



## **ESTUDO DA GEOMETRIA DO CAVACO NO CORTE COM DISCOS ABRASIVOS**

**Eduardo Carlos Bianchi,**

**Eraldo Jannone Da Silva**

**Luiz Dare Neto**

**Odilson Coimbra Fernandes**

**Ivan De Domenico Valarelli**

Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica

Cx. P. 473 - 17033-360 - Bauru, SP, Brasil

***Resumo.** Este trabalho apresenta um estudo sobre a geometria do cavaco gerado no processo de corte com discos abrasivos submetidos a diversas condições de corte, em operações do tipo “cut-off” por meio de mergulho basculante. Verificou-se que as condições de corte e o tipo de material cortado afetam diretamente a geometria do cavaco.*

***Palavras-chave:** Operação Cut-off, Condições de corte, Geometria do cavaco*

### **1. INTRODUÇÃO**

De acordo com Paulino et al. (1997), o desenvolvimento da indústria mecânica e a exigência de maior produtividade levaram à utilização de máquinas operatrizes mais rígidas e comandadas numericamente. Com o aperfeiçoamento das máquinas operatrizes e dos materiais das ferramentas de corte, aumentou-se a produtividade dos processos de fabricação por arrancamento de cavaco.

No corte com discos abrasivos, normalmente, são utilizadas velocidades de corte acima de 80 m/s, que pode provocar acidentes com o operador, poluição sonora (ruído), poluição do ar (toxicologia), queima da peça, desgaste do disco pela ação das elevadas temperaturas, comprometimento térmico da peça, dentre outros. A geometria dos cavacos arrancados está relacionada com as condições de corte, material a ser cortado, tipo de disco abrasivo, área de contato entre o disco e a peça, velocidade de corte, velocidade de penetração do disco na peça, diâmetro do disco, fluido de corte (no caso de corte metalográfico), rigidez da máquina de corte etc.

Jawahir e Luttermvet (1993), apud Paulino et al. (1997), realizaram um estudo sobre o controle do cavaco em ferramentas de corte com geometria definida, fazendo a sua divisão histórica. No caso do corte de peças com discos abrasivos existe pouca literatura disponível, mesmo sendo o estudo da geometria de cavaco subsídio para o estudo do processo de corte e projeto de máquinas.

Segundo Snee (1991) e Farago (1980), o corte de materiais por disco abrasivo ou “cut-off” é um dos processos que apresenta as melhores características de economia, eficiência e

rapidez, e ainda hoje é muito utilizado no meio industrial, se comparado a outros processos de corte de materiais, tais como corte por serra, oxi-corte etc.

De acordo com um relatório publicado em 1997, pelo Sindicato da Indústria de Abrasivos do Estado de São Paulo (SINAESP), o movimento geral das estatísticas deste setor em 1996 mostra que a quantidade (em massa) de discos abrasivos e de desbaste vendida no mercado nacional e exportado correspondeu a 42,5% e 30,8%, respectivamente.

Trata-se, portanto, de uma ferramenta abrasiva de corte que é produzida e utilizada em grandes quantidades. Entretanto, há carência de pesquisas científicas nas instituições nacionais abordando este assunto, que poderiam fornecer informações tecnológicas para a utilização dos discos abrasivos de forma mais adequada.

Discos abrasivos convencionais são produzidos com ligante resinóide, cujo processo de fabricação consiste em compactar os grãos abrasivos e uma resina fenólica com enchimentos e em seguida processar a cura.

O desgaste do ligante resinóide varia muito com as condições de usinagem. Isto provoca alterações na topografia do disco durante processo de corte, pelo desprendimento dos grãos abrasivos devido a geometria do cavaco arrancado.

O comportamento da operação de corte com discos abrasivos dependente do material a ser cortado, do tipo de disco abrasivo utilizado, da habilidade e sensibilidade do operador e das condições de corte que são empregadas. Deve-se ressaltar que normalmente o corte é feito manualmente; assim, um operador experiente pode controlar os esforços de corte a fim de proporcionar uma geometria de cavaco mais adequada, a uma determinada operação, com melhoria no desempenho do disco.

Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo sobre a geometria dos cavacos arrancados no processo de corte com discos abrasivos, em operações do tipo “cut-off” por meio de mergulho basculante, submetidos a diversas condições de corte não refrigerado cortando materiais dúcteis (ABNT 1020) e frágeis (ABNT 1045).

## **2. INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE PENETRAÇÃO ( $\eta$ ) DO GRÃO ABRASIVO NA PEÇA**

O ângulo com que os grãos abrasivos penetram na peça ( $\eta$ ), varia com a velocidade de mergulho  $V_f$  e com a velocidade de corte do disco abrasivo  $V_s$ , segundo a equação:

$$\text{tg } \eta = \frac{V_f}{V_s} \quad (1)$$

A variação deste ângulo modifica a densidade de grãos abrasivos ativos na região de contato. Seu aumento faz com que ocorra a elevação da densidade de grãos abrasivos para remoção de material. Assim, mais grãos abrasivos removem material. Isto pode ser analisado, no caso do corte com discos abrasivos, das seguintes formas:

1) Quando a velocidade de corte é constante e a velocidade de mergulho variável. Neste caso, o aumento do ângulo  $\eta$  é causado somente pela elevação da velocidade de mergulho, conforme pode ser observado na Fig. 1.

Pode-se notar que a densidade de grãos abrasivos aumenta com a elevação da velocidade de mergulho e decresce com a perda diametral do disco abrasivo (devido à diminuição do perímetro do disco abrasivo). Com a progressiva perda diametral, os cavacos arrancados tem suas espessuras aumentadas constantemente, pelo fato de que menos grãos removem cavacos mais espessos.

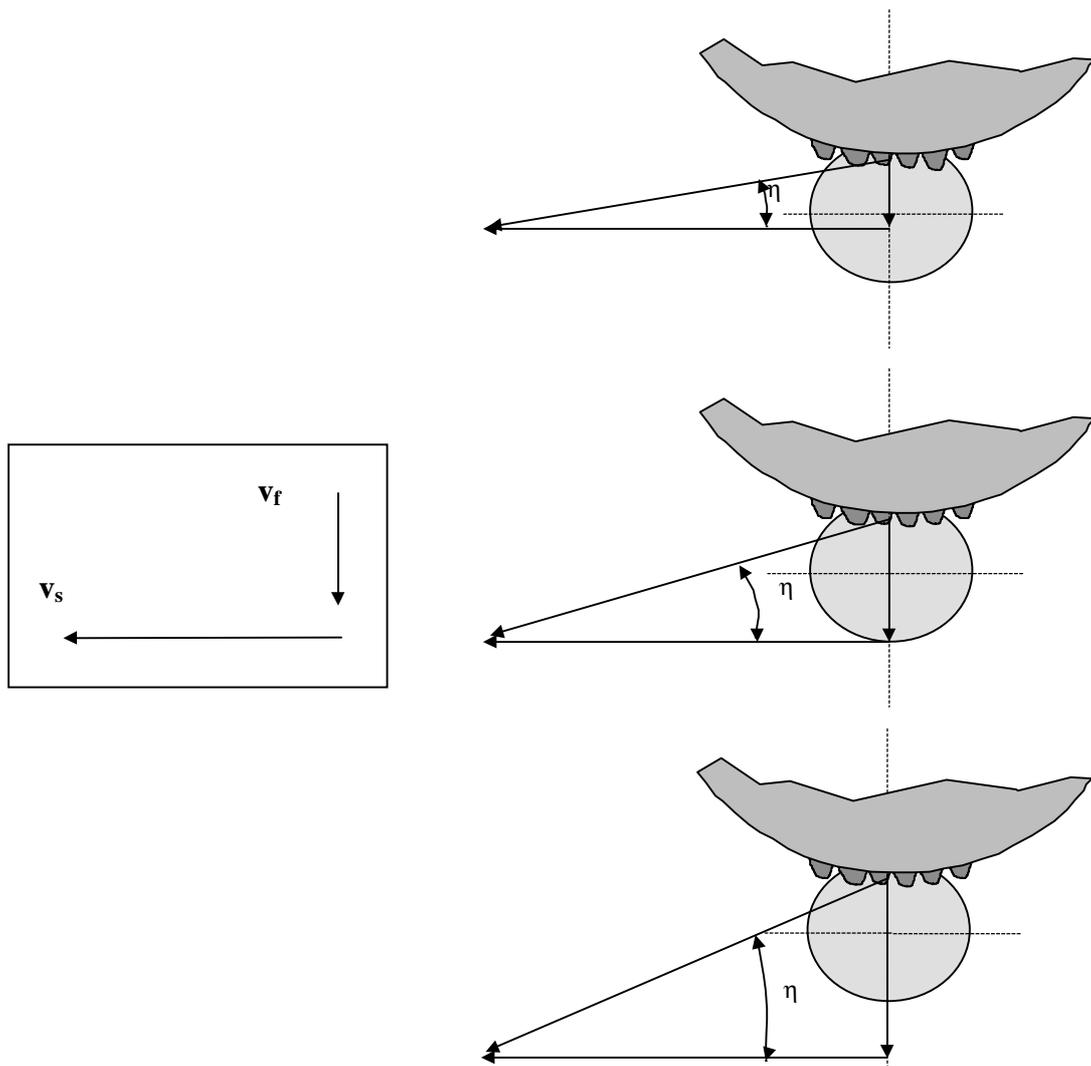


Figura 1 - Modificações no ângulo  $\eta$  quando a velocidade de corte é constante e a velocidade de mergulho variável.

2) Quando a velocidade de corte e a velocidade de mergulho são variáveis. Neste caso, o aumento do ângulo  $\eta$  é causado pela elevação da velocidade de mergulho e diminuição da velocidade de corte, conforme pode ser observado na Fig. 2.

A densidade de grãos abrasivos ativos aumenta mais rapidamente pela ação da velocidade de corte e velocidade de mergulho. Os cavacos arrancados tem suas espessuras maiores do que no caso anterior. Quando o ângulo de penetração  $\eta$  é pequeno, o volume de cavacos arrancados é menor. Neste caso, uma parte considerável da energia empregada para cortar a peça é gasta com atrito e riscamento dos grãos abrasivos.

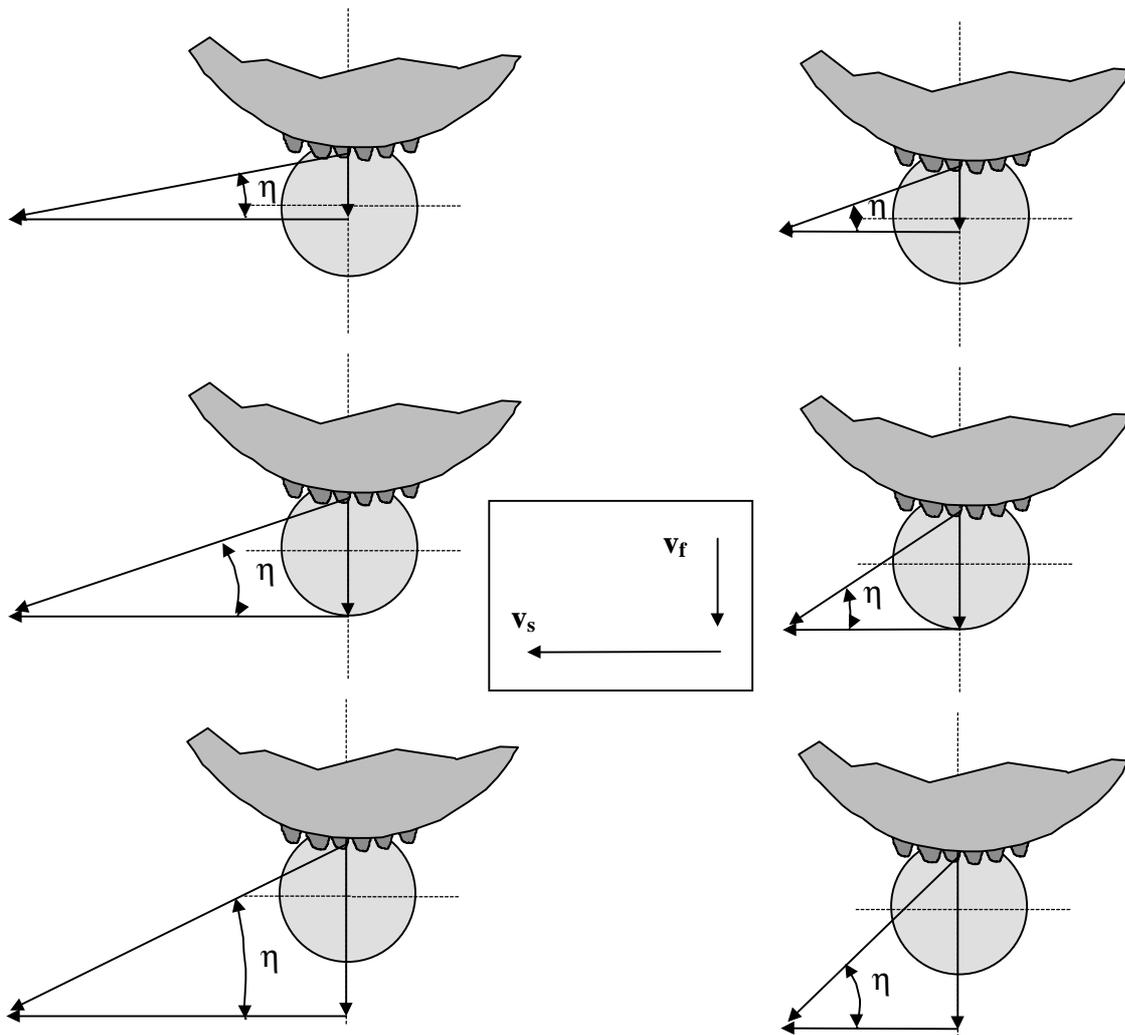


Figura 2 - Modificações no ângulo  $\eta$  quando a velocidade de corte é decrescente e a velocidade de mergulho é variável.

Com o aumento do ângulo de penetração  $\eta$ , mais cavacos são arrancados. Portanto, a maior parte da energia gasta no corte é utilizada para a remoção de material.

Na Fig. 3 é apresentada, esquematicamente, a remoção de material para pequenos ângulos de penetração (Fig. 3a) e para grandes ângulos de penetração (Fig. 3b).

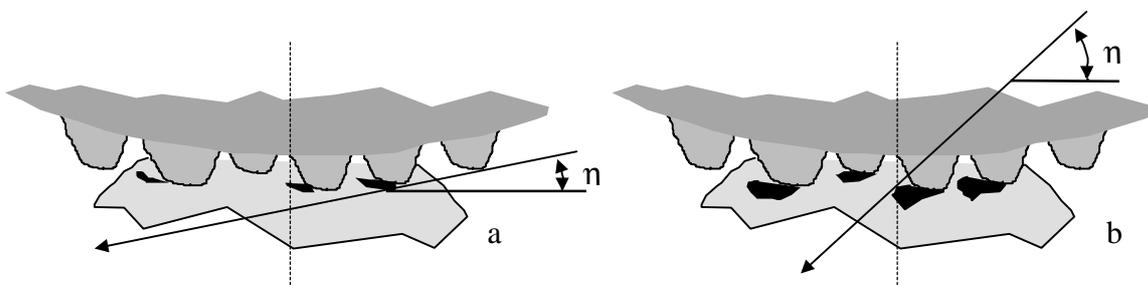


Figura 3 - Esquema da remoção de material para pequenos e grandes ângulos de penetração (Bianchi, 1997)

A geração do cavaco arrancado, segundo (Malkin, 1989), é feita por uma fase de deformação do cavaco que corresponde à deformação plástica sem remoção de material. Esta deformação ocorre principalmente durante o contato inicial entre um grão abrasivo e o material da peça. No início do contato, a uma baixa profundidade de corte, o material é comprimido e se deforma em direção às laterais. À medida que a extremidade de um grão abrasivo passa através da zona de corte, a profundidade de corte do grão aumenta de zero até um valor máximo. A formação do cavaco começa somente depois que a profundidade de corte alcança um valor crítico, correspondente ao início da formação do cavaco com espessura  $t'$  [mm]. Após este ponto a espessura do cavaco  $t$  [mm] tende a aumentar, até chegar no seu valor máximo que corresponde a máxima espessura do cavaco. A energia total do corte corresponde à deformação do material, formação cavaco e deslizamento entre o metal da peça e as áreas desgastadas no topo dos grãos abrasivos. Na Fig. 4 é apresentada a trajetória da ponta do grão abrasivo (Fig. 4a) e a formação do cavaco na forma esférica (Fig. 4b).

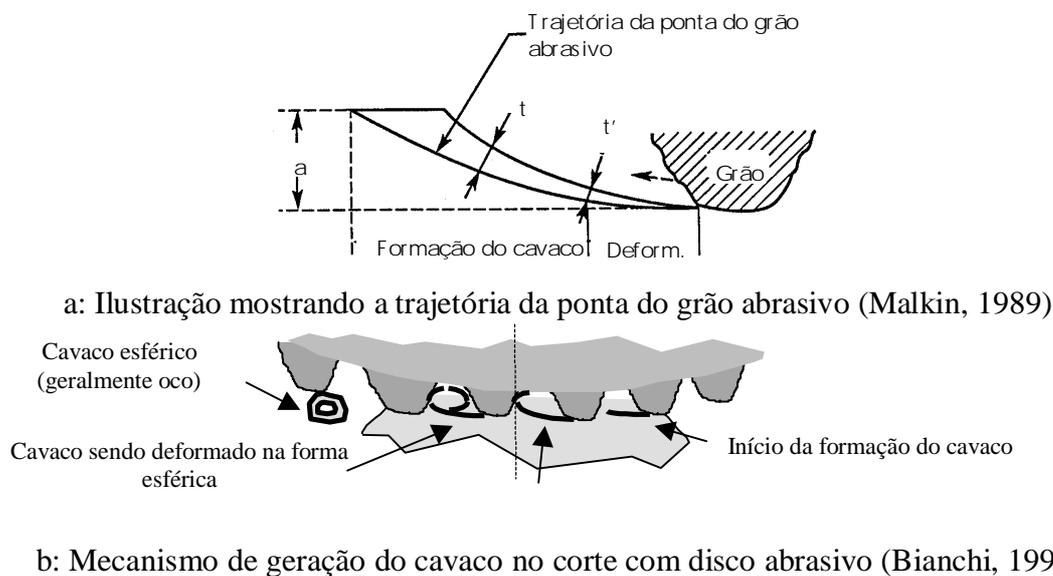


Figura 4 - Trajetória da ponta do grão abrasivo e a formação do cavaco na forma esférica

Pode-se notar que o cavaco tende a alojar-se nas porosidades do disco (Fig. 4b), ocupando os espaços mais afastados pela ação do deslizamento do cavaco. Devido à ação da força centrífuga e às elevadas temperaturas os cavacos tendem a ser ocos. Evidentemente que apenas algumas geometrias dos cavacos é que apresentam este mecanismo. As outras formam cavacos de diversos comprimentos.

### 3. METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados com três valores de  $V_f$  (2,0 mm/s, 3,4 mm/s e 4,6 mm/s) e dois valores de  $V_s$ , sendo uma constante e igual a 70 m/s e outra decrescente  $V_{si}$  com a perda diametral do disco (inicia com 70 m/s). Os materiais utilizados para o corte foram os aços ABNT 1020 e ABNT 1045 e o disco abrasivo AR302 (tipo serralheiro). Na Fig. 5 é apresentado o desenho esquemático de uma operação tipo “cut-off” e as principais variáveis envolvidas, sendo  $d_c$  o diâmetro do disco abrasivo [mm],  $l_c$  o comprimento de contato entre o disco e o material a ser cortado [mm] e  $\delta$  a penetração do disco na peça [mm].

Para a constatação das variações que ocorrem na geometria dos cavacos, estes foram fotografados com um foto-microscópio Carl Zeiss, modelo 58419, com lente objetiva Plan

2,5/0,08; 160/-, optovar regulado em 1,25 com ampliação de 3,2 vezes com dispositivo automático de exposição regulado na intensidade IX e com sensibilidade 0,4.

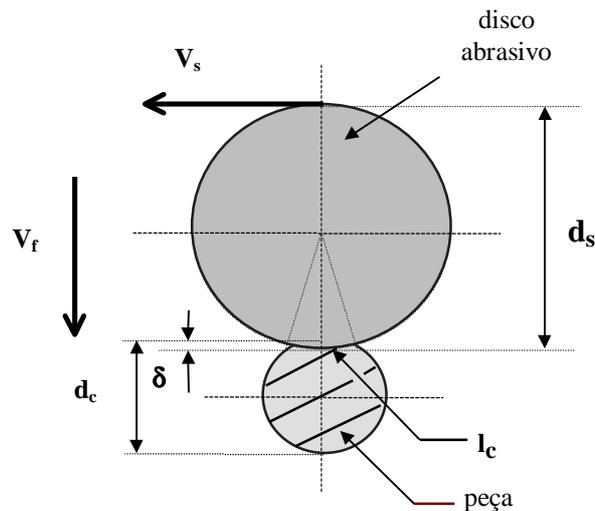


Figura 5 - Fenomenologia de corte para operações tipo “cut-off”

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição das arestas cortantes na superfície de corte das ferramentas abrasivas é aleatória, e as profundidades de atuação dos grãos abrasivos são diferentes, agindo simultaneamente e em grande número.

Nas operações de corte com discos abrasivos, do tipo mergulho basculante, os cavacos são arrancados de forma mais severa se comparado a outros processos de usinagem, como por exemplo, o processo de retificação.

Os cavacos arrancados por este tipo de operação possuem geometrias que são diretamente relacionadas aos parâmetros de velocidade de corte e velocidade de mergulho do disco abrasivo sobre a peça. A dureza e a geometria da peça a ser cortada também influenciam na forma geométrica dos cavacos arrancados.

A avaliação da geometria dos cavacos é uma atividade de grande dificuldade, considerando que as amostras apresentam cavacos de comprimentos diversos, pelas variações do comprimento de contato.

Os cavacos arrancados no corte de aços dúcteis, são mais longos, espessos e variam dimensionalmente com as condições de corte. Neste item estas variações são apresentadas e discutidas, visando o melhor entendimento da fenomenologia de corte do processo em questão.

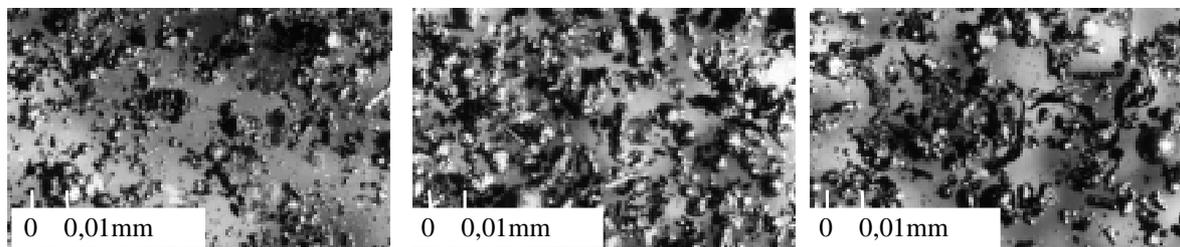
##### 4.1 Geometria dos cavacos arrancados no corte, em função da velocidade de mergulho e da velocidade de corte

Os cavacos arrancados no corte de aços frágeis, são curtos, finos e variam dimensionalmente com as condições de corte. De forma oposta, os cavacos arrancados no corte de aços dúcteis, são mais longos, espessos e também variam dimensionalmente com as condições de corte. Neste item estas variações são apresentadas e discutidas, visando o melhor entendimento da fenomenologia de corte do processo em questão.

- **Cavacos do aço ABNT 1045 arrancados com  $V_f$  variável e  $V_s$  (constante)**

Quando a velocidade de corte é constante, o aumento da espessura equivalente de corte e do ângulo de penetração ocorrem somente pela elevação da velocidade de mergulho, durante os sucessivos cortes. Consequentemente, à medida em que  $V_f$  cresce, há o aumento progressivo da espessura teórica máxima dos cavacos arrancados e da densidade de grãos abrasivos ativos pelo aumento do ângulo de penetração dos grãos abrasivos.

Os cavacos arrancados são mais fragmentados pois o número de cavacos arrancados por unidade de tempo é mantido constante, pela manutenção de  $V_s$  constante (70,0 m/s). Isto acontece pelo fato de que no início dos cortes, com disco abrasivo no seu diâmetro externo máximo, o número de grãos ativos é maior e a rotação do disco abrasivo é menor. Com a perda diametral do disco abrasivo, a rotação é aumentada, mantendo constante o número de cavacos arrancados. Isto pode ser verificado na Fig. 6 (6a, 6b e 6c) onde são apresentadas as geometrias dos cavacos obtidos nos ensaios com velocidade de mergulho variável e velocidade de corte constante.

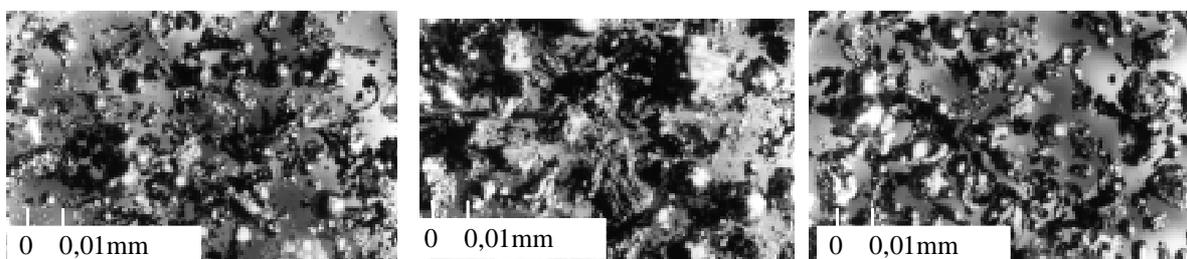


a)  $V_f = 2,0$  mm/s                      b)  $V_f = 3,4$  mm/s                      c)  $V_f = 4,6$  mm/s  
 Figura 6 - Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com  $V_f = 2,0, 3,4$  e  $4,6$  mm/s e  $V_s = 70,0$  m/s

Na Fig. 6 pode-se observar pequenas esferas ocas de aço. Isto ocorre pelos impactos dos grãos abrasivos sobre a peça e pela ausência de refrigeração, onde as elevadas temperaturas na região de corte fundem parte dos cavacos arrancados, formando as esferas ocas de aço, além de deteriorar o ligante, diminuindo a fixação dos grãos abrasivos.

- **Cavacos do aço ABNT 1045 arrancados com  $V_f$  variável e  $V_{si}$  (decrecente)**

Na Fig. 7 (7a, 7b e 7c) são apresentadas as geometrias dos cavacos obtidas nos ensaios com velocidade de mergulho e velocidade de corte variáveis ( $V_{si} = 70,0$  m/s).



a)  $V_f = 2,0$  mm/s                      b)  $V_f = 3,4$  mm/s                      c)  $V_f = 4,6$  mm/s  
 Figura 7 - Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com  $V_f = 2,0, 3,4$  e  $4,6$  mm/s e  $V_{si} = 70,0$  m/s

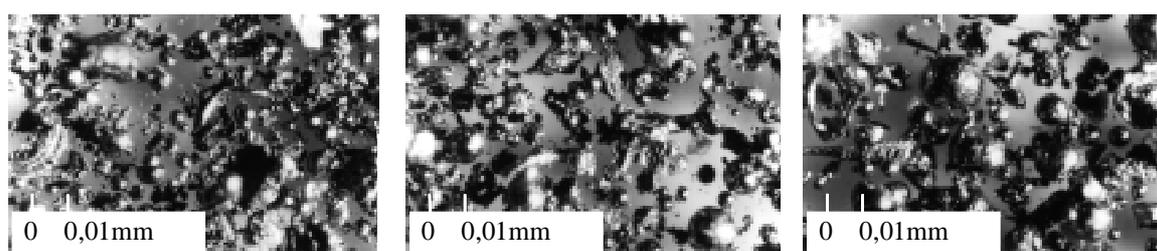
No caso da velocidade de corte decrescente, o aumento do ângulo de penetração ocorrem de forma mais acentuada, com relação ao caso anterior, pela combinação da elevação da velocidade de mergulho e diminuição da velocidade de corte. Neste caso a densidade de grãos abrasivos aumenta rapidamente e progressivamente, sendo maior que o caso anterior. Como consequência, os cavacos possuem maior espessura e são mais alongados. O número de cavacos arrancados é menor, pela diminuição da velocidade de corte. Os cavacos gerados tem maior dificuldade de alojamento nas porosidades do disco abrasivo, ocasionando um maior desgaste do ligante, devido a ação erosiva dos cavacos no mesmo. O desgaste do ligante é acentuado pela degradação térmica originária do processo de corte não refrigerado.

- **Cavacos do aço ABNT 1020, com  $V_f$  variável e  $V_s$  (constante)**

Quando a velocidade de corte é constante, o aumento da espessura equivalente de corte e do ângulo de penetração ocorrem somente pela elevação da velocidade de mergulho, durante os sucessivos cortes. Consequentemente, à medida em que  $V_f$  cresce, há o aumento progressivo da espessura teórica máxima dos cavacos arrancados e da densidade de grãos abrasivos ativos pelo aumento do ângulo de penetração dos grãos abrasivos. Os cavacos arrancados são mais fragmentados pois o número de cavacos arrancados por unidade de tempo é mantido constante, pela manutenção de  $V_s$  constante. Isto acontece pelo fato de que no início dos cortes, com disco abrasivo no seu diâmetro externo máximo, o número de grãos ativos é maior e a rotação do disco abrasivo é menor. Com a perda diametral do disco abrasivo, a rotação é aumentada, mantendo constante o número de cavacos arrancados.

Isto pode ser verificado na Fig. 8 (8a, 8b e 8c) onde são apresentadas as geometrias dos cavacos obtidos nos ensaios com velocidade de mergulho variável e velocidade de corte constante.

Pode-se notar que entre os cavacos há grãos abrasivos fraturados (e/ou arrancados) e pequenas esferas ocas de aço. Isto ocorre pelos impactos dos grãos abrasivos sobre a peça e pela ausência de refrigeração, onde as elevadas temperaturas na região de corte fundem parte dos cavacos arrancados, formando as esferas ocas de aço, além de deteriorar o ligante, diminuindo a fixação dos grãos abrasivos.



a)  $V_f = 2,0$  mm/s

b)  $V_f = 3,4$  mm/s

c)  $V_f = 4,6$  mm/s

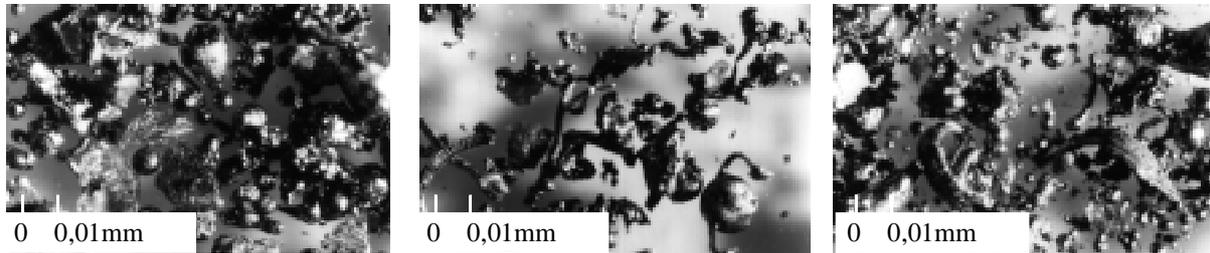
Figura 8 - Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com  $V_f = 2,0, 3,4$  e  $4,6$  mm/s e  $V_s = 70,0$  m/s

- **Cavacos do aço ABNT 1020, com  $V_f$  variável e  $V_{si}$  (decrescente)**

No caso da velocidade de corte decrescente, o aumento da espessura equivalente de corte e do ângulo de penetração ocorrem de forma mais acentuada, com relação ao caso anterior, pela combinação da elevação da velocidade de mergulho e diminuição da velocidade de corte. Neste caso a densidade de grãos abrasivos aumenta rapidamente e progressivamente, sendo

maior que o caso anterior. Como consequência, os cavacos possuem maior espessura e são mais alongados pela ductilidade deste aço. O número de cavacos arrancados é menor, pela diminuição da velocidade de corte.

Na Fig. 9 (9a, 9b e 9c) são apresentadas as geometrias de cavacos obtidas nos ensaios com velocidade de mergulho e velocidade de corte variáveis.



a)  $V_f = 2,0$  mm/s

b)  $V_f = 3,4$  mm/s

c)  $V_f = 4,6$  mm/s

Figura 9 - Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com  $V_f = 2,0, 3,4$  e  $4,6$  mm/s e  $V_{si} = 70,0$  m/s

#### 4.2 Considerações gerais sobre as geometrias dos cavacos arrancados

O macro desgaste da superfície de corte dos discos abrasivos está diretamente relacionado à geometria dos cavacos arrancados e à ação da temperatura na região de contato.

Analisando-se somente o efeito da geometria do cavaco no desgaste da superfície de corte do disco abrasivo, pode-se afirmar que as geometrias mais volumosas dos cavacos arrancados, que apresentam maiores dificuldades para serem alojados nos poros dos discos abrasivos, tendem a desgastar mais o ligante.

O outro fator que influencia o macro desgaste é a temperatura na região de contato grão-peça, que normalmente é elevada (Ueda e Tanaka., 1993) tornando-se ainda maior quando o corte não é refrigerado. Altas temperaturas deterioram o ligante enfraquecendo a fixação dos grãos abrasivos. Isto facilita a liberação destes caracterizando o macro desgaste.

O micro desgaste do grão abrasivo somente pode ocorrer se o ligante mantiver sua capacidade de retenção. Assim, análise do macro desgaste é de fundamental importância para a redução do desgaste diametral do disco abrasivo.

### 5. CONCLUSÕES

Analisando-se os resultados obtidos no processo de corte com discos abrasivos de materiais, do tipo mergulho basculante e sem refrigeração, pode-se concluir que:

No corte de materiais por discos abrasivos, os cavacos são arrancados de forma severa e possuem geometrias que estão diretamente relacionadas aos parâmetros velocidade de corte, velocidade de mergulho do disco abrasivo sobre a peça e dureza do material a ser cortado. Através da análise microscópica dos cavacos arrancados, pode-se afirmar que no corte de aços dúcteis os cavacos são mais longos e espessos e no corte de aços frágeis os cavacos são mais finos e quebradiços.

Os cavacos arrancados apresentam, em grande parte, forma geométrica tendendo o ser esférica pela ação da elevada temperatura na região de corte e pelo processo em que é formado.

As geometrias mais volumosas dos cavacos arrancados, gerados quando são utilizadas operações de corte com  $V_f$  variável e  $V_{si}$  decrescente, tendem à apresentar maiores dificuldades no alojamento nas porosidades dos discos abrasivos. Isto leva a um maior

desgaste do ligante do disco abrasivo contribuindo para uma maior perda diametral do mesmo, diminuindo o seu desempenho.

### ***Agradecimentos***

Desejamos manifestar nossos agradecimentos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro que viabilizou a maior parte da realização deste trabalho e pela bolsa de Iniciação Científica concedidas, a FUNDUNESP (Fundação Para o Desenvolvimento da UNESP) pelo apoio financeiro complementar, a empresa NORTON S.A. que cedeu os discos abrasivos e a empresa KOHLBACH, pela doação dos motores.

### **REFERÊNCIAS**

- Bianchi, E.C., 1997, Estudo do comportamento de discos abrasivos, em operações do tipo “cut-off” por mergulho basculante, submetidos a diversas condições de corte sem refrigeração. Bauru, 131p. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Engenharia - UNESP - Campus de Bauru.
- Farago, F.T., 1980, Abrasive Methods Engineering. Vol 2. Industrial Press. Inc., New York, USA. p. 435-459.
- Jawahir, I. S.; Lutervet, C. A., 1993, Recent developments in chip control research and applications. Annals of the CIRP, Vol 42/2, apud Paulino et al. (1997), p. 659-693
- Malkin, S., 1989, Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives. England: Ellis Horwood Limited. 275p.
- Paulino, W.S.; Sales, W.F.; Machado, A. R., 1997, Determinação experimental da influência dos principais parâmetros de usinagem no tipo e na forma do cavaco. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 14; Bauru, de 8 a 12 de dezembro de 1997. Anais do COBEM. São Paulo: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 8 páginas (em CD - ROM).
- SINAESP (Sindicato da Indústria de Abrasivos do Estado de São Paulo), 1997. Movimento Geral das Estatísticas do Setor - Exercício de 1996. São Paulo. 2p.
- Snee, J., 1991 Are You Making the Most of Your Cut-Off Operation? Welding Journal. February, p. 60-62.
- Ueda, T.; Tanaka, H., 1993, “Measurement of Grinding Temperature of Active Grains Using Infrared Radiation Pyrometer with Optical Fibre”, Annals of the CIRP., 42/1, p. 405-408.

### **THE STUDY OF THE CHIP'S GEOMETRY WHEN CUTTING WITH ABRASIVE DISC**

***Abstract.*** *This paper shows a research about the study of the chip's geometry generated in the diving cut-off operation, under several cutting conditions. As a result it was possible to verify that the cutting conditions and the type of the material cut can directly affect the chip's geometry.*

***Key words:*** *Cut-off operation, Cutting conditions, Chip's geometry*