

OTIMIZAÇÃO DO FRESAMENTO FRONTAL DE DIVERSAS SUPERFÍCIES DE FERRO FUNDIDO CINZENTO UTILIZANDO FERRAMENTA DE CERÂMICA.

Jorge Antonio Giles Ferrer

Professor do Centro SENAI Fundação Romi Formação de Formadores
Santa Bárbara d'Oeste – SP e-mail: jorge@senaiformadores.com.br

Anselmo Eduardo Diniz

Diretor da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP – SP
e-mail: anselmo@fem.unicamp.br

Resumo. *Este trabalho pretende abordar alguns problemas gerados pelo fresamento frontal de superfícies planas que apresentam diversas discontinuidades. Atualmente, a maior parte dos processos de fresamento com fresas de facear em peças de ferro fundido cinzento ainda são realizados com ferramentas de metal duro. As ferramentas cerâmicas de nitreto de silício têm mostrado desempenho bem melhor que as de metal duro neste tipo de operação. Porém, o uso de ferramenta cerâmica na operação de fresamento, principalmente em superfícies com discontinuidades é olhado com desconfiança, devido à menor tenacidade deste material. Este trabalho visa avaliar estas ferramentas cerâmicas no fresamento de superfícies irregulares de ferro fundido cinzento, tentando reconhecer os mecanismos que causam os desgastes/avarias destas ferramentas nestas operações. Para isto, ensaios foram realizados em peças de ferro fundido real (carcaça de compressor do sistema de freio de ônibus), que contém 3 superfícies a serem fresadas com características diferenciadas, em condições de desbast, com ferramenta cerâmica de nitreto de silício em diferentes velocidades de corte. Dentre as conclusões se destaca o fato de que a ferramenta cerâmica de nitreto de silício apresenta tenacidade suficiente para ser utilizada em processos de fresamento similares aos utilizados neste trabalho, já que o lascamento não foi fator predominante para o fim da vida da ferramenta.*

Palavras-Chave : *Fresamento, Ferro fundido cinzento, Cerâmica, Desgaste de ferramenta.*

1. INTRODUÇÃO

Muito se tem pesquisado sobre o processo de fresamento frontal no tocante à posição relativa fresa-peça, diâmetro da fresa em relação à largura da superfície usinada, melhores condições de usinagem, sentido de corte, etc. Porém, quase a totalidade destes estudos teórico/práticos são realizados usinando-se superfícies planas sem interrupções, o que nos processos industriais raramente ocorre.

Na prática normalmente encontra-se superfícies interrompidas com furos e geometrias complexas, com larguras de corte variáveis, nas quais fresas de diâmetro grande são necessárias para usinar somente uma parte da superfície da peça (que apresenta largura compatível com o diâmetro da fresa), sendo que em outras partes da peça que apresentam larguras menores, a fresa opera em condições desfavoráveis. Isto gera vibração e desgaste prematuro das pastilhas. Também é comum a existência de superfícies da peça com rebaixos de 90° , o que faz com que todas as outras superfícies tenham que ser usinadas com uma fresa projetada com este ângulo de posição, para minimizar o custo de ferramental e diminuir os tempos de trocas de ferramenta. Porém, a utilização de uma fresa com ângulo de posição de 90° tende a acelerar o desgaste das pastilhas.

Além dos parâmetros de corte, a definição do sentido de corte é de fundamental importância para garantir maior vida útil da ferramenta, pois influencia diretamente nos diversos mecanismos de desgaste presentes. Cada sentido de corte apresenta limitações e sua influência deve ser analisada em função das diversas geometrias das peças a ensaiar.

Isto posto, os principais objetivos deste trabalho são:

- Entender o mecanismo de desgaste em ferramentas de cerâmica no fresamento de desbaste e acabamento de superfícies descontínuas de ferro fundido cinzento que apresentam geometrias diversas;
- Avaliar a influência da velocidade de corte, sentido de usinagem e posicionamento da ferramenta de corte na vida da ferramenta e na produtividade do processo de fresamento de superfícies descontínuas que apresentem características geométricas comuns com as peças ensaiadas.

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1. Ferramenta Cerâmica:

O material cerâmico possui algumas propriedades que são muito interessantes para uma ferramenta de usinagem, tais como: dureza a quente e a frio, resistência ao desgaste e excelente estabilidade química. Algumas propriedades, porém, fazem com que sua utilização na usinagem não seja tão fácil: baixa condutividade térmica, dificultando a transferência de calor e fazendo que a interface cavaco-ferramenta atinja temperaturas muito altas e, principalmente, baixa tenacidade, o que facilita o lascamento e quebra da ferramenta. Porém, muito se tem feito no sentido de aumentar a tenacidade deste material. Segundo Yeckley⁽¹⁾, as cerâmicas baseadas em Nitreto de silício chamadas de Sialons, são formadas por cristais de Si_3N_4 com uma fase intergranular de SiO_2 sinterizados na presença de alumina. A fase beta, composta por grãos alongados, de forma semelhante aos whiskers, aumenta a tenacidade e, a fase alfa, é composta por grãos que, dependendo do seu tamanho e composição, melhoram a dureza. Segundo Diniz et al⁽²⁾, o Sialon é o melhor cerâmico em termos de dureza a quente e resistência ao choque térmico, é bom com relação à tenacidade, porém é péssimo com relação à estabilidade química. Segundo Sandvik⁽³⁾, esse tipo de cerâmica representa a primeira opção para a usinagem do ferro fundido cinzento com elevadas taxas de remoção de cavaco, e é adequado para a usinagem a seco ou com refrigeração em velocidades de corte acima de 450 m/min. Possibilita um volume de remoção de cavaco quatro vezes maior que o metal duro e com velocidade de avanço até três vezes maior.

2.2. Desgastes e Avarias

Segundo Melo et al.⁽⁴⁾, a diferença entre desgaste e avaria pode ser analisada a partir da definição clássica de desgaste: “*Desgaste é a perda ou deslocamento de massa de um material causado por algum tipo de fenômeno tribológico*”. O desgaste em ferramentas pode aparecer na forma de uma cratera na superfície de saída da ferramenta, desgaste de flanco na superfície de folga ou como um entalhe que pode aparecer tanto na ponta como no extremo da aresta na região da profundidade de corte, normalmente na superfície de folga.

Os desgastes são caracterizados por perda ou deslocamento contínuo de material, ao longo da vida da ferramenta. Na usinagem, as ferramentas de corte devem resistir ao calor excessivo, elevadas pressões, abrasão e choque térmico. A temperatura de corte pode exceder os 1000°C e o calor extremo pode prejudicar o substrato e outros constituintes da ferramenta. Dentre os mecanismos causadores de desgaste em pastilhas de metal duro e cerâmica temos: abrasão mecânica, difusão, aderência ou *attrition* e oxidação (Trent⁽⁵⁾). No caso do material cerâmico, as temperaturas geradas pelo processo são muito superiores às típicas do mecanismo de *attrition*, presente na usinagem com metal duro.

Segundo Diniz et al.⁽²⁾, a difusão é um mecanismo que envolve a transferência de átomos de um material para outro e é fortemente dependente da temperatura, da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de cisalhamento secundária e da duração de contato. As cerâmicas puras são ótimas em relação à estabilidade química. Já os Sialons são ótimos em termos de dureza, porém péssimos com relação à estabilidade química, o que os fazem sensíveis ao mecanismo de difusão.

Na avaria da ferramenta também acontece uma perda ou deslocamento de massa, porém, de forma descontínua. Dentre as avarias, as mais comuns são: deformação plástica da aresta de corte, trincas térmicas/mecânicas, lascamento e quebra da ferramenta. O lascamento da ferramenta é mais freqüente durante o corte interrompido, como acontece no fresamento, e sua evolução pode provocar a quebra da ferramenta. Nessas condições a aresta de corte pode ser danificada devido ao

impacto ou à fadiga. Características das ferramentas, como dureza e tenacidade, geometria da aresta, parâmetros de corte e condições de entrada e saída da aresta no corte são variáveis importantes para prevenir o lascamento da ferramenta. O lascamento também pode ocorrer quando o inserto está saindo do corte. Pekelharing⁽⁶⁾ analisou o comportamento do plano de cisalhamento primário e observou que ele rotaciona e se torna negativo quando o inserto está saindo do corte (fenômeno chamado de *foot forming*). Este ângulo de cisalhamento negativo provoca uma mudança na velocidade do cavaco, produzindo esforços de tensão ao longo do comprimento de contato entre a superfície de saída da aresta e o cavaco. Esse processo acontece muito rapidamente de forma tal que, num momento, o esforço sobre a ferramenta é de compressão e, no outro, de tração, causando quebra da aresta se esta não for suficientemente tenaz. Este fenômeno é crítico quando a espessura de cavaco é grande na saída do corte discordante.

3. MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

O material usinado foi o ferro fundido cinzento com dureza entre 193-226 HBS, apresentando estrutura perlítica com pequenas áreas de ferrita e veios de grafita, com porcentagem de carbono entre 3,12-3,25%. A grafita foi classificada como do tipo A (ASTM A247) - irregular de orientação aleatória, de tamanho 4 -5 (considerado médio).

A pastilha utilizada tanto nos ensaios de desbaste quanto nos de acabamento era de Nitreto de Silício (Si_3N_4 - Sialon) classe ISO K20, código do fabricante KY3500⁽⁷⁾, de grão fino. Os ensaios foram realizados no Centro SENAI Fundação Romi Formação de Formadores. A máquina utilizada foi um centro de usinagem CNC Romi, Polaris V400, de 20 CV e 6000 RPM, usinagem a seco.

Os desgastes das ferramentas foram medidos utilizando-se um microscópio com ampliação de 60 vezes acoplado a uma câmera fotográfica. As arestas de corte utilizadas foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) com análise de energia dispersiva (EDS), para que se pudesse entender seus mecanismos de desgaste/avaria.

Três diferentes geometrias de superfície (peças 1, 2 e 3 respectivamente) foram fresadas, conforme mostram as Figuras 1, 2 e 3. Estas superfícies são idênticas às de um compressor de freio a ar. O desafio foi realizar a otimização da usinagem das três superfícies com uma única fresa. Pode-se ver que, para se usinar as três superfícies com a mesma fresa, é necessário que ela tenha ângulo de posição de 90° , devido ao rebaixo que deve ser usinado na Peça 1 e tenha no mínimo um diâmetro de 63 mm, devido a largura maior de parte da Peça 3. Porém, boa parte do corte das três superfícies vai ser feito com a largura da superfície bem menor que metade do diâmetro da fresa.

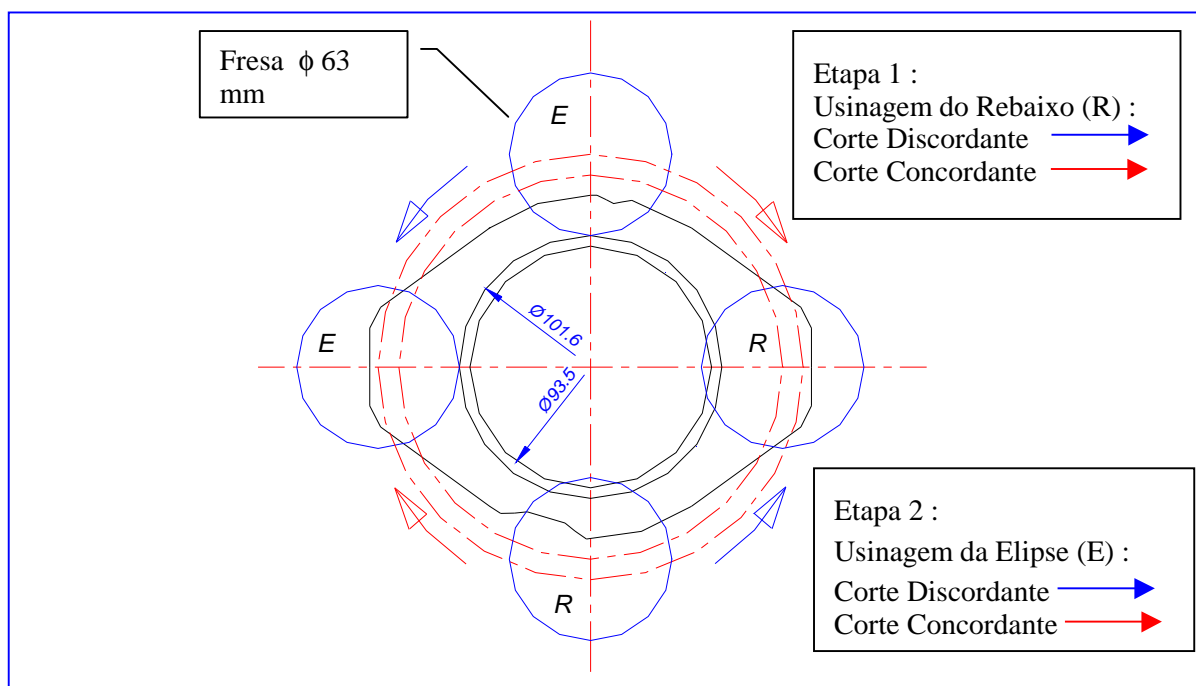


Figura 1 – Usinagem da Peça 1 nos sentidos concordante e discordante

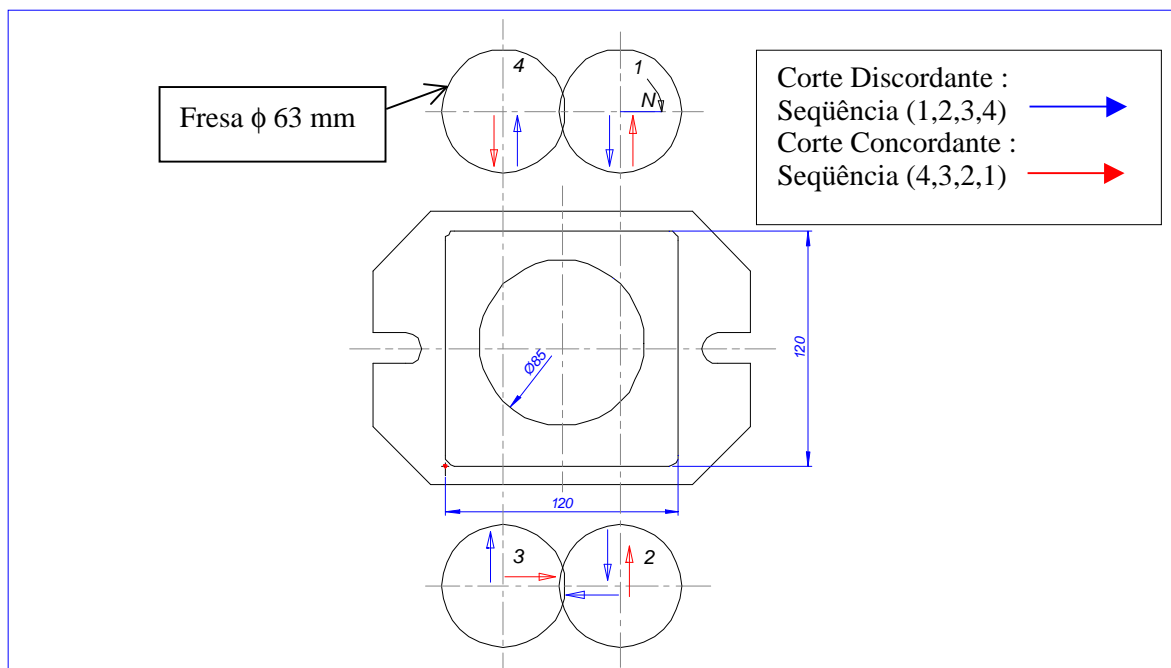


Figura 2 – Usinagem da Peça 2 nos sentidos concordante e discordante

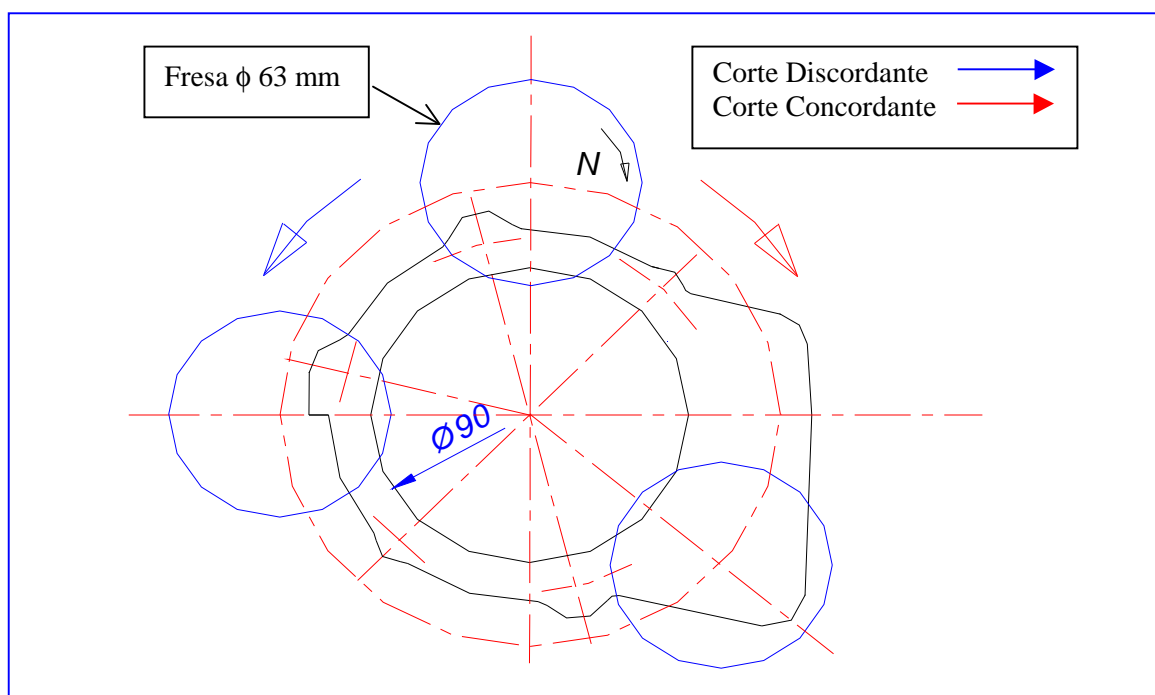


Figura 3 – Usinagem da Peça 3 nos sentidos concordante e discordante

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os ensaios nas três peças foram comparados, tomando como base o desgaste de flanco médio $V_{B\text{médio}}$ obtido a partir das três arestas mais críticas do jogo de oito pastilhas, sendo adotado como critério de fim de vida o valor de $V_{B\text{max}} = 0,2$ mm em 3 ou mais pastilhas ou lascamento acima de 0,6 mm em uma pastilha. Foram ensaiadas três velocidades de corte diferentes, 700 , 840 e 1000 m/min,. De fato, os ensaios foram feitos nos sentidos otimizados, tomando como base os resultados obtidos nos ensaios com ferramenta de metal duro (Ferrer e Diniz⁽⁸⁾). Somente na Peça 1 foi feito

ensaio em ambos os sentidos, confirmando que, também com pastilha cerâmica, o sentido mais apropriado é o concordante. Nas outras peças, o sentido adotado foi o discordante. O avanço por dente e a profundidade de usinagem foram mantidas constantes, sendo $f_z = 0,25$ mm e $a_p = 1$ mm.

4.1. Peça 1 (Elíptica)

O sentido discordante apresenta vários problemas: a espessura de cavaco é zero na entrada, inevitável pela existência do rebaixo, gerando elevado atrito na entrada da ferramenta na peça. Outro problema no sentido discordante é o fenômeno denominado *foot forming* relatado por Pekelharing⁽⁶⁾, que provoca lascamento. Esse problema é mais crítico quanto maior é a espessura de corte na saída da aresta de corte. Na peça 1, o corte atinge espessura máxima no diâmetro maior da elipse, a fresa usina nessa região crítica aproximadamente 25% do tempo de usinagem. O sentido concordante tem também uma desvantagem nesta peça: a linha de centro da fresa fica fora da peça aproximadamente 75% do tempo de corte. Portanto, o corte frequentemente começa com a parte mais externa da pastilha tocando a peça, incentivando seu lascamento.

Os resultados mostrados na Figura 4 indicam que o sentido concordante é melhor em termos de desgaste do que o sentido discordante. Este último provoca lascamento e o primeiro desgaste de flanco por difusão, contrariamente ao esperado, o que indica de que a pastilha cerâmica apresenta uma boa tenacidade, superior à esperada.

É importante destacar que no corte concordante, em que se tem o inconveniente da pancada aresta-peça na entrada do corte, não houve lascamento, mesmo na velocidade mais alta ($v_c = 840$ m/min). Porém, no corte discordante, em que não se tem a pancada na entrada, mas sim um forte atrito na entrada da aresta no corte. A explicação para isto é que, no discordante, o lascamento se deu por *foot forming* e não devido aos impactos.

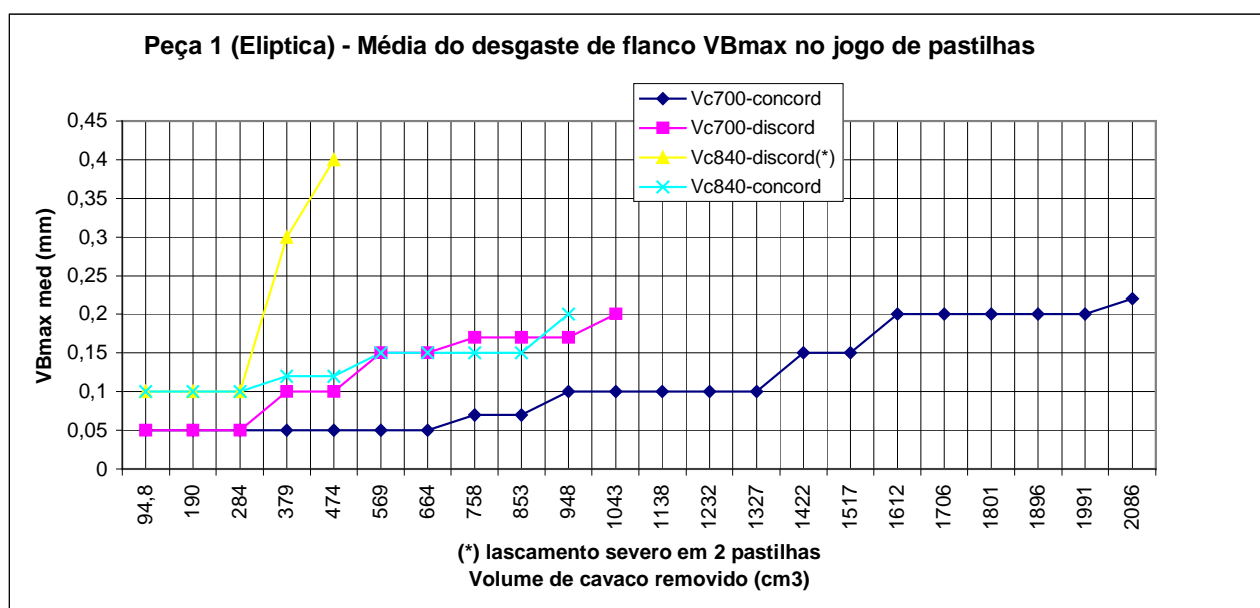


Figura 4 – Desgaste de flanco médio ao longo do ensaio - Peça 1

A Figura 5 mostra uma das arestas de corte da fresa do ensaio com $v_c = 840$ m/min no sentido discordante (maior desgaste dentre todas as ferramentas). O ensaio atingiu fim de vida por lascamento excessivo em duas pastilhas, após a passada 50. As outras seis pastilhas apresentaram pequeno desgaste de flanco por difusão. É possível que a alta velocidade de corte neste sentido tenha incentivado o mecanismo *foot forming* e provocado o lascamento da aresta na saída do corte, na região inferior do chanfro, atingindo grande parte da superfície secundária de folga. Este mecanismo é mais significativo quanto maior a espessura do cavaco na saída, que nesta peça corresponde à região do diâmetro maior da elipse. O resultado do EDS (Tabela 1) mostra que na superfície desgastada existe pequena presença de Fe proveniente do material da peça (ponto 3 da Figura 5) e que na região fronteira com a região desgastada (ponto 2) existe uma presença significativa de Fe. A região desgastada encontra-se bastante lisa, o que é próprio do processo

difusivo. Uma hipótese para o mecanismo de desgaste desta ferramenta é que o Fe difunde-se ou adere principalmente na fronteira do desgaste. Este ferro aí presente gera difusão entre material da ferramenta e este elemento e faz com que esta fronteira seja deslocada, aumentando o valor do desgaste. Na região já desgastada, a presença de Fe é pequena, pois o contato com a peça remove o excesso de ferro. No ponto 1, não foi possível verificar a presença de Fe por limitações do equipamento que não é capaz de analisar superfícies inclinadas.

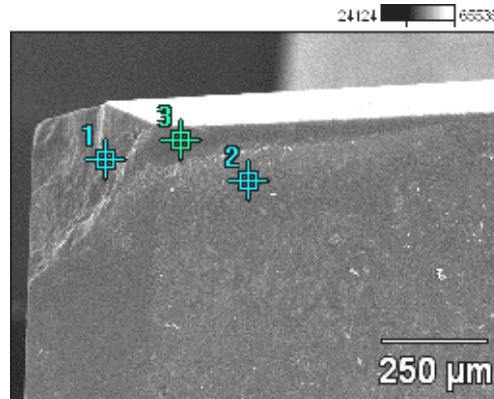


Figura 5 - Lascamento da pastilha - Peça 1 - ensaio 10 (x100) - $v_c = 840$ m/min discordante

Tabela 1 - Resultados do EDS - ensaio 10 (Concentração atômica %)

	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Zn</i>
<i>Pastilha 08 - ensaio 10_pt2</i>		65.64		28.70	2.73
<i>Pastilha 08 - ensaio 10_pt3</i>	0.27	94.59	1.04	4.10	

4.2. Peça 2 (Quadrada)

Para esta peça, foi ensaiado somente o sentido discordante. É importante notar que, nesta peça, em cerca de 30% do tempo de corte acontecem dois golpes de entrada da pastilha por volta da fresa e em nenhum momento a espessura de cavaco foi zero. Esta situação é muito favorável, pois minimiza o problema de desgaste por abrasão. Por outro lado, o fenômeno de lascamento por *foot forming* é desprezível, visto que a espessura de corte na saída da aresta de corte é pequena, atingindo somente o valor máximo em dois instantes (ponto de interseção da trajetória do centro da fresa e o círculo de diâmetro 85 mm), um tempo muito menor que no caso da Peça 1.

Estes ensaios confirmam que o sentido discordante não provoca lascamento e o desgaste de flanco é provocado por difusão. A velocidade de corte não influencia diretamente no desgaste da ferramenta. Como mostrado na Figura 6, quando se aumenta de 840 para 1000 m/min, observa-se um aumento da vida da ferramenta, devido à menor variação térmica da ferramenta, como consequência de uma maior temperatura da mesma na saída do corte e menor período de resfriamento.

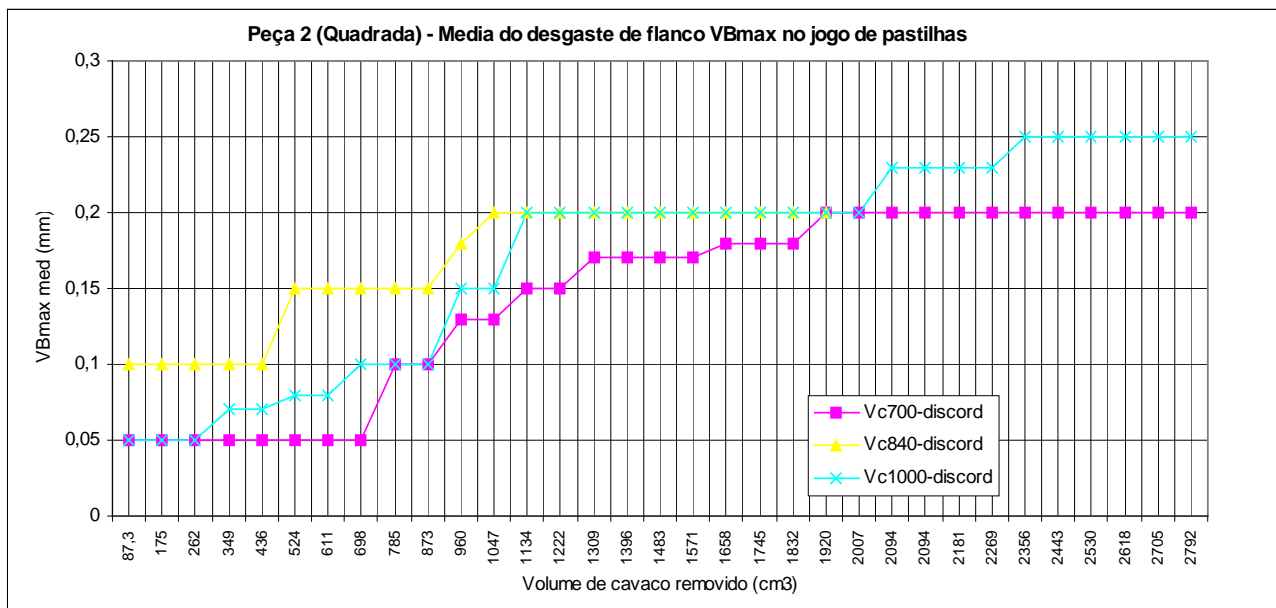


Figura 6 – Desgaste de flanco médio no final do ensaio- Peça 2

A Figura 7 mostra uma pastilha do ensaio com $v_c = 1000$ m/min. Este ensaio apresentou desgaste por difusão em todas as pastilhas, atingindo fim de vida após 130 passes. O ensaio foi prolongado até atingir 330 passes, quando as pastilhas atingiram desgaste uniforme com $V_B = 0,25$ mm. Não foi observado nenhum lascamento somente desgaste de flanco sem riscos abrasivos.

Como mostra o resultado da análise EDS (tabela 2), na superfície desgastada existe pequena presença de Fe proveniente do material da peça (ponto 1) e na região fronteira da área desgastada (ponto 2) existe uma forte presença de Fe. A região desgastada encontra-se bastante lisa, o que é próprio do processo difusivo.

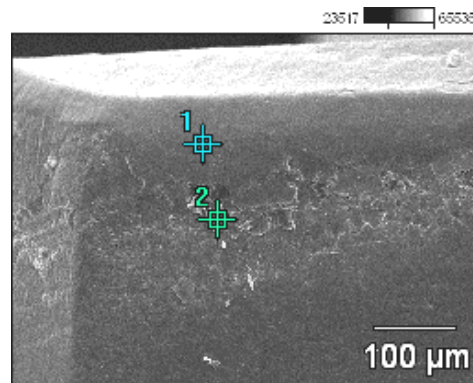


Figura 7 - Desgaste por difusão – Peça 2 - $v_c = 1000$ m/min, discordante

Tabela 2- Resultados do EDS – ensaio 9 (Concentração atômica %)

	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Zn</i>
<i>Pastilha 08 - ensaio 09_pt1</i>	1.49	3.52	77.10	8.71	7.89	
<i>Pastilha 08 - ensaio 09_pt2</i>		4.09	23.40	1.61	47.57	19.85

4.3. Peça 3 (Irregular)

Esta peça mostra que o desgaste é bastante sensível ao aumento da velocidade de corte (ver Figura 8). Isto acontece porque a usinagem desta peça acontece em baixa temperatura, devido à menor espessura média de cavaco. O sentido discordante provoca desgaste de flanco por difusão, embora existe uma leve tendência ao lascamento por *foot forming* em velocidades elevadas.

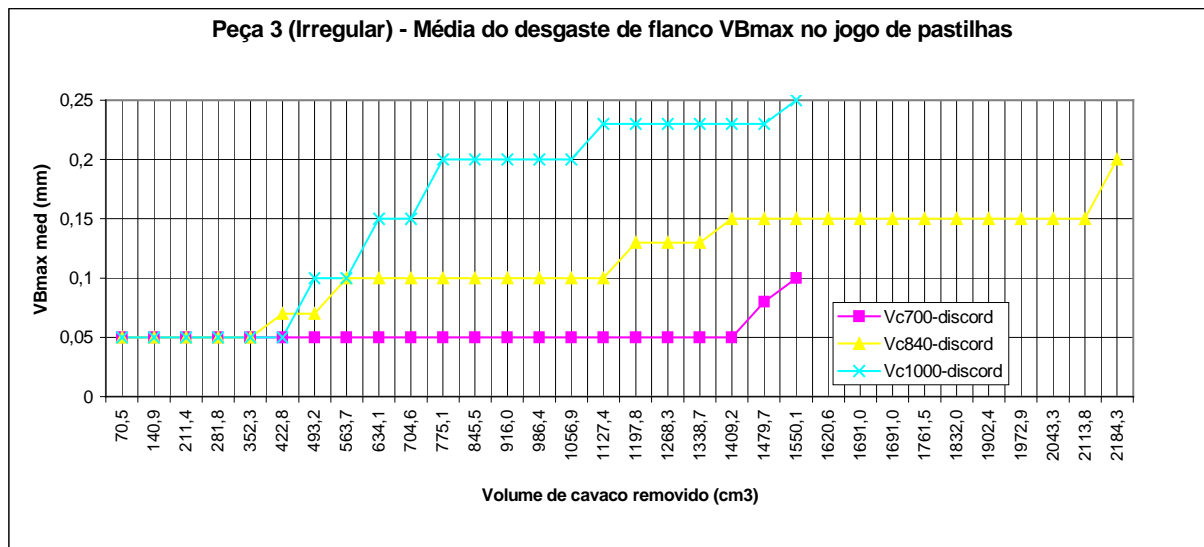


Figura 8 – Desgaste de flanco médio no final do ensaio- Peça 3

A Figura 9 mostra uma pastilha do ensaio com $v_c = 840$ m/min. Este ensaio gerou desgaste por difusão em todas as pastilhas, atingindo fim de vida após 320 passes, embora tenha sido continuado até 440 passes, quando todas as pastilhas atingiram $V_B = 0,2$ mm. O aspecto polido da superfície desgastada indica fenômeno difusivo. A Tabela 3 mostra que existe Fe na região fronteira do desgaste (ponto 2 da Figura 7) e nenhuma na região desgastada (ponto 1).

Tabela 3 - Resultados do EDS - ensaio 6 (Concentração atômica %)

	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Zn</i>
<i>Pastilha 08 - ensaio 06_pt1</i>	0.46	98.65		0.89		
<i>Pastilha 08 - ensaio 06_pt2</i>		83.28			10.95	5.77

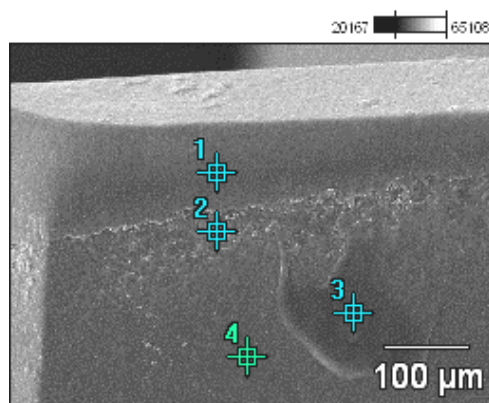


Figura 9 - Desgaste por difusão – Peça 3 - ensaio 6 (x200) $V_c = 840$ m/min, discordante

5. CONCLUSÕES

De acordo com o discutido neste trabalho, pode-se concluir para o fresamento frontal de superfícies de ferro fundido cinzento com ferramenta de material cerâmico que:

1. Em peças similares à peça 1, em que o corte discordante apresenta o inconveniente de se ter espessura de cavaco igual a zero na entrada do dente no corte e o corte concordante apresenta o inconveniente de se ter choque inadequado entre aresta e peça, já que em boa parte do tempo de corte a linha de centro da peça está fora da peça, o corte concordante apresenta melhor desempenho em termos de desgaste.
2. No fresamento de superfícies similares à peça 2 no sentido discordante não ocorre lascamento e o desgaste de flanco é provocado por difusão. Além disso, a velocidade de corte não influencia fortemente o desgaste da ferramenta.

3. No fresamento de superfícies similares à peça 2 no sentido discordante ocorre desgaste de flanco por difusão, embora existe uma leve tendência ao lascamento pelo mecanismo *foot forming* em velocidades elevadas. Além disso, neste caso há uma forte influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta.
4. A ferramenta cerâmica de nitreto de silício apresenta tenacidade suficiente para ser utilizada em processos de fresamento similares aos utilizados neste trabalho, já que o lascamento não foi fator predominante para o fim da vida da ferramenta.

6. REFERÊNCIAS

1. YECKLEY, R. Ceramic grade design. **Kennametal Comprehensive Application Engineering Guide**, Latrobe, PA: Kennametal University, cap.12, p. 2 –12. 2005.
2. DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 5ed. São Paulo: Artiber Editora, 2006. 244p.
3. SANDVIK, **Modern Metal Cutting** – A Practical Handbook, Suecia: Sandvik Coromant Technical Editorial, 1994
4. MELO, A. C. et al. Some observations on wear and damages in cemented carbide tools. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Sept 2006, v.28, n.3, p.269-277.
5. TRENT, E. M. ;WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**, Butterworth/Heinemann, Oxford, 2000, 446 p.
6. PEKELHARING, A. J. The Exit Failure of Cemented Carbide Face-Milling Cutters. Part I - Fundamentals and Phenomena, **Annals of the CIRP**, v. 33, p.47-50, 1984.
7. KENAMETAL. **Fresamento** - 301.00 PSA. Catálogo. Alemanha: Kennametal Hertel. [200-]. 240p.
8. FERRER, Jorge Antonio Giles, DINIZ, Anselmo Eduardo, Otimização do fresamento frontal de diversas superfícies de ferro fundido cinzento, Anais do III Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, Vol. 1, pp.1 –1 (anais em CD), Joinville, SC, BRASIL, 2005.

OPTIMIZING THE FACE MILLING PROCESS OF IRREGULAR SURFACES OF GRAY CAST IRON

Jorge Antonio Giles Ferrer

Professor do Centro SENAI Fundação Romi Formação de Formadores
Santa Bárbara d'Oeste – SP e-mail: jorge@senaiformadores.com.br

Anselmo Eduardo Diniz

Diretor da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP – SP
e-mail: anselmo@fem.unicamp.br

Abstract. *Most of the works about face milling are carried out on uninterrupted flat surfaces, which, in industrial practice, rarely occur. Usually what occur are interrupted surfaces with holes, narrow surfaces which are milled with large diameter cutters, due to a small portion of the surface with larger width, surfaces with corners of 90°, which makes mandatory the use of a 90° cutter, etc. This work deals with some problems which happen in the face milling of this kind of surfaces. Besides, most of the face milling operations on gray cast iron parts still are carried out with carbide cutters. However, the ceramic tools made of silicon nitride have presented much better performance than the carbide tools in this kind of operations. In the other hand, the use of ceramic tools in milling process, mainly on irregular workpiece surfaces, is not well accepted, due to the low toughness of this material. This work aims to evaluate these ceramic tools in the milling of irregular surfaces made of gray cast iron, trying to recognize the tool wear mechanisms of these tools in this kind of operations. Aiming this goal, several experiments were carried out using*

workpieces with the same shape of a real bus brake air compressor case, which contains three different surfaces, in rough milling conditions. The tool was made of silicon nitride and several cutting speeds were tried. Among the conclusions, it is important to point out that the silicon nitride ceramic tool has enough toughness to be used in face milling process similar to those used in this work, because edge chipping was not the main factor to establish the end of tool life.

Keywords. *Milling, Gray cast iron, Ceramic, Tool wear.*