

# UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O ENTENDIMENTO DA FORMAÇÃO DO CAVACO NO TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO NODULAR FERRÍTICO

Eliene Oliveira Lucas. [elienelucas@yahoo.com.br](mailto:elienelucas@yahoo.com.br)

Walter Lindolfo Weingaertner. [wlw@emc.ufsc.br](mailto:wlw@emc.ufsc.br)

Laboratório de Mecânica de Precisão LMP/EMC – Universidade Federal de Santa Catarina  
Florianópolis – Santa Catarina - Brasil

**Resumo:** *Uma das características intrínsecas do processo de usinagem é a solicitação à qual o material é submetido. A formação do cavaco envolve uma grande velocidade de deformação plástica, da ordem de  $10^4$  a  $10^6/s$ , com variações locais tão elevadas quanto  $10^7/s$  e grandes deformações ( $\epsilon > 2$ ), dentro de um brevíssimo intervalo de tempo, resultando num considerável encruamento, além de possíveis transformações microestruturais. Para fins comparativos nos ensaios de tração estática, a velocidade de deformação é da ordem de  $0,01/s$  e nos ensaios de impacto dentro da variação de  $10^2$  a  $10^3/s$ . Tais considerações dificultam estabelecer correlações entre as características do material, através de dados obtidos em ensaios convencionais, com as condições reais de deformação que o material apresenta na usinagem com formação de cavaco. Observações e análises das raízes de cavaco, obtidas pela interrupção súbita do corte, possibilitam investigar as condições de deformação nas interfaces. Embora, com o emprego deste método ocorra perda de informações da dinâmica da formação do cavaco, é possível obter detalhes importantes relativos à estrutura do material deformado. A partir do método da interrupção súbita do corte foram obtidas raízes de cavaco e investigada a formação do cavaco no torneamento do ferro fundido nodular ferrítico. Os resultados revelaram a formação do gume postiço para velocidades de corte de 20 e 40 m/min e avanços 0,2 e 0,3 mm. Na velocidade de corte de 80 m/min não é mais verificada a presença de gume postiço, no entanto a zona de fluxo não foi facilmente delineada na interface.*

**Palavras-chave:** *Formação do cavaco, Raízes de cavaco, Dispositivo de parada rápida, Ferro fundido nodular ferrítico, Interrupção súbita do corte.*

## 1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de fabricação amplamente praticado e difundido nas indústrias de manufatura de peças, e é indicado quando se tem por objetivo a obtenção de formas e geometrias complexas, dimensões dentro de tolerâncias estreitas e acabamento superficial em conformidade com a aplicação do componente.<sup>[1]</sup>

O maior consumo de energia na usinagem ocorre nas regiões de deformação, assim sendo, os problemas práticos e econômicos relativos ao processo como, por exemplo, taxa de remoção, formação do gume postiço, desgaste da ferramenta de corte, acabamento superficial, quebra do cavaco, vibrações, comportamento da força de usinagem e temperaturas são diretamente relacionados à formação do cavaco. Deste modo, a busca de soluções para estes problemas requer a compreensão do comportamento de fratura do material quando sujeito à elevada quantidade de deformação plástica, como este volume deformado se transforma em cavaco e por sua vez se movimenta sobre a face da ferramenta de corte.<sup>[2]</sup>

A dificuldade no estabelecimento de técnicas experimentais, que auxiliem nas observações e análises das deformações, deve-se em grande parte à complexidade do processo de formação do cavaco. Trata-se de um processo contínuo, ao qual, em condições normais, apresenta dificuldades de acesso visual à interface.<sup>[2]</sup>

A visualização do processo de formação do cavaco pode ser feita com o auxílio câmeras de alta velocidade. No entanto, este método, além de apresentar um custo relativamente elevado, só possibilita observar as condições de deformação na região externa do cavaco. Além disto, leva a erros de interpretação caso tais fenômenos sejam correlacionados às condições de deformações que ocorrem no centro do cavaco.<sup>[2]</sup>

Neste trabalho foi investigada a formação do cavaco, a partir de observações e análises de fotografias das raízes de cavaco, obtidas pela interrupção súbita do processo de torneamento do ferro fundido nodular ferrítico.

Os ferros fundidos nodulares consistem de uma família de ferros, em que o carbono se encontra na forma de grafita e esta por sua vez possui morfologia esferoidal (nodular). A grande versatilidade, em termos de propriedades mecânicas, atribuídas à morfologia da grafita e às diferentes matrizes metálicas, faz dos ferros fundidos nodulares potenciais concorrentes aos ferros fundidos maleáveis e cinzentos na fabricação de peças. Exemplos típicos de aplicação de ferros nodulares estão na fabricação de componentes automotivos: virabrequim, cubos de rodas, peças que compõem o sistema de suspensão, válvulas de segurança etc.<sup>[3]</sup>

Para a interrupção súbita do corte são empregados dispositivos, denominados Dispositivos de parada rápida (*Quick-Stop Device's*), que utilizam como fonte externa de energia: ar comprimido, explosivos ou o impacto de um martelo de forma a remover a ferramenta da região de corte (a partir do ponto de contato com a peça) com uma grande aceleração. Foi utilizado um modelo simplificado e de fácil operação, sendo utilizada a energia armazenada por uma mola de compressão para acelerar um punção contra o suporte (articulado) da ferramenta de corte. A ferramenta é então removida rapidamente da região de contato, mediante a ruptura de um pino de cisalhamento. Após a interrupção do corte, a raiz do cavaco permanece aderida à peça sendo removida posteriormente com auxílio de uma serra.<sup>[1]</sup>

## 2. FUNDAMENTOS

### 2.1 Generalidades

Os primeiros estudos na tentativa de explicar o mecanismo da formação do cavaco, realizados no fim do século XIX, consideravam que a formação do cavaco ocorria pela fratura do material à frente do gume ferramenta de corte. No entanto, esta suposição foi prontamente substituída pela teoria do “plano de cisalhamento”.<sup>[4]</sup>

Importantes resultados de pesquisas foram publicados por Piispanen<sup>[4]</sup> e são até os dias atuais considerados a primeira análise detalhada do mecanismo de formação do cavaco. Foi analisada qualitativamente a deformação do material no corte ortogonal e proposto um modelo no qual a deformação do material ocorria pelo cisalhamento (simples) ao longo de planos sucessivos inclinados em relação à direção de corte, conforme mostra de forma esquemática a figura 1.

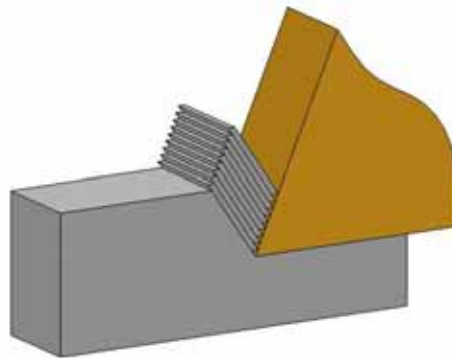


Figura 1. Modelo da formação do cavaco proposto por Piispanen<sup>[4]</sup>

Uma série de modelos de formação de cavaco têm sido propostos de forma a descrever o mecanismo da formação do cavaco. No entanto, é de consenso que tais modelos se tratam de aproximações das condições reais que ocorrem nas interfaces. Entretanto, tais análises teóricas em conjunto com observações das regiões de deformação, a partir de análises de raízes de cavaco, contribuem para o entendimento do mecanismo da formação do cavaco.<sup>[4]</sup>

Na análise das tensões e deformações na usinagem é admitido um modelo simplificado de formação do cavaco, conforme mostra a figura 2.

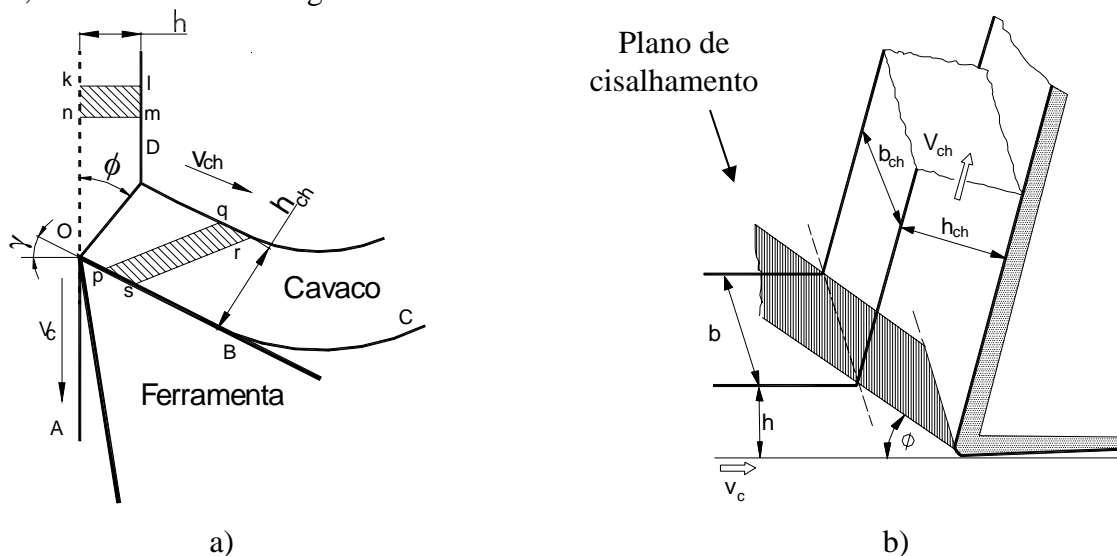


Figura 2. Diagrama simplificado da seção de corte<sup>[2, 5]</sup>

Neste modelo, a seção transversal do cavaco é perfeitamente retangular, onde a largura de usinagem (b) é proporcional à profundidade de corte ( $a_p$ ), e o avanço (f) é proporcional à espessura de usinagem (h).<sup>[2]</sup>

## 2.2 Mecanismo da Formação do Cavaco

Em geral considera-se que na formação do cavaco, em condições normais de usinagem com ferramentas de metal-duro, aço-rápido ou cerâmica, são observadas as seguintes etapas:

a) Devida à ação mecânica da ferramenta de corte contra a peça, uma pequena quantidade de material (ainda solidária à peça) é recalçada contra a face da ferramenta de corte.<sup>[6]</sup>

b) O material recalçado sofre deformação plástica, e esta aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente elevadas, de modo a se iniciar um deslizamento (sem que haja perda de coesão) entre a porção de material recalçado e a peça. Este deslizamento se realiza segundo planos de cisalhamento dos cristais da porção de material recalçada. Durante a usinagem, estes planos irão definir uma certa região de deformação entre a peça e o cavaco, chamada região primária de cisalhamento. De forma a facilitar a compreensão esta região é considerada um plano, denominado “plano de cisalhamento”, conforme mostra de forma esquemática a figura 2b. No entanto, vale ressaltar que não se trata “exatamente” de um plano e sim de um volume finito e localizado de material deformado.<sup>[6]</sup>

c) Continuando a penetração da ferramenta em relação à peça, ocorrerá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo da ductilidade do material e das condições de usinagem.

d) Prosseguindo, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção do material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a face da ferramenta. Enquanto tal etapa ocorre, uma nova porção de material (imediatamente adjacente à porção anterior) está se formando e cisalhando. Uma vez formado, o cavaco então se movimenta numa velocidade de saída ( $v_{ch}$ ) em relação à face da ferramenta de corte, estabelecendo por sua vez um comprimento natural de contato (segmento OB figura 2a) com a ferramenta.<sup>[6]</sup>

Camadas relativamente finas de material da peça são continuamente deformadas, mediante a ação mecânica da ferramenta de corte, e transformadas em cavaco. De tal modo conclui-se que a formação do cavaco, nas condições normais de trabalho é um fenômeno periódico. Tem-se alternadamente uma etapa de recalque e uma etapa de deslizamento, para cada porção de material removido.<sup>(2, 4)</sup>

A quantidade de deformação que ocorre na região primária é raramente menor que 2 para espessuras de cavaco relativamente pequenas (fator de recalque  $R_c = 1,5$ ), podendo alcançar valor igual ou superior a 5 a medida que aumenta o fator de recalque. A deformação plástica ocorre tanto na região primária de deformação (segmento OD na figura 2a) quanto na interface formada entre cavaco e a ferramenta de corte, também chamada região secundária de deformação.<sup>[2]</sup>

Embora a quantidade de deformação seja relativamente elevada, a fratura do material é influenciada pela tensão compressiva que atua no plano de cisalhamento. O aumento nesta tensão é associado à ação de forças de resistência à movimentação do cavaco sobre a face da ferramenta de corte, a partir do gume.<sup>[2]</sup>

Uma grande quantidade de energia é consumida nas regiões de deformação e a maior parcela desta energia é transformada em calor. A quantidade de deformação que ocorre na camada de material adjacente à face da ferramenta é consideravelmente elevada se comparada à que ocorre na região primária de deformação, e desta forma temperaturas ainda mais elevadas são esperadas.<sup>[2]</sup>

Como resultado da energia gerada pela deformação, as regiões bem próximas ao gume da ferramenta de corte são extremamente aquecidas. As temperaturas alcançadas, a distribuição destas temperaturas, em combinações com as tensões atuantes interface, determinam em grande parte a taxa de remoção de material bem como as propriedades requeridas aos materiais de ferramentas de corte.<sup>[2]</sup>

O tratamento dado inicial dado à interface cavaco-ferramenta foi baseado no conceito clássico de atrito de escorregamento. No entanto, estas considerações não são adequadas às condições reais de atrito dominantes na interface. Em condições extremas de temperaturas e pressões, reações químicas e físicas podem ocorrer na interface. Além disto às condições dominantes na interface são inteiramente dependentes das tensões atuantes, das velocidades alcançadas, das temperaturas desenvolvidas, da presença ou não de lubrificantes, das propriedades dos materiais da peça e da ferramenta.<sup>[2]</sup>

Estudos específicos das condições dominantes na interface cavaco-ferramenta é tema de pesquisas recentes e, deste modo, conclusões mais efetivas requerem análises e investigações mais detalhadas, bem como a utilização de equipamentos de medição mais avançados.<sup>[1]</sup>

A camada de material mais próxima à face da ferramenta de corte é intensamente deformada, como consequência do fenômeno de adesão. Sob condições de formação da adesão são observados dois modelos distintos de deformação na interface cavaco-ferramenta: gume postiço e zona de fluxo.<sup>[2]</sup>

Para velocidades de corte baixas e avanços pequenos, o mecanismo de deformação plástica dominante na interface é através do movimento de discordâncias e subsequente encruamento. A primeira camada de material que se adere à face da ferramenta é encruada e sua tensão de escoamento é elevada. Como a tensão de cisalhamento não é suficiente para romper a ligação com a ferramenta de corte, a deformação prossegue no metal localizado próximo ao gume da ferramenta de corte até que este se torne extremamente encruado. Através de um processo cíclico de deposição de camadas de material encruadas sobre a face da ferramenta, forma-se o gume postiço.<sup>[2]</sup>

Para velocidades de corte mais elevadas e avanços maiores o gume postiço não é mais observado na interface cavaco-ferramenta, dando lugar à formação de uma zona de fluxo. A zona de fluxo é uma instabilidade termoplástica e o comportamento do material dentro desta zona é uma das principais características da deformação do material em elevadas velocidades de corte. Na zona de fluxo uma grande variedade de metais e ligas se comportam como fluídos viscosos, e grandes deformações ocorrem dentro de tensão de escoamento constante e reduzida.<sup>[2]</sup>

### 3. MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS.

O material de peça utilizado foi o ferro fundido nodular ferrítico, classificado de acordo com as propriedades mecânicas, conforme norma DIN 1663, em GGG 42. O material foi fornecido na forma de barras de diâmetro  $\phi = 100$  mm e comprimento  $L = 500$  mm. Foram utilizados insertos de metal-duro revestidos *CCMW 09 T3 04* Sandvik, sendo a geometria final obtida na montagem:  $\alpha_o = 0^\circ$ ;  $\gamma_o = 7^\circ$ ;  $\lambda_o = 0^\circ$ ;  $\kappa_o = 95^\circ$  e  $r_e = 0,4$  mm.

Neste trabalho foi empregado o método da interrupção súbita do corte, caso particular do torneamento, conforme mostra de forma esquemática na figura 3.

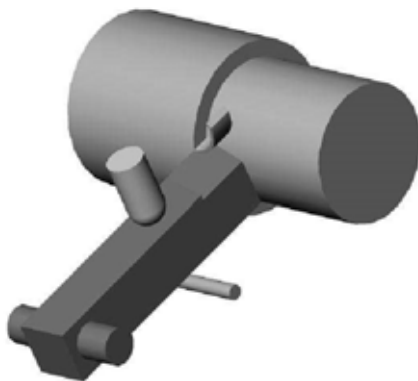


Figura 3. Esquema da interrupção súbita do corte no torneamento <sup>[1]</sup>

No método da interrupção súbita do corte a ferramenta é mantida na posição de trabalho apoiada sobre um pino de cisalhamento. Quando é necessária a interrupção é ativada uma fonte de energia externa que atua sobre uma massa de impacto que por sua vez atua direta ou indiretamente sobre a ferramenta. A massa de impacto promove a remoção rápida da ferramenta da região de corte mediante a ruptura do pino de cisalhamento. O movimento de rotação da ferramenta é feito por um pino articulado inserido na haste da ferramenta.<sup>[1]</sup>

Os corpos de prova foram previamente preparados (etapas de faceamento e desbaste externo longitudinal) de forma a uniformizar a superfície proveniente do processo de fundição.

Foram feitas ranhuras ao longo do comprimento do corpo de prova. Esta estratégia, além de facilitar a entrada da ferramenta de corte, possibilitou a obtenção de várias raízes de cavaco de forma consecutiva e eliminou o inconveniente de se remover o corpo de prova da máquina-ferramenta resultando em economia de tempo nos ensaios.

A remoção da raiz de cavaco da peça foi feita com o auxílio de uma serra manual e, em seguida, a superfície da mesma foi protegida com um esmalte de forma a evitar os efeitos da corrosão.

Foram inicialmente obtidas imagens das raízes de cavaco através de microscopia eletrônica de varredura e, em seguida, estas amostras foram submetidas a procedimentos de metalografia com intuito de se obter fotografias da seção longitudinal média da raiz do cavaco.

Os ensaios foram realizados num torno convencional ROMI I-45. Foram realizados três ensaios de interrupção, e empregados gumes novos, em cada condição de corte avaliada. Neste trabalho foi utilizado um dispositivo de parada rápida, sendo utilizada uma mola de compressão. Neste caso, a função da mola é armazenar energia que ao liberá-la deve promover o deslocamento de uma massa. A massa é acelerada, e na sua trajetória descendente colide contra a haste da ferramenta promovendo a ruptura do pino de cisalhamento localizado sob a haste da ferramenta. A energia deve ser suficiente para que a haste da ferramenta se afaste do ponto de contato com a peça com elevada aceleração. O esquema de montagem do conjunto no torno é mostrado na figura 4.

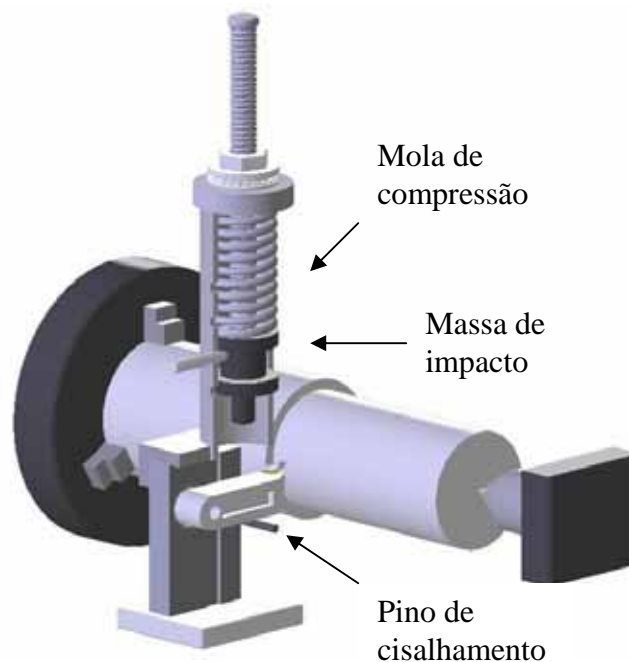
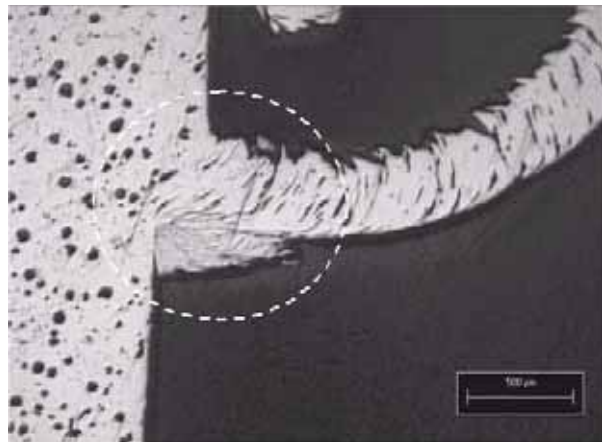


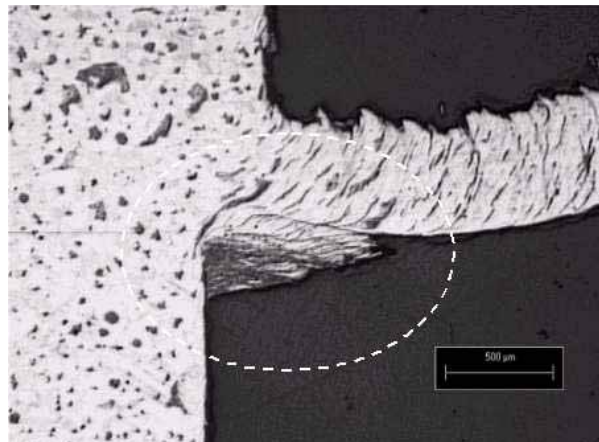
Figura 4. Esquema geral de montagem do dispositivo parada rápida <sup>[1]</sup>

#### 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

São apresentados os resultados para as velocidades de corte de 20, 40, 80 e 200 m/min. Para as velocidades de corte de 20 e 40 m/min e avanços 0,2 e 0,3 mm foi observada a presença de gume postiço na interface, conforme mostra a figura 5.

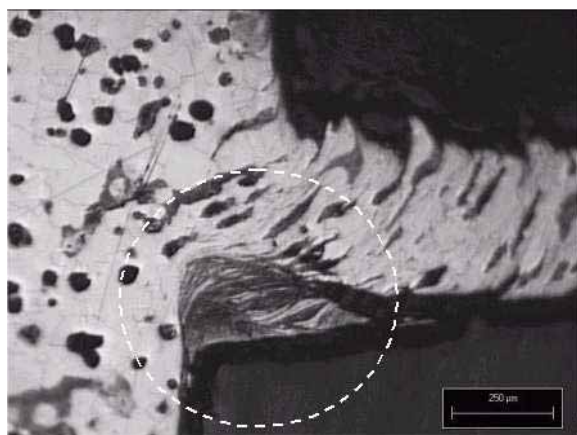


$v_c = 20 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,2 \text{ mm}$  e  $a_p = 2 \text{ mm}$

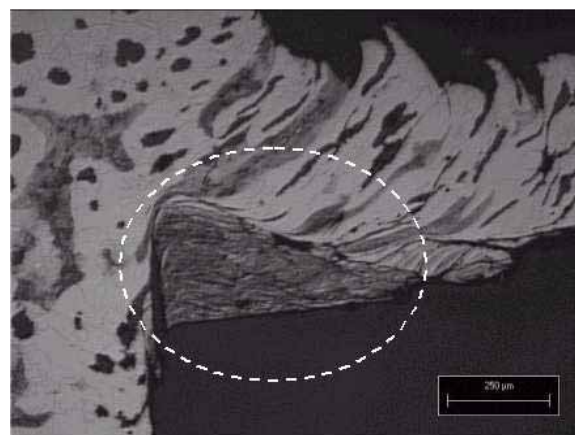


$v_c = 20 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,3 \text{ mm}$  e  $a_p = 2 \text{ mm}$

Figura 5. Seção transversal da raiz do cavaco revelando a presença do gume postiço na interface.



$v_c = 40 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,2 \text{ mm}$  e  $a_p = 2 \text{ mm}$



$v_c = 40 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,3 \text{ mm}$  e  $a_p = 2 \text{ mm}$

Figura 6. Seção da raiz do cavaco revelando a presença do gume postiço na interface.

Para velocidade de corte de 80 m/min não é mais observada a presença do gume postiço na interface, conforme mostra a figura 7.



Figura 7. Seção da raiz do cavaco do ferro fundido nodular ferrítico (condições de corte:  $v_c = 80$  m/min  $f = 0,2$  mm e  $a_p = 2$  mm)

A figura 8 mostra a seção transversal da raiz do cavaco para a velocidade de corte de 200 m/min.

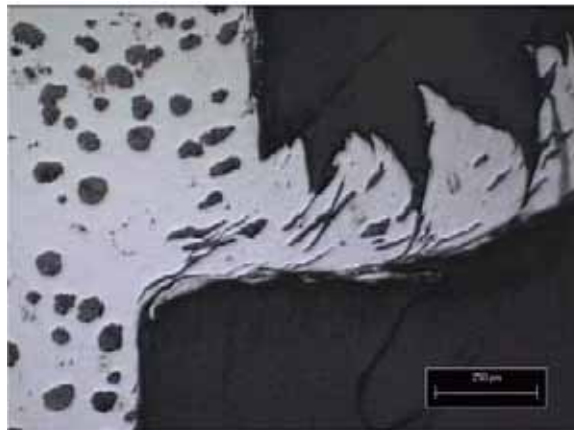


Figura 8. Seção da raiz do cavaco do ferro fundido nodular ferrítico ( $v_c = 200$  m/min  $f = 0,2$  mm e  $a_p = 2$  mm)

## 5. CONCLUSÕES

Observações das fotografias das seções das raízes de cavaco, obtidas para as velocidades de corte 20 m/min e 40 m/min e para avanços 0,2 e 0,3 mm, revelaram a presença do gume postiço na interface. Na prática a configuração do gume postiço varia em função da condição de corte empregada.

Uma verificação da distribuição da dureza no material deformado (do gume postiço) revelou valores de dureza na faixa de 400-440 HV contra 320-360 HV no cavaco e 200-240 HV no material da peça.

A extensão do gume postiço foi de aproximadamente 0,5 mm sobre a face da ferramenta de corte e atingiu uma altura máxima de 0,25 mm para a velocidade de corte de 40 m/min. Observações do material deformado no gume postiço revelaram uma estrutura (constituída de ferrita e grafita) severamente deformada e alongada no sentido da deformação.



Na interface, a presença de um gume postiço estável leva a uma “diminuição” do desgaste devido ao efeito de “proteção” da face e do gume da ferramenta pelo material do gume. No entanto, a formação do gume postiço é uma condição instável e dinâmica; desta forma quando ocorrem fraturas no material do gume postiço, parte dos fragmentos são expulsos tanto pela face da ferramenta como também pela interface gume-flanco e superfície de corte. A expulsão destas partículas, fortemente encruadas, resulta num desgaste acentuado, principalmente no flanco da ferramenta de corte.

Para velocidades de corte elevadas (80 e 200 m/min) o gume postiço não é mais observado na interface cavaco-ferramenta, dando lugar à formação de uma zona de fluxo. No entanto, a zona de fluxo não foi facilmente delineada nas amostras obtidas para o ferro fundido nodular ferrítico.

Investigações das condições de deformação das diferentes fases e constituintes do material da peça, feitas a partir de observações das fotografias das seções das raízes de cavaco, mostraram a ocorrência de grande quantidade de deformação plástica no material. As grafitas se apresentaram fortemente alongadas com orientação paralela às regiões de deformação. Pela observação da superfície de corte no cavaco foi verificada a grande quantidade de deformação plástica suportada pela matriz (ferrítica).

O dispositivo de parada rápida (*Quick-Stop Device*) desenvolvido apresentou características de fácil operação e boa repetibilidade. O sistema de acionamento empregado, com uso de uma mola de compressão, favoreceu a obtenção de amostras de raízes de cavaco com boa repetibilidade para velocidades de corte de 20 a 250 m/min.

## 6. AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Eng. Álisson Rocha Machado, do Laboratório de Pesquisas em Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pelas sugestões.

Ao professor Dr-Ing. Håbil Gunter Höhne e a equipe do Werkstoffe 1 por viabilizarem a execução de experimentos (aquisição de imagens) na Universidade Técnica de Ilmenau -TU-Ilmenau/Alemanha.

Às empresas parceiras SANDVIK, FUNDIÇÃO TUPY, WEG e ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina pelo fornecimento de ferramentas de corte, material de ensaio, manutenção da infra-estrutura necessários ao desenvolvimento do trabalho.

Ao DAAD e ao CNPq pelo pela concessão das bolsas.

## 7. REFERÊNCIAS

- 1 LUCAS, E. **O Desenvolvimento de dispositivo Quick-Stop e sua aplicação no estudo da formação do cavaco na usinagem do ferro fundido nodular ferrítico**. 2003. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- 2 KONIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Boreen**. Berlin: VDI-Verlag, 1997. 471 p.
- 3 METALLURGY and properties of ductile Irons. In: Davis, J. R. (Ed.). **ASM specialty Handbook: Cast irons**. USA: ASM International, set. 1996. p.54-79.
- 4 SHAW, M.C. **Metal Cutting Principles**. 1 ed. New York: Oxford University Press, 1984. 594 p.
- 5 TÖNSHOFF, H. K. **Spanen**. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 89 p.
- 6 FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 5 ed. São Paulo: Blücher, 1969. 751 p.

## A CONTRIBUTION FOR STUDY OF THE CHIP FORMATION IN TURNING OF THE CAST IRON NODULAR FERRITIC

Eliene Oliveira Lucas. [elienelucas@yahoo.com.br](mailto:elienelucas@yahoo.com.br)

Walter Lindolfo Weingaertner. [wlw@emc.ufsc.br](mailto:wlw@emc.ufsc.br)

Precision Mechanical Laboratory LMP/EMC – Federal University of Santa Catarina  
Florianópolis – Santa Catarina - Brasil

**Abstract:** One of the intrinsic characteristics of the machining process is related to strength in which the material is submitted. The chip formation involves a great strain rate; in order of  $10^4$  to  $10^6/s$ , with local variations so high as  $10^7/s$  and great plastic deformations ( $\epsilon > 2$ ), in a short time interval, that results in a considerable strain hardening and microstructural transformation. In static tension tests the strain rate is around of 0,01/s and in the impact tests around of  $10^2$  to  $10^3/s$ . These implications difficult to establish correlations between the characteristics of the material, in conventional tests, with the real plastic deformation conditions that the material is submitted in machining with chip formation. Analyses of the chip roots, obtained by suddenly interruption of the cutting process (Quick-Stop Tests), make possible to investigate the conditions of deformation in the interfaces. Although, with this technique application, information of the chip formation dynamic's could be lost with this technique application, it is possible to get relative important details from structure of the strained material. By the suddenly interruption, the chip formation in turning semi-orthogonal of the cast iron nodular ferritic was investigated. The results showed the formation of the build-up edge in cutting speeds from 20 to 40 m/min and feed rates from 0,2 and 0,3 mm. In the speed cutting of 80 m/min was not observed the occurrence of build-up edge, however the flow zone was not easily delineated in the interface.

**Keywords:** *Chip formation, Chips roots, Quick-Stop Device, Cast iron ferritic nodular, Quick-stop tests*