

UTILIZAÇÃO DE UM PLANEJAMENTO FATORIAL COMPLETO PARA ANÁLISE DA ALTURA DA REBARBA FORMADA NO FRESAMENTO FRONTAL DE BLOCOS MOTORES EM FERRO FUNDIDO CINZENTO

MSc **Luiz Carlos da Silva**

End.: Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás. Rua 75, Nº 46 – Centro – CEP 74055-110. Goiânia – Go. Fone: (62) 2125050. E-mail: lcds@cefetgo.br.

Prof. Dr **Anderson Clayton A. Melo**

End.: Universidade federal de Uberlândia. Rua João Naves de Ávila, 2121 - Bloco M. Faculdade de Engenharia Mecânica. Uberlândia - MG CEP 38408-100. Fone: (34) 32384148 Ramal 36. E-mail: acamelom@mecanica.ufu.br

Prof. Dr **Álison Rocha Machado**

End.: Universidade federal de Uberlândia. Rua João Naves de Ávila, 2121 - Bloco M. Faculdade de Engenharia Mecânica. Uberlândia - MG CEP 38408-100. Fone: (34) 32384148 Ramal 217. E-mail: alissonm@mecanica.ufu.br

MSc **Antônio Maria Souza Júnior**

End.: Fiat-GM Powertrain. Avenida do contorno da Fiat, 3455. Betim - MG CEP 32530-000. E-mail: antonio.maria@brf.fiat-gm-pwt.com

Resumo. *Este trabalho investiga a altura da rebarba formada no fresamento frontal em blocos motores de ferro fundido cinzento. Foram utilizados insertos de cerâmica e PCBN montados em uma fresa com diâmetro de 160mm e com capacidade de vinte e dois insertos, sendo dezoito de desbaste e quatro de acabamento. Durante os ensaios foram variados a velocidade de corte, o avanço, profundidade de corte e o desgaste de flanco máximo. A medição da altura da rebarba foi realizada em nove posições diferentes de cada uma das bordas (de entrada e de saída), variando a posição da ferramenta de corte em cada medição. A análise da variação da altura da rebarba foi realizada com o auxílio de um planejamento fatorial completo 2^5 , sendo as variáveis de entrada o avanço, a profundidade de corte, o desgaste de flanco e a posição da rebarba na borda. Observou-se a grande significância do desgaste de flanco máximo, da posição da rebarba na borda, do avanço, enquanto que a velocidade de corte, em apenas alguns casos. Devido à baixa profundidade de corte utilizada nos ensaios, quase não foi observada a significância da mesma.*

Palavras-chave: *Rebarba, Fresamento frontal, Bloco motor de ferro fundido cinzento.*

1. INTRODUÇÃO

A formação da rebarba ocorre em diversos processos de fabricação e o seu aparecimento é indesejável por vários fatores, dentre eles podem-se destacar: surgimento de eventuais acidentes que podem comprometer a integridade física dos operários; dificuldade de ajuste na linha de montagem

causado por alterações dimensionais devido à rebarba formada; durante o tratamento térmico, às vezes, ocorrem trincas nas bordas devido à concentração de tensões nas rebarbas; em escoamentos, compromete o fluxo de líquidos e gases aumentando a perda de carga na tubulação.

Existem várias definições para rebarba, o que pode ser justificado pela sua formação nos diversos processos de fabricação. Define-se rebarba como sendo uma projeção indesejável de material formada pelo resultado do escoamento plástico na operação de corte ou cisalhamento, Ko & Dornfeld⁽¹⁾.

O estudo dos mecanismos de formação das rebarbas permite uma previsão no tamanho e formato das mesmas e a partir da manipulação dos principais parâmetros de usinagem, torna-se possível evitar ou, pelo menos, minimizar a sua geração.

A maioria dos trabalhos sobre rebarbas classifica estas de três formas diferentes: com base no mecanismo de formação, em função da aresta de corte da ferramenta geradora da rebarba e usando a forma e a direção da rebarba como critérios.

Gillespie & Blotter⁽²⁾, identificaram três mecanismos básicos: a deformação lateral envolvendo o fluxo do material para a superfície livre da peça, flexão do cavaco na mesma direção do corte quando a ferramenta chega ao final da peça e ruptura por tração do material entre a peça e o cavaco. As rebarbas geradas por estes mecanismos foram classificadas em quatro tipos diferentes: do tipo Poisson, de encurvamento (*Rollover*), de estiramento (*tear*) e de ruptura (*cut-off*).

Nakayama & Arai⁽³⁾, julgaram conveniente classificar as rebarbas pela aresta de corte da ferramenta que está envolvida na sua formação e pela direção que a rebarba é formada na borda.

Na classificação das rebarbas formadas no fresamento de faceamento Gillespie⁽⁴⁾ investigou a influência dos parâmetros de usinagem na dimensão e nos mecanismos de formação das mesmas. Foi proposta por ele a identificação usando o seguinte critério: Rebarba 1 – aparece no topo da borda, Rebarba 3 – aparece na borda perpendicular à superfície gerada, Rebarba 5 – rebarba de saída na direção do avanço, Rebarba 9 - na direção do corte, conforme a figura 1.

Kishimoto et al.⁽⁵⁾ investigaram a formação das rebarbas 5 e 9 e introduziram os termos de rebarba primária e secundária para identificar as etapas da sua formação e dimensões, determinando as condições de corte para o seu aparecimento.

A profundidade de corte e o ângulo de saída da fresa da peça (θ) são fatores determinantes na dimensão da rebarba 5 e 9. Eles observaram que para um dado ângulo θ existe um determinado intervalo de profundidade de corte responsável pela transição da rebarba primária para secundária, chamada de profundidade de corte de transição (a_{pt}), conforme mostra o gráfico da figura 2, onde h é a altura da rebarba.

No fresamento de faceamento, em pequenas profundidades, o corte será formado principalmente pela aresta secundária da ferramenta, gerando-se a rebarba primária. A medida em que a profundidade de corte aumenta, a participação da aresta secundária de corte diminui (dividindo a função do corte com a aresta principal) gerando-se a rebarba de transição. A geração da rebarba secundária acontece quando a ação do corte ocorre principalmente pela aresta principal da ferramenta de corte.

Observa-se que a rebarba secundária tem altura bastante reduzida em relação à rebarba primária. Devido ao seu tamanho reduzido, Kishimoto et al.⁽⁵⁾, Olvera & Barrow⁽⁶⁾ passaram a considerar as bordas formadas por rebarba secundária como regiões livres de rebarba.

Ao processo da retirada das rebarbas é dado o nome de rebarbação. Essa operação pode ser feita utilizando equipamentos apropriados como as estações para lavagem à alta pressão d'água, jateamento de abrasivos e as máquinas de eletro-oxidação, sendo estes instalados na planta da linha de produção. Outros recursos também utilizados são as ferramentas abrasivas operadas manualmente. As dimensões das rebarbas são parâmetros importantes na escolha do processo de rebarbação. Desta forma, torna-se necessário o estudo das dimensões das mesmas a partir das principais variáveis de usinagem.

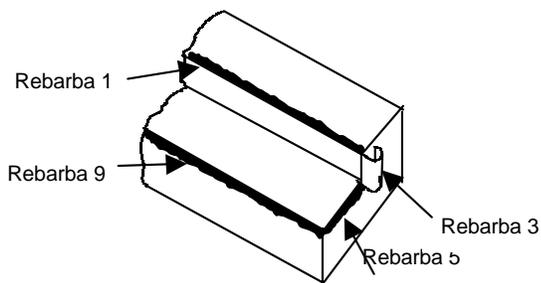


Figura 1 – Alguns tipos de rebarbas formadas na operação de fresamento (Gillespie, L. K. 1976).

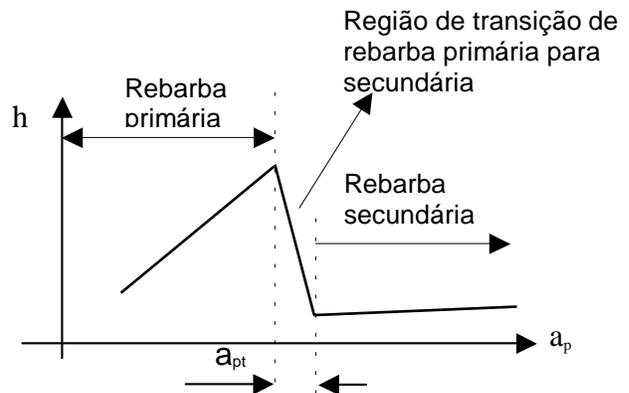


Figura 2 – Formação e transição da rebarba primária para secundária.

O objetivo principal deste trabalho foi verificar a influência do desgaste de flanco máximo (VB_{Bmax}), do ângulo de saída da ferramenta de corte em relação à peça - θ , da velocidade de corte (V_c), do avanço (f) e da profundidade de corte (a_p) na altura da rebarba formada no fresamento frontal de blocos de motores em ferro fundido cinzento, utilizando insertos de cerâmica e PCBN. Neste caso, aplicou-se um planejamento fatorial completo 2^5 , que foi uma ferramenta importante na análise dos resultados.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Foi elaborado um planejamento fatorial completo 2^5 considerando cinco variáveis de entrada, sendo elas a velocidades de corte (V_c), o avanço por dente (f_z), a profundidade de corte (a_p), o ângulo de saída da ferramenta de corte em relação à peça (θ) e o desgaste de flanco máximo (VB_{Bmax}). Como resposta foi medida a altura da rebarba formada. Para cada variável foram adotados dois níveis, conforme mostra a tabela 1.

Os ensaios foram divididos em duas partes, uma para insertos de cerâmica e outra de PCBN, sendo realizados 32 ensaios. Para cada ensaio foram realizadas três réplicas, totalizando em 128 ensaios para insertos de cerâmica e 128 ensaios para PCBN.

Tabela 1 – Variáveis utilizadas no planejamento fatorial e seus respectivos níveis

Fatores	V_c m/min	f_z mm/z	a_p mm	VB_{Bmax} Mm	θ ($^\circ$)
Nível ₁ (min.)	1000	0,04	0,2	0,00	120
Nível ₂ (Max)	1500	0,08	0,5	0,60	180

A peça fresada foi o bloco de motor FIRE de Ferro Fundido Cinzento GH 190UNI, fornecido pela Fiat GM Powertrain com a seguinte composição química: %C - 3,2 a 3,5; %Si - 1,5 a 2,0; %Cr - 0,20; %S - 0,15; %P - 0,10. A parte usinada foi o plano de apoio do cabeçote, onde é colocada a junta de união entre o bloco e o cabeçote. A figura 3 mostra a peça e a superfície usinada.

Os ensaios foram realizados em uma fresadora CNC modelo INTERACT 4, da Romi, com as seguintes características: potencia disponível de 7CV, rotação variável de 4 a 4000rpm, avanço variável de no máximo 5000mm/min, curso do eixo Z de 320 mm.

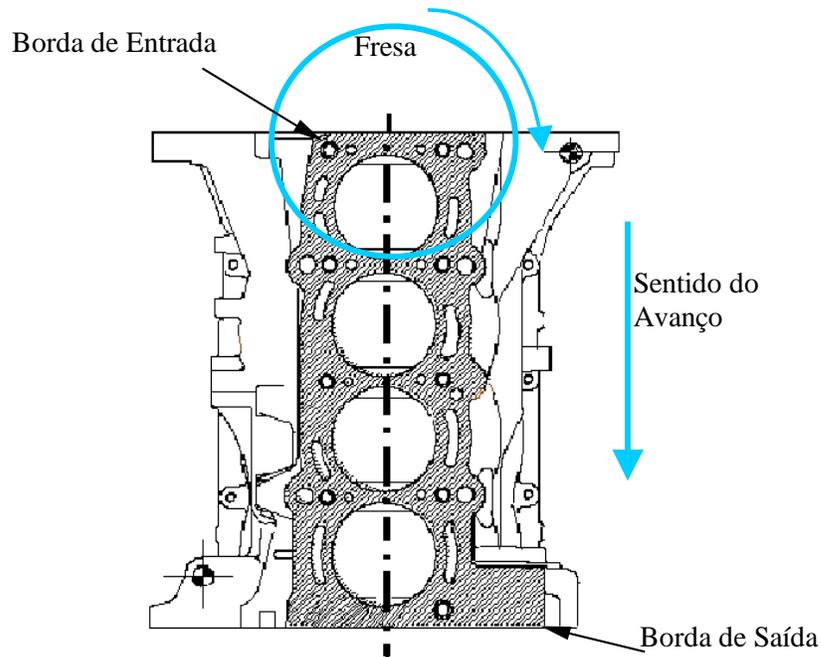


Figura 3 - Bloco do motor e plano usinado

A fresa utilizada tem diâmetro nominal de 160mm, denominada de F-2146.0.40.063.160 fornecida pela Walter do Brasil. É constituída de vinte e dois alojamentos para insertos com geometria octo. Dos vinte e dois alojamentos tem-se dezoito para insertos com geometria de desbaste, e quatro, com geometria alisadora, conforme mostrado em detalhe na figura 4. A figura 5 mostra os insertos utilizado nos ensaios.

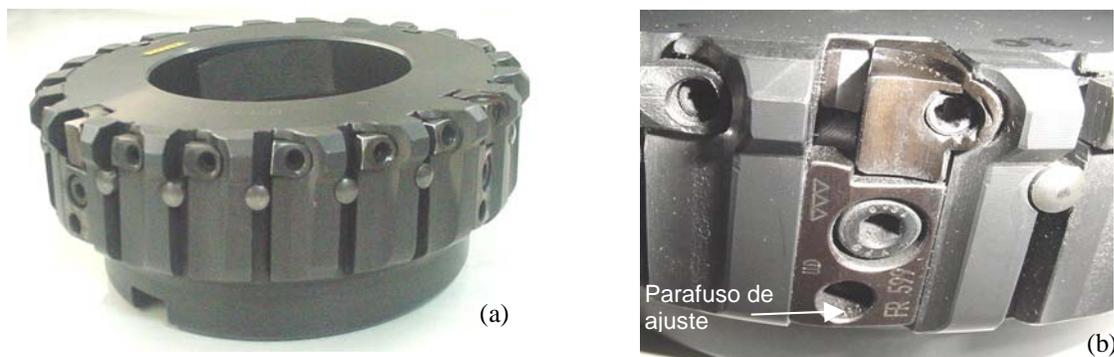


Figura 4 – (a) Fresa utilizada nos ensaios. (b) Detalhe do Parafuso de ajuste dos insertos alisadores.

Os alojamentos dos insertos alisadores possuem regulagem no sentido axial para garantir a planaridade entre eles e os insertos de desbaste e o bom acabamento superficial.

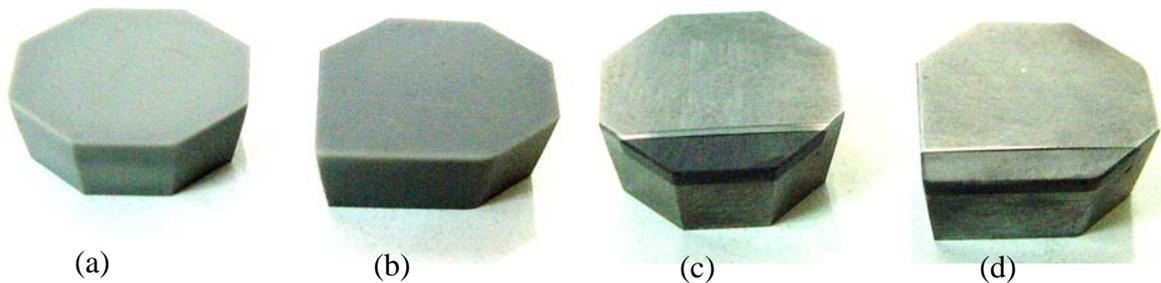


Figura 5 – Ferramentas utilizadas nos ensaios. Inserto de cerâmica (a) desbaste, (b) alisadores. Insertos de PCBN (c) desbaste, (d) alisadores

Os inserts utilizados são de geometria ISO do tipo Octo – OPHN0504 – AZTM e os alisadores do tipo OPHX0505ZZRA27TM. As ferramentas de cerâmica foram fornecidas pela Walter do Brasil, sendo uma cerâmica a base de Si₃N₄. As de PCBN da mesma forma, foram fornecidas pela Walter do Brasil, sendo constituída por uma placa de PCBN brasada em uma base de metal duro.

O sistema de medição da rebarba adotado foi desenvolvido pela equipe de pesquisadores do LEPU da UFU. O equipamento consiste do circuito aberto de um medidor de continuidade. O circuito se fecha quando o apalpador encontra uma pequena extensão da peça, no caso, a ponta da rebarba. No instante em que o circuito se fecha, entra em funcionamento um indicador de continuidade luminoso e sonoro. A altura da rebarba, então, pode ser lida no painel da fresadora. A figura 6 mostra o esquema do dispositivo com seus respectivos componentes.

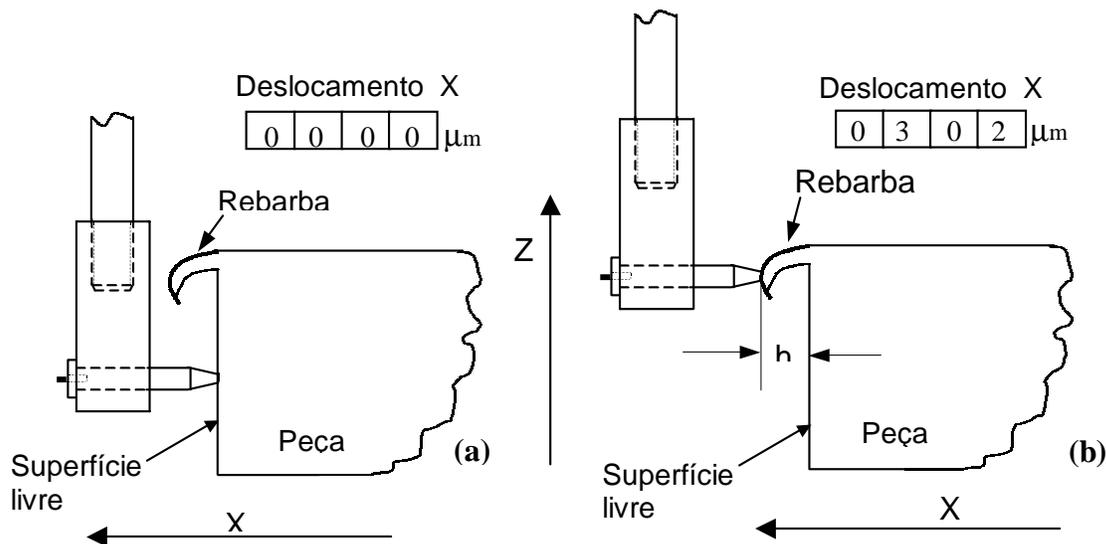


Figura 6- Esquema de medição da rebarba

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização de todos os ensaios foi elaborada uma matriz de contraste mostrando a média da altura da rebarba, os efeitos principais e os efeitos de interação, conforme apresentados nas tabelas 2 e 3 para inserts de cerâmica e PCBN, respectivamente.

A análise da significância dos efeitos principais e de interação podem ser determinados pela equação matricial 1, onde “y” é o do valor numérico da significância, “X” é a matriz do coeficiente de contraste completa, 32x16, retirado da tabela 2 para cerâmica e da tabela 3 para PCBN e “h” é a média da altura das rebarbas.

$$y = X^t h \quad (1)$$

Após a obtenção do valor numérico da significância dos efeitos, os mesmos devem ser divididos por um fator que dependerá do planejamento. Para planejamento fatorial 2^k o divisor para os efeitos será 2^{k-1} e 2^k para a média.

Os valores do erro padrão, representado por “ S_{efeito} ”, foram obtidos através da equação 2, sendo “ s ” a estimativa da variância conjunta e “ n_n ” o número de repetições para cada ensaio. A estimativa da variância conjunta é dada pela média aritmética da variância para os trinta e dois ensaios e pode ser determinado pela equação 3.

Tabela 2 – Matriz do coeficiente de contraste dos efeitos principais, de interação e altura da rebarba para insertos de cerâmica.

Nº do Ens.	M	Vc	f	ap	VB _B	θ	Vcf	Vca _p	VcVB _B	Vcθ	fa _p	fVB _B	fθ	a _p VB _B	a _p θ	VB _B θ	$\bar{h}(\mu\text{m})$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	255,83
2	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	250,08
3	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	270,50
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	304,67
5	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	242,58
6	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	189,17
7	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	284,83
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	244,67
9	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	84,58
10	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	76,75
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	91,42
12	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	87,67
13	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	68,25
14	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	76,92
15	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	94,00
16	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	96,08
17	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	249,83
18	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	232,08
19	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	235,33
20	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	189,83
21	+1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	202,33
22	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	189,00
23	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	268,33
24	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	227,83
25	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	61,25
26	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	50,33
27	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	37,00
28	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	45,25
29	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	46,58
30	+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	49,25
31	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	69,00
32	+1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	43,08

$$S_{\text{efeito}} = \sqrt{\frac{s^2}{n_n}} \quad (2)$$

$$s^2 = \frac{V_1 s_1^2 + V_2 s_2^2 + \dots + V_N s_N^2}{V_1 + V_2 + \dots + V_N} \quad (3)$$

Com a ajuda de recursos computacionais as resoluções das equações 1, 2 e 3 tornaram-se mais rápidas e confiáveis. Portanto, os valores dos efeitos principais e de interação juntamente com o erro padrão de cada efeito estão assim distribuídos.

Tabela 3– Matriz do coeficiente de contraste dos efeitos principais, de interação e altura da rebarba para insertos de PCBN.

Nº do Ens.	M	Vc	f	ap	VB _B	θ	Vcf	Vca _p	VcVB _B	Vcθ	fa _p	fV _{BB}	fθ	a _p VB _B	a _p θ	V _{BB} θ	$\bar{h}(\mu\text{m})$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	152,00
2	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	139,33
3	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	128,83
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	187,83
5	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	108,00
6	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	117,33
7	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	168,83
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	135,33
9	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	106,00
10	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	79,17
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	116,00
12	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	134,33
13	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	92,17
14	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	86,67
15	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	110,50
16	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	96,33
17	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	150,33
18	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	64,00
19	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	93,83
20	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	154,83
21	+1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	69,33
22	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	88,67
23	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	129,67
24	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	80,00
25	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	100,00
26	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	72,33
27	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	104,67
28	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	103,67
29	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	87,33
30	+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	72,83
31	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	106,83
32	+1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	91,50

Para insertos de cerâmicas.

Efeitos Principais

$$V_c = 13,06 \pm 19,403; \quad f_z = -16,54 \pm 19,403; \quad a_p = 8,15 \pm 19,403; \quad VB_{Bmax} = 175,46 \pm 19,403 \text{ e} \\ \theta = 32,60 \pm 19,403.$$

Efeitos de interação

$$V_c f_z = -0,85 \pm 19,403; \quad V_c a_p = -6,92 \pm 19,403; \quad V_c VB_{Bmax} = 9,71 \pm 19,403; \quad V_c \theta = -4,81 \pm 19,403; \\ fa_p = 16,42 \pm 19,403; \quad fV_{Bmax} = -10,34 \pm 19,403; \quad f\theta = -12,16 \pm 19,403; \quad a_p VB_{Bmax} = 9,26 \pm 19,403; \\ a_p \theta = 7,46 \pm 19,403; \quad V_{Bmax} \theta = -1,63 \pm 19,403.$$

Observa-se uma razoável significância do ângulo de saída da ferramenta da peça e do desgaste de flanco da ferramenta. A dimensão da significância desse último tornou os outros efeitos sem nenhuma

significância, pois seus valores podem ser nulos. A não significância da V_c , f , a_p e a suas interações, tornou o planejamento fatorial 2^5 adotado pouco interessante. Então deve-se adotar dois planejamento fatorial 2^4 sendo um para cada nível de desgaste da ferramenta.

A partir da matriz do coeficiente de contraste da tabela 2 torna-se possível a criação de duas outras matrizes, sendo uma para o VB_{Bmax} de 0,00mm e outra para VB_{Bmax} de 0,60mm, conforme pode ser observado nas tabelas 4 e 5. A partir delas, são fornecidos os efeitos utilizando o mesmo procedimento anterior.

Tabela 4 – Matriz do coeficiente de contraste para de cerâmica com $VB_{Bmax} = 0,00mm - 2^4$

Nº do Ens.	M	Vc	f	ap	θ	Vcf	Vcap	Vc θ	fap	f θ	ap θ	h(μ m)
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	84,58
2	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	76,75
3	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	91,42
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	87,67
5	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	68,25
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	76,92
7	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	94,00
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	96,08
9	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	61,25
10	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	50,33
11	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	37,00
12	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	45,25
13	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	46,58
14	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	49,25
15	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	69,00
16	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	43,08

Tabela 5 – Matriz do coeficiente de contraste para cerâmica com $VB_{Bmax} = 0,60 mm - 2^4$

Nº do Ens.	M	Vc	f	ap	θ	Vcf	Vcap	Vc θ	fap	f θ	ap θ	h(μ m)
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	255,83
2	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	250,08
3	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	270,50
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	304,67
5	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	242,58
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	189,17
7	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	284,83
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	244,67
9	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	249,83
10	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	232,08
11	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	235,33
12	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	189,83
13	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	202,33
14	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	189,00
15	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	268,33
16	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	227,83

Para insertos de cerâmica com $VB_{Bmax} = 0,00mm$

Efeitos Principais

$V_c = 3,33 \pm 8,01$; $f = -8,20 \pm 8,01$; $a_p = -1,11 \pm 8,01$; $\theta = 34,27 \pm 8,01$.

Efeitos de interação

$V_{cf} = -1,48 \pm 8,01$; $V_{cap} = 0,22 \pm 8,01$; $V_{c\theta} = -3,13 \pm 8,01$; $f_{ap} = 9,08 \pm 8,01$;

$$f\theta = -9,46 \pm 8,01; \quad fa_p = 9,08 \pm 8,01 \text{ e } a_p \theta = 2,4 \pm 8,01.$$

Os resultados obtidos apontam para uma situação onde os fatores mais importantes são: o ângulo de saída, o avanço, a interação entre o avanço e a profundidade e a interação entre o avanço e o ângulo de saída.

Portanto, nos ensaios realizados com insertos de cerâmica no início de vida da ferramenta ($VB_{Bmax} = 0,0$) observou-se que a variação da velocidade e da profundidade de corte não alterou significativamente a altura da rebarba. O mesmo ocorreu para outros efeitos de interações, como aqueles que envolve a velocidade de corte.

Para insertos de cerâmica com $VB_{Bmax} = 0,60\text{mm}$

Efeitos Principais

$$Vc = 22,77 \pm 11,13; \quad f = -26,88 \pm 11,13; \quad a_p = 17,42 \pm 11,13; \quad \theta = 30,97 \pm 11,13.$$

Efeitos de interação

$$Vcf = -0,212 \pm 11,13; \quad Vca_p = -14,07 \pm 11,13; \quad Vc\theta = -6,48 \pm 11,13; \quad fa_p = 23,76 \pm 11,13; \\ f\theta = -14,83 \pm 11,13; \quad a_p \theta = 12,53 \pm 11,13.$$

Observando a intensidade dos efeitos calculados, verificou-se que são vários os efeitos significativos para este caso, dentre eles, todos os efeitos principais: Vc, f, a_p e θ e quatro efeitos de interação: Vca_p , fa_p , $f\theta$ e $a_p\theta$.

O ângulo de saída da ferramenta da peça é o principal fator, pois a dimensão do seu efeito (30,97) é o maior. O avanço influencia de forma negativa (-26,88), ou seja, o seu aumento faz reduzir a altura da rebarba.

A velocidade de corte tem um comportamento semelhante à profundidade de corte, pois é pequena a diferença entre seus efeitos. Quanto ao efeito de interação entre as duas variáveis, apesar de pequeno (-14,07) em relação ao erro padrão, ainda sim são significantes, influenciando de forma negativa o crescimento da rebarba.

A situação é um pouco diferente para os insertos de PCBN, a dimensão de seus efeitos estão assim distribuídos.

Efeitos Principais

$$Vc = 7,51 \pm 10,85; \quad f = -22,34 \pm 10,85; \quad a_p = 15,36 \pm 10,85; \quad VB_{Bmax} = 25,48 \pm 10,85, \\ \theta = 24,30 \pm 10,85$$

Efeitos de interação

$$Vcf = 10,50 \pm 10,85; \quad Vca_p = -5,48 \pm 10,85; \quad VcVB_{Bmax} = -3,32 \pm 10,85; \quad Vc\theta = -6,76 \pm 10,85; \\ fa_p = 2,23 \pm 10,85; \quad fVB_{Bmax} = -1,42 \pm 10,85; \quad f\theta = -2,31 \pm 10,85; \quad a_pVB_{Bmax} = 6,36 \pm 10,85; \\ a_p\theta = 0,67 \pm 10,85; \quad VB_{Bmax}\theta = 14,05 \pm 10,85.$$

Conforme se pode notar pelos cálculos, a velocidade de corte tem pouca influência na formação da rebarba. Apesar da pequena dimensão do efeito para a profundidade de corte, o mesmo ainda é significativo. O efeito de interação do desgaste da ferramenta mais o ângulo de saída da ferramenta de corte da peça (θ) se mostrou importante na formação da rebarba, enquanto outras interações não foram significativas.

4. CONCLUSÕES

1. Através do planejamento fatorial observou-se que a rebarba é dependente principalmente do desgaste de flanco máximo e do ângulo de saída da ferramenta de corte da peça.
2. Em todos os casos o avanço influenciou a formação da rebarba de forma negativa, ou seja o aumento do avanço proporcionou a redução da altura da rebarba.

3. Nos ensaios de Cerâmica com $VB_{B_{max}}$ de 0,00mm e em todos ensaios de PCBN a velocidade de corte não influenciou na altura da rebarba..
4. Para os ensaios de cerâmicas com $VB_{B_{max}}$ de 0,00mm, a profundidade de corte teve influência na altura da rebarba, apenas na interação com o avanço.

5. AGRADECIMENTOS

À FIAT GM Powertrain, pelo fornecimento dos blocos e ferramentas e ao IMF – Instituto Fabrica do Milênio, FAPEMIG, CAPES e CNPq, pelo apoio financeiro às pesquisas do LEPU.

6. REFERENCIAS

1. Ko, S. L. and Dornefeld. D.A.,1991, “**A Study on Burr Formation Mechanism**”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, 75-87pp.
2. Gillespie, L. K. and Blotter, P. T., 1976, “ **The Formation and Properties of Machining Burrs**”, 6.
3. Nakayama, K. and Arai, M., 1987, ”**Burr Formation in Metal Cutting**”, Ann.,CIRP, pp.33-36. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, pp.66-74.
4. Gillespie, L. K. 1976, “**Burr Produced by End-Milling**”. BDX-613-1503, Bendix Co Kansas City Division.
5. Kishimoto, W., Miyake, T., Yamamoto, A., Yamanaka, K., and Tacano, K., 1981 “**Study of Burr Formation in Face Milling**”. Bull. Japan Soc. of Prec. Eng. Vol 15 No 1, pp. 51-52.
6. Olvera, O. and Barrow, G., 1996, ”**An Experimental Study of Burr Formation in Square Shoulder Face Milling**”, Int. J. Mach Tools and Manufact., pp. 1005-1020.

APPLICATION OF A FACTORIAL DESIGN FOR STUDING THE BURR FORMATION DURING FACE MILLING OF MOTOR ENGINE BLOCKS.

Abstract. *This paper studies the burrs formed during face milling of motor blocks. Ceramic and PCBN inserts were used mounted on a milling cutter with 160mm of diameter and capacity for twenty-two inserts, eighteen of them for roughing and four for finishing. During the tests the cutting speed, feed rate, depth of cut and flank wear were varied. The burr was measured in nine different positions of the edge of the workpiece varying thus the tool exit angle. It was verified that the burr height was smaller when using PCBN than ceramic inserts. The wear and the tool exit angle had significant influences on the burr size. The smaller the flank wear and the exit angle, the shorter the burr. The burr sizes were reduced with increasing the feed rate and in some case with the depth of cut, but increases when the cutting speed was enhanced.*

Keywords: *Burr, Milling operation, Motor engine blocks.*