

# ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NO DESEMPENHO DA CERÂMICA NÃO-ÓXIDA $Si_3N_4$ NO FRESAMENTO FRONTAL DE FERRO FUNDIDO CINZENTO

**Anderson Mueller**

Renault do Brasil - Avenida Renault, 1300 – Borda do Campo, S.J.P, Paraná - CEP 83.070-900  
anderson.mueller@renault.com

**Dr. Eng. Mec. Paulo André de Camargo Beltrão**

CEFET-PR - Avenida Sete de Setembro 3165, Curitiba, Paraná - CEP 80.230-901  
beltrao@cefetpr

**Resumo:** *As novas exigências de processo advindas com a utilização de linhas flexíveis de manufatura conduziram à investigação do rendimento de insertos cerâmicos no fresamento frontal de ferro fundido cinzento GG25. O objetivo deste artigo é o de avaliar a condição de desgaste de insertos cerâmicos  $Si_3N_4$  frente a diferentes solicitações de processo, durante o desbaste à seco das faces de blocos de motor. O trabalho experimental foi realizado variando-se a velocidade de corte, o avanço por rotação, e a estratégia de usinagem. As variáveis de controle foram o desgaste de flanco dos insertos de corte e o índice de ruído em processo. As melhores condições de processo foram obtidas com menor valor de velocidade de corte ( $v_c$ ) e maior valor de avanço por dente ( $f_z$ ).*

**Palavras-chave:** *Desgaste de flanco, Fresamento Frontal, Ruído em processo.*

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico na área de usinagem envolve uma série de fatores. Segundo König e Klocke<sup>(1)</sup> desde a modernização de maquinário, em grande parte beneficiada pelo desenvolvimento da eletrônica, da mecânica de precisão e da utilização de novas técnicas e processos, passando pelo surgimento de novos materiais de construção mecânica e de ferramentas de corte. Dentro deste contexto a otimização de processos é um dos fatores de maior importância, visto que em grandes volumes de produção, pequenos ajustes podem ter grande significância. Para isso há necessidade de se determinar parâmetros de processo adequados, de maneira a resolver os problemas específicos inerentes às peculiaridades de cada operação.

Com a introdução de novos sistemas de manufatura “chamados sistemas flexíveis de produção”, houve a necessidade de realizar investimentos em pesquisas visando à otimização de processos. Como exemplo pode-se citar o fresamento de blocos de motores, presentes atualmente nas plantas de usinagem mais modernas deste componente. Dentro desta área de usinagem, ocorrem em alguns casos uma baixa vida útil das ferramentas que utilizam insertos cerâmicos, em função da pouca rigidez proporcionada pela fixação adotada em alguns sistemas flexíveis (sistemas que são utilizados para a usinagem de “n” produtos). Diante disto, a necessidade de avaliar as características da ferramenta sob influência das condições de corte é fundamental para assegurar um desempenho adequado ao processo. Com a evolução das cerâmicas de corte houve um aumento da sua aplicação na manufatura automatizada, principalmente devido a melhora das suas propriedades de tenacidade. Segundo Al e Li<sup>(2)</sup> os motivos que fazem com que as cerâmicas de corte não possuam uma maior

aplicação ainda estão relacionados ao seu comportamento frágil (característico dos materiais cerâmicos), a dispersão das propriedades de resistência mecânica e as quebras.

Neste artigo, são analisados os resultados dos ensaios de fresamento frontal, na condição de desbaste a seco de blocos de motor (de ferro fundido cinzento - GG25), com uma fresa de facear dotada de insertos cerâmicos de  $Si_3N_4$  (KY3500 - micro grão). Os ensaios foram realizados na planta de usinagem de blocos de motores da Renault do Brasil, sediada em São José dos Pinhais, que possui em sua linha uma operação de fresamento crítica em relação à baixa vida útil da ferramenta de corte e elevado ruído em processo. Além da otimização de processos, outra crescente preocupação das indústrias refere-se aos aspectos de segurança do trabalho, uma vez que os índices de ruído provocados no interior das linhas de manufatura devem atender à normas específicas de legislação. Neste caso, os níveis de ruído provenientes do processo, bem como o desgaste de flanco máximo observado nas arestas dos insertos, foram avaliados em função da velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f_z$ ) e estratégia de usinagem. Vale ressaltar que este artigo é parte de um trabalho que está em curso, onde será realizada uma ampla pesquisa, avaliando o comportamento de quatro diferentes ferramentas frente à diversas solicitações de corte.

## 2. CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DO FRESAMENTO FRONTAL

No fresamento, a remoção de material e a geração da superfície usinadas ocorrem em decorrência do movimento relativo entre peça e ferramenta. Há dois movimentos a considerar, o de rotação da ferramenta e o de avanço da peça. Segundo Sandvick<sup>(3)</sup>, suas vantagens estão relacionadas com a variedade de formas e superfícies que podem ser geradas, na qualidade do acabamento da superfície usinada e nas altas taxas de remoção de cavaco.

No fresamento, o processo de corte é intermitente e o cavaco possui uma espessura variável. A cada revolução da ferramenta, seus gumes removem individualmente uma certa quantidade de material da peça. Distinguem-se dois métodos de fresamento, o frontal e o periférico, cada um com suas vantagens e desvantagens. No fresamento periférico a superfície fresada se encontra, de modo geral, paralela ao eixo da fresa, sendo a profundidade de corte ( $a_p$ ) significativamente maior que a penetração de trabalho ( $a_e$ ). No fresamento frontal, a penetração de trabalho é denominada largura de engajamento ( $a_e$ ) e esta é consideravelmente maior que a profundidade de corte ( $a_p$ ), sendo a superfície da peça gerada pelos dois gumes da ferramenta (gume principal e gume secundário). Segundo König e Klocke<sup>(1)</sup>, a vida útil das ferramentas é maior que os valores usuais no torneamento, pois se trabalha com elevado custo de ferramentas e grande tempo de troca das mesmas. O processo de fresamento é tanto usado para o desbaste quanto para o acabamento. Para a usinagem em peças que são objeto de estudo neste artigo, Stemmer<sup>(4)</sup> recomenda que, o diâmetro da fresa utilizada no fresamento frontal deve ser maior do que a largura a ser fresada ( $D > 1,5 \times a_e$ ). Com isso, a espessura do cavaco na entrada será igual ou maior do que 80% do avanço por dente e o impacto inicial se dará afastado do gume, em um ponto menos vulnerável. Segundo Sandvick<sup>(3)</sup>, o posicionamento da fresa afeta o ângulo de entrada da pastilha, determinando se o choque inicial é absorvido por uma região mais ou menos resistente. Com fresas de diâmetro igual a largura da peça, a espessura do cavaco na entrada e saída fica muito pequeno, provocando elevado desgaste abrasivo.

## 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios com as alterações das variáveis de processo foram realizados em ambiente de produção, na linha de usinagem de blocos de motor da Renault do Brasil. A máquina utilizada para os experimentos foi um centro de usinagem CNC BZ-600, fabricado pela empresa GROB. O material utilizado nos ensaios é o bloco de motor de ferro fundido cinzento GG25 (HV 210 kgf/mm<sup>2</sup>, C 3,35%, Si 2,2%, Mn 0,5%, Cr 0,3%, Sn 0,1%, S 0,09%, Cu 0,24%), fornecido pela empresa de fundição Teksid do Brasil. As condições de usinagem estão descritas na Tabela 1 e foram determinadas em ensaios prévios. Estes ensaios consistiam em verificar, quais condições

seriam satisfatórias para a realização de testes de longa duração. Foram selecionados os parâmetros de corte através de catálogos técnicos e realizados testes prévios com estas condições. As condições de corte utilizadas que resultaram em menores lascamentos de borda nas peças usinadas foram selecionadas para os testes finais.

Tabela 1. Condições de usinagem utilizadas nos ensaios

Ferramenta	SPK-MFS1250045F4 (pastilha SNGN 120412)	
Geometria de corte da fresa	$\gamma_a = -7^\circ$	$\gamma_r = -8^\circ 30'$
Velocidade de corte $v_c$ (m/min)	1025, 1178 e 1296	
avanço (mm/r)	0,20 e 0,23	
Profundidade de corte (mm)	4	
Fluido de corte	seco	
Estratégia de usinagem	1-discordante	2-concordante

Para melhor conhecer a influência dos diversos parâmetros de processo ( $v_c$ ,  $f_z$ ) na vida dos insertos de cerâmica, foram realizados os ensaios relacionados abaixo:

- Variação da velocidade de corte ( $v_c$ ) sem variar a velocidade de avanço ( $v_f$ ), a fim de se variar o avanço por dente ( $f_z$ );
- Variação da velocidade de corte ( $v_c$ ) e a velocidade de avanço ( $v_f$ ) simultaneamente a fim de manter o avanço por dente ( $f_z$ ) constante.
- Variação da trajetória de usinagem (conforme estratégias definidas na Figura 1).

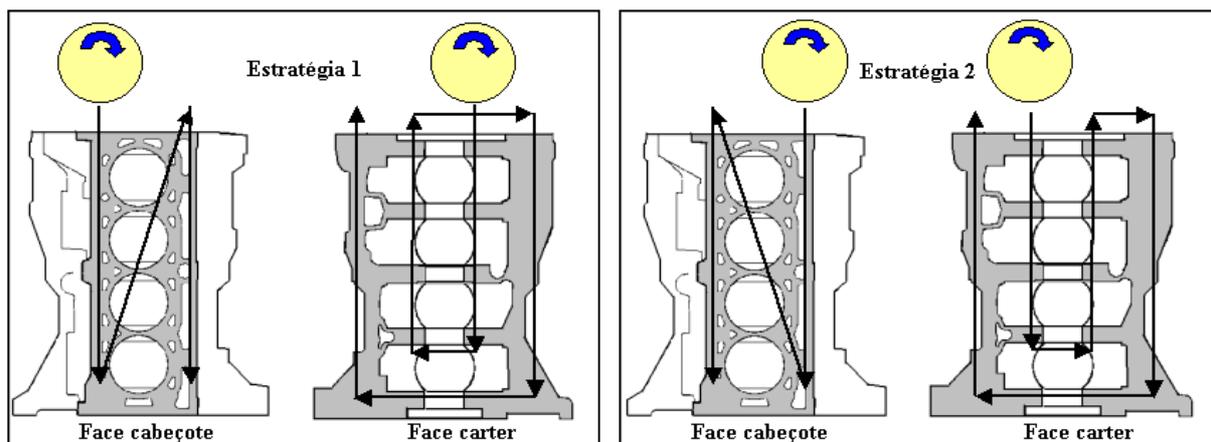


Figura 1. Estratègias de usinagem definidas para os ensaios

Para verificar a influência das variáveis de processo sobre os insertos de corte, foram monitorados durante os ensaios: o desgaste de flanco dos insertos de corte ( $VB_{m\acute{a}x}$ ); e o nível de ruído (dB) no processo. Através de testes preliminares com as condições de corte foi definido o critério de fim de vida para os ensaios, o mesmo foi estipulado em  $L_f=300$  m, em virtude do lascamento de borda que ocorre nos cantos da peça a partir desse valor. Para a avaliação do desgaste de flanco dos insertos foi utilizado um sistema de aquisição de imagens (câmera CCD) e posterior medição da marca de desgaste através do software corel draw. Para obter os valores médios da variável  $VB_{m\acute{a}x}$  foi aplicado um tratamento estatístico adequado ao conjunto de dados obtidos. Uma das distribuições estatísticas mais utilizadas na prática é a distribuição normal ou gaussiana. O teorema do limite central demonstra que a combinação de um grande número de fatores de natureza aleatória, com qualquer distribuição, aproxima-se da distribuição normal à medida que aumenta o número dos fatores envolvidos, e por causa dessa sua característica optou-se pelo seu uso nesta pesquisa. Sobre cada condição de ensaio foi realizada a medição dos níveis de ruído próximo a área de usinagem. Segundo a NR 15<sup>(5)</sup> os níveis de ruído contínuo ou intermitente são medidos em

decibéis (dB) com instrumento de pressão sonora (dosímetro de ruído da marca QUEST, modelo Q300) operando no circuito de compensação “A” e circuito de resposta lenta (SLOW). As leituras foram feitas próximas à altura do ouvido do trabalhador (1,60m), sendo monitoradas as últimas 10 peças de cada ensaio.

#### 4. RESULTADOS E ANÁLISES

Os gráficos da Figura 2 mostram os resultados de nível de ruído e desgaste de flanco máximo em função dos parâmetros de corte para a ferramenta ensaiada. Analisando o comportamento da ferramenta testada primeiramente quanto à variação da velocidade de corte (mantendo-se  $f_z$  constante em 0,20mm/rot), observa-se através do gráfico da Figura 2A um aumento do desgaste de flanco do inserto de corte. Esse aumento de desgaste é provocado diretamente pelo aumento do número de sulcos em forma de pente gerado pela velocidade de corte maior. Segundo Melo<sup>(6)</sup> isto ocorre porque a variação de temperatura ( $\Delta T$ ) é aumentada em virtude da utilização de maiores valores de velocidade de corte. No corte interrompido, a cada ciclo da fresa, cada inserto de corte sofre um grande impacto na entrada da peça. Esses impactos provocam um elevado carregamento compressivo que levam ao aparecimento destas trincas. Segundo Palma<sup>(7)</sup>, e Al e Li<sup>(2)</sup>, a ação cíclica do corte interrompido, junto com as tensões de tração e compressão provenientes das variações de temperatura na interface do cavaco com a ferramenta, promovem o aparecimento de trincas por fadiga de origem térmica.

Para as condições de processo da Figura 2C, foram alterados os valores de velocidade de corte, bem como o avanço por dente ( $f_z$ ) mantendo-se o mesmo valor de avanço de trabalho. Na condição de velocidade de corte de 1025 (m/min) e avanço por dente de 0,23 (mm/rot) houve menores valores de desgaste de flanco. Observa-se que o aumento do avanço por dente faz diminuir o número de sulcos em forma de pente sendo que, o aumento do desgaste está diretamente relacionado com o surgimento de maior número de trincas, sejam elas de origem mecânica ou térmica. Com o aumento do avanço por dente ( $f_z$ ), a ferramenta percorre um caminho de usinagem menor e conseqüentemente atrita menos com o material da peça. Segundo Ferraresi<sup>(8)</sup> o aumento do avanço, apesar de aumentar a temperatura média, tende a reduzir a variação de temperatura ( $\Delta T$ ), o que promove uma redução no número de sulcos desenvolvidos em forma de pente na aresta de corte. Os menores tempos de contato dos insertos de corte com o material da peça em virtude do aumento do avanço por dente provocam menos desgaste e uma maior taxa de remoção de cavaco.

Com relação às estratégias de usinagem foram definidas duas abordagens: a primeira com predominância de corte discordante, e a segunda com a mudança da região de corte discordante para o corte concordante. No fresamento discordante a espessura do cavaco cresce gradativamente desde zero até a espessura máxima. Antes que a aresta de fato inicie o corte, ela tenderá a escorregar pelo material com uma certa pressão, tanto a peça quanto a ferramenta cederão e estas têm a tendência de se afastar um pouco. A distância pela qual a aresta escorrega, antes de iniciar o corte, é resultado das propriedades da peça, da fixação e da rigidez da máquina. Segundo Sandvick<sup>(3)</sup> este fenômeno de escorregamento cria um desgaste maior na ferramenta do que o próprio corte.

Durante o fresamento concordante, este escorregamento não aparece, e a aresta inicia o corte imediatamente após o contato com o material, tendo no início a espessura máxima de corte. Acontece porém, um impacto inicial da aresta de corte contra a peça. Ao analisar a Figura 2A e C, nota-se menores valores de  $VB_{máx}$  (para  $v_c$  de 1025 e 1296 m/min) utilizando a estratégia 1. Com a estratégia 2, o impacto gerado no início do corte, mesmo em centros de usinagem isentos de folgas, provocou maiores danos às arestas de corte ocasionando valores de  $VB_{máx}$  superiores à estratégia 1. Os níveis de ruído presentes no processo para as condições da Figura 2B, nas condições de diferentes velocidades de corte com o mesmo valor de avanço por dente, demonstram uma redução na faixa de 01 decibél. Isto em parte pode ser creditado ao deslocamento da frequência natural do sistema para uma condição mais favorável, fazendo com que houvesse uma menor incidência de vibração durante a usinagem. Para a condição da Figura 2D, foi percebido que com a adoção de menores valores de velocidade de corte com um maior valor de avanço por dente, houve um menor

índice de ruído em processo. A questão do ruído em processo é crítica para maiores valores de velocidade de corte, influenciada diretamente pela condição não rígida do sistema de fixação, pouco favorável a soluções que gerem maiores pressões de corte sobre a superfície usinada (provocado diretamente pela geometria de corte duplo negativo da fresa testada). Outro ponto importante é o fato da própria ferramenta contribuir para a instabilidade do processo, pois a mesma possui cápsulas para a fixação dos insertos ao corpo da fresa, tornando assim a montagem suscetível à vibrações que elevam o nível de ruído em processo.

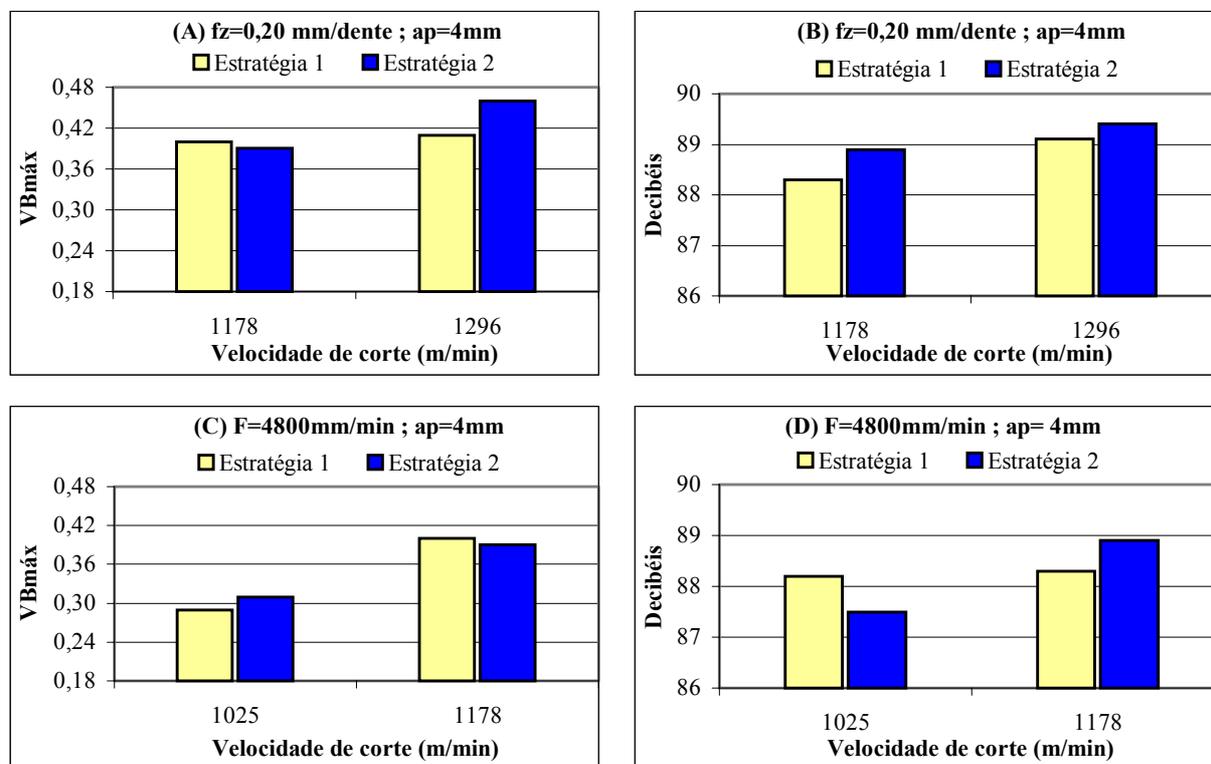


Figura 2. Resultados de nível de ruído e desgaste de flanco em função das variáveis de processo

Os mecanismos de desgaste encontrados nas arestas dos insertos resultam de processos físicos e químicos durante a operação de fresamento. Devido ao processo de corte, a aresta do inserto é carregada mecanicamente por tensões normais e tensões de cisalhamento na superfície de saída e na superfície de folga, sobrepostas por uma carga térmica, resultando em desgaste da ferramenta. Foram identificadas as seguintes características de desgaste nos insertos de cerâmica  $Si_3N_4$ :

- Microtrincas, que podem ser justificadas pelo ciclo térmico ocorrido no corte interrompido, aceleradas pela condição da peça estar lubri-refrigerada por processos anteriores e por haver uma limpeza contínua da base de apoio da peça com óleo refrigerante. O óleo molha a ferramenta aquecida pelo processo intermitente ocasionando a degradação da aresta de corte. Este fenômeno foi observado por Melo<sup>(6)</sup>, em seu estudo sobre a variação de temperatura no gume da ferramenta, causada pela ação do corte interrompido durante o fresamento frontal.
- Na superfície de folga dos insertos verificou-se a presença de sulcos paralelos à direção de corte, o que indica a predominância do desgaste por abrasão. Este desgaste é ativado devido ao material da peça usinada ser o ferro fundido cinzento, pois este contém na sua microestrutura carbeto duros, como o  $Fe_3C$ , que certamente atuaram como grãos abrasivos contra a superfície de folga da ferramenta.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu chegar às seguintes conclusões:

- Ocorre desgaste na aresta de corte pela ação de microtrincas que são provenientes dos ciclos térmicos e mecânicos, e que estas são aceleradas pela condição desfavorável do processo;
- Na superfície de folga dos insertos ocorre desgaste por abrasão, provocados pelo contato da ferramenta com os carbeto duros do ferro fundido cinzento.
- Com menor velocidade de corte e maior avanço por dente se obtém os menores valores de desgaste de flanco e índice de ruído, para o processo em estudo.
- A estratégia 2 gerou maiores desgastes de flanco devido à pouca rigidez de fixação do sistema.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem às empresas Renault do Brasil, Kennametal e as instituições de ensino CEFET-PR e UFSC, pelo apoio e pelos recursos colocados à disposição.

## 7. REFERÊNCIAS

1. KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Böhren**. 5. Ed., Berlim. Düsseldorf: VDI - Verlag, 1997.
2. AI, X.; LI, Z. **Advanced ceramic tools for machining applications I**. Key Engineering materials, 1994, v. 96, p. 143-196.
3. SANDVICK. **Modern Metal Cutting: a practical handbook**. Sweden: Sandvick, 1994.
4. STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 249 p.
5. NORMA REGULAMENTADORA, NR 15. Portaria 3214 Ministério do Trabalho, item 4, 1978.
6. MELO, A.C.A. **Estudo das Trincas de Origem Térmicas Geradas em Ferramentas de Metal Duro Durante o Fresamento Frontal**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2001, 173 p.
7. PALMAI, Z. **Cutting Temperature in Intermittent Cutting**. International Journal of Machine Tools Manufacture, 1987, v. 27(2), p. 261-274.
8. FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1977, v. 1, 751 p.

## ANALYSIS OF THE FACE MILLING PROCESS CHARACTERISTICS OF GRAY CASTING IRON USING CERAMIC TOOLS $Si_3N_4$

**Anderson Mueller**

Renault do Brasil - Avenida Renault, 1300 – Borda do Campo, S.J.P, Paraná - CEP 83.070-900  
anderson.mueller@renault.com

**Dr. Eng. Mec. Paulo André de Camargo Beltrão**

CEFET-PR - Avenida Sete de Setembro 3165, Curitiba, Paraná - CEP 80.230-901  
beltrao@cefetpr

**Abstract:** *Flexible line of manufacturing has demanded new processes studies. One of them, it is the analysis of the ceramic insert in the face milling process to machine gray casting iron (GG25). The goal of this study is to analyze the ceramic insert ( $Si_3N_4$ ) wear during the rough milling machining process using dry cutting conditions in a flexible machining system. The experimental work was accomplished as a variation of machining strategy and cutting conditions such as cutting speed, feed rate, keeping cutting depth at 4 mm. The parameters studied were the flank wear and the noise during the machining. The better conditions were found out with less cutting speed and more feed rate.*

**Keywords:** *Flank wear, Frontal milling, Noise in process.*