

VITOR TOMAZ GUIMARÃES NAVES

ESTUDO DA USINABILIDADE DOS FERROS FUNDIDOS
CINZENTOS LIGADOS (CrCuSn E CrCuSnMo) E
VERMICULAR CLASSE 350 NO FRESAMENTO
FRONTAL EM ALTA VELOCIDADE DE CORTE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

VITOR TOMAZ GUIMARAES NAVES

**ESTUDO DA USINABILIDADE DOS FERROS FUNDIDOS CINZENTOS
LIGADOS (CrCuSn E CrCuSnMo) E VERMICULAR CLASSE 350 NO
FRESAMENTO FRONTAL EM ALTA VELOCIDADE DE CORTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva

UBERLÂNDIA – MG

2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

N323e Naves, Vitor Tomaz Guimarães, 1982-

Estudo da usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos ligados (CrCuSn e CrCuSnMo) e vermicular classe 350 no fresamento frontal em alta velocidade de corte / Vitor Tomaz Guimarães Naves. - 2009. 145 f. : il.

Orientador: Marcio Bacci da Silva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Usinagem - Teses. 2. Ferro fundido - Teses. 3. Fresagem - Teses.

I. Silva, Marcio Bacci da, 1964- II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.9

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer.”

Albert Einstein.

Dedico este trabalho aos meus queridos
pais por todo amor, carinho e compreensão.
Amo vocês...

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e por fortalecer a minha fé em busca dos meus sonhos e de minha felicidade.

À minha família, de modo especial à minha amada mãe, Luzia Irene, pelo carinho e amor, uma fonte de alegria, simpatia e esperança em que me espelho todos os dias. Ao meu pai, Braz Tomaz, por me apoiar na busca de meus sonhos e ideais, um guerreiro que batalha pela felicidade de nossa família. E ao meu irmão Fábio Henrique, um grande amigo em todos os momentos.

De modo especial ao Professor Marcio Bacci da Silva, pela orientação, pelo suporte e incentivo, principalmente, pela oportunidade de um excelente relacionamento desenvolvido durante todo o meu trabalho de pesquisa.

Ao Professor Álisson, o alicerce e incentivador de meus trabalhos na área de usinagem. Uma pessoa que sempre me apoiou, me orientando nas pesquisas desde os tempos de minha iniciação científica.

Ao amigo e Professor Rosemar Batista da Silva, pelo apoio prestado durante o período das pesquisas no LEPU, e pelos momentos de descontração.

Aos amigos e doutorandos Sebastião Jr e Ildeu Lúcio, pelos bons momentos convvidos juntos durante toda a pesquisa, e principalmente pela ajuda prestada na discussão de alguns detalhes desta dissertação.

Aos colegas de trabalho do LEPU, especialmente aos doutorandos Paulo Rosa Mota, Deborah Oliveira, Mauro Paipa, Marcelo Nascimento, Mauro Medeiros e Fabio Lima.

Ao Professor Gilmar Guimarães e seus orientados e pesquisadores do (LTCM), Valério e Priscila, pela possibilidade de medições e análises da condutividade térmica dos materiais investigados nesta pesquisa.

Ao Professor Cleudmar Araújo, coordenador do (LPSM), pela disponibilidade e atenção prestada nos ensaios de resistência mecânica dos ferros fundidos cinzentos ligados e vermicular tratados ao longo deste trabalho.

Aos professores Rafael Ariza, Alberto Raslan e José Daniel B. de Mello, do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), pela colaboração na realização da caracterização dos materiais investigados.

Aos alunos de iniciação científica, Thiago Larquer e Stéfano Bombonato, que trabalhamos juntos, e muito contribuíram nos diversos experimentos ao longo deste período.

À Empresa Tupy Fundições, especialmente ao Sr. Cássio L. F de Andrade e ao Professor Wilson Guesser, pela importante participação no estabelecimento das parcerias entre as diferentes instituições, bem como no fornecimento de materiais para a pesquisa.

Aos técnicos Reginaldo F. de Sousa, do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), e Ângela M. S. Andrade, do LTM, pelo apoio durante a realização de testes de usinagem e na preparação de amostras e análises metalográficas, medições de dureza e microdureza.

Aos técnicos da Oficina Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica e a todos os funcionários da UFU que de alguma forma apoiaram a execução deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia Mecânica, à Coordenação do Curso de Pós-Graduação e também à Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade e pela infra-estrutura fundamentais à realização deste trabalho.

À FAPEMIG, ao IFM e a CAPES pelo apoio financeiro. Ao CNPq pelo apoio financeiro e a bolsa de mestrado.

Aos professores do curso de pós-graduação, pelos conhecimentos transmitidos.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente participaram para transformar em realidade esta Dissertação... MUITO OBRIGADO!

NAVES, V. T. G. **Estudo da Usinabilidade dos Ferros Fundidos Cinzentos Ligados (CrCuSn e CrCuSnMo) e Vermicular Classe 350 no Fresamento Frontal em Alta Velocidade de Corte**. 2009. 145 p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

Resumo

Utilizado na a fabricação de bloco e cabeçote de motores diesel, o ferro fundido cinzento, apresenta características como boa condutividade térmica e bom amortecimento de vibrações que passam a ser fundamentais no projeto desses blocos. Porém, este material apresenta um limite de resistência menor que a de outros tipos de ferros fundidos, portanto, para obter maiores taxas de compressão é necessário que a espessura da parede do bloco do motor seja aumentada, o que é indesejável, pois além de aumentar seu peso, irá gerar maiores problemas ambientais de modo geral. Mediante a essas características dos ferros fundidos cinzentos, um outro material, de maior resistência mecânica, passa a ganhar importância na fabricação dos blocos de motores diesel, pois torna-se possível obter maiores rendimentos térmicos, visto que a taxa de compressão poderá ser maior. Este material é o ferro fundido vermicular ou *Compacted Graphite Iron (CGI)* que aparece como uma alternativa para a substituição do ferro fundido cinzento por apresentar características, de condutividade térmica e amortecimento de vibração semelhante aos cinzentos. Porém, o CGI apresenta como desvantagem uma pior usinabilidade, ou seja, maior dificuldade na usinagem quando comparado com o ferro fundido cinzento. O objetivo deste trabalho é investigar e comparar a usinabilidade de dois ferros fundidos cinzentos ligados (ao CrCuSn e ao CrCuSnMo) e um vermicular da classe 350. O processo de usinagem para os testes foi o fresamento frontal. As ferramentas foram pastilhas de metal duro da classe K20 revestidas com Al_2O_3 sobre pela técnica *MTCVD (deposição química de vapor em médias temperaturas)* sobre uma camada de TiCN. Todos os testes de usinabilidade foram realizados a seco. O avanço por dente e a profundidade de corte foram mantidos constantes em 0,2 mm/ver e 1 mm respectivamente. Utilizou-se três valores para as velocidades de corte , 600, 800 e 1000 m/min. Os resultados mostraram que o ferro fundido ligado ao CrCuSnMo é o que apresentou uma maior dificuldade na usinagem nas maiores velocidades de corte. Para a velocidade de 600 m/min o ferro fundido vermicular foi o material que apresentou a pior usinabilidade.

Palavras-chave: ferro fundido vermicular, ferro fundido cinzento, usinabilidade, fresamento.

NAVES, V. T. G. **Investigation of the Machinability of Alloyed Gray Cast Iron (CrCuSn and CrCuSnMo) and Compacted Graphite Iron ASTM 350 in Milling Operation under HSM conditions.** 2009. 145 p., Master Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG, Brazil.

Abstract

Cast iron is used to manufacture engine blocks due to its mechanical and physical properties like thermal conductivity and dumpy capacity, which are fundamental to these applications. Compacted graphite iron (CGI) has higher mechanical strength compared to gray cast iron and can be a great advantage in these type of mechanical parts. The compression rate can be increased in the engine resulting in a higher efficiency for example. Alloying elements are also used to increase the mechanical resistance of the gray cast iron, resulting in a material with similar mechanical properties to the CGI. The mechanical and physical properties can be similar for both materials, however the CGI has a poor machinability compared to gray cast iron, even for the alloyed material. These means it is important to investigate the behaviour of the CGI for the main cutting process. The main objective of this work is the investigation of the machinability of two types of alloyed gray cast iron (CrCuSn and CrCuSnMo) and the compacted graphite iron class ASTM 350. Tool life tests were carried out in a milling operation and the flank wear was the parameter used to define the end of the tool life. Investigations using observations into the scanning electron microscope SEM were also used to analyse the wear mechanisms. It was used cemented carbide inserts coated with Al_2O_3 over a layer of TiCN. All the tests were carried under dry conditions. Feed per tooth and depth of cut were constant, 0,2mm/rev and 1mm respectively. It was used three values of cutting speed, 600, 800 and 1000m/min. The results shown that the gray cast iron alloyed with CrCuSnMo is the most difficult to machine material at the higher cutting speeds. At the cutting speed of 600m/min the CGI is the most difficult to cut material.

Keywords: Compacted graphite iron, Gray cast iron, machinability, milling process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de fresamento.....	8
Figura 2.2 – Fresamento de topo.....	10
Figura 2.3 – Representação esquemática dos movimentos e direções para o fresamento tangencial.....	11
Figura 2.4 – Representação do Percurso de corte L_c , percurso de avanço L_f e percurso efetivo L_e para o fresamento discordante.....	11
Figura 2.5 – Avanço por dente f_z , avanço de corte f_c e avanço efetivo f_e no fresamento discordante.....	13
Figura 2.6 – Representação de algumas grandezas físicas no fresamento.....	14
Figura 2.7 – Variação do ângulo de posição de uma fresa.....	15
Figura 2.8 – Arestas de corte e superfícies da cunha de corte de uma fresa frontal.....	16
Figura 2.9 – Fresamento discordante e concordante.....	18
Figura 2.10 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.....	23
Figura 2.11 – Fotografias das três formas de desgaste.....	24
Figura 2.12 – Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte.....	27
Figura 2.13 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte	32
Figura 2.14 – Perfil da rugosidade, ondulação e de forma.....	33
Figura 2.15 – Diagrama equilíbrio da liga Fe-C.....	38
Figura 2.16 – Morfologia típica da grafita. A (cinzento), B (vermicular) e C (nodular).....	43
Figura 2.17 – Comparativo da vida das ferramentas em relação à usinagem do vermicular e do cinzento para diferentes processos de usinagem.....	45
Figura 3.1 – Micrografias do ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn atacadas com nital 3%.....	50
Figura 3.2 – Micrografias do ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSnMo atacadas com nital 3%.....	50
Figura 3.3 – Micrografias do ferro fundido vermicular da classe 350 atacadas com nital 3%.....	50
Figura 3.4 – Representação da geometria dos corpos de prova.....	52
Figura 3.5 – Corpos de prova bruto fundição e usinado na parte inferior e superior.....	52
Figura 3.6– Configuração do ângulo de posição da pastilha.....	53
Figura 3.7 – Foto da fresa frontal e da pastilha utilizadas nos testes de usinabilidade.....	53

Figura 3.8 – Representação do revestimento e cobertura das pastilhas utilizadas nos teste de vida da ferramenta.....	54
Figura 3.9 – Fresadora INTERACT IV da marca ROMI utilizada nos ensaios de fresamento.....	55
Figura 3.10 – Detalhe do sistema de fixação dos corpos de prova através de uma morsa mecânica.....	56
Figura – 3.11. (a) sistema de aquisição de imagens; (b) foto da aresta de corte de uma pastilha após a usinagem de um ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSnMo (45X).....	57
Figura 3.12 – Durômetro da marca WOLPERT.....	58
Figura 3.13 – Região onde foi retirado o material para medição da dureza Brinell e em detalhe o material embutido em resina de baquelite.....	58
Figura 3.14 – Microdurômetro da marca HVM e computador para tratamento de imagens.....	60
Figura 3.15 – Imagens feita por um microscópico com aumento de 400 x para medição da microdureza dos materiais investigados. (a) ferro fundido cinzento ligado, (b) ferro fundido vermicular.....	61
Figura 3.16 – Geometria dos corpos de prova para ensaios de tração.....	62
Figura 3.17 – Foto da máquina destinada aos ensaios de ruptura à tração.....	62
Figura 3.18 – Desenho esquemático dos sistemas de medição da potência específica de corte e da vibração.....	66
Figura 3.19 – Detalhe do sensor de efeito hall e cabo de energia do motor principal da fresa.....	67
Figura 3.20 – (a) acelerômetro fixado no mancal do eixo-árvore da máquina-ferramenta. (b) sistema de aquisição dos sinais de potência e vibração.....	69
Figura 4.1 – Caracterização da matriz metálica dos materiais. Aumento de 400 X.....	75
Figura 4.2 – Comprimento desgaste de flanco médio para $V_c = 600$ m/min.....	76
Figura 4.3 – Comprimento desgaste de flanco médio para $V_c = 800$ m/min.....	77
Figura 4.4 – Comprimento desgaste de flanco médio para $V_c = 1000$ m/min.....	79
Figura 4.5 – Comprimento do desgaste de flanco médio para os três materiais nas três velocidades de corte utilizadas.....	80
Figura 4.6 – Tempo de vida ferramenta para VB_B de 0,15mm.....	81
Figura 4.7 – Superfície de resposta para a vida da ferramenta para os três tipos de ferros fundidos.....	82
Figura – 4.8. Desgaste de flanco na aresta principal de corte ($V_c = 600$ m/min).....	84
Figura – 4.9. Desgaste de flanco na aresta principal de corte ($V_c = 800$ m/min).....	85
Figura – 4.10. Desgaste de flanco na aresta principal de corte ($V_c = 1000$ m/min).....	85

Figura 4.11 – Característica do tipo de mecanismo de desgaste durante a usinagem do material C realizado com uma velocidade de 600 m/min.....	86
Figura 4.12 – Foto feita em MEV apresentando as três regiões analisadas e detalhe da aresta principal de corte desgastada na usinagem do material A, $V_c = 800$ m/min.....	87
Figura 4.13 – Espectro por energia dispersiva (análise química) dos principais elementos químicos presentes na região 1 da Fig. 4.12.....	88
Figura 4.14 – Espectro por energia dispersiva (análise química) dos principais elementos químicos presentes na região 2 da Fig. 4.12.....	89
Figura 4.15 – Espectro por energia dispersiva (análise química) dos principais elementos químicos presentes na região 3 da Fig. 4.12.....	90
Figura 4.16 – Característica do tipo de mecanismo de desgaste durante a usinagem do material B realizado com uma velocidade de 1000 m/min.....	91
Figura 4.17– Potência de corte para $V_c = 600$ m/min.....	92
Figura 4.18 – Potência de corte para $V_c = 800$ m/min.....	93
Figura 4.19 – Potência de corte para $V_c = 1000$ m/min.....	93
Figura 4.20 – Condições da potência de corte para três estados de afiação da ferramenta para $V_c = 6000$ m/min.....	95
Figura 4.21 – Condições da potência de corte para três estados de afiação da ferramenta para $V_c = 8000$ m/min.....	96
Figura 4.22 – Condições da potência de corte para três estados de afiação da ferramenta para $V_c = 10000$ m/min.....	96
Figura 4.23 – Resposta do sinal de vibração para três estados de afiação da ferramenta para $V_c = 600$ m/min.....	97
Figura 4.24 – Resposta do sinal de vibração para três estados de afiação da ferramenta para $V_c = 800$ m/min.....	98
Figura 4.25 – Resposta do sinal de vibração para três estados de afiação da ferramenta para $V_c = 1000$ m/min.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Faixa da composição de ferros fundidos típicos comuns.....	40
Tabela 2-2 Comparação entre as propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos vermicular, cinzento e nodular.....	44
Tabela 3.1 – Composição química dos ferros fundidos fornecida pelo fabricante (% em peso).....	48
Tabela 3.2 – Porcentagem de perlita e caracterização da grafita dos materiais usinados.....	49
Tabela 3.3 – Valores da dureza Brinell dos corpos de prova.....	59
Tabela 3.4 – Valores da Microdureza dos materiais usinados.....	62
Tabela 3.5 – Limite de resistência à tração dos materiais investigados.....	63
Tabela 3.6 – Valores de condutividade térmica com ferro fundido vermicular e cinzento em diferentes temperaturas.....	65
Tabela 3.7 – Parâmetros de corte dos testes preliminares.....	70
Tabela 3.8 – Parâmetro de corte utilizado nos ensaios definitivos da pesquisa.....	71
Tabela 3.9 – Condições de corte realizado nos testes de usinabilidade.....	71
Tabela – 4.1. Propriedades dos materiais investigados.....	74
Tabela 4.2 – Resultado da análise de variância (ANOVA) do desgaste de flanco.....	81

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3	Óxido de alumínio
ap.....	Profundidade de corte
APC.....	Aresta Postiça de Corte
CNC.....	Comando Numérico Computadorizado
CrC.....	Carboneto de cromo
CVD.....	”Chemical vapour deposition”
EDS.....	Espectroscopia de Energia Dispersiva
f.....	Avanço de corte
HB.....	Dureza Brinell
HSC.....	”High Speed Cutting”
HSM.....	”High Speed Machining”
HV.....	Dureza Vickers
MEV.....	Microscópio Eletrônico de Varredura
MTCVD.....	”Moderate temperature Chemcal vapour deposition”
PVD.....	”Physical Vapour Deposition”
TiCN.....	Carbonitreto de Titânio
VB_B	Desgaste de flanco médio
VB_{Bmax}	Desgaste de flanco máximo
Vc.....	Velocidade de corte

SUMÁRIO

I – Introdução.....	1
1.1 Objetivo e Justificativa.....	4
1.1.1 Objetivo Geral.....	4
1.1.2 Objetivos específicos.....	4
1.1.3 Justificativa.....	4
II – Revisão Bibliográfica	6
2.1 Processo de Fresamento.....	7
2.1.1 Tipos Fundamentais de fresamento.....	8
2.2 Fresamento Frontal Simétrico e Assimétrico.....	19
2.3 Desgaste das Ferramentas de Corte	21
2.4 Mecanismos de Desgaste nas Ferramentas de Corte.....	24
2.5 Ensaios de Usinabilidade.....	27
2.5.1 Vida da Ferramenta de corte.....	31
2.5.2 Rugosidade.....	33
2.5.3 Potência de corte.....	34
2.5.4 Vibração em usinagem.....	36
2.6 Ferros Fundidos.....	37
2.6.1 Ferro Fundido Cinzento.....	42
2.6.2 Elementos de liga.....	42
2.6.2 Ferro fundido vermicular.....	43
III – Procedimentos Experimentais.....	47
3.1 Materiais Investigados.....	48
3.1.1 Preparação dos corpos de prova.....	51
3.1.2 Ferramentas.....	53
3.2 Equipamentos Utilizados.....	55
3.2.1 Máquina ferramenta	55
3.2.2 Sistema de fixação dos corpos de prova.....	55
3.2.3 Microscópio para a medição do desgaste nas ferramentas de corte.....	56
3.3 Caracterização dos Materiais	57
3.3.1 Medição da Dureza.....	58
3.3.2 Medição da Microdureza.....	59
3.3.2 Medição do limite de ruptura à tração.....	62
3.3.2 Medição da condutividade térmica.....	64

3.4 Medição da potência efetiva de corte e da vibração.....	65
3.5 Metodologia.....	69
IV – Resultados e Discussões	73
4.1 Caracterização dos Materiais.....	73
4.2 Ensaios de vida	75
4.3 Mecanismo de Desgaste.....	82
4.4 Potência de Corte.....	92
4.5 Sinal de vibração	97
V – Conclusões	101
VI – Proposta para Trabalhos Futuros	103
VII – Referências Bibliográficas	104
VIII - Anexos.....	111

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O aquecimento global é uma das grandes preocupações ambientais hoje em todo mundo. Este problema se relaciona aos impactos ambientais causados pela emissão de poluentes no ar atmosférico. Como forma de minimizar o efeito da emissão de poluentes, como por exemplo, monóxido de carbono e outros gases tóxicos, as indústrias buscam a melhor forma de redução deste efeito, uma vez que existem hoje leis de fiscalização na emissão de poluentes lançados pelas indústrias em todo mundo. As empresas de fundições, principalmente as fabricantes de blocos e cabeçote de motores, por exemplo, vem pesquisando o aprimoramento da eficiência energética de seus produtos juntamente com a redução dos níveis de emissão desses gases poluentes.

As constantes exigências pela diminuição das emissões de poluentes, juntamente com a redução do consumo dos combustíveis fósseis, transformou-se em um objetivo generalizado entre os fabricantes de veículos. As pesquisas para a diminuição do consumo de combustível, por um lado, já estão bastante avançadas na melhoria da aerodinâmica e das técnicas de acionamento dos veículos, mas, por outro, a redução do peso dos veículos oferece outros potenciais de economia de combustível. A redução do peso do motor, que representa aproximadamente 15% do peso total de um veículo sem alteração da potência, se torna um fator importante levado em conta pelos fabricantes (Klink e Flores, 2001).

A tecnologia de ferros fundidos tem recebido, continuamente, importantes desenvolvimentos, tanto em processos de fabricação como em materiais. Estes desenvolvimentos, resultantes de necessidades nas áreas de aplicação ou ainda de redução de

custos, trazem como consequência a atualização tecnológica de um material de longa tradição de uso na indústria automobilística (Guesser, 1997).

A grande aplicação dos ferros fundidos em peças automotivas dá origem à necessidade de um aprimoramento em pesquisas, com o objetivo de melhor entender o desempenho destes materiais perante aos diversos tipos de processos de fabricação. Portanto, investimentos em pesquisas e desenvolvimento em novos produtos nesta linha, tornam-se fator de grande importância na economia de uma forma geral.

A substituição por novos materiais torna-se necessários para melhorar o desempenho de funcionamento de alguns produtos. Os blocos e cabeçote de motores diesel, por exemplo, vem sofrendo algumas mudanças a fim de conferir a estes maiores rendimentos térmicos com o mínimo de impacto ambiental possível. Parece este um dos grandes interesses das pesquisas com ferros fundidos, investigar a melhor aplicação que um material proporcionará, gerando cada vez menos impactos ambientais.

O material tradicionalmente utilizado para a fabricação de blocos e cabeçote de motores diesel, o ferro fundido cinzento, chegou a um limite de resistência, possibilitando este aumento de pressão somente pelo aumento da espessura das paredes do bloco, o que eleva o peso e, por sua vez, não cumpre as exigências ambientais especificadas.

O ferro fundido vermicular ou *Compacted Graphite Iron* (CGI) é um material que apresenta características de condutividade térmica de amortecimento próximos aos dos ferros fundidos cinzento, entretanto apresenta propriedades mecânicas superiores a estes e, assim, possibilita a fabricação de componentes com menor peso, melhor desempenho e redução de poluição ambiental por gases e ruídos. Em contra partida a usinabilidade do CGI é inferior quando se comparado com o ferro fundido cinzento, levando a um maior desgaste da ferramenta. Por isso faz se necessário um intenso trabalho de pesquisa para a melhoria dessas ligas.

O vermicular permite a fabricação de motores diesel com uma combustão mais eficiente e com melhor performance, pois admite maiores taxas de compressões na câmara de combustão, devido às suas boas propriedades mecânicas (Guesser et al, 2001). Atualmente, a maior dificuldade para a fabricação de blocos fabricados com ferro fundido vermicular a preços competitivos é a sua baixa usinabilidade quando comparado ao cinzento (Mocellin, 2003).

Os ferros fundido cinzento e vermicular, ligas de alumínio e outras ligas menos comum como a de magnésio e alumínio-compósito, são alguns dos materiais mais utilizados atualmente na fabricação de bloco de motores. Logicamente, observa-se para a escolha do material a ser

empregado nos blocos de motores algumas características tais como: resistência mecânica, densidade do material, custo de fabricação, impactos ambientais produzidos na fabricação dos blocos entre outros. Nestes critérios, o ferro fundido vermicular é o material que preenche os requisitos de forma mais satisfatória. Porém, apresenta um dos piores candidatos com relação ao custo de usinagem, limitando assim sua aplicação (Marquad et al., 1998).

Com a aplicação cada vez maior do CGI em linhas de produção do tipo *transfer*, o desgaste das ferramentas de corte motiva a investigação para descobrir a melhor forma para a usinagem destes materiais, como por exemplo, alguns parâmetros de corte. Portanto, devido ao desgaste excessivo que pode ocorrer com a utilização em altas velocidades de corte, a ferramenta de usinagem deve apresentar boas características de resistência mecânica e resistência à fadiga.

A dificuldade na usinagem dos ferros fundidos vermiculares torna-se ainda maior quando estão submetidos a alguns processos de fabricação que envolvem altas velocidades de corte, alta taxa de calor gerado, motivando assim em um menor tempo de vida da ferramenta. A operação mais crítica durante os processos foi - e ainda é - o mandrilamento dos cilindros, processo no qual a redução da vida útil da ferramenta é bastante significativa, como apresenta os estudos de Mocellin (2007) em seu trabalho de doutorado. Desta forma motivou-se o desenvolvimento de pesquisas com a intenção de tornar viável e competitiva a usinagem do vermicular, envolvendo o meio acadêmico, empresas automobilísticas, os fabricantes de ferramentas, empresas de fundição e blocos de motores (Reuter, 1999).

As pesquisas estão divididas em três campos: melhoria da usinabilidade do CGI, aprimoramento das técnicas de usinagem; desenvolvimento de novos materiais das ferramentas para a usinagem do CGI (Dawson et al., 1999).

O objetivo deste trabalho é investigar a usinabilidade de dois ferros fundidos cinzentos ligados ao (CrCuSn e CrCuSnMo) e um vermicular da classe 350, e em seguida fazer uma comparação entre os mesmos, identificando as principais características apresentadas por eles quando submetidos a um fresamento frontal com pastilhas de metal duro da classe K revestidas com TiCN e Al₂O₃. Será feito também um estudo da caracterização dos materiais, como: dureza, microdureza, resistência de ruptura à tração e condutividade térmica.

O trabalho é fruto da parceria entre a Universidade Federal de Uberlândia e a Tupy S.A., fornecedora dos materiais em estudo e uma das principais fornecedoras de bloco de motores para as indústrias automobilísticas.

1.1 Objetivos e Justificativa

1.1.1 Objetivo geral

Pesquisar a usinabilidade de três ligas de ferros fundidos. O primeiro é um ferro fundido cinzento ligado com CrCuSn, será identificado como material A. O segundo material também um ferro fundido porém ligado com CrCuSnMo, identificado como material B. Por último o ferro fundido vermicular da classe 350, material C. A partir dos ensaios de usinabilidade, deve-se fazer a comparação entre esses três materiais para que por fim, identifique qual deles terá melhor usinabilidade nos processos utilizados para a fabricação de blocos e cabeçotes de motores, além do conhecimento do comportamento do desgaste das ferramentas de corte durante a usinagem destes materiais.

1.1.2 Objetivos específicos

Identificar com confiança estatística através de um planejamento de experimentos o material que apresenta o melhor desempenho durante o processo de fresamento. O desempenho será avaliado através dos ensaios de:

- Vida da ferramenta, buscando entender as formas e os tipos de desgaste presentes nas ferramentas de metal duro durante o processo de fresamento.
- Potência de corte.
- Sinal de vibração no eixo árvore da máquina operatriz.
- Condutividade térmica, uma vez que a forma da grafita influencia na condução do calor, facilitando a troca térmica na matriz do material, sendo esta uma propriedade muito importante para o material utilizado na fabricação de blocos e cabeçotes de motores de combustão interna.
- Dureza e micro dureza da ligas.
- Resistência de ruptura à tração.

1.1.3 Justificativa

Tem-se discutido muito entre centros de pesquisas e as indústrias formas de obter melhoria nos materiais, visando encontrar melhor eficiência e rendimento na aplicação de determinados materiais, com vistas para o fato do impacto ao meio ambiente que poderá surgir com este desenvolvimento. E isso as indústrias, de uma forma geral, buscam fazer, levantando o impacto que um produto possa oferecer na substituição por outro.

Devido às exigências pela diminuição das emissões de poluentes no ar atmosférico e busca por melhores desempenhos do rendimento de motores diesel, há uma tendência de substituição e inovação por materiais mais resistentes mecanicamente e mais leves.

Dessa forma, o ferro fundido vermicular apresenta-se como um material de uso potencial e decisivo para empresas do ramo automobilístico ganhar uma maior fatia do mercado consumidor. O processo de desenvolvimento de blocos de motores em ferro fundido vermicular envolve uma análise criteriosa das vantagens e desvantagens de sua utilização, passando pelas áreas de análise estrutural, processo de obtenção da liga e a sua usinagem (Doré, 2007).

A substituição do ferro fundido cinzento pelo ferro fundido vermicular nos blocos de motores diesel ganha atenção devido principalmente ao melhoramento da eficiência térmica e com isso maior potência dos motores. Características próximas entre estes materiais, como por exemplo, a condutividade térmica e o fator de amortecimento, acompanhado da redução do peso do motor, influência para que o CGI seja definitivamente o material adotado para a fabricação de cabeçote e blocos de motores diesel. Porém, a utilização fica comprometida devido a sua pior usinabilidade, agravado ainda mais em processos que utilizam altas velocidades de corte em processos de corte contínuo. Neste contexto, as pesquisas apresentam como uma importante ferramenta para a seleção de parâmetros e ferramentas de corte durante a usinagem.

A Tupy S.A. empresa brasileira fabricante e exportadora de peças automotivas, atenta às novas tecnologias e vantagens na utilização do CGI, desenvolve estudos científicos na fabricação de produtos com o referido material, visando a competitividade no mercado mundial. A parceria entre a Universidade Federal de Uberlândia e a Tupy S.A. visa enriquecer ainda mais a qualidade das pesquisas nestes materiais, e ainda difundir o intercâmbio de idéias visando a melhoria da qualidade de produtos brasileiros, fortalecendo a economia e a credibilidade do país.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Usinagem é processos de fabricação que visa conferir à peça a forma, as dimensões ou acabamento, ou ainda a combinação destes três itens, gerando cavaco (Ferraresi, 1973). O cavaco por sua vez é a porção de material das peças que foi removido pela ação de uma ferramenta – chamada ferramenta de corte – o qual apresenta uma forma geométrica irregular (Chiaverini, 1979).

Atualmente a usinagem é caracterizada à produção de superfícies de ligas metálicas, mas também muitos produtos plásticos também são usinados. A usinagem dos metais é comumente associada com grandes indústrias como a automotiva, a aeroespacial, a de eletrodomésticos, etc, mas este processo de fabricação inclui também a usinagem de ultra precisão em componentes extremamente delicados (Trent, 2000).

Ferraresi (1973) e Chiaverini (1979) definem as principais operações de usinagem, entre elas podem se destacar: torneamento, aplainamento, furação, madrilamento, serramento, brochamento, torneamento, roscamento, retificação, alargamento, fresamento, etc.

A tendência mundial é produzir peças cada vez mais sofisticadas, com elevado grau de tolerância geométrica, dimensional e acabamento superficial, com baixo custo e sem poluir o meio ambiente. A crescente conscientização em torno da defesa do meio ambiente traz uma forte cobrança às indústrias, que se vêem obrigadas a utilizar adequadamente os recursos naturais consumidos em seus processos de manufatura (Pereira, 2005). Isto reflete na importância do aprimoramento da utilização, de uma forma geral, dos processos ou operações de usinagem.

2.1 Processo de Fresamento

O processo de fresamento pode ser definido como sendo a usinagem mecânica em que a ferramenta provida de elementos cortantes dispostos simetricamente em volta de um eixo rotatório remove material da peça através do movimento relativo do eixo girante com o movimento de alimentação da peça. A usinagem por fresamento possui características de corte interrompido devido ao fato de que os elementos de corte estão dispostos simetricamente em torno de um eixo, e durante um giro, cada elemento cortante tem um tempo ativo e outro inativo de corte. Com relação a posição deste eixo, as fresadoras (máquinas operatrizes que realizam o fresamento) são caracterizadas em horizontais, verticais ou simplesmente universais (Ferraresi, 1973).

A fresadora é máquina-ferramenta que realiza o processo de fresamento. Esta máquina possibilita à ferramenta possuir movimento de rotação e, por sua vez, movimentar a peça em um, dois, três ou mais eixos (lineares ou giratórios), movimento que é conhecido como movimento de avanço. Em determinados casos a ferramenta pode realizar movimento de rotação e avanço. As ferramentas de fresar são denominadas fresas e geralmente são providas de vários gumes dispostos simetricamente ao redor do seu eixo de rotação, removendo intermitentemente material da peça. Esta característica oferece uma grande vantagem das fresas sobre outras ferramentas: o menor desgaste. Quando os dentes não estão realizando o corte eles estão sendo refrigerados, e isto permite que mantenham sua vida útil melhorada.

Segundo Trent (1991), o fresamento difere das outras operações de usinagem pelos fatores:

- O corte é interrompido, uma vez que cada dente entra e sai da peça de trabalho em cada giro da fresa;
- O tamanho do cavaco é relativamente pequeno;
- A espessura do cavaco é variável ao longo da penetração de trabalho;
- A superfície produzida por cada dente tem a forma de um segmento de arco (para o fresamento cilíndrico tangencial).

No fresamento cada aresta de corte remove uma certa quantidade de metal, com uma ação de corte limitada, tornando a formação e saída de cavacos um aspecto secundário. Na maioria dos casos, o fresamento ainda é utilizado na usinagem de superfícies planas – como no caso do faceamento – porém há um aumento significativo de usinagem de outras formas e superfícies com o aumento do número de centros de usinagem de quatro, ou mais eixos e

máquinas multitarefas (Sandvik 2005). Os principais tipos de fresamento, ilustrados pela Figura 2.1, em relação ao efeito sobre uma peça, ou do ponto de vista da trajetória da ferramenta, são:

- | | |
|-----------------------------|--------------------------------|
| 1 faceamento | 8 cortes |
| 2 faceamento de cantos a 90 | 9 fresamento com altos avanços |
| 3 fresamento de perfis | 10 fresamento de mergulho |
| 4 fresamento de cavidades | 11 fresamento em rampas |
| 5 fresamento de canais | 12 interpolação helicoidal |
| 6 tornofresamento | 13 interpolação circular |
| 7 fresamento de roscas | 14 fresamento trocoidal |

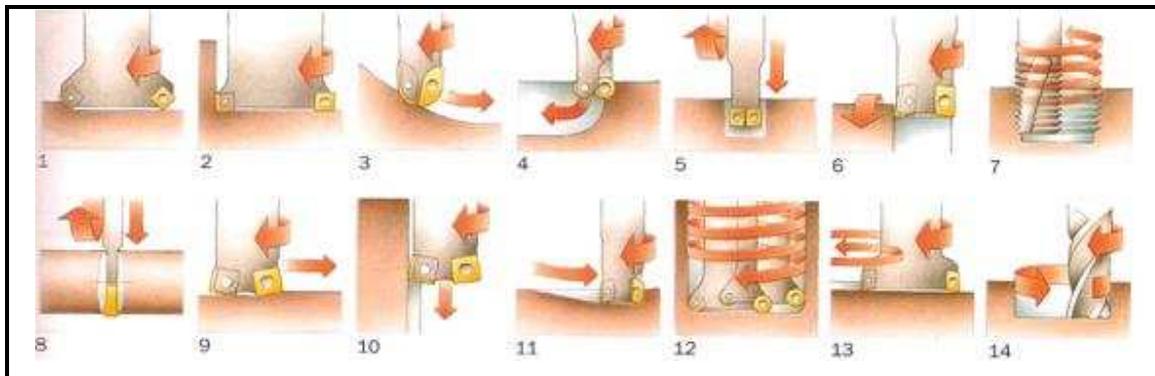


Figura 2.1 - Tipos de fresamento (Sandvik, 2005).

2.1.1 Tipos Fundamentais de fresamento

O processo de fresamento pode ser classificado de várias formas, no entanto é mais comum a classificação de acordo com a posição do eixo principal de acionamento da máquina. Assim, classifica-se o processo em:

- fresamento horizontal, realizado em máquinas-operatrizes (fresadora horizontal) que apresentam o eixo-árvore posicionado na horizontal.

- fresamento vertical, neste caso o eixo-árvore localiza-se verticalmente posicionado à mesa da fresadora, conhecido como fresadora vertical.

Segundo a disposição dos dentes ativos da fresa, o fresamento é classificado da seguinte maneira:

- fresamento tangencial ou periférico, os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta, o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo usinada. As fresas são chamadas de cilíndricas ou tangenciais.

- fresamento frontal, para este tipo de fresamento os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta, o eixo da fresa é perpendicular à superfície usinada. As fresas são chamadas de fresas frontais ou de topo.

Os cortes realizados neste processo normalmente são profundos radialmente e estreitos axialmente, enquanto que no fresamento tangencial, ocorre o inverso. Para que no processo de fresamento apresente uma boa rigidez da máquina, da peça e da ferramenta e havendo a possibilidade de se utilizar tanto o fresamento frontal quanto o tangencial, sugere-se utilização do primeiro.

Devido à posição em que se encontra a fresa, ou seja, perpendicular à superfície a ser usinada, o fresamento frontal apresenta as seguintes vantagens em relação ao tangencial Metals Handbook (1989):

- Maior rigidez do sistema máquina/ferramenta, uma vez que não há possibilidade de flexão do eixo de rotação da ferramenta;
- Possibilita usinar grandes áreas com menor esforço do eixo de rotação;
- Redução do tempo de troca da ferramenta;
- Menor custo de retificação das arestas de corte se for fresa sólida ou custo zero no caso de insertos;
- Melhor acabamento da superfície;
- Melhor desempenho na remoção de grandes quantidades de material;
- Alcança tolerâncias mais apertadas.

Quanto às limitações em relação ao fresamento tangencial tem-se:

- A largura do corte aumenta em relação ao diâmetro da fresa;
- Exige a utilização de máquinas mais robustas e de maior rigidez do sistema máquina/ferramenta/peça.

Existe ainda o fresamento de topo que é geralmente diferenciado do fresamento tangencial ou frontal mais pelo tipo da aplicação do que pela definição. Ele normalmente é preferido quando no perfilamento, abertura de canais, cavidades ou reentrâncias. São bastante empregados na produção de moldes para matrizes (Trent, 1991).

Fresamento de topo não é tão eficiente quanto os outros métodos de fresamento na remoção de material devido ao topo da ferramenta não ser apoiado e a razão comprimento/diâmetro geralmente ser alta. Conseqüentemente, cortes pesados não são praticáveis. Mas apesar de sua baixa eficiência na remoção de metal, fresamento de topo é

freqüentemente preferido para perfilagem, abertura de ranhuras, chanframentos, e fresamento de cavidades (Metals Handbook; 1989). A Figura 2. mostra um esquema de um fresamento de topo.

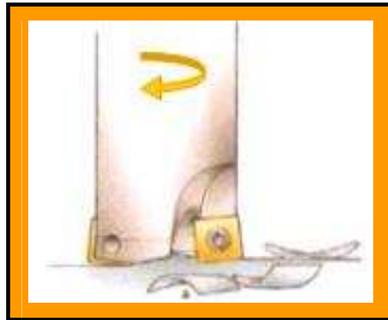


Figura 2.2 – Fresamento de topo. Adaptado de (Sandvik 2005).

A norma ABNT 6162/89 – Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais – Terminologia, trata de alguns conceitos fundamentais e importantes para o estudo do processo de usinagem. Os conceitos se referem a um ponto geométrico da aresta cortante, chamado de “Ponto de Referência”, próximo à ponta da ferramenta. Particularmente para o fresamento esta norma define que os movimentos relativos entre a peça e a fresa que causam a saída de cavaco são definidos como sendo:

- *Movimento de corte*: movimento entre a peça e a ferramenta, o qual sem o movimento de avanço origina somente uma única retirada de cavaco.
- *Movimento de Avanço*: movimento entre a peça e a ferramenta, o qual juntamente com o movimento de corte origina a retirada contínua de cavaco.
- *Movimento Efetivo*: movimento resultante dos movimentos de corte e de avanço ao mesmo tempo.

As direções associadas a estes movimentos que resultam diretamente na retirada de cavaco são:

- *Direção de Corte*: direção instantânea do movimento de corte.
- *Direção de Avanço*: direção instantânea do movimento de avanço.
- *Direção Efetiva*: direção instantânea do movimento efetivo de corte.

A Figura 2.3. ilustra os movimentos e direções para uma operação de fresamento tangencial discordante.

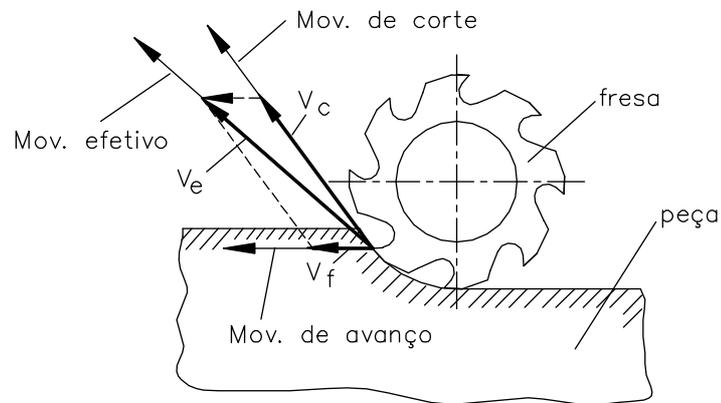


Figura 2.3 – Representação esquemática dos movimentos e direções para o fresamento tangencial (Machado et al., 2009).

O deslocamento da ferramenta sobre a peça, ilustrado na Figura 2.4, é definido como:

- *Percurso de Corte* L_c : espaço percorrido pela aresta de corte sobre a peça segundo a direção de corte.
- *Percurso de Avanço* L_f : espaço percorrido pela fresa sobre a peça segundo a direção de avanço.
- *Percurso Efetivo* L_e : espaço percorrido pela aresta cortante sobre a peça segundo a direção efetiva de corte.

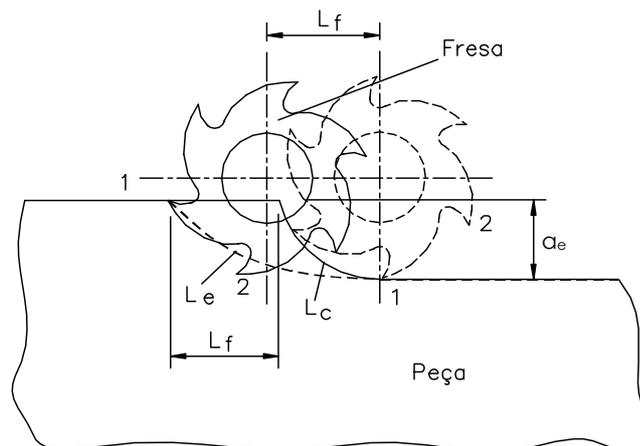


Figura 2.4 – Representação do Percurso de corte L_c , percurso de avanço L_f e percurso efetivo L_e para o fresamento discordante (Machado et al., 2009).

Com relação ao parâmetro velocidade de corte a Norma ABNT NBR 6162/89 (1989), apresenta três definições:

- *Velocidade de Corte* V_c : velocidade instantânea da aresta cortante da ferramenta segundo a direção e sentido de corte. Para processos com movimentos de rotação, a velocidade de corte é calculada pela Equação 2.1.

$$V_c = \pi \cdot \phi \cdot n / 1000 \quad [\text{m/min}] \quad (2.1)$$

onde,

ϕ = diâmetro da peça ou da ferramenta, em mm.

n = número de rotações por minuto.

- *Velocidade de Avanço* V_f : velocidade instantânea da aresta cortante, segundo a direção e sentido de avanço, calculada pela Equação 2.2.

$$V_f = f \cdot n \quad [\text{mm/min}] \quad (2.2)$$

onde,

f = avanço, mm/volta.

n = número de rotações por minuto.

- *Velocidade Efetiva de Corte* V_e : velocidade instantânea da aresta cortante, segundo a direção e o sentido efetivo do corte. É calculada vetorialmente como apresentado na Equação 2.3.

$$\vec{V}_e = \vec{V}_c + \vec{V}_f \quad [\text{m/min}] \quad (2.3)$$

Além destas podemos ter também as velocidades de aproximação, de ajuste, de correção e de recuo da máquina.

As principais grandezas de corte que devem ser ajustadas na máquina-operatriz para o processo de fresamento, são: avanço por dente, profundidade de corte, penetração de trabalho, velocidade de corte e velocidade de avanço. Algumas destas grandezas estão definidas, por exemplo:

- Avanço f: percurso de avanço da ferramenta em cada volta. No fresamento, este avanço deve ser ajustado em função do número de dentes da aresta, caracterizando o avanço por dente f_z , conforme mostrado na Equação 2.4. O avanço por dente (f_z), em mm/dente, é um valor para o cálculo do avanço da mesa no processo de fresamento. Como a fresa é uma

ferramenta com várias arestas de corte é necessário multiplicar o valor da quantidade de aresta pelo avanço por dente.

$$f = f_z \cdot z \quad (2.4)$$

onde,

z = número de dentes da fresa.

O avanço por dente, por sua vez, pode ser decomposto no avanço de corte f_c e no avanço efetivo de corte f_e . O *avanço de corte* (f_c) é definido como sendo a distância de duas superfícies consecutivas de usinagem medida na direção perpendicular a direção de corte no plano de trabalho (plano em que se realizam os movimentos responsáveis pela retirada do cavaco) e calculado conforme a Equação 2.5.

$$f_c = f_z \cdot \text{sen } \varphi \quad (2.5)$$

onde φ , é o ângulo que a direção de avanço faz com a direção de corte, conforme mostrado na Figura 2.5.

O *avanço efetivo de corte* (f_e) é definido como a distância entre duas superfícies consecutivas de usinagem medida na direção perpendicular a direção efetiva de corte, no plano de trabalho, e é calculado pela Equação 2.6.

$$f_e = f_z \cdot \text{sen } (\varphi - \eta) \quad (2.6)$$

onde η , é o ângulo que a direção efetiva faz com a direção de corte, conforme mostra a Figura 2.5.

O *avanço por rotação* (f_n), em mm/rotação é um valor usado especialmente para cálculos de avanço e, geralmente, determinar a capacidade de acabamento de uma fresa. É um valor auxiliar que indica o quanto uma ferramenta se desloca durante a rotação.

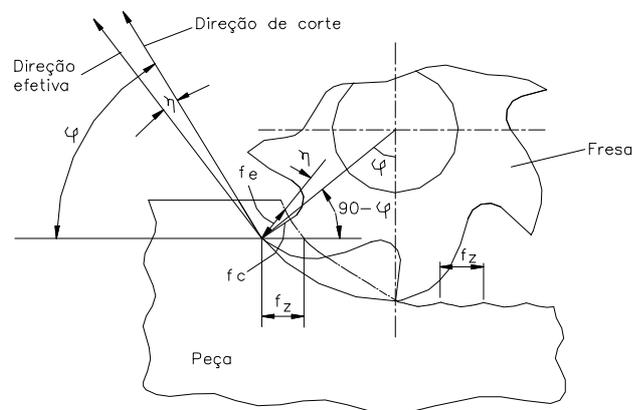


Figura 2.5 – Avanço por dente f_z , avanço de corte f_c e avanço efetivo f_e no fresamento discordante (Machado et al., 2009).

- *Profundidade ou Largura de Usinagem (a_p)*: trata-se da distância (axial) em mm que a ferramenta penetra na superfície não usinada. O *plano de trabalho* pode ser definido como sendo o plano formado pelas direções de corte e de avanço; a profundidade de corte é medida numa direção perpendicular a este plano.

- *Penetração de trabalho (a_e)*: é a largura da peça que está sob a ação do diâmetro da fresa. É a distancia transversal (radial) em relação à superfície que está sendo usinada ou, se o diâmetro da ferramenta for menor, é a distância coberta pela ferramenta. A penetração de trabalho é medida no plano de trabalho e numa direção perpendicular à direção de avanço.

- *Penetração de Avanço (a_f)*: é a grandeza de penetração da ferramenta, medida no plano de trabalho e na direção de avanço.

A espessura média do cavaco (h_m) e a espessura máxima (h_{ex}), são duas importantes grandezas que devem ser consideradas no processo de fresamento. A primeira torna-se importante para determinar a força de corte específica e em seguida a potência de corte. A segunda é o mais importante indicador de limitação de uma ferramenta em determinada operação (Sandvik, 2005). A Figura 2.6 representa a largura ou profundidade de usinagem a_p , penetração de trabalho a_e e as marcas de avanço da ferramenta f_z para o fresamento tangencial [a] e para o fresamento frontal [b]. A espessura do cavaco é a distância entre as trajetórias da ferramenta de corte, ou seja, é a espessura máxima na direção radial que uma aresta de corte encontra durante a usinagem. Ela é importante para o cálculo da carga máxima sobre a ferramenta.

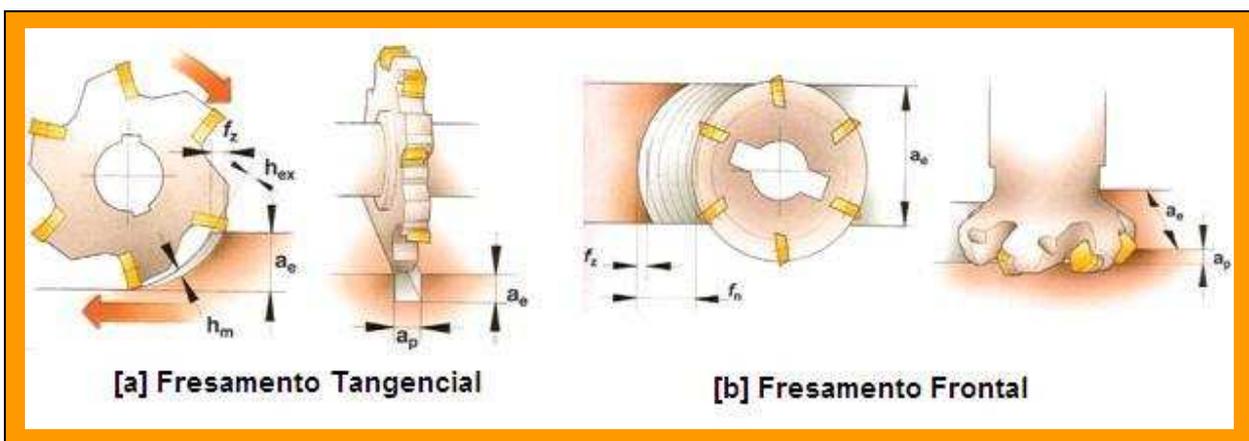


Figura 2.6 – Representação de algumas grandezas físicas no fresamento. Adaptado de (Sandvik 2005).

Além disso, a espessura do cavaco varia de acordo com a disposição da fresa em relação à peça, ou melhor, em relação ao ângulo de posição (χ_r). Este ângulo é medido entre o plano da superfície usinada e a superfície produzida pela aresta principal de corte. A Figura 2.7 representa a ilustração de alguns ângulos de posição mais freqüentes no fresamento frontal.

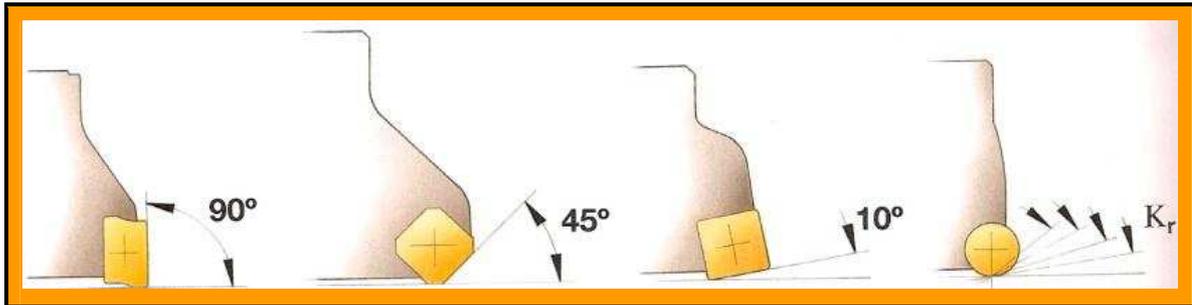


Figura 2.7 – Variação do ângulo de posição de uma fresa (Sandvik, 2005).

Valor pequeno do ângulo de posição produzirá cavacos mais finos. Estes cavacos se espalham por um comprimento maior da aresta de corte, reduzindo assim a carga sobre esta. Com isto maiores valores de avanço por dente poderão ser utilizados, o que aumenta a taxa de produção. Por outro lado, um χ_r pequeno significa menor capacidade de aumento de a_p .

A norma ABNT NBR 6163/80 (1980), que define os parâmetros relacionados com a nomenclatura e geometria da ferramenta de corte, define as seguintes superfícies nas ferramentas de corte:

- *Superfície de saída* (A_v): definida como sendo a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco desliza.

- *Superfície de Folga*: superfície que determina a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem. Distinguem-se a *superfície principal de folga* (A_α) e a superfície secundária de folga (A'_α).

- *Aresta principal de corte* (S): é a aresta de corte cuja cunha de corte, observada no plano de trabalho e para um ângulo de direção de avanço de $\phi = 90^\circ$, indica a direção de avanço.

- *Aresta secundária de corte* (S'): é a aresta de corte cuja a cunha de corte, observada no plano de trabalho e para um ângulo de direção de avanço de $\phi = 90^\circ$, indica a direção contrária a direção de avanço.

A Figura 2.8, representa uma ilustração de uma fresa cilíndrica para o fresamento frontal e ilustra categoricamente estas definições.

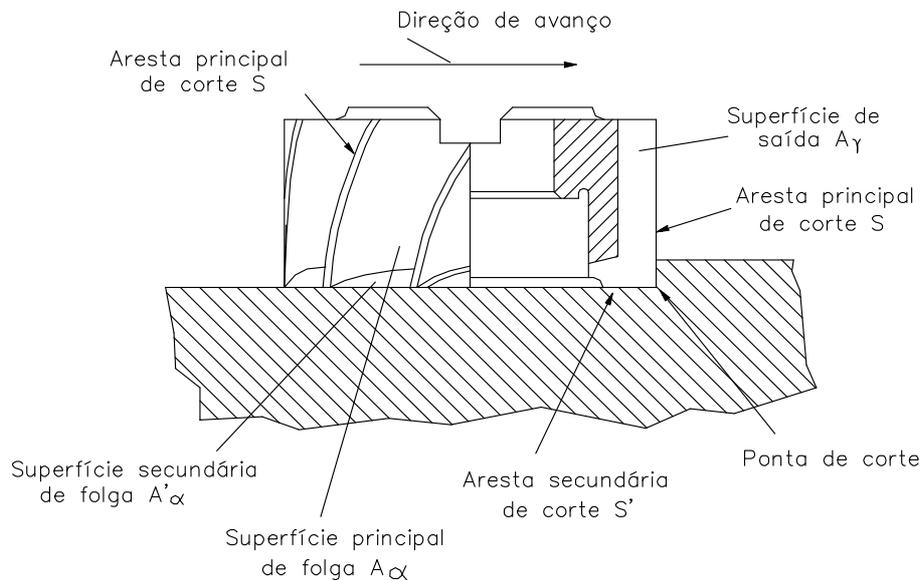


Figura 2.8 – Arestas de corte e superfícies da cunha de corte de uma fresa frontal (Machado e Da Silva 2004).

Durante a operação de fresamento, a peça se desloca no mesmo sentido ou em sentido contrário ao sentido de rotação e isso afeta a natureza do início e final do corte, conseqüentemente no processo de usinagem. Para isso, à relação entre os sentidos das velocidades de corte e de avanço, distinguem-se em fresamento concordante (do inglês *down milling* ou *climb milling*) e discordante (do inglês *up milling* ou *conventional milling*). Assim, o fresamento **discordante** é aquele onde o ângulo ϕ cresce de zero a um valor máximo (o sentido de movimento de avanço é contrário ao sentido de movimento rotatório da fresa) e o fresamento **concordante** é aquele onde o ângulo ϕ começa em um valor máximo e decresce até zero (o sentido do movimento de avanço é o mesmo do movimento rotatório da fresa) Diniz et al (2006).

As técnicas do fresamento concordantes são bastante utilizadas na maioria das aplicações de fresamento, desde que se utilize máquina rígida e com dispositivos que eliminem o surgimento do efeito “*back-lash*”. Este efeito é resultante da folga existente entre o fuso e a porca que são responsáveis pelo avanço da mesa durante o seu movimento de avanço na usinagem. No caso da ferramenta arrastar a peça, o avanço aumenta involuntariamente, e

assim pode produzir um cavaco com espessura significativamente maior que o normal e, conseqüentemente, levar à quebra da ferramenta. No entanto, isso pode ser evitado utilizando-se a técnica do fresamento discordante, e os cuidados com a rigidez e correta fixação da peça devem ser considerados (Ramos, 2004).

Quando existe a disponibilidade de máquinas rígidas e dispositivos que eliminem o efeito “*back-lash*” o fresamento concordante apresenta as seguintes vantagens em relação ao fresamento discordante (Metals Handbook, 1989):

- Os dispositivos de fixação da peça são mais simples e têm custo menor, já que a ferramenta exerce uma força no sentido de empurrar a peça para baixo;
- Pode-se utilizar fresas com ângulos de saída mais elevados, reduzindo, desta forma, a potência de corte;
- Menor probabilidade de arrastamento de cavacos e, conseqüentemente, de causar danos à ferramenta (no caso do cavaco estiver preso ou “soldado” na aresta de corte, no concordante ele seria cisalhado sem representar danos à ferramenta e já no discordante o cavaco poderia levar à quebra da ferramenta);
- Melhor controle dos cavacos já que eles são amontoados mais comumente atrás da fresa e não na frente;
- As arestas de corte apresentam menor desgaste, pois o corte se inicia com o cavaco de espessura máxima e vai decrescendo;
- O acabamento da superfície usinada geralmente é melhorado porque o efeito do atrito com o cavaco no início do corte é eliminado.

Quanto ao fresamento discordante, este é recomendado nas seguintes situações, onde o fresamento concordante não apresenta bom desempenho:

- Quando existe o efeito “*back-lash*” ou máquina apresenta folgas em seus componentes (geralmente recomendado para máquinas mais antigas ou obsoletas);
- Em situações onde o acabamento da superfície não é a principal exigência;
- Em usinagem em que a profundidade de corte é bastante variada (cerca de 20%);
- Em usinagem de materiais fundidos ou forjados que apresentam superfícies irregulares ou que têm areia ou crostas.

Estas características tornam o processo de fresamento dependente das características das condições de corte, da máquina-operatriz, dos acessórios disponíveis, da forma e dos

mecanismos de desgaste envolvidos, do custo das ferramentas, das qualidades geométrica e dimensional exigidas, das tolerâncias e do tipo de produção.

No fresamento concordante, o sentido de avanço da peça é o mesmo da rotação da fresa na área de corte. A espessura do cavaco vai diminuindo, desde o início do corte, até chegar a zero no final do corte em fresamentos periféricos. Já para o discordante, o sentido de avanço da peça é o oposto da rotação da fresa na área de corte. A espessura do cavaco começa em zero e vai aumentando até o final do corte (Sandvik, 2005). A Figura 2.9 representa o sentido de rotação da fresa e avanço da mesa nos fresamentos concordante e discordante.

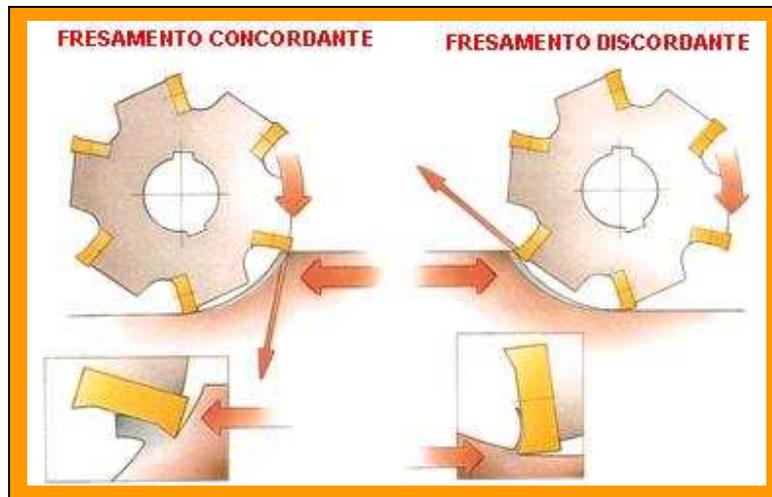


Figura 2.9 – Fresamento discordante e concordante. Adaptado de (Sandvik 2005).

Diniz et al (2006), explica que no fresamento discordante a espessura de corte aumenta progressivamente de zero até um valor máximo. Inicialmente quando a aresta toca a peça, ela é forçada para dentro da peça, criando um excessivo atrito (com conseqüente formação plástica daquela região da peça, ao invés da formação do cavaco) e altas temperaturas. Além disso, frequentemente o contato é realizado com uma superfície encruada, causada pelo dente de corte anterior. Estes atritos incentivam bastante o desgaste da ferramenta. Quando a pressão da aresta atinge um valor capaz de vencer a tensão de ruptura da material da peça, a ferramenta penetra a peça e, como os movimentos de usinagem, retira uma porção de cavaco em forma de vírgula. Assim, no início da operação de cada dente, a componente vertical da força de usinagem tende a afastar a ferramenta da peça e empurra a peça contra a mesa fresadora, enquanto que no fim da operação de um dente, a aresta cortante tende a arrancar a

peça da mesa. Essa alternância da componente vertical da força de usinagem produz vibrações indesejáveis, que prejudicam o acabamento superficial e a tolerância da peça fresada.

Mediante a estes fatos, justifica-se escolher o fresamento concordante preferencialmente, sempre que a máquina-ferramenta, os acessórios e a peça permitirem, pois os defeitos listados no fresamento discordante serão minimizados. Isto, deve-se ao fato de que no fresamento concordante, a ferramenta inicia o corte gerando um cavaco de grande espessura. Isso evita o excessivo atrito, gerando assim menos calor e o mínimo de possibilidade de encruamento por deformação plástica. A grande espessura do cavaco ainda influenciará na forças de corte, fazendo que elas atuem empurrando a peça contra a fresa, mantendo a pastilha no corte, permitindo que os efeitos de vibração tornem-se mais estáveis.

Porém, revelam Diniz et al (2006), podem ainda haver inconvenientes no fresamento concordante. Verifica-se neste tipo de corte que a espessura do cavaco inicialmente é máxima, e diminui progressivamente no decorrer da usinagem, até atingir um valor igual a zero. Por isso, nas peças que apresentem uma camada superficial endurecida (crosta de fundição ou de forjamento, por exemplo), o contato inicial da aresta cortante se dá em condições desfavoráveis, exigindo maiores esforços para o cisalhamento do material, e assim influenciando na vida da ferramenta. Outro agravante é que a componente horizontal da força de usinagem possui o mesmo sentido de avanço da mesa, o que pode prejudicar no sistema de avanço da máquina-operatriz, pois em algumas máquinas acionadas por um sistema fuso-porca que é solidário à mesa da máquina, tem que haver no fuso uma força no sentido oposto ao do avanço da mesa. Portanto, o fuso tende a ir para um lado desejado, e a força de usinagem tenta empurrá-lo para o sentido oposto, o que gera vibração. Neste caso deve-se optar pelos fresamentos discordantes. Também, quando houver grandes variações de tolerância no trabalho, o fresamento discordante pode ser mais vantajoso.

2.2 Fresamento Frontal Simétrico e Assimétrico

Este tópico foi escolhido para abordagem, pois foi utilizado o fresamento frontal assimétrico nos ensaios experimentais realizados no presente trabalho.

Primeiramente é importante lembrar que existem três tipos básicos de situações envolvendo a relação do diâmetro fresa com a largura da peça, são eles:

1º - Quando a largura da peça for maior ou igual ao diâmetro da fresa, resultando em cavacos finos na entrada e saída ou na necessidade de vários passes.

2º - Diâmetro da fresa for um pouco superior à largura da peça, como acontece em geral, no processo de fresamento (20 a 50% geralmente representando a situação ideal, especialmente em faceamento).

3º - O diâmetro da fresa for bem maior que a largura do corte, com o eixo da fresa bem fora da largura da peça. Isso acontece principalmente nos casos de faceamento e fresamento de disco, fresamentos de bordas longas e fresamento de topo (Sandvik, 2005).

O fresamento frontal simétrico é caracterizado por apresentar uma concordância entre o posicionamento do eixo da fresa e a linha de simetria da peça em usinagem. Esse posicionamento central (para fresas de facear) dependendo da largura da peça, resulta em um menor contato (ângulo de contato) de cada aresta com a peça (quando comparado com o fresamento frontal assimétrico) e, portanto, poderá resultar numa maior vida da ferramenta. Entretanto, a direção das forças radiais de corte no corte simétrico variará a medida que a aresta de corte penetrar na peça, o que poderá levar a vibrações e à quebra prematura da aresta. Obviamente este problema é minimizado quando se tem mais de um dente simultaneamente no corte.

Para o fresamento frontal assimétrico, o corte não ocorre sobre o eixo de simetria da peça em usinagem. Quando toda a superfície plana está sendo fresada, tem-se que a penetração de trabalho é menor que o diâmetro da peça. Neste caso, pode-se também classificar o fresamento em concordante, se a maior parte do corte tiver a espessura de corte decrescente; e discordante, se a maior parte do corte tiver a espessura de corte crescente. O fresamento assimétrico é vantajoso quando o diâmetro da fresa é grande em relação à largura da peça, devido ao fato de quando isto acontece neste tipo de fresamento, pode-se ter um maior número de dentes simultaneamente no corte mais suave, quando comparado ao fresamento simétrico. Quando o corte é assimétrico, a variação da direção da componente radial da força de usinagem é bem menor, e com isso menor tendência à vibração (Diniz et al, 2006). Em síntese, o processo de fresamento que foi adotado nesta investigação foi o fresamento frontal assimétrico discordante, que será melhor detalhado no Capítulo III deste trabalho.

No fresamento é frequente o choque da ferramenta com a peça, por tratar-se de corte intermitente. Caso as avarias prejudiquem consideravelmente a integridade da ferramenta, e com isto acelere o fator de fim de vida da ferramenta, sugere-se, segundo Diniz et al (2006), que o fresamento seja assimétrico, diminuindo o batimento radial, conseqüentemente diminuindo as vibrações mecânicas geradas no processo de fresamento.

Diniz e Caldeirani Filho (1999) investigaram a influência da posição relativa da ferramenta e da peça na vida da ferramenta de metal duro da classe P, no desgaste e no acabamento superficial da peças durante um fresamento frontal de um aço AISI 1045. Eles perceberam que para um maior afastamento entre o eixo de fresa e a linha de simetria do material usinado, de modo que configurasse um fresamento frontal assimétrico discordante, o desgaste na ferramenta seria gradualmente diminuído para o mesmo critério de fim de vida quando maior fosse este afastamento. Esta simples mudança no posicionamento já seria substancial na conservação da integridade da ferramenta. Diniz et al (2006) ressalta que estes resultados poderiam não ser os mesmos em outras situações. Se houvesse uma mudança de ferramenta para uma de classe mais tenaz, ela seria mais resistente ao choque e lascamento causado por ele. Assim, o lascamento não seria mais tão determinante para o fim da vida da ferramenta, não havendo a necessidade do deslocamento entre o centro da fresa e o eixo de simetria da fresa.

Uma importante característica de todo processo de fresamento é que a ação de cada aresta de corte é intermitente. Cada aresta usina durante menos que a metade de uma revolução do corte, e em algumas vezes por uma pequena parte do ciclo. Esta aresta está sujeita aos impactos periódicos durante o contato com a peça. Com estas características, a tensão e o calor gerado durante parte do ciclo do processo de usinagem é seguido de um período em que aliviam-se as tensões geradas anteriormente e seguida de um resfriamento. Frequentemente o tempo de usinagem de uma aresta de corte é uma fração de segundos que é repetido varias vezes no tempo de um segundo, gerando fadiga mecânica e térmica na ferramenta (Trent e Wright 2000).

2.3 Desgaste das Ferramentas de Corte

Segundo a norma ISO 3685 (1993), o desgaste de uma ferramenta é o resultado de mudanças na forma da ferramenta a partir do seu estado original, que acontecem durante o processo de corte, provocadas pela perda gradual de material ou deformação.

Machado e Da Silva (2004), definem desgaste em ferramentas de usinagem, como sendo a destruição de uma ou de ambas superfícies que compõem um sistema tribológico, geralmente envolvendo perda progressiva de material.

O estudo dos principais mecanismos de desgaste das ferramentas de corte torna-se necessário para se adequar os parâmetros do processo e reduzir os problemas de parada de

máquina para troca da ferramenta. A otimização dos parâmetros de corte melhora a produtividade e previsibilidade do sistema adequando o processo para uso de modelos automatizados (Telles, 2007). Apesar de sua importância, o desgaste nem sempre recebe a atenção merecida, principalmente quando não é associado ao aspecto econômico. As perdas econômicas conseqüentes de desgastes e avarias são generalizadas e perversas, e não envolvem tão somente os custos de reposição, mas também os custos de depreciação de equipamentos, diminuição da produção, falta de competitividade e aumento do consumo de energia (Da Mota, 2006).

O desgaste é um fenômeno negativo que acontece com todas as ferramentas de corte, principalmente nas condições mais críticas e são fortemente dependentes da combinação do material da peça a ser usinada, do material da ferramenta e da geometria do cavaco. Os parâmetros de corte, como velocidades, avanços e profundidades de corte, assim como o sistema de arrefecimento da interface cavaco/ferramenta, determinarão a forma de desgaste predominante (Da Mota, 2006).

Autores como (Trent , 2000; Machado e Da Silva, 2004) afirmam alguns motivos que podem levar à substituição da ferramenta de corte durante o processo de usinagem, listam três, são eles: avaria (lascamento, quebra ou trincamento), deformação plástica; e desgaste propriamente dito.

Todos estes fatores podem combinar entre si, e assim atacam uma pequena parte da cunha em contato com o material usinado. Os efeitos deste ataque dependem principalmente das propriedades do material da ferramenta e da peça, das condições de corte e do fluido de corte. Dentro deste contexto, as principais características para a ferramenta são (Sandvik, 2001):

- Alta dureza;
- Estabilidade Química;
- Superfície inerte;
- Boa relação resistência/tenacidade;
- Adesão de revestimento;
- Baixo coeficiente de difusão e expansão térmica.

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. A Figura 2.10 identifica as três formas de desgaste que

podem ocorrer nas ferramentas de usinagem, identificadas como: desgaste de cratera (área A), desgaste de flanco (área B) e desgaste de entalhe (área C e D).

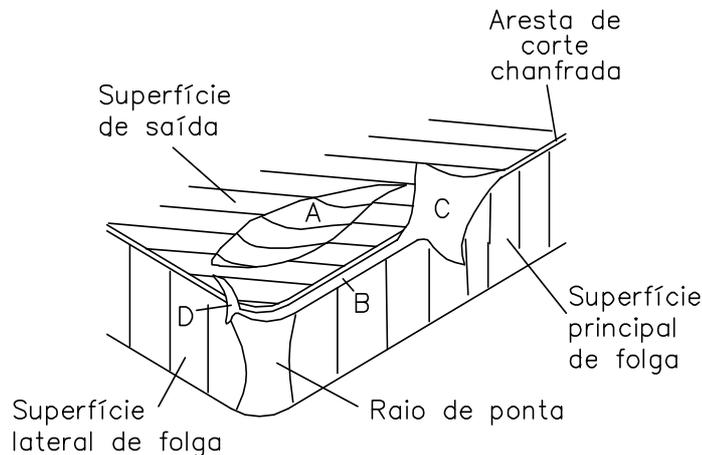


Figura 2.10 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (Dearnley; Trent, 1982, apud Machado et al., 2009).

O desgaste de flanco é o tipo de desgaste mais comum, todo o processo de usinagem causa desgaste frontal. Esse tipo de desgaste ocasiona a deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original, faz com que a peça mude de dimensão, podendo sair de sua faixa de tolerância. É incentivado pelo aumento da velocidade de corte.

O desgaste de cratera é fortemente influenciado pelo atrito entre a ferramenta e o escoamento do cavaco. Por não ocorrer em alguns processos de usinagem, principalmente quando se utiliza ferramentas de metal duro revestidas (a cobertura de Al_2O_3 é a mais eficiente contra a craterização por ser mais estável quimicamente). Pode-se ainda aumentar a estabilidade química do material da ferramenta, adicionando TiC ao WC do metal duro (Diniz et. Al, 2005).

A geometria da ferramenta também é importante, o uso de ferramenta com ângulo de saída positivo reduz a pressão sobre a ferramenta e diminui o contato entre o cavaco e o inserto, reduzindo o desgaste de cratera.

O desgaste de entalhe também ocorre na superfície de folga assim como o desgaste de flanco. O entalhe pode se formar no extremo da aresta que corresponde à profundidade de corte, onde o ar entra em contato com a zona de corte. Esse tipo de desgaste pode provocar rebarba e debilitar a aresta de corte, provocando aumento da rugosidade superficial e até provocar a quebra da ferramenta. Para minimizar esse desgaste, é conveniente utilizar uma

ferramenta de metal duro com elevado conteúdo de Co e coberturas com alumina ou TiN. Também é possível alterar a profundidade de corte no programa de usinagem para minimizar o problema. A Figura 2.11 ilustra o três tipos de desgaste abordados anteriormente.



(a) – Desgaste de Flanco



(b) – Desgaste de Cratera



(c) – Desgaste de Entalhe

Figura 2.11 – Fotografias das três formas de desgaste.(Sandvik, 1999).

2.4 Mecanismos de Desgaste nas Ferramentas de Corte

Em condições normais de corte, uma das formas de desgaste apresentada na Figura 2.9 irá prevalecer, e eles se desenvolverão por vários mecanismos de desgaste. Segundo Trent (2000), essas formas de desgaste podem ser geradas por uma ou por várias combinações de mecanismos de desgaste: deformação plástica, adesão ou *attrition*, difusão, abrasão ou oxidação.

A aresta postiça de corte – APC também pode influenciar o sistema de desgaste. Ela é causada pela soldagem ou caldeamento do material em usinagem na face da ferramenta e que, por isso, assume a função do gume a partir do momento no qual o material aderido se deforma e encrua com o fluxo posterior de cavacos sobre ele. Partículas do gume postiço podem se

desprender e deslizar entre o flanco e a superfície de corte, dependendo dos parâmetros de corte utilizados. Isto conduz a um desgaste excessivo do flanco por abrasão e à má qualidade superficial, pois parte do material pode aderir-se à peça (Andrade, 2005).

Diniz et. al (2006) definem avaria como um processo de destruição da ferramenta de corte que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lasca ou trinca da ferramenta de corte. A diferença entre microlascamento, lascamento e quebra está na dimensão da fratura, que é definida pelo volume de material perdido pela ferramenta. O lascamento é um tipo de avaria gerada pela retirada repentina de grandes partículas do corpo da ferramenta de corte, ao contrário do que ocorre no desgaste que é resultante de uma retirada contínua de partículas muito pequenas da ferramenta. Esta avaria ocorre principalmente em ferramentas de material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada. O lascamento prejudica o acabamento superficial da peça e, se continuar aumentando, pode provocar a quebra da ferramenta. Machado e Da Silva (2004) reforçam que as avarias são mais comuns no corte interrompido (fresamento), devido aos choques mecânicos e térmicos inerentes ao processo.

Para Machado e Da Silva (2004), deformação plástica é a mudança da geometria da ferramenta de corte pelo deslocamento de massa. Ela ocorre por cisalhamento devido às altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte. Em casos extremos pode causar a total destruição da cunha cortante da ferramenta, inclusive com perda de massa. É mais comum ocorrer em ferramentas com resistência ao cisalhamento relativamente baixa e com maior tenacidade, como o aço-rápido, as ligas fundidas e o metal duro. A ocorrência nas cerâmicas é difícil porque a grande fragilidade deste grupo de materiais não apresenta campo plástico suficiente para permitir o deslocamento de material, promovendo antes, a quebra ou fratura.

O mecanismo de abrasão é uma das principais causas de desgaste da ferramenta, na qual partículas da ferramenta são arrancadas à alta pressão e temperatura devido ao deslocamento com atrito entre a ferramenta e a peça sendo usinada. Esse tipo de desgaste pode ser incentivado pela presença de partículas duras na peça e pela temperatura de corte que reduz a dureza da ferramenta (Stemmer, 2005; Diniz *et al*, 1999).

Esse tipo de mecanismo de desgaste envolve a perda de material por microsulcamento ou microlascamento, causados por partículas de elevada dureza relativa. Estas partículas podem estar contidas no material da peça ou podem, principalmente, ser partículas da própria ferramenta de corte, que são arrancadas por aderência e arrastamento, por exemplo. As ferramentas de aço rápido são mais suscetíveis a esse tipo de desgaste, principalmente na

usinagem de ferros fundidos. Para metal duro e cermet, as partículas duras dos carbonetos são arrancadas das ferramentas, surgindo um mecanismo acelerado de desgaste. Para inibir a ação desse mecanismo é necessário uma classe de metal duro com baixo percentual de cobalto e com uma granulometria mais fina (Trent, 2000).

O mecanismo de adesão é a principal causa de formação de aresta postiça de corte (APC). Este mecanismo de desgaste surge principalmente quando a velocidade de corte e avanço são relativamente baixos, de tal modo que a temperatura não é alta o suficiente para provocar difusão ou deformação plástica na ferramenta de corte, (Melo et al., 2005). Isto não significa que este mecanismo não está presente quando se usina em condições mais severas. Quando o fluxo de material sobre a superfície de saída ou de folga da ferramenta é menos laminar e mais intermitente provoca o arrancamento de grãos, fragmentos destes ou grupos de grãos da ferramenta de corte (Teles, 2007). Sob alta pressão e temperatura, partículas provenientes da peça ou do cavaco se caldeiam ao gume da ferramenta de corte (Stemmer, 2005; Diniz et al, 1999).

Trent (2000) denomina este mecanismo de “*attrition*” e aborda-o de uma forma diferente. O material da peça aderido à superfície de saída ao se desprender provoca a remoção de fragmentos microscópicos da ferramenta acelerando seu desgaste. Através deste fenômeno, as partículas da ferramenta que são removidas pela continuidade do movimento de escorregamento entre as duas superfícies seguem aderidas ao fluxo do cavaco ou peça. Como elas são bastante duras, ao atritarem com regiões da ferramenta mais a frente, desgastam-nas por abrasão.

O mecanismo de difusão envolve a transferência de átomos de um material para outro e é fortemente dependente de altas temperatura e solubilidade dos elementos envolvidos na zona de fluxo (zona de cisalhamento secundário) e do tempo de contato. As moléculas que formam a estrutura da ferramenta se movem, misturando-se formando ligas menos resistentes e mais suscetíveis ao desgaste (Stemmer, 2005). Em usinagem, as velocidades relativas entre ferramenta-peça ou ferramenta-cavaco são altas e o tempo de contato entre esses materiais é muito pequeno. Isso praticamente levaria o mecanismo de difusão a ser desprezível, se não fosse a existência de uma zona de aderência (zona de fluxo) na interface cavaco-ferramenta (Trent 1984). As temperaturas na zona de fluxo são elevadas o suficiente para promover o processo difusivo. A renovação constante da zona de aderência, promovida pela alta taxa de deformação, garante um fluxo difusivo também constante. Se esta zona de aderência não fosse

renovada, haveria o saturamento desta zona de aderência, que funcionaria como uma barreira à difusão.

Quando o material da ferramenta apresenta afinidade com o oxigênio, sob altas temperaturas ocorre a formação de uma camada óxida em partes da ferramenta. Essa camada óxida pode ser removida pelo atrito entre a peça e a ferramenta, gerando a marca de desgaste (Stemmer, 2005; Diniz et al, 1999).

Um fator importante no controle da oxidação em ferramentas de metal duro é a concentração de oxigênio no ambiente de corte. Observa-se que o aumento da concentração desse gás provoca um conseqüente aumento da taxa de oxidação (Teles, 2007). Os principais fatores causadores de desgaste são mostrados na Figura 2.12.

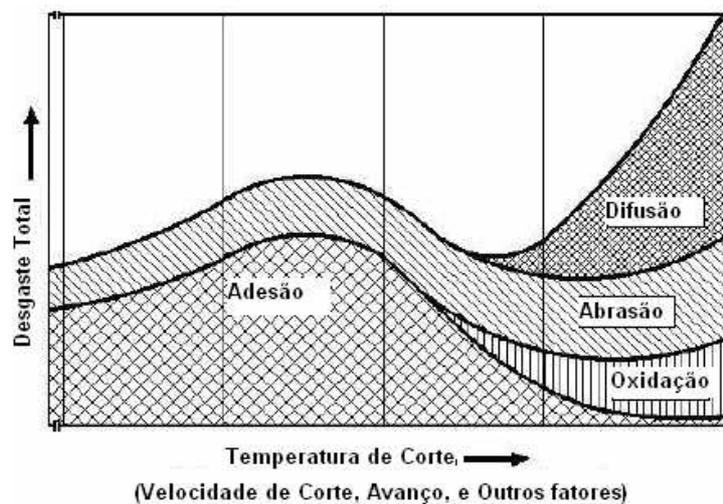


Figura 2.12 – Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte (Vieregge, 1970, apud Machado et al., 2009).

2.5 Ensaio de Usinabilidade

De um modo geral, usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão (Diniz et al, 2006). A usinabilidade pode ser considerada uma propriedade do material, mas a medida da usinabilidade depende dos parâmetros considerados. Em outras palavras, a ordem no ranking da usinabilidade de um número de materiais pode não ser o mesmo, quando obtidos em condições diferentes (Machado et al., 2009). Estes autores salientam ainda que a usinabilidade

não é usada apenas para quantificar a facilidade ou a dificuldade de se usinar materiais. Ela pode ser usada também para quantificar o desempenho de ferramentas de corte, de fluidos de corte e de geometrias das ferramentas. Trent e Wright (2000) sugere que a usinabilidade não é uma propriedade, mas o “modo” como este material se comporta durante a usinagem.

Na prática, o significado de usinabilidade tende a refletir os interesses do usuário. Pode representar, por exemplo, o número de componentes produzidos por hora, custo de usinagem, ou a qualidade de acabamento sobre uma superfície crítica (Trent, 2000).

A respeito da falta de uma medida universal de usinabilidade, Trent e Wright (2000) listam alguns critérios inerentes ao processo de usinagem, que quantificam o índice de usinabilidade dos materiais, como por exemplo:

(1) Vida da ferramenta: a quantidade de material removido por aresta de corte, sob condições padrões de usinagem, antes que a performance da ferramenta torne-se indesejável ou a ferramenta apresente um desgaste padrão que poderá comprometer seu desempenho.

(2) Taxa limite de material removido: o volume máximo que um material poderá ser removido durante sua usinagem para um critério de vida da ferramenta.

(3) Forças de usinagem: forças que atuam na ferramenta (medidas por um dinamômetro, a partir de condições específicas) ou a potência necessária no processo.

(4) Acabamento superficial: a superfície final adquirida sob condições de usinagem específicas.

(5) Forma do cavaco: a forma do cavaco como influencia no escoamento do cavaco pela superfície de saída da ferramenta, sobre condições padronizadas de usinagem.

Vale lembrar que o processo é de certa maneira mais complexo. Por exemplo: se a vida da ferramenta, baseada em uma certa quantidade de desgaste, é selecionada como critério de usinabilidade, ainda será necessário especificar como isto poderá ser mensurado (forma de desgaste, parâmetros que serão medidos), o tipo de ferramenta de corte utilizada, as condições de corte, etc. Tudo isto deve ser selecionado arbitrariamente. Sendo assim, Machado et. al (2009) explicam em suas teorias que a usinabilidade é uma função do teste, e qualquer número de usinabilidade deve acompanhar uma descrição completa deste. Sem estas informações adicionais, este número não tem significado. Além disso, a grandeza usinabilidade é um valor comparativo, deve ser sempre fornecida comparando-se pelo menos dois materiais, um valor isolado não fornece nenhuma informação útil.

A usinabilidade depende do estado metalúrgico da peça, da dureza, das propriedades mecânicas do material, de sua composição química, das operações anteriores efetuadas sobre o material (seja a frio ou a quente) e do eventual encruamento (Diniz et. al, 2006).

Os testes de usinabilidade são classificados, de acordo com sua duração, em testes de curta e longa duração. Diniz et. al (2006) explica que os ensaios de curta duração são aqueles onde são utilizadas condições forçadas de usinagem e/ou materiais de ferramentas pouco resistentes ao desgaste, a fim de que a vida da ferramenta termine rapidamente e o ensaio possa ser realizado em um curto espaço de tempo. Porém a maneira mais precisa para avaliação da usinabilidade é o acompanhamento na linha de produção, em condições reais. A desvantagem deste método é que ele envolve grande quantidade de material e tempo além de ter alto custo. Deve-se ressaltar que as diferentes condições de ensaios podem dar origem a diferentes resultados de usinabilidade. Por exemplo, testes feitos com ferramentas de aço-rápido dão resultados diferentes de testes com metal-duro. Mecanismos diferentes podem estar atuando e influenciando na usinabilidade. E o melhor exemplo de teste de longa duração é o teste de vida da ferramenta e seus resultados são geralmente apresentados usando a equação de Taylor.

Machado et. al (2009) explicam que uma das grandes contribuições dos ensaios de usinabilidade é a possibilidade de geração de banco de dados de usinagem, que é uma tarefa árdua, mas de grande contribuição prática. A maior dificuldade de geração de banco de dados está na existência de grandes quantidades de materiais de processamento em geral e de materiais de ferramentas. Além disso, para se ter um banco de dados confiável, deve-se utilizar critérios e procedimentos padronizados para que os dados gerados sejam transferíveis e que possam realmente ser utilizados em princípio, sem restrição. Infelizmente, em usinagem não se pode confiar integralmente nas informações contidas em bancos de dados, mas eles são extremamente úteis no ponto de partida para uma determinada aplicação. Assim, por meio de ensaios de usinabilidade pode-se catalogar resultados e gerar informações práticas preciosas do ponto de vista de chão de fábrica. Informações deste tipo são encontradas nos catálogos dos principais fabricantes de ferramentas de corte do mercado mundial.

Os testes de usinabilidade podem ser subdivididos em duas categorias básicas: aqueles que não requerem usinagem, e aqueles que a requerem. Há ainda uma subdivisão paralela onde se tem mais duas categorias: os testes classificatórios conhecidos como “ranking testes” e os testes absolutos. Os testes classificatórios são muito úteis, como o próprio nome diz, na classificação da usinabilidade de diversos materiais, porém não se obtém resultados

quantificadores. É possível somente se determinar qual material é mais fácil de ser usinado (sem fornecer valores numéricos).

Os testes absolutos por sua vez, permitem uma visualização mais completa das características de usinagem de um par ferramenta-peça, e possibilitam quantificar o quanto um material é mais fácil de usinar do que outro. Geralmente são considerados, sobre muitas circunstâncias, superiores aos testes classificatórios (Machado et. al., 2009).

Os testes que não requerem usinagem são sempre testes classificatórios, enquanto que o que requerem usinagem podem ser classificatórios ou absolutos.

Podem ser classificados como testes de curta duração ou longa duração. Os que não requerem usinagem e os classificatórios, que requerem usinagem, são sempre de curta duração e os absolutos são quase sempre de longa duração.

Exemplos de testes que não requerem usinagem:

- testes de composição química,
- testes de microestrutura,
- testes de propriedades físicas.

Exemplos de testes que requerem usinagem:

- testes de pressão constante,
- testes de faceamento rápido,
- testes de torneamento cônico,
- testes da taxa de desgaste (Taylor).

Há um teste absoluto de longa duração, teste de vida da ferramenta, com ferramenta de tornear monocortante, especificado pela norma ISO 3685 de 1977, que tem objetivo de assegurar que os testes sejam realizados em condições padrões afim de que os dados de fontes diferentes sejam compatíveis. Os resultados são geralmente apresentados na forma da equação de Taylor.

Serão detalhados a seguir alguns ensaios que quantificam o grau de usinabilidade de uma material. Estes ensaios requerem usinagem e são frequentemente realizados por pesquisadores de um modo geral a analisar a usinabilidade dos materiais. Os testes descritos a seguir referem-se a: teste de vida da ferramenta, rugosidade, potência de corte e vibração da máquina.

2.5.1 Vida da Ferramenta de corte

A vida da ferramenta pode ser definida como o tempo em que as ferramentas de corte trabalham efetivamente sem perder a capacidade de corte até que haja um critério de fim de vida previamente estabelecido. O fim de vida de uma ferramenta de corte será definido pelo grau de desgaste pré-estabelecido (Ferraresi, 1970). Alguns fatores, quando monitorados, podem ajudar a prever o fim de vida da ferramenta de corte e por consequência o valor máximo do desgaste. Entre os fatores pode-se citar:

- receio de quebra da aresta de corte;
- acabamento superficial obtido é insatisfatório;
- temperaturas elevadas atingidas nas superfícies de contato da ferramenta;
- aumento das forças de usinagem a níveis muito elevados;
- aumento excessivo no nível dos ruídos e vibrações;
- impossibilidade de manter tolerâncias dimensionais especificadas;

Se estes fatores listados acima forem monitorados e controlados, será possível determinar o momento em que a ferramenta deverá ser substituída ou reafiada. A quantificação da vida da ferramenta pode então ser determinada através de vários critérios, como:

- tempo total de trabalho (min);
- percurso de corte (Km);
- volume de material removido (cm^3);
- número de peças produzidas;
- nível da marca de desgaste;

Os fabricantes de ferramentas de corte sugerem que ao atingir o fim de vida, seja feita a troca ou reafiação das arestas de corte, pois se isto não ocorrer, poderá surgir algum tipo de dano ou quebra catastrófica da aresta de corte, comprometendo por sua vez a qualidade final da peça ou a integridade da máquina-ferramenta. Com o controle correto do fim de vida de uma ferramenta de corte, será possível manter o processo produtivo dentro de condições econômicas adequadas.

A norma ISO 3685/77, para ferramentas monocortantes, sugere a troca da ferramenta de aço rápido, metal duro ou cerâmica quando um dos tipos de desgaste da ferramenta atingir os seguintes valores:

- Média da largura do desgaste de flanco (VB_B) igual a 0,3 mm, se o desgaste da superfície de folga (região B da Figura 2.10) é regular.

- Largura máxima do desgaste de flanco da superfície de folga ($VB_{B\max}$) igual a 0,6 mm, se o desgaste da superfície de folga (região B da Figura 2.10) é irregular.

- Profundidade máxima de cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$, onde f é o avanço de corte em mm/rev.

- Se o desgaste de entalhe (VB_N) predominar, a norma recomenda a troca das ferramentas quando o VB_N atingir 1,0 mm.

- A ocorrência de uma falha catastrófica da ferramenta.

Deve-se salientar que estes valores são para os testes de vida de ferramentas, e que em condições normais de usinagem, estes valores podem ser diferentes dos recomendados na norma. Estes valores dependem de vários fatores que variam para cada processo, tais como: tolerância dimensional requerida na peça, rigidez da máquina ferramenta, e acabamento superficial desejado.

A Figura 2.13 ilustra os parâmetros utilizados para medir o desgaste em uma ferramenta de corte monocortante. Temos que: KB (largura de cratera); KT (profundidade de cratera); KM (distância do centro da cratera à aresta de corte); $VB_{B\max}$ (desgaste de flanco máximo); VB_B (desgaste de flanco médio); VB_N (desgaste de entalhe); VB_C (desgaste de ponta).

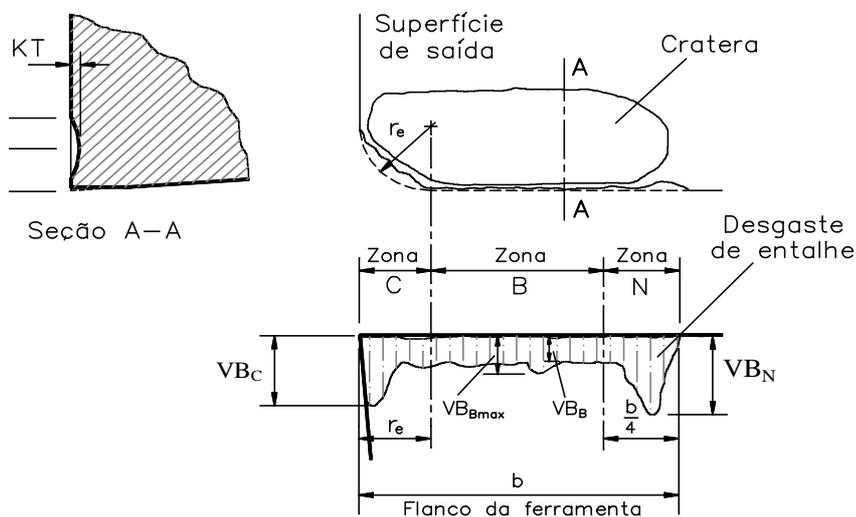


Figura 2.13 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte (Norma ISSO 3685/77).

2.5.2 Rugosidade

Outra grandeza característica de grande importância na usinabilidade dos metais é a rugosidade superficial da peça usinada. A qualidade das superfícies usinadas é caracterizada pelo acabamento na usinagem e pelas propriedades físicas e mecânicas do metal na camada superficial, Ferraresi (1970).

A rugosidade superficial constitui um desvio micro-geométrico ou uma micro-irregularidade, caracterizado por finas irregularidades na textura da superfície. Tem origem durante o processo de formação do cavaco e é influenciada pela vibração da ferramenta, aresta postiça de corte, marcas do avanço durante as operações de acabamento, atrito da superfície de incidência da ferramenta com a peça, etc. A Figura 2.14 representa um exemplo de um perfil de uma superfície. É interessante observar que o perfil pode ser dividido em rugosidade, que é um erro microgeométrico, ondulação e erro de forma.

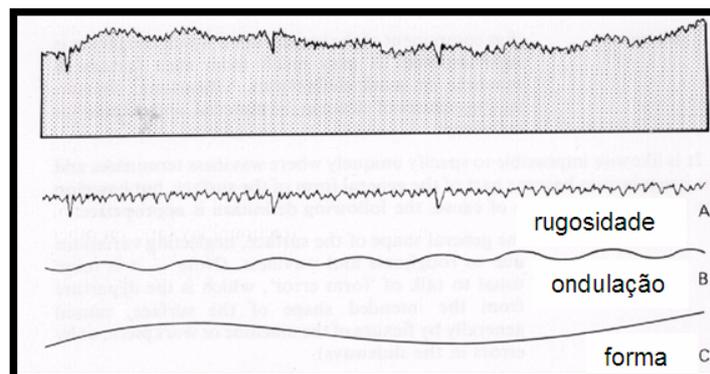


Figura 2.14 – Perfil da rugosidade, ondulação e de forma. Adaptado de (Hutchings, 1992).

Existem vários parâmetros de usinagem que podem afetar diretamente o acabamento superficial da peça usinada, e como consequência a rugosidade superficial. Os principais agentes externos que podem influenciar na rugosidade são: material da peça a ser usinada e da ferramenta, condições de corte (avanço, velocidade de corte, fluídos etc), rigidez da máquina-ferramenta etc. Machado et al., (2009) listam alguns casos onde é possível obter uma rugosidade menor ou um melhor acabamento, são eles:

- deflexões geradas por esforços de usinagem ou vibrações são pequenas.
- a ponta da ferramenta não é aguda.
- a ferramenta e a peça estão corretamente posicionadas e centradas (evitar desvios).

- o material da peça é inerentemente puro, livre de defeitos (trintas, bolhas e inclusões).
- o eixo principal da máquina ferramenta está corretamente alinhado e as guias sem desgastes.
- a aresta de corte sem quebras.
- corte sem aresta postiça de corte (APC).

À medida que a ferramenta vai se desgastando, observam-se variações mais ou menos intensas no processo de usinagem. A temperatura se eleva progressivamente, a força de corte e a potência consumida aumentam, as dimensões da superfície usinada se alteram e a rugosidade superficial normalmente piora. Em condições extremas, ocorre um faiscamento intenso no corte e a superfície usinada se apresenta áspera.

O acabamento da superfície obtido no processo de fresamento depende de vários fatores (Metals Handbook, 1989) como a composição e condição do material, velocidade, avanço, material e geometria da ferramenta e fluido de corte.

2.5.3 Potência de corte

Medir os parâmetros elétricos do motor é medir indiretamente os esforços de corte (Ferraresi, 1977). Este fato se explica, pois o motor da máquina-ferramenta, para gerar a potência mecânica necessária para executar uma operação de usinagem, consome corrente elétrica em uma quantidade diretamente proporcional à potência e as forças de corte geradas (Souto, 2007).

Basicamente em processos de fabricação a potência de usinagem está relacionada com o produto das componentes de direção das forças de usinagem pelas respectivas velocidades de corte. Portanto, para as três principais componentes das forças (força de corte, força de avanço e força efetiva) no processo de usinagem, haverá uma potência respectiva a cada uma dessas forças. Neste trabalho foi monitorada a potência necessária para girar o eixo árvore da máquina-ferramenta, ou seja, a potência efetiva de corte acrescida de um valor que depende do rendimento da máquina ferramenta.

Em síntese, o comportamento da potência está diretamente relacionado à força de corte. De uma maneira simples e clara, pode-se afirmar que todos os fatores que influenciam a força de corte, influenciarão na potência de corte. Dentro deste raciocínio, encontra-se uma vasta gama de informações a respeito de forças de usinagem que servirão para o entendimento da potência de usinagem. Trent e Wright (2004) listam dois principais fatores que agem com forte importância na força de usinagem, são elas:

- ✓ área dos planos de cisalhamento primário e secundário;
- ✓ resistência ao cisalhamento, do material da peça, nos planos de cisalhamentos primário e secundário;

Com isto, Machado e Da Silva (2004), apresentam a influência de algumas variáveis de usinagem que afetam consideravelmente na força de corte e conseqüentemente na potência de usinagem, como por exemplo: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, material da peça, material da ferramenta de corte, geometria e estado de afiação da ferramenta e uso de fluído de corte. Abordando o que estes autores relatam em sua obra, e considerando a relação que a potência de usinagem sofre com a força de usinagem, será aqui resumido o efeito apenas da velocidade, avanço e profundidade de corte e material da peça e da ferramenta.

- Velocidade de corte: fora do campo da APC, a força de usinagem e conseqüentemente a potência tendem a diminuir com o aumento da velocidade de corte. Isto ocorre devido a maior geração de calor e conseqüente redução da resistência ao cisalhamento do material nas zonas de cisalhamento, e pela ligeira redução na área de contato cavaco-ferramenta a força de usinagem tende a sofrer uma ligeira redução com o aumento da velocidade, notando-se que para valores bem altos de velocidades o comportamento da força é praticamente constante.

- Avanço e profundidade de corte: o aumento destes dois fatores, por aumentar diretamente as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, causam um aumento da força de usinagem, com isto maior potência, numa proporção direta, quase que linear.

- Material da peça: de uma maneira geral, quanto maior a resistência do material a usinar, maior a resistência ao cisalhamento nos planos de cisalhamento e, portanto, maior a força de usinagem e maior potência. Entretanto, baixa resistência pode vir acompanhada de elevada ductilidade e isto pode aumentar a área da seção de corte, influenciando também a força de usinagem.

- Material da ferramenta: a afinidade química do material da ferramenta com o material da peça pode atuar principalmente, na área da seção de corte. Se a tendência for promover uma zona de aderência estável e forte, a força de usinagem poderá ser aumentada, como resultado aumenta-se a potência de usinagem. Se a tendência for diminuir o atrito na interface, evitando as fortes ligações de aderência, a área da seção de corte poderá ser reduzida, diminuindo a força de usinagem, diminuindo a potência de usinagem.

Segundo Sales (1999) a potência consumida na operação de usinagem pode ser medida diretamente no motor elétrico da máquina operatriz. Um sensor de corrente elétrica, do tipo "hall", é instalado na fonte de alimentação do motor elétrico responsável pelo suprimento de

potência no eixo principal da máquina ferramenta. De posse da corrente elétrica consumida pelo motor elétrico, calcula-se a potência efetiva. As máquinas equipadas com comando numérico computadorizado, normalmente apresentam motores individuais para os movimentos de corte (rotação do eixo árvore) e de avanços (eixos x, y e z). Isto permite a medição de diversas componentes da potência total.

Durante o processo de fresamento a potência consumida pelo motor principal da máquina aumenta com o desgaste da ferramenta de corte. Logo, quanto maior o desgaste da ferramenta, maior o esforço de corte e, conseqüentemente, maior a corrente necessária ao processo. Por sua vez, a vida da ferramenta pode ser monitorada através da análise do comportamento dos sinais elétricos do motor da máquina.

2.5.4 Vibração em usinagem

Para que um sistema mecânico vibre é necessário, e suficiente, que o mesmo tenha capacidade de armazenar energia cinética (que tenha inércia), energia potencial elástica (que seja flexível) e uma excitação externa dependente do tempo (Duarte et al., 2005). Conseqüentemente, na prática é muito difícil evitar a vibração. Geralmente ela ocorre por causa dos efeitos dinâmicos de tolerâncias de fabricação, folgas, contatos, atrito entre peças de uma máquina e, principalmente, devido ao efeito de forças dinâmicas desequilibradas de componentes rotativos e alternativos de máquinas.

Em um processo de fabricação como a usinagem, a ocorrência de energia vibratória estará presente quase que durante todo o corte do material. Com isto, os parâmetros de usinagem como as condições de corte, material da ferramenta, material a ser usinado e a vibração na máquina-ferramenta podem influenciar decisivamente na geração de efeitos vibratórios no processo.

Só a previsão dos níveis de vibração já é uma tarefa das mais complicadas, uma vez que a vibração, que é inerente a qualquer processo de usinagem, depende de uma série de fatores: heterogeneidade dos materiais, perturbações provocadas pelo movimento relativo da ferramenta de corte sobre a superfície da peça, evolução dos desgastes das ferramentas de corte, cinemática do acionamento da máquina, perturbações oriundas de outras fontes, etc. (Sousa, 1998).

Sabe-se que o desgaste de flanco que ocorre na ferramenta durante a evolução do processo de usinagem contribui sempre no sentido de aumentar os esforços de corte. Este fato pode ser explicado pelo aumento da força de atrito diante do gradativo crescimento da área de contato entre a peça e a ferramenta na superfície de folga da mesma, o que acaba acarretando um aumento do nível de vibração no processo de usinagem. Normalmente o desgaste de cratera evolui menos que o desgaste de flanco podendo as vezes ocorrer um equilíbrio entre os dois tipos de desgastes, e que

em qualquer situação sempre provocará uma elevação dos esforços de corte, que por sua vez elevará o nível de vibração do processo (Trent, 2000).

2.6 Ferros Fundidos

Chiaverini (2005) define como ferro fundido ligas de ferro-carbono-silício de teores de carbono acima de 2%, em quantidade superior à que é retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita.

Existem diversos tipos de ferros fundidos, fundamentalmente condicionados a estrutura final obtida, isto é, dependem de sua matriz metálica, da morfologia, quantidade e distribuição de grafita na matriz do material e ainda do tratamento e distribuição de células eutéticas.

No diagrama de fases do sistema Fe-C mostrado na Figura 2.15, para a faixa correspondente aos ferros fundidos, corresponde à mais recente versão do diagrama de equilíbrio Fe-C, neste diagrama o principal elemento de liga é o carbono. Chiaverini (2005), faz alguns comentários a respeito deste diagrama, como por exemplo:

- ao teor de carbono de 4.3%, temperatura de 1148° (ponto C), corresponde a liga de mais baixo ponto de solidificação ou fusão; essa liga é chamada de eutética. que significa bem fusível.

- as ligas entre 2,0 e 4,3% de carbono são chamadas de hipoeutéticas; aquelas de carbono acima são chamadas de hipereutéticas. Os ferros fundidos correspondentes seriam denominados de hipoeutéticos, hipereutéticos e eutéticos (estes últimos com 4.3% de carbono).

- ao resfriar lentamente uma liga binária Fe-C com teor de carbono correspondente à liga eutética (ponto C), verifica-se que, exatamente no ponto C, a mesma se solidifica, havendo em equilíbrio duas fases: austenita de um lado e Fe₃C (cementita) do outro lado. Esse eutético cristalizado é chamado "ledeburita" e é constituído de um fundo de cementita com aproximadamente 6,7% de carbono e cristais dentríticos de austenita, contendo 2% de carbono.

- continuando o resfriamento, verifica-se uma diminuição gradativa do teor de carbono de austenita, visto que a composição desta acompanha a inclinação das linhas *ES* ou *A_{cm}*. Este fenômeno prossegue até que tenha atingido a temperatura de 727°C (ponto S), correspondente a 0,77% de carbono, na linha *A₁*, abaixo da qual como se sabe, não se pode mais existir a austenita.

- ao ultrapassar, pois, a linha *A₁*, essa austenita transforma-se em perlita. Assim sendo, a ledeburita, abaixo de 727° C, até a temperatura ambiente (faixa de temperaturas dentro do

qual nenhuma nova transformação ocorre) será constituída de glóbulos de perlita sobre um fundo de cementita, aspecto micrográfico desse constituinte, que corresponde pois, ao de um ferro fundido com 4,3% de carbono. As linhas X e Y o autor exemplifica as considerações feitas anteriormente.

A grafita presente em quase todos os ferros fundidos desempenha um papel importante na usinabilidade, porém a presença de inclusões de sulfetos e a relação ferrita/perlita da matriz possuem, também, efeito significativo, como será visto adiante. A grafita e as inclusões de sulfeto presentes nos planos de cisalhamento primário e secundário facilitam o trabalho de deformação e reduzem a energia necessária para a formação do cavaco. Isto, relativamente, promove um corte com baixas temperaturas de corte e pequenas forças de usinagem (Machado et al., 2005).

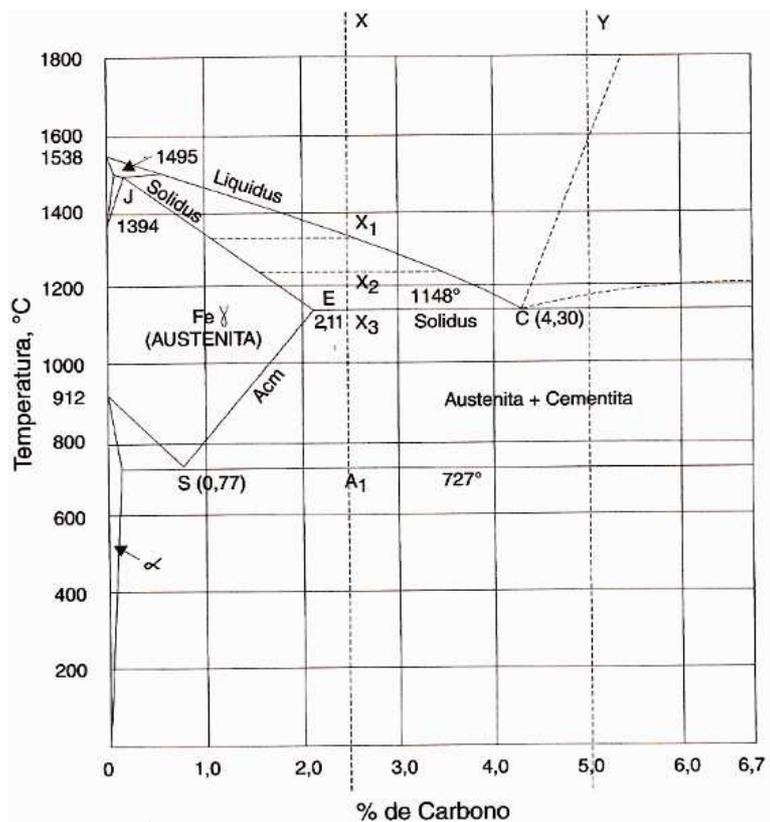


Figura 2.15 – Diagrama equilíbrio da liga Fe-C (Chiaverini, 2005).

Os ferros fundidos são geralmente classificados em: cinzento, nodular, maleável, branco, mesclados e os ferros fundidos vermiculares. Santos e Castello Branco (1991) caracterizam cada um deles da seguinte forma:

- *Ferros fundidos brancos*: são aqueles onde todo o carbono presente na liga encontra-se na forma de cementita ou outros carbonetos metálicos. A seqüência de solidificação e a microestrutura desses materiais podem ser interpretados pelo diagrama de equilíbrio metaestável (Fe-Fe₃C), com as modificações necessárias em virtude da presença de outros elementos químicos.

- *Ferros fundidos cinzentos*: são caracterizados no qual a fase formada na solidificação são a austenita e a grafita, dando-se, portanto, sua solidificação, segundo o diagrama de equilíbrio estável. Nestas ligas obtém-se grafita em forma de veios, sendo necessário distinguir-se os teores de carbono combinado, cuja soma fornece o teor total de carbono desses ferros fundidos.

- *Ferros fundidos mesclados*: quando a solidificação resulta na formação de áreas de ferro fundido branco e ferro fundido cinzento, em virtude de, parte de sua solidificação se verificar segundo o sistema estável (austenita-grafita); e parte, segundo o metaestável (austenita-carboneto).

- *Ferros fundidos nodulares*: são aqueles em que a grafita apresenta na forma de nódulos ou esferóides no estado bruto de fusão, em decorrência da adição de certos elementos químicos ou condições particulares de fabricação, que modificam a forma de crescimento da grafita, não se obtendo a grafita em veios como nos ferros fundidos cinzentos.

- *Ferros fundidos maleáveis*: são ligas que se solidificam como ferros fundidos brancos, sendo posteriormente submetidas a um tratamento térmico (maleabilização), onde a cementita se decompõe em grafita e austenita, dando origem aos chamados ferros maleáveis de núcleo preto ou americano, ou é removida parcialmente por oxidação, com formação de alguma grafita, sendo então chamado ferro maleável de núcleo preto ou europeu.

- *Ferros fundidos vermiculares*: são materiais mais recentes que os anteriores, neles é possível obter, no estado bruto de fusão, através da adição de elementos de liga, a chamada grafita vermicular, que é uma forma intermediária entre grafita em veios e em nódulos.

- *Ferros fundidos especiais*: são os que contêm porcentagens consideráveis de elementos de liga para proporcionar a obtenção de determinadas propriedades específicas. Estes ferros fundidos podem ser:

a) cinzentos – como é o caso dos ferros fundidos ao silício (cerca de 15% Si), dos ferros fundidos ao níquel (cerca de 15% Ni), ambos resistentes à corrosão, dos ferros fundidos ao alumínio (cerca de 25% Al), resistente à oxidação em temperaturas elevadas ou dos ferros fundidos ao alumínio (até cerca de 4% Al), de elevada resistência mecânica.

b) brancos – como os ferros fundidos ao cromo (cerca de 13% Cr), resistentes à abrasão.

c) nodulares – como os ferros fundidos nodulares ao alumínio (cerca de 25% Al), resistentes à oxidação em temperaturas elevadas ou os ferros fundidos nodulares ao níquel (15% Ni), resistentes à corrosão, tendo-se ainda, uma grande série de outros exemplos.

Chiaverini (2005), lista a influência dos principais elementos químicos na estrutura dos ferros fundidos. Nesse caso, os elementos químicos têm o seguinte efeito:

- *Carbono*: é o elemento base que determina a quantidade de grafita a se formar;
- *Silício*: é o elemento grafitizante que favorece a decomposição do carbono de ferro;
- *Manganês*: é o oposto do silício, estabilizando a cementita e, além disso, é um elemento dessulfurante;
- *Fósforo*: formador de um composto de natureza eutética – carboneto de ferro e fosfeto de ferro - de aparência branca e perfurada chamado steadita;
- *Enxofre*: combina com o manganês, formando sulfeto de manganês (MnS).

A faixa de composição química dos cinco principais tipos de ferros fundidos, sem elemento de liga está indico na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Faixa da composição de ferros fundidos típicos comuns (Chiaverini, 2005).

Tipo	Composição Química				
	C	Si	Mn	S	P
Branco	1,8/3,6	0,5/1,9	0,25/0,80	0,06/0,20	0,06/0,20
Maleável	2,2/2,9	0,9/1,9	0,15/1,20	0,02/0,20	0,02/0,20
Cinzento	2,5/4,0	1,0/3,0	0,20/1,00	0,02/0,25	0,02/1,00
Nodular	3,0/4,0	1,8/2,8	0,10/1,00	0,01/0,03	0,01/0,10
Grafita Compactada	2,5/4,0	1,0/3,0	0,20/1,00	0,01/0,03	0,01/0,10

Uma mesma composição química pode originar um ferro fundido branco ou cinzento conforme a velocidade de resfriamento a que peça é submetida e esta é definida pela espessura da peça e pela natureza do molde em que a peça é vazada. Baixos teores de carbono e silício e velocidade de resfriamento rápida favorecem a solidificação segundo a forma

metastável, com formação de cementita, originando ferros fundidos brancos. Um resfriamento lento e elevados teores de C e Si incentivam o crescimento e quantidade dos veios de grafita, a formação de uma estrutura de matriz ferrítica de baixa resistência.

A tecnologia de ferros fundidos tem recebido, continuamente, importantes desenvolvimentos, tanto em processos de fabricação como em materiais. Estes desenvolvimentos, resultantes de necessidades nas áreas de aplicação ou ainda de redução de custos, trazem como consequência a atualização tecnológica de um material de longa tradição de uso na indústria automobilística (Guessser, 1997).

A grande aplicação dos ferros fundidos em peças automotivas dá origem à necessidade de um aprimoramento em pesquisas, com o objetivo de melhor entender o desempenho destes materiais perante aos diversos tipos de processos de fabricação. Portando, investimentos em pesquisas e desenvolvimento em novos produtos nesta linha, tornam-se fator de grande importância na economia de uma forma geral.

Será feito uma abordagem mais detalhada dos ferros fundido cinzento ligado e o ferro fundido vermicular da classe 350, materiais que foram utilizados nos testes de usinabilidade deste trabalho.

2.6.1 Ferro Fundido Cinzento

O aspecto da fratura do ferro fundido cinzento é escuro (daí a sua denominação). Na sua estrutura uma parcela relativamente grande do carbono está no estado livre (grafita lamelar) e outra parcela no estado combinado (Fe_3C) (Chiaverini, 2005). Durante a solidificação dos ferros fundidos cinzentos há a formação de austenita e grafita. A austenita por sua vez, pode sofrer, no estado sólido, novas transformações de fase que tendem a se decompor em perlita e ou, ferrita em temperaturas próximas a 750°C .

As propriedades dos ferros fundidos cinzentos são influenciadas pelo tamanho, forma e distribuição da grafita, e pela relativa dureza da matriz metálica que envolve a grafita.

O ferro fundido cinzento de grafita lamelar possui elevada fluidez no estado líquido, isto favorece a produção de peças finas e de formas complexas quando se solidifica. O ferro fundido cinzento apresenta uma excelente usinabilidade, decorrente do efeito da grafita facilitar a deformação e a propagação de trincas nos planos de cisalhamento. Estes materiais por sua vez possuem boa resistência ao desgaste por atrito (dada à presença da grafita, que atua como lubrificante), onde são aplicados na fabricação de peças automotivas, como por exemplo: bloco

e cabeçote de motores de combustão interna, discos de embreagem, pistões, tambores e sapatas de freio.

A grafita age também na matriz dos ferros fundidos cinzentos como uma boa capacidade de amortecimento de vibrações, podendo ser aplicada em bases de máquinas-ferramentas e elevada resistência à corrosão e ao choque térmico, o que favorece a construção de cadinhos, queimadores, grelhas de fornos e lingoteiras.

2.6.2 Elementos de liga

A usinabilidade depende do estado metalúrgico da peça, da dureza, das propriedades mecânicas do material, de sua composição química, das operações anteriores efetuadas sobre o material (seja a frio ou a quente) e do eventual encruamento (Diniz et al., 2006).

Contudo, as melhorias nas características metalúrgicas listadas anteriormente apenas foram possíveis através da adição de alguns elementos de liga na matriz dos ferros fundidos, particularmente, dos ferro fundidos cinzentos. Santos e Castello Branco (1991) explicam que a adição de elementos de liga a ferros fundidos, via de regra, possibilita a obtenção de propriedades mecânicas mais elevadas, tanto no estado bruto de fusão como após tratamento térmico. Estes novos materiais, além de apresentarem menor tendência à formação de carbonetos eutéticos e de grafita de super-resfriamento, possuem menos fluidez e são menos susceptíveis ao aparecimento de porosidade, quando comparados aos ferros fundidos cinzentos de menor grau de saturação (Santos e Castello Branco, 1991).

Os elementos de liga interferem diretamente na usinabilidade. A determinação da influência dos elementos de liga que compõem os ferros fundidos é bastante difícil, tendo em vista três fatores: a reação entre esses elementos, seu efeito na microestrutura e a taxa de esfriamento (Teles, 2007).

A influência dos elementos de liga presentes nos ferros fundidos pode ser dividida em dois tipos: os formadores de carbonetos (cromo, cobalto, manganês, molibdênio e vanádio) que prejudicam a usinabilidade devido ao fato de que carbonetos são partículas muito duras e abrasivas; e os grafitizantes (silício, níquel, alumínio e cobre) que auxiliam a usinabilidade (Diniz et al., 1999).

2.6.2 Ferro fundido vermicular

O ferro fundido vermicular ou CGI do inglês (compacted graphite iron), uma parte do carbono que ficou retido na matriz do material transforma-se em grafita, que aparecem individualmente em forma de verme. Esta grafita apresenta-se de forma interconectadas com extremidades arredondadas e orientadas aleatoriamente, o que lhe confere maior resistência mecânica em relação ao ferro fundido cinzento (Diniz, 2006). A morfologia compacta, com extremidades arredondadas, torna a nucleação e propagação de trincas muito mais difícil que no caso dos ferros com grafita lamelar (Guesser, 2002).

Este ferro fundido é um produto de características intermediárias entre o ferro fundido cinzento e o nodular. Assim, ele apresenta melhor resistência mecânica e ductilidade que o ferro fundido cinzento. Além disso, o seu acabamento na usinagem é superior ao que se verifica no ferro fundido cinzento (mesmo apresentando uma usinabilidade inferior). Por outro lado, em relação ao ferro fundido nodular, ele possui maior capacidade de amortecimento, condutividade térmica mais elevada e melhor usinabilidade (Chiaverini, 2005). A Figura 2.16 ilustra as diferentes morfologia da grafita, que conferem a estes materiais propriedades físicas e mecânicas distintas.

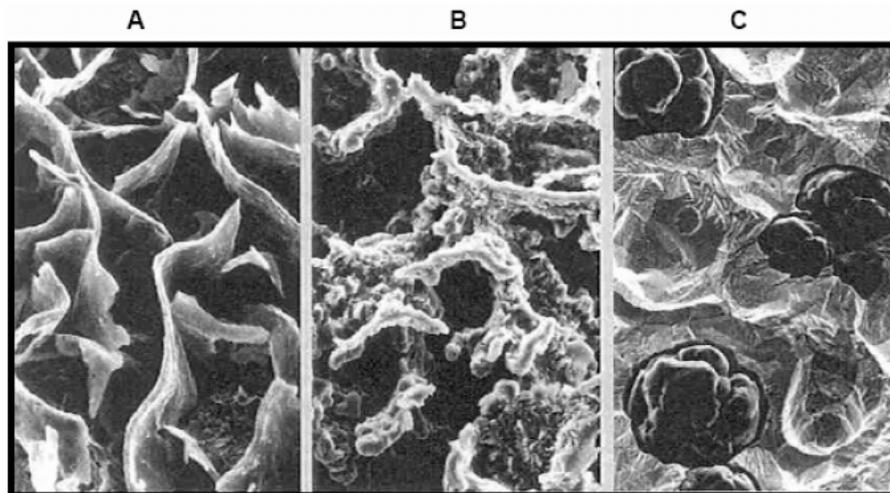


Figura 2.16 – Morfologia típica da grafita. A (cinzento), B (vermicular) e C (nodular). (Sintercast, 2007).

No caso do ferro fundido vermicular, os cantos arredondados das lamelas de grafita não agem como pontos de concentração de tensões e a grafita interconectada propicia uma taxa maior de transferência de calor e dissipação de vibrações do que o nodular, garantindo

assimboas propriedades físicas e mecânicas (ASM Handbook, 1990; Guessser, 1997). Na Tabela 2-2 são comparadas as propriedades físicas e mecânicas do ferro fundido vermicular em relação ao ferro fundido cinzento e ao nodular.

Tabela 2-2 Comparação entre as propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos vermicular, cinzento e nodular (Sintercast, 2001 citado por Mocellin 2002; Vaccari, 2000; Doré, 2007).

Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência à tração [MPa]	235	500	650
Módulo de elasticidade [GPa]	110	140	165
Resistência à fadiga [MPa]	100	205	265
Condutividade térmica [W/(mK)]	48	35	28
Dureza [HB]	200	225	270
Limite de escoamento 0,2%	160	380	425

Comparado ao ferro fundido cinzento, a dificuldade na usinagem do vermicular está associada a dois fatores: a sua alta resistência mecânica envolvendo grandes forças de corte, e a ausência de sulfeto de manganês em sua microestrutura, sempre presente no ferro fundido cinzento, e que se deposita sobre a ferramenta de corte garantindo uma ação lubrificante local (Pereira et. al., 2006, Reuter et. al., 2001, Gastel et. al., 2000 apud Doré, 2007).

No caso do ferro fundido vermicular, que possui limite de resistência cerca de 75% maior e rigidez em torno de 45% superior ao do ferro fundido cinzento, torna-se evidente a maior dificuldade na sua usinagem em relação ao cinzento (Dawson et al, 2004).

Guessser (1997) lista que a grafita em forma de vermes, conferirá a esta classe de ferros fundidos propriedades mecânicas e térmicas intermediárias entre o ferro fundido cinzento (alta condutividade térmica, baixa resistência e alongamento) e o ferro fundido nodular (baixa condutividade térmica, alta resistência e alto alongamento), compromisso este muito favorável para solicitações de fadiga térmica.

Com a aplicação cada vez maior do CGI em linhas de produção do tipo transfer, o desgaste das ferramentas de corte motiva a investigação para descobrir a melhor forma para a usinagem destes materiais, como por exemplo, alguns parâmetros de corte. Portanto, devido ao desgaste excessivo que pode ocorrer com a utilização em altas velocidades de corte, a

ferramenta de usinagem deve apresentar boas características de resistência mecânica e resistência à fadiga.

A Figura 2.17 mostra a dificuldade em usinar o ferro fundido vermicular em comparação com o ferro fundido cinzento. Em todos os processos, é evidente que o vermicular é mais difícil de ser usinado que o ferro fundido cinzento. Em operações como fresamento e furação, a vida da ferramenta condiz com a diferença verificada na resistência mecânica das ligas (o vermicular tem aproximadamente o dobro da resistência mecânica do cinzento (ver Tabela 2.2)). O problema que ainda clama por soluções é a grande diferença observada no processo de mandrilamento, no qual a vida da ferramenta, quando usinando o vermicular, é em torno de 5% do valor obtido quando usinando o cinzento com altas velocidades de corte e utilizando ferramentas cerâmicas (Xavier, 2009).

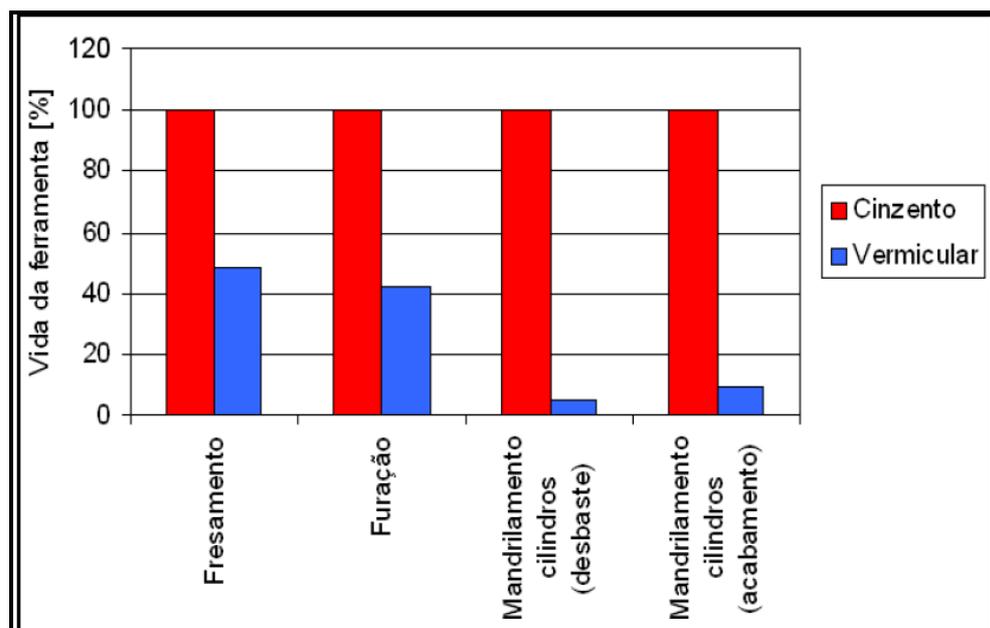


Figura 2.17 – Comparativo da vida das ferramentas em relação à usinagem do vermicular e do cinzento para diferentes processos de usinagem (Reuter, 2000, apud Xavier, 2009).

A dificuldade na usinagem dos ferros fundidos vermiculares torna-se ainda maior quando estão submetidos a alguns processos de fabricação que envolvem altas velocidades de corte, alta taxa de calor gerado e assim menor tempo de vida da ferramenta. A operação mais crítica foi - e ainda é - o mandrilamento dos cilindros, processo no qual a redução da vida útil da

ferramenta é bastante significativa, estudada por (Mocellin, 2007). Estes problemas fizeram com que várias pesquisas fossem desenvolvidas, com a intenção de tornar viável e competitiva a usinagem do vermicular, envolvendo o meio acadêmico, empresas automobilísticas, os fabricantes de ferramentas, empresas de fundição e blocos de motores (Reuter, 1999).

Dawson et al., (1999) enumeram três principais campos de pesquisa na usinabilidade destes materiais, são elas: melhoria da usinabilidade do CGI, aprimoramento das técnicas de usinagem; desenvolvimento de novos materiais das ferramentas para a usinagem do CGI.

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O objetivo do trabalho é investigar, caracterizar e comparar a usinabilidade de três materiais, sendo dois ferros fundidos cinzentos ligados e um ferro fundido vermicular. Foi programado para tanto, uma série de experimentos práticos, tais como ensaios de vida da ferramenta, potência de corte no fresamento, vibração na máquina operatriz e a rugosidade superficial. Foi feito também a caracterização dos materiais como: dureza, microdureza, metalografia e ensaios de tração. Foi ainda realizada a medição da condutividade térmica de todos os materiais.

Salvo algumas publicações em revistas técnicas, não existe muita literatura sobre fresamento do ferro fundido vermicular, por se tratar de um material relativamente novo. Com isto, torna-se de grande importância o desenvolvimento de pesquisas para melhor investigar o comportamento destes materiais perante os processos de usinagem, e assim obter maiores informações para fins de compará-los com os ferros fundidos cinzentos tradicionalmente utilizado pela indústria automotiva.

Nesta seção do trabalho serão apresentados e descritos os materiais, equipamentos e métodos dos ensaios de usinabilidade em que esta pesquisa foi desenvolvida. Os ensaios de usinabilidade foram realizados no laboratório de ensino e pesquisa em usinagem – LEPU – da Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC – da Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Foram ainda realizados ensaios de caracterização dos materiais nos laboratórios de projetos

mecânicos (LPM), laboratório de tribologia e materiais (LTM) e no laboratório de transferência de calor e massa (LTCM) da mesma Universidade.

3.1 Materiais Investigados

Os materiais que serviram para a investigação deste trabalho foram dois ferros fundidos cinzentos ligados (CrCuSn e CrCuSnMo), e o ferro fundido vermicular da classe 350. Estes materiais são utilizados na fabricação de bloco e cabeçote de motores. Estas ligas representam uma nova tecnologia destinada a aumentar a potência desenvolvida e reduzir o peso do bloco do motor, que então poderão ser fabricados com paredes mais finas, por se tratar de materiais de maior resistência mecânica quando comparados aos demais ferros fundidos cinzentos utilizados tradicionalmente em peças e componentes automotivos.

Particularmente os principais elementos de liga presentes nos ferros fundidos cinzentos investigados neste trabalho têm, entre outras, a função de conferir maior resistência mecânica na matriz dos materiais. Para isto alguns elementos de liga atuam como formadores de carbonetos, que são partículas duras e abrasivas como é o caso do cromo e molibdênio. O cobre tem função grafitizante e desta forma influencia positivamente na usinabilidade. O cromo, cobre e o estanho, são elementos de liga com boa ação perlitizante endurecendo a matriz. Dessa forma é obtida um grão fechado, estrutura fina lamelar com propriedades de elevada resistência.

A ação da maioria dos elementos de liga baseia-se no aumento da quantidade de perlita na estrutura e na diminuição do espaçamento intralamelar deste micro-constituente (obtenção de perlita mais fina), podendo ainda proporcionar um endurecimento da ferrita por solução sólida, (Souza e Castello Branco,1991). Todos estes fatores levam a entender que em algum momento seja esperado obter uma pior usinabilidade nos ferros fundidos cinzentos, que apresentem na sua matriz os elementos de liga mencionados anteriormente, do que nos ferros fundidos com grafita compactada.

Os materiais foram fornecidos pela Tupy S.A. Unidade Joinville, cuja designação própria deste fabricante é FC 250 (ferro fundido cinzento ligado ao CuCrSn), FC 300 (ferro fundido cinzento ligado ao CuSnCrMo) e FV 350 (ferro fundido vermicular). A composição química destes ferros fundidos é apresentada na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química dos ferros fundidos fornecida pelo fabricante (% em peso).

Material	C (%)	Si	Mn	S	Cu	Sn	Mo	Cr	Ti
FC 250	3,4	2,1	0,55	0,09	0,62	0,055	0	0,19	0,013
FC 300	3,3	2,1	0,54	0,09	0,9	0,03	0,27	0,26	0,009
FV 350	3,5	2,3	0,25	0,006	0,19	0,024	0	0	0,01

Segundo o fabricante dos materiais, ambos os ferros fundidos cinzentos ligados apresentam na sua matriz uma estrutura 100% perlítica. O ferro fundido vermicular da classe 350 possui uma matriz perlítica com 44% de ferrita. A forma, quantidade e a distribuição da grafita, bem como a estrutura da matriz, influenciam diretamente nas propriedades dos ferros fundidos, caracterizando em um fator importante na usinabilidade do material, razão pela qual a escolha da classe de ferro fundido apropriada depende muito de sua aplicação.

A usinabilidade dos ferros fundidos, assim como a dos aços, está fortemente atrelada aos microconstituintes como ferrita, perlita, martensita, austenita, carbetos e densidade de grafita (Boehs et al., 2000). A composição química também exerce uma grande influência como já citado anteriormente.

A microestrutura dos ferros fundidos cinzentos ligados consiste de uma matriz totalmente perlítica com lamelas de grafita orientadas aleatoriamente. Em contrapartida o ferro fundido vermicular apresenta uma matriz ferrítica-perlítica, onde as grafitas são encurtadas com extremidades arredondadas e orientadas aleatoriamente. As metalografias dos ferros fundidos cinzentos ligados e do ferro fundido vermicular com ataque de solução nital (3% de concentração) são exibidas nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3. Os resultados quantitativos da análise metalográfica são sintetizados na Tabela 3-2. As informações apresentadas nesta tabela, assim como as imagens da microestrutura dos materiais, foram fornecidas pela Tupy S.A, empresa que produziu os corpos de prova.

Tabela 3.2 – Porcentagem de perlita e caracterização da grafita dos materiais usinados.

Material	Matriz	Grafita			
		Forma	Tipo	Tamanho	Nodular
A	Perlita 100%	I	A	4-5	-
B	Perlita 100%	I	A	4-5	-
C	Perlita com ~44% de ferrita	III - VI	-	-	15%

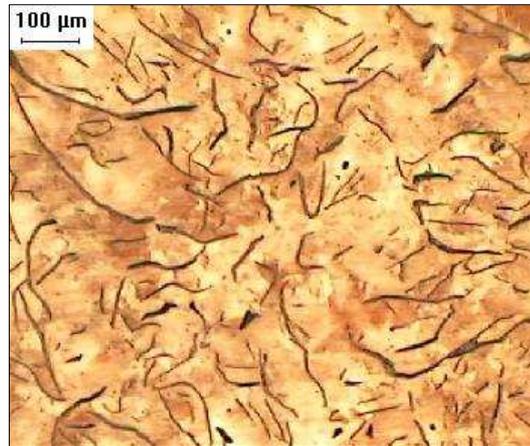


Figura 3.1 – Micrografias do ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn atacadas com nital 3%.

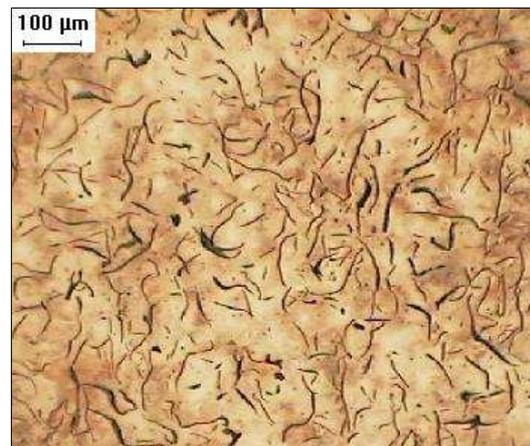


Figura 3.2 – Micrografias do ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSnMo atacadas com nital 3%.

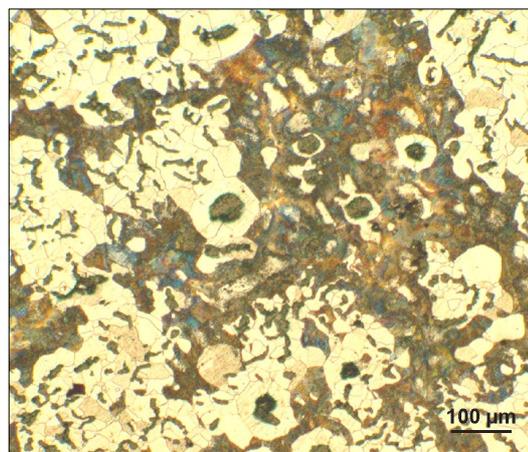


Figura 3.3 – Micrografias do ferro fundido vermicular da classe 350 atacadas com nital 3%.

3.1.1 Preparação dos corpos de prova

Antes da realização dos ensaios de usinabilidade, os corpos de prova foram pré-usinados, tanto na face inferior, para que a peça estivesse em condições de ser nivelada quando da sua fixação sobre a mesa da máquina, quanto na parte superior, para remover a camada bruta de fundição, para evitar influência desta no desgaste das ferramentas. A espessura da camada removida em ambas as faces foi de 3 mm, como pode ser observado na Figura 3.4, que ilustra também as dimensões e o formato dos corpos de prova utilizados nos ensaios de usinabilidade.

Foi necessária a confecção de um rasgo longitudinal junto a base do corpo de prova. Este rasgo tem uma largura de 20 mm e um comprimento de 355 mm que corresponde ao comprimento longitudinal da base do corpo de prova. Esta superfície foi previamente usinada através de um fresamento de topo para garantir a planicidade e o paralelismo destas superfícies. Este procedimento foi necessário devido ao sistema de fixação do corpo de prova na fresadora, que apenas foi possível através de uma morsa presa a base da mesa de coordenadas da máquina. Com esta configuração de fixação, foi inevitável uma parte do corpo de prova em balanço, uma vez que a garra da morsa era menor que o comprimento da base do corpo de prova. A Figura 3.5 apresenta as fotos dos corpos de prova bruto de fundição e usinado pronto para serem fixados na máquina operatriz.

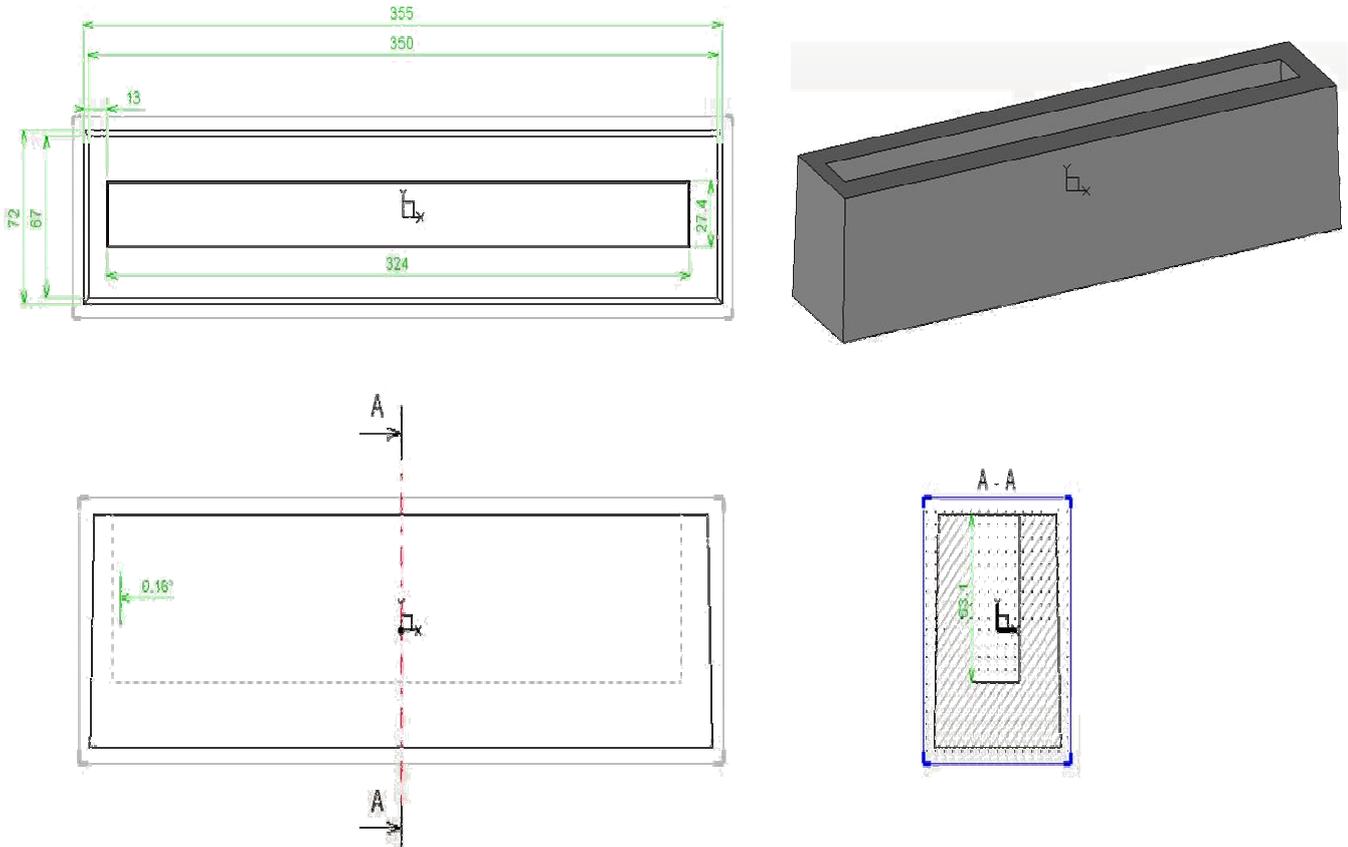


Figura 3.4 – Representação da geometria dos corpos de prova.



Figura 3.5 – Corpos de prova bruto fundição e usinado na parte inferior e superior.

3.1.2 Ferramentas

As ferramentas utilizadas na usinagem de fresamento frontal nos ensaios de vida foram pastilhas de metal duro com revestimento de Al_2O_3 , classe K20D, com especificação R365-1505ZNE-KM K20D da Sandvik Coromant. A fresa utilizada, também da Sandvik, tem especificação R365-125Q40-S15M, é uma fresa frontal de 125 mm de diâmetro com 08 pastilhas intercambiáveis. Uma característica importante da ferramenta é que a mesma apresenta dois ângulos de posição em sua configuração. Próximo a aresta raspadora o ângulo de posição é de 30° , depois este ângulo muda para 65° para possibilitar uma profundidade de corte de até 6 mm. A ausência dos valores dos demais ângulos da aresta de corte se deve à complexidade da geometria da ferramenta e a falta de informações disponibilizadas pelo fabricante. É relevante informar que o desgaste de flanco, utilizado para acompanhar a evolução do desgaste da ferramenta, foi medido próximo à aresta raspadora, no ângulo de posição de 30° . A Figura 3.6 ilustra a configuração dos ângulos de posição mencionados. A Figura 3.7 apresenta uma foto da fresa frontal de 125 mm e a pastilha propriamente dita.

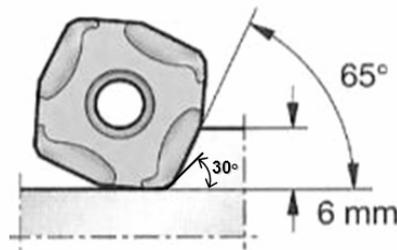


Figura 3.6– Configuração do ângulo de posição da pastilha. Adaptado de (Sandvik, 2007).



Figura 3.7 – Foto da fresa frontal e da pastilha utilizadas nos testes de usabilidade.

As pastilhas são revestidas pela técnica MTCVD (*Medium Temperature Chemical Vapor Deposition*) que significa deposição química de vapor em médias temperaturas. Esta técnica de deposição ocorre sob temperaturas entre 700 e 900°C, na qual camadas de carbonitreto de titânio são agregadas ao revestimento.

Este revestimento juntamente com esta técnica de deposição confere às ferramentas boa característica de tenacidade, e assim sendo, adequadas para o processo com corte intermitente. Segundo a empresa fabricante da ferramenta a cobertura MTCVD de espessura fina garantirá um melhor acabamento superficial e sem escamações, proporcionará também uma redução de adesão do material na superfície de saída da ferramenta, minimizando a evolução do desgaste.

A Figura 3.8 ilustra a camada de revestimento e do substrato da pastilha utilizadas nos testes de vida. É importante salientar que o substrato deve apresentar uma boa resistência à deformação sem perda da tenacidade, influenciando dessa maneira positivamente no desgaste da ferramenta.

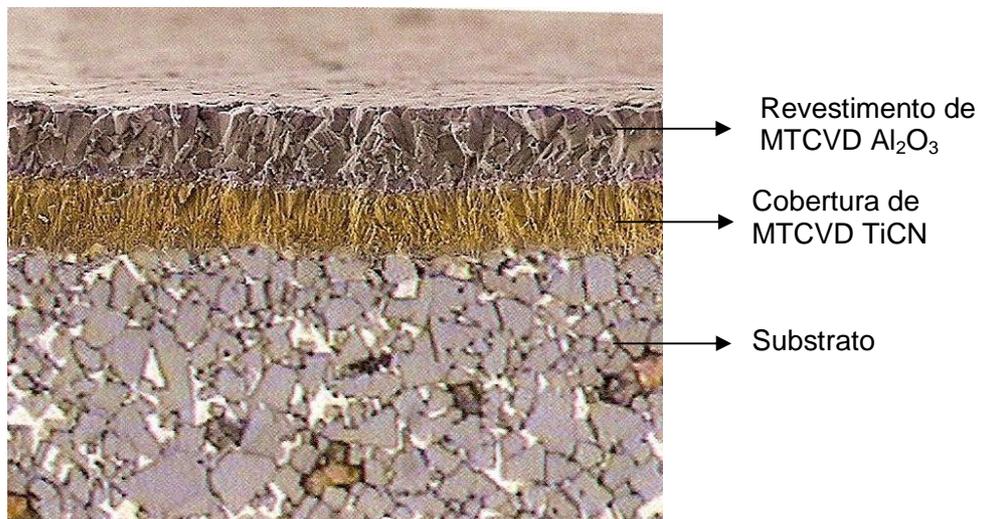


Figura 3.8 – Representação do revestimento e cobertura das pastilhas utilizadas nos teste de vida da ferramenta. (Sandvik, 2007).

3.2 Equipamentos Utilizados

Neste item será descrito os equipamentos e acessórios necessários para a realização dos ensaios de usinabilidade, entre eles o ensaio de vida da ferramenta, potência de corte e vibração no mancal do eixo árvore da fresadora. É apresentado também os equipamentos utilizados para a caracterização do comportamento físico dos materiais, bem como a análise da microestrutura.

3.2.1 Máquina ferramenta

Os ensaios para determinação da vida da ferramenta foram realizados sem aplicação de fluido de corte em uma Fresadora CNC ROMI INTERACT IV, com 16 kW (22 cv) de potência e variação contínua de velocidade de 40 a 4000 rpm. A Figura 3.9 mostra a fresadora utilizada, e também o corpo de prova fixado na morsa sobre a mesa de coordenadas da máquina. Esta máquina encontra-se no laboratório de ensino e pesquisa em usinagem da FEMEC-UFU.



Figura 3.9 – Fresadora INTERACT IV da marca ROMI utilizada nos ensaios de fresamento.

3.2.2 Sistema de fixação dos corpos de prova

O sistema de fixação e o perfil da peça são de extrema importância durante o processo de fresamento, uma vez que eles agem diretamente ligados aos fenômenos de vibração e assim sendo influenciando no acabamento final da superfície usinada. Os corpos de prova

foram fixados em uma morça com garra 210 mm de comprimento. Tentou-se neste trabalho posicionar a peça de modo que o comprimento em balanço fosse o menor possível e ambos de igual comprimento. Neste caso o comprimento em balanço foi de 72,5 mm em cada extremidade. É esperado que com o aumento da frequência de vibração haja uma maior propagação da amplitude de vibração dos comprimentos em balanço, o que pode influenciar em algumas análises de vida da ferramenta posteriormente. Este sistema de fixação dos corpos de prova pode ser visto na Figura 3.10.



Figura 3.10 – Detalhe do sistema de fixação dos corpos de prova através de uma morsa mecânica.

3.2.3 Microscópio para a medição do desgaste nas ferramentas de corte

O desgaste foi medido por meio de um estéreo microscópio da marca *Olympus* com um aumento máximo de 45 vezes. Com este equipamento calibrado e padronizado, foi possível acompanhar a evolução do desgaste de flanco para um dos oito insertos usados nos testes de usinagem. Observação feita durante os primeiros passes identificou um que havia um desgaste mais evidente. O ponto de referência para a medição do desgaste foi o gume principal da ferramenta de corte.

A Figura 3.11 (a) apresenta o sistema de aquisição de imagens e a Figura 3.11 (b) apresenta uma foto do desgaste de flanco na aresta principal de corte de uma ferramenta, após ter usinado cinco corpos de prova do material B, com velocidade de corte de 1000 m/min. Foi utilizado um *software (Image Express)* para mensurar o desgaste de flanco médio na aresta principal de corte naquela ferramenta que demonstrou um desgaste mais evidente. As imagens

foram captadas em tempo real através de uma câmera digital acoplada ao microscópio pelo estéreo microscópio e enviadas a um computador posicionado ao lado do equipamento. Todos os dados foram analisados e armazenados em um banco de dados no computador.

Para a medição do desgaste a fresa é posicionada em um suporte especial, que permite a medição do desgaste em todos os insertos sem a retirada dos mesmos do alojamento.

As análises metalográficas dos três materiais usinados foram feitas por meio de um microscópio metalúrgico do laboratório. Foi construído também um dispositivo para a adaptação da câmera digital a este equipamento. As imagens também eram enviadas em tempo real, por esta câmera, a um computador e com o *software (Image Express)* elas foram trabalhadas e analisadas posteriormente. Com um aumento de 100 x e 400 x foi possível identificar e analisar a estrutura do material e distribuição, forma e quantidade da grafita na matriz dos materiais.

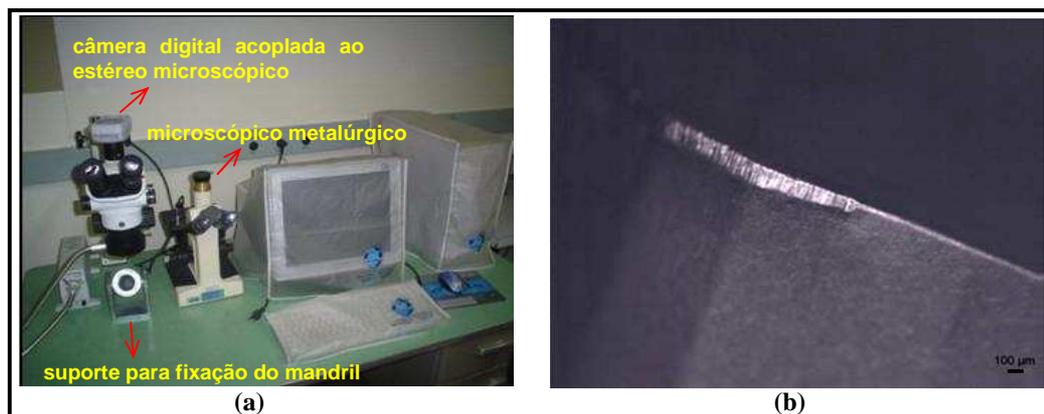


Figura – 3.11. (a) sistema de aquisição de imagens; (b) foto da aresta de corte de uma pastilha após a usinagem de um ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSnMo (45X).

3.3 Caracterização dos Materiais

Os materiais analisados neste trabalho foram submetidos a alguns ensaios de caracterização para obter maiores informações do comportamento mecânico dos mesmos. Foram feitos medições da dureza, microdureza, resistência máxima à tração, imagens e análises metalográficas e a medição da condutividade térmica dos materiais.

3.3.1 Medição da Dureza

A carga utilizada nos ensaios de dureza Brinell foi de 187,5 kg. Estes valores são padronizados pela norma DIN (501434). Para a medição utilizou-se um durômetro universal da marca Wolpert. Este equipamento está locado no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da FEMEC-UFU, representado pela Figura 3.12.



Figura 3.12 – Durômetro da marca WOLPERT.

A medição da dureza Brinell foi feita em cinco pontos de uma amostra retirada de um corpo de prova de cada material. Em seguida, cortou-se e retirou-se um volume de material na região mais ao centro dos corpos de prova, como mostrado na Figura 3.13.

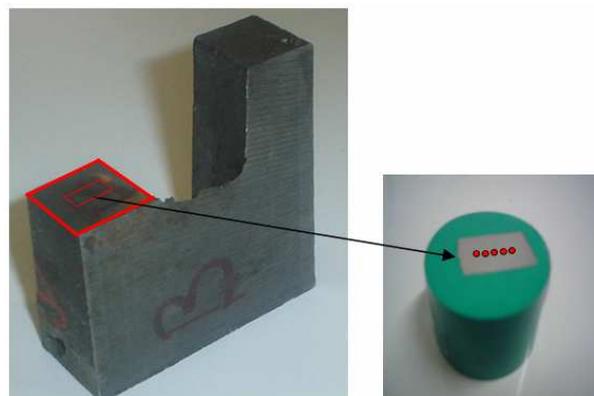


Figura 3.13 – Região onde foi retirado o material para medição da dureza Brinell e em detalhe o material embutido em resina de baquelite.

A Tabela 3.3 apresenta os valores obtidos na medição da dureza Brinell dos dois ferros fundidos cinzentos ligados e do vermicular. Pode-se perceber que os ferros fundidos cinzentos tiveram uma dureza maior que o ferro fundido vermicular, isto se deve ao fato da matriz deste material ser composta por uma fase ferrítica e perlítica, enquanto os demais são totalmente perlíticos.

Tabela 3.3 – Valores da dureza Brinell dos corpos de prova.

	Material A	Material B	Material C
Dureza Brinell	213	224	170
	218	226,5	184
	219	224	168,5
	219	219	180
	213	224	172
média	216,4	223,5	174,9
desvio padrão	3,13	2,74	6,75

3.3.2 Medição da Microdureza

A medição da microdureza é uma técnica que possibilita avaliar a dureza de diferentes fases presentes no material ou ainda em locais bem definidos, como, por exemplo, camadas finas depositadas em uma superfície. Os ferros fundidos cinzentos ligados que foram investigados neste trabalho possuem uma matriz 100% perlítica, diferentemente do ferro fundido vermicular que apresentou uma quantidade de 44% de ferrita em sua matriz metálica. Mediante este fato todas as microdurezas foram obtidas na região da perlita com uma carga de 100 gramas e com um tempo de aplicação de 15 segundos. A medição da microdureza da perlita foi realizada em 05 pontos distintos ao longo da amostra e feita uma média desses valores medidos. Utilizou-se um microdurômetro da marca SHIMADZU modelo HMV, que é mais um equipamento locado no Laboratório de Tribologia e Materiais da FEMEC-UFU. A Figura 3.10 representa uma fotografia do microdurômetro e do computador utilizado para o tratamento e medições da imagens da marca deixada pelo penetrador. Foram utilizadas os mesmos corpos de prova dos ensaios de dureza. A Figura 3.14 representa uma fotografia do microdurômetro e do computador utilizado para o tratamento e medições da imagens da impressão deixada pelo penetrador.



Figura 3.14 – Microdurômetro da marca HMV e computador para tratamento de imagens.

A Figura 3.15 (a) apresenta uma foto de uma marca da indentação feita durante a medição da microdureza em um ferro fundido cinzento com 100 % de matriz perlítica. A Figura 3.15 (b) trata-se do ferro fundido vermicular utilizado nos testes de usinabilidade. Este material possui uma matriz ferrítica e perlítica, foi necessário preparar a amostra com nital com 3 %. Com isto foi possível identificar com mais clareza os veios de cementita da região perlítica e a matriz ferrítica. Logo, mediu-se apenas na região de matriz perlítica. Porém foi medido, para informação, a microdureza na matriz ferrítica do ferro fundido vermicular, porém o objetivo aqui foi apenas a comparação da microdureza das matrizes perlíticas de todos os materiais investigados.

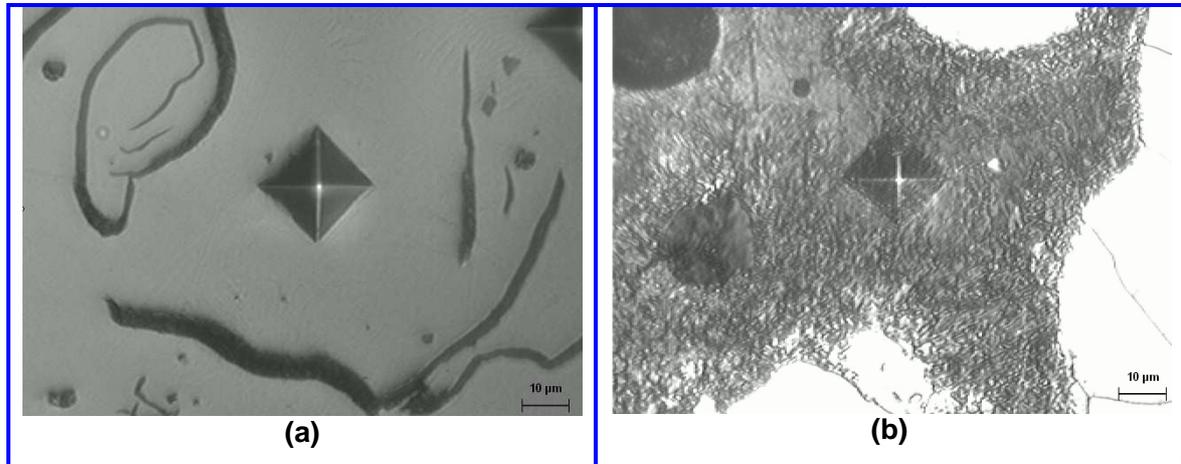


Figura 3.15 – Imagens feita por um microscópio com aumento de 400 x para medição da microdureza dos materiais investigados. (a) ferro fundido cinzento ligado, (b) ferro fundido vermicular.

A Tabela 3.4 apresenta os valores obtidos de microdureza Vickers dos dois ferros fundidos cinzentos ligados e do vermicular. Para o vermicular foi realizada também a microdureza na fase ferrítica. Foram feitas cinco identações aleatoriamente nas amostras, tomou-se o cuidado em não permitir que o penetrador atingisse os veios de grafita, uma vez que esta fase possui baixa dureza e baixa resistência. Com um programa da SHIMADZU modelo HVM-WIN próprio para medição da microdureza foi possível realizar as medições com maior precisão, e documentar com fotos das marcas de identações, obtidas por uma câmera digital. Pode-se perceber que os ferros fundidos cinzentos apresentaram uma microdureza ligeiramente menor que o ferro fundido vermicular. Isto pode ser justificado pelo fato que no ferro fundido vermicular ocorreu um menor espaçamento entre as lamelas de perlita quando comparado ao ferro fundido cinzento. Isso indica que o ferro fundido vermicular possui maior quantidade de cementita na perlita que no ferro fundido cinzento, o que aumenta a resistência à tração e abrasividade (Xavier, 2009).

Tabela 3.4 – Valores da Microdureza dos materiais usinados.

	Material A	Material B	Material C (perlita)	Material C (ferrita)
Micro Dureza Vickers	321,70	331,99	334,69	196,82
	297,82	375,50	309,42	187,50
	348,47	324,20	321,67	208,13
	293,41	304,69	402,34	216,27
	340,09	314,26	340,08	230,86
Valor Máx.	348,47	375,50	402,34	230,86
Valor Min.	293,41	304,69	309,42	187,50
Média	320,30	330,13	341,64	207,92
S.t.d	24,57	27,37	35,96	16,86
C.V	7,67	8,29	10,52	8,11

3.3.2 Medição do limite de ruptura à tração

Para este ensaio foi necessário confeccionar os corpos de provas com dimensões conforme estabelece a norma NBR 6152 (2002). A geometria do corpo de prova para o ensaio de tração é mostrado na Figura 3.16. O corpo de prova tem seção retangular com 5 mm de espessura. Estes corpos de provas foram confeccionados de uma região extraída da base dos coxinhos utilizados nos testes de usinabilidade.

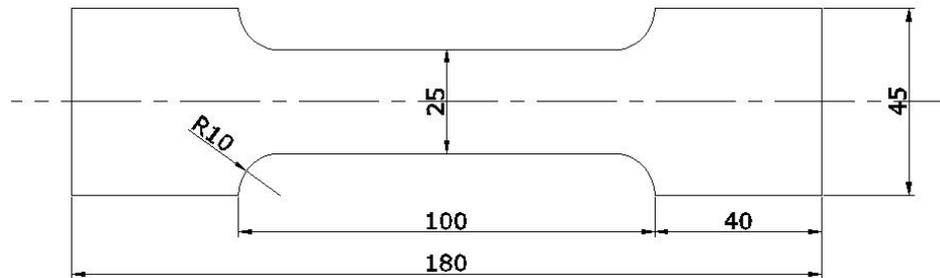


Figura 3.16 – Geometria dos corpos de prova para ensaios de tração.

Os ensaios de ruptura à tração foram realizados no Laboratório de Projetos Mecânicos Prof. Henner A. Gomide da Faculdade de engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. A Figura 3.17 apresenta uma foto desta máquina.



Figura 3.17 – Foto da máquina destinada aos ensaios de ruptura à tração.

Os resultados do limite de resistência à tração confirmam as propriedades mecânicas superiores do ferro fundido vermicular em relação ao ferro fundido cinzento. A Tabela 3.5 apresenta uma média dos valores de cinco medições feitas para conhecer o limite de ruptura à tração. Estes e outros valores da resistência mecânica e gráficos da tensão deformação estão apresentados em Anexos neste trabalho. No que diz respeito à resistência à tração, o ferro fundido vermicular da classe 350 (material C) apresentou a maior tensão de ruptura à tração, seguido dos ferros fundidos cinzentos ligado ao (CrCuSnMo e CrCuSn), respectivamente os materiais B e A.

Tabela 3.5 – Limite de resistência à tração dos materiais investigados.

	Material A	Material B	Material C
Amostra 01	#	241,22	337,87
Amostra 02	246,16	251,20	355,80
Amostra 03	233,37	251,56	359,56
Amostra 04	241,56	245,60	372,84
Amostra 05	211,22	266,29	#
média [MPa]	233,08	251,17	356,52
S.t.d	15,50	9,47	14,42

#, corpo de prova descartado e não substituído.

3.3.2 *Medição da condutividade térmica*

O uso recente do ferro fundido vermicular na fabricação de cabeçotes criou a necessidade de se estudar suas propriedades mais profundamente, em especial a sua condutividade térmica (Baguetti, 2009). O uso dos ferros fundidos, em geral, é muito comum na fabricação de componentes automotivos como por exemplo tambores de freios, bloco e cabeçote de motores e outras importantes partes de veículo automotor. Estes componentes, em grande maioria, estão sujeitos a uma temperatura de trabalho relativamente elevada (motores de combustão interna), tornando de fundamental importância entender a capacidade que cada tipo de material apresentará na condução do calor durante sua aplicação em projetos de motores.

Segundo Guessser et al (2003) a condutividade térmica em alguns tipos de ferros fundidos aumenta à medida que se caminha para classes de menor resistência mecânica. Isto ocorre devido à contribuição da grafita na condutividade, de modo que as classes que contêm maiores quantidades de grafita apresentam maior condutividade térmica (e menor resistência mecânica).

Pesquisadores como Metzler et al. (2000) citado por Guessser et al (2003), indicam o comportamento da condutividade térmica em regiões da peça contendo carbonetos em ferro fundidos ligados ao molibdênio. Estas regiões apresentam baixa condutividade térmica e baixa capacidade de amortecimento de vibrações, podendo causar problemas no projeto de peças automotivas.

Tentou-se ainda neste trabalho fazer a medição da condutividade térmica dos três materiais investigados nesta pesquisa. A técnica adotada para a medição desta propriedade física foi pelo método de problemas inversos, descrita por Borges (2008). Esta parte da pesquisa é fruto da parceria estabelecida entre os pesquisadores do Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM) e pesquisadores do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), ambos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. O objetivo primordial desta etapa do trabalho foi comparar com os resultados de condutividade térmica publicados por Guessser et al (2005). Entretanto as faixas de temperatura utilizadas por estes autores são maiores que aquelas utilizadas no desenvolvimento desta pesquisa. Logo, valores da condutividade térmica medidos nos três materiais utilizados nesta pesquisa, e em elevadas temperaturas, ainda investigados pelos pesquisadores do LTCM, serão futuramente publicados em periódicos científicos.

A Tabela 3.6 foi extraída do trabalho publicado por Guessser et al (2005), onde os autores mediram a condutividade térmica em dois ferros fundidos cinzentos ligados, sendo estes respectivamente aos materiais A e B e dois ferros fundidos vermiculares, sendo o da classe 350 (material C) e da classe 450. Os resultados mostram os valores da condutividade térmica medidos em quatro faixas de temperaturas, 100, 200, 300 e 400°C. A Tabela 3.6 mostra que há uma diminuição da condutividade térmica a medida que a temperatura aumenta e a medida que se caminha para classes de menor resistência mecânica. Mediante aos resultados desta tabela o material que apresenta a maior condutividade térmica, e com isso a melhor facilidade em condução do calor, é o material A, identificado por Cinzento 250, seguido do material B, identificado por Cinzento 300 e o de menor condutividade térmica o material C, nomeado por CGI 350. Estes valores serão úteis para melhor entender alguns fenômenos relacionados aos mecanismos de desgaste termicamente ativados durante os testes de usinabilidade dos materiais discutidos no capítulo IV.

Tabela 3.6 – Valores de condutividade térmica com ferro fundido vermicular e cinzento em diferentes temperaturas (GUESSER et al., 2005)

Temperatura (°C)	Condutividade Térmica (W/K.m)			
	CGI 350	CGI 450	Cinzento 250	Cinzento 350
100	37	33,6	50	45,5
200	37,4	34,2	46,6	43,15
300	37,2	34,3	43,6	41,2
400	36,5	33,9	40,9	39,7

3.4 Medição da potência efetiva de corte e da vibração

A Figura 3.18 ilustra os dispositivos utilizados para a aquisição da potência de corte e vibração. No caso da potência de corte, a aquisição foi realizada por meio da corrente elétrica que passa pelo cabo de alimentação do motor principal da máquina-ferramenta, eixo-árvore. Foi utilizado um sensor de corrente por efeito Hall da Newtronic, modelo NW-SCD-50-R, cuja faixa de amperagem é de 0 a 50 A, a tensão de alimentação de ± 9 VDC e o sinal de saída na faixa de 0 a 5 VDC. O cabo de alimentação de energia elétrica do motor principal responsável pela rotação da fresa passa através deste sensor (na forma de um anel), que é sensível às variações de corrente.

A medição da corrente é feita com o eixo-árvore girando em vazio com o objetivo de se determinar a potência de referência. A seguir foram feitas as aquisições durante o corte.

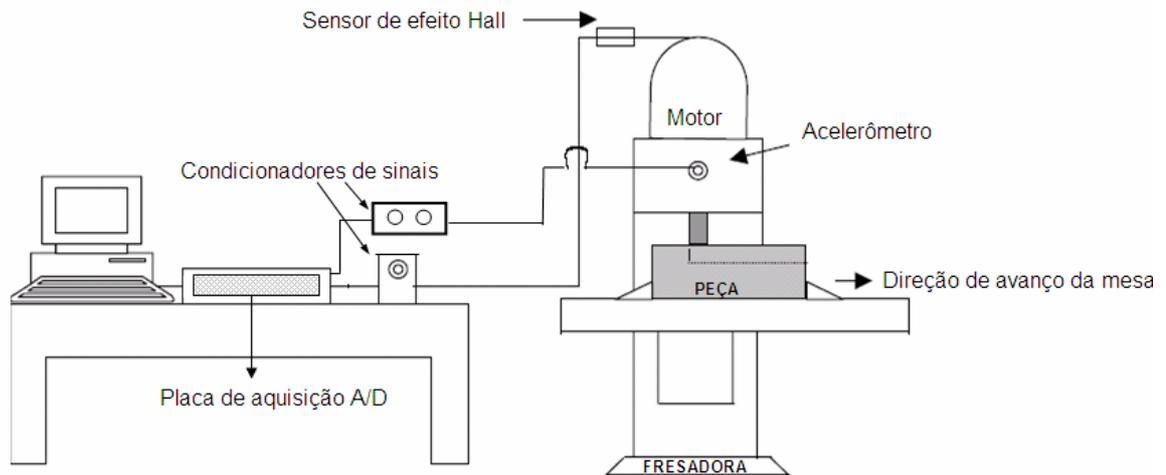


Figura 3.18 – Desenho esquemático dos sistemas de medição da potência específica de corte e da vibração. Adaptado de (Ramos, 2004).

O sinal adquirido no sensor é conduzido a uma placa de conversão analógico-digital e de aquisição de sinais. Esta placa é fabricada pela *National Instruments*, modelo NI DAQPad-6251 Pinout, gerenciado por um microcomputador utilizando o software *LabView 5.1*, também da *National Instruments*. Realizou-se a aquisição do sinal com uma taxa de amostragem de 10.000 pontos por segundo durante 15s do corte de cada passe.

Foi necessário plotar uma curva de calibração do valor da corrente que era medida através no cabo de alimentação da energia elétrica do motor responsável pela rotação da fresa, através de amperímetro digital, e então relacionado ao sinal que chegava à placa de aquisição. Portanto, o valor real da corrente consumida pelo motor é encontrado multiplicando-se o sinal de saída por este fator de conversão e subtraindo um incremento. A equação 3.2 apresenta a curva de calibração da corrente real consumida por este motor. Os valores para a construção dessa curva de calibração foi realizada para uma velocidade de corte de 1000 m/min usinando o material C – ferro fundido vermicular 350 – e em vazio. Esta calibração foi necessária com objetivo de analisar a corrente elétrica real que o motor elétrico consumia durante o processo de usinagem, uma vez que a tensão da máquina fresadora permanecia constante em 400 volts. Assim a potência consumida pode ser obtida multiplicando-se o valor de corrente encontrado

pela tensão nos terminais do motor do eixo-árvore. O valor da potência de cada aquisição é o resultado da média obtida durante o período efetivo de corte, medida em cada passada. Os dados da potência efetiva de corte assim como o de vibração foram analisados através do programa *MatLab* versão 7.

$$y = 9,1725 x - 0,691 \quad (3.2)$$

onde,

y - é o valor da corrente real consumida pelo motor que aciona o eixo árvore da fresadora em ampères.

x - é o valor do sinal em milivolts que o sensor de efeito hall envia para a placa de aquisição.

A Figura 3.19 representa uma foto tirada na parte posterior da fresadora onde se encontra os sistemas e circuitos elétricos da máquina fresadora Interact IV da ROMI. Nesta imagem é identificado o cabo de alimentação de energia elétrica do motor que aciona o eixo árvore da fresadora passando através do sensor de efeito hall.

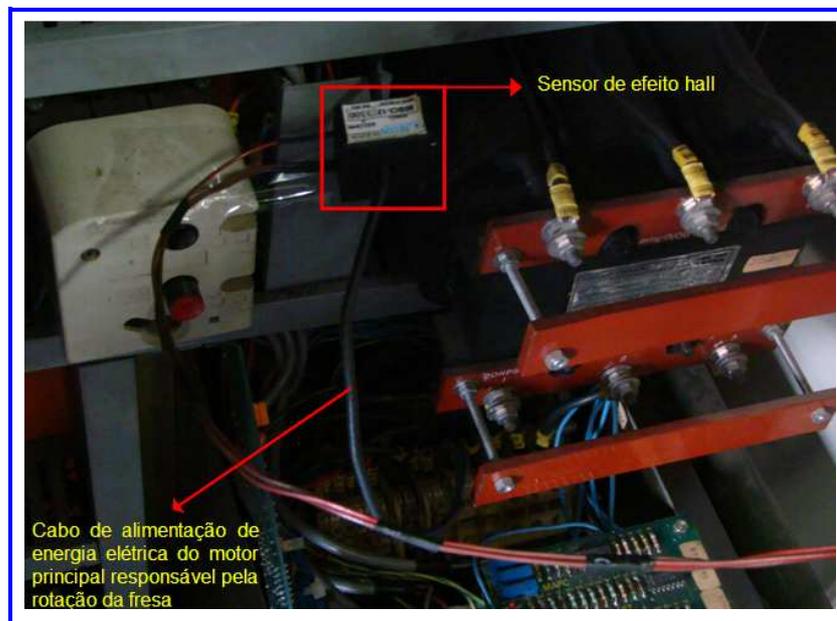


Figura 3.19 – Detalhe do sensor de efeito hall e cabo de energia do motor principal da fresa.

O sinal de vibração é captado por meio de um acelerômetro fixado no mancal do eixo-árvore da máquina-ferramenta. Este é conduzido até um amplificador, a um filtro da marca *Sensis* modelo DM42 e finalmente a uma placa de aquisição de sinais, a mesma placa que recebe o sinal do sensor de efeito hall, porém selecionado um outro canal de entrada de sinais. Todos estes dados, tanto aqueles obtidos pelo acelerômetro quando os originados pelo sensor de efeito hall, são enviados, processados e armazenado em computador, onde por meio de um programa em *LabView* foram analisados para cada teste de usinagem.

A fixação do acelerômetro no mancal do eixo-árvore da máquina-ferramenta é fundamentada nos estudos de análise do comportamento dinâmico da fresadora Interact VI da ROMI desenvolvido no trabalho de doutorado de Sousa (1998). Este autor analisou a sensibilidade de vibração na estrutura mecânica deste modelo de fresadora com base nas variações observadas nas curvas das Funções Resposta e Frequência (FRF), mapeando-se 80 locais para a colocação dos acelerômetros e assim identificar qual apresentaria maior sensibilidade à variação de vibração durante o processo de usinagem.

Sousa (1998) identificou que o mancal do eixo-árvore da fresadora apresentou uma maior sensibilidade à variação dos sinais de vibração mecânica durante o fresamento frontal de um aço ABNT 1045. Daí o motivo de fixar o acelerômetro especificamente nesta região da fresadora. A Figura 3.20 (a) apresenta o acelerômetro fixado na região próximo ao mancal do eixo árvore da fresadora, e a Figura 3.20 (b) mostra o sistema de aquisição de sinais do sensor de efeito hall (potência de corte), do acelerômetro e o computador com o software em *LabView* para tratamento dos sinais.



Figura 3.21 – (a) acelerômetro fixado no mancal do eixo-árvore da máquina-ferramenta. (b) sistema de aquisição dos sinais de potência e vibração.

3.5 Metodologia

Os ensaios de usinabilidade foram realizados priorizando a análise do desgaste de flanco médio da aresta principal de corte, durante o fresamento frontal de dois ferros fundidos ligados e um ferro fundido vermicular. Neste caso optou-se em utilizar condições de usinagem mais severas, especificamente a velocidade de corte, bem superiores daquelas recomendadas pelo fabricante da ferramenta de corte. Entretanto o avanço por dente e a profundidade de corte utilizados nos ensaios, foram valores relativamente baixos para o fresamento de desbaste para os materiais investigados nesta pesquisa. Utilizou-se apenas um tipo de material de ferramenta de corte, pastilha de metal-duro revestida por óxido de alúmina (Al_2O_3). O fabricante da ferramenta indica que a ferramenta é projetada para a usinagem a seco de ferros fundidos cinzentos e vermiculares.

Nos testes preliminares as velocidades de corte utilizadas foram bem abaixo daquelas adotadas nos testes definitivos deste trabalho. A faixa de velocidade de corte utilizadas nos testes iniciais foram da ordem de duas a três vezes maiores daquelas recomendados pelo fabricante da ferramenta, e demais parâmetros mantidos dentro de uma faixa de valores sugeridos pelo fabricante da ferramenta. Com os testes preliminares, notou-se a inviabilidade de se atingir o fim de vida das ferramentas, devido ao baixo desgaste desenvolvido na aresta principal de corte. A restrição na

quantidade dos corpos de prova gerou uma nova estratégia para o trabalho. Os parâmetros dos teste preliminares estão apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Parâmetros de corte dos testes preliminares

Vc m/min:	400	600
Fz mm/dente:	0,1	0,15
ap mm:	1	1,5

Determinou-se que para os ensaios definitivos, a velocidade de corte deveria ser alterada para valores maiores daqueles utilizados nos testes preliminares. Particularmente, os tipos de ferro fundidos cinzentos investigados nesta pesquisa representa um tipo de material utilizado na fabricação de blocos de motores. No caso do fresamento da “face de fogo”, região do bloco do motor como é conhecida nas indústrias fabricantes de peças automotivas, pelo menos nas empresas que o autor conhece¹, esta usinagem é feito com valores acima daqueles apresentados na Tabela 3.7. Com isto, a estratégia da pesquisa foi fazer uma modificação completa nos parâmetros de corte, para que assim fosse possível atingir um desgaste considerado na aresta principal de corte da ferramenta.

Observou-se pelos testes preliminares, que a condições de corte poderiam ser mais severas (aumentar a velocidade de corte para cada condição), uma vez que a potência de corte e os sinais de vibração não demonstraram valores muito altos e se encontravam, com segurança, dentro da faixa recomendada pelo fabricante da máquina fresadora. Com isto, confirmou-se que os parâmetros de corte poderiam realmente serem alterados para faixas maiores e com isto uma usinagem mais severa poderia ser aplicada aos testes finais, visando conseguir um desgaste considerável na ferramenta de corte com um menor tempo de ensaio de usinagem.

Determinou-se que nos ensaios definitivos os valores seriam alterados para os apresentados na Tabela 3.8. A profundidade não foi alterada, bem como a penetração de trabalho, a configuração da fresa e da ferramenta também não foi modificada. Com estas alterações, as únicas variáveis nos testes de usinabilidade, ou seja, as grandezas quantitativas, foram a velocidade de corte e o material propriamente dito. Isto impediu que fosse desenvolvido um planejamento estratégico com mais fatores e níveis de variação.

¹ O nome das empresas não são citadas por se tratar de informações confidenciais.

Tabela 3.8 – Parâmetro de corte utilizado nos ensaios definitivos da pesquisa

Parâmetros de Corte			
Vc (m/min)	600	800	1000
Vf (mm/volta/dente)	2445	3259	4074
fz (mm/dente/volta)	0,2	0,2	0,2
ap (mm)	1	1	1
ae (mm)	67	67	67
n (rpm)	1528	2037	2546
d (mm)	125	125	125
nº de gumes	8	8	8

A partir dos dados da Tabela 3.8 foi possível elaborar uma tabela para os testes que quantificariam o índice de usinabilidade para cada material. A Tabela 3.9 identifica cada um dos ensaios apresentando o material e a velocidade de corte para cada teste de usinagem. Foram gerados nove ensaios, com três velocidades de corte e três materiais distintos. Os demais parâmetros de corte como avanço, profundidade de corte e penetração de trabalho foram mantidos constantes. O material A representa o ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn, o material B representa ligado ao CrCuSnMo e por fim o material C o ferro fundido vermicular da classe 350.

Tabela 3.9 – Condições de corte realizado nos testes de usinabilidade

Ensaio	Material	Vc [m/min]
1	A	600
2	B	600
3	C	600
4	A	800
5	B	800
6	C	800
7	A	1000
8	B	1000
9	C	1000

Para cada ensaio de vida da ferramenta, durante a usinagem dos três materiais, foram utilizados oito insertos em uma fresa de 125 mm de diâmetro. Richetti et al (2004) investigou a influência do número de inserto na evolução do desgaste da ferramenta no fresamento frontal em dois aços com ferramentas com e sem revestimento. As conclusões de seu trabalho mostram que, mantendo-se o mesmo avanço por aresta, quanto maior o número de aresta de

corte durante o processo de fresamento, maiores taxas de desgaste de flanco surgirão devido a alta temperatura de usinagem gerada no cisalhamento do material. Logo, haverá um processo de desgaste mais acelerado da aresta da ferramenta de corte. Desta forma, adotou-se a quantidade máxima possível de insertos na fresa, acelerando assim o mecanismo de desgaste da ferramenta. Foram realizados dois ensaios para cada condição de corte (um ensaio e uma repetição) totalizando 18 testes.

Como critério de fim de vida foi utilizado um volume fixo de material usinado de aproximadamente $4921,2 \text{ cm}^3$, o que corresponde ao volume de cinco corpos de prova, desconsiderando a parte necessária para a fixação do mesmo preso a mesa de coordenadas da fresadora. No total foram usinados 90 corpos de prova para os ensaios definitivos. O desgaste ao final dos testes do fresamento frontal foram, por sua vez, os indicadores do índice de usinabilidade, medidos sempre na aresta principal de corte de um entre os oitos insertos utilizados na fresa.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos experimentos realizados para quantificar o índice de usinabilidade dos três materiais investigados, como o desgaste da ferramenta, potência de corte e o sinal de vibração no mancal do eixo árvore da fresadora de acordo com os procedimentos descritos no capítulo anterior. Algumas informações estão apresentadas em forma de gráficos, de modo a tornar possível uma comparação da usinabilidade entre os três materiais investigados.

O teste de fim de vida da ferramenta foi realizado através do monitoramento das medições do comprimento do desgaste de flanco na aresta principal de corte daquela ferramenta que demonstrou apresentar maiores taxas. As análises para estes testes foram realizados por meio da análise de variância (ANOVA) com intervalo de confiança de 95% e nível de significância de 5%. A variável dependente (resposta) é a vida da ferramenta, ou seja, neste caso é a medida do comprimento do desgaste de flanco médio na aresta principal de corte, e as variáveis independentes são a velocidade de corte e o tipo de material usinado.

4.1 Caracterização dos Materiais

Antes de iniciar as análises do grau de usinabilidade, é importante apresentar e conhecer algumas propriedades mecânicas dos materiais. Para isto, foi feito um levantamento de algumas importantes propriedades físicas e mecânicas dos três materiais analisados, como dureza, micro dureza, resistência de ruptura à tração, condutividade térmica e caracterização

metalográfica. As informações das propriedades mecânicas para o ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn (material A), ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSnMo (material B) e o ferro fundido vermicular da classe 350 (material C) estão apresentadas na Tabela 4.1. Nesta tabela os valores da condutividade térmica correspondem a uma faixa de temperatura de 100°C obtidos por Guessser e outros (2005).

Tabela – 4.1. Propriedades dos materiais investigados.

Propriedade	Material A	Material B	Material C
Resistência à Tração (Mpa)	233,06	251,17	356,52
Dureza (HB)	216,4	223,5	174,9
Micro Dureza da Perlita (HV 01)	320,3	330,13	341,64
Condutividade Térmica (W/K.m)	50	45,5	37

Ambos os ferros fundidos cinzentos ligados, apresentam uma matriz inteiramente perlítica e microestruturas muito semelhantes entre si, bem como a quantidade, distribuição e morfologia dos veios de grafita. Evidentemente que a composição química varia para cada tipo de material, principalmente nos elementos de liga com função perlizantes, como o caso do cobre, cromo e estanho, e aqueles formadores de carbonetos como é o caso do molibdênio.

É importante conhecer e caracterizar a estrutura do material para entender alguns fenômenos que ocorrem durante a usinagem. Quando o material possui uma matriz basicamente composta por perlita grosseira e maior quantidade de cementita (Fe_3C) espera-se uma piora na usinabilidade, de acordo com Dawson (2001). Estes carbonetos de ferro tendem a enrijecer a matriz do material. Apenas a matriz dos ferros fundidos ligados são, conforme o fabricantes dos materiais, inteiramente perlítica. Já o ferro fundido vermicular, material C, constata-se a presença de ferrita e perlita. A Figura 4.1 ilustra a matriz metálica das amostras dos três materiais.

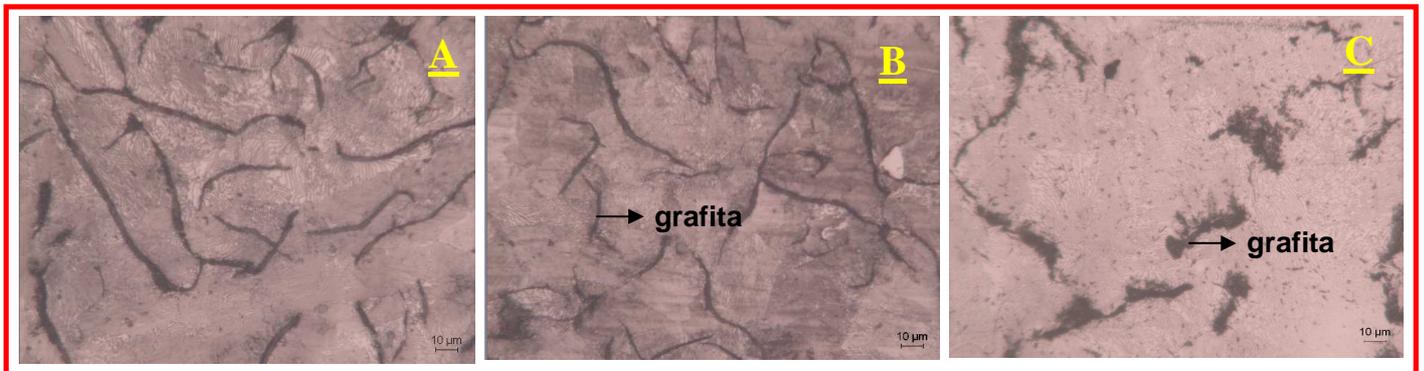


Figura 4.1 – Caracterização da matriz metálica dos materiais. Aumento de 400 X.

4.2 Ensaio de vida

Os resultados de desgaste são apresentados nos gráficos a seguir e representam uma média feita em duas medições para cada ensaio daqueles apresentados na Tabela 3.4. Portanto, foi realizada uma repetição para cada condição, não sendo possível uma maior repetibilidade devido ao reduzido número de corpos de prova disponíveis. Todos os dados para a confecção dos gráficos dos ensaios de vida da ferramenta estão apresentados na Tabela 1 do Capítulo VI.

Todos os ensaios foram realizados sem refrigeração e como critério de fim de vida foi estabelecido um volume determinado de material removido para os três materiais investigados. O objetivo foi comparar o desgaste da ferramenta para um determinado volume de material removido.

Segundo Diniz et al. (2006) e Machado e Da Silva (2004), dentre os parâmetros de corte que mais influenciam o desgaste das ferramentas, tem-se a velocidade de corte seguida do avanço e por último, a profundidade de corte. Neste trabalho, devido ao reduzido número de corpos de prova, foi possível analisar apenas a influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta. As Figuras 4.2 a 4.4 mostram as curvas de evolução do desgaste de flanco médio (VB_B) em função do tempo de usinagem para os três materiais nas velocidades de corte de 600, 800 e 1000 m/min, respectivamente.

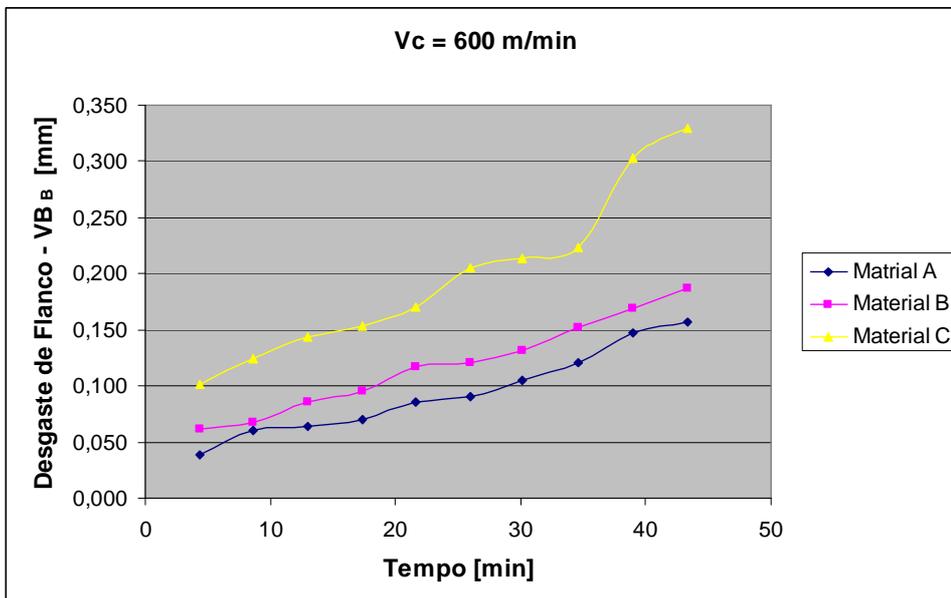


Figura 4.2 – Comprimento desgaste de flanco médio para Vc = 600 m/min.

De acordo com a Figura 4.2 o desgaste de flanco médio foi sempre maior para o ferro fundido vermicular. Para as condições de corte utilizadas neste teste ($V_c = 600$ m/min) o comportamento do desgaste apresentou uma boa relação com a resistência de ruptura à tração, ou seja, o ferro fundido vermicular (material C) demonstrou ter a pior usinabilidade, resultado de sua maior resistência mecânica, comparado pelos testes de tração. A morfologia da grafita vermicular pode ter influenciado negativamente nesta condição, restringindo a propagação de trincas internas no material e dificultando o fluxo térmico gerado no processo de formação do cavaco, de tal modo que beneficiasse algum tipo de mecanismo de desgaste termicamente ativado.

Nesta condição o material de melhor usinabilidade foi o ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn (material A) que por sua vez apresenta a menor resistência à tração e menor dureza, gerando condições para um menor desgaste da ferramenta. O material B, ferro fundido ligado ao CrCuSnMo, apresentou valores intermediários de desgaste entre o material A e C nesta condição em todas as medições realizadas.

Durante a usinagem com velocidade de corte de 800 m/min, o comportamento do desgaste de flanco médio passa a ter uma característica diferenciada àquele apresentado na velocidade de 600 m/min. A Figura 4.3 apresenta este comportamento. O material de pior usinabilidade para esta condição foi o material B, ou seja, apresentou um maior comprimento no desgaste de flanco médio quando comparado aos demais. Observa-se ainda pela Figura 4.3,

um desgaste de flanco médio mais acelerado no material B, após o instante que este atinge um valor 0,150 mm. Novamente o material que continuou apresentando o melhor índice de usinabilidade foi o material A. O material C agora passa a ter um valor de desgaste intermediário aos dois materiais já citados.

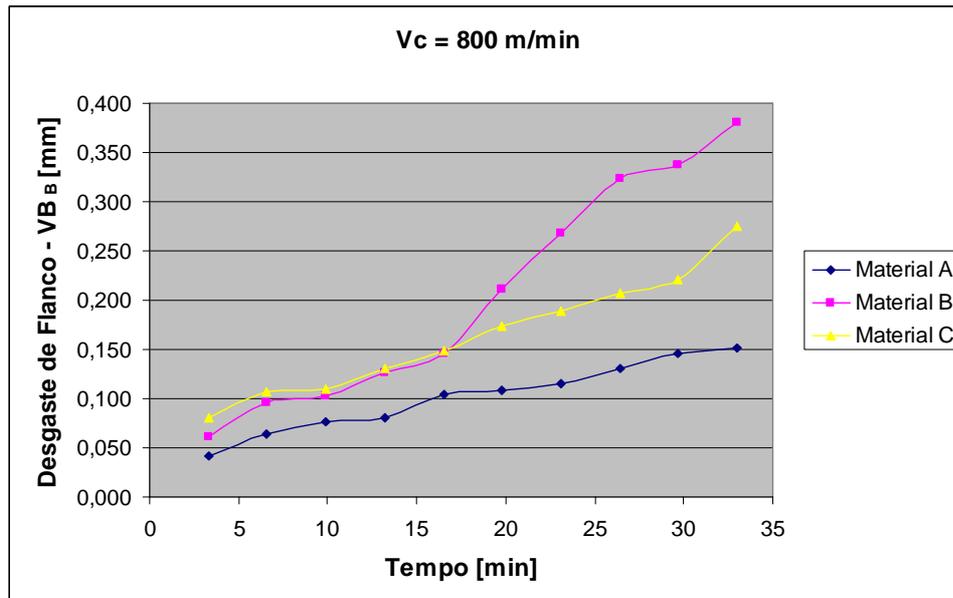


Figura 4.3 – Comprimento desgaste de flanco médio para $V_c = 800$ m/min.

Evidentemente, que os fenômenos de usinagem devem ser entendidos particularmente, e assim analisados separadamente. Não é comum esta condição de corte para este tipo de material quando usinado com uma ferramenta de metal duro da classe K. (Meurer, 2007), realizou um faceamento de desbaste em um material de composição química bastante similar ao material A, com condições de corte idênticas aos aplicados nesta etapa do trabalho ($V_c = 800$ m/min, $f = 0,2$ mm/rotação e $a_p = 1$ mm). Este autor utilizou insertos cerâmicos com dois tipos de revestimentos, Al_2O_3 (óxido de alumínio) e TiCN (carbonitreto de titânio) e analisou a influência da camada bruta de fundição no desgaste de flanco da ferramenta. Logo, são poucas as informações técnicas da usinabilidade dos materiais aqui investigados, com as respectivas condições de corte.

Sugere-se, então para $V_c = 800$ m/min, que possa estar havendo uma influência significativa de alguns carbonetos, que são partículas duras e abrasivas, presentes no material B que levem a este comportamento de desgaste. Aliado a essa teoria materiais com uma matriz totalmente perlítica (ferrita + cementita) tendem a apresentar uma pior usinabilidade quando

comparado aos perlíticos-ferríticos, como é o caso do ferro fundido vermicular sob investigação neste trabalho. Nos ferros fundidos, a presença de partículas duras de cementita eutética, formadas na solidificação, reduzem consideravelmente a usinabilidade (Machado et al 2005).

O comportamento do desgaste na condição da velocidade de corte de 1000 m/min, apresentado na Figura 4.4, é semelhante ao apresentado na Figura 4.3. Observa-se nesta figura que o material B apresenta novamente a pior usinabilidade de acordo com o critério adotado neste trabalho, o material C, ferro fundido vermicular, permaneceu intermediário e o material A apresentou uma melhor usinabilidade dentre os três investigados. Porém, o último valor de desgaste medido durante a usinagem do material C (vermicular da classe 350) apresentou um valor menor quando comparado na usinagem do material A.

Por se tratar de uma condição de corte elevada, e acima daquelas recomendadas pelo fabricante da ferramenta, os resultados encontrados não podem ser comparados com resultados de outros autores, além disso, não foram encontradas na literatura informações para o conjunto material usinado e material da ferramenta de corte. Assim, sugere-se que possa estar ocorrendo o mesmo comportamento na velocidade de 800 m/min, ou seja, a matriz do material esta influenciando de forma significativa no índice de usinabilidade dos materiais, conseqüentemente no mecanismo de desgaste da ferramenta de corte. O elevado valor da velocidade de corte empregada nos testes, sem dúvida geraram um aporte térmico elevado na região de cisalhamento do material durante a usinagem. Haja vista, que grande parte deste calor é dissipada pelo cavaco e pela peça. Contudo, esta quantidade de energia térmica não esta sendo suficiente para gerar uma transformação de fase na matriz do material ou atuando na precipitação dos carbonetos, tanto o de molibdênio quando os carbonetos de cromo. Por sua vez, estas partículas duras e abrasivas, provavelmente atuaram de forma a acelerar os mecanismos de desgaste termicamente ativado nas ferramentas de usinagem. Em algumas normas são especificadas adições de molibdênio a ferros fundidos cinzentos de alto teor de carbono, objetivando conferir resistência à quente e assim aumentar a resistência à fadiga térmica (Guesser et al., 2003).

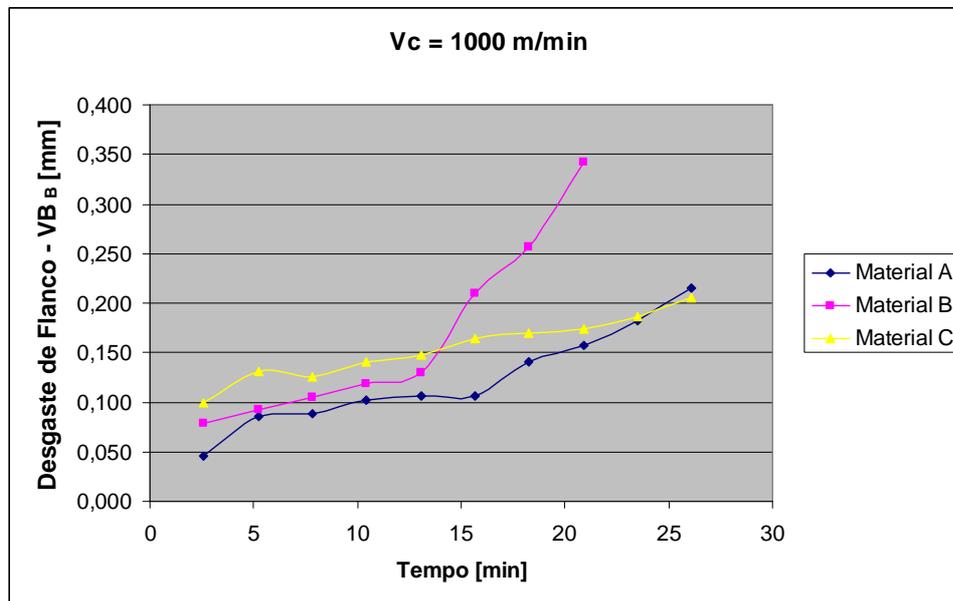


Figura 4.4 – Comprimento desgaste de flanco médio para $V_c = 1000$ m/min.

A Figura 4.5 apresenta um gráfico comparativo de vida de ferramenta para as três velocidades utilizadas. O ferro fundido vermicular da classe 350 apresentou uma maior dificuldade na usinagem, e com isso um maior desgaste, na condição de velocidade de corte de 600m/min. Para as demais condições o ferro fundido ligado ao CrCuSnMo, material B, foi o que gerou um maior desgaste de flanco médio. O critério de fim de vida para estes ensaios, foi estabelecido em um volume de material removido de $4921,2 \text{ cm}^3$, o que representa aproximadamente ao volume de cinco corpos de prova. Os resultados deste gráfico representam uma média de dois ensaios realizados para cada condição de uma ferramenta que foi identificada com aquela com maior evidência do desgaste.

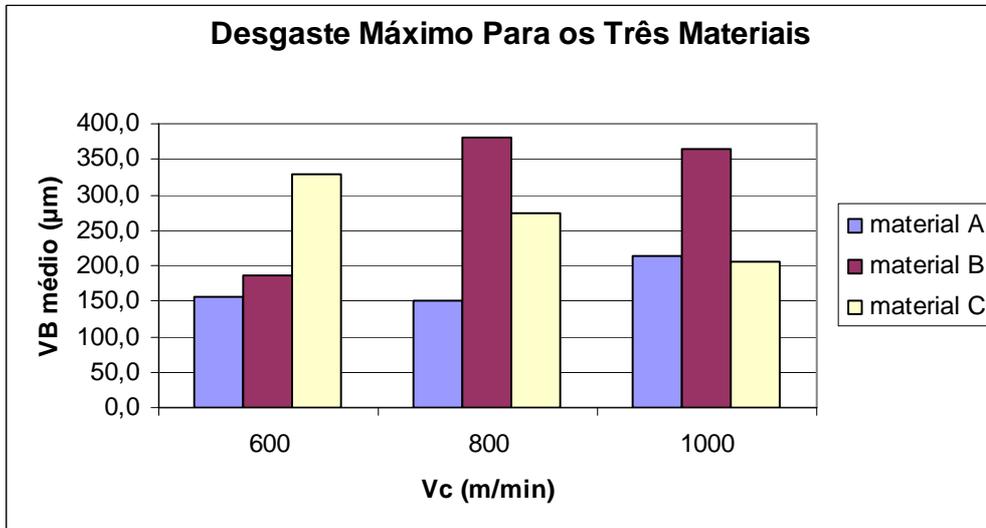


Figura 4.5 – Comprimento do desgaste de flanco médio para os três materiais nas três velocidades de corte utilizadas.

É importante destacar que o fato da Figura 4.4 mostrar que o desgaste da ferramenta para o vermicular (material C) diminuir com o aumento da velocidade de corte está relacionado ao tempo necessário para usinar 5 corpos de prova. Quando as curvas de desgaste para as três velocidades de corte são comparadas, observa-se que o comportamento é similar, ou seja, o tempo de vida da ferramenta para este material é similar para as três velocidades de corte. Isto pode ser observado na Figura 4.6. Esta figura mostra o gráfico do tempo necessário para ocorrer um desgaste de flanco médio de 0,15 mm (este valor foi escolhido por ser o maior valor de desgaste apresentado na usinagem do material A na velocidade de corte de 600 m/min) na aresta principal de corte durante a usinagem dos três materiais. Para este comprimento de desgaste, o material C, apresentou o menor tempo de usinagem, caracterizando assim em uma pior usinabilidade. O ferro fundido ligado ao CrCuSn, material A, teve o maior tempo de vida, logo, o melhor índice de usinabilidade. O material B, ferro fundido cinzento ligado, manteve-se intermediário a estes dois mencionados. Porém, conforme apresentado anteriormente, o material B, para o critério de fim adotado nos ensaios, apresenta uma maior dificuldade em ser usinado para as velocidades de corte de 800 e 1000 m/min. O desgaste da ferramenta na usinagem do material B tem um incremento após atingir o valor de 0,150 mm, como pode ser observado nas figuras 4.3 e 4.4.

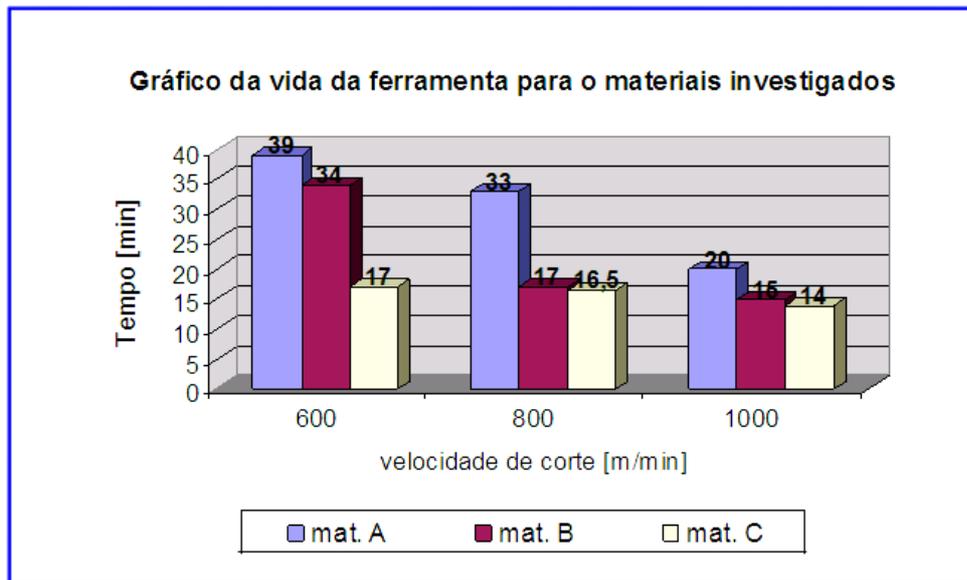


Figura 4.6 – Tempo de vida ferramenta para VB_B de 0,15mm.

Para confirmar estatisticamente a diferença entre os materiais, foi realizado uma análise de variância (ANOVA) com intervalo de confiança de 95 % e nível de significância de 5 %. A Tabela. 4.2 mostra os resultados da análise

Tabela 4.2 – Resultado da análise de variância (ANOVA) do desgaste de flanco.

Condição de Corte	Nível de Probabilidade (p)
$V_c = 600$ m/min	0,0315
$V_c = 800$ m/min	0,0436
$V_c = 1000$ m/min	0,0458

Pelo nível de probabilidade p é possível verificar se serão significativos a variação de velocidade de corte e o tipo de material durante o desgaste da ferramenta, neste caso medido pelo comprimento do desgaste de flanco médio. Para que um fator seja considerado significativo a probabilidade p deve ser menor ou igual ao nível de significância (neste caso considerado de 0,05). De acordo com a Tabela 4.2, todos os valores de p foram menor que 0,05, logo todas aquelas interações, entre velocidade de corte e tipo de material, possuem uma diferença estatística que deve ser analisada particularmente, para cada tipo de material e cada velocidade de corte.

A Figura 4.7 caracteriza a superfície de resposta projetada no plano do desgaste de flanco médio, velocidade de corte e tipo de material usinado. Esta superfície tende a expressar uma visão global em termos de tendência da vida (comprimento do desgaste) em função das variáveis: velocidade de corte e o tipo de material. Observa pela Figura 4.6 que os maiores valores de desgaste foram obtidos para o material B, seguido do material C. Os melhores resultados para a vida ferramenta foram obtidos para os menores níveis de velocidade de corte para o material A. Este gráfico foi escolhido de forma a resumir as principais observações da influência das variáveis analisadas sobre a vida da ferramenta. Para esta superfície não foi feito nenhum tipo de ajuste no modelo do matemático feita pela análise de variância.

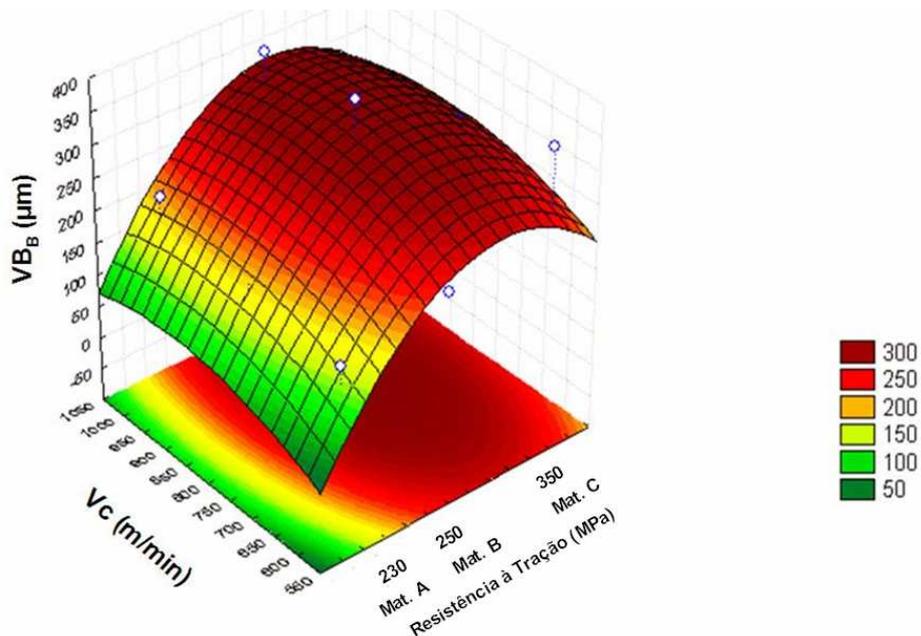


Figura 4.7 – Superfície de resposta para a vida da ferramenta para os três tipos de ferros fundidos.

4.3 Mecanismo de Desgaste

Os mecanismos que causam desgaste nas ferramentas de metal duro estão relacionados a vários fatores, entre eles o material usinado. No caso dos ferros fundidos podem estar relacionados com a abrasividade, adesividade e afinidades químicas entre a ferramenta e

a peça. A seguir serão apresentadas algumas análises dos mecanismos de desgaste através de observações da ferramenta no final de vida.

Um fator importante que contribui para que ocorra um menor desgaste quando na usinagem de ferros fundidos cinzentos é a presença do sulfeto de manganês na matriz desse tipo de material. Boehs (1979) verificou que a presença de MnS no ferro fundido maleável preto ferrítico melhora sua usinabilidade principalmente por melhorar a quebra de cavacos. Inclusões de MnS tendem a melhorar a usinabilidade de ferros fundidos cinzentos, agindo como lubrificante sólido e aderindo sobre a superfície da ferramenta, formando uma camada protetora (Reuter et al., 2005), influenciando positivamente a evitar alguns tipos de mecanismo de desgaste. Este autor explica que no vermicular a quantidade de enxofre é cerca de 10 vezes menor que no cinzento, e combina-se preferencialmente com o magnésio, elemento nodulizante, não ficando quantidades remanescentes para se combinar com o manganês e formar a camada protetora. Logo no vermicular, não se observa a formação da referido camada, pois o teor de enxofre presente é de 0,006 (%peso), conforme apresentado na Tabela 3.1.

Outro fator que torna-se um aliado em favorecer a redução dos mecanismo de desgaste é o tipo de revestimento da ferramenta, tipo de substrato e a técnica de deposição deste revestimento.

A ferramenta possui uma camada de óxido de alumina (Al_2O_3) no seu revestimento, que é um material de grande estabilidade química contra os ferrosos, o que garante estabilidade térmica em temperaturas elevadas, possui alta resistência à abrasão, além da resistência à oxidação, diminuindo a formação do desgaste por cratera na ferramenta de corte.

A seqüência de Figuras 4.8 à 4.10 mostram as ferramentas no fim de vida definido para este trabalho. Com estas imagens, obtidas por um MEV (microscópico eletrônico de varredura) será possível identificar e analisar o mecanismo de desgaste gerado após um determinada condição de usinagem para cada tipo de ferro fundido.

Para velocidade de corte de 600 m/min fica claro que ambos os ferros fundidos cinzentos apresentaram um mecanismo de desgaste do tipo abrasivo. A conclusão para esta afirmação é a presença de micro-sulcos ou micro trincas geradas no gume da aresta de corte. As boas propriedades térmicas da ferramenta e a ação do filme de MnS, podem ter contribuído para que a ferramenta não atingisse um colapso perdendo parte a aresta de corte.

Para o ferro fundido vermicular, na condição de 600 m/min, é possível identificar que a ferramenta apresenta um elevado processo de desgaste. Neste caso a ferramenta chegou a uma condição severa, perdendo parte do material da aresta principal durante o processo de

usinagem. Além do fato do ferro fundido vermicular não apresentar as inclusões de MnS, o que auxiliaria a evitar o desgaste, há também um outro fator que pode ter contribuído negativamente para o alto valor de desgaste, que é a baixa condutividade térmica deste tipo de material comparados aos demais usinados. Sendo a condutividade menor neste material, implicará em uma maior quantidade de calor estará concentrado numa região muito pequena no contato cavaco-ferramenta-peça. Trent (2000) mostrou que existe uma alta taxa de deformação do material durante a formação do cavaco, conseqüentemente altos valores de pressão e temperatura serão gerados durante a usinagem. Como esta energia térmica é mal conduzida ao longo da matriz do ferro fundido vermicular, haverá, portanto, maiores chances de acelerar os mecanismos de desgaste termicamente ativados.

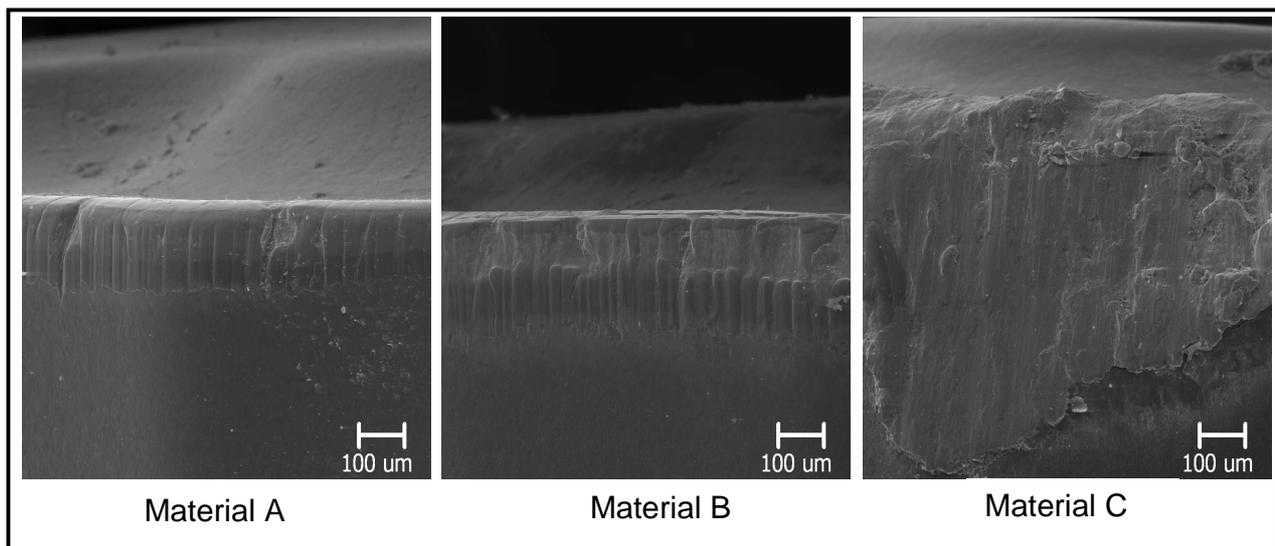


Figura – 4.8. Desgaste de flanco na aresta principal de corte ($V_c = 600$ m/min).

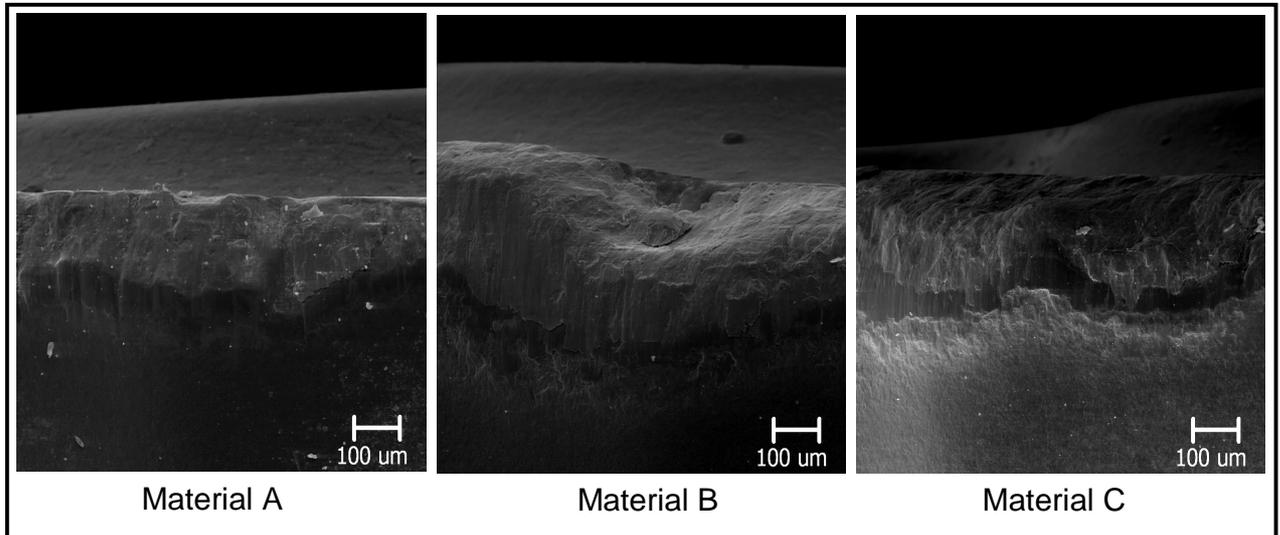


Figura – 4.9. Desgaste de flanco na aresta principal de corte ($V_c = 800$ m/min).

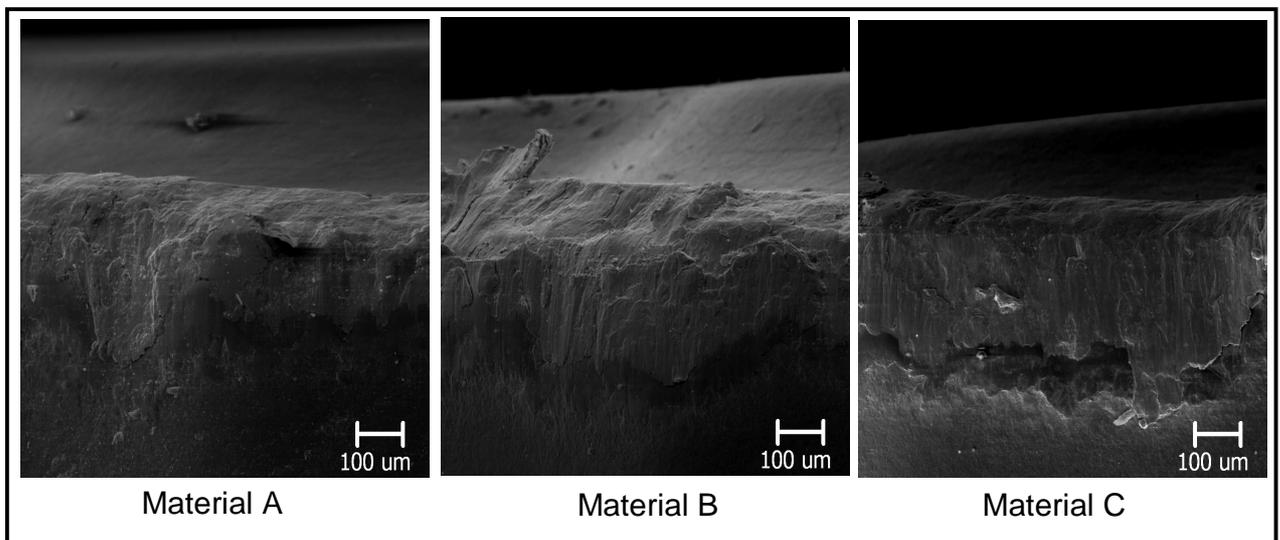


Figura – 4.10. Desgaste de flanco na aresta principal de corte ($V_c = 1000$ m/min).

A Figura 4.11 apresenta, novamente uma imagem feita no MEV, agora com elétrons retro-espalhados para uma ferramenta que usinou ferro fundido vermicular a 600 m/min. Nesta imagem é possível constatar adesão do material da ferramenta na região de desgaste de flanco da ferramenta. Entende-se aqui que a parte clara nesta imagem seja algum tipo de partículas

proveniente da peça ou do cavaco que caldeiam ao gume da ferramenta sendo removidas pelo movimento de corte e carregando junto consigo partículas do material da ferramenta de corte, o que reflete em um mecanismo de desgaste do tipo adesivo.

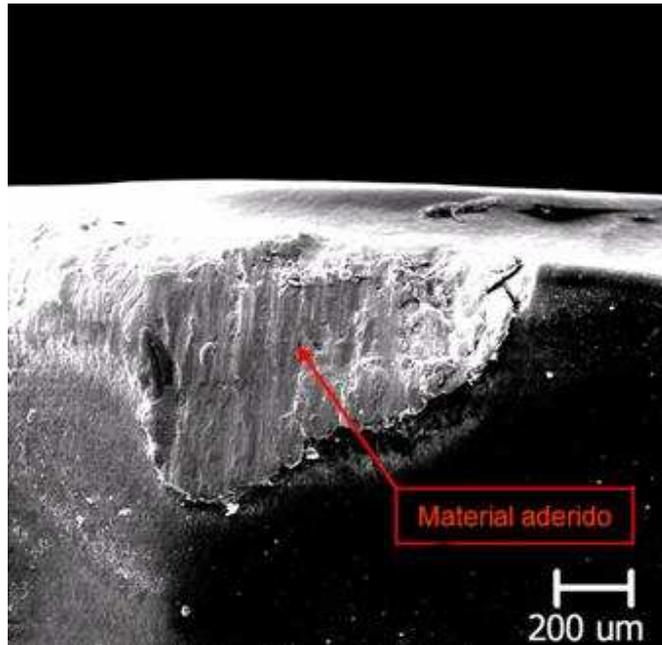


Figura 4.11 – Característica do tipo de mecanismo de desgaste durante a usinagem do material C realizado com uma velocidade de 600 m/min.

Após o fim de vida da ferramenta para a condição de $V_c = 800$ m/min, pode-se perceber pela Figura 4.12 que novamente a aresta de corte principal de ferramenta apresentou um desgaste bastante severo, levando ao lascamento da aresta. No estágio de desgaste que as ferramentas apresentavam para esta condição, não será possível detalhar ao certo qual o principal mecanismo de desgaste predominou durante a usinagem dos três materiais. Acredita-se que por se tratar de elevadas temperaturas durante a usinagem, decorrente da alta velocidade de corte aplicada, pode ter ocorrido difusão, abrasão e oxidação. Para que este último mecanismo ocorra é necessário que o material da ferramenta apresente afinidade com o oxigênio, aliado a altas temperaturas, para a formação de uma camada de óxido em partes da ferramenta. Essa camada pode ser removida pelo atrito entre a peça e a ferramenta, gerando as marcas de desgaste (Stemmer, 2005; Diniz et al 2005). O efeito do desgaste difusivo seria importante se realmente confirmasse que estaria havendo o desprendimento das moléculas que

formam a estrutura da ferramenta, formando ligas menos resistentes e mais susceptíveis ao desgaste. Logo, estes mecanismos de desgaste podem estar presentes, mas não é possível afirmar sem que haja um estudo mais detalhado da topografia do desgaste da ferramenta.

A Figura 4.12 apresenta ainda as regiões (1, 2 e 3) onde foram feitos alguns espectros aleatórios na superfície dessa ferramenta, já no fim de vida, quando usinado o ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn (material A) com uma velocidade de corte de 800 m/min. O objetivo dessa divisão foi identificar, através das análises químicas, os principais elementos presentes na aresta principal de corte desgastada e identificar a região na ferramenta que ainda haveria revestimento. Além disso, essa figura mostra, em destaque, uma parte da aresta principal de corte da ferramenta, onde ocorreu um desgaste mais severo, evidenciando a presença de material aderido e de riscos abrasivos.

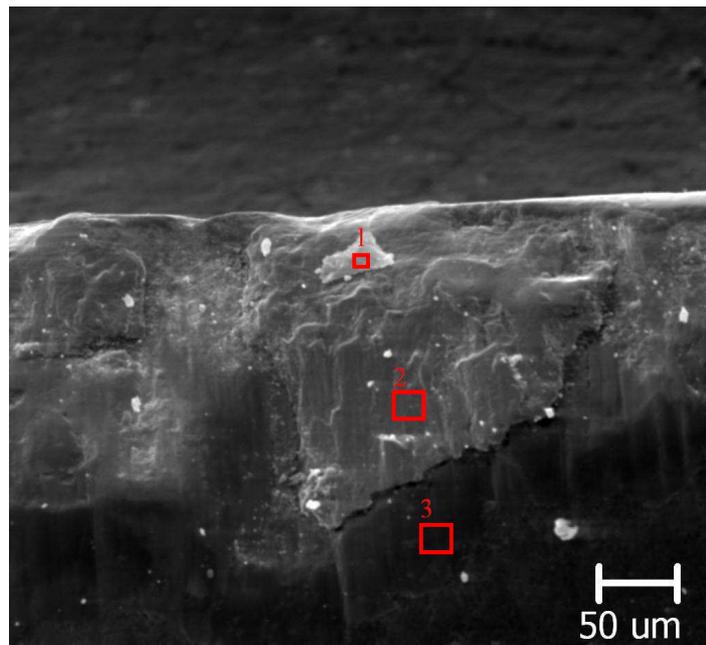


Figura 4.12 – Foto feita em MEV apresentando as três regiões analisadas e detalhe da aresta principal de corte desgastada na usinagem do material A, $V_c = 800$ m/min.

A Fig. 4.13 apresenta os principais elementos químicos presentes na região 1 (EDS) da Figura 4.12.

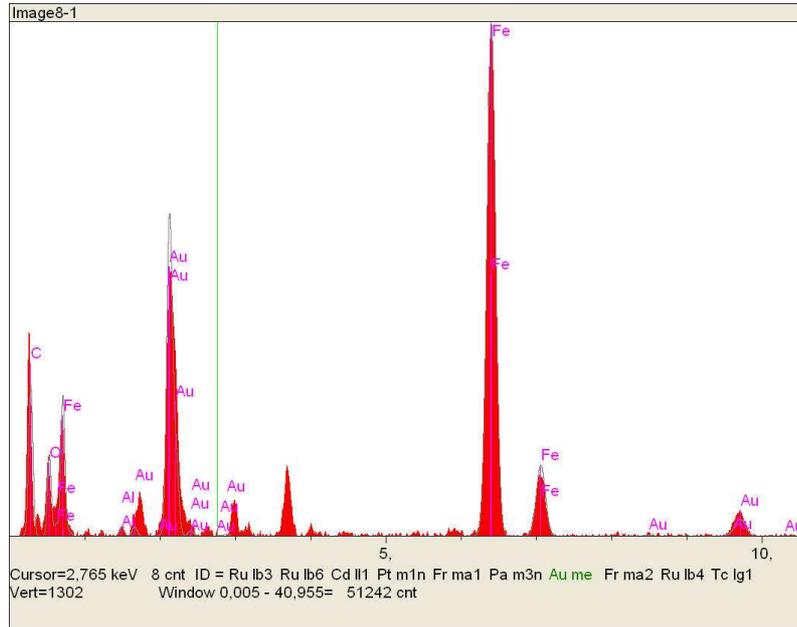


Figura 4.13 – Espectro por energia dispersiva (análise química) dos principais elementos químicos presentes na região 1 da Fig. 4.12.

A Fig. 4.13 apresenta os constituintes químicos daquela região 1. Essa região é uma mistura entre a superfície de folga e de saída (aresta de corte) e caracteriza os elementos presentes no desgaste de flanco da pastilha. Verifica-se, com maior evidência, a presença de carbono e ferro. Isto leva a crer que há fortes indícios que esta região seja algum tipo de carboneto, ou seja, alguma partícula dura e abrasiva presente nos ferros fundidos cinzentos ligados, que tenha ficado aderido naquela região.

A Figura 4.14 aponta os principais elementos químicos presentes na região 2 (EDS) da Figura 4.12. Observa-se que a constituição química assemelha-se com a os elementos químicos da região 1, que também é uma região desgastada. Porém nesta região observa-se uma maior variedade de elementos químicos providos do material da peça usinada, como por exemplo: ferro, carbono, silício e enxofre. Esta análise é válida para comprovar que houve uma forte adesão do material da peça sobre a região de desgaste da ferramenta. Logo, sugere-se que o mecanismo de desgaste que prevaleceu foi o de adesão, mesmo em elevadas velocidades de corte, ou seja, altas temperaturas.

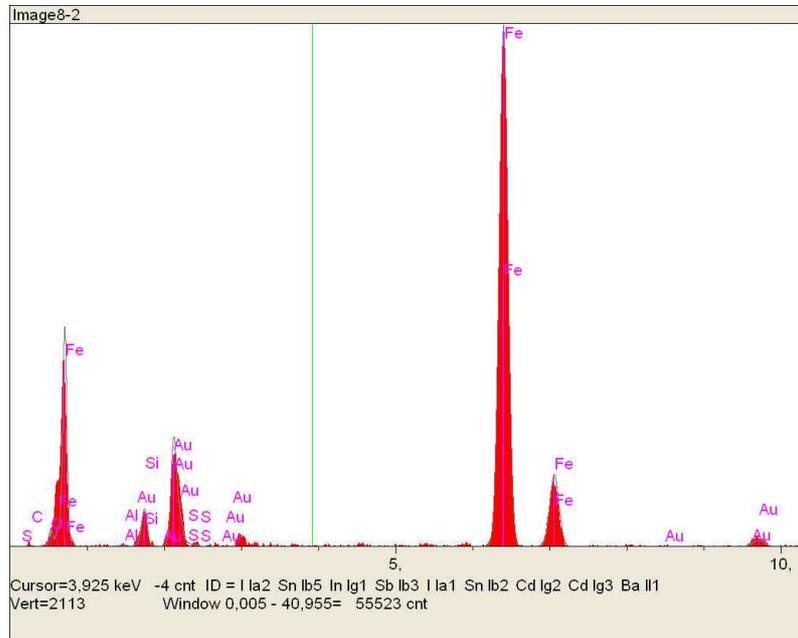


Figura 4.14 – Espectro por energia dispersiva (análise química) dos principais elementos químicos presentes na região 2 da Fig. 4.12

Por fim, a Figura 4.15 apresenta os constituintes químicos da região 3 da Figura 4.12. Observa-se que os elementos químicos que compõem o revestimento (Al e O) estão bem representados nesta figura. Isso comprova que nesta região ainda há presença do revestimento da ferramenta. Verifica-se também a presença de ferro (Fe), carbono (C) e silício (Si). Esses elementos são originados do material da peça, logo, ainda prevaleceu o mecanismo de adesão nesta região da ferramenta. O teor de ferro presente nesta região, provavelmente, também pode ser originado do material usinado.

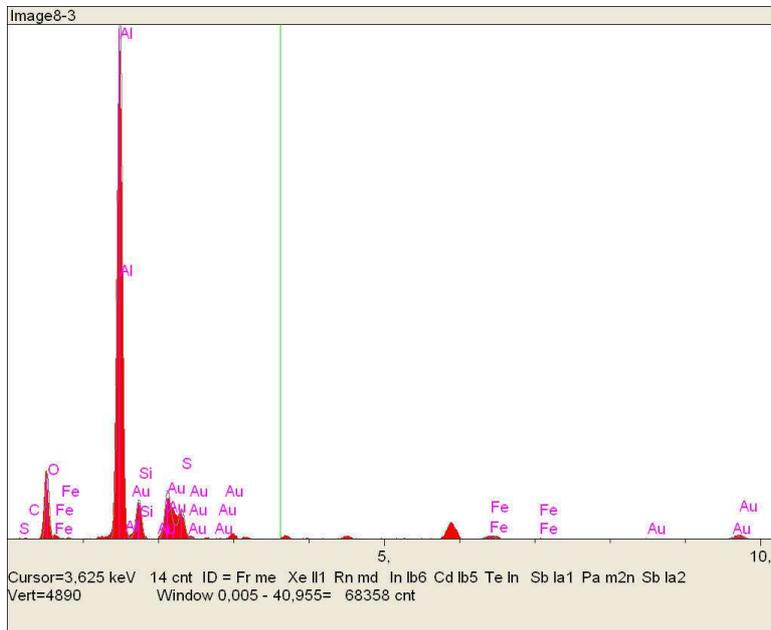


Figura 4.15 – Espectro por energia dispersiva (análise química) dos principais elementos químicos presentes na região 3 da Fig. 4.12.

Através de análises feitas no MEV, com elétrons retro-espalhados, verificou-se a presença de um metal pesado aderido na região do desgaste de flanco da ferramenta (parte mais clara da figura), quando usinado o material B (ferro fundido ligado ao CrCuSnMo) com uma velocidade de 1000 m/min após o fim de vida da ferramenta. Acredita-se que este metal pesado possa ser o ferro originado do material da peça. É possível que tenha ocorrido adesão. A Figura 4.16 apresenta uma foto no MEV desta região.

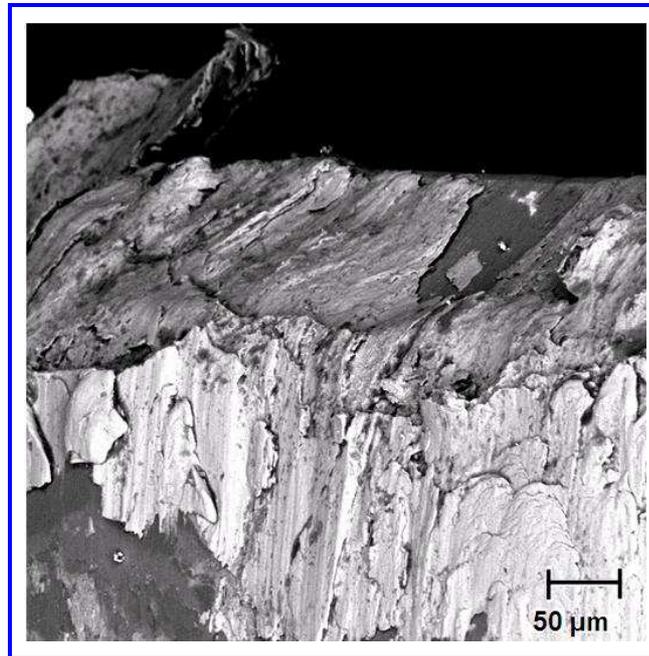


Figura 4.16 – Característica do tipo de mecanismo de desgaste durante a usinagem do material B realizado com uma velocidade de 1000 m/min.

A análise dos mecanismos de desgaste para as faixas de velocidade de corte de 1000 m/min não é de fácil interpretação. Novamente, é possível que tenha ocorrido os mecanismos de difusão, abrasão e oxidação comuns para faixas de velocidade de corte elevadas. Porém, para garantir qual deles foi o predominante, seria necessário um estudo mais detalhado sobre este assunto. A Figura 4.16 mostra, no entanto, que há uma boa adesão do material usinado na região do desgaste de flanco da aresta principal de corte.

Contudo é importante ressaltar que os micros constituintes da matriz metálica dos materiais desempenham importante influência no mecanismo de desgaste das ferramentas. Como por exemplo, os carbonetos de molibdênio, característica do material B, que são inclusões com alta dureza, não são deformados plasticamente, mesmo quando as condições de temperatura e pressão desenvolvidas na interface cavaco-ferramenta são suficientes para promover alterações microestruturais no material da peça (Meurrer, 2007). As inclusões de carbonetos de molibdênio e carbonetos de cromo são potencialmente prejudiciais à usinabilidade devido ao seu efeito abrasivo.

4.4 Potência de Corte

Conforme apresentado no capítulo 3, a potência foi obtida em cada teste a partir do monitoramento da corrente elétrica do motor principal (eixo-árvore). Por se tratar de um motor de corrente contínua a o cálculo da potência era feito pelo produto da corrente pela tensão do motor do eixo árvore. A tensão de alimentação deste motor manteve-se constante em 400 V. O rendimento do motor não foi considerado para os cálculos da potência de corte, pois a intenção deste teste foi avaliar a comparação do comportamento dentre os materiais para cada faixa de velocidade de corte. Logo, foram monitorados apenas os sinais de corrente elétrica.

As Figuras 4.17 a 4.19 mostram o comportamento do sinal da potência de corte para as três condições de velocidade de corte durante a usinagem dos três ferros fundidos investigados, sendo os mesmos coletados no ultimo passe já com ferramentas no fim de vida. Para facilitar a interpretação, estes sinais, foram filtrados, apresentando uma média móvel de 10000 pontos, o que também representa a taxa de aquisição dos sinais coletados durante todo o momento do passe da fresa sobre o material.

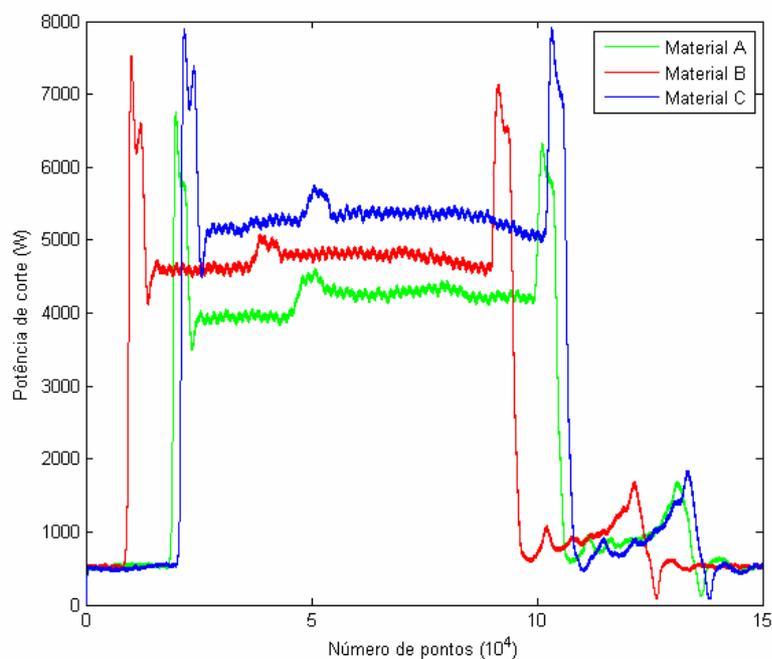


Figura 4.17– Potência de corte para $V_c = 600$ m/min.

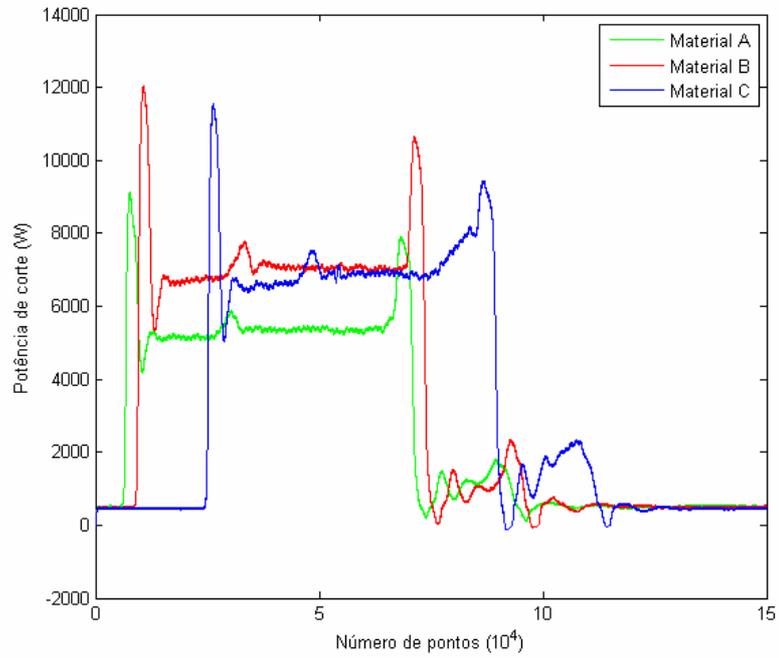


Figura 4.18 – Potência de corte para $V_c = 800$ m/min.

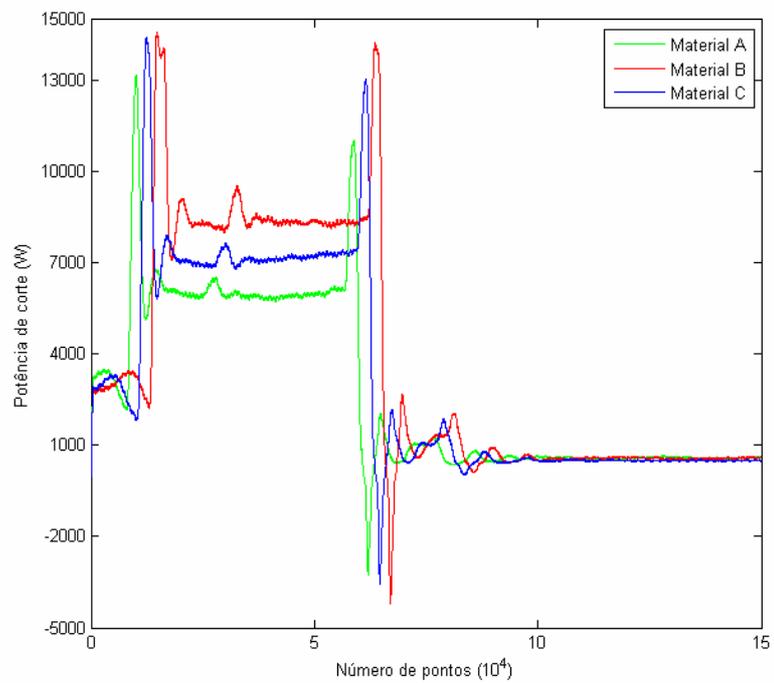


Figura 4.19 – Potência de corte para $V_c = 1000$ m/min.

Observa-se pelos gráficos da potência de corte que o material que apresentou a menor potência durante as três faixas de velocidade de corte foi o material A, ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn. Este material apresenta valores de resistência máxima à tração e dureza menores que os demais materiais. Isto implica em menores esforços durante o cisalhamento do material. Como o material da peça apresentava uma geometria característica (um rasgo no centro), os esforços de usinagem poderiam ser alterados devido a um volume não constante de material a medida que iria sendo usinado. Isto explica o fato de algumas alterações que ocorriam no sinal da corrente elétrica, conseqüentemente na potência de corte.

Observa-se pelos gráficos de potência de corte que a potência aumenta com a velocidade de corte. Segundo Diniz (2006) a potência de corte não é diretamente proporcional à velocidade de corte, pois com o aumento da velocidade de corte leva a um decréscimo da pressão específica de corte e, portanto, da força de corte. A diminuição da pressão específica de corte é motivada pela redução da deformação e da dureza do cavaco e também dos coeficientes de atrito que o aumento da velocidade de corte (e conseqüentemente da temperatura de corte) proporciona. Logo, em velocidades de corte altas, a influência deste parâmetro na pressão específica é pequena e com isto a potência de corte nesta faixa de velocidade de corte é diretamente proporcional à velocidade de corte.

O material B, ferro fundido cinzento ligado, demonstrou ter novamente a pior usinabilidade nas velocidades de corte de 800 e 1000 m/min do que o ferro fundido vermicular, material C. Isto é confirmado pelos gráficos das Figuras 4.18 e 4.19, a potência de corte para o material B teve maiores valores que para o material A. O fato de o ferro fundido vermicular apresentar uma maior resistência à tração, neste caso não foi fundamental para haver uma maior potência de corte, e aliado a isto maiores esforços. A dureza do material B é cerca de 30% maior que a dureza do material C, uma vez ainda que a matriz desse material é totalmente perlítica. Esta diferença de microestrutura aliada aos maiores valores de dureza tendem a levar o material B, novamente, demonstrar maiores dificuldades durante a usinagem. A morfologia da grafita nos ferros fundidos cinzentos, assim como sua distribuição, afetam de forma positiva durante o cisalhamento destes materiais. Os veios de grafita nos ferros fundidos cinzentos, por possuírem em suas extremidades formas finas e pontiagudas, levariam a facilitar a propagação de trincas na matriz destes materiais e conseqüentemente facilitaria a usinagem, quando se comparados aos ferros fundidos de grafita compactada. Porém, estas características não motivou menores esforços, e conseqüentemente menores valores de potência de corte para as velocidades de corte mais elevada.

A adição do molibdênio, como elemento de liga no material B, principal diferença para o material A, leva a formação de carbonetos de molibdênio. Estes carbonetos, que são partículas duras e abrasivas, objetivam em conferir na matriz dos materiais maiores resistência a quente e assim maior resistência à fadiga térmica (Guessser, 2003). Conseqüentemente a presença deste tipo de carbonetos influenciam negativamente durante a usinagem em elevadas faixas de velocidade de corte.

Na velocidade de corte de 600 m/min a potência de corte foi maior para o ferro fundido vermicular. Nesta condição de corte a ferramenta apresentou maior desgaste em relação aos demais materiais. É importante ressaltar que nesta faixa de velocidade de corte o sulfeto de manganês, presentes apenas nos ferros fundidos cinzentos, pode ter auxiliado positivamente no cisalhamento deste tipo de material e assim gerando uma menor potência de corte. Acima desta faixa de velocidade, parece não haver tanta influência destes elementos.

As Figuras 4.20 a 4.22 apresentam informações em forma de gráfico de barras do comportamento da potência de corte no decorrer da usinagem até atingir o critério de fim de vida da ferramenta que foi de 5 corpos de prova. Considera-se como meia vida da ferramenta o momento que a ferramenta havia removido um volume de material de aproximadamente 2460 cm³, ou seja, 2,5 corpos de prova. Os dados de potência de corte para a ferramenta nova, foram obtidos nos primeiros passes dos testes, ou seja, não havia ainda a presença de desgaste na aresta principal da ferramenta.

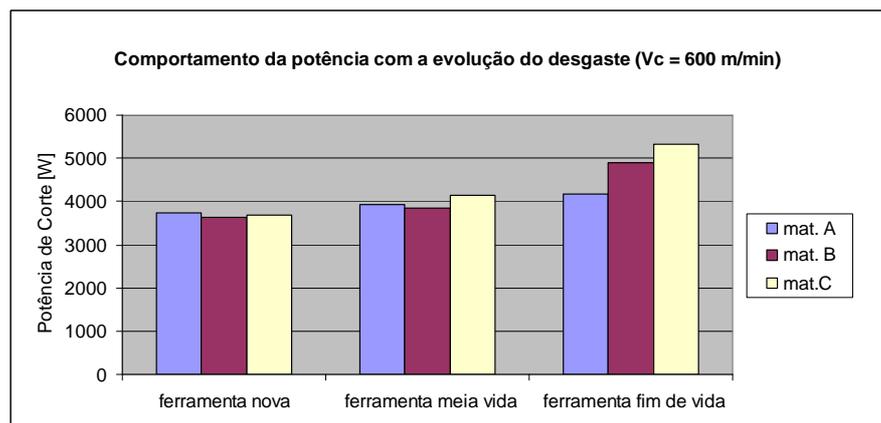


Figura 4.20 – Condições da potência de corte para três estados de afiação da ferramenta para Vc = 6000 m/min.

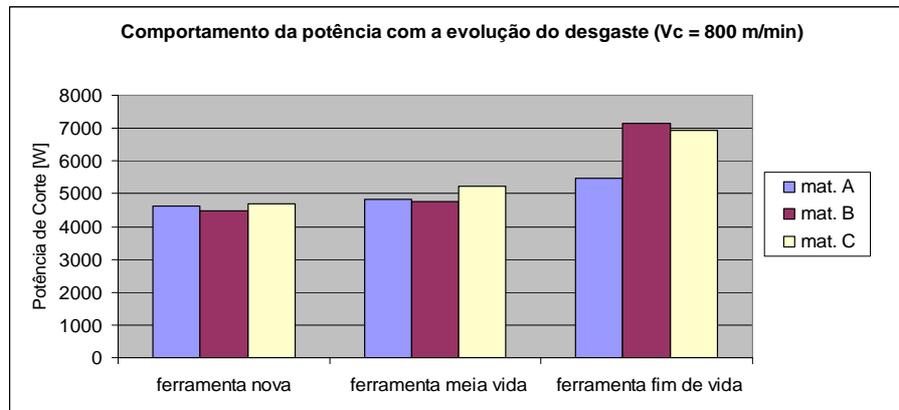


Figura 4.21 – Condições da potência de corte para três estados de afiação da ferramenta para $V_c = 8000$ m/min.

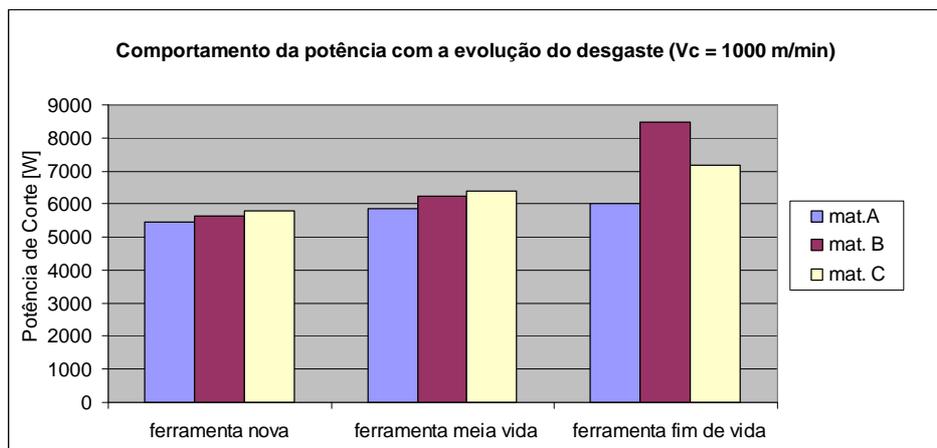


Figura 4.22 – Condições da potência de corte para três estados de afiação da ferramenta para $V_c = 10000$ m/min.

Em todos os gráficos do comportamento da potência com a evolução do desgaste na ferramenta, é possível que o crescimento da potência de corte tenha ocorrido devido a excessiva deformação já causada à aresta de corte, com os altos desgastes de flanco na aresta principal de corte.

4.5 Sinal de vibração

As Figuras 4.23 a 4.25 representam o comportamento do sinal de vibração com a evolução do desgaste de flanco na ferramenta de corte para as três faixas de velocidade de corte empregadas nos testes. As informações apresentadas por estas figuras foram obtidas pela média quadrática (RMS) dos valores dos sinais de vibração durante apenas o período ativo da fresa, ou seja, apenas durante a usinagem do corpo de prova. Novamente, considera-se como meia vida da ferramenta o momento que a ferramenta havia removido um volume de material de aproximadamente 2460 cm^3 e para a ferramenta nova, não havia ainda a presença de desgaste na aresta principal da ferramenta.

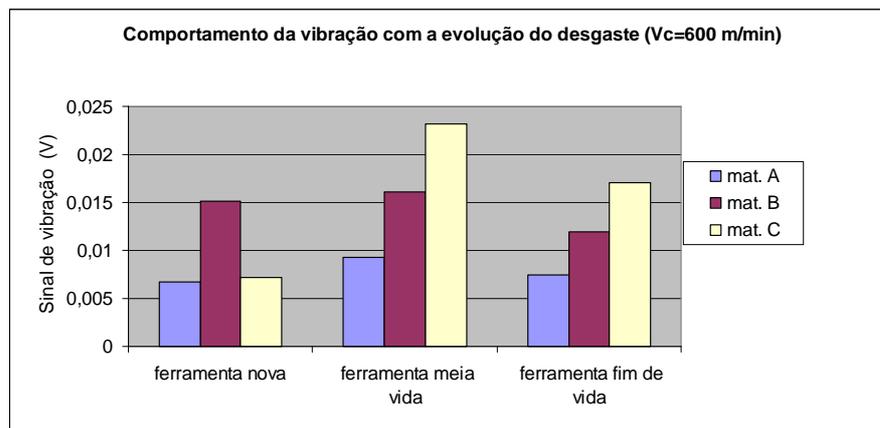


Figura 4.23 – Resposta do sinal de vibração para três estados de afiação da ferramenta para $V_c = 600 \text{ m/min}$.

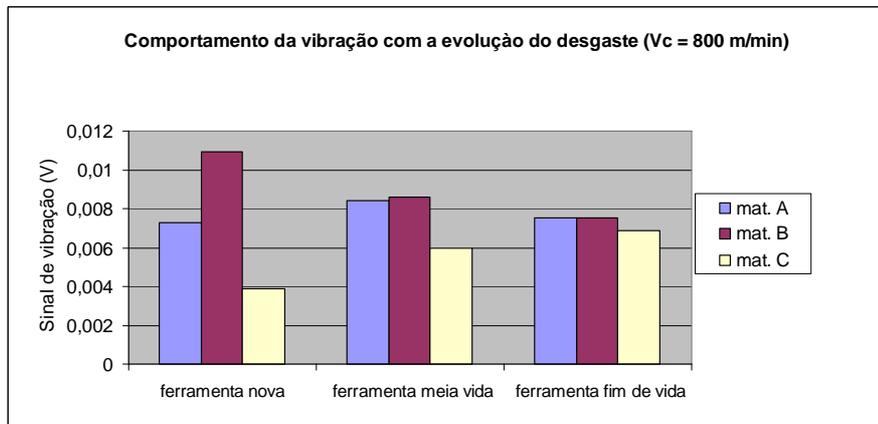


Figura 4.24 – Resposta do sinal de vibração para três estados de afiação da ferramenta para $V_c = 800$ m/min.

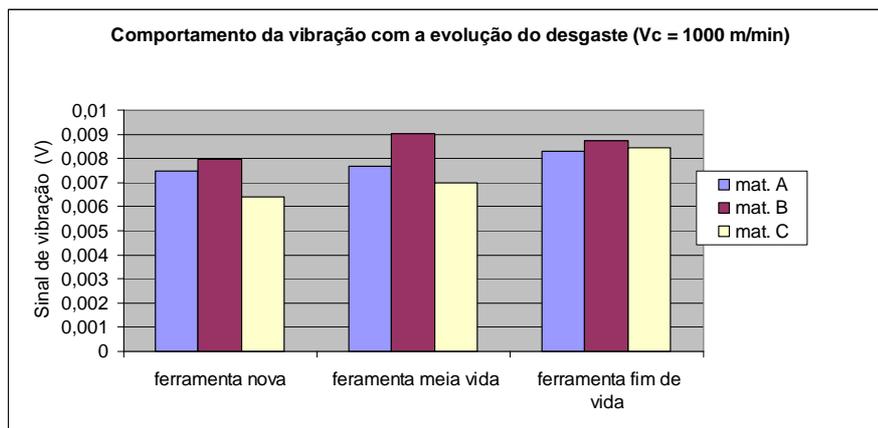


Figura 4.25 – Resposta do sinal de vibração para três estados de afiação da ferramenta para $V_c = 1000$ m/min.

Pode-se observar que não houve um padrão bem definido da vibração durante a usinagem dos três tipos de ferros fundidos. Pelo fato do fresamento ser um processo de corte intermitente, e pela geometria complexa dos corpos de prova, os dados tiveram de ser analisados de forma a comparar o grau de usabilidade dentre os materiais. Estas características do material da peça e do tipo do processo, aliado às elevadas velocidades de corte podem ter mascarados alguns resultados do sinal de vibração.

De uma forma geral os dados dos sinais de vibração para a velocidade de corte de 600 e 1000 m/min, Figuras 4.23 e 4.25, demonstram que à medida que a ferramenta desgasta o sinal de vibração tende a aumentar. Segundo Sousa (1998) esse comportamento pode ser explicado da seguinte maneira. No início, pelo assentamento das arestas de corte na fresa e pela própria evolução do desgaste das mesmas, ou seja, a dificuldade de se obter a mesma altura nas oito arestas de corte durante o ajuste inicial de montagem da fresa, acaba definindo alturas diferentes das mesmas em relação à peça, provocando portanto no início do processo de fresamento, cortes com profundidades diferentes. As arestas mais protuberantes são mais exigidas, portanto desenvolvem o desgaste mais rapidamente. Isto gera esforços menores do que quando todas as arestas de corte trabalham na mesma altura, e esforços menores implicam em nível de vibração menor durante o processo de fresamento. Mas à medida que se aumentam o número de passes, as arestas de corte vão se desgastando e a tendência é ajustar as alturas relativas à peça, provocando assim a estabilização do nível de vibração do sistema. Mesmo que não aconteça este ajuste, o desgaste continua a evoluir, de maneira desigual, aumentando as forças de corte, que acarretam em níveis de vibração maiores na fresadora.

A capacidade de amortecimento de vibração de um material é a sua habilidade de dissipar energia vibracional. Em ferros fundidos, a capacidade de amortecimento de vibrações é resultado entre a grafita e a matriz metálica, durante a sollicitação mecânica. A capacidade de amortecimento de vibração depende de defeitos na grafita, sendo independente da matriz metálica. Elevada quantidade de partículas grandes de grafita lamelar, tende a favorecer esta capacidade (Guessser et al., 2003). Este comportamento demonstrou ocorrer para o material A, que possui este tipo de grafita. Em média foi o material que apresentou menores taxas de vibração para três condições de velocidade de corte.

Com o aumento da velocidade de corte, o sinal de vibração foi menor. Com o aumento do desgaste de flanco, os sinais de vibração durante a usinagem aumentam, mas a taxa de aumento é baixa para elevadas velocidade de corte Ghani (2002). Este autor usinou um ferro fundido de semelhante composição química, dureza resistência à tração dos ferros fundidos aqui investigados, e também observou em seus experimentos menores sinais de vibração quanto maiores eram as velocidades de corte. Com ele sugere que à medida que a velocidade de corte aumenta o processo de usinagem tende a ficar mais estável, conseqüentemente gerando menores ruídos de vibração no sistema ferramenta-peça-máquina.

O sinal RMS de vibração em usinagem é um bom parâmetro para monitorar o fim de vida de uma ferramenta, como também a qualidade do acabamento da superfície de uma peça.

Porém, é necessário ter o domínio de todos os fatores que podem influenciar direta ou indiretamente no processo de usinagem, para que os resultados possam posteriormente ser melhor tratados e analisados. Um importante fator que tenha influenciado nos resultados pode ter sido alteração no raio de arredondamento da aresta principal de corte. A perda do revestimento, aliado ao desgaste da ferramenta, influenciam significativamente na vibração de máquinas devido à alteração na geometria da aresta de corte.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser obtidas para os testes e condições de corte utilizadas neste trabalho:

- O ferro fundido vermicular da classe 350 (material C) apresentou a pior usinabilidade quando usinado a uma velocidade de corte de 600 m/min. Nesta condição o material ofereceu uma maior resistência ao cisalhamento quando comparado aos dois ferros fundidos ligados.
- O Material B, ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSnMo, demonstrou ter o pior índice de usinabilidade para as velocidades de corte de 800 e 1000 m/min, sendo estas faixas de velocidades A influência da matriz metálica (perlítica) e as inclusões de carbonetos de molibdênio podem ter influenciado significativamente nestes resultados.
- Houve uma relação entre o desgaste de flanco médio da aresta principal de corte com o sinal de potência de corte. Sendo que, para maiores comprimentos de desgaste maiores foram os esforços gerados para o corte do material, isto se refletiu em maior consumo de potência no eixo árvore da máquina operatriz.
- De um modo geral o sinal RMS da vibração foi maior à medida que aumentava o desgaste nas ferramentas de corte. Este comportamento ocorreu para todos materiais analisados. Por sua vez, o comportamento da vibração tornou-se mais

estável à medida que a velocidade de corte era aumentada. Logo, isso favoreceu de certo modo, a usinagem para a velocidade de corte de 1000 m/min.

- O material B apresentou maiores valores médios da dureza que o material A e o material C.
- Não é possível afirmar dentre os três materiais investigados o que apresenta maiores valores de resistência de ruptura à tração e microdureza da perlita, pois a grande dispersão dos valores obtidos induz, estatisticamente, em restringir esta informação.
- Os mecanismos de desgaste mais evidentes que foram possíveis ser identificados, se destacam abrasão e adesão. Porém, é importante ressaltar que por envolver um grande aporte térmico, nas velocidades relativamente alta, podem ter ocorrido algum outro mecanismo de desgaste como o de oxidação e difusão.
- A ferramenta de corte da classe K20D revestida com óxido de alumínio pela técnica MTCD, apresentou uma boa tenacidade e uma boa resistência térmica favorecendo em um bom tempo de vida das mesmas. Isto se justifica pela quantidade de volume de material usinado para as severas condições de usinagem empregadas no ensaio

CAPÍTULO VI

PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

A metodologia empregada neste trabalho suscitou dúvidas que fazem jus a investigação posterior para de fato entender melhor a usinabilidade do material, tais como:

1. Adotar outro critério de fim de vida nas ferramentas, tais como: percurso de corte, tempo de usinagem, valores de desgaste sugeridos pela norma ISSO 3685 e etc.
2. Investigar o desempenho de outros tipos de ferramenta de corte, de outras classes e revestimento.
3. Averiguar outras grandezas físicas que indiquem o índice de usinabilidade do material, tais como: sinal de torque, da força de corte e da temperatura de usinagem.
4. Pesquisar materiais que apresente valor da condutividade térmica maiores daqueles obtidos nesta pesquisa, uma vez que em processos de usinagem quase toda forma de energia envolvida durante o processo é do tipo térmica.
5. Investigar, criteriosamente, as inclusões metálicas na matriz dos materiais, tais como: distribuição, quantidade, forma e o tipo de micro constituinte.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, C. **Análise da Furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos Revestidas com TiN e TiAlN**. Florianópolis, 2005. Dissertação-Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

ASM Handbook, **Properties and Selection Irons, Steels and High Performance Alloys**. Metal Handbook, 10ª Edição, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2002, “**Materiais Metálicos- Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente**”, Rio De Janeiro, Brasil.

Bonifácio, M. E. R.; Diniz, A. E. **Correlating tool wear, tool life, surface roughness and tool vibration in finish turning with coated carbide tools**. Wear 173 (1993) 137 – 144.

Chiaverini, V. **Aços e Ferros Fundidos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 7ª Edição, 2002.

Bagetti, J. H. **Análise da Usinabilidade, Deformação e Temperatura no Fresamento dos Ferros Fundidos Vermicular e Cinzento**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2009.

Boehs, L. **Influência do sulfeto de manganês na usinabilidade do ferro fundido maleável preto ferrítico**. 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1979.

Borges, L. V. **Desenvolvimento do Método de Aquecimento Plano Parcial para a Determinação Simultânea de Propriedades Térmicas Sem o Uso de Transdutores de Fluxo de Calor**. 2008. 129 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia.

Chiaverini, V. **Tecnologia Mecânica – Estrutura e Propriedades dos Metais e Ligas- Processos de Fabricação**. Editora McGraw-Hill do Brasil, 2ª Ed, vol 1, 1979.

Da Mota, P. R. **Investigação do Comportamento de Ferramentas de Aço-Rápido no Processo de Rosqueamento Interno em Alta Velocidade de Corte**. 2006. 142 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Dawson, S. **Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine Design**. Werkstoff und automobilartrieb (Materials in powertrain), VDI (Verein Deutscher Ingenieure. Dresden, Germany, 1999.

Dawson, S. **Process Control for the Production of Compacted Graphite Iron**. 106th AFS Casting Congress, Kansas City, 4-7 Maio 2002.

Dawson, S., Schroeder, T. **Practical Applications for Compacted Graphite Iron**. AFS Transactions, , Des Plaines, USA: Paper 04-047, 2004, p.1-9.

Duarte, M. A. V. et al. **Monitoramento do Desgaste das Ferramentas Durante o Processo de Rosqueamento com Machos Máquina via Medições de Vibrações**. In: COBEF, 2003, Uberlândia. Anais do II COBEF, 2003.

Sousa, M.M, **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, 1998.

Diniz, A. E.; Filho, J.C. **Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process**, *Wear* 232 (1999) 67 – 75.

Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. Editora Artliber, São Paulo, SP, 5ª Edição 2006.

Doré, C. **Influência da variação da nodularidade na usinabilidade do ferro fundido vermicular**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2007.

Ferraresi, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 3 ed. v.1, S.P: Editora Edgard Blücher Ltda, 1995. 751p.

Ferrer, Jorge Antonio Giles, **Uma contribuição ao fresamento frontal de superfícies irregulares de ferro fundido cinzento**, Campinas,:Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 2006. 208 p. Tese de Doutorado.

Ghani, A. K. et al. **Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool**, *Journal of Materials Processing Technology* 122 (2002) 17 – 22.

Guesser, I. W.; Guedes, L. C. **Desenvolvimentos Recentes em Ferros Fundidos Aplicados à Indústria Automobilística**. In: IX Simpósio de Engenharia Automotiva - AEA, 1997, São Paulo. Anais... 1997.

Guesser, W.; Schroeder, T.; Dawson, S. **Production Experience with Compacted Graphite Iron Automotive Components**. In: AFS CASTING CONGRESS, 105, 2001, Dallas. Anais... Dallas: 2001.

Guesser, W.L. **Ferro Fundido com Grafita Compacta**. Metalurgia & Materias: Junho 2002. p. 403-405.

Guesser, W. L. et al., **Ferros Fundidos Empregados para Discos e Tambores de Freios**, in Brake Colloquium, SAE, 2003, Brasil – Gramado, 2003.

Guesser, W., Masiero, I., Cabezas, C. **Thermal Conductivity of Gray Iron and Compacted Graphite Iron Used for Cylinder Heads**. Revista Matéria, vol 10, n. 2, Junho 2005, p 265-272.

Hutchings, I.M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**, Edward Arnold, 273 pp. London, 1992.

ISO, 1977. **Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools**. ISO 3685.

Klink, U., Flores, G. **O Uso da Grafita Vermicular em Cilindros Fundidos**. Revista Máquinas e Metais, Fevereiro de 2001.p 38.

Machado, A. R.; Da Silva, M. B. **Apostila de Usinagem dos Metais**. 8. ed. Universidade Federal de Uberlândia. 2004. 257p.

Machado, A R; Bohes, L; Santos, M T; Guesser, W L. **Usinagem de ferros fundidos cinzento, nodular e vermicular**. In: Coelho, R T. Tecnologias Avançadas de Manufatura. Instituto Fábrica do Milênio. Ed Novos Talentos, 2005.

Machado, A. R, Da Silva, M. B; Coelho, R. T; Abrão, A. M. **Teoria da Usinagem dos Materiais** 1ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

Marquard, R.; Helfried, S.; Mcdonald, M. Crank it up: **New materials create new possibilities**. Engine technology international, v. 2, p. 58-60, 1998.

Metals Handbook, 1989, American Society for Metals - ASM, 9a ed., vol. 16.

Meurer, P. R. **Usinagem de Ferro Fundido Cinzento FC-250 com Diferentes Tipos de Elementos de Liga Utilizados na Fabricação de Discos de Freios**. Florianópolis, 2007. Dissertação - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

Milan, J. C. G. **Usinabilidade de aços para moldes para plástico**, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia - MG, 1999.

Mocellin, F. **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaios de Furação**. Florianópolis, 2002a. Dissertação – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

Mocellin, F., et al. **Study of Machinability of Compacted Graphite Irons for Drilling Process**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering: vol 26, 2004.

Mocellin, F. **Desenvolvimento de Tecnologia para Brunimento de Cilindros de Blocos de Motores em Ferro Fundido Vermicular**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2007.

Montgomery, D.C., Runger, G. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Tradução Profa. Verônica Calado, Editora LTC, 2º ed, 2003.

Pereira, A. A.; Boehs, L.; Guessser, W. L., **Como as inclusões no material da peça podem afetar o desgaste da ferramenta?** O Mundo da Usinagem 4ª Edição – 2005.

Pereira, A.A. **Influência do teor de Enxofre na Microestrutura, nas Propriedades Mecânicas e na Usinabilidade o Ferro Fundido Cinzento FC 25**. Florianópolis, 2005. Dissertação-Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

Ramos, C. A. D., 2004, **Usinabilidade de Aços Inoxidáveis para Matrizes ABNT420 e VP80 no Fresamento de Topo Usando Superfícies de Respostas**, Tese de Doutorado , Universidade Federal de Uberlândia, 229 pp., Uberlândia, MG.

Reuter, U., Schulz, H. **CGI Machinability and Developments Towards Production**. CGI Design and Machining Workshop, PTW TU-Darmstadt, 1999.

Reuter, U., Schulz, H., Dawson, S., Hollinger, I., Robbins, M., Daeth, J. **The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron**. Society of automotive engineers, Inc, Alemanha, 2001, p 1-18.

Richetti, A. et al. **Influence of the number of inserts for tool life evaluation in face milling of steels**, International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 695 – 700.

Sales, W. F. **Determinação das Características Refrigerantes e Lubrificantes de Fluidos de Corte**. 1999. 176 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia.

Sandvik Coromant. **CoroPak - Suplemento do Catálogo de Ferramentas Rotativas e do Catálogo de Ferramentas para Torneamento**. Catálogo Sandvik Coromant Brasil, 2005, pg 79.

Sandvik Coromant. **Novas ferramentas de corte da Sandvik Coromant**. Suplimento do Catálogo Sandvik Coromant Brasil, 2007.

Santos, A. B. S., Castello Branco, C. H. **Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991. São Paulo – SP.

Shaw, M.C. **Metal Cutting Principles**, Oxford University Press, ISBN 0-19-859002-4, 1984.

Silva, J.G., Abrão, A.M. **Comportamento da Cerâmica e do Metal-Duro Revestido no Torneamento de Fofo Nodular**. Revista Máquinas & Metais, Julho de 2006, p 38-49.

Sintercast. **What is CGI**. Em www.sintercast.com , Acesso Agosto de 2007.

Stemmer, C. E. **Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscas, fresas, brochas, rebolos e abrasivos**. Ed. da UFSC. Florianópolis: 1992, 326p.

Souto, U. B. **Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Fresamento Via Emissão Acústica**. 2007. 182 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia.

Sousa, M.M, **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, 1998.

TELES, J. M. **Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro**, Itajubá, 105 p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2007.

Trent, E.M.; Wright, P.K. **Metal Cutting**. 4th Edition, Butterworths – Heinemann. 2000, 446 p.

Vaccari, J. **How to Machine Compacted Graphite Iron**. Revista Machine Shop Guide, Novembro de 2000.

Xavier, F. A. **Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-duro, Cerâmica e CBN**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2003.

Xavier, F. A. **Estudo dos Mecanismos de Desgaste em Ferramentas de Nitreto de Silício Aplicadas Na Usinagem Dos Ferros Fundidos Vermicular e Cinzento**. Março de 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2009.

CAPÍTULO VIII

Anexos

Tabela 8. 1 – Valores dos desgaste, sinal de potência e vibração para o material A

		Material A								
		Volume cm ³	Desgaste VBb (µm)	Desgaste VBb (µm) (replica)	Valor Médio do Desgaste (µm)	Valor Médio do Desgaste (mm)	Desvio Padrão do Desgaste	Sinal RMS da Potência	Sinal RMS de Vibração	Tempo [min]
Vc = 600 m/min	1 ^o CP	474,86	45,58	31,34	38,46	0,038	10,07	3731,6	0,006689	4,33
		945,80	59,83	59,9	59,87	0,060	0,05	3222,4	0,009964	8,66
	2 ^o CP	1420,66	65,53	62,68	64,11	0,064	2,02	3770	0,009546	12,99
		1891,6	74,07	65,77	69,92	0,070	5,87	3407,3	0,009684	17,32
	3 ^o CP	2366,46	82,62	89,05	85,84	0,086	4,55	3921,1	0,009306	21,65
		2837,4	88,32	91,57	89,95	0,090	2,30	3379,6	0,008053	25,98
	4 ^o CP	3312,260	114	97,03	105,52	0,106	12,00			30,12
		3783,2	139,6	102,9	121,25	0,121	25,95	3365,1	0,007484	34,64
	5 ^o CP	4258,06	153,8	140,6	147,20	0,147	9,33	3880	0,007441	38,97
		4729	159,5	154,5	157,00	0,157	3,54	4158,5	0,006633	43,3

		Volume cm ³	Desgaste VBb (µm)	Desgaste VBb (µm) (replica)	Valor Médio do Desgaste (µm)	Valor Médio do Desgaste (mm)	Desvio Padrão do Desgaste	Sinal RMS da Potência	Sinal RMS de Vibração	Tempo [min]
Vc = 800 m/min	1 ^o CP	474,86	45,67	37,15	41,41	0,041	6,02	4628,9	0,007268	3,3
		945,80	57,05	71,28	64,17	0,064	10,06	4245	0,006057	6,6
	2 ^o CP	1420,66	65,59	85,9	75,75	0,076	14,36	4742,7	0,008389	9,9
		1891,6	71,74	88,73	80,24	0,080	12,01	4515,4	0,0086	13,2
	3 ^o CP	2366,46	94,7	114,3	104,50	0,105	13,86	4841,7	0,008433	16,5
		2837,4	97,53	120	108,77	0,109	15,89	4498,2	0,008636	19,8
	4 ^o CP	3312,260	103,2	128,7	115,95	0,116	18,03	4829	0,008126	23,1
		3783,2	129,3	131,1	130,20	0,130	1,27	4637	0,008356	26,4
	5 ^o CP	4258,06	135	156,7	145,85	0,146	15,34	4946,4	0,008926	29,7
		4729	137,8	166,1	151,95	0,152	20,01	5459,6	0,007536	33

		Volume cm ³	Desgaste VBb (µm)	Desgaste VBb (µm) (replica)	Valor Médio do Desgaste (µm)	Valor Médio do Desgaste (mm)	Desvio Padrão do Desgaste	Sinal RMS da Potência	Sinal RMS de Vibração	Tempo [min]
Vc = 1000 m/min	1 ^o CP	474,86	***	45,94	45,94	0,046	0,00	5469,5	0,007464	2,61
		945,80	87,77	83,4	85,59	0,086	3,09	5238,8	0,007697	5,22
	2 ^o CP	1420,66	***	88,4	88,40	0,088	0,00	5800,3	0,006345	7,83
		1891,6	102	102,9	102,45	0,102	0,64	5270,7	0,007741	10,44
	3 ^o CP	2366,46		105,6	105,60	0,106	0,00	5857,7	0,00765	13,05
		2837,4	103,7	108,4	106,05	0,106	3,32	5659,9	0,007444	15,66
	4 ^o CP	3312,260	159,4	122,6	141,00	0,141	26,02	6120,7	0,007358	18,27
		3783,2	178,6	137,2	157,90	0,158	29,27	6103,1	0,007502	20,88
	5 ^o CP	4258,06	204,7	160	182,35	0,182	31,61	6027,9	0,008287	23,49
		4729	215	***	215,00	0,215	0,00			26,1

Tabela 8. 1 – Valores dos desgaste, sinal de potência e vibração para o material B.

		Material B								
		Volume cm ³	Desgaste VBb (µm)	Desgaste VBb (µm) (replica)	Valor Médio do Desgaste (µm)	Valor Médio do Desgaste (mm)	Desvio Padrão do Desgaste	Sinal RMS da Potência	Sinal RMS de Vibração	Tempo [min]
Vc = 600 m/min	1°C	474,86	49,18	73,03	61,11	0,061	16,864	3641,8	0,015068	4,33
		945,80	50,48	83,79	67,14	0,067	23,554	3488,2	0,013635	8,66
	2°C	1420,66	69,32	101,8	85,56	0,086	22,967	3754,4	0,012788	12,99
		1891,6	81,58	108,1	94,84	0,095	18,752	3600,8	0,012129	17,32
	3°C	2366,46	114	120,1	117,05	0,117	4,313	3847,7	0,016115	21,65
		2837,4	115,4	125,3	120,35	0,120	7,000	3718	0,017846	25,98
	4°C	3312,260	120,2	143,4	131,80	0,132	16,405			30,12
		3783,2	138,2	165,1	151,65	0,152	19,021	4354,6	0,011341	34,64
	5°C	4258,06	161,7	175,7	168,70	0,169	9,899	4420,9	0,011932	38,97
		4729	180,4	193,1	186,75	0,187	8,980	4891,6	0,009278	43,3

		Volume cm ³	Desgaste VBb (µm)	Desgaste VBb (µm) (replica)	Valor Médio do Desgaste (µm)	Valor Médio do Desgaste (mm)	Desvio Padrão do Desgaste	Sinal RMS da Potência	Sinal RMS de Vibração	Tempo [min]
Vc = 800 m/min	1°C	474,86	56,98	65,77	61,38	0,061	6,215	4493,9	0,010939	3,3
		945,80	88,32	103,2	95,76	0,096	10,522	4243,1	0,010977	6,6
	2°C	1420,66	97,03	107,3	102,17	0,102	7,262	4415	0,008402	9,9
		1891,6	126,2	126,2	126,20	0,126	0,000	4468,3	0,008324	13,2
	3°C	2366,46	137,5	155,5	146,50	0,147	12,728	4756,8	0,008594	16,5
		2837,4	236,9	185,4	211,15	0,211	36,416	4769,2	0,007699	19,8
	4°C	3312,260	308,5	228,1	268,30	0,268	56,851	5280,6	0,008386	23,1
		3783,2	323	323	323,00	0,323	0,000	5436,6	0,00781	26,4
	5°C	4258,06	354,2	321,8	338,00	0,338	22,910	6119,8	0,007518	29,7
		4729	382	378,9	380,45	0,380	2,192	7141,6	0,009014	33

		Volume cm ³	Desgaste VBb (µm)	Desgaste VBb (µm) (replica)	Valor Médio do Desgaste (µm)	Valor Médio do Desgaste (mm)	Desvio Padrão do Desgaste	Sinal RMS da Potência	Sinal RMS de Vibração	Tempo [min]
Vc = 1000 m/min	1°C	474,86	74,95	83,4	79,18	0,079	5,975	5633,2	0,007945	2,61
		945,80	92,27	91,57	91,92	0,092	0,495	5417,4	0,009227	5,22
	2°C	1420,66	112,4	97,53	104,97	0,105	10,515	5927,6	0,00832	7,83
		1891,6	132,2	106,4	119,30	0,119	18,243	5611,4	0,008868	10,44
	3°C	2366,46	140,3	120,2	130,25	0,130	14,213	6248,2	0,009052	13,05
		2837,4	175,7	243,8	209,75	0,210	48,154	6427,3	0,009552	15,66
	4°C	3312,260	180,6	331,7	256,15	0,256	106,844	7388,1	0,00838	18,27
		3783,2	287,3	397	342,15	0,342	77,570	7455,9	0,009876	20,88
	5°C	4258,06	302,6	**	302,60	0,303		8464	0,00873	23,49
		4729	364,9	**	364,90	0,365				26,1

Tabela 8. 1 – Valores dos desgaste, sinal de potência e vibração para o material C

		Material C								
		Volume cm ³	Desgaste VBb (µm)	Desgaste VBb (µm) (replica)	Valor Médio do Desgaste (µm)	Valor Médio do Desgaste (mm)	Desvio Padrão do Desgaste	Sinal RMS da Potência	Sinal RMS de Vibração	Tempo [min]
Vc = 600 m/min	1°Cp	474,86	100	103	101,5	0,102	2,12	3685,2	0,007209	4,33
		945,80	136,3	112,4	124,35	0,124	16,90	3402,9	0,006747	8,66
	2°Cp	1420,66	145,5	141,4	143,45	0,143	2,90	3859,7	0,006105	12,99
		1891,6	150,4	155,9	153,15	0,153	3,89	3836,8	0,017896	17,32
	3°Cp	2366,46	177,1	163,1	170,1	0,170	9,90	4143,3	0,023171	21,65
		2837,4	206,4	202,8	204,6	0,205	2,55	4167,1	0,022662	25,98
	4°Cp	3312,260	214,1	214,2	214,15	0,214	0,07			30,12
		3783,2	226,8	220,4	223,6	0,224	4,53	4492,2	0,019994	34,64
	5°Cp	4258,06	322,2	283,1	302,65	0,303	27,65	4881,2	0,017017	38,97
		4729	371,7	286,7	329,2	0,329	60,10	5319,7	0,019304	43,3

		Volume cm ³	Desgaste VBb (µm)	Desgaste VBb (µm) (replica)	Valor Médio do Desgaste (µm)	Valor Médio do Desgaste (mm)	Desvio Padrão do Desgaste	Sinal RMS da Potência	Sinal RMS de Vibração	Tempo [min]
Vc = 800 m/min	1°Cp	474,86	71,74	89,05	80,395	0,080	12,24	4695,6	0,00387	3,3
		945,80	92,76	120,9	106,83	0,107	19,90	4452,4	0,004583	6,6
	2°Cp	1420,66	89,05	129,3	109,175	0,109	28,46	4791,2	0,004575	9,9
		1891,6	118,1	142,5	130,3	0,130	17,25	4729,2	0,00593	13,2
	3°Cp	2366,46	132,2	165,4	148,8	0,149	23,48	5230,7	0,005966	16,5
		2837,4	175,7	170,5	173,1	0,173	3,68	4994,8	0,005918	19,8
	4°Cp	3312,260	179,4	199,5	189,45	0,189	14,21	5491,2	0,006405	23,1
		3783,2	191,1	224,1	207,6	0,208	23,33	5414,2	0,006562	26,4
	5°Cp	4258,06	209,9	231,9	220,9	0,221	15,56	5940,8	0,006877	29,7
		4729	256,3	293,9	275,1	0,275	26,59	6933,7	0,008334	33

		Volume cm ³	Desgaste VBb (µm)	Desgaste VBb (µm) (replica)	Valor Médio do Desgaste (µm)	Valor Médio do Desgaste (mm)	Desvio Padrão do Desgaste	Sinal RMS da Potência	Sinal RMS de Vibração	Tempo [min]
Vc = 1000 m/min	1°Cp	474,86	89,96	108,4	99,18	0,099	13,04	5785,2	0,006393	2,61
		945,80	127,4	135,4	131,4	0,131	5,66	5549,8	0,006782	5,22
	2°Cp	1420,66	106,4	143,5	124,95	0,125	26,23	6006,6	0,006255	7,83
		1891,6	138,2	143,8	141	0,141	3,96	5836,9	0,007551	10,44
	3°Cp	2366,46	143,5	152	147,75	0,148	6,01	6388,3	0,007009	13,05
		2837,4	156,5	172,1	164,3	0,164	11,03	6159,4	0,00775	15,66
	4°Cp	3312,260	160,8	177,2	169	0,169	11,60	6823,5	0,008103	18,27
		3783,2	168,7	180,1	174,4	0,174	8,06	6349,8	0,009114	20,88
	5°Cp	4258,06	188,6	183,1	185,85	0,186	3,89	7183,1	0,008429	23,49
		4729	211,3	200,7	206	0,206	7,50			26,1



**LABORATÓRIO DE PROJETOS MECÂNICOS
 PROF. HENNER A. GOMIDE**

Sample ID: **Material A** Test Date: 1/7/2009
 Method: Tensile_Ret_Sem_Ext.msm Operator: MTS

Specimen Results:

Specimen #	Espessura mm	Largura mm	Area mm ²	Modulus MPa	Load At Offset Yield N	Stress At Offset Yield MPa	Load At Yield N
1	5.40000	25.10000	135.54000	34524.94403	25788.49363	190.26482	****
2	5.25000	25.00000	131.25000	35008.35868	27482.29623	209.38892	32336.94374
3	5.35000	25.00000	133.75000	35973.02823	27043.05579	202.19107	31213.90176
Mean	5.33333	25.03333	133.51333	35168.77698	26771.28188	200.61494	31775.42275
Std. Dev.	0.07638	0.05774	2.15477	737.24995	878.99807	9.65898	794.11060

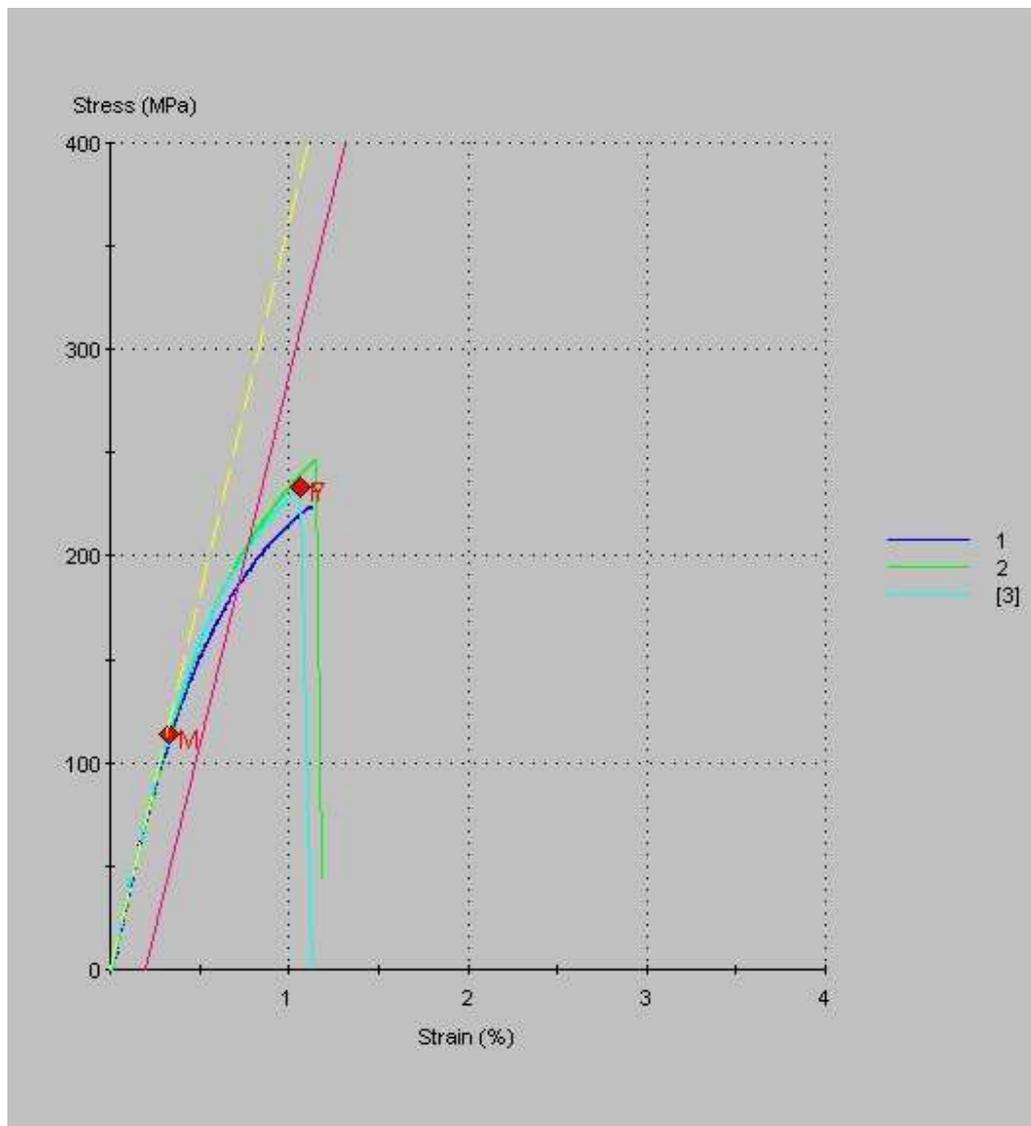
Specimen #	Stress At Yield MPa	Peak Load N	Peak Stress MPa	Break Load N	Break Stress MPa	Strain At Break %	
1	****	30374.05584	224.09662	****	****	****	
2	246.37671	32336.94374	246.37671	32309.39781	246.16684	1.15561	
3	233.37497	31213.90176	233.37497	31213.90176	233.37497	1.06656	
Mean	239.87584	31308.30045	234.61610	31761.64979	239.77090	1.11109	
Std. Dev.	9.19362	984.84291	11.19178	774.63269	9.04522	0.06297	

Calculation Inputs:

Name	Value	Units
Break Marker Drop	10.0	%
Break Marker Elongation	0.00100	mm
Chord Modulus Elongation Point 1	0.25400	mm
Chord Modulus Elongation Point 2	12.70000	mm
Chord Modulus Strain Point 1	0.02000	mm/mm
Chord Modulus Strain Point 2	0.05000	mm/mm
Comprimento Nominal	80.00000	mm
Grip Separation	****	mm
Secant Modulus Elongation Point 1	0.25400	mm
Secant Modulus Strain Point 1	0.05000	mm/mm
Secant Modulus Strain Point 2	0.05000	mm/mm
Slack Pre-Load	0.22500	lbf
Slope Segment Length	50.000	%
Strain Point 01	0.05000	mm/mm
Strain Point 02	0.05000	mm/mm
Strain Point 03	0.05000	mm/mm
Strain Point 04	0.05000	mm/mm
Strain Point 05	0.05000	mm/mm
Strain Point 06	0.05000	mm/mm
Strain Point 07	0.05000	mm/mm
Strain Point 08	0.05000	mm/mm
Yield Angle	0.00000	rad
Yield Offset	0.00200	mm/mm
Yield Segment Length	2.0	%

Test Inputs:

Name	Value	Units
Break Sensitivity	75	%
Break Threshold	100.00000	N
Data Acq. Rate	10.0	Hz
Extension Endpoint	0.50000	mm
Gage Adjustment Pre-Load	0.44500	N
Gage Adjustment Speed	2.54000	mm/min
Load Endpoint	4448.00000	N
Outer Loop Rate	100	Hz
Secondary Speed	15.00000	mm/min
Strain Endpoint	0.10000	mm/mm
Velocidade Inicial	0.60000	mm/min





**LABORATÓRIO DE PROJETOS MECÂNICOS
PROF. HENNER A. GOMIDE**

Sample ID: **Amostra B**

Test Date:

1/7/2009

Method: Tensile_Ret_Sem_Ext.msm Operator:

MTS

Specimen Results:

Specimen #	Espessura mm	Largura mm	Area mm ²	Modulus MPa	Load At Offset Yield N	Stress At Offset Yield MPa	Load At Yield N
1	5.50000	25.25000	138.87500	36513.69328	30066.53336	216.50069	33508.55931
2	5.35000	25.25000	135.08750	37697.44213	28944.30009	214.26335	33992.78553
3	5.00000	25.25000	126.25000	37443.27561	28136.36821	222.86232	31759.63319
Mean	5.28333	25.25000	133.40417	37218.13701	29049.06722	217.87545	33086.99268
Std. Dev.	0.25658	0.00000	6.47865	623.16200	969.33817	4.46129	1174.74727

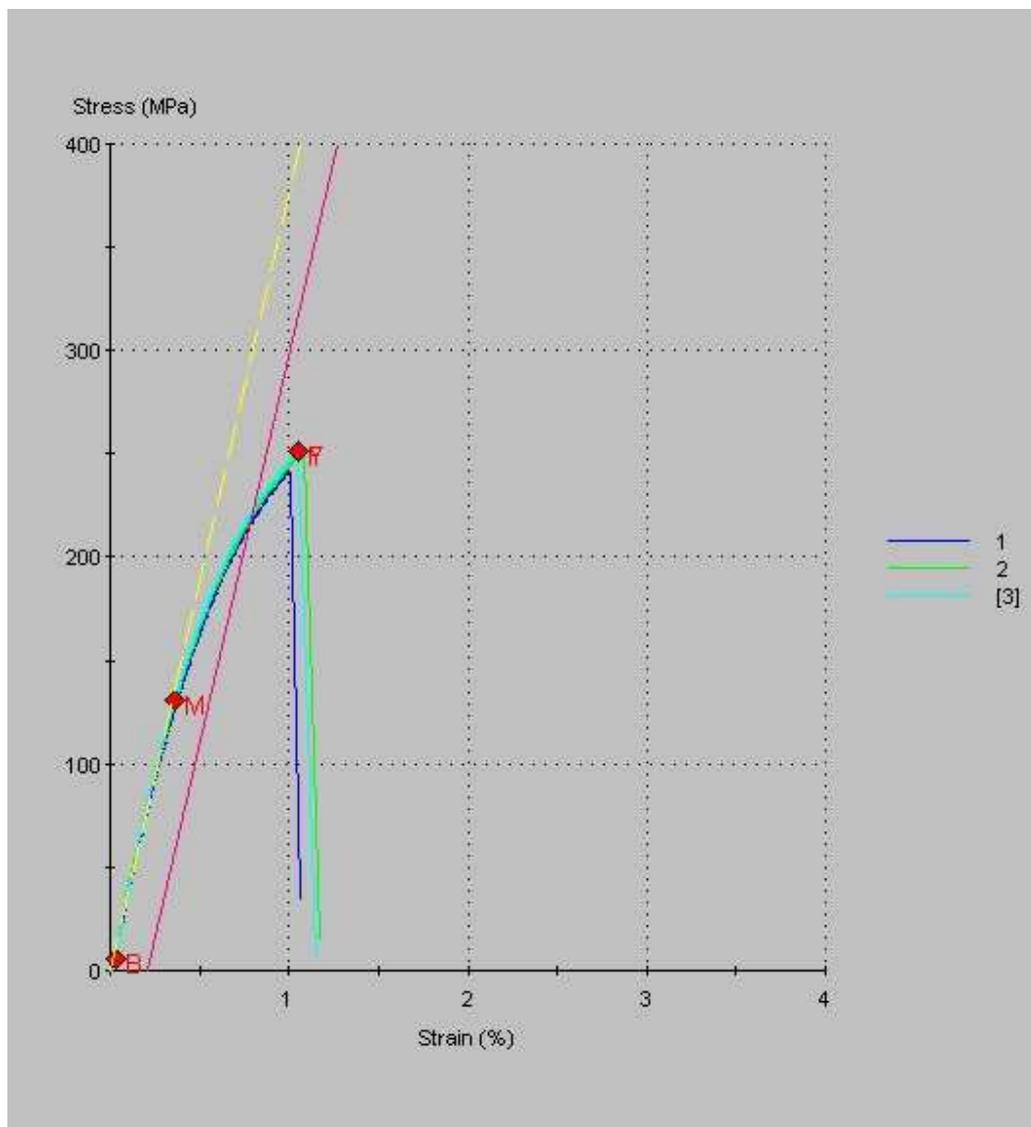
Specimen #	Stress At Yield MPa	Peak Load N	Peak Stress MPa	Break Load N	Break Stress MPa	Strain At Break %	
1	241.28576	33508.55931	241.28576	33499.99188	241.22406	1.00930	
2	251.63531	33992.78553	251.63531	33934.33292	251.20261	1.08443	
3	251.56145	31759.63319	251.56145	31759.63319	251.56145	1.05605	
Mean	248.16084	33086.99268	248.16084	33064.65267	247.99604	1.04993	
Std. Dev.	5.95411	1174.74727	5.95411	1150.85616	5.86745	0.03794	

Calculation Inputs:

Name	Value	Units
Break Marker Drop	10.0	%
Break Marker Elongation	0.00100	mm
Chord Modulus Elongation Point 1	0.25400	mm
Chord Modulus Elongation Point 2	12.70000	mm
Chord Modulus Strain Point 1	0.02000	mm/mm
Chord Modulus Strain Point 2	0.05000	mm/mm
Comprimento Nominal	80.00000	mm
Grip Separation	****	mm
Secant Modulus Elongation Point 1	0.25400	mm
Secant Modulus Strain Point 1	0.05000	mm/mm
Secant Modulus Strain Point 2	0.05000	mm/mm
Slack Pre-Load	0.22500	lbf
Slope Segment Length	50.000	%
Strain Point 01	0.05000	mm/mm
Strain Point 02	0.05000	mm/mm
Strain Point 03	0.05000	mm/mm
Strain Point 04	0.05000	mm/mm
Strain Point 05	0.05000	mm/mm
Strain Point 06	0.05000	mm/mm
Strain Point 07	0.05000	mm/mm
Strain Point 08	0.05000	mm/mm
Yield Angle	0.00000	rad
Yield Offset	0.00200	mm/mm
Yield Segment Length	2.0	%

Test Inputs:

Name	Value	Units
Break Sensitivity	75	%
Break Threshold	100.00000	N
Data Acq. Rate	10.0	Hz
Extension Endpoint	0.50000	mm
Gage Adjustment Pre-Load	0.44500	N
Gage Adjustment Speed	2.54000	mm/min
Load Endpoint	4448.00000	N
Outer Loop Rate	100	Hz
Secondary Speed	15.00000	mm/min
Strain Endpoint	0.10000	mm/mm
Velocidade Inicial	0.60000	mm/min





**LABORATÓRIO DE PROJETOS MECÂNICOS
PROF. HENNER A. GOMIDE**

Sample ID: **Material C**

Test Date:

11/26/2008

Method: Tensile_Ret_Sem_Ext.msm

Operator:

MTS

Specimen Results:

Specimen #	Espessura mm	Largura mm	Area mm ²	Modulus MPa	Load At Offset Yield N	Stress At Offset Yield MPa	Load At Yield N
1	5.00000	25.00000	125.00000	49858.13141	33624.09504	268.99276	42482.96246
2	5.20000	25.00000	130.00000	44588.62380	35082.06849	269.86207	46601.40107
3	5.10000	25.00000	127.50000	45369.30891	34953.56946	274.14564	46271.84519
Mean	5.10000	25.00000	127.50000	46605.35471	34553.24433	271.00016	45118.73624
Std. Dev.	0.10000	0.00000	2.50000	2843.90304	807.22785	2.75853	2288.58676

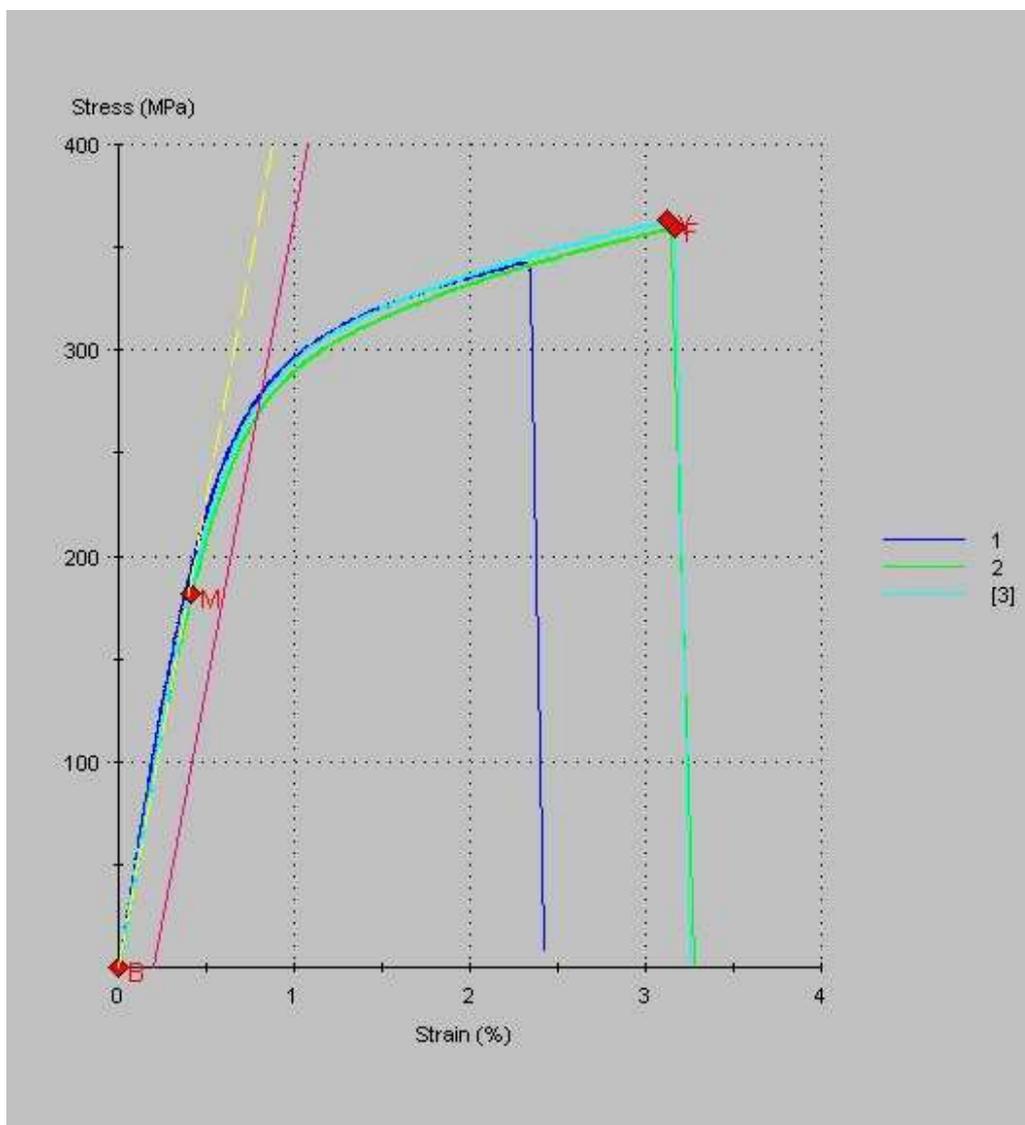
Specimen #	Stress At Yield MPa	Peak Load N	Peak Stress MPa	Break Load N	Break Stress MPa	Strain At Break %	
1	339.86370	42849.47093	342.79577	42234.19843	337.87359	2.35122	
2	358.47232	46601.40107	358.47232	46255.04736	355.80806	3.14038	
3	362.91643	46271.84519	362.91643	45844.36298	359.56363	3.16977	
Mean	353.75082	45240.90573	354.72817	44777.86959	351.08176	2.88712	
Std. Dev.	12.23015	2077.58804	10.56997	2212.43365	11.59172	0.46434	

Calculation Inputs:

Name	Value	Units
Break Marker Drop	10.0	%
Break Marker Elongation	0.00100	mm
Chord Modulus Elongation Point 1	0.25400	mm
Chord Modulus Elongation Point 2	12.70000	mm
Chord Modulus Strain Point 1	0.02000	mm/mm
Chord Modulus Strain Point 2	0.05000	mm/mm
Comprimento Nominal	80.00000	mm
Grip Separation	****	mm
Secant Modulus Elongation Point 1	0.25400	mm
Secant Modulus Strain Point 1	0.05000	mm/mm
Secant Modulus Strain Point 2	0.05000	mm/mm
Slack Pre-Load	0.22500	lbf
Slope Segment Length	50.000	%
Strain Point 01	0.05000	mm/mm
Strain Point 02	0.05000	mm/mm
Strain Point 03	0.05000	mm/mm
Strain Point 04	0.05000	mm/mm
Strain Point 05	0.05000	mm/mm
Strain Point 06	0.05000	mm/mm
Strain Point 07	0.05000	mm/mm
Strain Point 08	0.05000	mm/mm
Yield Angle	0.00000	rad
Yield Offset	0.00200	mm/mm
Yield Segment Length	2.0	%

Test Inputs:

Name	Value	Units
Break Sensitivity	75	%
Break Threshold	100.00000	N
Data Acq. Rate	10.0	Hz
Extension Endpoint	0.50000	mm
Gage Adjustment Pre-Load	0.44500	N
Gage Adjustment Speed	2.54000	mm/min
Load Endpoint	4448.00000	N
Outer Loop Rate	100	Hz
Secondary Speed	15.00000	mm/min
Strain Endpoint	0.10000	mm/mm
Velocidade Inicial	0.30000	mm/min



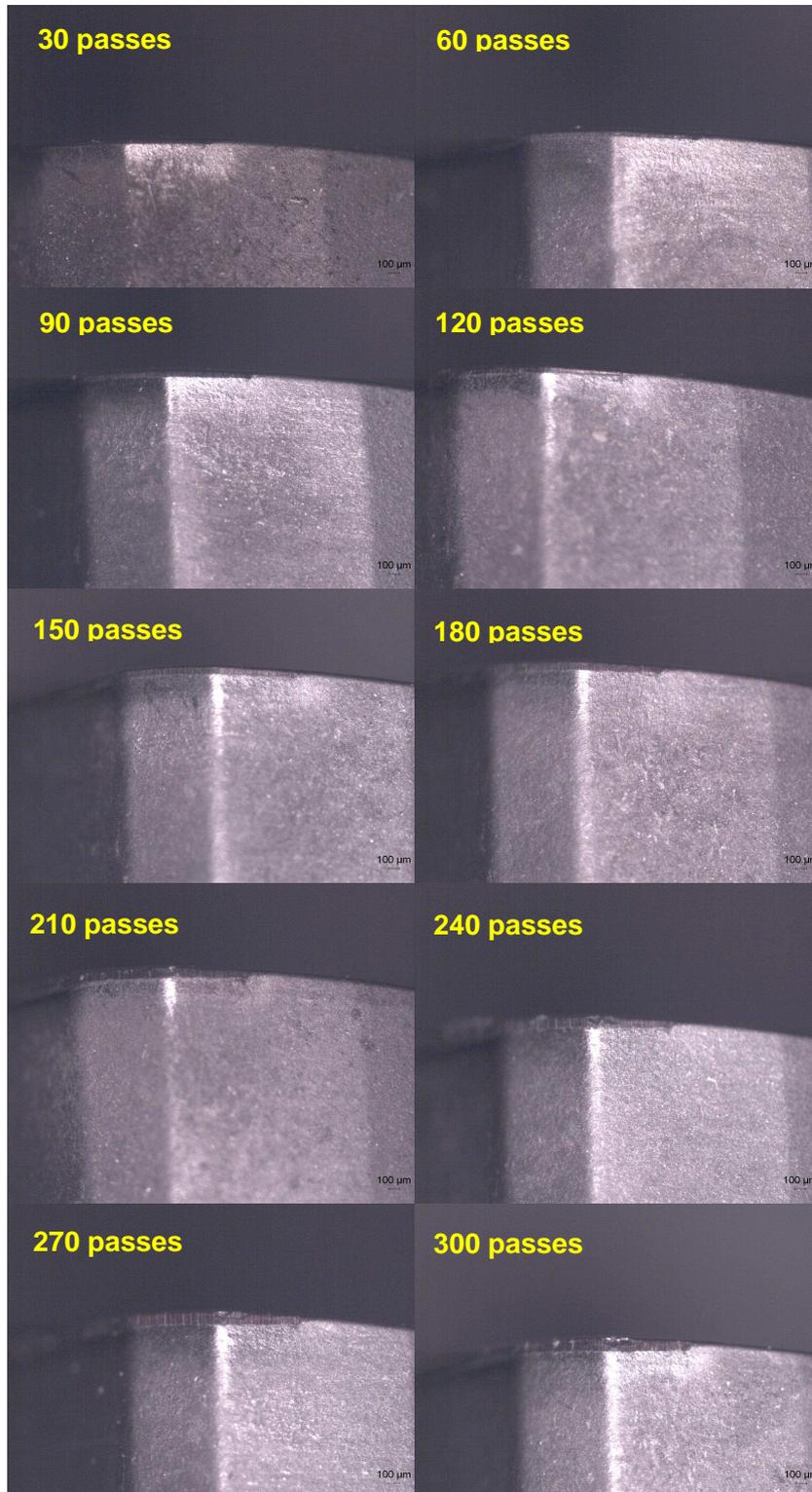


Figura 8.1 – Fotos para medição do desgaste no material A, $V_c = 600$ m/min.

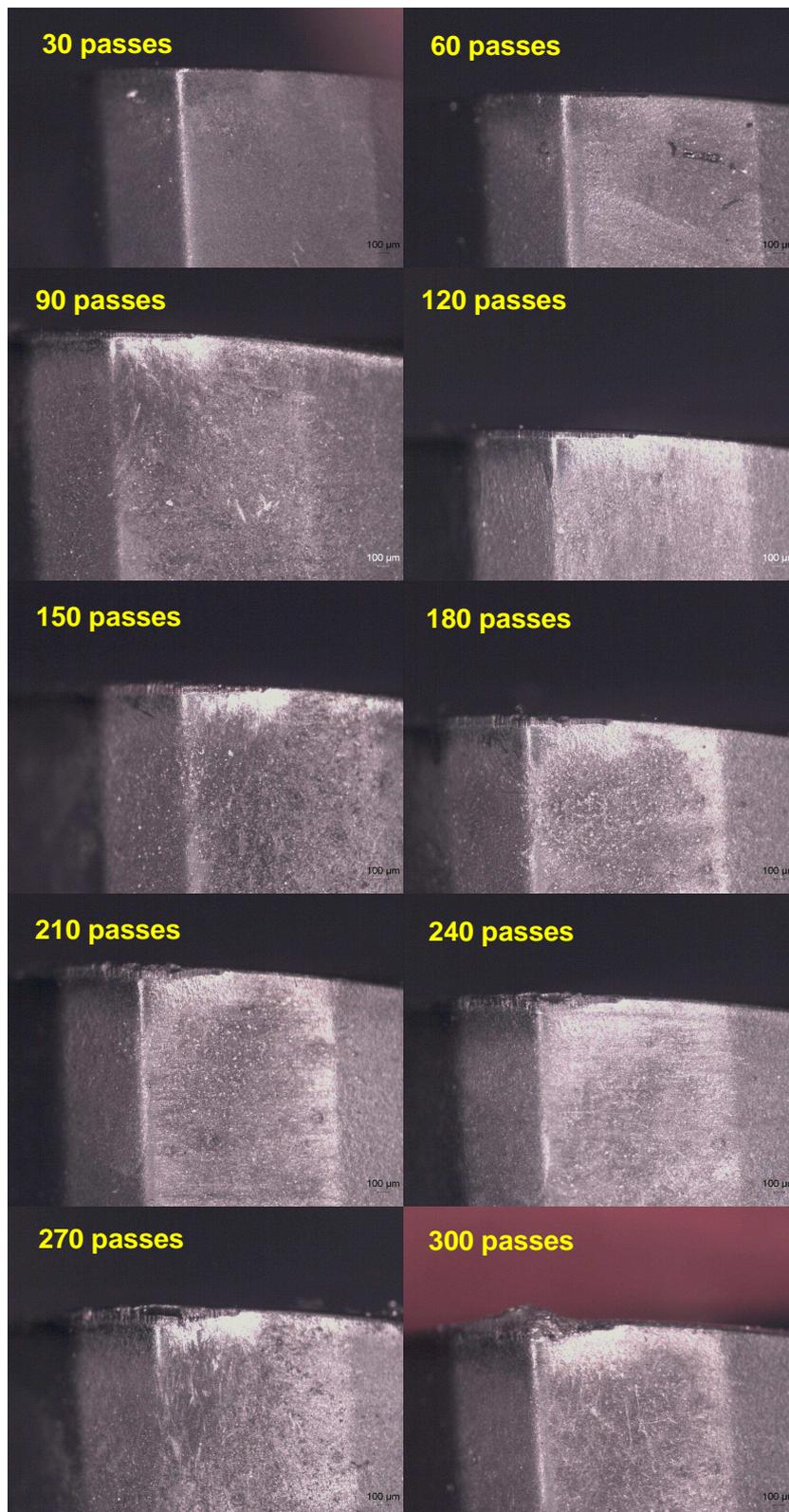


Figura 8.2 – Fotos para medição do desgaste no material A, $V_c = 800$ m/min.

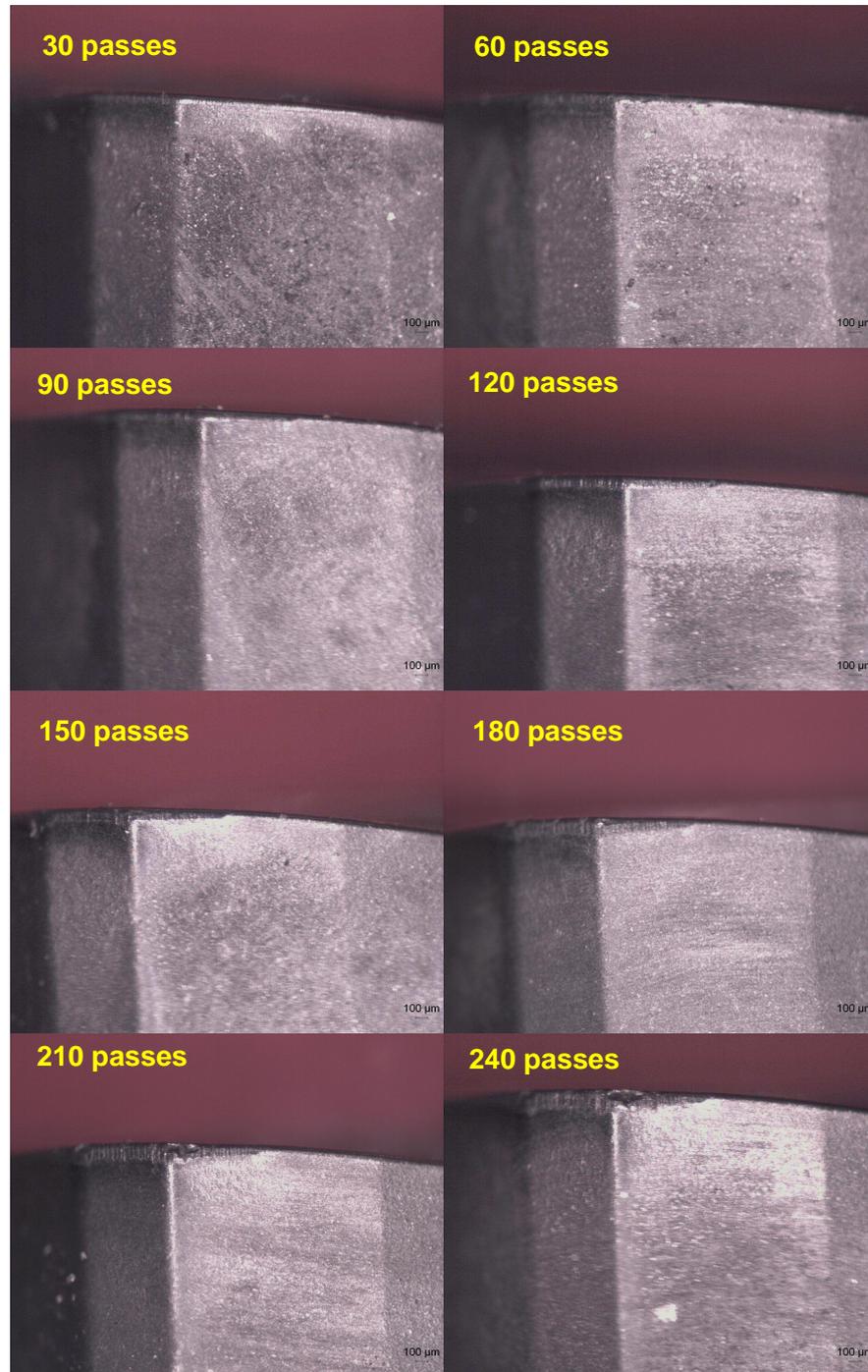


Figura 8.3 – Fotos para medição do desgaste no material A, $V_c = 1000$ m/mi.

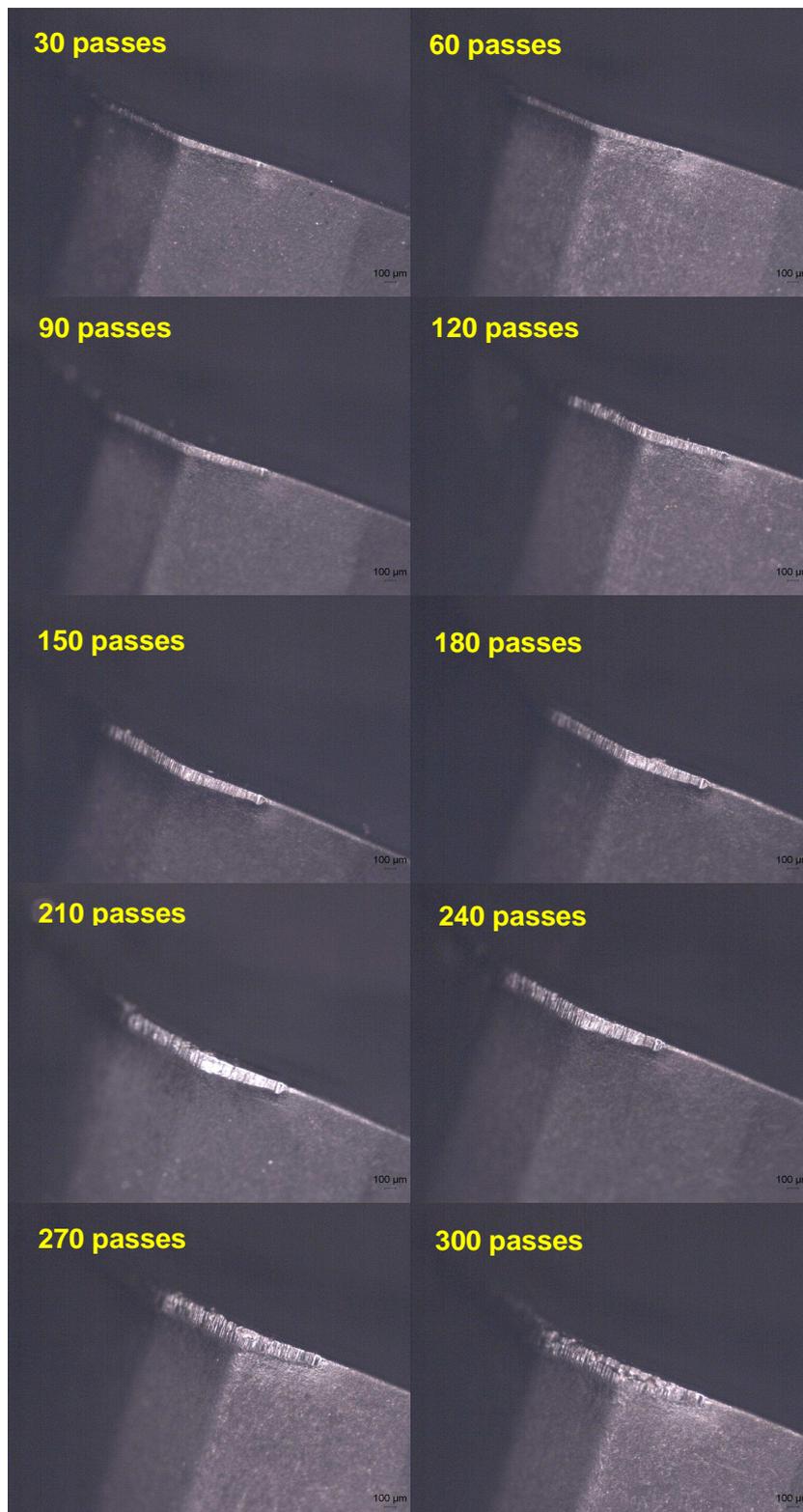


Figura 8.4 – Fotos para medição do desgaste no material B, $V_c = 600$ m/min.

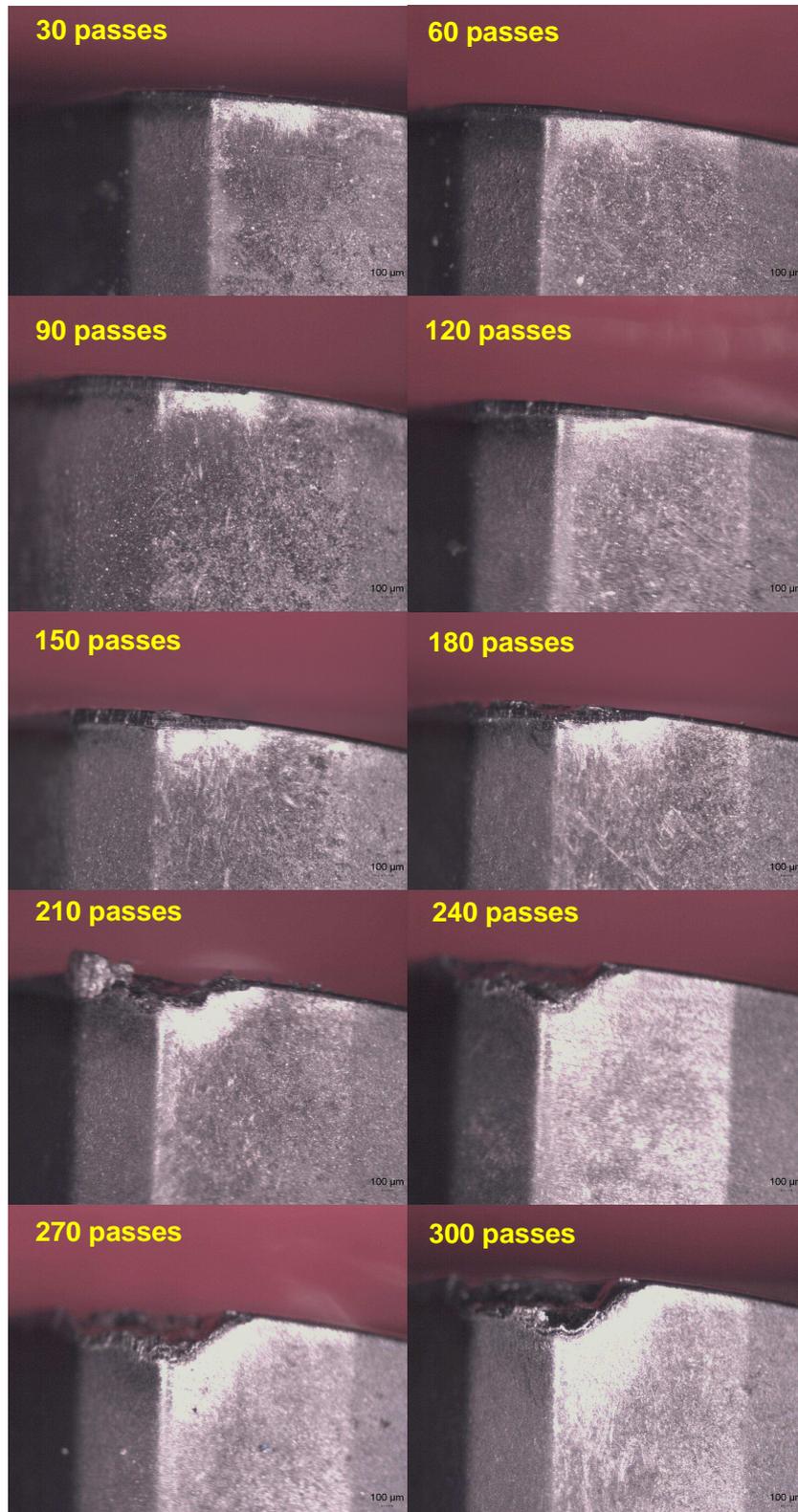


Figura 8.5 – Fotos para medição do desgaste no material B, $V_c = 800$ m/min.

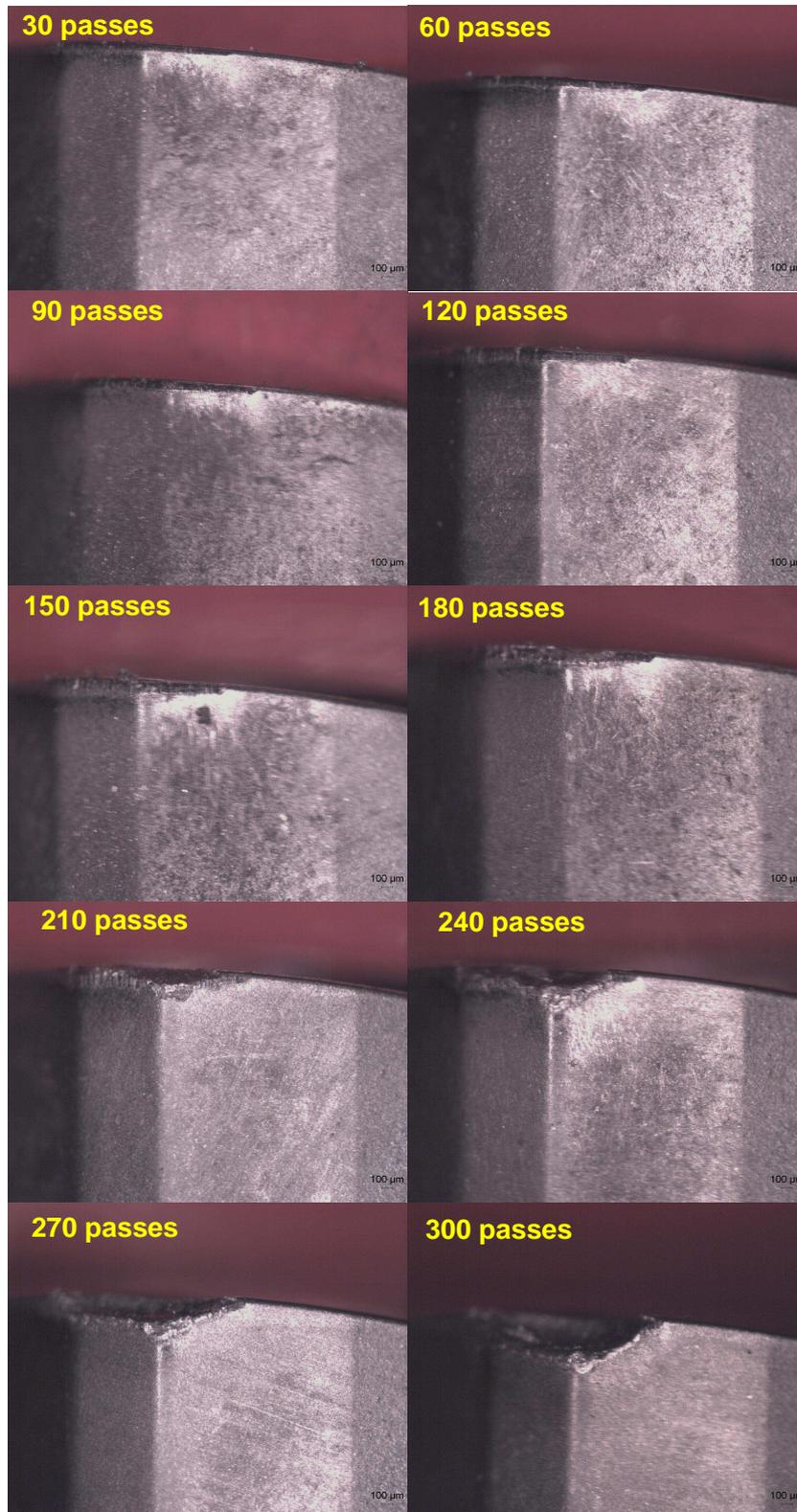


Figura 8.6 – Fotos para medição do desgaste no material B, $V_c = 1000$ m/min.

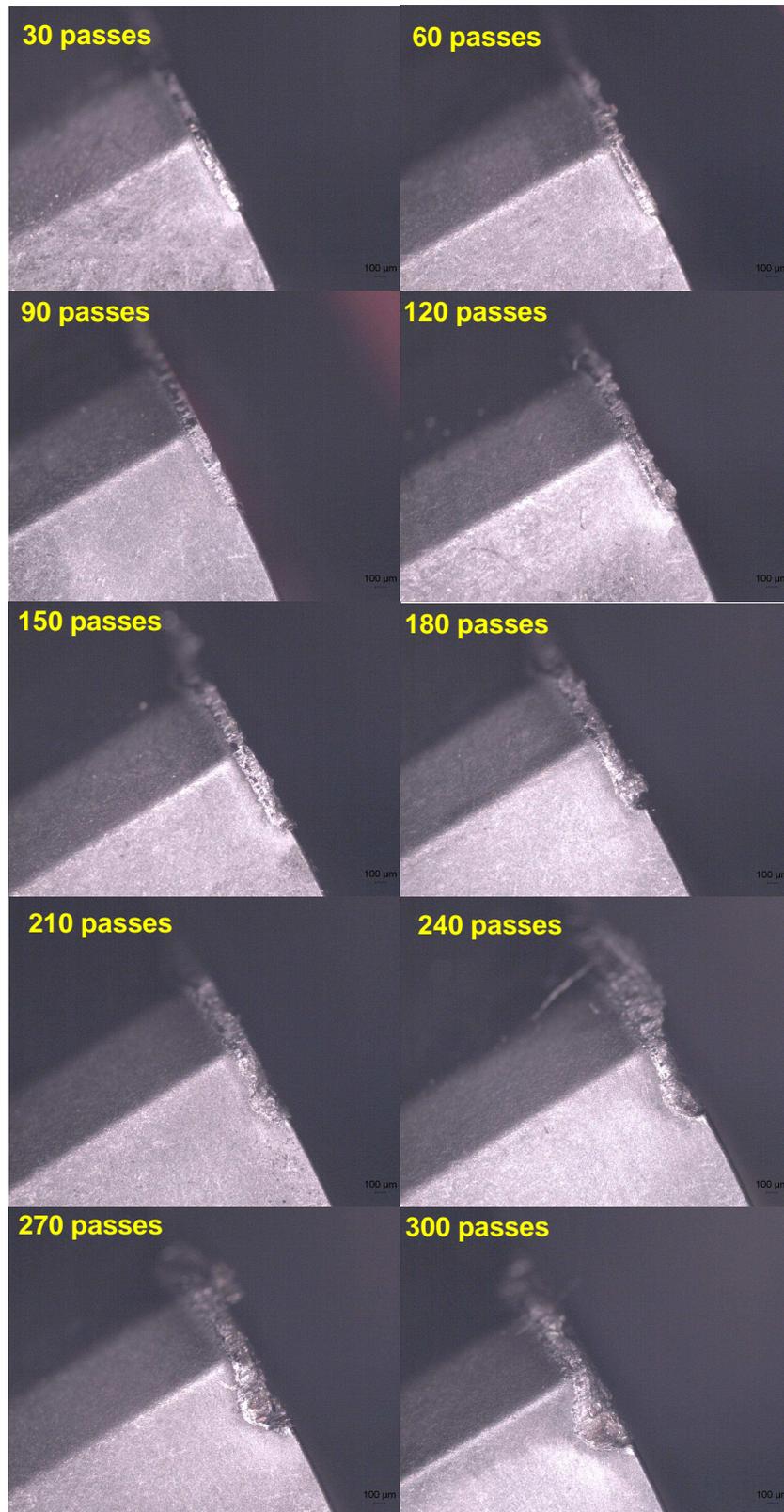


Figura 8.7 – Fotos para medição do desgaste no material C, $V_c = 600$ m/min.

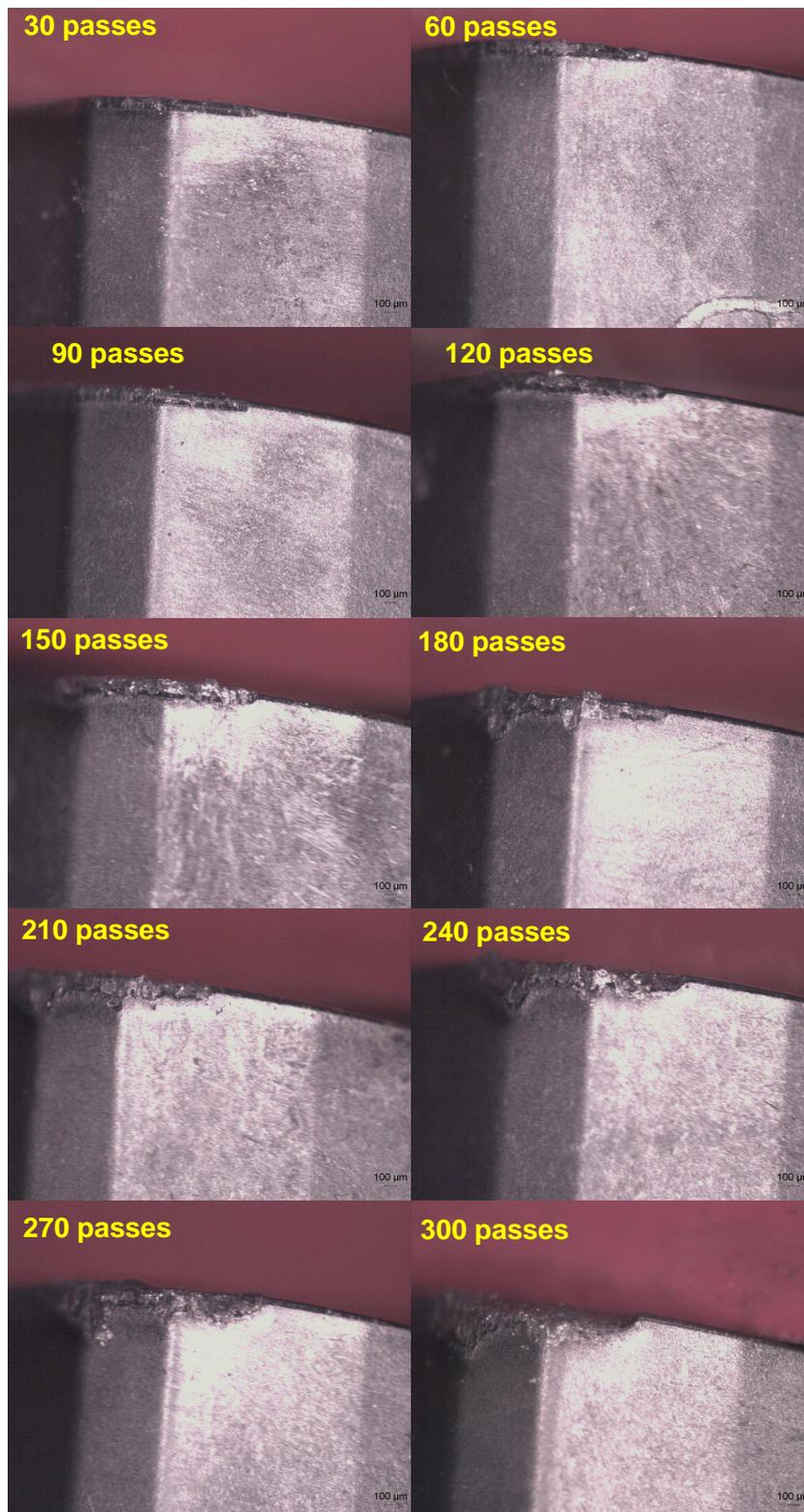


Figura 8.8 – Fotos para medição do desgaste no material C, $V_c = 800$ m/min.

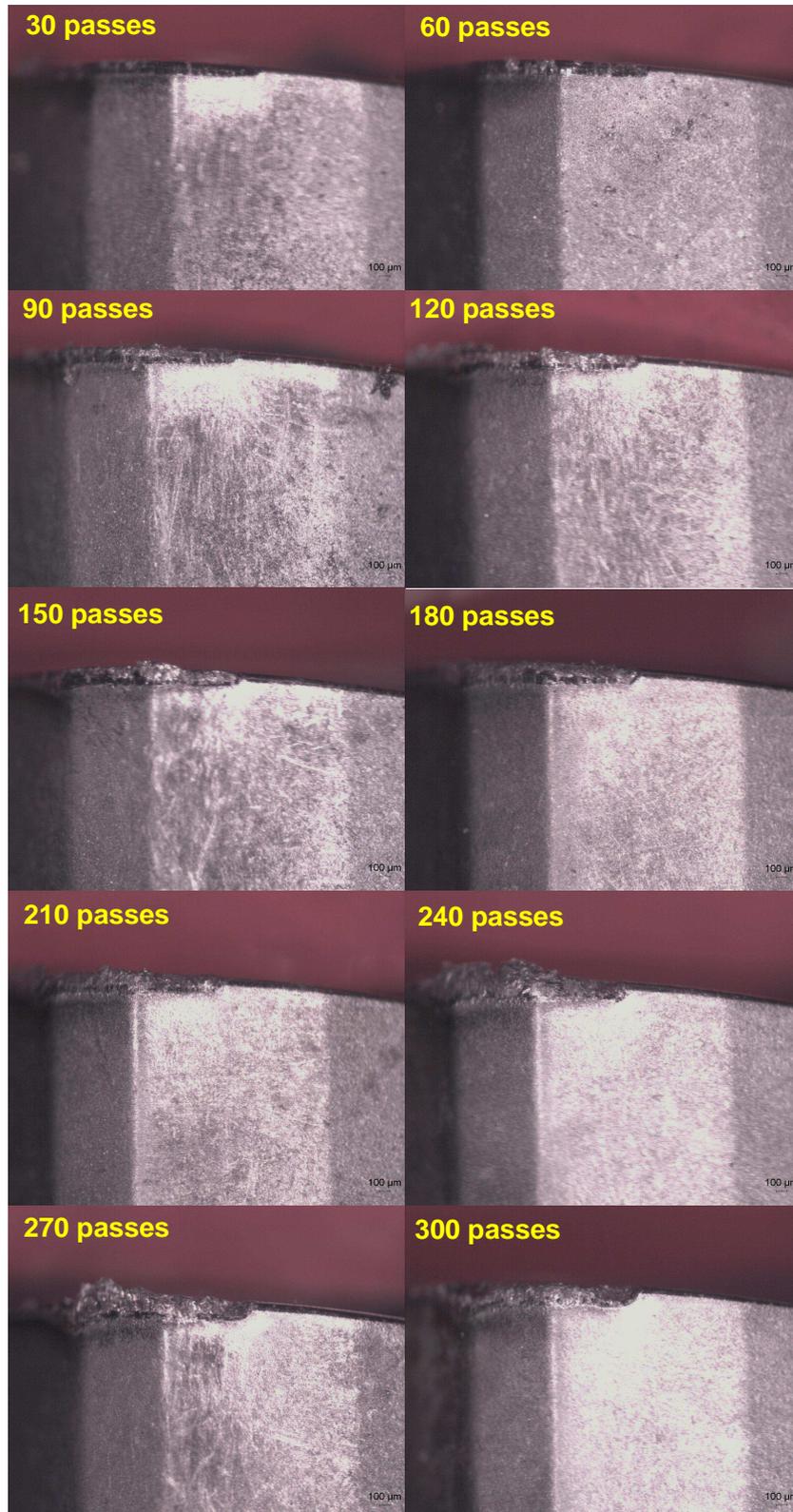


Figura 8.9 – Fotos para medição do desgaste no material C, $V_c = 1000$ m/min.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)