



## DETECÇÃO DA FORMAÇÃO INTERMITENTE DO DESGASTE DE ENTALHE NA FERRAMENTA PELA MONITORAÇÃO DO TORNEAMENTO

**José Stockler Canabrava Filho.\***  
stockler@serv.com.ufrj.br

**Sérgio Exel Gonçalves \***  
exel@serv.com.ufrj.br

\* Lab. de Tecnologia Mecânica (LTM) - Dep. Eng. Mecânica - Escola Politécnica / UFRJ  
Caixa Postal: 68.503 – Rio de Janeiro – Brasil – CEP: 21.945 - 970

***Resumo.** Durante a usinagem de materiais tais como aços de baixo teor de carbono, aços inoxidáveis, ligas com níquel e inconel, pode ocorrer a formação de desgaste de entalhe nas ferramentas de corte. Na usinagem destes materiais, o progresso do desgaste de entalhe se dá de forma intermitente devido ao mecanismo de adesão na ferramenta de parte do material usinado e a sua posterior remoção, efetuada pela borda do cavaco. Na monitoração das componentes da força de corte durante testes de vida de ferramenta, este mecanismo se reflete na descontinuidade dos valores de força medidos, dificultando estabelecer a correlação entre estes valores e os comprimentos do entalhe, para diferentes momentos dos testes. Algumas técnicas foram empregadas, sem sucesso, na tentativa de identificar ou quantificar este mecanismo de desgaste a partir de medidas de grandezas efetudas ao longo de testes de vida de ferramenta. Neste trabalho serão apresentados os resultados da aplicação de técnicas de processamento de sinais visando facilitar a identificação da formação descontínua do desgaste de entalhe, a partir de valores médios da força de corte. Estas técnicas tem como objetivo evidenciar as alterações características nos gráficos com os valores da força de corte causadas pelo desgaste de entalhe.*

***Palavras-chave:** Monitoração de desgaste de ferramenta, monitoração de ferramenta, desgaste de entalhe, desgaste de ferramenta, monitoração de usinagem.*

### 1. INTRODUÇÃO

A monitoração do desgaste de ferramenta durante a usinagem é de extrema importância para se obter boa produtividade e garantir a qualidade das peças usinadas. Em muitos casos, os diferentes tipos de desgaste da ferramenta, causados pelos diversos mecanismos de desgaste, acarretam em um aumento de uma ou mais componentes da força de usinagem. Estas componentes podem ser utilizadas para monitorar o estado das ferramentas.

Um sistema para monitoração de desgaste de entalhe da ferramenta por meio de Redes Neurais foi apresentado em Canabrava Filho (2000). Este sistema apresentou bons resultados na monitoração do torneamento dos aços ABNT 1040 e ABNT 4140, pouco dúteis, e péssimos resultados na monitoração do torneamento do aço ABNT 1021, mais dúctil que os anteriores.

Na usinagem de metais pouco dúteis, o progresso do desgaste da ferramenta em uma ou mais regiões se desenvolve de forma contínua. Este progresso do desgaste é refletido em uma variação contínua dos valores das componentes da força de usinagem, que em geral apresentam tendência de crescimento. Este comportamento facilita a monitoração do desgaste da ferramenta.

Por outro lado, na usinagem de metais muito dúteis, o progresso do desgaste da ferramenta se desenvolve de forma descontínua, devido às microfaturas da mesma causadas pela remoção do

metal usinado aderido em sua superfície. Os mecanismos que causam este tipo de desgaste foram extensamente apresentados em Chandraskaran e Johansson (1994) e Lo Casto e outros (1997). No progresso do desgaste de entalhe, não só a formação do cavaco é de grande importância, mas também a formação de rebarbas (Nakayama e Arai, 1987), cujo material também adere ao entalhe, e quando removido causa também microfratura da ferramenta. No torneamento de metais dúteis, durante o progresso do desgaste de entalhe, os valores de força de corte medidos, além de apresentarem grande descontinuidade, apresentam a tendência de crescimento ou de decrescimento em diferentes momentos do teste de vida da ferramenta. Este comportamento, relatado em Canabrava Filho e Barrow (2001), faz com que o mesmo valor de força seja medido em diferentes momentos do teste de vida da ferramenta, e portanto, não caracteriza de forma unívoca o estado da ferramenta.

Em Canabrava Filho (2000) e Canabrava Filho e Barrow (2001) foi apresentada uma aplicação de Redes Neurais Artificiais para detectar a ocorrência de variações de medida da força de corte devido a adesão e remoção de material da região do entalhe da ferrameta, possivelmente associadas a pequenas fraturas da ferrameta. Estes resultados mostraram que a Rede Neural utilizada se comportou como um filtro, suavizando as medidas de força. O valor apresentado no neurônio de saída corresponde à força de corte, e apesar de em alguns casos apresentar um decrescimento brusco simultâneo a um crescimento brusco do desgaste de entalhe, esta rede não foi suficiente para caracterizar o mecanismo intermitente de desgaste de entalhe.

Neste trabalho serão apresentados os resultados de uma pesquisa com técnicas de processamento de sinais para enfatizar as variações nos gráficos das medidas de força de corte no torneamento, possivelmente associadas ao progresso do desgaste de entalhe.

## **2. TESTES DE DESGASTE DE FERRAMENTA**

Estes testes foram executados para a aquisição de dados para serem utilizados na pesquisa de monitoração de desgaste de ferramenta.

### **2.1. Procedimentos Experimentais.**

Os dados utilizados para neste trabalho foram adquiridos durante o torneamento de barras de aço ABNT 1021, com 150 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento, sem uso de fluido refrigerante.

Sinais de força e aceleração foram adquiridos em vários estágios dos testes de desgaste, e em seguida, a usinagem foi interrompida para a avaliação do comprimento dos desgastes das ferramentas. Os sinais de força foram adquiridos com frequências de 2 kHz ou 20 kHz, que foram armazenados em arquivos com 1024 pontos para cada componente de força. Com estes dados obtidos, foram calculadas as médias para cada componente da força. O intervalo de tempo entre as aquisições de dados não foi constante ao longo de cada teste, porque isto não era um fator relevante na ocasião dos experimentos, mas para este trabalho teria sido importante.

Para a avaliação das ferramentas foram efetuadas observações e medidas em um microscópio, e quando necessário, foram tiradas fotografias e registrado em papel alguns perfís da ferramenta em estudo. Os principais equipamentos utilizados foram: dinamômetro Kistler 9262, amplificadores de carga Kistler 5006 e 5001, conversor A/D Amplicon PC-30 PGH, torno Dean Smith and Grace tipo 18 com variador de velocidade contínuo, medidor de superfície Taylor Hobson Talysurf 10.

A ferramenta utilizada nos testes foi um inserto de metal duro P25 CNMG 120408, com revestimento TiN – TiC – TiN (Iscar ic656), montado em um porta ferramentas PCLNR 2525-12A.

A Tab. (1) apresenta as condições de corte utilizadas nos testes. Os testes foram efetuados uma vez para cada condição de corte.

Tabela 1. Condições de corte utilizadas nos testes de desgaste de ferramenta.

TESTE	v (m/min)	a (mm/rot)	p (mm)
U1	330	0,30	2,0
U2	250	0,30	3,0
U3	320	0,30	2,0
U4	250	0,50	2,0

## 2.2. Resultados dos testes de desgaste de ferramenta.

Os resultados dos testes de desgaste de ferramenta estão descritos em detalhes em Canabrava Filho (2000) e parcialmente em Canabrava Filho e Barrow (2001). Durante estes testes, observou-se que o desgaste de entalhe ocorreu devido aos ciclos de adesão e remoção do metal usinado na ferramenta na região do entalhe. Observou-se também um aumento da rebarba formada na face das peças usinadas ao longo dos testes. Parte do metal das rebarbas foram aderidas nas ferramenta na região do entalhe, e portanto participaram dos ciclos de adesão e remoção de metal que contribuíram para o desgaste da ferramenta.

Neste trabalho serão apenas utilizados os valores de força de corte e as medidas de desgaste de entalhe obtidas durante os testes.

As Fig. (1 a)), (2 a)), (3 a)) e (4 a)) apresentam os gráficos de desgaste de entalhe versus tempo e as Fig. (1b)), (2 b)), (3 b)) e (4 b)) os gráficos de força de corte versus tempo para todos os testes utilizados neste trabalho. Nestas figuras pode-se observar que o comportamento da força de corte ao longo dos testes não segue a mesma tendência que o progresso do desgaste de entalhe. Enquanto que o desgaste de entalhe aumenta durante os testes, o valor da força de corte apresenta um comportamento incerto com regiões de crescimento e decréscimo.

Em alguns casos, após um decréscimo brusco da força de corte foi observado um aumento do desgaste de entalhe. Portanto, a diminuição brusca dos valores da força de corte parece refletir o arrancamento do metal aderido na ferramenta e a conseqüente fratura da mesma.

Em outros casos, não foi observado aumento do desgaste de entalhe após a queda brusca do valor da força de corte, o que não significa que não houve arrancamento de material aderido da ferramenta. Nestes casos, poderia ter havido apenas o arrancamento de parte do material aderido na ferramenta sem que houvesse fratura da mesma. Outra possibilidade seria haver microfratura da ferramenta seguida de adesão de outra porção de metal, o que impossibilitaria a observação do crescimento do desgaste de entalhe.

A forma como os dados foram adquiridos não permite fazer uma comparação com os resultados descritos em Youn e outros (1994), onde foi detectada uma correspondência entre a queda do sinal de força e a microfratura da ferramenta. Esta alteração no sinal da força de corte tinha uma duração de proximadamente 800 milissegundos.

Apesar de nem sempre a oscilação corresponder ao desgaste de entalhe é importante detectar esta oscilação por ela estar presente no mecanismo de desgaste intermitente de entalhe.

## 3. TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE SINAL APLICADAS ÀS MEDIDAS DE FORÇA DE CORTE PARA A DETECÇÃO DO DESGASTE DE ENTALHE.

O comportamento característico do sinal de Força de Corte medido durante os testes de usinagem em condições nas quais ocorre o desgaste de entalhe apresenta quedas bruscas associadas ao momento em que há um arrancamento do cavaco aderido à ferramenta, que pode ou não vir acompanhado de pequenos pedaços da própria ferramenta. O valor médio da Força de Corte em função do tempo em alguns casos não aumenta e pode até mesmo diminuir, como nos experimentos U2 e U3. Deste modo, a detecção deste regime característico precisa ser efetuada pelo reconhecimento de grandes quedas bruscas do valor da força, independente do aumento ou não do valor médio da força devido ao desgaste da ferramenta.

Procurou-se realçar estas quedas bruscas, calculando a derivada do sinal de Força de Corte. Com os dados discretos disponíveis, foi utilizada uma derivada discreta calculada pela expressão:

$$\text{DerFc}_i = \frac{\text{Fc}(t_i) - \text{Fc}(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}}$$

onde  $\text{DerFc}_i$  é a derivada da Força de Corte (Fc) em relação ao tempo associada ao instante  $t_i$ , computada no intervalo  $(t_{i-1}, t_i]$ . Os resultados obtidos estão apresentadas nos gráficos assinalados com  $\text{DerFc}$  nas Fig. (1c, 2c, 3c e 4c), para os testes U1, U2 U3 e U4 respectivamente.

Os pontos de interesse são aqueles associados aos valores negativos desta derivada. Entretanto, apenas o fato de serem negativos não é suficiente; o que nos interessa são as grandes quedas bruscas. Para evidenciar estas quedas, efetuou-se uma intensificação dos valores de  $\text{DerFc}_i$ , multiplicando-os pelo valor absoluto da queda  $(\text{Fc}(t_i) - \text{Fc}(t_{i-1}))$ . O uso do valor absoluto é necessário para não alterar o sinal da derivada. Os resultados desta intensificação aparecem nos gráficos assinalados com  $\text{DerFc*absdif}$ , Fig. (1d, 2d, 3d e 4d) para os quatro testes. Note que estes dados foram obtidos com intervalos irregulares, e por isso é necessária a divisão pela magnitude do intervalo  $(t_i - t_{i-1})$ . Para resultados mais significativos o ideal seria que o intervalo de amostragem fosse constante. Neste caso o cálculo da derivada seria ainda mais simples e equivalente ao uso de um filtro de valores  $(-I, I)$  convoluído com os valores da Força de Corte (Nalwa, 1993), o que poderia ser feito em tempo real.

#### 4. DISCUSSÃO.

As técnicas de processamento utilizadas evidenciaram as variações bruscas dos valores de força medidos, reveladas pelos picos negativos nos gráficos das Fig. (1d, 2d, 3d e 4d). Observando a diferença entre os gráficos da derivada simples (Fig. (1c, 2c, 3c e 4c)) e os gráficos com intensificação, observa-se que alguns picos negativos se tornam menores porque correspondem a quedas pequenas.

Para avaliar o processamento utilizado como indicador de formação de desgaste de entalhe, é preciso considerar os erros e os acertos, o que será apresentado em seguida.

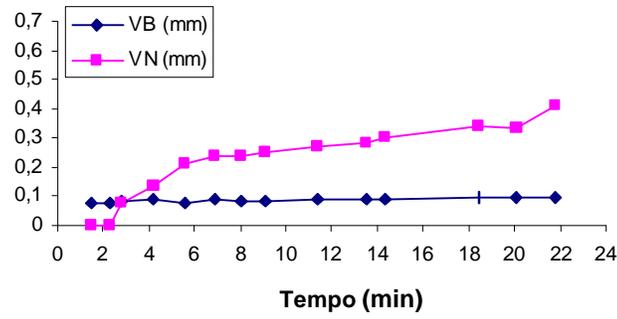
Em muitos casos, os picos negativos nos gráficos plotados com os resultados do processamento das medidas de força corresponderam ao aumento do desgaste de entalhe.

No gráfico da Fig. (1 d)), correspondente ao teste U1, três dos seis picos observados aparentaram estar relacionados com o aumento do entalhe. Eles ocorreram em 5,7 min, 12,57 min e 15,43min. Por outro lado, esperava-se que houvessem picos entre 2 e 4 min, quando ocorreu um considerável aumento do desgaste de entalhe e nenhum pico foi observado.

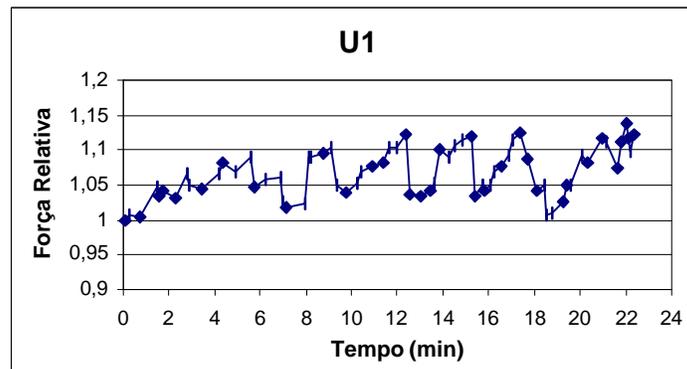
No gráfico da Fig. (2 d)), correspondente ao teste U2, foram observados quatro picos. Dois deles, em 6.85 min e 17,5 min, poderiam ser associados ao aumento do entalhe. Durante este teste, o desaste de entalhe progrediu de forma aproximadamente constante.

No gráfico da Fig. (3(d)), correspondente ao teste U3, foram observados também quatro picos negativos, sendo que os localizados em 1,27 min e 14,31 min poderiam estar associados ao aumento do entalhe. Observando-se o gráfico do desgaste, Fig. (3 a)), nota-se uma aumento do entalhe entre 10,4 e 12,7 min, mas nenhum pico foi observado na Fig. (3 d)) neste intervalo.

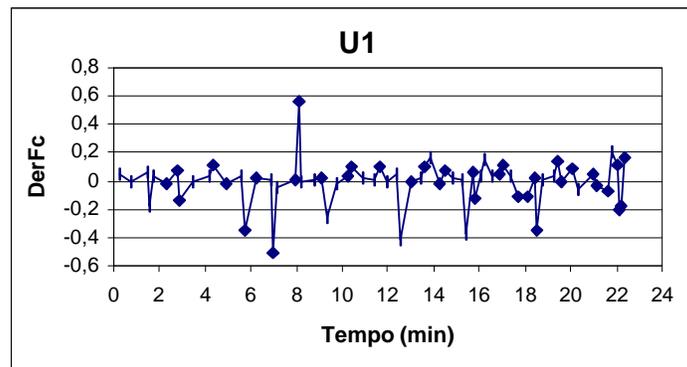
No gráfico da Fig. (4 d)), correspondente ao teste U4, foram observados cinco picos negativos, sendo que apenas o pico localizado em 12,71min poderia estar associado a um aumento do entalhe. Neste teste, o desgaste de entalhe permaneceu quase constante entre 2min e 12 min, praticamente no final do mesmo.



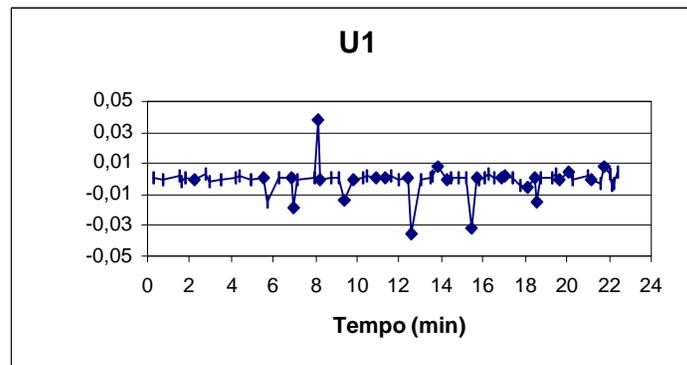
(a)



(b)

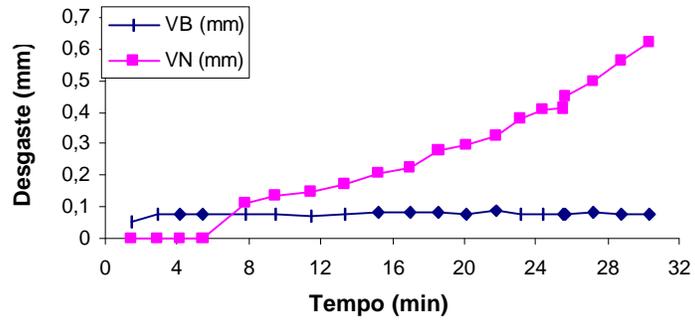


(c)

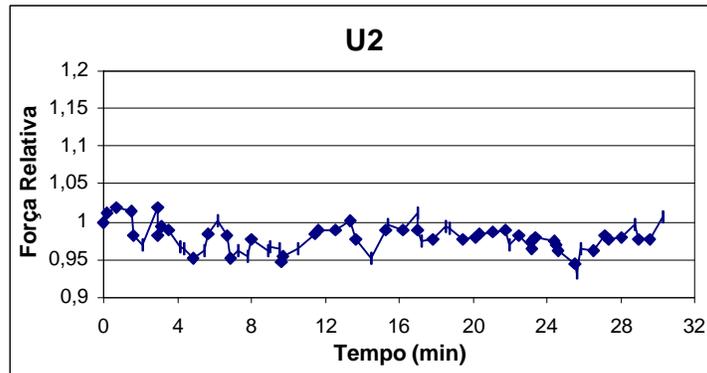


(d)

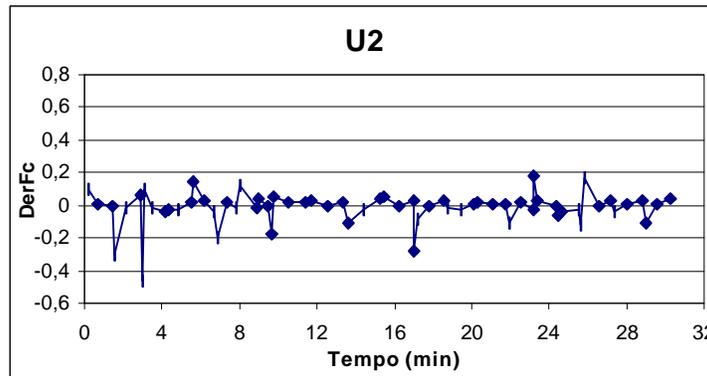
Figura 1. Gráficos: a) Desgaste x tempo; b) Força relativa x tempo; c) Derivada da força de corte x tempo e d) Derivada da força de corte intensificada x tempo; para os dados do teste U1.



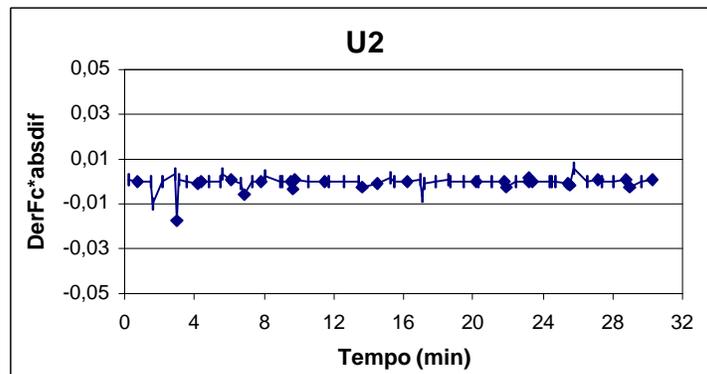
(a)



(b)

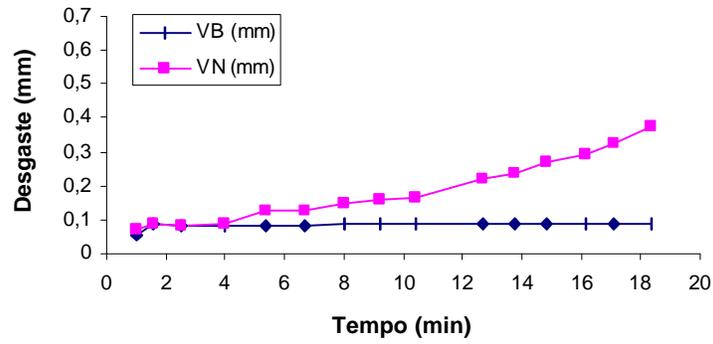


(c)

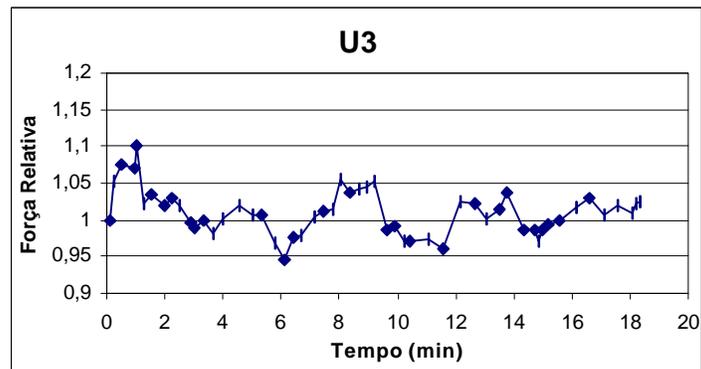


(d)

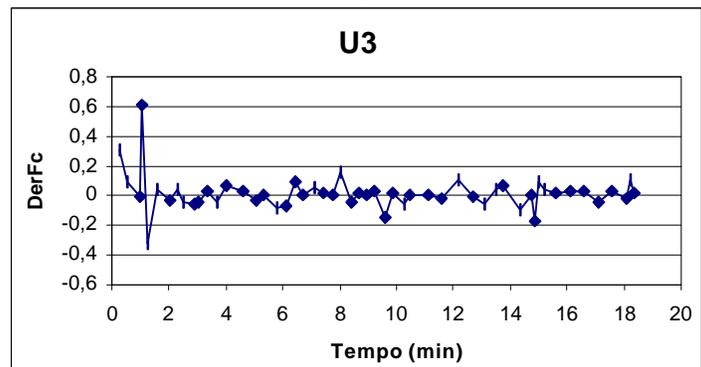
Figura 2. Gráficos: a) Desgaste x tempo; b) Força relativa x tempo; c) Derivada da força de corte x tempo e d) Derivada da força de corte intensificada x tempo; para os dados do teste U2.



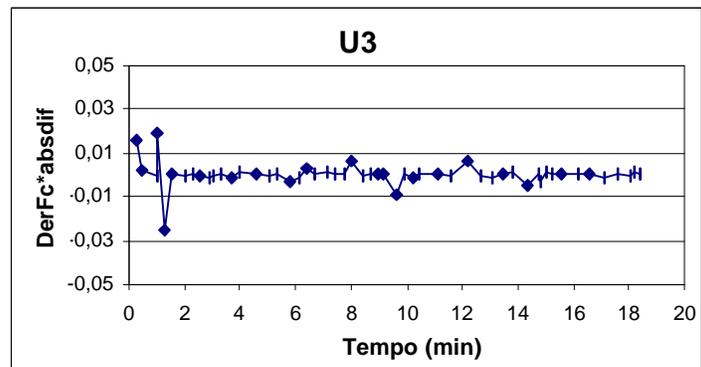
(a)



(b)

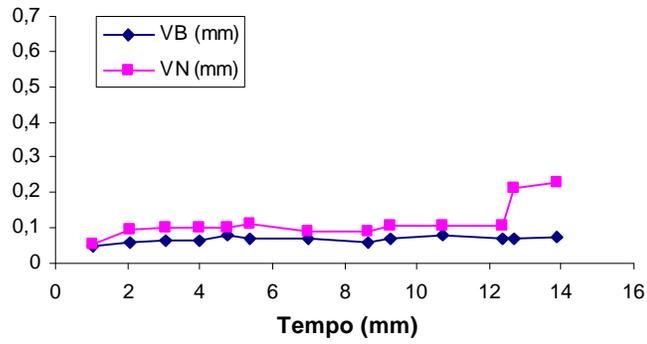


(c)

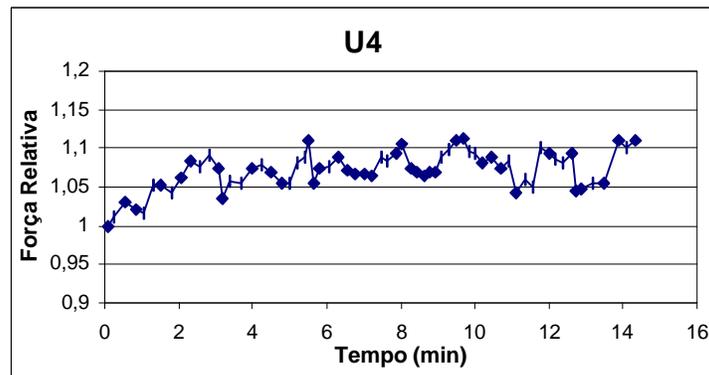


(d)

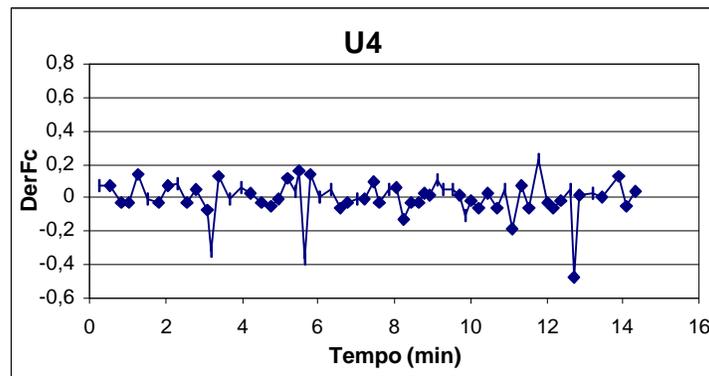
Figura 3. Gráficos: a) Desgaste x tempo; b) Força relativa x tempo; c) Derivada da força de corte x tempo e d) Derivada da força de corte intensificada x tempo; para os dados do teste U3.



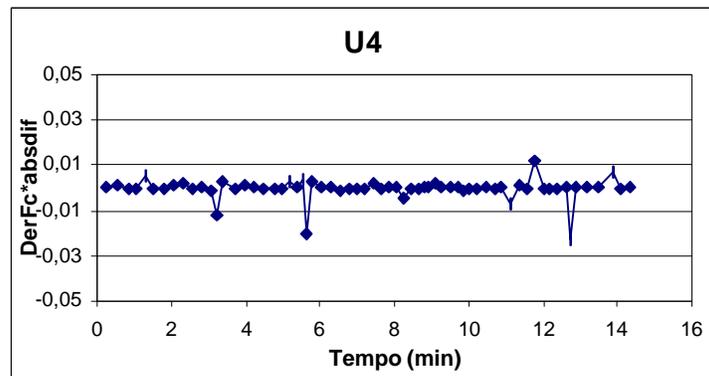
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4. Gráficos: a) Desgaste x tempo; b) Força relativa x tempo; c) Derivada da força de corte x tempo e d) Derivada da força de corte intensificada x tempo; para os dados do teste U4.

O processamento efetuado produziu três tipos de resultados:

- **Existência de pico negativo e observação de aumento do entalhe** - Detecção correta do mecanismo intermitente de desgaste de entalhe.
- **Existência de pico negativo e sem observação de aumento do entalhe (falso positivo)** - Em alguns casos não foi observada correspondência entre os picos nos gráficos dos resultados do processamento (gráficos letra (d) das figuras) e o aumento do entalhe, como no teste U4. Neste caso, apesar de picos terem sido observados entre 2 e 12 minutos do teste, praticamente não houve alteração do tamanho do entalhe neste intervalo. Algumas possíveis razões para este resultado são:
  - a) Quebra ou arrancamento do metal aderido na superfície da ferramenta sem que houvesse um correspondente aumento do entalhe.
  - b) Quebra ou arrancamento do metal aderido na superfície da ferramenta seguido de adesão de metal na ferramenta, o que impediria uma medida precisa do tamanho do entalhe.
- **Não existência de pico negativo e observação de aumento do entalhe (falso negativo)** - Nos gráficos das Fig. (2 a)) e (3 a)), referentes aos testes U2 e U3 respectivamente, observa-se uma progressão do desgaste de entalhe quase contínua ao longo dos testes, sem que haja muitos picos nos gráficos dos pontos processados, Fig. (2 d)) e (3 d)). . Algumas possíveis razões para este resultado são:
  - a) desgaste de entalhe progrediu devido a predominância de um outro mecanismo que produziu uma ação contínua.
  - b) Pequenas fraturas da ferramenta que não foram detectadas pelas medidas de força, quer seja pelo intervalo de aquisição, quer seja por ter se adotado um valor médio da força de corte.
  - c) Queda pouco brusca no valor da medida de força, ou seja, a existência de pontos intermediários entre o pico e o vale de uma região do gráfico de força, como entre 13,38 e 14,45 min, e 24,4 e 25,6 min no gráfico da Fig. (2 b)), referente ao teste U2. Estes pontos intermediários suavizam o gráfico da força, e por isso o processamento gera pequenos picos correspondentes a cada um destes pontos e não um pico grande proporcional à variação total de força nesta fase do teste.

Em todos os experimentos foram observadas oito detecções corretas, duas regiões de falso negativo e cinco casos de falso positivo.

Os resultados desta pesquisa não apresentaram uma correlação entre a amplitude do pico e a severidade do aumento do entalhe.

## 5. CONCLUSÕES.

O desgaste de entalhe tende a causar queda brusca da força de corte. Esta variação foi revelada pelo picos negativos produzidos pelo processamento utilizado.

O nível de correspondência entre os picos negativos e o desgaste de entalhe justifica tentar usá-los como detector do mecanismo intermitente do desgaste de entalhe. Os resultados sugerem que o uso de um limiar convenientemente escolhido poderia ser usado para detectar on-line estas ocorrências.

Para aperfeiçoar este método, seria necessário realizar novos testes de desgaste de ferramenta com a finalidade de minimizar as detecções incorretas, de permitir o estudo dos mecanismos que causam o desgaste de forma descontínua e aprofundar a investigação sobre suas influências nas medidas de força.

Esta metodologia aparenta ser útil também para detectar se o regime de progresso do desgaste é contínuo ou descontínuo, e com esta informação, possibilitar ao sistema de monitoração aplicar a melhor técnica para avaliar o estado da ferramenta durante a usinagem.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq pelo apoio que viabilizou os testes de desgaste de ferramenta, cujos resultados foram utilizados neste trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS

- Canabrava Filho, J.S, 2000, “Tool Wear Monitoring for Practical Conditions”, Ph.D. Thesis University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST), U.K..
- Canabrava Filho, J.S. and Barrow, G., 2001, “Difficulties in tool wear monitoring in turning of soft steels”, 16<sup>th</sup> Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Uberlândia, Minas Gerais, Brazil.
- Chandraskaran, H. and Johansson, J. O., 1994, “Chip Flow and Notch Wear Mechanisms during the Machining of High Austenitic Stainless Steel”; Annals of CIRP vol 43/1.
- Lo Casto, S.; Lo Valvo, E.; Lucchini, E.; Maschio S. and Ruisi, V.F., 1997, “Wear Rates and Wear Mechanisms of Alumina-Based Tools Cutting Steel at Low Cutting Speed”, Wear 208 67-72.
- Nakayama, K. and Arai, M., 1987; “Burr Formation in Metal Cutting”, Annals of the CIRP vol 36/1.
- Nalwa, V.S., 1993, “A Guided Tour of Computer Vision”, Cap.3: “Edge Detection and Image Segmentation”, Addison-Wesley Publishing Company.
- Youn, J. W., Yang, M. Y. e Park, H.Y., 1994, “Detection of Cutting Tool Fracture by Dual Signal Measurements”, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol 34, No. 4, pp 507-525, Elsevier Science Ltd.,U.K..

## 8. DIREITOS AUTORAIS

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

### DETECTION OF DISCONTINUOUS PROGRESSION OF NOTCH WEAR ON TOOLS BY TURNING MONITORATION

**José Stockler Canabrava Filho.\***

stockler@serv.com.ufrj.br

**Sérgio Exel Gonçalves \***

exel@serv.com.ufrj.br

\* Lab. de Tecnologia Mecânica (LTM) - Dep. Eng. Mecânica - Escola Politécnica / UFRJ

Caixa Postal: 68.503 – Rio de Janeiro – Brasil – CEP: 21.945 - 970

***Summary.** Notch wear of tools can occur during the turning of low carbon steels, stainless steels and inconel and nickel alloys. In these cases the notch wear formation takes place in a discontinuous form due to the adhesion of machined material to the tool followed by its removal by the chip border. The values of force components taken during tool life tests with these materials are discontinuous which makes it difficult to correlate it with the length of the notch for different stages of the test. Monitoring techniques have unsuccessfully been used both to identify this mechanism of wear as well to quantify the length of notch wear during tool life tests. The aim of this work is to present the results from experiments with signal processing techniques used to identify the discontinuous notch wear formation from measurements of cutting force. The monitoring techniques used clearly show the changes in the cutting force graphs when notch wear occurs.*

**Key words:** Tool wear monitoring, tool monitoring, notch wear, tool wear, machining monitoring.