



Influência da Velocidade de Corte nos Mecanismos de Desgaste no Mandrilamento de Sedes de Válvulas de Motores de Combustão Interna com Ferramentas de PCBN

Cláudio Araújo Rocha

car-rocha@brfee.com.br – FA Powertrain, Betim, MG, Brasil.

Wisley Falco Sales*

wisley@pucminas.br

Clovis Sperb de Barcellos*

clovis@pucminas.br

*Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Resumo. Investigou-se a influência da velocidade, v_c , e profundidade de corte, a_p , e avanço, f , na usinagem das sedes de válvulas de motores de combustão interna, utilizando ferramentas de PCBN. Quanto ao desgaste das ferramentas, o aumento do avanço e a redução da velocidade de corte, promoveu o aumento do desgaste. As formas de desgastes predominantes foram de flanco e de cratera enquanto os mecanismos de microlascamentos e *attrition* predominaram em baixas e microlascamentos e difusão em elevadas v_c . A instabilidade dinâmica da máquina foi decisiva, promovendo o fluxo descontínuo do cavaco e o mecanismo de *attrition*, comprometendo o desempenho das ferramentas de corte.

Palavras-chave: Motores de Combustão. PCBN, Mecanismos de Desgaste, Vida da Ferramenta

1. INTRODUÇÃO

No processo de usinagem, um avanço maior pode reduzir a produtividade da ferramenta em virtude do aumento das áreas de contato e conseqüentemente, um aumento da força de usinagem e dos níveis de vibração (Trent, 1991 e De Sousa, 1998). Com isso, a máquina operatriz se torna altamente sensível influenciando os parâmetros de topografia de superfície, piorando o acabamento da área usinada (Machado e Da Silva, 1999). Em contrapartida, quando é promovido um aumento da velocidade de corte ocorre um aumento da temperatura na interface cavaco-ferramenta, reduzindo a resistência ao cisalhamento do material da peça. Dessa maneira, o acabamento da superfície usinada poderá ser melhorado.

Na fabricação dos motores, a usinagem da sede de válvulas é de suma importância para determinar a potência e torque nos mesmos, pois o assentamento correto da válvula na sua sede garante a correta vedação o que é imprescindível no desempenho dos motores.

O conhecimento da influência dos parâmetros de corte na performance dos motores automotivos passa a ter uma importância relevada, pois existe uma série de teorias sobre o comportamento da região onde ocorre o assentamento da válvula no cabeçote motor, porém não se dispõe de literaturas que expliquem claramente o quanto os erros de forma e os parâmetros de acabamento superficiais alterados pela variação dos parâmetros de usinagem contribuem para o desempenho desses motores.

Este trabalho tem o objetivo de investigar a influência da velocidade de corte no desempenho das ferramentas de PCBN, no mandrilamento de válvulas de admissão de motores de combustão

interna. Buscou-se identificar os principais mecanismos de desgaste que ocorreram nas diferentes velocidades avaliadas.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1. Descrição das Sedes de Válvulas (peça usinada)

As sedes de válvulas de admissão são produzidas de um material obtido pela metalurgia do pó, especificação M657BA.12T, conforme norma de produção Fiat Automóveis Spa Itália. A Tabela (1) mostra algumas características desse material. Na análise micrográfica da liga Fe-C-Cu-Mo, foi encontrada perlita com cobre uniformemente distribuída e cementita nos contornos dos grãos.

Tabela 1. Composição química percentual, densidade e dureza das sedes de válvulas de admissão.

%C	%Mo	%Ni	%Cu	%S	%Cr	%W	%Fe	% outros	Densidade g/cm ³	Dureza HB
0.80~ 1.2	0.30~ 0.6	0.30~ 0.7	8.0~ 12.0	0.20~ 0.5	—	—	Restante	2.0% ≥	≥ 7.0	220~ 320

Os procedimentos de usinagem são realizados após a sede estar montada no cabeçote motor. A Figura (1) mostra o desenho de uma sede de válvula de admissão.

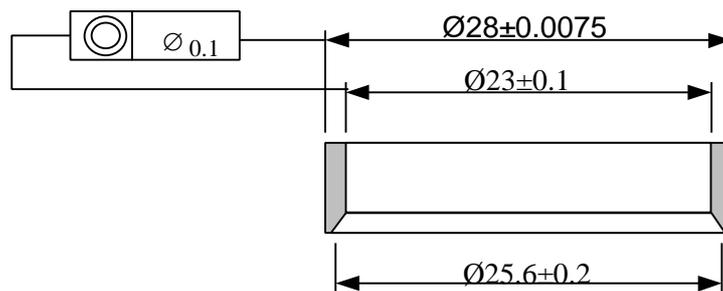


Fig. 1. Desenho da sede de válvula de Admissão.

2.2. Descrição da Máquina-Ferramenta

O equipamento que foi utilizado nesse trabalho é uma *Transfer* de usinagem especial da linha de produção do cabeçote motor “1.3 16V Fire” da FA Powertrain Ltda, conforme Fig. (2).



Fig. 2. *Transfer* de usinagem da linha de produção do cabeçote motor 16V.

A operação de usinagem da sede de válvula consiste em promover os movimentos de corte e de avanço na ferramenta, enquanto a peça permanece fixa, ou seja, a ferramenta avança e gira sobre a peça, o que caracteriza como mandrilhamento cilíndrico (Ferraresi, 1977). A superfície cônica é proporcionada pela geometria da ferramenta.

2.3. Descrição dos Testes de Usinagem

Nos testes foram usinadas 45 peças, divididas em 9 grupos de 5 peças, combinando as velocidades de corte (128,61; 160,77; 192,92 m/min), as profundidade de corte (0,1 e 0,2 mm) e os avanços (0,0495, 0,055 e 0,0605 mm/rev). A ferramenta era nova e a cada peça fabricada foi medida a evolução do desgaste de flanco, $VB_{B_{máx}}$, até o fim da vida útil cujo critério estabelecido foi baseado nos parâmetros superficiais e na estanqueidade da sede da válvula, definidos no projeto.

O equipamento utilizado para medição do desgaste de flanco da ferramenta, $VB_{B_{máx}}$, foi o *Optical Measurement Inspection System* cuja capacidade de ampliação é de 150 vezes.

Utilizou-se o fluido de corte “EP” à base de cloro denominado MH 2030, da Fuchs do Brasil S.A., de elevada lubricidade, concentração de 6%, biodegradável, atóxico, não irritante e isento de óleo mineral. Em sua composição não é utilizado nitrito, biocidas fenólicos ou à base de cloro, cianeto ou metais pesados, butilglicol, aditivos à base de chumbo, bário ou zinco, seguindo as normas de proteção ambiental.

2.4. Metodologia para Verificar a Influência dos Parâmetros Corte no Desgaste da Ferramenta

Inicialmente, a máquina trabalhou em vazio por 30 minutos para que todos os sistemas hidráulicos, componentes mecânicos e demais dispositivos atingissem as condições de ideais trabalhos. Em seguida, com as ferramentas de corte novas, cada grupo de peças era usinada, a ferramenta era retirada e medido o desgaste, sempre mantendo-a trabalhando em vazio para que não fossem perdidas as condições de trabalho.

Com o intuito de pesquisar o desgaste das ferramentas de corte, agora durante o processo de usinagem normal, foram realizadas medições de desgaste / produtividade das mesmas em cada lote de teste. A análise comparativa dos valores de desgastes, medidas nesta etapa, representam intrinsecamente uma maior ou menor interferência dos parâmetros de corte. Objetivo dessa etapa é verificar a relação clara entre os parâmetros de corte e a produtividade da ferramenta.

2.4.1. Ferramentas Utilizadas

Utilizou-se ferramentas de PCBN, fabricadas pela De Beers na forma de plaqueta de 1,5 mm de espessura brasadas sobre um substrato de metal duro. Apresenta dureza Knoop de 2750 kg/mm², com percentual de CBN aproximadamente em um volume de 50%, fabricado pela De Beers da classe DBC50. Os demais elementos são: 40% TiC, 6% WC e 4% AlB₂ / AlN.

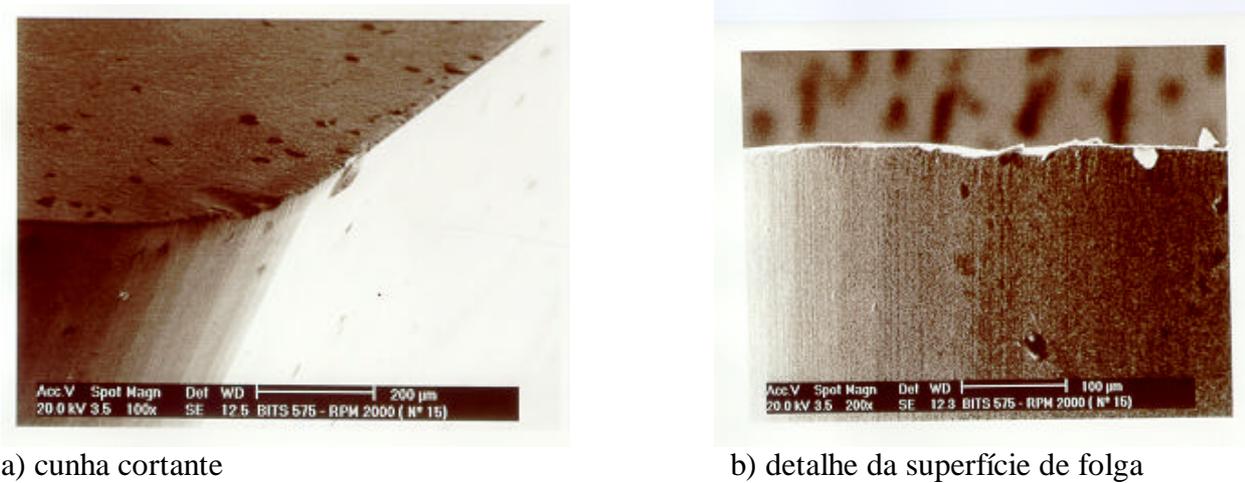
O conjunto ferramenta-porta-ferramenta montado apresentou a seguinte geometria: Ângulo de folga, $\alpha_0 = 10^\circ$; Ângulo de cunha, $\beta_0 = 75^\circ$; Ângulo de saída, $\gamma_0 = 5^\circ$ e Ângulo de posição, $\chi_r = 15^\circ$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Mecanismos de Desgaste

Na Figura (3), mostra-se a fotografia, retirada no microscópio eletrônico de varredura, da ferramenta usinada com os parâmetros de corte $f = 0,055$ mm/rev, $v_c = 161$ m/min, $a_p = 0,1$ mm. Observa-se as superfícies de saída e de folga com aspecto bem liso o que sugere que o mecanismo de desgaste atuante foi a difusão (Trent, 1991). Não foram verificadas tendências de lascamento e

de riscamento, que poderia ser promovido pela falta de tenacidade da ferramenta ou por abrasão respectivamente.



a) cunha cortante

b) detalhe da superfície de folga

Fig. 3. Ferramenta desgastada com a melhor condição de desgaste com os parâmetros de corte: $f = 0,055 \text{ mm/rev}$; $v_c = 161 \text{ m/min}$; $a_p = 0,1 \text{ mm}$.

Na Figura (4), mostra-se a evolução do desgaste de flanco da ferramenta, $VB_{B\text{máx}}$ e da rugosidade aritmética média, R_a , na condição mais desfavorável ($a_p = 0,2 \text{ mm}$, $v_c = 129 \text{ m/min}$ e $f = 0,061 \text{ mm/rev}$).

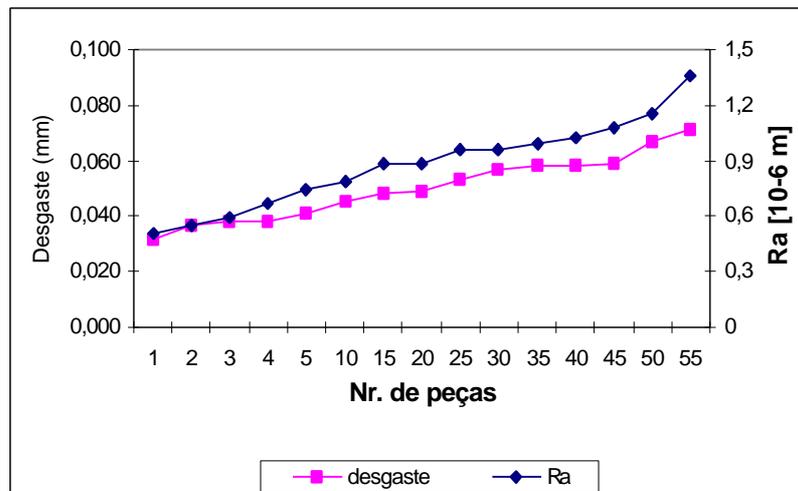
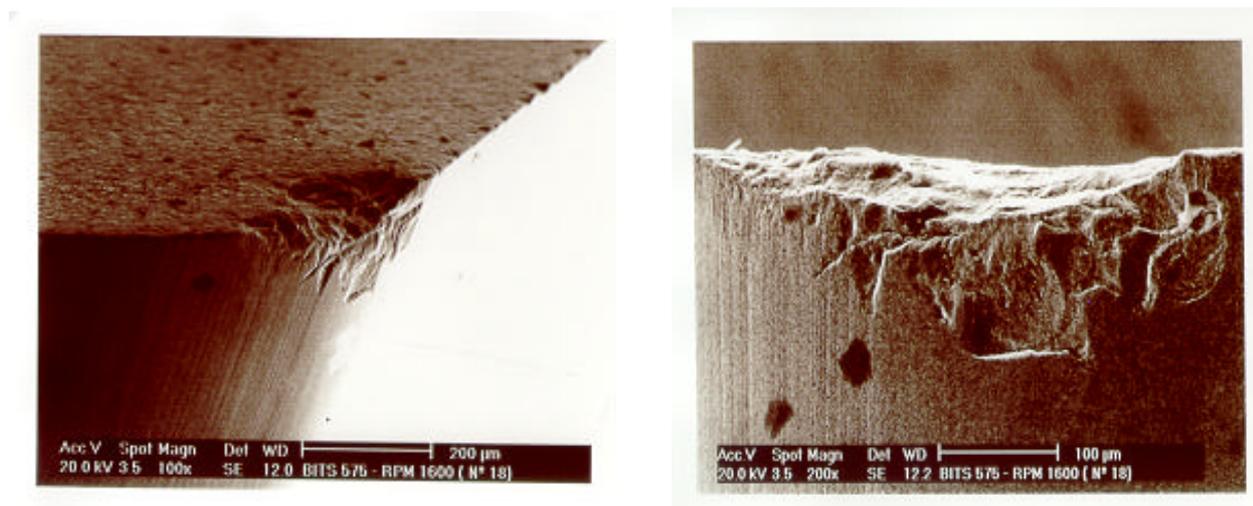


Fig. 4. Condição mais desfavorável de usinagem com os parâmetros de corte: $f = 0,061 \text{ mm/rev}$, $v_c = 129 \text{ m/min}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$.

Com $a_p = 0,2 \text{ mm}$, $v_c = 129 \text{ m/min}$ e $f = 0,061 \text{ mm/rev}$, a ferramenta apresentou o desgaste de flanco e de cratera como se pode observar na Fig. 5. Analisando as superfícies desgastadas, nota-se o aspecto bastante aspero o que sugere que a craterização tenha sido ativada pelo fluxo descontínuo do cavaco, caracterizada por baixas v_c e que ativou o mecanismo de desgaste por *attrition*. Os elevados valores dos parâmetros superficiais indicam que os fenômenos que ocorrem na interface cavaco-ferramenta não acontecem de forma contínua e homogênea e sugerem a provável formação da aresta postíça de corte (APC). Por menor que seja a fase de instabilidade e desaparecimento, ela promove o fluxo descontínuo de cavaco e deixa micro-rebarbas na superfície usinada, piorando o acabamento. Para a confirmação deste fenômeno seriam necessários a realização de ensaios de interrupção brusca do corte (*quick-stop*) o qual não foi realizado, já que toda a parte experimental

foi efetuada no chão-de-fábrica e no mandrilamento seria muito difícil de reproduzir a situação investigada.



a) cunha cortante

b) detalhe da cunha cortante

Fig. 5. Ferramenta desgastada na condição mais desfavorável de desempenho: $f=0,061$ mm/rev, $v_c = 129$ m/min, $a_p = 0,2$ mm.

No caso mais favorável, embora a área seja menor e todos os fenômenos relacionados à zona de fluxo e geração de calor ocorram neste pequeno espaço, a v_c é maior. Segundo Trent (1991) a v_c é o parâmetro mais influente na temperatura da interface cavaco-ferramenta.

Nas Figuras (3) e (5), são mostradas as superfícies de folga e de saída das ferramentas de melhor e pior desempenho, respectivamente. A que apresentou melhor resultado usinou à $v_c = 161$ m/min mostrou aspecto “liso” sem evidências de deformações plásticas da aresta cortante o que sugere que apenas o mecanismo da difusão tenha atuado. Já para a pior condição, a $v_c = 129$ m/min, a superfície apresentou um aspecto áspero, a aresta de corte apresenta fortes evidências de material arrancado pelo mecanismo de *attrition* o qual é ativado em condições de fluxo descontínuo do cavaco, o que ocorre em baixos v_c .

Foi realizado análise dinâmica do sistema medindo as acelerações de vibrações. Em ordem crescente da instabilidade, foram encontradas às seguintes velocidades de corte: 161, 193 e 129 m/min como mostra-se na Tab. (2). Ou seja, na $v_c = 129$ m/min, obteve-se grandes acelerações o que certamente promoveu a descontinuidade do fluxo do cavaco.

Tabela 2. Síntese dos relatórios da análise de aceleração de vibração.

Valor da amplitude da aceleração para $v_c = 129$ m/min (m/s^2)	Valor da amplitude da aceleração para $v_c = 161$ m/min (m/s^2)	Valor da amplitude aceleração para $v_c = 193$ m/min (m/s^2)
0,521676	0,1023450	0,318060
0,523484	0,1107260	0,320444

Na Figura (6), mostra-se a condição de desempenho intermediário. Os parâmetros de corte foram: $f=0,061$ mm/rev, $v_c = 193$ m/min, $a_p = 0,2$ mm. Nota-se que os acentuados desgastes de flanco e de cratera que ocorreram na ferramenta. Há ainda indícios de tenha havido algum lascamento da aresta de corte, evidenciado na parte (a) desta figura. Observando a superfície de saída (partes “a” e “d” desta figura), existe uma distância da aresta de corte, de extensão maior que a profundidade de corte (igual a 200 µm), a evidência de lascamento, ou seja, houve o

desprendimento de material paralelo à superfície, o que pode ser caracterizado por uma avaria (Dearnley e Trent, 1982).

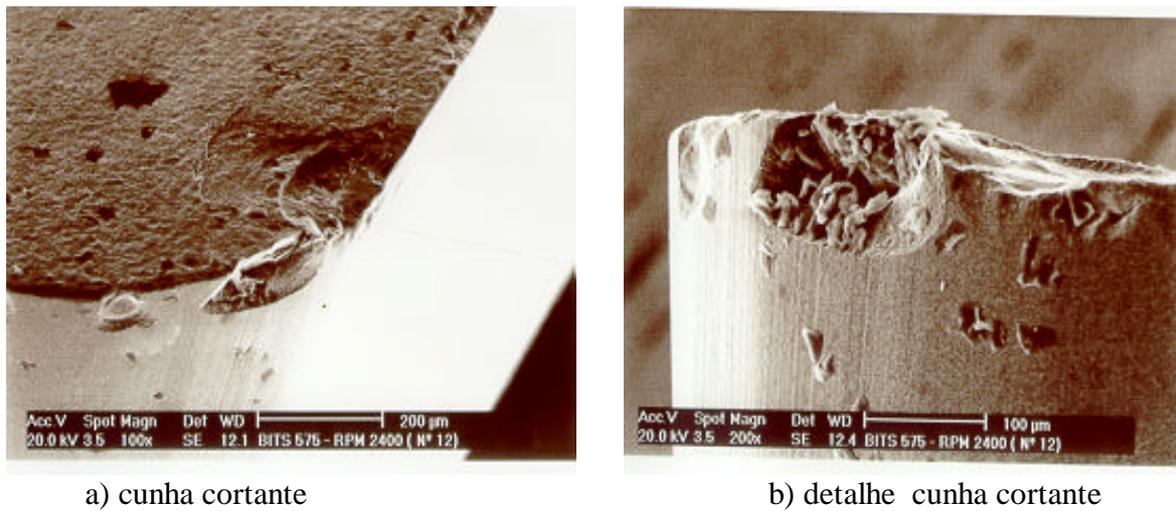


Fig. 6. Ferramenta desgastada na condição intermediária de desempenho: $f = 0,061$ mm/rev, $v_c = 193$ m/min, $a_p = 0,2$ mm.

Elbestawi et alli (1997) observou este tipo de comportamento nas ferramentas de PCBN usinando aços endurecidos para a fabricação de matrizes, no fresamento em velocidades de corte entre 220 e 1320 m/min. Eles encontraram em algumas ferramentas evidências de difusão e noutras a presença de lascamentos, principalmente nas ferramentas com 65% de CBN e 35% de reforço metálico que são recomendadas para acabamento. Para eles a difusão predominou na faixa inferior de v_c testada, enquanto os lascamentos nas v_c maiores. Eles concluíram que a razão principal da falha da ferramenta com baixa fração volumétrica de CBN é devido ao lascamento da aresta principal de corte.

Conforme avaliação das fotografias da ferramentas desgastadas, mostradas nas Fig. (3), (5) e (6), sugere-se nas três condições de v_c avaliadas os mecanismos de desgaste mais influentes foram:

- $v_c = 129$ m/min – *attrition* e microlascamentos – pior desempenho da ferramenta.
- $v_c = 161$ m/min – “leve difusão” – melhor desempenho da ferramenta.
- $v_c = 193$ m/min – “lascamentos”.

Mostra-se na Figura (7), que à profundidade e velocidade de corte constantes, o aumento do avanço acelera o desgaste da ferramenta.

Para $v_c = 129$ m/min foram encontrados os maiores valores de desgaste da ferramenta. Avaliando os dados obtidos na investigação do desgaste, apresentados na Fig. (8), para um mesmo valor de profundidade de corte, observa-se que para a mesma velocidade de corte quanto maior o avanço, maior foi o desgaste da ferramenta. O aumento do avanço aumenta a área de contato cavaco-ferramenta, a taxa de remoção de material e conseqüentemente a temperatura da interface (Shaw, 1984 e Trent, 1991). Portanto o aumento do avanço reduz a vida útil da ferramenta.

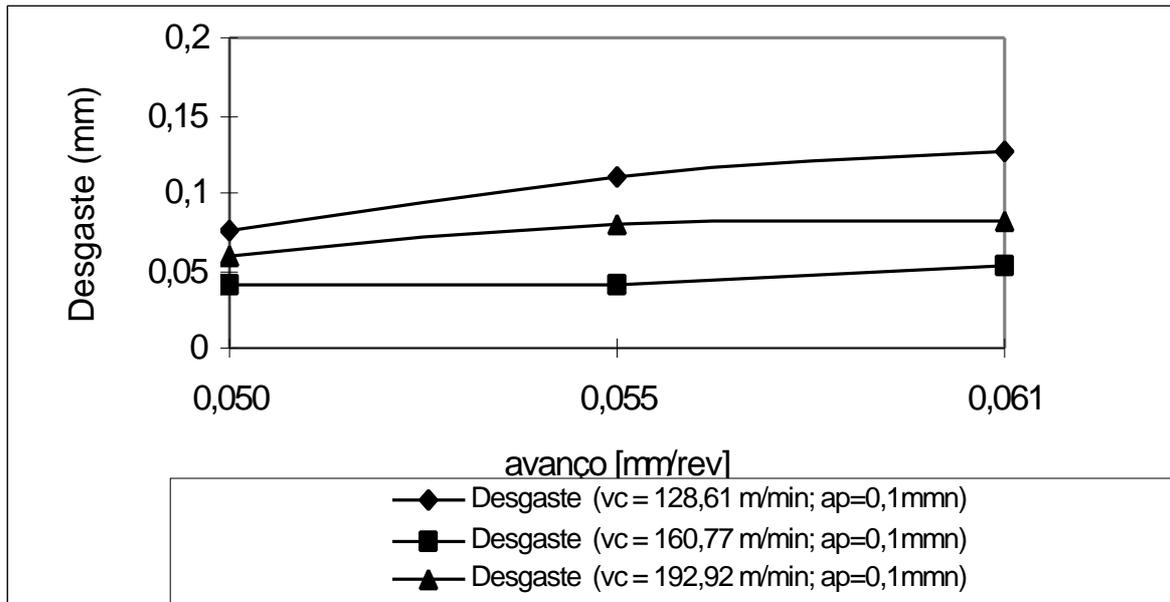


Fig. 7. Comparativo do desgaste da ferramenta com avanço fixando $a_p = 0,1$ mm

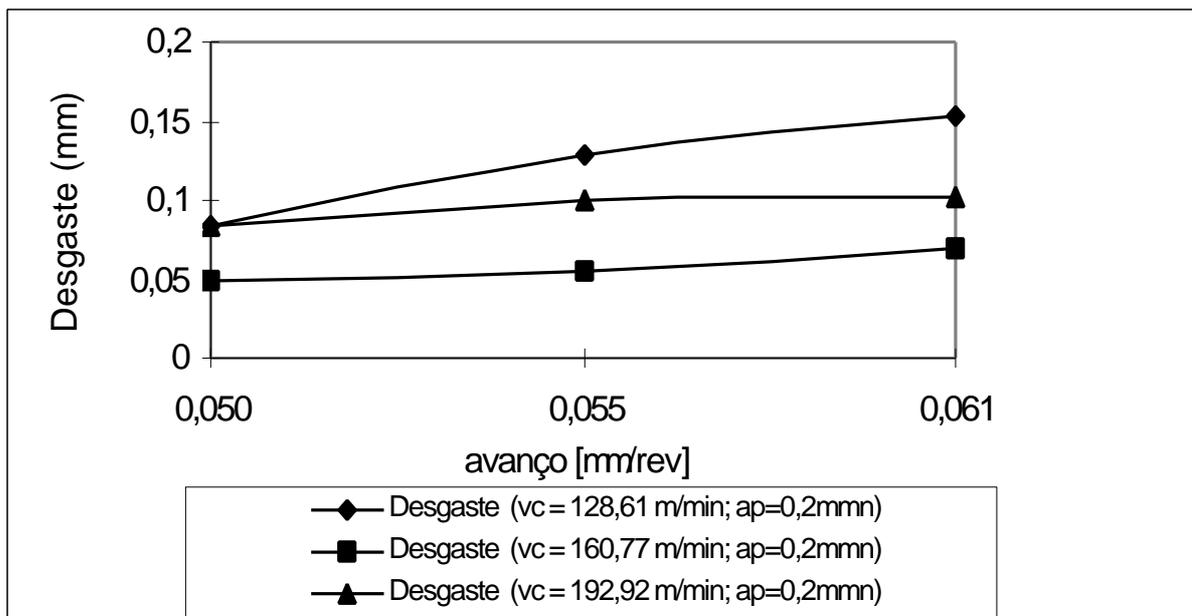


Fig. 8. Comparativo do desgaste da ferramenta com avanço fixando $a_p = 0,2$ mm

Para $a_p = 0,2$ mm, as análises são similares às apresentadas para $a_p = 0,1$ mm. Em ambos os testes, mantendo-se o mesmo avanço, na menor v_c encontrou-se o maior desgaste da ferramenta, porém, quando se observa para mesma v_c quanto maior a profundidade maior foi o desgaste.

3.2. Produtividade das Ferramentas

Para mesma v_c , o aumento do avanço reduz a produtividade da ferramenta. A análise é válida com a $a_p = 0,1$ mm como para $a_p = 0,2$ mm como pode ser visto nas Figs. (9) e (10).

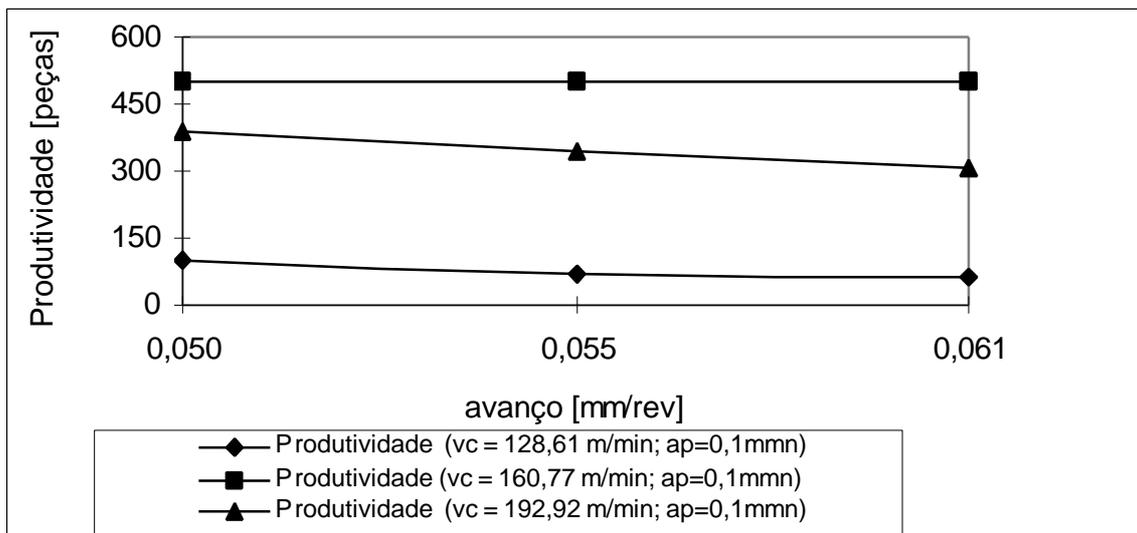


Fig. 9. Comparativo da produtividade da ferramenta com avanço fixando a $a_p=0,1$ mm.

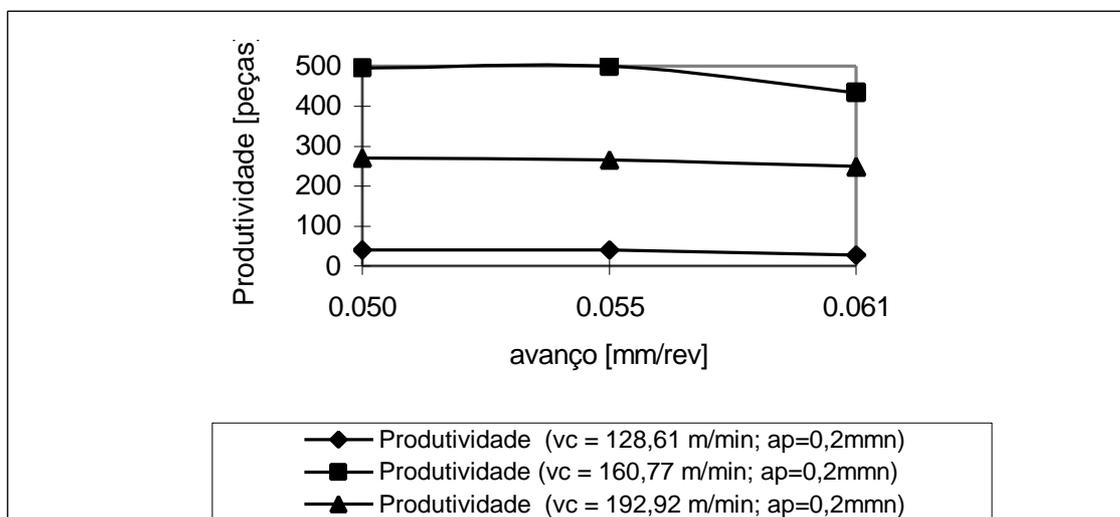


Fig. 10. Comparativo da produtividade da ferramenta com avanço fixando a $a_p = 0,2$ mm.

Nas Figuras (7) a (10), os valores de v_c apresentados são os reais, sem os arredondamentos utilizados no texto.

A análise da produtividade é diretamente relacionada ao comportamento tribológico do sistema de usinagem, ou seja, menores taxas de desgaste conduzem a maiores produtividades e vice-versa.

Como no caso da v_c , pequenas alterações incrementais de 15%, para mais e para menos em torno da média (161 m/min), promoveu grande variação no desempenho do sistema tribológico. A pior condição produziu aproximadamente 30 peças enquanto a melhor, 500. Isto sugere que houve uma transição entre os mecanismos de desgaste como o *attrition*, que predomina em condições de baixas v_c onde o fluxo de cavaco é intermitente e os lascamentos. Na maior velocidade de corte ensaiada (193 m/min) não ficou evidenciada, na análise por meio da microscopia eletrônica de varredura, a difusão, que é exponencialmente dependente da temperatura (Boothroyd, 1981 e Trent, 1991) e que por sua vez é fortemente influenciada pela velocidade de corte. Sabe-se que para a comprovação da presença do mecanismo de difusão deve-se utilizar de outras ferramentas de microscopia eletrônica, que podem vir acopladas ao de varredura, como o EDX e/ou WDX, o que neste trabalho não foi possível realizar.

Como este trabalho foi realizado no chão de fábrica, a preocupação com redução de custos é um tema abordado frequentemente. No início do trabalho produzia-se 30 cabeçotes (120 válvulas de admissão) por cada ferramenta de PCBN. Após a sua conclusão, chegou-se a 500 cabeçotes/ferramenta, o que proporcionou uma redução nos custos em aproximadamente U\$0,45

por cabeçote. Numa fábrica que produz centenas de milhares de motores anuais, este trabalho proporcionou um ganho considerável, somente nesta estação de trabalho, o que certamente justificou a sua realização.

4. CONCLUSÕES

Deste trabalho, chegou-se às seguintes conclusões:

1. A instabilidade dinâmica da máquina operatriz influencia fortemente na seleção das condições de corte de menor taxa de desgaste;
2. A seleção da velocidade de corte, proporcionada pela rotação do mandril deve ser relacionada com as acelerações de vibrações do sistema;
3. A condição mais desfavorável em relação a produtividade da ferramenta é: $a_p=0,2$ mm, $v_c = 129$ m/min e $f = 0,060$ mm/rev e o mecanismo de desgaste predominante foi o *attrition* acompanhado por microlascamentos;
4. A condição mais favorável em relação a produtividade da ferramenta é: $f=0,055$ mm/rev; $v_c = 161$ m/min; $a_p = 0,1$ mm e o mecanismo de desgaste predominante foi a difusão;
5. Sugere-se que em baixas velocidades de corte tenha predominado o *attrition*, em médias a difusão e altas, a ferramenta de PCBN apresentou diversas microtrincas;
6. Desgaste de flanco foi a forma predominante de desgaste nas ferramentas de PCBN. O aumento deste desgaste, $VB_{Bmáx}$, provocou o aumento da rugosidade da sede da válvula;

5. AGRADECIMENTOS

À FA Powertrain Ltda pelo suporte técnico-científico, a liberação dos equipamentos e instrumentos necessários à realização dessa pesquisa e ao CNPq pelo apoio ao Projeto 523564/96-1.

6. REFERÊNCIAS

- Boothroyd, G., 1981, Fundamentals of Metals Machining and Machine Tools, International Student Edition, Mcgraw Hill, 5th printing, 350 pgs.
- Dearnley, P.A. and TRENT, E.M., 1982, Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools, Metals Technology, vol. 9, pp. 60-75.
- De Sousa, M.M., 1998, Utilizando a Vibração Mecânica para Monitorar o Desgaste das Ferramentas de Corte e o Acabamento Superficial no Processo de Fresamento, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- Elbestawi, M.A., Chen L., Becze, C.E. and EL Wardary, 1997, High – speed Milling of Dies and Molds in Their Hardened State, Annals of the CIRP, vol. 16, 46/1.
- Ferraresi, D. 1977, Fundamentos da Usinagem dos Metais, Editora Edgard Blücher Ltda, Vol 1, São Paulo, Brasil, 751 pgs.
- Groover, M.P., 1996, Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, Prentice-Hall, ISBN 0-13-312182-8.
- Hutchings, I.M., 1992, Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Boca Raton, USA, CRC Press, 273 pp.
- Machado, A.R. e Da Silva, M.B., 1999, Usinagem dos Metais, Editora UFU, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, Brasil.
- Shaw, M.C., 1984, Metal Cutting Principles, Oxford University Press, ISBN 0-19-859002-4.
- Trent, E.M., 1991, Metal Cutting, 3rd Edition, Butterworths-Heinemann Ltd, 273 pg., ISBN 0-7506-1068-9.

Machining of Internal Combustion Motor Seat Valves With PCBN Tools: Influence of the Cutting Speed on the Wear Mechanisms

Cláudio Araújo Rocha

car-rocha@brfee.com.br – FIAT/GM Powertrain - Belo Horizonte, MG, Brasil.

Wisley Falco Sales*

wisley@pucminas.br

Clovis Sperb de Barcellos*

clovis@pucminas.br

*Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas - Belo Horizonte, MG, Brasil.

Abstract: In this work a methodology is proposed for the evaluation of the influence of the cutting parameters, mainly of the cutting speed, in the machining of the internal combustion motor seat valves, using PCBN tools. The effects of the cutting parameters were investigated, e.g. cutting speed and depth of cut, and feed rate on the wear mechanism evolution in the tools. Regarding the wear of the tools, the increase and the reduction of the cutting speed resulted the increase of the wear. The predominant wear forms were flank and crater while the mechanisms were attrition which prevailed in the low cutting speeds and the diffusion in high cutting speeds. In the conditions of predominance of the attrition, the dynamic instability of the machine was decisive for the favor the discontinuous chip flow.

Key words: Combustion Motors, Polycrystalline Cubic Boron Nitride, Wear Mechanisms, Tool Life.