tempo de usinagem no desgaste da ferramenta, quando do uso de brocas revestidas e não revestidas.

Nota-se para as duas condições de corte uma elevação nos valores da corrente elétrica do motor com o tempo, donde o aumento desta corrente é função do crescimento do desgaste, pois aumento deste gera uma área de contato maior entre ferramenta/peça/cavaco, elevando-se assim, a corrente elétrica do motor. Verifica-se porém que este crescimento da corrente do motor não ocorre de forma contínua sendo que em alguns instantes há uma tendência de queda nesta corrente. Este fato ocorre devido a variações tanto no sistema de refrigeração/lubrificação quanto na própria heterogeneidade estrutural do material. Como a condição de corte utilizando a broca revestida apresenta menor taxa de desgaste, esta situação é a que mais retarda o crescimento da corrente do motor.

A potência de corte ( $N_c$ ), é basicamente o consumo de energia durante corte fornecida pela equação:

$$N_c = F_c \times V_c \quad (1)$$

Com as comparações usando-se velocidades de corte ( $V_c$ ) e avanços iguais, o parâmetro que altera o consumo de energia é a força de corte ( $F_c$ ). É conhecido que as forças de corte dependem de dois fatores (Trent, 1992):

I – Áreas dos planos de cisalhamento (primário, secundário e contato da superfície de folga com a peça).

II – Resistência ao cisalhamento do material nestas regiões.

As forças de corte são tanto menores quanto menores forem estes fatores. Os revestimentos de TiN, por apresentarem um baixo coeficiente de atrito contra aço e alta dureza, diminuem o comprimento de contato cavaco ferramenta e ferramenta peça e diminuem também o desgaste da ferramenta de corte, proporcionando então, menores forças de corte.

O gráfico de desgaste das ferramentas de corte é também apresentado na Figura 3. Nos testes de vida da ferramenta houve um predomínio do desgaste de flanco máximo,  $VB_{máx.}$ , na superfície de folga das ferramentas testadas. Este desgaste medido em vários intervalos durante os testes, permitiram a construção de gráficos  $VB_{máx.}$  x números de furos. Vale ressaltar que nestes gráficos o valor de  $VB_{máx.}$  é referente ao maior valor encontrado entre as duas arestas cortantes da broca em cada parada para medida do desgaste.

O revestimento de TiN sempre aumentou a vida da ferramenta em relação a condição onde não utilizou-se revestimento de TiN (chegando a um aumento de 11 vezes). Isto sugere que mecanismos de desgaste ativados por cargas térmicas e mecânicas (deformação plástica, abrasão, adesão e attrition), provavelmente controlaram a vida das ferramentas, e que a ação dos revestimentos que sempre aumentaram a resistência ao desgaste e diminuíram o atrito nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, foram benéficos contra tais mecanismos.

## 7.2 Emissão acústica

Os parâmetros de emissão acústica monitorados foram Marse e Frequência, a fim de se encontrar uma relação entre os mesmos e o desgaste da ferramenta. Os gráficos das Figuras 4 a 8 caracterizam os sinais de EA parâmetro Frequência das brocas não revestida e revestida. Tanto os gráficos das Figuras 4 a 8 quando os gráficos das Figuras 9 e 10 foram escolhidos para serem apresentados por melhor caracterizar o processo como um todo.

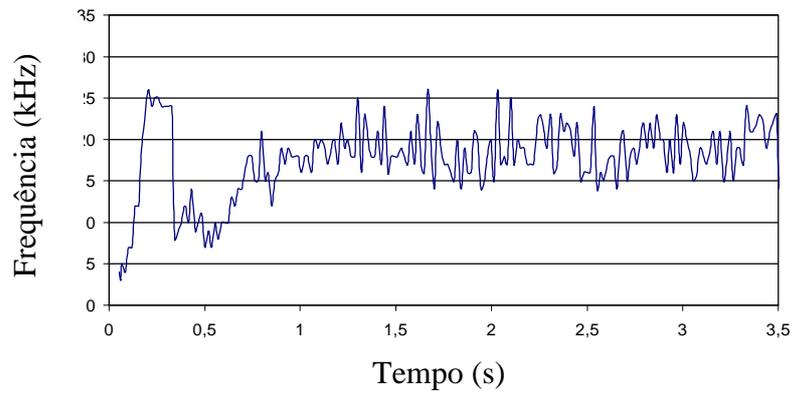


Figura 4 - Emissão acústica, parâmetro Frequência para o furo 2 com broca não revestida.

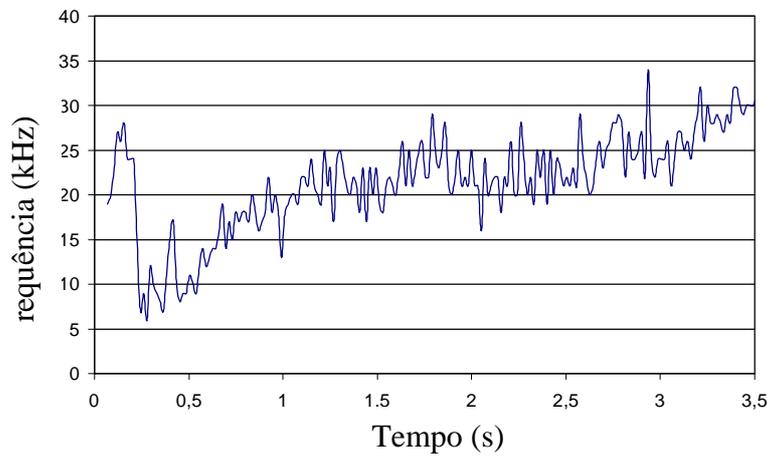


Figura 5 - Emissão acústica, parâmetro Frequência para o furo 4 com broca não revestida.

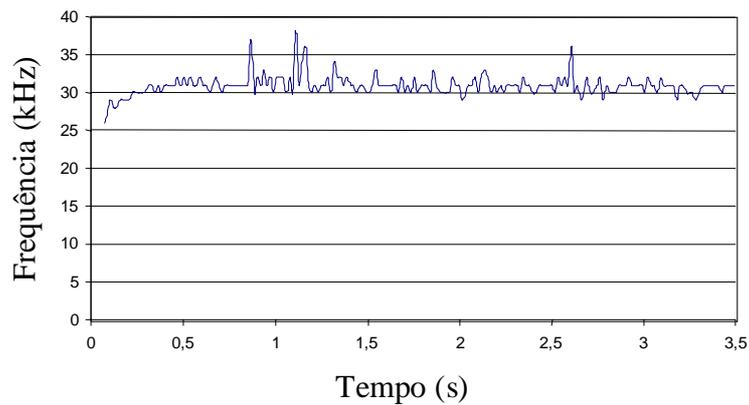


Figura 6 - Emissão acústica, parâmetro Frequência para o furo 1 com broca revestida.

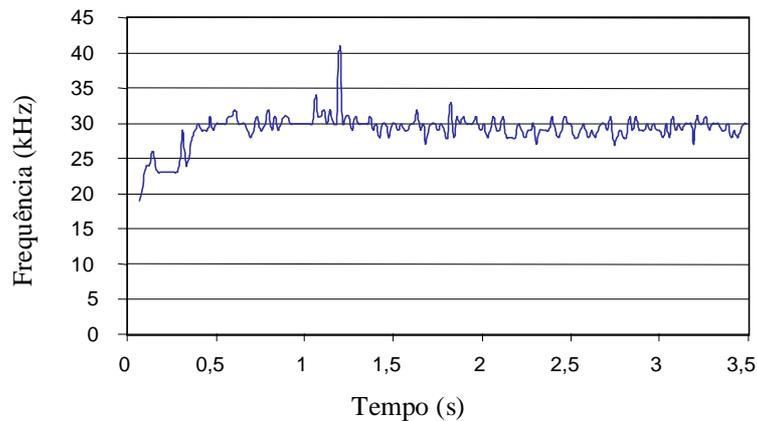


Figura 7 - Emissão acústica, parâmetro Frequência para o furo 31 com broca revestida.

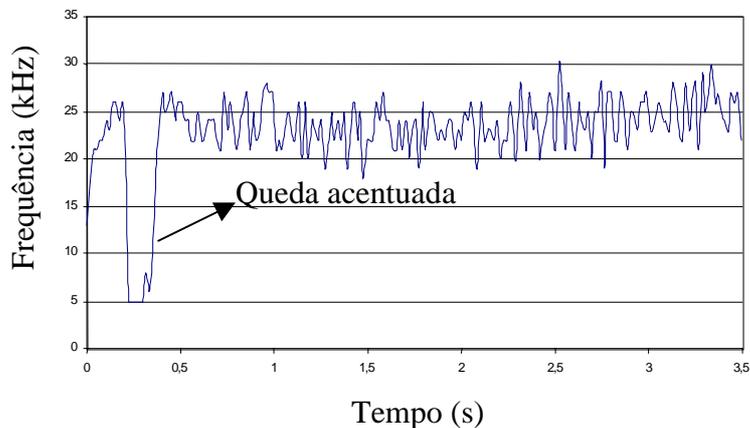


Figura 8 - Emissão acústica, parâmetro Frequência para o furo 46 com broca revestida.

O decréscimo acentuado nos valores do parâmetro Frequência observado durante furação, para um tempo de corte de aproximadamente 0,5s, esta associado com o aumento nos níveis de desgaste da ferramenta. A medida em que tem-se uma elevação do desgaste da ferramenta, o atrito entre as regiões desgastadas e as paredes do furo tendem a aumentar. Tem-se então, um engate momentâneo entre a broca e o furo (Fonseca *et al.* 1996). Neste ponto, o nível de ocorrência dos eventos acústicos é reduzido, mas a intensidade dos mesmos eleva-se consideravelmente (Figuras 9 e 10).

Quadro & Branco (1997), afirmam que os picos, inicial e final, nos sinais de Marse podem estar relacionados com o desgaste da ferramenta e com o mecanismo de formação do cavaco. O parâmetro de EA Marse apresenta 5 estágios bem definidos durante furação. O estágio 1 corresponde ao puncionamento da broca no material da peça, onde a broca levemente indenta o material. O estágio 2, ou estágio transiente, onde a espessura do cavaco aumenta a medida em que a broca penetra no material, gerando um cavaco em forma de espiral. O estágio 3, chamado de estado de furação em regime, onde a espessura do cavaco permanece constante. O estágio 4 correspondente ao término do processo de furação e finalmente o estágio 5 correspondente a retirada da broca do furo.

Durante o funcionamento existe pouca atividade acústica para ambas as brocas revestida e não revestida. Esta contagem de energia indica que esta indentação corresponde a uma dada deformação plástica com sinal acústico fraco. Durante o estágio 2, tem-se a formação do cavaco em espiral. Devido ao maior comprimento deste tipo de cavaco, este permanece em maior contato com a broca gerando assim uma atividade acústica considerável.

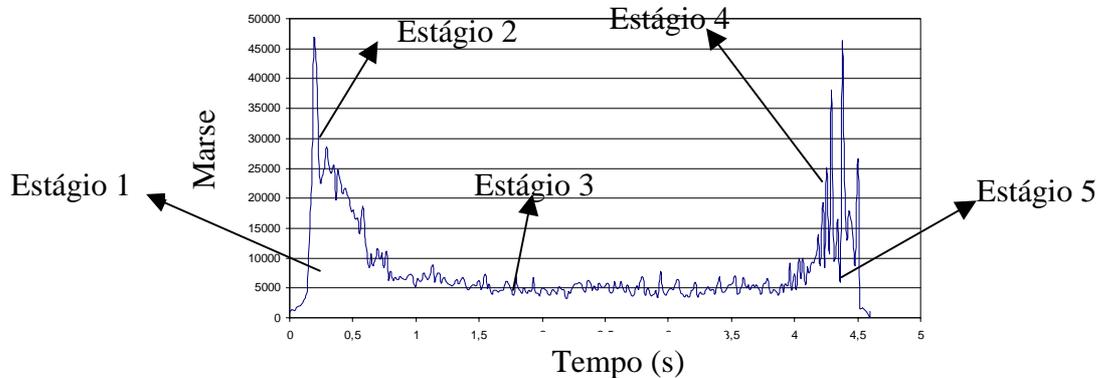


Figura 9 - Emissão acústica, parâmetro Marse para o turo 4 com broca não revestida.

No estágio 3, os cavacos gerados apresentam pequeno comprimento (tipo lascas) e a atividade acústica permanece constante.

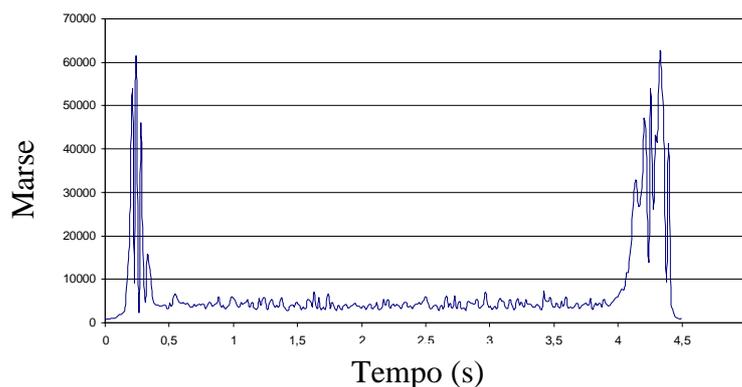


Figura 10 - Emissão acústica, parâmetro Marse para o furo 1 com broca revestida.

Os picos de Marse nos estágios 2 e 4 implicam que a taxa de desgaste da ferramenta tende a aumentar. Entretanto, esta conclusão não pode ser totalmente alcançada pois existem fontes de EA não diretamente relacionadas com o desgaste tais como, deformação e fratura de cavacos, entrelaçamento de cavacos entre outros, mas a análise dos gráficos do parâmetro Frequência nos permitem associar a queda acentuada nos sinais do sinal ao desgaste da ferramenta o que ocorre simultaneamente com o primeiro pico do Marse.

## 8. CONCLUSÕES

- O consumo de energia (corrente elétrica que passa através do cabo de alimentação principal do motor) aumenta com a elevação do desgaste da ferramenta de corte. A aplicação de revestimentos de TiN nas ferramentas diminui este consumo de energia, isto porque o efeito dos revestimentos de TiN diminui o atrito e o desgaste nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, diminuindo-se assim as forças de corte.

- A vida da ferramenta aumenta com a aplicação de revestimentos de TiN sobre as ferramentas de corte. Neste caso especificamente, a vida da ferramenta de aço rápido revestida chegou a ser 11 vezes superior.
- O parâmetro Frequência de EA mostrou ser satisfatório para determinação do fim de vida da ferramenta de corte revestida. Para ferramenta não revestida, a emissão acústica não mostrou-se adequada para determinação do fim de vida da ferramenta. Para brocas não revestidas, a corrente do motor apresentou uma melhor condição para monitoramento do fim de vida da ferramenta.

## 9. REFERÊNCIAS

Byrne, G., Dornfeld, D., Inasaki, I., Ketteler, G., Teti, R. (1995) Tool condition monitoring (TCM) – status of research and industrial application. *Annals of the CIRP*, V. 44, n. 2, pp.541-561.

Dornfeld, D., König, W. and Ketteler, G., 1993, Present state of tool and process monitoring, In *Cutting. International Cirp/Vdi Conference, Dusseldorf. Proceedings of New Developments in Cutting.*

Fonseca, A.M., Silva, I.F. and Branco, J.R.T., 1996, Desgaste de brocas durante o processo de perfuração, *Associação Brasileira de Metais.*, pp. 16.

*Metals Handbook*, 1982, Surface Cleaning, Finishing and Coating, American Society for Metals, ninth edition, vol. 5.

Quadro, A. L. & Branco, J.R.T., 1997, Analysis of the acoustic emission during drilling tests, *Surface and Coating Technology*, pp. 691-695.

Tangena, A. G., 1987, Tribology of thin film system, Doctoral thesis, Eindhoven Technical University, Netherlands.

Trent, E. M., 1992, *Metal Cutting*, 3<sup>rd</sup> Edition, Butterworths, London.

Vieira, J. M., 1997, Influência de fluidos de corte no fresamento do aço NB8640, Dissertação de Mestrado, Universidade de Uberlândia/MG.