

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Alberto Simas da Costa

..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 11 / 12 / 2009

Amauri Hassui
.....
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Uma Contribuição ao Estudo do Fresamento
Frontal em Blocos de Motores
de Ferro Fundido Cinzento**

Autor: Alberto Simas da Costa

Orientador: Amauri Hassui

06 / 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Uma Contribuição ao Estudo do Fresamento Frontal em Blocos de Motores de Ferro Fundido Cinzento

Dissertação de Mestrado Profissional

Autor: Alberto Simas da Costa

Orientador: Amauri Hassui

Curso: Mestrado Profissional em Engenharia Automobilística

Área de Concentração: Materiais

Dissertação de mestrado profissional apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Automobilística.

Campinas, 2009

S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

C823c Costa, Alberto Simas da
Uma contribuição ao estudo do fresamento frontal em
Blocos de Motores de Ferro Fundido Cinzento / Alberto
Simas da Costa. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Amauri Hassui.
Dissertação de Mestrado (Profissional) - Universidade
Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia
Mecânica, Faculdade de Engenharia Elétrica e
Computação e Instituto de Química.

1. Força (Mecânica). 2. Usinagem. 3. Ferro fundido .
I. Hassui, Amauri. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica,
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação e
Instituto de Química. III. Título.

Título em Inglês: A contribution to the study of front milling on a gray cast iron
crankcase

Palavras-chave em Inglês: Power (Mechanics), Machining, Cast Iron

Área de concentração: Materiais

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Olívio Novaski, Alessandro Roger Rodrigues

Data da defesa: 11/12 /2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL

Uma Contribuição ao Estudo do Fresamento Frontal em Blocos de Motores de Ferro Fundido Cinzento

Autor: Alberto Simas da Costa

Orientador: Amauri Hassui

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Amauri Hassui, Presidente
UNICAMP



Prof. Dr. Olivio Novaski
UNICAMP



Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues
UNESP / FEIS

Campinas, 11 de dezembro de 2009.

Dedicatória

Dedico este trabalho,

À Susana, minha esposa, pela paciência nas horas a fio em que fiquei colado nos livros ou na frente do computador. E além desta paciência, quero agradecê-la principalmente pelo compartilhamento do entusiasmo, pela motivação e pelo constante apoio que sempre me dá.

À Bianca, minha filha, a quem dedico o meu esforço. Você acrescenta e muito em minha vida, deixando-a repleta de força, alegria e inspiração.

E aos meus pais, que com certeza estariam muito orgulhosos de mim neste dia.

Agradecimentos

Aos meus pais pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

Em especial à minha querida esposa e filha que estiveram sempre presentes no apoio e no incentivo para superar este grande desafio, mesmo distante. E a minha força de vontade, ao retornar ao meio universitário.

Ao meu orientador, Amauri Hassui, que além de participativo, me encaminhou para as melhores alternativas no desenvolvimento deste trabalho.

Em especial a minha revisora Inês Joeques, com a sua ajuda para elaborar um trabalho nestes moldes.

Aos professores e colegas de curso que reforçaram os ensinamentos de camaradagem, união e respeito.

Aos colegas de departamento da MWM International os quais serei eternamente grato, pois sem a ajuda deles não poderia concluir este trabalho junto com minhas atividades na empresa.

Ao grupo de colegas, que para mim foram uma família universitária, que formamos ao longo de inúmeras viagens.

E a todos os colegas que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Este trabalho contou com a ajuda de um elenco de 40 pessoas que cooperaram de forma direta e indiretamente, trabalhando em diversos departamentos da MWM International, ao longo desta jornada e no desenvolvimento deste trabalho, aos quais serei eternamente grato, pois contribuíram de uma forma ou de outra dando condições de desenvolver e concluir este trabalho, às quais presto minha homenagem.

Informática: Gaspar Scholl do Amaral;

RH: Sinara Varich Tessaro, Aline Cristiane Vieira e Graziane de Carvalho Klein;

Usinagem: Valmir Silveira, Daniel de Moraes, Mario André de Azevedo, Davenilcio Luiz de Souza, Rafael Tavares Serafim, Carlos Antonio Mayer Machado;

Operadores de Máquina: Rafael Leoti, Ivan Inácio da Silva, Joel Batista Santos Barbosa e Daniel Couto;

Afiação: Sérgio Luis de Moura, Adenir Farias, Luis Alberto Marcírio e Luis Eduardo Rosa;

Laboratório: Carlos Targa, Rosane Marchiori e Clério Padilha da Silva;

Metrologia: Luiz Alberto Costa e Jânio Lautenschlager;

Manufatura: Renan Zancanaro;

Manutenção: César Augusto Jung; Peterson Nivaldo Borges; Rodrigo Lima Barbosa, Lucas Antônio da Silva, Dejalmo Souza da Silva, Orlando Couto, Carlo Alberto da Rocha, Jorge Gonçalves e Carlos Eduardo de Lima Alves;

Segurança: Renata Rodrigues e Carine Vani;

Expedição: Cristiano Guedes Pereira;

Engenharia: Omar Hildinger, João Mattos e Regis Costa;

Participação especial de: Deywid Silveira Kruguer da TUPY.

*Para realizar grandes conquistas,
devemos não apenas agir, mas
também sonhar; não apenas
planejar, mas também acreditar.*

Resumo

COSTA, Alberto Simas da. Uma contribuição ao estudo do fresamento frontal em blocos de *motores de ferro fundido cinzento*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 136p., Dissertação (Mestrado).

O mercado busca produtos com uma boa relação custo benefício que é percebido pelo consumidor, frente às suas necessidades. As estratégias de marketing têm como uma de suas funções estimular e mesmo criar essa percepção. Portanto, é fundamental que as empresas reduzam seus custos de fabricação, dentre eles o de usinagem. No presente trabalho, foi feito um estudo do processo de fresamento frontal com o objetivo de monitorar a potência de corte e de avanço de uma máquina para indicar o momento ideal para troca de ferramenta. A operação em análise foi realizada no desbaste das faces do carter e do cabeçote de blocos de motores automotivos em ferro fundido cinzento em superfícies que apresentam características severas de corte pela sua descontinuidade. No seguimento dos testes, a avaliação do sobremetal presente, também foi objeto de estudo e indicou a possibilidade de se reduzir o mesmo. A metodologia empregada na aquisição do sinal de potência mostrou-se como um bom indicador do fim de vida da ferramenta, mesmo com as baixas taxas de amostragem possíveis e grandes interrupção do corte. O sinal também foi capaz de detectar variações nas condições de corte e permitiu também visualizar-se o rendimento do motor da máquina nessas diferentes condições. Caso seja necessário ou interessante diminuir-se o consumo de potência, isso pode ser feito de forma mais embasada. Por fim, foi feito um estudo dos mecanismos e tipos de desgaste presentes nas ferramentas. Nessa operação pode ser visualizada a presença de trincas térmicas bem como pontos de adesão na ferramenta.

Palavras-chaves: Potência de corte, fresamento, ferro fundido cinzento.

Abstract

COSTA, Alberto Simas da. A contribution to the study of front milling on gray cast iron *crankcase*. Campinas: College of Mechanical Engineering, State University of Campinas, 2009, 136 p., Dissertation (Máster of Science).

The market is looking for products with a cost benefit which is perceived by consumers, compared to their needs. Marketing strategies have as one of its functions to stimulate and even create that perception. Therefore, it is essential that companies reduce their manufacturing costs, among them the machining. In this work, it was done a study of the face milling process in order to monitor the cutting power and progress from one machine to indicate the ideal time for tool change. The operation in question was held in the thinning of the faces of the crankcase and the head of automotive engine blocks, cast iron gray areas which show characteristics of hard-face cut by its discontinuity. Following the tests, the evaluation of an allowance this has also been studied and indicated the possibility of reducing the same. The methodology used in the signal acquisition power proved to be a good indicator of the end of tool life, even with low sampling rates and large possible interruption of the cut. The signal was also able to detect variations in cutting conditions and also allowed to view the engine performance of the machine in these different conditions. If it is interesting or necessary to decrease the power consumption, this can be done in more scientific based way. Finally, a study was made of the mechanisms and types of wear on these tools. In these operations it was visualized the presence of thermal cracks and adhesion points were identified on cutting tools.

Keywords: Power (Mechanics), Machining, Cast iron.

SUMÁRIO

Ficha catalográfica	Erro! Indicador não definido.
Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Resumo	viii
Abstract	ix
SUMÁRIO	x
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xvii
Glossário	xxi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	3
1.2 Estrutura do trabalho	4
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1. FERRO FUNDIDO	5
2.1.1. Obtenção	5
2.1.2. Generalidades	6
2.1.3. Ferro fundido cinzento	13
2.1.4. Elementos de liga na usinabilidade do ferro fundido:	15
2.1.5. Aspectos da grafita:	17
2.2. O FRESAMENTO	18
2.2.1. Classificações:	19
2.2.2. Parâmetros de corte:	24
2.2.3. O inserto de metal duro	25

2.2.4. Potência de corte necessária no processo de fresamento	29
2.2.5. Energia utilizada na usinagem	31
3. Procedimento Experimental	34
3.1.1. Bloco do Motor	34
3.1.2. Máquina-ferramenta	37
3.1.3. Equipamentos de Medição e Leitura	39
3.1.4. Ferramentas de corte	42
3.1.5. Simetria das fresas em relação à peça	43
3.1.6. Ensaios com variações de sobremetal	45
3.1.7. Ensaios com variação na velocidade de corte das fresas	48
3.1.8. Ensaios com variação na velocidade de avanço da mesa	51
4. Resultados e Discussão:	53
4.1. Avaliação da energia consumida com variação na penetração de trabalho “ a_p ”	53
4.2. Avaliação da qualidade da superfície usinada por rugosidade	62
4.3. Avaliação visual das superfícies usinadas com diferentes profundidades	74
4.4. Avaliação da energia consumida com variações de velocidades	78
4.4.1. Avaliação da energia consumida com variação de velocidade de corte	78
4.4.2. Avaliação da energia consumida com variação de velocidade de avanço	86
5. Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos	94
6. Referências	96
7. APÊNDICE:	102
7.1 Relação de Parâmetros, e Velocidades X Corrente do motor a vazio	102
7.2 Relação de Potência e sobremetal removido em diversos níveis	103
7.3 Rugosidades em diversos níveis antes da posição final de desbaste	107
7.4 Tabelas de energia com variação apenas na rotação das fresas	119
7.4.1 Medição com as fresas com insertos no início de vida	119
7.4.2 Medição com as fresas com insertos no final de vida	123
7.5 Tabelas de energia com variação apenas no avanço da mesa	128
7.5.1 Medição com as fresas com insertos no início de vida	128
7.5.2 Medição com as fresas com insertos no final de vida	131

Lista de Figuras

Figura 2.1: Diagrama de equilíbrio das ligas ferro-carbono, [MSPC, 2009].	6
Figura 2.2: Relação carbono-silício para diferentes tipos de ferro fundido e aço, onde as retas (a) representa a igualdade do C_e com coeficiente em 1/3 e (b) igualdade similar em 1/6.	9
Figura 2.3: Posição dos átomos de carbono na estrutura CFC à esquerda e CCC à direita da célula cúbica unitária do átomo de ferro, [Zoqui, 2007].	11
Figura 2.4: Microestrutura do ferro fundido vermicular, [Guesser et al, 2004].	12
Figura 2.5: Microestrutura do ferro fundido cinzento, [Colpaert, 1974].	15
Figura 2.6: Tipo de grafitas: A, tamanho 4 - veios curvos e bifurcados sem orientação;	18
Figura 2.7: Fresamento concordante e a espessura do cavaco que diminui do início ao fim do corte, [CIMM, 2009].	19
Figura 2.8: Fresamento discordante e a espessura do cavaco que aumenta do início.	20
Figura 2.9: Fresamento Frontal com a_e igual ao diâmetro da fresa discordante enquanto a espessura do cavaco aumenta e concordante enquanto a espessura do cavaco diminui a partir do centro, [CIMM, 2009].	21
Figura 2.10: Posicionamento da pastilha no momento do choque do dente da fresa com a peça em B($a_e > D/2$) e em A($a_e < D/2$), [Sandivik, 1994].	21
Figura 2.11: Direção e Módulo das forças radiais na condição assimétrica com a superfície fresada, defasada, da distância “j” em relação ao Diâmetro da fresa.	22
Figura 2.12: Geometria das fresas frontais de facear a)duplo-negativa; b)duplo-positiva; c)positiva-negativa, [Sandivik, 1994].	23
Figura 2.13: Fratura por Fadiga, Quebra e Microlascamento,	26
Figura 2.14: Desgaste por fadiga ou trinca térmica, [Eduardo et al, 2008].	26
Figura 2.15: Desgaste por craterização, [(Sandvik, 2002) apud (Ferrer, 2006)].	27
Figura 2.16: Desgaste por aresta postiça, [Ferrer, 2006].	27

Figura 2.17: Desgaste por deformação plástica, [(Sandvik, 2002) apud (Ferrer, 2006)].	27
Figura 2.18: Desgaste de Flanco e Entalhe, [(Sandvik, 2002) apud (Ferrer, 2006)].	28
Figura 2.19: (A) Desgaste de Cratera (na superfície de saída da ferramenta); (B) de Flanco principal e secundário; (C) e (D) de Entalhe, [Eduardo et al, 2008].	28
Figura 2.20: (A) Zona de cisalhamento primário; (B) Zona de aderência; (C) Zona de escorregamento e (D) Superfície de folga da ferramenta.	30
Figura 2.21: Variação da distribuição da Energia de Corte com a Velocidade, [Coppini, 2006].	31
Figura 2.22: Esquema do conjunto: Sensor / Captor do sistema vibro-acústico composto por 2 acelerômetros e 1 captor acústico aplicado em um corpo de prova, [Maia, 2009].	32
Figura 2.23: Forças de usinagem (N) em função do tempo (s). Pastilha da classe 4040 ($v_c = 370$ m.min ⁻¹ e $f_z = 0,25$ mm/aresta) e uma vista do dinamômetro Kistler, [Ribeiro, 2006].	33
Figura 3.1: Bloco de motor.	34
Figura 3.2: Fresadora Duplex em três vistas: o conjunto de duas fresas; o conjunto do dispositivo com a mesa e o cilindro de ajuste para batente de posicionamento intermediário.	37
Figura 3.3: Dispositivo de fixação da máquina com o bloco de motor fixado e a vista da face do cabeçote.	38
Figura 3.4: Inversores de frequência WEG - CFW09 e CLP Twido TWDLMDA20D-K mais duas placas de entradas analógicas TWDAMM3HT	40
Figura 3.5: Inserto classe KC915M - TNHF 1204 AN3N	43
Figura 3.6: Visualização da posição das fresas à esquerda cabeçote e à direita o carter.	43
Figura 3.7: Esquema da peça mostra a simetria da fresa em relação à face do cabeçote.	44
Figura 3.8: Esquema da peça mostra a simetria da fresa em relação à face do carter.	44
Figura 3.9: Sobremetal: carter à esquerda e cabeçote à direita.	46
Figura 3.10: Esquemática das cotas e espessuras envolvidas na remoção de sobremetal tanto na face do carter como na face do cabeçote.	48
Figura 3.11: Visualização das saliências obtidas após remoções parciais de sobremetal resultando em degraus distintos entre as faces bruta, intermediária e final.	48
Figura 3.12: Relação de corrente (A) em vazio do carter em função da velocidade.	50
Figura 3.13: Relação de corrente (A) em vazio do cabeçote em função da velocidade.	50

Figura 4.1: Perfil das faces do cabeçote (acima) e carter (abaixo) com início de usinagem à direita conforme deslocamento da peça na direção das fresas.	53
Figura 4.2: Face do carter – % da Potência máxima de aproximação para remoção do sobremetal variando a_p entre 2,5mm e 0,5mm.	54
Figura 4.3: Face do cabeçote – % da Potência máxima de aproximação para remoção do sobremetal variando a_p entre 2,5mm e 0,5mm.	55
Figura 4.4: Face do carter + cabeçote: % da Potência máxima de aproximação para remoção do sobremetal variando a_p entre 2,5mm e 0,5mm.	56
Figura 4.5: Potência média na remoção de sobremetal entre a face bruta e intermediária para o volume removido com “ a_p ” variando desde 0,5mm até 2,5mm (carter + cabeçote).	58
Figura 4.6: Potência média na remoção de sobremetal entre a face intermediária e final para o volume removido com “ a_p ” variando desde 0,5mm até 2,5mm (carter + cabeçote).	58
Figura 4.7: Potência média na remoção de sobremetal entre a face bruta e final para o volume removido (carter + cabeçote).	59
Figura 4.8: Relação entre a Potência e o volume removido na região superficial desde a posição bruta até a intermediária com “ a_p ” entre 0,5 a 2,5mm (carter + cabeçote).	60
Figura 4.9: Relação entre a Potência e o volume removido na região interna desde a posição intermediária até a final com “ a_p ” entre 0,5 a 2,5mm (carter + cabeçote).	61
Figura 4.10: Relação entre a Potência e o volume de sobremetal removido desde a posição bruta até a posição final com crescentes volumes (carter + cabeçote).	62
Figura 4.11: Definição de posicionamento para deslocamento do sensor do rugosímetro.	63
Figura 4.12: Distribuição e média das 16 leituras de rugosidade $R_a(\mu\text{m})$ p/5 pçs. em 0,5mm.	64
Figura 4.13: Distribuição e média das 16 leituras de rugosidade $R_a(\mu\text{m})$ p/5 pçs. em 1,0mm.	64
Figura 4.14: Distribuição e média das 16 leituras de rugosidade $R_a(\mu\text{m})$ p/5 pçs. em 1,5mm.	65
Figura 4.15: Distribuição e média das 16 leituras de rugosidade $R_a(\mu\text{m})$ p/5 pçs. em 2,0mm.	65
Figura 4.16: Média progressiva de rugosidade $R_a(\mu\text{m})$ entre 0,5 e 2,5mm das 16 leituras obtidas expressas nos gráficos das figuras 4.12 a 4.15.	66
Figura 4.17: Média progressiva de rugosidade $R_a \text{ max.}(\mu\text{m})$ entre 0,5 e 2,5mm das 16 leituras obtidas distribuídas no cabeçote e no carter.	66
Figura 4.18: Gráfico de tendência da média de $R_a (\mu\text{m})$ juntamente com as dispersões para a redução de sobremetal “ a_p ”, mantendo constante os parâmetros de corte e de avanço.	67

Figura 4.19: Primeira avaliação de planeza para vida da ferramenta em 465 pçs	68
Figura 4.20: Segunda avaliação da planeza para vida da ferramenta em 780 pçs	69
Figura 4.21: Terceira avaliação da planeza para vida da ferramenta em 795 pçs	69
Figura 4.22: Quarta avaliação da planeza para vida da ferramenta em 500 pçs	70
Figura 4.23: Quinta avaliação de planeza para vida da ferramenta em 475 pçs	70
Figura 4.24: Variações possíveis na quantidade de peças produzidas e a respectiva planeza encontrada durante as cinco medições anteriores.	71
Figura 4.25: Condição do inserto após fim da vida útil na face com uso (à esquerda face do cabeçote) e (à direita face do carter).	72
Figura 4.26: Aspecto do cavaco gerado na face do carter à esquerda e do cabeçote à direita, com a ferramenta na condição inicial de uso.	72
Figura 4.27: Aspecto do cavaco gerado na face do carter à esquerda e do cabeçote à direita, com a ferramenta na condição final de uso.	73
Figura 4.28: Bloco 1 – face cabeçote e carter - amostra 0,5mm.	74
Figura 4.29: Bloco 1 – face cabeçote e carter - amostra 1,0mm.	75
Figura 4.30: Bloco 1 – falha1 face carter - amostra 1,0mm.	75
Figura 4.31: Bloco 3 – face cabeçote e carter - amostra 1,5mm.	76
Figura 4.32: Bloco 3 – falha3 face carter - amostra 1,5mm.	76
Figura 4.33: Bloco 1 – face cabeçote e carter - amostra 2,0mm.	77
Figura 4.34: Bloco 3 e 4 – face cabeçote e carter - amostra 2,5mm.	77
Figura 4.35: Perfil de energia para rotações maiores que a nominal 100%	79
Figura 4.36: Perfil de energia para rotações menores que a nominal 100%	80
Figura 4.37: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (%de Rotação das fresas) com a ferramenta no início de uso - lado do carter, cabeçote e o somatório.	81
Figura 4.38: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (%de Rotação das fresas) com a ferramenta ao final do uso - lado do carter, cabeçote e o somatório.	82
Figura 4.39: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (%de Rotação das fresas) entre a ferramenta ao início e final de uso - lado do carter + cabeçote.	83
Figura 4.40: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (% de Rotação das fresas) entre a ferramenta ao início e final de uso - lado do carter.	85

Figura 4.41: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (% de Rotação das fresas) entre a ferramenta ao início e final de uso - lado do cabeçote.	85
Figura 4.42: Perfil de energia para diversos avanços da mesa em relação à nominal 0%.	86
Figura 4.43: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (% de Avanço da mesa) com a ferramenta ao início de uso - lado do carter, cabeçote e o somatório.	87
Figura 4.44: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (% de Avanço da mesa) com a ferramenta ao final do uso - lado do carter, cabeçote e o somatório.	88
Figura 4.45: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (% de Avanço da mesa) entre a ferramenta ao início e final de uso - lado do carter + cabeçote.	89
Figura 4.46: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (% de Avanço da mesa) entre a ferramenta ao início e final de uso - lado do carter.	90
Figura 4.47: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (% de Avanço da mesa) entre a ferramenta ao início e final de uso - lado do cabeçote.	90
Figura 4.48: Lascamento da pastilha da fresa - lado do carter – Microscopia eletrônica de varredura com elétrons secundários (25 kV).	91
Figura 4.49: Lascamento da pastilha da fresa - lado do cabeçote –Microscopia eletrônica de varredura com elétrons secundários (25 kV).	93

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Tabela adaptada - Produção Mundial de Ferro Fundido, [MCM, 2005].....	5
Tabela 2.2: Tabela adaptada da classificação dos ferros fundidos quanto à velocidade.....	7
Tabela 2.3: Classificação e Estrutura conforme temperatura no processo de fundição do ferro. .	10
Tabela 2.4: Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos, EB-126 da ABNT,	13
Tabela 3.1: Especificações de projeto constantes no desenho do bloco do motor.....	35
Tabela 3.2: Composição química do bloco.	36
Tabela.3.3: Dureza Brinell (HB) do bloco.	36
Tabela 3.4: Resistência a tração do Bloco (MPa)	37
Tabela 3.5: Histórico de variações no sobremetal nas faces e no peso do bloco.	46
Tabela 3.6: Relação dos parâmetros do inversor de frequência para diferentes % de velocidades de avanço da mesa e o respectivo tempo de fresamento das faces da peça.	51
Tabela 3.7: Velocidade de corte (v_C) e avanço por dente (f_Z) para diferentes velocidades de avanço (v_f).....	52
Tabela 4.1: Análise química por energia dispersiva (EDS) – lado do carter	92
Tabela 4.2: Análise química por energia dispersiva (EDS) – lado do cabeçote	93
Tabela 7.1: Relação de corrente (A) a vazio do carter e do cabeçote em função da velocidade.	102
Tabela 7.2: Relação de Potência e sobremetal removido para níveis	103
Tabela 7.3: Relação de Potência e sobremetal removido para níveis	103
Tabela 7.4: Relação de Potência e sobremetal removido para níveis	104
Tabela 7.5: Relação de Potência e sobremetal removido para níveis	104
Tabela 7.6: Relação de Potência e sobremetal removido para níveis	105
Tabela 7.7: Relação entre massa e energia na remoção de sobremetal entre os níveis.....	106
Tabela 7.8: Relação entre massa e energia na remoção de sobremetal entre os níveis.....	106
Tabela 7.9: Rugosidade medida no nível de 0,5 mm da medida final.	107

Tabela 7.10: Rugosidade medida no nível de 1,0 mm da medida final.	110
Tabela 7.11: Rugosidade medida no nível de 1,5 mm da medida final.	113
Tabela 7.12: Rugosidade medida no nível de 2,0 mm da medida final.	116
Tabela 7.13: Rugosidade medida no nível de 2,5 mm da medida final.	118
Tabela 7.14: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 15% superior à rotação nominal com inserto novo.	119
Tabela 7.15: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 10% superior à rotação nominal com inserto novo.	119
Tabela 7.16: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 5% superior à rotação nominal com inserto novo.	120
Tabela 7.17: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal (100%) com inserto novo.	120
Tabela 7.18: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 5% inferior à rotação nominal com inserto novo.	121
Tabela 7.19: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 10% inferior à rotação nominal com inserto novo.	121
Tabela 7.20: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 15% inferior à rotação nominal com inserto novo.	122
Tabela 7.21: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 20% inferior à rotação nominal com inserto novo.	122
Tabela 7.22: Relações de Potência para remoção completa de sobremetal com variação na rotação das fresas mantendo avanço constante com inserto novo – resumo tabelas 7.14 a 7.21.	123
Tabela 7.23: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 15% superior à rotação nominal com inserto desgastado.	123
Tabela 7.24: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 10% superior à rotação nominal com inserto desgastado.	124
Tabela 7.25: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 5% superior à rotação nominal com inserto desgastado.	124
Tabela 7.26: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal (100%) com inserto desgastado.	125

Tabela 7.27: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 5% inferior à rotação nominal com inserto desgastado.	125
Tabela 7.28: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 10% inferior à rotação nominal com inserto desgastado.	126
Tabela 7.29: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 15% inferior à rotação nominal com inserto desgastado.	126
Tabela 7.30: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 20% inferior à rotação nominal com inserto desgastado.	127
Tabela 7.31: Relações de Potência para remoção completa de sobremetal com variação na rotação das fresas mantendo avanço constante com inserto no final de vida – resumo tabelas 7.23 a 7.30.	127
Tabela 7.32: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 120% do avanço nominal e com inserto novo.	128
Tabela 7.33: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 110% do avanço nominal e com inserto novo.	128
Tabela 7.34: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa nominal (100%) e com inserto novo.	129
Tabela 7.35: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 90% do avanço nominal e com inserto novo.	129
Tabela 7.36: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 80% do avanço nominal e com inserto novo.	130
Tabela 7.37: Relações de Potência para remoção completa de sobremetal com variação no avanço da mesa e a rotação das fresas mantida constante com inserto novo – resumo tabelas 7.32 a 7.36.	130
Tabela 7.38: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 120% do avanço nominal e com inserto desgastado.	131
Tabela 7.39: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 110% do avanço nominal e com inserto desgastado.	131
Tabela 7.40: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa nominal (100%) e com inserto desgastado.	132

Tabela 7.41: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 90% do avanço nominal e com inserto desgastado.....	132
Tabela 7.42: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 80% do avanço nominal e com inserto desgastado.....	133
Tabela 7.43: Relações de Potência para remoção completa de sobremetal com variação no avanço da mesa e a rotação das fresas mantida constante e com inserto desgastado – resumo tabelas 7.38 a 7.42.	133
Tabela 7.44: Resumo de variação de sobremetal e o comparativo da variação de potência medida	134
Tabela 7.45: Cálculo da Taegutec para fresamento - face do carter - ($a_e=270$ mm),	135
Tabela 7.46: Cálculo da Taegutec para fresamento - face do carter – ($a_e=50$ mm),	135
Tabela 7.47: Cálculo da Taegutec para fresamento - face do cabeçote – ($a_e=156$ mm),.....	136

Glossário

Letras Latinas

A	Ampères (unidade de corrente elétrica)	
B	Dimensão bruta considerando sobremetal	[mm]
bit	Impulso elétrico de uma parte de oito bits que compõe um byte.	
C	Carbono	
D	Diâmetro da fresa	[mm]
F	Dimensão final considerando sobremetal	[mm]
f	Avanço	[mm/rot]
I	Representação da corrente elétrica na equação de potência elétrica	
j	Índice que mede a assimetria da largura da fresa na posição frontal em relação à peça a fresar.	[adimensional]
N	Newton (unidade de força)	
n	Rotações por minuto	[rpm]
m	Metro	
m ²	Unidade de área	
P	Potência elétrica	[W]
Q	Taxa de remoção de material.	[mm ³ /min.]
r	raio interatômico	
S	Enxofre	
s	segundo	
U	Representação da tensão elétrica na equação de potência elétrica	
V	Volt	
z	Nº. de dentes de uma fresa na equação 5 ou constante do material na equação 6	
~	aproximado	

% Percentual

Abreviações

Al	Alumínio	
a_e	penetração de trabalho	[mm]
a_p	profundidade de usinagem	[mm]
$\cos\Phi$	Função matemática trigonométrica	
Ca	Cálcio	
C_e	Carbono equivalente	
Co	Cobalto	
Cr	Cromo	
Cu	Cobre	
D_c	Diâmetro útil de corte da fresa	[mm]
Dens	Densidade	[g/cm ³]
DP	Desvio Padrão	
dm ³	Unidade de volume equivalente a 1 litro	
esp.	Específica	
Fe	Ferro	
f	avanço por rotação	[mm/rotação]
f_z	avanço por dente	[mm/z]
ff duct	ferro fundido dúctil	
ff cinz	ferro fundido cinzento	
ff. maleav	ferro fundido maleável	
FoFo	Ferro Fundido	
GE	Grafita em forma de esferóide	
GL	Grafita livre	
GV	Grafita em forma de veios	
HB	dureza Brinell	[kgf/mm ²]
h_m	espessura média do cavaco	[mm]
INFOMET	Informações Britadas Fundidas e Laminadas	
Int	Dimensão intermediária considerando sobremetal	[mm]

K_c	Força de corte específico	[N/mm ²]
K_{sm}	Pressão específica de corte média	[N/mm ²]
K_{s1}	Pressão específica de corte de um material (constante de Kienzle)	[N/mm ²]
KT	Desgaste de profundidade em inserto	
KB	Desgaste de largura em inserto	
KM	Desgaste de distância de centro da cratera no inserto	
kg	Unidade de massa	
kHz	Unidade de frequência x 1000	
kW	Unidade de potência elétrica x 1000	
Mf	Massa final	[kg]
Mi	Massa inicial	[kg]
Mn.	Mínimo	
Mn	Manganês	
MPa	Unidade de resistência mecânica Mega Pascal	
Mx.	Máximo	
mA	Milésima partição do Ampère	
min.	Minuto	
mm	Milésima partição do metro	
mm ²	Unidade de área	
Ni	Níquel	
Per	Perlita	
Pot	Potência	[W]
P_C	Potência de corte	[W]
$Pot_{esp/corte}$	Potência específica de corte	[kW min / cm ³]
$P_{max.}$	Potência máxima	[W]
Pto.	Ponto	
Ra	Rugosidade de uma superfície	[μ m]
$R_{max.}$	Rugosidade máxima de uma superfície	[kg]
Si	Silício	
Ti	Titânio	
Vc	Velocidade de corte	[metros/minuto]

Vol	Volume de material removido considerando sobremetal	[kg]
$V_{B_{max}}$	Desgaste de flanco de um inserto	
V_B	Desgaste de flanco médio	
V_B	Desgaste de entalhe	
Vol.f	Volume final considerando sobremetal	[cm ³]
Vol.i	Volume inicial considerando sobremetal	[cm ³]
V_f	Velocidade de avanço	[mm/min.]
W	Tungstênio	
Watt	Unidade de potência elétrica	
W/cm ³	Unidade de densidade de potência elétrica	[Watts/cm ³]
WC	Carboneto de tungstênio	
°C	Temperatura em graus centígrados	
X_r	Ângulo de posição principal da ferramenta	
Y	Ítrio	
Zn	Zinco	

Letras Gregas

α	Alfa – “ferrita ou solução sólida de carbono em ferro alfa”
π	número Pi = 3,14159
ϕ_1	ângulo de entrada da ferramenta
ϕ_2	ângulo de saída da ferramenta
ϕ_{cab1}	ângulo de entrada 1 da ferramenta lado cabeçote
ϕ_{cab2}	ângulo de saída 2 da ferramenta lado cabeçote
ϕ_{cart1}	ângulo de entrada 1 da ferramenta lado carter
ϕ_{cart11}	ângulo de saída 11 da ferramenta lado carter
ϕ_{cart2}	ângulo de entrada 2 da ferramenta lado carter
ϕ_{cart22}	ângulo de saída 22 da ferramenta lado carter
γ	austenita ou ferro gama
η	rendimento (%)
τ	tensão cisalhante com deformação plástica
μm	milionésima divisão do metro

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMD – K6	Advanced Micro Devices – (K6 é o modelo de processador)
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society Testing Material
BSI	British Standards Institution
CV	Cavalo vapor (unidade de potência mecânica)
CCC	Cúbica de corpo centrada
CFC	Cúbica de face centrada
CIMM	Centro de Informação Metal Mecânico
CLP	Controlador Lógico Programado
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DIN	Deutsches Institut für Normung
EA	Emissão acústica
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
INFOMET	Informações sobre processos e materiais
ISO	International Organization for Standardization
ISBN	International Standard Book Number
MSPC	Multivariate Statistical Process Control
RES	Rover Engineering Standard
S2i	Sistemas Industriais Inteligentes

1. INTRODUÇÃO

O mundo vive um processo de globalização. A oferta de produtos com qualidade e preço competitivo se tornou questão de sobrevivência. Todas as empresas que almejam uma participação ativa no mercado devem, portanto, buscar incessantemente melhorar seu produto, agregando um máximo de atrativos, e produzi-lo com economia e qualidade. A própria história nos remete a uma diversidade de exemplos em que as empresas tiveram que se preocupar com fatores que melhorassem sua eficiência e reduzissem seus desperdícios, a fim de manter sua competitividade.

Com o progresso na área das comunicações, observa-se que as pessoas estão constantemente informadas e o mundo está mais próximo em todos os aspectos. Como consequência desse progresso, não só o acesso ao conhecimento profundo e minucioso sobre diversos assuntos foi facilitado, como também foi favorecida uma aproximação entre os mercados da comunidade global nas suas operações de comércio.

A consequência desta situação é que a procura e a oferta por produtos e serviços de melhor preço e qualidade estabeleceram um novo critério de exigências. Essa competição traz a necessidade, por parte das empresas, de reduzir seus custos dentro do possível, mantendo a expectativa de reforçar a qualidade do produto de forma atraente para o consumidor. A empresa que alcançar os requisitos necessários para competir e estiver alerta diante do mercado, terá condições de se manter ativa. Outro fator relevante é o meio ambiente. A preocupação com os recursos energéticos existentes e a matéria-prima cada vez mais escassa é global e tem gerado uma ânsia pela preocupação dos mesmos. A contínua utilização de recursos naturais não renováveis e o crescente consumo de energia são hoje uma realidade no mundo industrializado. Este processo caminha com objetivo de produzir bens de consumo que satisfaçam as necessidades diárias com que o homem se acostumou. O conforto e a prosperidade norteiam estes objetivos, ou seja, há uma busca incessante por “melhores” condições de vida. No entanto, este

crescente aumento no consumo de bens naturais pode sofrer um colapso, se não forem tomadas as devidas providências. As comunidades mundiais permanecem em alerta diante deste fato. Os recursos tendem a ficar escassos, dia a dia, trazendo uma gradativa elevação de preços da matéria-prima. Neste processo encontram-se vários investimentos necessários para uma redução no consumo destes recursos, ou a criação de novas alternativas, com a visão de garantir um sistema sustentável. O uso racional da matéria-prima envolvida na produção de um item é bem vindo. A reciclagem do lixo, que já é uma realidade em muitos países, também contribui com a redução do consumo dos recursos naturais. A indústria trabalha, neste sentido, quando realiza a manufatura de um item de forma a atender ao critério econômico para reduzir os custos de ineficiência.

O tema central deste trabalho, paralelamente engajado nesta preocupação, está em racionalizar o uso dos recursos naturais, na preservação do meio ambiente sem comprometer a qualidade do produto. A análise científica das informações e os dados coletados deverão indicar a possibilidade de que se venham reduzir-se os níveis de sobremetal no bloco do motor. Paralelo a esta situação avaliar-se-á a possibilidade, mesmo que em níveis reduzidos, de um consumo racional da matéria-prima necessária para a confecção do bloco bruto. Entre outros fatores, com a redução dos níveis de sobremetal, haverá uma racionalização em outros itens, tais como: menor solicitação mecânica e elétrica de vários equipamentos da cadeia produtiva. A máquina utilizada em um processo de fresamento requer elevada resistência para resistir aos esforços mecânicos que aceleram seu desgaste e reduzem sua disponibilidade. Ter-se-á também, uma economia no consumo de energia elétrica e uma redução no desgaste da ferramenta.

A geração de resíduos na usinagem demanda em custos desnecessários que devem ser minimizados porque, além do seu transporte em retorno aos centros de reciclagem, incide em novos gastos com energia. O uso inadequado de máquinas e ferramentas exerce um foco importante, porque se a energia não tiver seu uso otimizado, resultará em custos mais elevados para a produção e, nesta cadeia, novos recursos governamentais serão exigidos, com investimentos na produção de energia necessária que pode ser utilizada adequadamente em novas oportunidades.

1.1 Objetivo

Reforçada a preocupação recente, fundamentada na redução de custos, foi elaborado este trabalho, no sentido de propor a redução no sobremetal do fundido. A redução do peso do bloco em bruto possibilita uma diminuição das despesas com fornecedores, tanto de matéria-prima, quanto da energia necessária para fundir cada bloco numa proposição com menos sobremetal.

Outro objetivo propõe uma nova alternativa na determinação do momento de troca da ferramenta estabelecido pela avaliação da diferença de energia necessária para executar um mesmo trabalho, entre diferentes situações, entre ferramenta desgastada ou não. Seria mais uma forma de decisão frente aos métodos que utilizam apenas a rugosidade ou a planeza da peça ou mesmo critérios imprecisos de análise visual como a cor do cavaco ou a situação de contorno dos cantos da peça.

Outro critério utilizado em diversas máquinas, não empregado aqui, é o da análise direta do desgaste da ferramenta, que demanda em tempo e exige equipamento de precisão. Para realizar os testes foi empregada uma máquina de produção, em uma operação de desbaste com fresas de insertos intercambiáveis em metal duro, realizadas na face bruta do carter e do cabeçote, de um bloco de motor em ferro fundido cinzento. Através da avaliação da superfície da peça, pela medição da planeza da superfície da peça é identificado, com relativa precisão, o momento ideal desta troca. No entanto, o inconveniente deste método reside nos sucessivos deslocamentos de cada peça, de cada lote, até a máquina tridimensional onde é feita esta medida. Por outro lado, a viabilidade de se utilizar a medida de variação da potência como indicador do final de vida, da ferramenta, pode representar em uma alternativa que elimina deslocamentos e paradas de máquina, porque pode medir ao longo de todo o tempo de usinagem e a cada peça. Uma vez desenvolvido o sistema de aquisição da potência do motor, foram feitas diversas leituras de energia para uma posterior análise da influência da velocidade de corte, avanço da mesa e profundidade de corte na vida da ferramenta. Isso sem prejudicar os níveis de qualidade da superfície fresada, sem falhas, por defeito no fundido, etc.

O monitoramento da potência do motor possibilita também a identificação da velocidade com melhor rendimento para a máquina em vazio e com carga.

Buscou-se estabelecer parâmetros de comparação de energia baseado na massa removida para os ensaios com variação de sobremetal, velocidade de corte e de avanço.

1.2 Estrutura do trabalho

Item 2 é apresentado a revisão da literatura tendo como ênfase o ferro fundido com suas características, o processo de fresamento frontal utilizado e alguns meios para realizar medições de energia, nesse processo.

Item 3 são apresentadas as ferramentas adotadas e o procedimento experimental para a realização dos ensaios.

Item 4 estão os resultados e as discussões.

Item 5 estão as conclusões.

Item 6 estão as referências bibliográficas.

Item 7 está o apêndice com as tabelas geradoras dos gráficos que levaram aos resultados dos experimentos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. FERRO FUNDIDO

2.1.1. Obtenção

Ao adicionar minério de ferro em forma de óxidos em presença de coque ou carvão de madeira, em fornos adequados, obtém-se uma liga de ferro onde o óxido é reduzido e o ferro resultante se liga ao carbono. O refino desta liga é a matéria-prima para produção de peças metálicas com interesse na indústria por suas propriedades mecânicas, além de possuir custo reduzido. A classificação desse material como liga vem do fato de que a adição proposital de carbono ou um segundo componente, tais como Si, Mn, tem como objetivo melhorar suas propriedades [Colpaert, 1974].

O ferro fundido tem uma importância fundamental para a indústria moderna. Isto se deve ao ponto de fusão que é de 1150°C, menor que o aço (~1500°C), resultando numa redução do custo de produção entre 30 e 40%. Uma pesquisa de 2005 aponta uma produção mundial de 60 milhões de toneladas na tabela adaptada 2.1. A China está em 1º e o Brasil em sétimo lugar, [MCM, 2005].

O ferro fundido é o produto siderúrgico obtido por fusão que apresenta uma concentração de carbono acima de 2% [Colpaert, 1974].

Tabela 2.1: Tabela adaptada - Produção Mundial de Ferro Fundido, [MCM, 2005].

Posição	Países	Produção(t)	%
1º	China	17441396	28,94
2º	USA	8433188	13,99

Posição	Países	Produção(t)	%
3°	Rússia	5700000	9,45
4°	Japão	4631996	7,69
5°	Alemanha	3902214	6,47
6°	Índia	3662000	6,07
7°	Brasil	2377497	3,94
8°	França	1943500	3,22
9°	Coréia	1560400	2,58
10°	Itália	1437114	2,38
	Outros países	9202397	15,27

2.1.2. Generalidades

A taxa de concentração máxima de carbono no ferro fundido poderá chegar a 6,7%. Este teor provém da participação percentual do carbono na estrutura da cementita Fe_3C .

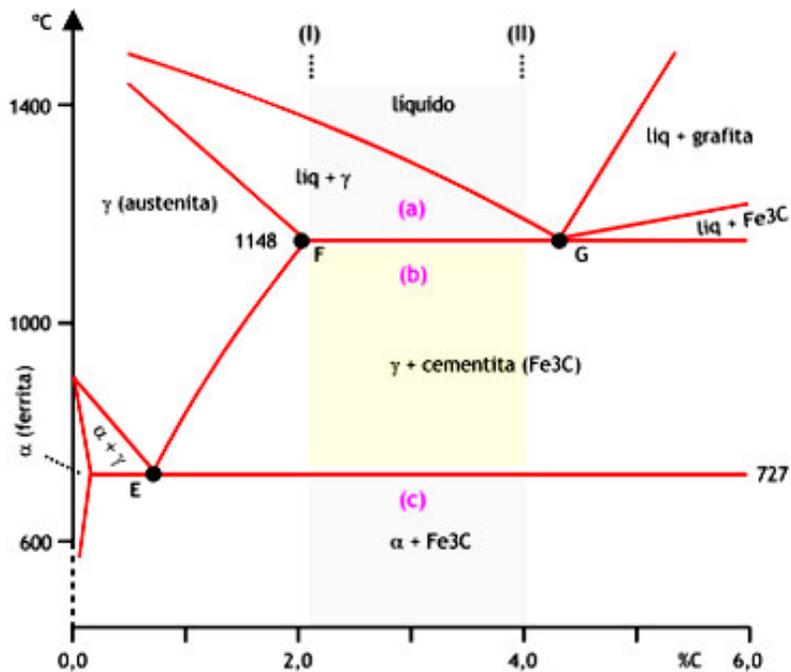


Figura 2.1: Diagrama de equilíbrio das ligas ferro-carbono, [MSPC, 2009].

O silício está quase sempre presente e pode conter outros elementos residuais do processo ou propositalmente adicionados. A maioria dos ferros fundidos comerciais apresenta teores de carbono até 4%. No diagrama Fe-C da figura 2.1, esta liga está compreendida dentro da faixa indicada, de (I) até (II). São em geral produzidos a partir de sucatas e do ferro-gusa refundido, mediante procedimentos e etapas para reduzir teores de elementos indesejáveis como fósforo e enxofre. Um conceito antigo de ferro fundido associava seu nome ao ferro fundido cinzento. A característica quebradiça e resistente era associada a todos os tipos, de forma errada, pois, na verdade as características mecânicas variam de acordo com o tipo de ferro fundido. Na tabela 2.2 estão ilustradas as principais ligas sob a denominação ferro fundido, [MSPC, 2009].

Tabela 2.2: Tabela adaptada da classificação dos ferros fundidos quanto à velocidade de resfriamento e estrutura até a fase sólida (c) desde a fase líquida (a) do diagrama da Figura 2.1, [MSPC, 2009].

Item	Resfriamento	Região (a)	Região (b)	Região (c)	Ferro Fundido
1	Rápido	$\gamma +$ líquido	$\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$	$\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}$	Branco
2	Médio	$\gamma +$ líquido	$\gamma + \text{GV}$	$\text{P} + \text{GV}$	Cinzento Perlítico
3	Lento	$\gamma +$ líquido	$\gamma + \text{GV}$	$\alpha + \text{GV}$	Cinzento Ferrítico
4	Médio	$\gamma +$ líquido	$\gamma + \text{GS}$	$\text{P} + \text{GE}$	Dútil Perlítico
5	Lento	$\gamma +$ líquido	$\gamma + \text{GS}$	$\alpha + \text{GE}$	Dútil Ferrítico
6	Rápido		$\gamma + \text{GL}$	$\text{P} + \text{GL}$	Maleável Perlítico
7	Lento		$\gamma + \text{GL}$	$\alpha + \text{GL}$	Maleável Ferrítico

As transformações ocorrem a partir da fase líquida (a) do diagrama da figura 2.1 até a fase sólida (c), do material no estado final. No item 1 - ferro fundido branco – ocorre um resfriamento rápido com um ajuste nos teores de carbono e silício que impedem a formação de grafita, ficando todo o carbono na forma de cementita. Nos itens 2 e 3 - fundido cinzento – a grafitização na forma de veios é facilitada pela reduzida velocidade de resfriamento. Nos itens 4 e 5 - ferro fundido nodular – a composição é semelhante ao cinzento diferindo apenas pela grafita esferoidal, resultante da ação de elementos como o magnésio ou cério e baixos teores de enxofre. Por fim, têm-se os itens 6 e 7 - ferro fundido maleável – produzido a partir do branco. Por isso a região (a) da tabela é vazia. As peças de ferro fundido branco são submetidas a um resfriamento de 30h a 700°C. A grafita resultante tem forma livre. Existe ainda o ferro fundido mesclado cuja superfície é do tipo branco e o interior é do tipo cinzento. A elevada dureza superficial e a menor fragilidade da peça são alcançadas mediante ajuste da velocidade de resfriamento e de outros parâmetros.

O diagrama de equilíbrio da figura 2.1 estabelece que as transformações na liga ferro-carbono sofrem influências basicamente da temperatura e do teor de carbono. As variações estabelecidas no processo de formação da liga resultam em alterações na sua microestrutura e, conseqüentemente, em grande variação nas propriedades mecânicas. A liga ferro-carbono é uma liga ternária porque no seu processo de obtenção existem impurezas, com inclusões de outros elementos de liga presentes.

Como o uso de diagramas de três elementos é um tanto complexo, na prática, é adotada uma aproximação considerando apenas o carbono e o silício que exerce grande influência, com participação superior ao do próprio carbono de forma a assumir uma forma parcialmente livre, em veios ou lamelas de grafite. Rigorosamente, os ferros fundidos deveriam ser estudados como ligas Fe-C-Si.[Chiaverini, 1994].

O silício afeta o comportamento mecânico da liga porque altera o teor de carbono encontrado e favorece a grafitização, decompondo a cementita, Fe_3C , em ferro e carbono. A definição hipo, hiper ou eutético é baseada no teor de carbono equivalente C_e de carbono que sofre a influência das impurezas e é dado pela equação1:

$$\text{Equação 1: } C_e = \%C + (1/3) \%Si.$$

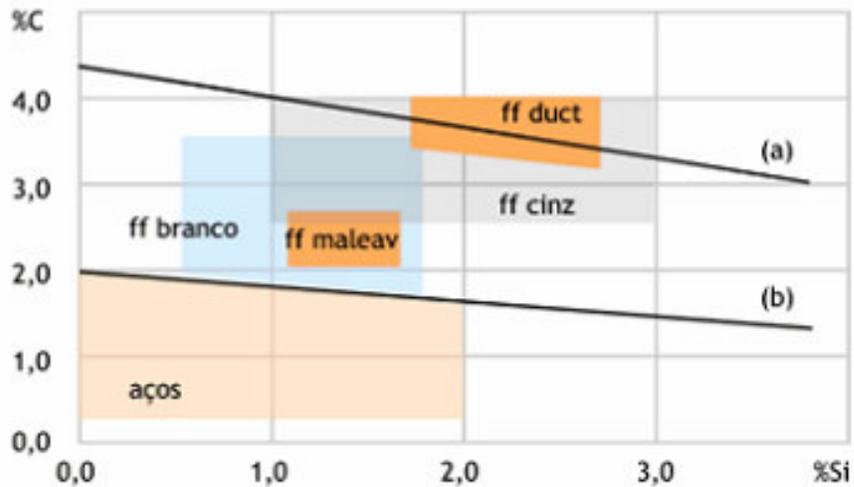


Figura 2.2: Relação carbono-silício para diferentes tipos de ferro fundido e aço, onde as retas (a) representa a igualdade do C_e com coeficiente em 1/3 e (b) igualdade similar em 1/6.

[MSPC, 2009]

A igualdade da figura 2.1 é representada pela reta (a) do gráfico da Figura 2.2. Em (b), há igualdade similar, com o coeficiente (1/6) em vez de (1/3). E as faixas usuais de teores para aços e ferros fundidos são dadas no mesmo gráfico. A consequência na alteração do C_e observada, na presença de elementos de liga, modifica o ponto eutético afetando a velocidade de resfriamento. Como existem novas condições de equilíbrio para o resfriamento, parâmetros micro estruturais como quantidade, forma da grafita e a própria distribuição fica alterada. O resfriamento é mais lento, no interior do material. Com isto, haverá maior grafitização, redução na dureza e melhor usinabilidade. Outros elementos como o manganês, exercem efeito contrário ao do silício, porque não decompõe o Fe_3C . O fósforo age como estabilizador do carboneto de ferro e atua na estrutura do material formando com o ferro e com o carbono um composto de natureza eutética. Assim, teores variáveis na concentração de silício, ou mesmo de outros elementos de liga deslocam o ponto de equilíbrio eutético por alterarem a quantidade de C_e presente.

Um paralelo, em termos de difusão, ocorre quando se considera apenas o carbono na estrutura do ferro. Nesta transformação, o ferro é o solvente e o carbono o soluto. Dependendo da temperatura aplicada, durante as transformações, ocorrem variações na taxa de concentração tanto do soluto quanto do solvente. Estas variações de concentração são responsáveis pelas características mecânicas do material. A distinção entre o aço e ferro fundido é estabelecida com

base no limite de concentração do carbono. Ligas com concentrações abaixo de 2 % são consideradas aço e acima disso, até o limite de 6,7%, ferro fundido.

De forma ideal, para teores crescentes de carbono, até 4,3% reduzem a temperatura necessária para a fusão completa do material. Além deste limite, a temperatura se eleva de novo, à medida que o teor de carbono continua a aumentar. Assim a liga com 4,3% de carbono é a mais fusível de todas, recebendo a classificação de “eutética”. Em função disto, ligas com concentrações de carbono abaixo de 4,3%, são denominadas “hipoeutéticas” e acima desse valor, “hipereutéticas”, [Colpaert, 1974] .

Durante o aquecimento, o ferro puro experimenta duas mudanças em sua estrutura cristalina antes de se fundir. À temperatura ambiente, a forma estável, chamada ferrita α , é constituída por uma solução sólida intersticial de carbono no ferro α onde a célula unitária é CCC. A difusão do carbono é baixa nesta estrutura porque a relação entre seus raios atômicos é alta, (63/100), com uma solubilidade limitada a 0,02% em peso à temperatura de 723°C. Porém, quando a ferrita é aquecida até 910°C se transforma em austenita, com célula unitária do tipo CFC, uma nova solubilidade é encontrada, e esta aumenta a absorção do carbono em 100 vezes, chegando a 2,0% em peso à temperatura de 1147°C. O processo de mudança na temperatura do ferro afeta sua estrutura que passa a receber diferentes nomes identificados na tabela 2.3. A difusão que se processa na formação da liga de ferro com o carbono ocorre porque o átomo de carbono é extremamente pequeno. Com isto os átomos de ferro assumem a configuração de pequenas células unitárias, CFC, um tetraedro que apresenta um interstício na parte central. Este espaço pode ser preenchido pelo átomo de carbono formando soluções sólidas intersticiais.

Tabela 2.3: Classificação e Estrutura conforme temperatura no processo de fundição do ferro.

Temperatura	< 723 °C	910 °C a 1394°C	1394 °C a 1534 °C
Classificação	Ferrita α	Austenita ou Ferrita γ	Ferrita δ
Estrutura	CCC	CFC	CCC

A figura 2.3 fornece uma referência espacial do que acontece na inclusão do átomo de carbono entre os átomos de ferro durante o processo de difusão.

A estrutura CFC das ligas de ferro acontece quando sua temperatura se eleva acima de 910°C. Abaixo desta temperatura o ferro apresenta uma estrutura CCC, onde os interstícios ficam menores, de forma a reduzir a solubilidade do carbono no ferro.

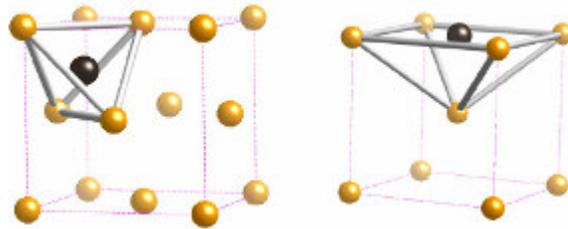


Figura 2.3: Posição dos átomos de carbono na estrutura CFC à esquerda e CCC à direita da célula cúbica unitária do átomo de ferro, [Zoqui, 2007].

A microestrutura do ferro fundido não se modifica apenas com a introdução de elementos de liga, mas também quando submetido a tratamentos térmicos adequados, ganhando, com isto, propriedades que lhe permite substituir o aço, em muitas aplicações. O desenvolvimento do ferro fundido nodular é um exemplo disso. Dentre os tratamentos térmicos, pode-se mencionar o recozimento, a normalização e a têmpera com revenimento. O objetivo é obter alívio das tensões remanescentes advindas do processamento mecânico ou metalúrgico do material. A melhoria na usinabilidade é alcançada pelo recozimento. A normalização e a têmpera com revenimento aumentam a resistência mecânica à tração e dureza. O recozimento, um processo grafitizante, consiste no aquecimento além da temperatura crítica e posterior resfriamento lento. A normalização, um recozimento com resfriamento à temperatura ambiente, não só elimina carbonetos nocivos às ferramentas de corte, como também, torna a matriz homogênea. Já na têmpera, a peça é aquecida acima da zona crítica e resfriada rapidamente em água ou óleo aumentando a dureza, limite de escoamento e resistência à tração. Caso seja constatada dureza e tensão interna excessiva é feita o revenimento, que consiste em reaquecer a peça temperada a uma temperatura adequada abaixo da zona crítica e resfriá-la novamente, [Carneiro, 2005].

A indústria automobilística, especialmente voltada à produção de bloco de motores, tem usado com mais intensidade as ligas de ferro fundido cinzento e mais recentemente do tipo vermicular. A exigência para o material utilizado nessa aplicação é que tenha elevada resistência mecânica, ductilidade, condutividade térmica e capacidade para amortecer vibrações, [Mocelin, 2002].

A descoberta do ferro fundido vermicular aconteceu em 1965 e sua produção teve início na década de 90 com a evolução do processo e dos equipamentos necessários para sua produção. No ferro fundido vermicular a grafita fica distribuída em forma de estrias grossas, ou “vermes” na sua matriz. Combina a boa resistência mecânica do nodular e a alta condutividade térmica e ductilidade do cinzento, melhor que a do ferro fundido nodular, ou seja, este material é semi-dútil. Portanto, está entre os dois extremos. Tem uma qualidade superior no acabamento após usinagem do que o cinzento. A empresa SinterCast iniciou sua utilização em substituição ao ferro fundido cinzento, em discos de freio, coletores de escapamento, cabeçotes e blocos de motores Diesel, para atender exigências por disponibilizar elevadas taxas de compressão, [Boff, 2003].

Na micrografia da figura 2.4, a matriz de ferro envolve cada vermículo isolado.

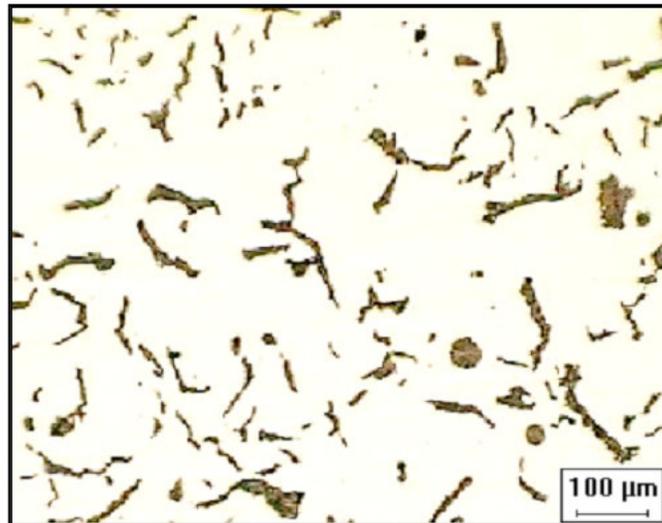


Figura 2.4: Microestrutura do ferro fundido vermicular, [Guesser et al, 2004].

A característica mecânica desta microestrutura aumenta a eficiência dos motores com a redução no tamanho e a eficiência térmica durante a combustão por permitir maiores taxas de compressão. Na composição química do ferro fundido vermicular existe a presença de magnésio em uma faixa controlada entre 0,010% e 0,012%, [Baker, 2006].

A alta resistência mecânica ainda desfavorece a usinabilidade. Ainda há uma grande demanda por pesquisas que, vem sendo feitas em empresas automobilísticas, e fundições, principalmente em ferramental e processo, [Mocellin, 2002].

2.1.3. Ferro fundido cinzento

O ferro fundido cinzento é superior ao vermicular em termos de usinabilidade. Sua facilidade de fusão e moldagem, além da boa usinabilidade frente ao vermicular e outros fatores, como resistência mecânica ao desgaste e às vibrações, o tornaram o material de maior aceitação na indústria automobilística. O tom escuro característico de sua fratura é a razão da denominação pela qual é conhecido entre os diversos tipos de ferro fundido. Sua microestrutura apresenta a grafita na forma lamelar interconectada, razão para a boa condutividade térmica. Por outro lado, certos parâmetros de resistência mecânica como ductilidade e tenacidade são afetadas pela presença de descontinuidades na matriz, que confere a este material o comportamento frágil, quando submetido ao carregamento dinâmico imposto por altas taxas de deformação, [Marquard, 1998].

Relacionando a matriz da microestrutura, quanto maior o teor de perlita, maior a resistência à tração alcançada. A tabela 2.4 mostra a classificação dos ferros fundidos cinzentos, segundo a norma EB-126 da ABNT quanto ao seu limite de resistência.

Tabela 2.4: Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos, EB-126 da ABNT, [Zilmann et al, 2009].

Classe	Diâmetro da barra de ensaio		Limite de resistência à tração (min.) N/mm ²	Dureza Brinell (valores máximos)	Resistência À flexão estática (valores médios) N/mm ²
	D, mm (no estado bruto de fusão)	D, mm (usinada)			
FC10	30	20	98	201	-
FC15	13	8	225	241	333
	20	12,5	176	223	314
	30	20	147	212	294
	45	32	107	201	265

Classe	Diâmetro da barra de ensaio		Limite de resistência à tração (min.) N/mm ²	Dureza Brinell (valores máximos)	Resistência À flexão estática (valores médios) N/mm ²
	D, mm (no estado bruto de fusão)	D, mm (usinada)			
FC20	13	8	323	269	-
	20	12,5	274	248	451
	30	20	245	241	412
	45	32	205	229	382
FC25	13	8	323	269	-
	20	12,5	274	248	451
	30	20	245	241	412
	45	32	206	229	382
FC30	20	12,5	323	269	-
	30	20	294	262	470
	45	32	254	248	441
FC35	20	12,5	372	-	-
	30	20	343	277	529
	45	32	304	269	500
FC40	30	20	392	-	588
	45	32	353	-	559

Quanto menor o carbono equivalente, maior a classe do material e menor a quantidade e o tamanho das grafitas. Para a definição das propriedades mecânicas, é importante o conhecimento da espessura da peça, na microestrutura da grafita bem como da composição química. O tratamento térmico e o recozimento, no ferro fundido cinzento, têm por objetivo melhorar suas propriedades aliviando tensões, que por sua vez melhora a usinabilidade.

Os blocos em ferro fundido cinzento possuem o menor custo de fabricação, mas resultam em motores mais pesados do que os que utilizam vermicular. Na figura 2.5 é mostrada a microestrutura do ferro fundido cinzento com detalhes na distribuição da perlita e da grafita.

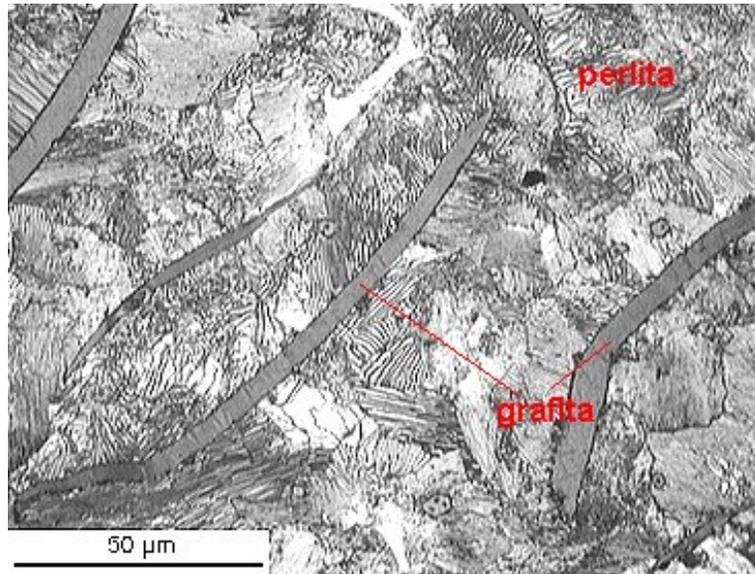


Figura 2.5: Microestrutura do ferro fundido cinzento, [Colpaert, 1974].

2.1.4. Elementos de liga na usinabilidade do ferro fundido:

Embora seja hoje possível produzir ferros fundidos cinzentos de alta qualidade sem a adição de elementos de liga, apenas com um controle rigoroso do carbono livre, do carbono combinado, dos teores de silício e manganês e da técnica de fabricação, a adição de elementos de liga vem se tornando uma prática usual, por permitir não só obter maiores resistências com o carbono equivalente mais elevado (os ferros fundidos comuns de alta resistência apresentam baixo carbono equivalente), como também porque as estruturas resultantes são menos sensíveis à variação da espessura das peças.

Diversos componentes são encontrados, além do carbono, como o silício, o manganês, o fósforo, o enxofre, o níquel, o cromo, o molibidênio e o cobre.

Se o elemento adicionado é grafitizante, mais carbono livre (grafite), ele decompõe a cementita e ajuda na usinabilidade porque reduz a dureza e a fragilidade. Assim os elementos de adição são classificados em formadores de carbonetos ou grafitizantes, [Sandvik, 2003].

Efeito grafitizante: silício, alumínio, níquel, cobre e titânio;

Efeito carbonetizante: manganês, cromo, molibdênio, vanádio e cobalto, entre outros. Estes elementos são evitados em peças de paredes finas.

Todos os elementos de liga tendem a aumentar a resistência à tração e a dureza, sendo os mais eficientes, nesse sentido, o vanádio, o molibdênio e o cromo.

O aumento na capacidade de potência desenvolvida por um motor exige uma redução de peso através da redução de suas paredes. Para tanto, o ferro fundido é ligado com Cr e Ni e outros elementos como o Cu. O objetivo é alcançar elevada resistência através de um grão fechado com estrutura fina lamelar [Calderini, 1998].

Níquel: Normalmente piora a usinabilidade porque é formador de austenita que aumenta a tenacidade. Ajuda a usinabilidade em concentrações acima de 5%. Promove a formação de grafita, [Chiaverini, 1994].

Estanho: Ajuda a usinabilidade em concentrações entre 0,05 e 0,15%. Reduz a dureza em toda a peça fundida e elimina pontos duros nos cantos, [ASM, 1967].

Manganês: Prejudica a usinabilidade. Promove a formação de carbonetos. Estabiliza a cementita. Reduz o efeito do enxofre na forma de inclusões de MnS, [Chiaverini, 1994].

Enxofre: Prejudica a usinabilidade em concentrações, entre, 0,02 e 0,25%. Promove a formação da cementita. Sua influência é atenuada pelo Manganês, [Chiaverini, 1994].

Fósforo: Forma o composto branco “esteadita” na microestrutura do ferro fundido cinzento ou nodular, em quantidades inferiores a 0,15%. A esteadita tem dureza excessiva e reduz significativamente a vida da ferramenta quando ultrapassa 0,2%. Seu efeito é atenuado quando sua matriz perlítica migra para a ferrítica por um tratamento de inoculação. Como a matriz ferrítica é mole, acaba por reduzir o efeito abrasivo da esteadita na ferramenta de corte, [ASM, 1967].

Cromo: Prejudica a usinabilidade em concentrações acima da faixa entre 0,05 e 1% pelo aparecimento de um excesso de carbonetos livres, que aumentam a dureza. Normalmente é adicionado na faixa de 0,30%. Acima desse valor, deve ser conjugado um elemento grafitizante, sobretudo em peças de secções finas, com cantos vivos. O cromo torna a estrutura de matriz do ferro fundido cinzento mais perlítica e mais fina. O cromo aumenta a resistência à ruptura transversal e à corrosão.

Cobre: Ajuda a usinabilidade e sua resistência à corrosão, principalmente em meios contendo enxofre. Sua concentração usual é em teores de 0,5% a 2,0%, [Infomet, 2009].

2.1.5. Aspectos da grafita:

A grafita tem origem em uma ampla faixa de temperaturas durante o processo de solidificação do ferro fundido. A forma, a quantidade e suas dimensões dependem não só da concentração de carbono e da capacidade de expansão na liga, como também da velocidade de resfriamento. Estas alterações afetam as características finais modificando as propriedades mecânicas. A norma ASTM classifica pela forma, os diferentes tipos de grafita encontrados, que estão distribuídos em: A, B, C, D, E. Outro critério é o comprimento médio dos veios que a ASTM divide em oito categorias, cujos intervalos variam de 1 (veios longos) a 8 (veios curtos). Boyles constatou que a tendência à grafitização no ferro fundido cinzento após a solidificação do eutético depende da existência de algum teor de carbono inicial, [Colpaert, 1974].

A presença da grafita facilita a usinagem devido ao efeito de lubrificação sólida. A sua forma e quantidade determinam o acabamento da superfície durante o corte, além da força necessária para a usinagem. A vida da ferramenta depende da microestrutura ao redor da grafita, que exerce influência direta nos limites máximos permitidos para as velocidades tanto de corte quanto de avanço, [Bezerra, 2003].

A dureza, no aço, é proporcional à quantidade de carbono presente, quanto maior, mais duro e menos dúctil é o aço. Assim também é o ferro fundido, com a diferença de que no ferro fundido existe uma grande quantidade de carbono. Os ferros fundidos são praticamente indeformáveis e não podem ser utilizados onde se necessita boa resistência à tração, flexão ou choque. Por outro lado, estes materiais funcionam muito bem onde se necessita resistência à compressão. No ferro fundido cinzento ocorre a decomposição da cementita (dura) e grande parte do carbono separa-se em forma de grafita, de forma a reduzir o teor de carbono da matriz. A intensidade da grafitização regula a tendência da estrutura tornar-se eutetóide, hipoeutetóide ou hipereutetóide, influenciando as propriedades mecânicas, facilitando a resistência ao desgaste e ao amortecimento das vibrações, [Müller, 2009].

O ferro fundido utilizado no presente trabalho tem a forma do tipo A com tamanho de grafita, entre 4 e 5, em veios de grafita finos e aleatórios, tipicamente eutético. Na figura 2.6, mostram-se as grafitas de cada tipo com aumento de 100 vezes. As do tipo A, desenvolvem-se em veios com resfriamento lento, normalmente localizado na parte mais interna do material. No tipo B, as partículas são vermiformes, circundadas por veios em disposição radial com aspecto de roseta. No tipo C, os veios maiores são favorecidos pela facilidade de desenvolverem-se. No tipo

D, as partículas são vermiformes, devido à rapidez de resfriamento e são mais facilmente encontrados na superfície do material. No tipo E, tem-se menos carbono e a orientação predominante é interdendrítica dentro do espaço disponível, [Colpaert, 1974].

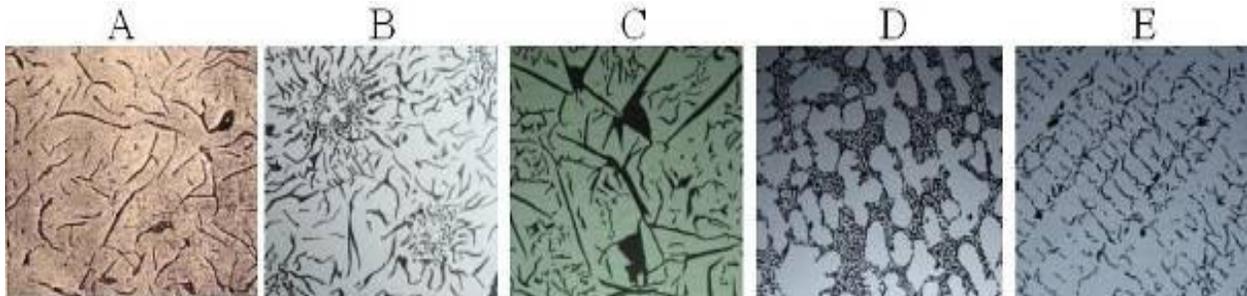


Figura 2.6: Tipo de grafitas: A, tamanho 4 - veios curvos e bifurcados sem orientação;

B – veios radiais em torno de núcleo eutético – em roseta;

C – veios pequenos normais entre veios grandes e quase retos - desiguais irregular;

D – veios pequenos e curtos agrupados preenchendo espaços interdendríticos e desorientada, percebida no eutético;

E – veios orientados no espaço interdendrítico orientado, [Colpaert, 1974].

Se a solidificação ocorre à baixa velocidade, existe a tendência a se formar grafita do tipo A, com veios finos e distribuídos aleatoriamente, o que favorece a usinabilidade. Por outro lado, o tipo D, que ocorre quando o resfriamento é rápido, apresenta veios mais finos, favorecendo o aumento de concentração de tensões e a possibilidade de um acabamento superficial mais fino [Sandvik, 2003].

2.2. O FRESAMENTO

O processo de fresamento consiste na operação de usinagem em que o material é removido por uma ferramenta giratória denominada fresa de múltiplos insertos cortantes. Cada inserto remove uma pequena quantidade de material em cada revolução do eixo onde a ferramenta é fixada. A máquina que realiza esta operação é chamada de fresadora, [Agostinho et al, 2004].

O fresamento destaca-se por apresentar grande versatilidade em relação à capacidade de gerar geometrias, bem como custos relativamente reduzidos, [Coppini, 2006].

O fresamento tem como característica o corte interrompido, o que provoca impactos sobre a ferramenta e compromete o seu desempenho. A alternância entre períodos de corte e vazio ocasiona mudanças bruscas de temperaturas e tensões na ferramenta que podem provocar avarias, [Workfer, 2009].

2.2.1. Classificações:

Pode-se classificar os processos de fresamento de acordo com diversos critérios:

Quanto à disposição do eixo-árvore na máquina:

Horizontal, Vertical ou Inclinada;

Quanto à disposição das arestas de corte:

Frontal (onde o eixo da fresa é perpendicular à superfície) ou,

Tangencial (onde o eixo da fresa é paralelo à superfície);

Quanto ao sentido de avanço:

Discordante (sentidos opostos, em um dado momento, das velocidades de corte e de avanço, a espessura do cavaco aumenta gradativamente até a saída da ferramenta, ocorre deformação plástica do material da peça na entrada da ferramenta, maiores esforços e vibrações na ferramenta) ou,

Concordante (mesmo sentido, em um dado momento, das velocidades de corte e de avanço, a espessura do cavaco diminui gradativamente até a saída da aresta de corte da peça, ocorre deformação plástica da saída da ferramenta e o atrito entre ferramenta e peça é maior).

A figura 2.7 ilustra o fresamento concordante e a figura 2.8 o discordante.

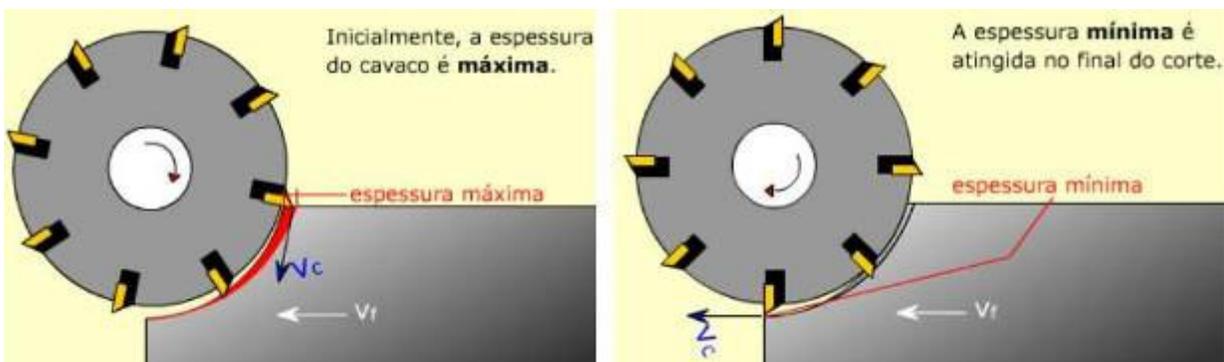


Figura 2.7: Fresamento concordante e a espessura do cavaco que diminui do início ao fim do corte, [CIMM, 2009].

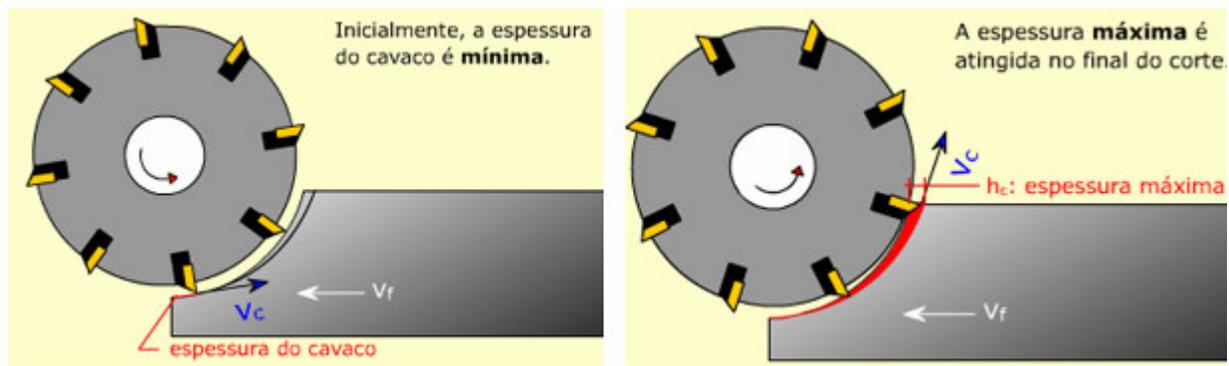


Figura 2.8: Fresamento discordante e a espessura do cavaco que aumenta do início ao fim do corte, [CIMM, 2009].

Como vantagem do fresamento concordante pode-se mencionar: menor desgaste da ferramenta, melhor acabamento; menor potência requerida para o corte e menor tendência à vibração porque a peça é comprimida contra a mesa.

Por outro lado, o fresamento discordante também apresenta algumas vantagens: melhor acabamento quando há folga no fuso da mesa da máquina-ferramenta. Também tem a tendência por reduzir uma possível avaria da ferramenta, principalmente quando a superfície da peça apresenta resíduo de areia de fundição proveniente de processos de forjamento.

Fresamento Frontal:

O fresamento frontal gera uma superfície normalmente perpendicular ao eixo da fresa. Ela também é plana. Pode ser considerado discordante se a espessura do cavaco aumentar ao longo do corte e concordante se ocorrer o contrário, [Coppini, 2006].

A profundidade de corte é menor que a penetração de trabalho ($a_p < a_e$).

No fresamento frontal onde a_e é igual ao diâmetro da fresa, ocorrem simultaneamente fresamento concordante e discordante. Tomando um dente em particular, primeiro ele se engaja em fresamento discordante. A espessura do cavaco que está se formando cresce até um valor máximo na linha que passa pelo centro da fresa e com direção igual à do avanço. A partir deste ponto o corte passa a ser concordante. A espessura do cavaco decresce até a aresta sair da peça.

Na figura 2.9, exemplo de fresamento frontal, a espessura inicial e a final do cavaco são teoricamente zero, [CIMM, 2009].

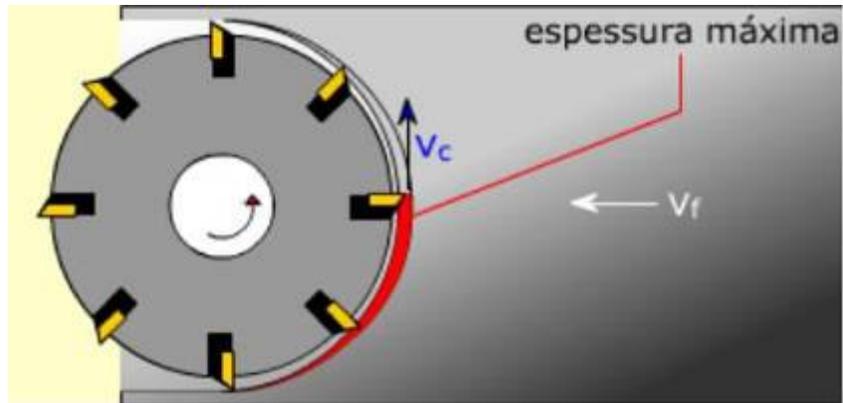


Figura 2.9: Fresamento Frontal com a_e igual ao diâmetro da fresa discordante enquanto a espessura do cavaco aumenta e concordante enquanto a espessura do cavaco diminui apartir do centro, [CIMM, 2009].

Forças radiais nos cortes simétrico e assimétrico:

O corte simétrico acontece quando o eixo de rotação da fresa coincide com o eixo de simetria da peça. O mesmo não ocorre no corte assimétrico, [Ferraresi, 1970].

Recomendações de fabricantes de ferramentas estabelecem que a melhor condição ocorra quando o diâmetro da fresa é maior (cerca de 30%) que a largura fresada e o corte se dê numa condição assimétrica. Com isso, quando da utilização do corte concordante, o choque da aresta com a peça, na entrada do corte deve ser aliviado. Esse choque acontece no corpo da pastilha, que é uma região mais resistente que a aresta propriamente dita, [Sandivik, 1994].

Este conceito é melhor observado na figura 2.10:

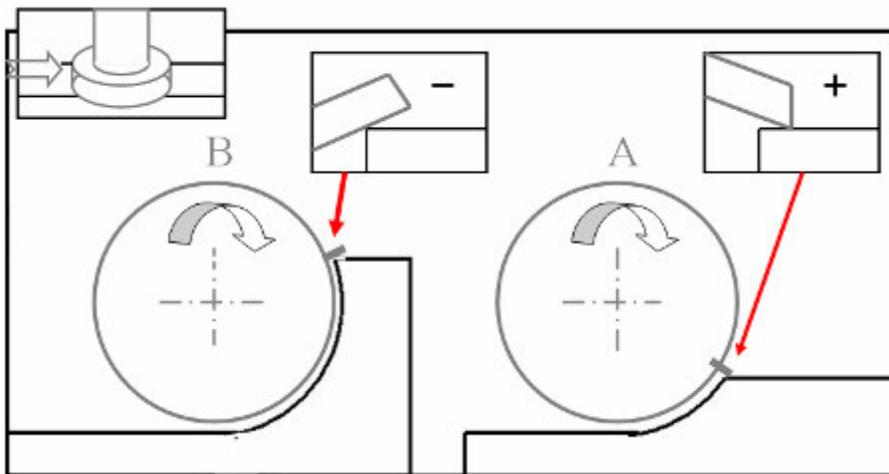


Figura 2.10: Posicionamento da pastilha no momento do choque do dente da fresa com a peça em B($a_e > D/2$) e em A($a_e < D/2$), [Sandivik, 1994].

No corte simétrico, as forças radiais mudam de direção durante a entrada na peça e são causadoras de vibrações e avarias prematuras das arestas, [Sandivik, 1994].

No corte assimétrico, a variação proveniente da direção da componente radial da força de usinagem é menor e propicia a redução da vibração. O parâmetro “j” define a defasagem da fresa em relação à peça. Se “j” for pequeno, o corte assimétrico será discordante e se “j” for grande, o corte será concordante. Valores menores de “j” reduzem a intensidade dos choques. Quanto menor a espessura do cavaco na entrada da ferramenta, menor energia de choque. Por outro lado, uma espessura de corte igual a zero na entrada do corte, causa elevado atrito e um aumento da força que tende a puxar a peça da mesa. A figura 2.11 mostra o crescimento da força radial com “j” tendendo a zero.

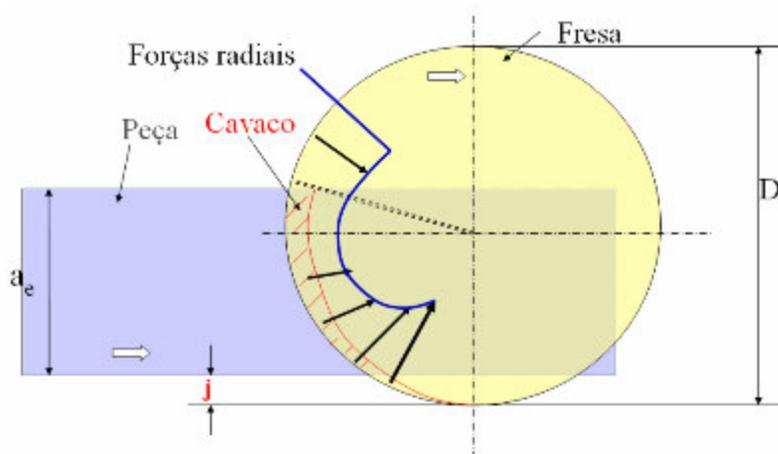


Figura 2.11: Direção e Módulo das forças radiais na condição assimétrica com a superfície fresada, defasada, da distância “j” em relação ao Diâmetro da fresa.

Testes realizados com “j” entre 3,8% (assimétrico discordante) e 26,2% (assimétrico concordante) do diâmetro da fresa em metal duro e pastilhas intercambiáveis, no corte de aço ABNT 1045, demonstraram um aumento na vida da ferramenta de 2,4% entre condições de assimetria discordante com o menor “j”, em relação à condição simétrica. Esta condição é especialmente importante quando a ferramenta é mais suscetível ao fim de vida por lascamento, [Diniz, 1999].

Uma sugestão que a prática recomenda: um “j” ajustado para 5% do diâmetro da fresa para aliviar o choque na pastilha.

$$\text{Equação 2: } \mathbf{j = 0,05 D, [Diniz, 1999]}$$

Existem outras considerações que dizem respeito ao número de insertos na fresa. Se esse número é reduzido, a potência de corte apresenta grandes oscilações e o número de dentes é grande, esta oscilação diminui. Nesta condição, a força média se aproxima da força máxima e assim, uma potência maior, é exigida no dimensionamento da máquina.

Quanto à geometria de corte:

A geometria de corte é decisiva no bom desempenho de usinagem. A figura 2.12 ilustra as possíveis situações.

Fresa com geometria duplo-negativa: ângulos de saída e de inclinação negativos. Grande deformação do cavaco e elevado esforço de corte. Dificuldade na eliminação dos cavacos que se enrolam em espirais. Recomendado em situações onde há risco de quebra da aresta cortante como no ferro fundido. Sua recomendação é para uso em materiais duros. Exige alta rigidez da máquina.

Fresas com geometria duplo-positiva: ângulos de saída e de inclinação positivos. Baixa deformação do cavaco e reduzido esforço de corte. Facilidade na eliminação do cavaco devido à sua forma helicoidal. Recomendado em situações onde se quer evitar o encruamento do material da peça, não-ferrosos, aços inoxidáveis e de baixo carbono. Apresenta menor consumo de energia que a duplo-negativa.

Fresas com geometria positiva-negativa: ângulos de saída radial negativo e de inclinação axial positivo. Grandes vantagens em desbaste pesado com cavacos helicoidais, pois o fluxo de cavaco nesse caso é favorável, [Diniz, 2006].

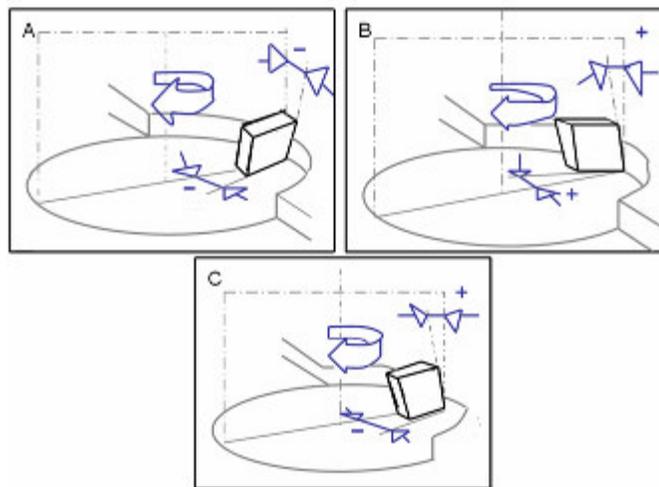


Figura 2.12: Geometria das fresas frontais de facear a)duplo-negativa; b)duplo-positiva; c)positiva-negativa, [Sandivik, 1994].

2.2.2. Parâmetros de corte:

No processo de fresamento existe uma série de parâmetros que descrevem quantitativamente os movimentos, as dimensões e outras características pertinentes à operação de corte.

Penetração de trabalho: a_e [mm] - É a penetração da ferramenta em relação à peça medida na largura trabalhada.

Profundidade de usinagem: a_p [mm] - É a penetração da ferramenta em relação à peça medida em profundidade.

Rotação: n [rpm] – É o número de voltas por unidade de tempo da fresa em torno do seu eixo.

Velocidade de corte: V_c [m/min] - é a velocidade com que o diâmetro de corte da fresa passa sobre a peça. A velocidade de corte do material removido é dada pela seguinte equação:

$$\text{Equação 3: } v_c = (\pi D n) / 1000 \text{ [m/min], [Engprod, 2009].}$$

Onde,

D o diâmetro efetivo de corte da fresa em “mm”;

n a rotação por minuto.

Avanço por dente: f_z [mm/dente] - a quantia removida no percurso de um dente de fresa, por rotação, na direção do avanço.

A equação que define esta grandeza é:

$$\text{Equação 4: } f_z = v_f / (n z) \text{ [mm/dente]}$$

v_f representa a velocidade da peça em relação à ferramenta em (mm/min);

n rotação por minuto;

z é o número de dentes da ferramenta;

k_c força de corte específica em N/mm².

2.2.3. O inserto de metal duro

O metal duro é o resultado da compactação e sinterização de uma mistura de pós de carboneto de tungstênio (WC) com outros pós como o de Co na proporção de 6% à temperatura de 1300°C. Conforme o sistema ISO (*International Organization for Standardization*), estes insertos são classificados em 3 classes de codificação. Como a classe diz respeito apenas à aplicação e às propriedades de resistência ao desgaste e tenacidade, ficou liberado para cada fabricante diversificar a composição química, estrutura e propriedades, podendo afetar a durabilidade. Quanto menor for o tamanho do grão do pó utilizado para produzir o inserto, maior é a dureza e resistência à abrasão. A temperatura também exerce grande influência na dureza do metal duro. Acima de 1000°C, sua dureza cai rapidamente, [Melo, 2001].

A classe K é indicada para usinagem de ferro fundido, mas também atende a classe dos não ferrosos, [Machado, 1999].

O processo de fresamento pode ser feito sobre uma superfície plana, sem mais interrupções do que a inerente ao processo. Este fenômeno favorece as trincas mecânicas por fadiga. Outro fator importante é que as arestas de corte são expostas a um maior número de oscilações de temperatura. Isso favorece as trincas de origem térmica, [Ferraresi, 1970].

Os desgastes e avarias nas ferramentas de corte são descritos pela norma ISO3685, [ISO 3685, 1993].

Os desgastes caracterizam-se por mudanças da ferramenta em relação ao seu estado original, devido ao processo de corte, de uma lenta perda de material ou deformação gradual durante um determinado período de tempo. A correta adequação de classe, geometria, sistema de fixação e dados de corte, bem como um bom preparo da mão-de-obra, contribuem para um melhor rendimento da ferramenta. No fresamento, a aresta da pastilha está em corte durante uma fração de rotação da ferramenta e a espessura do cavaco varia durante a usinagem. Em cortes interrompidos ou condições de cortes exageradas ou até mesmo quando do uso de ferramentas com geometria inadequada ocorrem às chamadas avarias, cuja característica é uma perda súbita de material, que resulta normalmente em perda instantânea da pastilha.

No livro “A História do Metal Duro”, de Francisco Marcondes (1990), são descritos os diversos tipos de avarias e desgastes possíveis em metal duro para operações de fresamento.

Fratura ou *Lascamento* caracteriza-se pelo desprendimento de pequenas partículas da aresta de corte e podem afetar a vida da ferramenta se não forem reduzidos a velocidade de corte

ou o avanço por dente. A quebra ou o lascamento da ferramenta de corte ocorre antes que um desgaste significativo aconteça. A fratura ocorre com mais frequência em cortes interrompidos devido à fadiga mecânica. A prevenção requer uma classe de metal duro mais tenaz, ou pastilhas com arestas mais reforçadas.

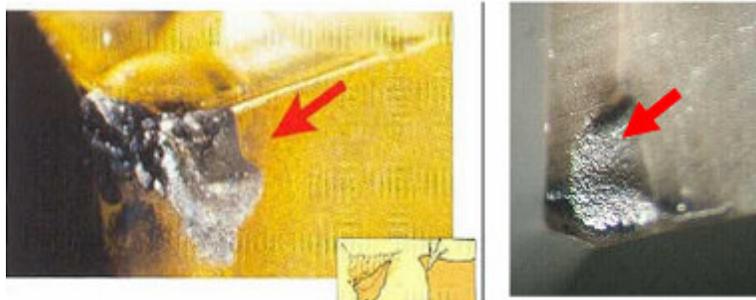


Figura 2.13: Fratura por Fadiga, Quebra e Microlascamento, [(Sandvik, 2002) apud (Ferrer, 2006)].

Fadiga térmica é originada da flutuação térmica sofrida pela ferramenta. São identificadas por pequenas fissuras perpendiculares à aresta de corte. O aparecimento repentino pode prejudicar a vida da ferramenta. Uma fresa de diâmetro menor, uma velocidade de corte ou avanço por dente menor reduz a temperatura da aresta e o efeito da fadiga térmica. Uma classe de inserto mais tenaz ou a ausência de refrigerante pode também contribuir positivamente para evitar tal efeito, [Melo et al, 2005].

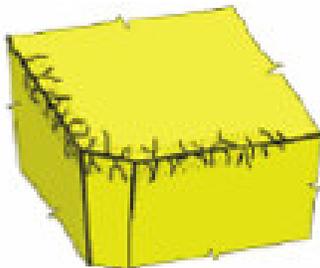


Figura 2.14: Desgaste por fadiga ou trinca térmica, [Eduardo et al, 2008].

Quanto aos desgastes que provém de alterações na geometria temos: [Coppini, 2006].

Cratera é observada na superfície de saída da ferramenta. Sua ação está associada à elevada velocidade de corte em aços. O material removido da ferramenta fica aderido no cavaco. Uma redução na velocidade de corte ou uma classe com maior resistência ao desgaste diminui a craterização.



Figura 2.15: Desgaste por craterização, [(Sandvik, 2002) apud (Ferrer, 2006)].

Aresta postiza é uma adesão do material fresado, mais maleável e pastoso como alguns tipos de aços inoxidáveis que soldam-se à aresta de corte e, quando o material soldado se desprende, arrasta pequenas partículas da aresta. Esta situação é gerada por baixas velocidades de corte.

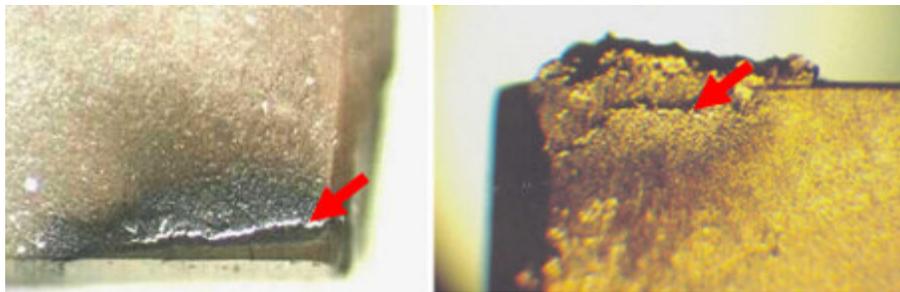


Figura 2.16: Desgaste por aresta postiza, [Ferrer, 2006].

Deformação Plástica é o resultado de altas temperaturas somadas com grandes forças de corte. Dados de corte inferiores ou uma classe de metal duro com maior resistência aos desgastes podem evitar este tipo de desgaste.



Figura 2.17: Desgaste por deformação plástica, [(Sandvik, 2002) apud (Ferrer, 2006)].

Desgaste de Flanco e Entalhe são responsáveis por modificar a superfície de folga da ferramenta e termina por afetar a dimensão da peça. A velocidade de corte contribui significativamente para isto.

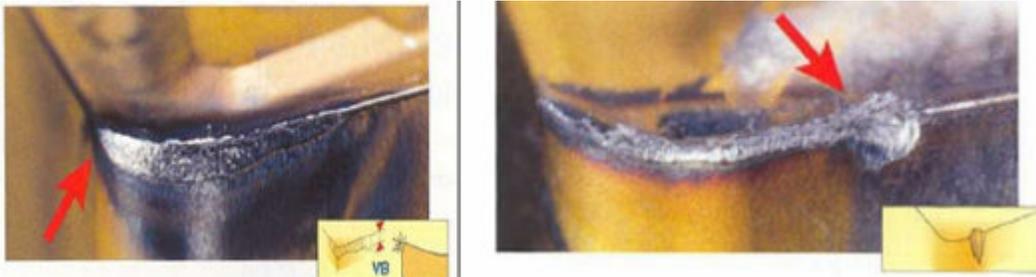


Figura 2.18: Desgaste de Flanco e Entalhe, [(Sandvik, 2002) apud (Ferrer, 2006)].

O critério normalmente utilizado para avaliar o desgaste de um inserto de metal duro é medi-lo no contorno das arestas. O desgaste de flanco é o mais adotado por apresentar uma evolução linear ao longo do processo, mas exige a remoção da ferramenta para sua avaliação. A medição do desgaste sempre exigirá um tempo de parada da produção. Existem outras variáveis de controle menos utilizadas conhecidas como VB_B que é o desgaste de flanco médio, o VB que é o desgaste de entalhe e o KT , KB ou KM , respectivamente profundidade, largura ou distância do centro da cratera. A norma ISO3685 estabelece para fim de vida, em ensaios de usinagem, VB_B igual a 0,3mm e VB_{Bmax} igual a 0,6mm. Quanto à KT o critério estabelece que esse seja igual a $(0,06+0,3f)$, onde f é o avanço da ferramenta dado em mm/rotação. Para a relação entre KT e KM , o limite deve ser igual a 0,1. Para VB o máximo deve ser igual a 1 mm, [Diniz, 1999].

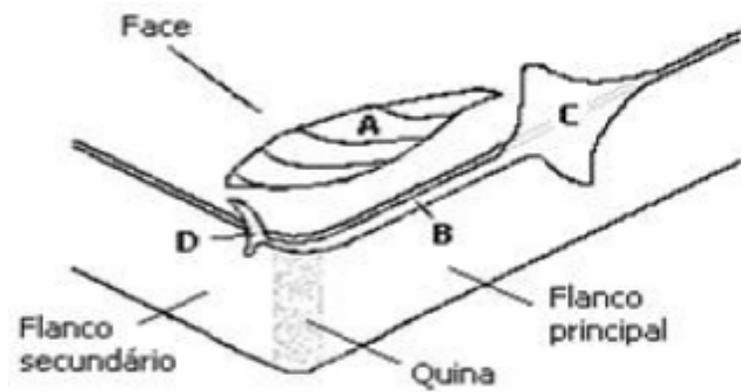


Figura 2.19: (A) Desgaste de Cratera (na superfície de saída da ferramenta); (B) de Flanco principal e secundário; (C) e (D) de Entalhe, [Eduardo et al, 2008].

2.2.4. Potência de corte necessária no processo de fresamento

O cavaco removido em um processo de fresamento tem sua espessura variável, em função da conjugação do avanço com a velocidade de corte. A potência necessária para realizar o fresamento também varia, de acordo com a espessura do cavaco. Vale lembrar que é comum, no fresamento, mais de uma aresta cortante estar em contato ao mesmo tempo. Teoricamente, a potência média pode ser obtida da potência máxima, segundo a equação 5.

$$\text{Equação 5: } P = (Q \cdot K_{sm}) / 6,12 \times 10^6 \text{ [kW]}, [\text{Marcondes, 1990}] .$$

$Q = (a_p \cdot a_e \cdot n \cdot z \cdot fz)$ é o volume de cavacos removidos em mm^3/min .

a_p é a profundidade de usinagem (mm);

a_e é a penetração de trabalho (mm);

n é a rotação/min.;

z é o número de dentes;

fz é o avanço por dente em mm/dente;

η é o rendimento da máquina;

K_{sm} é a força específica de corte média para cisalhar um cavaco de área de 1 mm^2 .

$$\text{Equação 6: } K_{sm} = K_{s1} \cdot (h_m)^{-z'} \text{ [Diniz, 2006]}$$

z' é a constante do material;

K_{s1} é tabelado e vale 1100 N/mm^2 ou $247,29 \text{ kp/mm}^2$ para o ferro fundido cinzento com dureza Brinell (HB) de 245 kgf/mm^2 , [Webcalc, 2009]

h_m no fresamento frontal, é a espessura média do cavaco.

A espessura média do cavaco tem sua forma variável entre o ângulo de entrada Φ_1 , e de saída Φ_2 da ferramenta e do ângulo de posição χ_r . Este parâmetro dá uma boa indicação da força média de corte e existe uma relação direta entre a força específica de corte média K_{sm} e a espessura média do cavaco é h_m .

$$\text{Equação 7: } h_m = (a_e \cdot 360 \cdot f_z) / (D \cdot 3,14 \cdot (\Phi_1 + \Phi_2)) \cdot \text{sen } \chi_r$$

A equação 7 é uma aproximação teórica e considera que a superfície fresada seja contínua e uniforme.

A energia mecânica desenvolvida no desbaste gera calor, que tem origem na deformação do cavaco, no cisalhamento primário, no atrito da ferramenta com a peça e no atrito do cavaco com a ferramenta. O tipo de usinagem, o material, a geometria da peça e da ferramenta, além das condições de usinagem influenciam não só a quantidade de calor gerado, como também a sua participação pelos componentes envolvidos. A figura 2.20 mostra as regiões mencionadas e a figura 21, a participação da energia de acordo com a velocidade de corte, onde se percebe um aumento da porção de calor que vai para o cavaco com o aumento da velocidade de corte. A usinagem deve ser feita de forma a respeitar os limites da ferramenta, pois com o aumento da temperatura, acelera-se o desgaste da ferramenta e conseqüentemente, aumenta-se o coeficiente de atrito e a força de corte necessária para o conjunto, [Coppini, 2006].

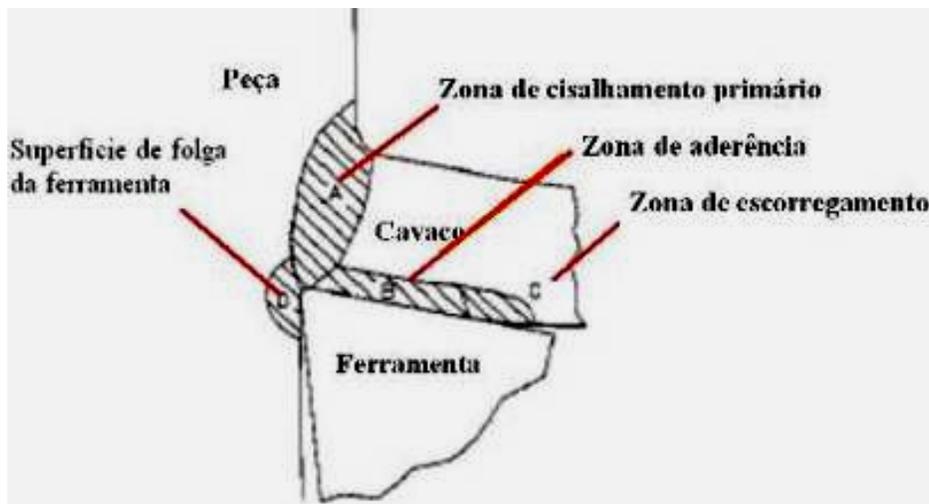


Figura 2.20: (A) Zona de cisalhamento primário; (B) Zona de aderência; (C) Zona de escorregamento e (D) Superfície de folga da ferramenta.

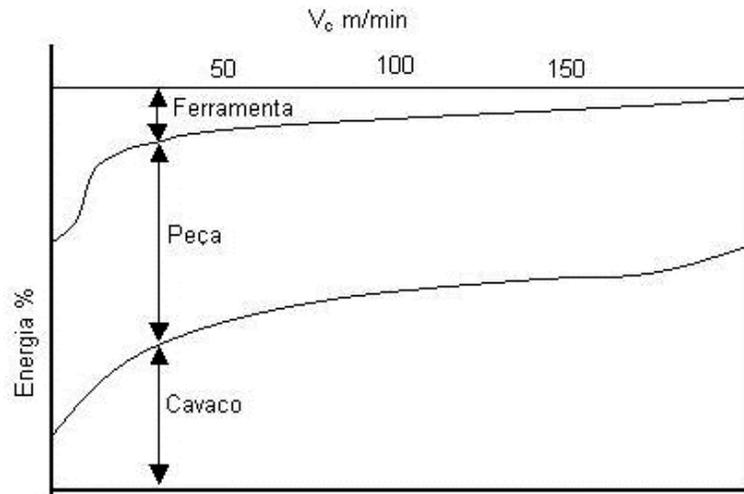


Figura 2.21: Variação da distribuição da Energia de Corte com a Velocidade, [Coppini, 2006].

A ruptura da aresta cortante deve ser evitada afim de não comprometer o acabamento superficial da peça, nem a sua precisão. Além dos desgastes, as avarias que acontecem devido aos sulcos em forma de pente e ao lascamento são muito frequentes nos fresamento, sendo que os limites de segurança para VB e KT não devem atingir um valor crítico que comprometa o inserto.

2.2.5. Energia utilizada na usinagem

A medição da energia utilizada durante a usinagem requer a adaptação de algum captor das vibrações mecânicas impostas pelo processo até um coletor externo. Cada tipo de captor, representado pelo transdutor, em particular, terá suas próprias características exigíveis de instalação para atender à melhor definição para a observação do fenômeno. Estes resultados dependerão da precisão do equipamento utilizado e das possíveis variáveis encontradas no processo. Diversos equipamentos têm sido utilizados neste estudo, sendo que alguns deles estão exemplificados abaixo:

A emissão acústica E.A.:

Uma aplicação na medição desta energia, em fresamento, utilizou a energia acústica proveniente da propagação da onda vibracional na rede cristalina dos materiais, no momento que tenta se reorientarem após um desarranjo. Variações na espessura de corte foram avaliadas com a utilização do princípio da dinâmica em torno de uma posição fixa. Os sinais são captados através de um sensor piezoelétrico. A emissão acústica depende do tamanho de grão, da densidade de

deslocamento e da distribuição de partículas de segunda fase. Esse experimento avaliou a energia cinética armazenada em função da elasticidade do material após aplicação de uma energia. O sistema era composto por um sensor piezoelétrico na faixa entre 25 e 600 kHz e um sistema de aquisição de sinais vibracionais composto por dois acelerômetros fixados: um no eixo-árvore e o outro na peça com sua operação na faixa de 0 a 15 kHz. O método demonstrou eficiência na leitura das forças impostas nos dois sentidos de corte, onde constata-se um esforço maior no sentido concordante. Também foi possível obter um bom monitoramento das características microscópicas do corte, [Maia, 2009].

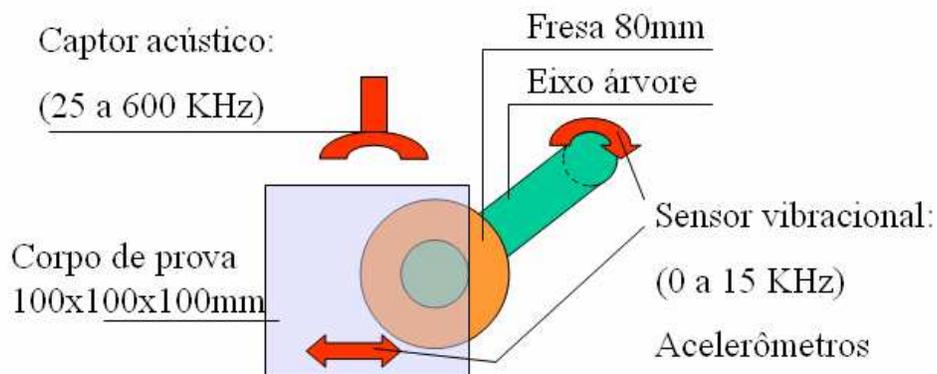


Figura 2.22: Esquema do conjunto: Sensor / Captor do sistema vibro-acústico composto por 2 acelerômetros e 1 captor acústico aplicado em um corpo de prova, [Maia, 2009].

Plataforma piezoelétrica:

Outro método utilizado na medição das forças de usinagem descrito na figura 2.23, utilizou um dinamômetro Kistler, modelo 9257 B, com placa de aquisição instalada em um computador AMD K6 e software *Dynoware*, com frequência de aquisição de 400 Hz. Foram analisadas as forças resultantes nos eixos X, Y e Z com a utilização da pastilha classe 4040 em um corpo de prova em fresamento frontal discordante. Foram mantidos constantes os valores de profundidade de usinagem e penetração de trabalho.

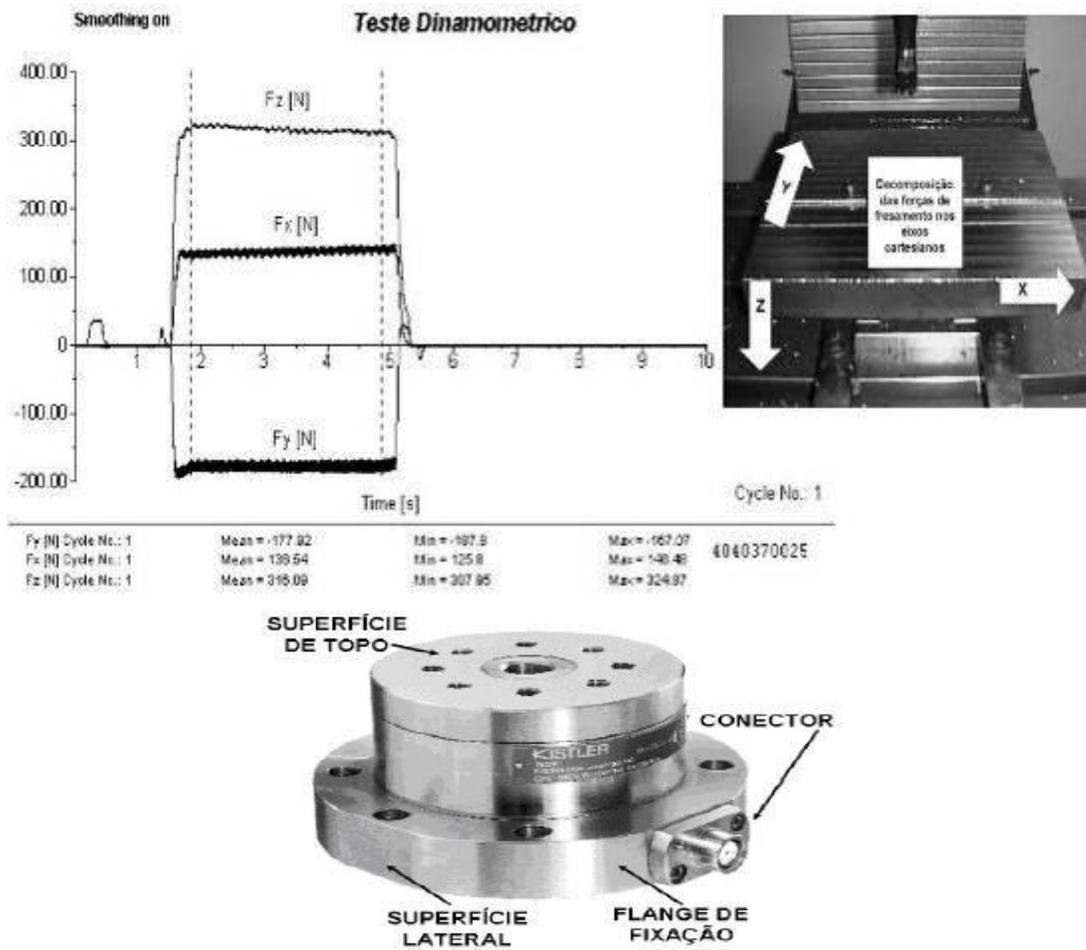


Figura 2.23: Forças de usinagem (N) em função do tempo (s). Pastilha da classe 4040 ($v_c = 370$ m.min⁻¹ e $f_z = 0,25$ mm/aresta) e uma vista do dinamômetro Kistler, [Ribeiro, 2006].

3. Procedimento Experimental

O experimento foi realizado no setor de usinagem do Bloco HS na fábrica de motores Diesel MWM International, em Canoas/RS, mais especificamente na fresadora duplex, operação 20, cujo código de controle é ME5796.

3.1.1. Bloco do Motor

Na figura 3.1 visualiza-se o bloco do motor que pesa aproximadamente 90 kg em bruto.

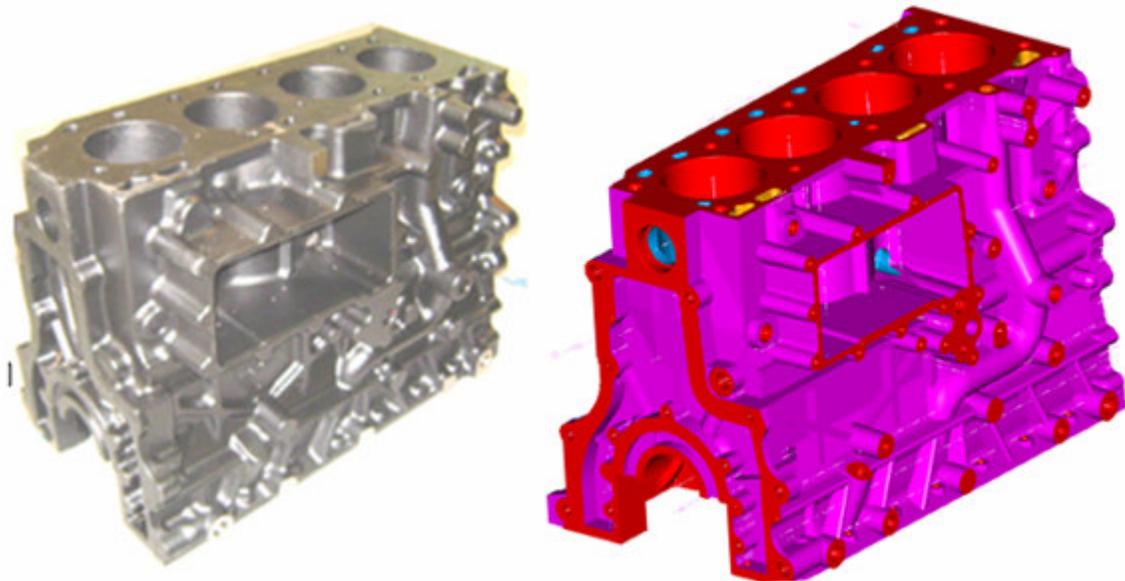


Figura 3.1: Bloco de motor.

O bloco utilizado nos testes é destinado à fabricação do motor Diesel NGD3.0 L, (especificação de projeto nº. 70280126). A microestrutura especificada é de ferro fundido cinzento perlítico com teor de ferrita menor que 5% em sua matriz. A grafita deve apresentar

características conforme a norma ASTM tipo A e B, tamanhos quatro a seis. A Tabela 3.1 apresenta as propriedades mecânicas exigidas.

Tabela 3.1: Especificações de projeto constantes no desenho do bloco do motor.

Material	Norma	Resistência à Tração	Dureza de Face	
			Cabeçote	Demais regiões
FC250	RES21FC01	184N/mm ²	200 a 255HB	187 a 255HB

A classificação FC250 é da norma da ABNT – NBR6589 que determina algumas propriedades mecânicas:

- Resistência à tração e ao cisalhamento: 250N/mm² mínimo ou 25 kgf / mm²;
- Resistência à flexão: de 350 a 490 N/mm² ou 35 a 49 kgf / mm²;
- Resistência à compressão: de 700 a 1000 N/mm² ou 70 a 100 kgf / mm²;
- Dureza Brinell de pré-carga HB30; entre 180 e 240 HB;
- Módulo de elasticidade: entre 105000 e 120000 N/m²;

A norma RES21FC01, publicada em junho de 1996 pela *Land Rover*, estabelece a composição química necessária para a fundição do bloco. Também faz referência à norma BS 1452 (*British Standards Institution, 1977*) para os procedimentos de ensaio mecânico de tração, bem como as condições de tratamento térmico, requerido além de detalhes específicos da microestrutura. Nesta norma está especificado que o tratamento térmico é feito pelo aquecimento a 660°C e um esfriamento lento a uma taxa máxima de redução em 50°C / h até chegar a 200°C, onde segue posteriormente, a um resfriamento lento ao ar.

Na Tabela 3.2 é especificada a orientação recomendada para a composição química do bloco segundo a RES.21. FC.01 (*Rover Engineering Standard, 1996*), onde o fósforo e o enxofre têm seus limites estabelecidos, mas não assumem caráter obrigatório para os demais itens, [Rover, 1996].

O bloco utilizado nos experimentos é de ferro fundido, FC250, conforme apresentado na tabela 5. As características do material foram fornecidas pela Fundição Tupy, e mostra uma variação no C_e entre 3,71 e 4,27. Como estes valores são inferiores ao ponto eutético (4,3%) o material é considerado hipoeutético. A designação FC ou GC, provém da sua classificação em diferentes normas FC (ABNT) ou GG (DIN), seguidas de seu limite de resistência à tração (MPa

ou bar), por exemplo: FC-250 ou GG25. Na determinação da densidade do ferro cinzento foi utilizado o mesmo procedimento feito por Arquimedes. Uma proveta, uma balança de precisão(g) e uma amostra de ferro cinzento. Enche-se a proveta com água pura até uma marca conhecida juntamente com a amostra e pesa-se o conjunto. Remove-se a amostra da proveta, anota-se o novo nível e pesa-se em seguida o tubo de proveta. Da relação entre as diferenças de peso e do volume deslocado obteve-se o valor de 7,35 kg/dm³.

Tabela 3.2: Composição química do bloco.

Composição	%
Carbono Total	3,10 a 3,45
Silício	1,85 a 2,45
Manganês	0,60 a 0,90
Enxofre	Mx. 0,12
Fósforo	Mx. 0,15
Níquel	Mx. 0,25
Cromo	0,10 a 0,30

A norma BSI 1452 de 1977 da *British Standards Institution*, estabelece os requisitos para retirada dos corpos de prova do bloco de motor. Esta norma é a guia de referência para a certificação do bloco de ferro cinzento. O lote de blocos, em questão, fornecidos pela fundição Tupy, apresentam os seguintes parâmetros:

Análise metalográfica: é um ferro fundido cinzento de grafita lamelar com matriz metálica do tipo perlítica. Grafita forma I, tipo A, tamanho 4 e 5.

As Tabelas 3.3 e 3.4 informam as características especificadas e encontradas após ensaios de dureza (HB) e tração para o bloco fundido.

Tabela.3.3: Dureza Brinell (HB) do bloco.

SUPERFÍCIE				NÚCLEO			
Mn.espec.	Mx.espec.	Mn.	Mx.	Mn.espec.	Mx.espec.	Mn.	Mx.
200	255	217	235	200	255	212	212

Tabela 3.4: Resistência a tração do Bloco (MPa)

Mn. Especificado	Valor medido	Valor mx. Medido
184	244	280

3.1.2. Máquina-ferramenta

Para a realização dos ensaios, foi escolhida a máquina que realiza a primeira operação de usinagem, remoção do sobremetal nas faces do carter e do cabeçote do bloco do motor. Ela é denominada, fresadora duplex, por dispor de duas fresas horizontais conforme pode ser observado nas figuras 3.2 e 3.3. O bloco é posicionado na parte interna da máquina, constituída de uma mesa que se movimenta entre as duas fresas. A fresa da direita usina a face do cabeçote enquanto a fresa da esquerda atua na face do carter. Cada fresa, juntamente com seu sistema de tração, desliza (perpendicularmente à peça) sobre apoios comandados por cilindros hidráulicos. Estes conjuntos possuem duas posições limitadas mecanicamente. Um deles é denominado batente final e está localizado à frente destes sistemas, enquanto o outro, ajustável, fica localizado do lado oposto à fresa, onde está o cilindro responsável pelos deslocamentos. As medidas intermediárias de deslocamentos são feitas através do ajuste de posição na porca do batente. Para efeito de avaliação da garantia deste posicionamento, foi realizada uma seqüência de recuos e avanços, repetitivos, com a utilização de um relógio apalpador. Desta verificação ficou constatada uma variação máxima de seis centésimos de milímetro, em ambos os lados, o que é considerado aceitável na faixa de tolerância, para esta operação, que é de um décimo de milímetro.



Figura 3.2: Fresadora Duplex em três vistas: o conjunto de duas fresas; o conjunto do dispositivo com a mesa e o cilindro de ajuste para batente de posicionamento intermediário.

A fresadora duplex é equipada com dois motores de 30 CV e um terceiro motor de 2,5 CV, todos com caixa redutora, apresentam resistência suficiente para manter estável o giro das fresas diante dos esforços exigidos no deslocamento da mesa que é responsável pelo movimento de avanço do bloco. Na lateral direita da foto da figura 3.2, mostra-se uma vista do cilindro que faz este controle.



Figura 3.3: Dispositivo de fixação da máquina com o bloco de motor fixado e a vista da face do cabeçote.

Para o acionamento dos motores, no controle de rotação, são previstos três inversores de frequência modelo WEG tipo CFW09. Apesar da possibilidade de ajuste de velocidades devido aos inversores de frequência, apenas o motor da mesa prevê, em projeto, troca de velocidades, a saber, movimento rápido e outro lento, ajustado por meio de potenciômetros. O movimento lento serve para garantir a velocidade de avanço prevista para a usinagem do bloco. Na parte de controle, a estabilidade de movimentos é garantida por um CLP.

A profundidade de corte está relacionada à quantidade de sobremetal da peça e também pode ser ajustada. Para este ajuste, conforme já descrito, existe um conjunto de válvulas e cilindros hidráulicos controlados pelo CLP. Existe uma chave no painel elétrico que permite alternar o funcionamento do sistema entre duas alternativas. A primeira consiste em cortar todo o sobremetal em um só ciclo, daí o deslocamento das fresas é feito até um batente final; a segunda possibilidade é realizar o corte em dois estágios, ou em dois ciclos de peça, com um intermediário e outro final. A posição limite que define a profundidade de corte está localizada sobre um batente mecânico. Apesar deste batente ser regulável, o mesmo acaba por assumir um aspecto fixo, devido ao caráter impreciso de seu ajuste. Esta regulagem só é feita a cada troca de fresas, onde o operador da máquina avalia esta posição e faz um ajuste com o objetivo de atender

a dimensão estabelecida em desenho. Esse ajuste não é fácil de ser feito, daí uma variação de profundidade de corte ao longo do lote de peças ser complexo. Essa situação dificultou o presente trabalho de mestrado. Por outro lado, quando a chave está ajustada na posição de profundidade de corte intermediária, é possível a remoção parcial de sobremetal. Além disso, não há comprometimento do ajuste da máquina. Neste processo a máquina opera com ajuste para um ciclo com profundidade de corte total. Vale lembrar que os ensaios foram adaptados às condições fabris, para que os resultados possam ser úteis para a empresa.

A fim de analisar as variações nos parâmetros de corte, foi feita a aquisição da corrente elétrica consumida pelos motores que impulsionam os sistemas mecânicos envolvidos no processo de usinagem. Esta visualização foi alcançada através do mostrador frontal de cada inversor de frequência (um para cada fresa) e a mesa, com a peça no dispositivo de fixação que também dispõe de um inversor de frequência.

3.1.3. Equipamentos de Medição e Leitura

Diversos equipamentos foram necessários para obtenção dos dados e posterior análise de resultados. Para permitir ajustar fisicamente a profundidade de corte, dentro dos limites definidos, foram utilizadas algumas ferramentas mecânicas de precisão, dentre eles, o paquímetro digital, o relógio apalpador centesimal e o calibrador de folga, em lâminas. Na avaliação de contorno superficial foi utilizado um rugosímetro. Para determinar a planeza da face da peça foi utilizada uma máquina com capacidade de medição tridimensional atendendo a norma ABNT NBR6409, vigente desde 4 de junho de 2006.

Na determinação do peso da peça, durante os ensaios, foi utilizada uma balança eletrônica com precisão em 0,05 kg. Um tacômetro digital permitiu obter a rotação das fresas. Para uma avaliação precisa da densidade do material utilizou-se uma proveta de 1000 cm³ e uma balança eletrônica semi-analítica com precisão em 0,1g.

Arquimedes propôs a equação 8 para determinar a massa específica de um corpo qualquer, baseado na relação entre o peso e o volume deslocado de um líquido quando nele é imerso uma amostra.

$$\text{Equação 8: Dens} = (M_f - M_i) \div (\text{Vol.f} - \text{Vol i}) [\text{g/cm}^3]$$

Em nosso exemplo a *massa inicial*, assume como o peso da proveta preenchida com água destilada a 20°C até uma marca suficiente para não transbordar quando a massa é mergulhada, definida como volume inicial. Posteriormente mergulha-se a amostra dentro da proveta. O novo peso e nível de água atingido, definem a massa final e o peso final. Com a aplicação dos dados obtidos na equação 8 obtém-se a densidade da amostra que ficou em 7,35 kg/dm³.

Para o sistema de aquisição de energia:

A corrente elétrica consumida monitorada pelos inversores de frequência para acionar as fresas, durante o deslocamento da mesa, foi outro conjunto de equipamentos específicos visualmente identificados na figura 3.4:



Figura 3.4: Inversores de frequência WEG - CFW09 e CLP Twido TWDLMDA20D-K mais duas placas de entradas analógicas TWDAMM3HT

O sistema de coleta é automático e independente do funcionamento da máquina, pois é controlado pelo CLP, modelo Twido da Telemecanique, além de dois anexos correspondentes a duas placas analógicas. Estas entradas analógicas estão configuradas para coleta da tensão (0 a 10 V), que tem correspondência com a corrente consumida pelos inversores de frequência. Esta equivalência situa-se na mesma escala de tensão. Durante o ensaio, o CLP informa ao supervisor o momento de início de leitura, que ocorre no exato instante em que uma micro-chave detecta o início do deslocamento lento da mesa, quando as fresas estão no início do corte. Os valores das leituras analógicas de corrente são convertidas em tensão, (numa escala de 0 a 10 V), que por sua vez é convertida em binário 12 bits (0 a 4095). Estas leituras são adquiridas ao longo dos testes. Foi aberta uma janela de aquisição com duração de 130 segundos, suficiente para que as fresas finalizassem o percurso de corte. No supervisor, criado especialmente em um microcomputador, são direcionadas as leituras efetuadas e essas passam por um acumulador dos

resultados com atualização a cada 0,5 segundo. Posteriormente, através de um gráfico integralizador, consegue-se visualizar a energia consumida no processo.

O coletor analógico preparado para este trabalho mostra dados digitais de corrente relativos a cada motor de fresa. O inversor CFW09 utilizado na máquina tem capacidade para 45 A e a tensão analógica de saída vem pré-ajustada, de fábrica, para o máximo, pré-definido, de 10 V. A corrente máxima consumida durante a usinagem atinge o patamar de 30 A, daí a saída analógica foi ajustada para indicar 100% quando atingir este patamar. Como o sistema eletrônico de coleta de dados tem uma resolução de 12 bits para monitorar 30.000 mA, cada bit de incremento corresponde aproximadamente a 7,32 mA. A indicação da corrente consumida, pelo motor, inclui uma parcela necessária para vencer o atrito mecânico da máquina. Nos testes, as fresas em rotação livre (com a mesma rotação usada em corte), sem corte algum, indicam um consumo de 11,6 A para a face do cabeçote e 12,2 A para a face do carter. Em função disto, esta parte da corrente elétrica registrada é posteriormente subtraída do total, para analisar-se apenas a corrente consumida na usinagem.

A potência dos motores, relacionada na equação 9, é proporcional à corrente consumida que pode chegar a 30A, à tensão utilizada, de 380 volts, à raiz quadrada de 3 e ao fator de potência $\cos \Phi$, em função dos motores serem de corrente alternada em sistema trifásico. O fator de potência dos 2 motores para potência máxima de placa é de 0,80. A potência de corte, relacionada na equação 10 é o percentual da potência calculada na equação 9, obtido dos experimentos, em cada caso.

$$\text{Equação 9: } \mathbf{P = U I (3)^{1/2} \cos \Phi \text{ [W]}}$$

$$\text{Equação 10: } \mathbf{P_C = P \times (\%P_{MAX.}) \text{ [W]}}$$

Da equação 9, a potência total de cada motor da fresa da máquina é:

$$\mathbf{P = 380V \times 30A \times (3)^{1/2} \times 0,80 = 15.770 \text{ [W]}}$$

Da equação 10, a potência total de cada motor da fresa da máquina é:

$$\text{No carter: } \mathbf{P_{c \text{ carter}} = 15770 \times (\%P_{max. \text{ do carter}}) \text{ [W]}}$$

$$\text{No cabeçote: } \mathbf{P_{c \text{ cabeçote}} = 15770 \times (\%P_{max. \text{ do cabeçote}}) \text{ [W]}}$$

Nos gráficos e tabelas, todos os valores foram referenciados em % de potência máxima da usinagem. Se a máquina não está em ação de corte, a indicação percentual é zero. Os dados de potência de corte podem ser obtidos em W, bastando multiplicar pelo fator 15770. A massa removida está expressa em kg. Para trabalhar-se com a massa por volume em “cm³”, é interessante criar um fator multiplicativo de 1000 dividido por 7,35 que é igual a 136. Para conversão em volume basta então, multiplicar-se a massa medida por 136. Os dados registrados na memória do CLP são transferidos via porta de comunicação serial “COM1” do computador, que acumula cada leitura digital, em intervalos de 0,5 segundo, através de um software elaborado em Visual Basic, onde forma uma tabela de duas colunas com o dado lido de cada fresa em um arquivo com extensão “txt”, onde a primeira coluna (%MW1.0) corresponde ao lado do carter e o %MW1.1, da direita, é o do cabeçote. Posteriormente é feita a importação dos dados para o formato Excel onde é subtraída a participação de corrente em vazio, de cada lado e em seguida calculado o percentual de potência, efetivamente utilizado.

3.1.4. Ferramentas de corte

As ferramentas de usinagem utilizadas consistiram de duas fresas, com capacidade para 50 insertos, cada uma, sendo que apenas 25 foram utilizados. As fresas são modelo: AUTO CAP L260.31.315.10 e AUTO CAP R260.31.315.10 da Sandvik Coromant e o inserto em metal duro é o TNHF 1204 AN3N, classe KC915M correspondente à classe K15 pela norma ISO apresenta o revestimento multi-camada em CVD, (TiN/MT TiCN/Al₂O₃). A geometria do alojamento é neutra, mas o inserto tem uma configuração de corte positiva, devido ao quebra-cavacos, [Sandvik, 2009].

Os parâmetros de corte recomendados em catálogo são: $v_c = 250$ a 350 m/min e $f_z = 0,05$ a $0,08$ mm/dente. A figura 3.5 mostra o inserto e a fresa utilizada.

O motivo da utilização de metade dos insertos é que anteriormente o desbaste e o acabamento eram feitos em uma única operação e utilizava-se inserto alisador. Posteriormente essas operações foram desmembradas e os insertos alisadores removidos, onde manteve-se apenas os necessários ao desbaste. O diâmetro nominal da fresa é de 350mm e o efetivo de corte é 315mm.



Figura 3.5: Inserto classe KC915M - TNHF 1204 AN3N

Fresas modelo: AUTO CAP L260.31.315.10 e AUTO CAP R260.31.315.10

3.1.5. Simetria das fresas em relação à peça

O nível de assimetria exerce grande influência na vida útil dos insertos. A figura 3.6, 3.7 e 3.8 expõe uma visão dimensional dos parâmetros relacionados neste aspecto: **J**, **D** e **a_e**.

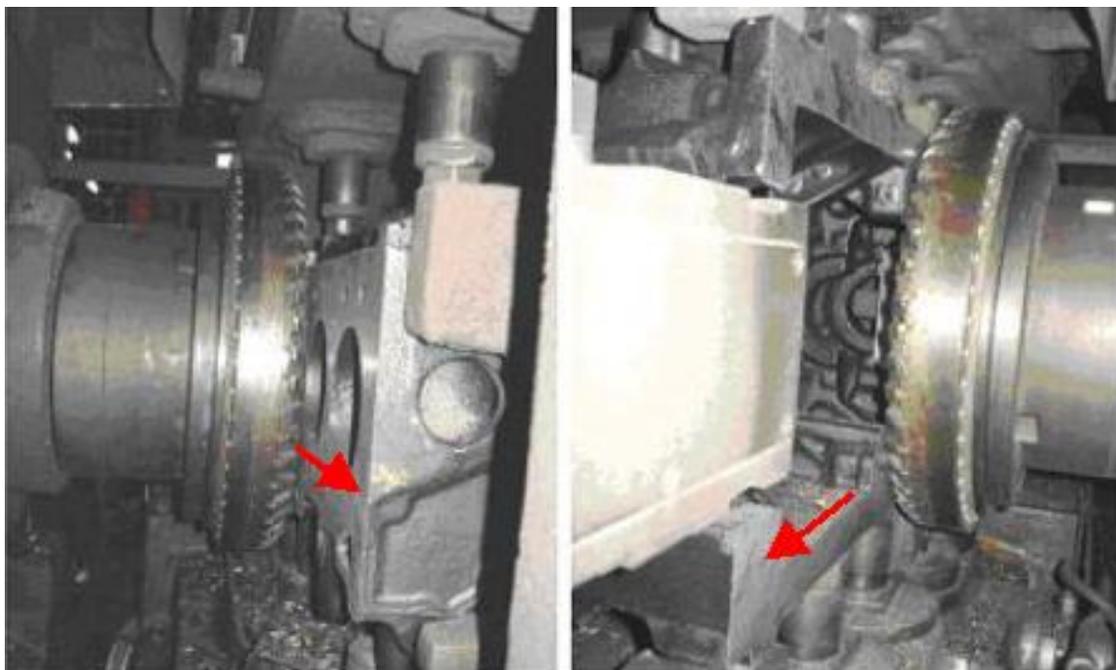


Figura 3.6: Visualização da posição das fresas à esquerda cabeçote e à direita o carter.

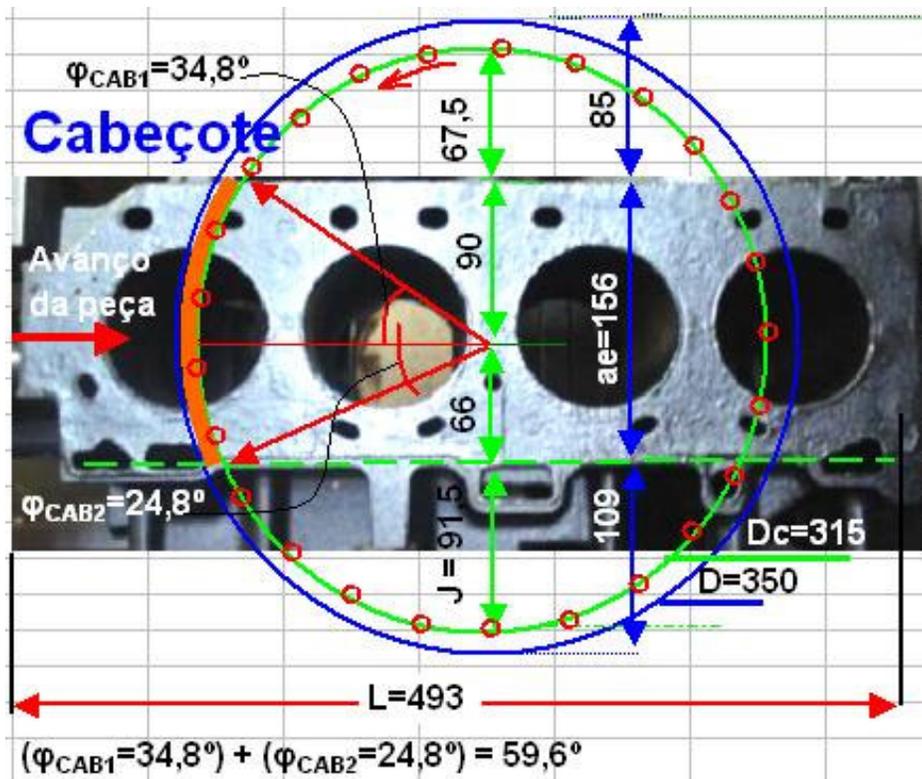


Figura 3.7: Esquema da peça mostra a simetria da fresa em relação à face do cabeçote.

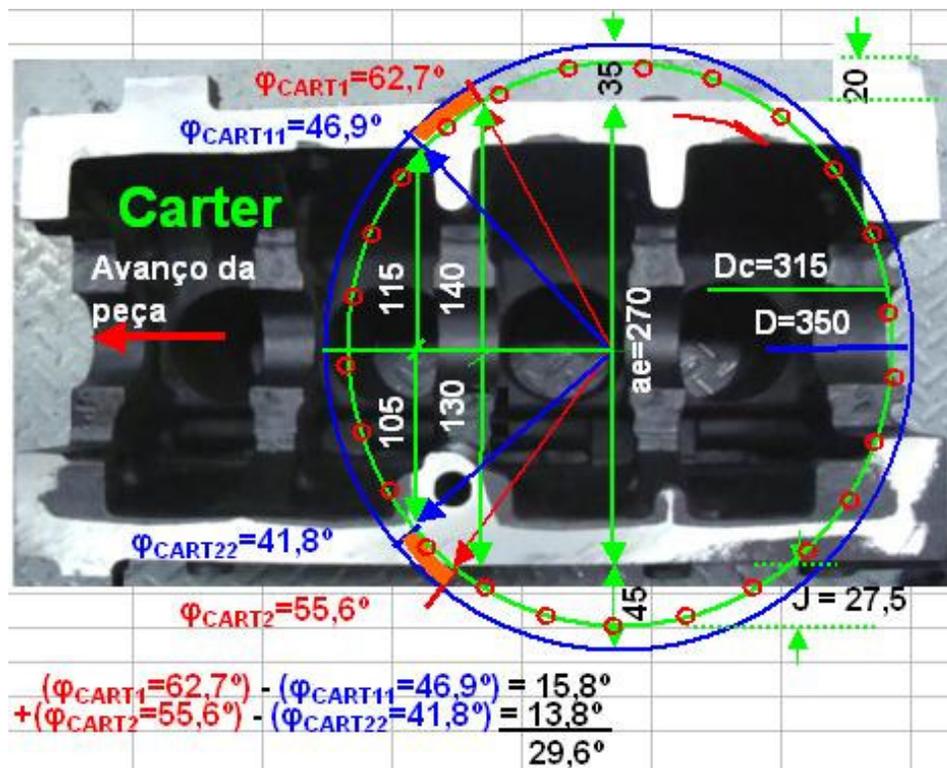


Figura 3.8: Esquema da peça mostra a simetria da fresa em relação à face do carter.

No presente trabalho, existem descontinuidades nas superfícies fresadas que geram maior número de entradas em corte da ferramenta e, conseqüentemente, maior número de impactos ao longo da vida da mesma. Nota-se que a face do cabeçote apresenta uma superfície a ser usinada maior, mas mesmo assim, a furação faz com que o fresamento seja mais interrompido ainda. A face do carter possui usinagem apenas na face superior das paredes do bloco, o que aumenta o número de entradas e saídas da ferramenta em corte, que por sua vez, favorece as avarias nas pastilhas.

Uma aplicação da equação 5 no cálculo da potência toma apenas “Q” como a taxa do volume em cm^3/min , para o tempo de 130 segundos (2,17 minutos) no experimento com variação de sobremetal, temos que basta multiplicar o volume removido em cm^3 pelo coeficiente 18,62. Esta constante é o resultado de: $(247,29 \cdot 1000) / (2,17 \cdot 6120)$, sem variações no avanço nominal e na rotação das fresas, desprezando o efeito do rendimento. A estimativa teórica da equação 5 em relação à medição feita está resumida na tabela 7.47 do apêndice item 7.5.2, pelas variações de volume de sobremetal removido, revelou-se uma aproximação de 81% do valor medido. Existe um outro procedimento para cálculo da potência média de usinagem dado pela Taegutec, que permite estimar a potência média a partir do preenchimento de parâmetros pré-estabelecidos, conforme identificado nas tabelas: 7.45, 7.46 e 7.47 do apêndice item 7.5.2, [Taegutec, 2009].

Na simulação do carter com $a_e = 270\text{mm}$ ou $a_e = 50\text{mm}$ (na estimativa de que o carter seja composto de uma única largura) temos a potência estimada em 10,74 e 1,91 kw, enquanto para o cabeçote, esta aproximação ficou em 7,35kW. Uma média das tabelas 7.22, 7.31, 7.37 e 7.43 para uma rotação e avanço nominal de 100% temos que $(5264+6828+6619+7617)$, numa indiferença quanto ao estado do desgaste dos insertos tem a média calculada em 6582kw. Se somarmos $1,91+7,35$ temos 9,26kw. Tratando-se de uma peça não maciça, ficamos numa relação de aproximação de 71% nas leituras realizadas. O calculado ficou maior porque desconsidera as falhas de material que existem na peça do ensaio, no caso de que o material utilizado fosse contínuo, o que não é verdade, mas válido como título de comparação.

3.1.6. Ensaio com variações de sobremetal

Foi feita uma avaliação preliminar do sobremetal existente no bloco, quando este chega da fundição. Foram feitas comparações entre o que é removido, em desbaste, e o que existe na forma bruta. Para tanto foi realizada uma pré-usinagem do bloco, interrompendo-se o corte, logo

após o início. Obteve-se assim, um degrau na superfície que permitiu a medição com um paquímetro digital, a profundidade removida. Com esta medição inicial, foi possível estabelecer os parâmetros para o início dos testes. Isso foi feito estabelecendo-se uma posição das fresas para o ciclo intermediário. Os testes iniciais revelaram que o sobremetal total na face do Carter, apresentou um valor aproximado de 3 mm, enquanto no lado do cabeçote, o valor médio foi de 4 mm. Da observação da figura 3.9 é possível visualizar o degrau gerado. Nesta operação, o bloco apresenta uma medida bruta de 357 mm entre as faces do carter e do cabeçote. No desbaste é removido 7 mm. Na operação seguinte (que não faz parte desse trabalho), é feito o acabamento na face do carter com remoção de 0,5mm, enquanto a face do cabeçote tem o acabamento numa operação, bem mais à frente na linha de usinagem, com remoção de 0,7mm. Assim, a dimensão final é 348,8 mm.

O primeiro experimento preliminar consistiu em regular a profundidade de corte das fresas em 0,5 mm no máximo. Observou-se que cada bloco que chega da fundição tem seu peso bruto estimado em 90 kg. Esta medida é apenas um valor estimado, que não possui exatidão confirmada, mas existem estudos realizados que identificaram um padrão de comportamento, há alguns anos, cujo resultado é mostrado na tabela 3.9:



Figura 3.9: Sobremetal: carter à esquerda e cabeçote à direita.

Tabela 3.5: Histórico de variações no sobremetal nas faces e no peso do bloco.

Sobremetal - (a_p , Peso)						
Variações de a_p (mm)	ano 2004 (amostras = 10)			ano 2009 (amostras = 150)		
	Cabeçote	Carter	Peso(kg)	Cabeçote	Carter	Peso(kg)
Maior	3,80	3,80	2,50	-	-	91,20
Menor	2,80	2,70	2,05	-	-	90,35
Média	3,30	3,25	2,28	4,00	3,00	2,06 (DP = 0,08)

As variações de peso podem ter origem nas variações residuais de contorno provenientes da fundição ou na troca de uma matriz.. Nas peças analisadas observou-se que este peso oscila em média +/- 1 kg. Em função disto, com o intuito de conhecer-se a quantidade de material removido, foram pesados os blocos, em bruto, antes da usinagem. Posteriormente os blocos foram pesados, mais duas vezes, após o passe intermediário e final. Em todas as pesagens foi usada uma balança eletrônica. Esta forma de avaliação é a maneira mais prática e precisa, porque o material é removido na forma de cavacos em poeira metálica na impossibilidade do seu agrupamento para posterior pesagem.

Nos primeiros ensaios, foram mantidos todos os parâmetros de corte menos a profundidade de corte. Uma seqüência de testes foi feita para avaliar o contorno superficial e a proporção relativa de energia envolvida nos diversos níveis de remoção. Foram estabelecidas cotas de forma a possibilitar a avaliação, de cada diferença comparativamente. Atribuiu-se como nível zero, o ponto em que a peça teve todo seu sobremetal removido. Assim as cotas usinadas ficaram estabelecidas para iniciar em 0,5 mm, prosseguir em 1,0mm, 1,5mm, 2,0mm até o limite de 2,5mm, em ambas as faces, a partir da medida zero ou final. Em outras palavras, com esse procedimento foi possível usar-se com profundidades de corte na variação de 0,5mm a 2,5mm com incremento de 0,5mm. Isso fez com que fosse possível avaliar-se a condição pós usinagem de cada passada e visualizar o sobremetal necessário, em termos de usinagem. As figuras 3.10 e 3.11 mostram estas cotas.

O nível dito final é a medida limite da peça para esta operação. A espessura dita intermediária compreende a diferença de material encontrada entre a face bruta e o nível intermediário, que por sua vez é aquele, após uma primeira usinagem, feita na face em bruto. Nestes testes iniciais, foram variadas a espessura final ou o nível intermediário.

A definição da melhor espessura ou do melhor sobremetal, em termos de usinagem dependerá dos resultados obtidos ao longo dos testes. A dimensão do nível intermediário é alcançada através do ajuste feito no cilindro do batente intermediário. Para cada ajuste destes batentes, é feita uma confirmação das medidas com um paquímetro digital, nas faces do carter e do cabeçote.

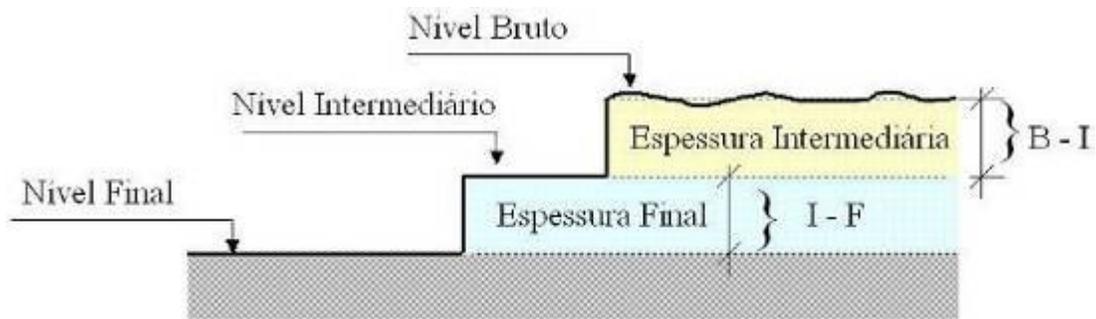


Figura 3.10: Esquemática das cotas e espessuras envolvidas na remoção de sobremetal tanto na face do carter como na face do cabeçote.

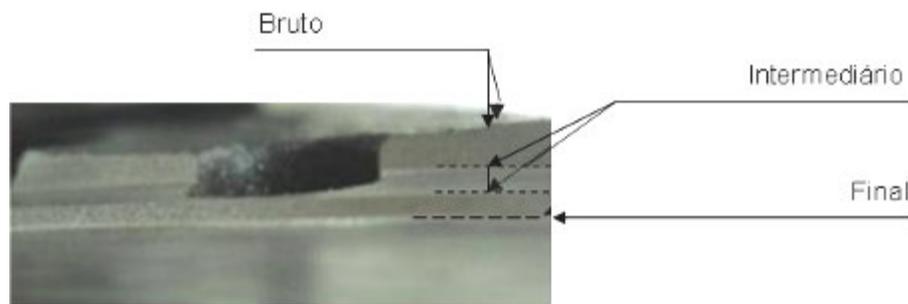


Figura 3.11: Visualização das saliências obtidas após remoções parciais de sobremetal resultando em degraus distintos entre as faces bruta, intermediária e final.

A título de estudo, foi registrado o peso do bloco de motor antes da usinagem intermediária e após usinagem final. Para cada dimensão diferente, de sobremetal, foi destinada uma amostra contendo cinco peças para avaliação.

3.1.7. Ensaios com variação na velocidade de corte das fresas

Neste ensaio, variou-se apenas velocidade de corte das fresas, mantendo-se a profundidade de corte total (utilizada no processo atual), 4 mm na face do cabeçote e 3 mm na do carter, bem como o avanço de 280mm por minuto. As variações foram feitas em intervalos de aproximadamente 5 em 5% acima e abaixo da velocidade de corte utilizada no processo atual até o limite de mais 15% e menos 20%, no total. As velocidades de corte, em cada face do bloco, são diferentes. Neste momento, são avaliadas as energias consumidas em diferentes velocidades de corte e essas serão associadas com a quantidade de massa removida. É conhecido, da máquina, que o conjunto, tanto mecânico quanto elétrico com seus inversores de frequência, têm capacidade suficiente para não se alterar diante de variações no torque, provenientes da carga,

motivado por variações no fundido. Segundo o inversor de frequência, a rotação é mantida constante, conforme pré-programação imposta no parâmetro 133 do fabricante. A lógica determina que estas variações de carga se reflitam diretamente na potência final consumida no corte. Como a potência despendida no corte, é basicamente, o produto da corrente consumida pela tensão de trabalho, e esta tensão, não se altera, toda dinâmica do processo é refletida na corrente consumida em cada inversor. Uma vez que a energia medida, em forma de corrente elétrica, no inversor de frequência, representa o somatório de todas as cargas mecânicas envolvidas, novamente é preciso subtrair-se a energia necessária para vencer a inércia, ou seja, medida com a máquina rotacionando em vazio, como foi feito no item 3.1. Porém, ao variarem-se as rotações das fresas, através da alteração do parâmetro 133 do inversor, em corte e em vazio, aparecem valores divergentes de corrente para cada *preset* de velocidade. Este efeito se deve ao rendimento da máquina. O atrito entre os componentes dos sistemas de transmissão de uma máquina ferramenta consome parte da potência entregue e é variável com a rotação. Como o objetivo é conhecer a relação de velocidades de corte com a energia consumida para remoção do material, deve-se conhecer, de antemão, o rendimento do motor em cada rotação para que se possa subtrair o devido valor oriundo dos esforços de atrito e assim, destacar a energia de interesse para posterior comparação. Baseado nestes fatores, foram realizados ensaios preliminares com a máquina em vazio, para conhecimento da corrente consumida que agora assume comportamento variável. A tabela 7.1 mostra a corrente gasta em vazio com o respectivo parâmetro de velocidade e rotação de cada fresa na face do carter e cabeçote. As figura 3.12 e 3.13 mostram os gráficos, referente à tabela 7.1. Nessas figuras, visualiza-se que a corrente em vazio inicialmente decresce com o aumento da velocidade de corte, atinge um mínimo e, posteriormente, cresce. Na máquina usada nos experimentos, a parametrização adotada para o inversor é a mesma para os dois lados, mas as rotações são diferentes, porque a relação de transmissão é diferente. Em função disso, as correntes elétricas consumidas também são diferentes. Portanto, a tabela 7.1 do anexo 7 gera duas curvas independentes. A redução do sobremetal gera economia de energia, fato confirmado a partir das observações realizadas no item 3.1.

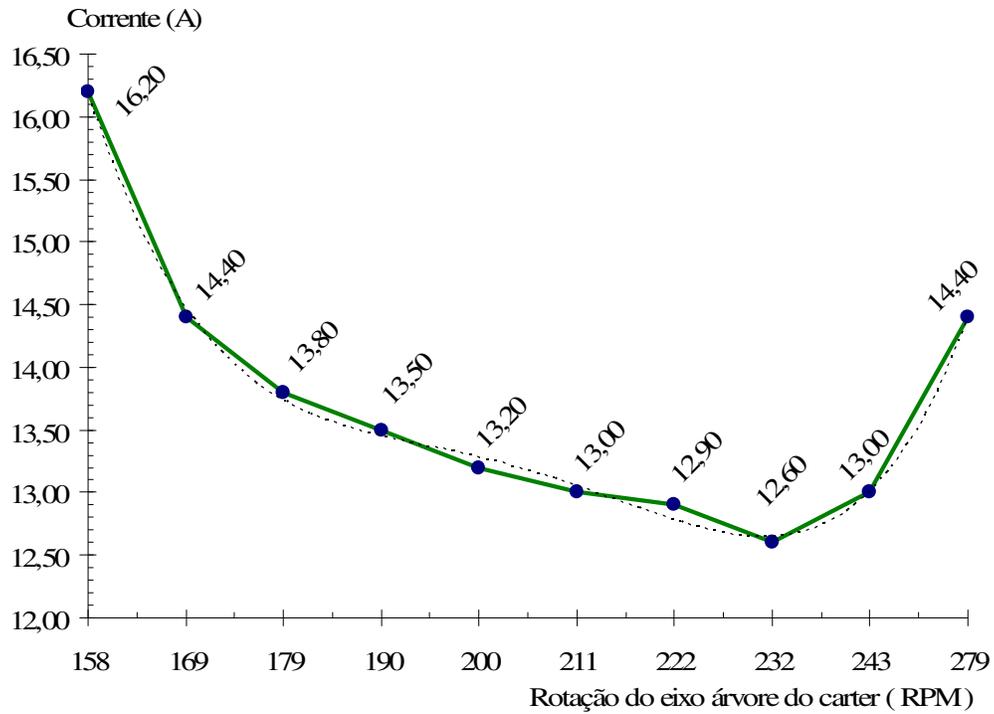


Figura 3.12: Relação de corrente (A) em vazio do carter em função da velocidade.

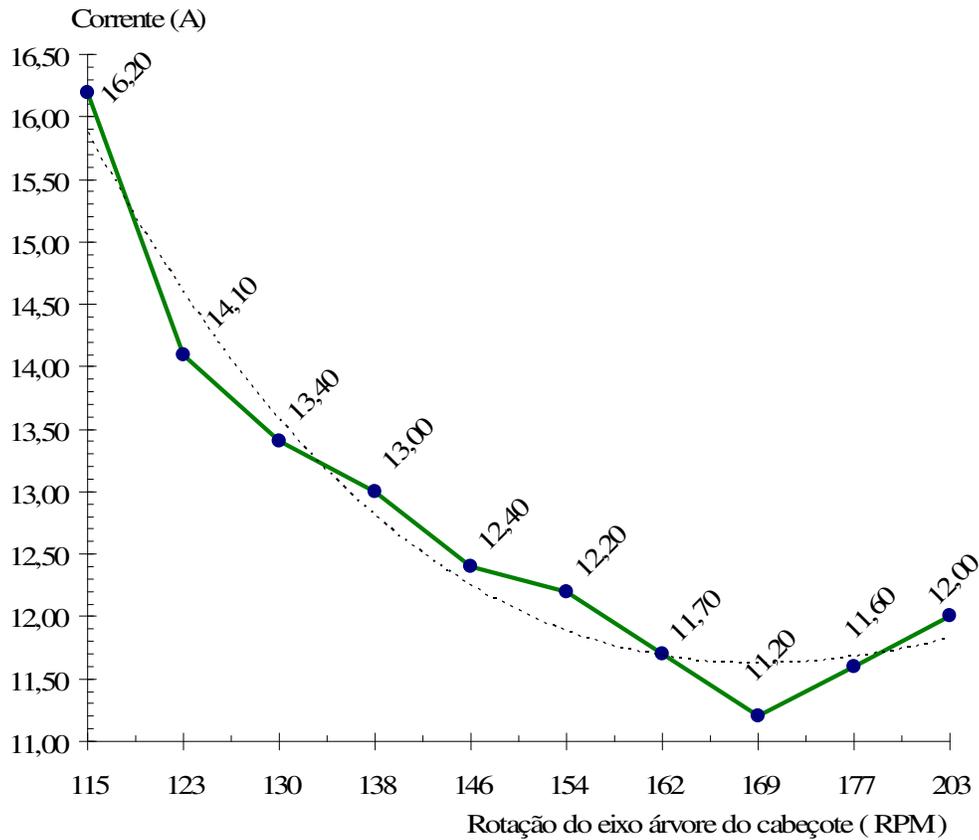


Figura 3.13: Relação de corrente (A) em vazio do cabeçote em função da velocidade

Da análise da tabela 7.1 ou as figuras 3.12 e 3.13, é possível determinar a velocidade de melhor rendimento, ou seja, aquela em que a corrente “A” apresenta menor valor. Sob a óptica da máquina, em relação à face do carter, o melhor rendimento, em vazio, ocorre em uma velocidade de corte aproximadamente 10% maior do que a utilizada. Cabe lembrar que quando existe o esforço de usinagem, outras variáveis aparecem, mas uma análise, mais completa, será feita futuramente.

3.1.8. Ensaio com variação na velocidade de avanço da mesa

Em todos os experimentos anteriores, foi fixada uma quantidade de leituras no CLP (260) distribuídas no tempo necessário para a fresa concluir o corte. Foi especificada uma velocidade de avanço nominal da mesa, ajustada no parâmetro 134 do CLP (880). O experimento foi conduzido com variação de 10% e 20% (para mais e para menos em relação ao valor nominal) no parâmetro correspondente ao ajuste de velocidade do inversor de frequência. Com as alterações no parâmetro 134 do inversor de frequência, foi possível alterar-se a rotação do motor de acionamento da mesa para que essa atingisse diferentes velocidades, conforme pode ser visto na tabela 3.6. Durante o experimento foi necessário realizar o mesmo procedimento anterior de ir pesando cada bloco bruto antes e após a conclusão da operação. Em todos os experimentos anteriores tínhamos uma quantidade fixa de leituras, onde no CLP fixávamos em 260 leituras, o tempo necessário para a fresa concluir seu trabalho, finalizando a remoção de material na peça. Era utilizado o avanço nominal da mesa tendo o inversor fixado o parâmetro 134 de velocidade máxima fixado em 880. A relação percentual de velocidades se mostrou constante como previsto e ficou em 80; 90; 110 e 120% da nominal.

Tabela 3.6: Relação dos parâmetros do inversor de frequência para diferentes % de velocidades de avanço da mesa e o respectivo tempo de fresamento das faces da peça.

Ajuste	Veloc. %	Parâmetro 134	T(s)/metro	Avanço (mm/min.)	T (s)
1	80	704	268	224	163
2	90	792	236	252	139
3	100	880 (nominal)	214	280	133
4	110	968	196	306	115
5	120	1056	178	337	110

Considerando os parâmetros de corte variáveis com a rotação e atendendo às formulações descritas no item 2.2.2, equações 3 e 4, foi possível construir-se a tabela 3.7 com os possíveis valores para o avanço por dente.

Distribuído no eixo horizontal estão os ensaios efetuados com variação apenas no avanço da mesa, na faixa verde, mantendo a velocidade de corte constante. Distribuído no eixo vertical estão os ensaios que aconteceram com variação na velocidade de corte, na faixa azul, mantendo o avanço da mesa constante. Os limites aconteceram entre 0,046 e 0,091 mm/dente para velocidade de corte e entre 0,042 e 0,087 para a velocidade de avanço, na faixa verde, sendo que a nominal iniciou com 0,053 mm/dente, no carter e 0,072 mm/dente para o cabeçote, na faixa laranja, na região em que iniciaram os ensaios sem variação no avanço nem de velocidade de corte das fresas.

Tabela 3.7: Velocidade de corte (v_c) e avanço por dente (f_z) para diferentes velocidades de avanço (v_f)

Velocidade de corte			Velocidade de avanço (mm/min)									
			224 (80%)		252 (90%)		280 (0%)		306 (110%)		337 (120%)	
%	carter	cabeç.	carter	cabeç.	carter	cabeç.	carter	cabeç.	carter	cabeç.	carter	cabeç.
	v_c (m/min)		f_z (mm/dente)									
-20	167	122	x	x	x	x	0,066	0,091	x	x	x	x
-15	177	129	x	x	x	x	0,062	0,086	x	x	x	x
-10	188	136	x	x	x	x	0,059	0,081	x	x	x	x
-5	198	144	x	x	x	x	0,056	0,077	x	x	x	x
0	209	152	0,042	0,058	0,047	0,065	0,053	0,072	0,058	0,079	0,063	0,087
5	220	160	x	x	x	x	0,050	0,069	x	x	x	x
10	229	167	x	x	x	x	0,048	0,066	x	x	x	x
15	240	175	x	x	x	x	0,046	0,063	x	x	x	x

4. Resultados e Discussão:

4.1. Avaliação da energia consumida com variação na penetração de trabalho “ a_p ”

Tanto a face do carter como a face do cabeçote apresentam características próprias de contorno e área. Cada contorno apresenta um comportamento variável conforme a espessura retirada. Baseado, nisso, foram agrupados os gráficos de energia intermediária e final, específicos para o carter, o cabeçote e o somatório de ambos. Conforme já relatado, os valores apresentados nos gráficos são o resultado de uma média de cinco peças por amostra.

Energia consumida para remoção na espessura intermediária:

É a energia relativa à remoção do sobremetal iniciando da face em bruto. O objetivo é fornecer um maior controle da profundidade de corte do segundo passe. Essa operação foi monitorada por fazer parte do processo da peça. Portanto, a variação de sobremetal é inerente, principalmente pelo fato do bloco ser fundido. A figura 4.1 mostra os dois perfis fresados bem como a direção descrita pela peça às fresas.

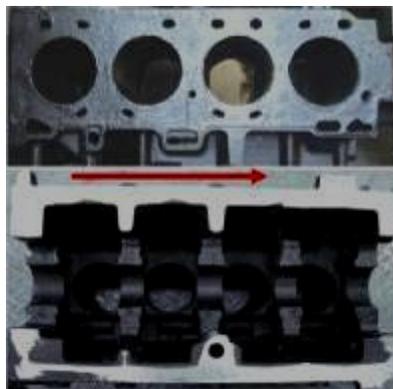


Figura 4.1: Perfil das faces do cabeçote (acima) e carter (abaixo) com início de usinagem à direita conforme deslocamento da peça na direção das fresas.

A figura 4.2 mostra o comportamento da potência consumida no fresamento da face do carter em diferentes profundidades de corte. Vale ressaltar que as dimensões da legenda indicam a distância medida a partir da face bruta, ou seja, o parâmetro da profundidade de corte a_p do carter, em uma progressão de 0,5 mm até 2,5 mm. A última aproximação de a_p em 2,5 mm representa uma aproximação de 0,5 mm da face final usinada de um total previsto de 3 mm. Outro ponto importante a ressaltar é que o ângulo entre duas pastilhas é $14,4^\circ$. Da figura 3.8 pode-se observar que o ângulo de entrada da fresa na peça é $55,6^\circ$, na parede inferior e $46,9^\circ$ na parede superior da figura. Além disso, os ângulos de contato são $13,8^\circ$ e $15,8^\circ$ respectivamente. Com isso, nota-se que o corte se dá, considerando-se que uma aresta está iniciando o contato na parede inferior, da seguinte forma: 1 aresta iniciando o contato e outra sobre a parede superior em $62,7^\circ$; após uma rotação de $1,7^\circ$ um segundo dente entra em corte sobre a parede superior; rotaciona-se mais $1,4^\circ$ o dente que estava em contato inicialmente sai do corte; rotaciona-se mais $10,7^\circ$ e o dente sobre a face inferior sai do corte; rotaciona-se mais $0,6^\circ$ e um dente entra em corte sobre a face inferior e o ciclo se reinicia. Isso dá uma sequência de 1, 3, 2, 1, 3 dentes em contato com a peça. Outro detalhe importante é que existem trechos nas paredes do bloco que apresentam maior largura a ser cortada. Nesses casos, tomando-se a parte externa da parede como início do corte, a saída dessa primeira parede se dará à frente, nessa mesma rotação ocorrerá nova entrada a $55,6^\circ$ e saída a $118,3^\circ$. Isso representa 6, 5, 4 e 5 dentes em contato numa dada rotação, com posterior repetição desse ciclo. Isso mostra os demais patamares do gráfico.

Face do carter:

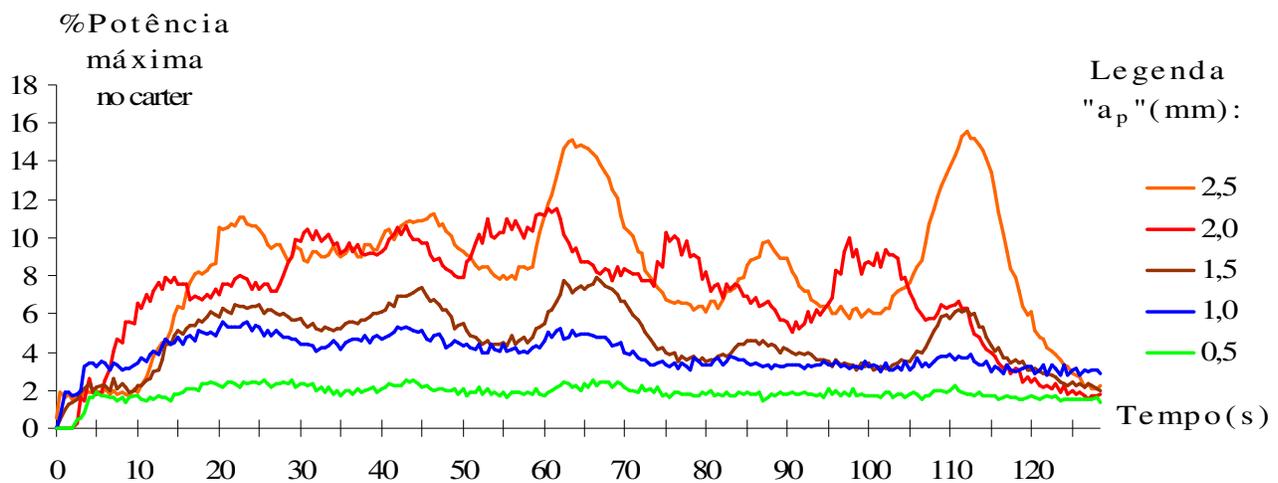


Figura 4.2: Face do carter – % da Potência máxima de aproximação para remoção do sobremetal variando a_p entre 2,5mm e 0,5mm.

Vale lembrar que como é feita uma aquisição de potência a cada 1,8 volta, alguns patamares não foram retratados. Nesta taxa de aquisição coleta-se 1 ponto a cada 45 contatos dos insertos na peça.

Da figura 4.2 observa-se que existem 3 patamares distintos para os níveis 2,5mm, 2,0mm e 1,5mm. Isso corresponde à sequência mostrada anteriormente de dentes em contato. Para os níveis 1,0mm e 0,5mm, esses patamares de consumo de potência não são observáveis, provavelmente porque houve falhas na usinagem, ou seja, a presença de 1, 2 ou 3 dentes em contato não representaram que esses estavam efetivamente cortando, ou pelo menos não estavam cortando com a profundidade de corte nominal. Isso pode ser observado nas figuras 4.28 a 4.34, que mostram fotos da face do carter usinada. Vale lembrar que 211 rpm corresponde a 3,5 rps. Como o intervalo entre as leituras é de 0,5 s, cada leitura corresponde a 1,8 rotações. Isso possibilita uma visão macro da usinagem. Não é possível visualizar detalhes da operação como saídas e entradas de dentes em corte, mas é possível ter uma visão global da operação. Para uma visão mais detalhada, a taxa de amostragem ou os intervalos entre as leituras deveria ser menor, algo da casa de 0,05 s, 176 Hz, por exemplo. Por outro lado, uma leitura como a que foi feita nesse trabalho, possibilita visualizar a potência média que está sendo consumida no corte.

Face do cabeçote:

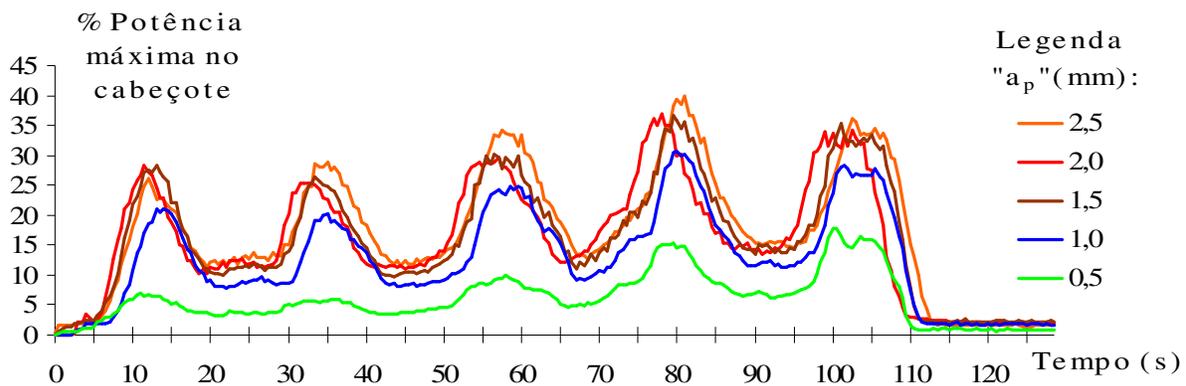


Figura 4.3: Face do cabeçote – % da Potência máxima de aproximação para remoção do sobremetal variando a_p entre 2,5mm e 0,5mm.

Analisando-se as figuras 4.2 e 4.3 nota-se que a face do cabeçote é mais homogênea em termos de continuidade da usinagem do que a face do carter. Nesse caso, tem-se a usinagem das paredes e dos furos que são simetricamente distribuídos. O ângulo de contato é de 59,6 °, que apresenta 4,8 dentes em contato, ou seja ora 4 dentes em contato ora 5, sendo que na maior parte

do tempo ocorre essa última situação. Por outro lado, o furo possui 87 mm de diâmetro que implica num ângulo de contato (considerando o diâmetro maior) de 34,8 °. Esse ângulo de contato corresponde ao espaçamento de 2,2 dentes. Portanto, quando do corte sobre o furo, 2,6 dentes estão em contato. Isso quer dizer que o contato oscila entre 2 e 5 dentes. Na figura 4.3, esses 4 patamares não são nitidamente distintos. Percebe-se apenas dois patamares claros, correspondentes, provavelmente às duas situações extremas. Além disso, os níveis 2,5 mm, 2,0 mm e 1,5 mm não apresentaram diferenças na potência consumida para o seu corte. O nível 1,0 mm apresentou valores menores e o nível 0,5 mm ainda menores. Novamente para o nível 0,5 mm, nota-se que ocorreram falhas de usinagem ou a profundidade especificada não atingiu seus valores reais durante todo o corte.

A figura 4.4 mostra a somatória dos sinais de potência. Essa somatória reflete os comentários feitos para as figuras onde a aquisição foi separada nas faces do cabeçote e do carter. Devido ao ocorrido na face do cabeçote, a diferenciação dos níveis de potência de corte envolvidos não pode ser percebido. A conclusão dessa primeira etapa é que o sinal de potência é capaz de perceber diferenças de dentes em contato, mas não é sensível para perceber diferenças de profundidade de corte. Talvez por variações no valor de K_s ou mesmo porque o ferro fundido apresente uma variação de esforços maior, devido ao seu mecanismo de formação do cavaco, característico de materiais frágeis.

Face do carter mais a face do cabeçote:

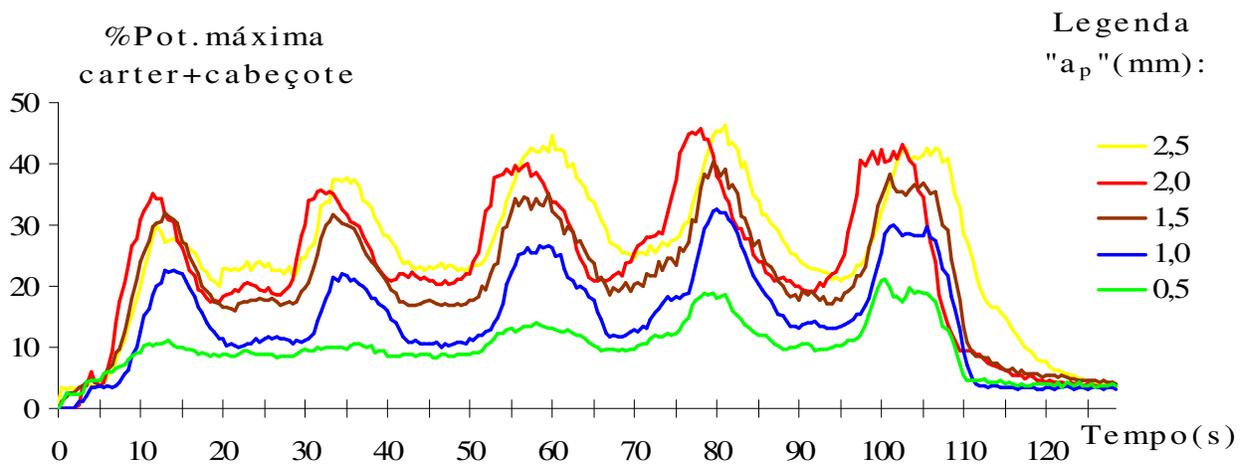


Figura 4.4: Face do carter + cabeçote: % da Potência máxima de aproximação para remoção do sobremetal variando a_p entre 2,5mm e 0,5mm.

Uma análise individual, por face, é interessante para um comparativo entre os diversos níveis de remoção de material. Teoricamente a energia necessária é proporcional à massa envolvida na usinagem. Conforme o sobremetal vai diminuindo deveria ocorrer uma redução nos níveis de esforço das fresas e conseqüentemente menos energia enviada pelos inversores de frequência aos motores seria necessária. Isto ficou mais evidente para a usinagem da face do carter (figura 4.2) e menos evidente para a face do cabeçote (figura 4.3). Pode-se avaliar a massa total removida através da pesagem do bloco antes e após a usinagem. Por outro lado, com esse procedimento não é possível discernir-se a porção relacionada à face do carter e do cabeçote, uma vez que devido à máquina ferramenta e ao dispositivo de fixação não é possível usinar-se uma face isoladamente, já que as forças atuando em faces opostas tendem a equilibrar-se. Desta forma, um comparativo de energia por volume de cavaco removido só poderá ser feito somando-se todas as massas removidas e todas as energias envolvidas.

Como a taxa de amostragem utilizada foi muito baixa, perderam-se informações pontuais, mas pode-se visualizar o processo como um todo. Além disso, essas informações foram coletadas em instantes diferentes a cada ciclo. Daí, a relação com a massa removida implica na necessidade de trabalhar-se com valores médios dentre os adquiridos.

Comparativos entre massa e energia:

As avaliações de massa foram adotadas a cada operação sofrida pelo bloco, para isso, esse era transportado até uma balança e pesado. Foram feitas três medições em cada bloco. A primeira, indicada nas tabelas do apêndice item 7.2, como peso bruto “B” acontecia antes de submeter-se o bloco ao processo de usinagem. Posteriormente, logo após a remoção intermediária, novamente, o bloco era pesado. Nas tabelas, a parte I (intermediária) mostra sua variação após o processo parcial. Finalmente, acontece a remoção total do material excedente, e que exige uma terceira pesagem, resultando na coluna “F” que representa a resultante após a conclusão da usinagem. É conhecido que existe uma variação dimensional entre as faces originais e a primeira remoção de material, haja vista que o fundido não tem uma superfície uniforme, o que responde pelas variações observadas na coluna I das tabelas 7.2 a 7.8 do apêndice item 7.2. As variações observadas na coluna “F” da tabela que persistem neste último estágio de remoção são decorrentes da diferença residual entre um bloco e outro e entre as demais faces e saliências que ainda não foram trabalhadas e que se tornam mais significativas na

coluna “I-F”. Os gráficos das figuras 4.5 e 4.6 mostram a progressão da potência em Watts com o volume de sobremetal removido na face do carter mais o cabeçote, desde a face bruta até a face intermediária e da intermediária até a final em cm^3 . Mostra-se a crescente demanda de potência com o volume removido.

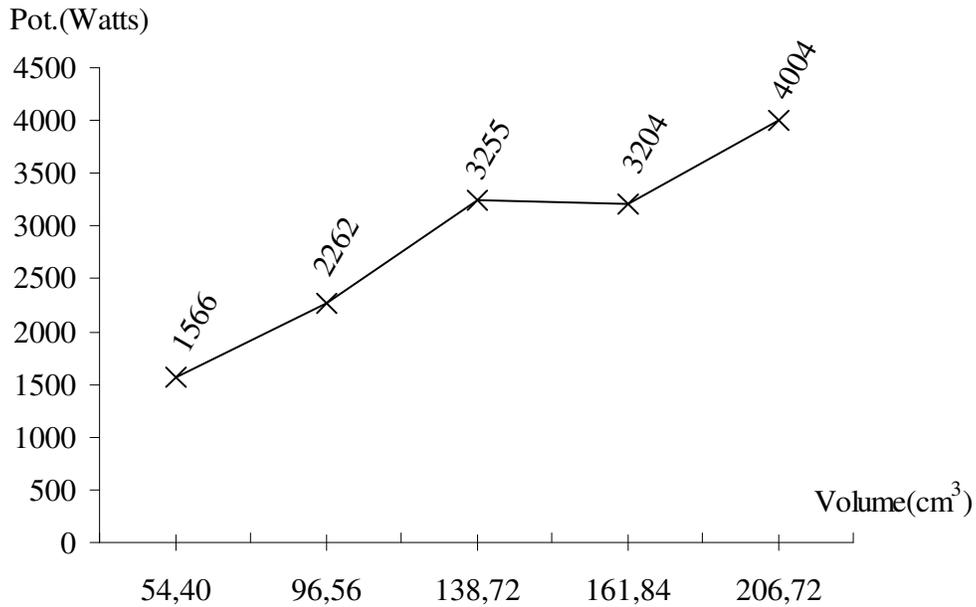


Figura 4.5: Potência média na remoção de sobremetal entre a face bruta e intermediária para o volume removido com “ a_p ” variando desde 0,5mm até 2,5mm (carter + cabeçote).

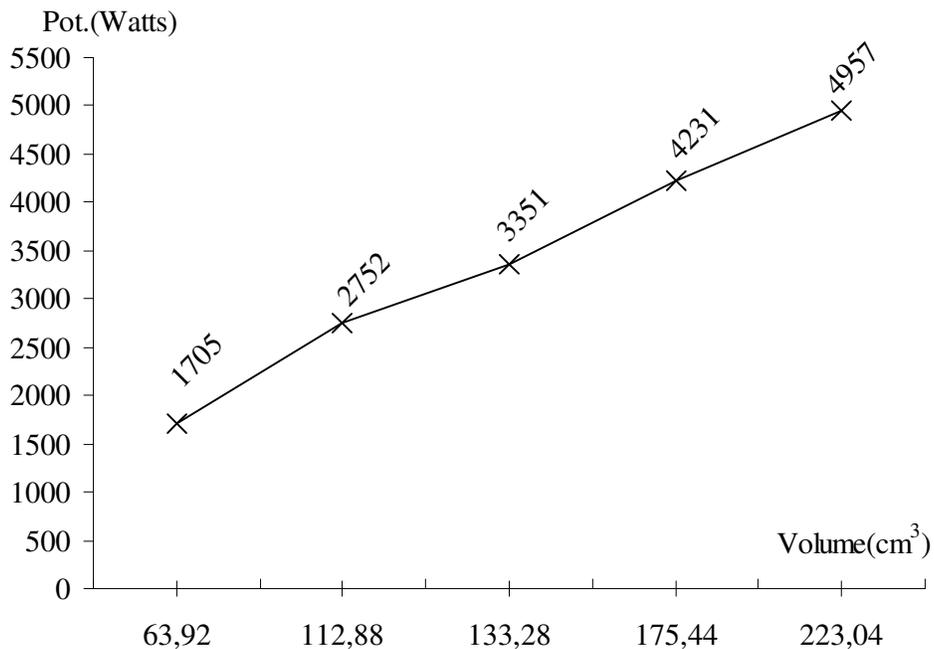


Figura 4.6: Potência média na remoção de sobremetal entre a face intermediária e final para o volume removido com “ a_p ” variando desde 0,5mm até 2,5mm (carter + cabeçote).

No gráfico da figura 4.6 percebe-se que esta relação tem uma constante de aumento porque a espessura removida tem uma constância que às vezes não é uniforme como é o caso da superfície bruta que admite uma certa ondulação na superfície e que acaba afetando nos resultados como é observado na figura 4.5. Apesar deste efeito procurou-se mostrar o resultado destes dados expressos num único gráfico, o da figura 4.7, que no somatório define uma reta crescente de potência com o aumento do volume removido.

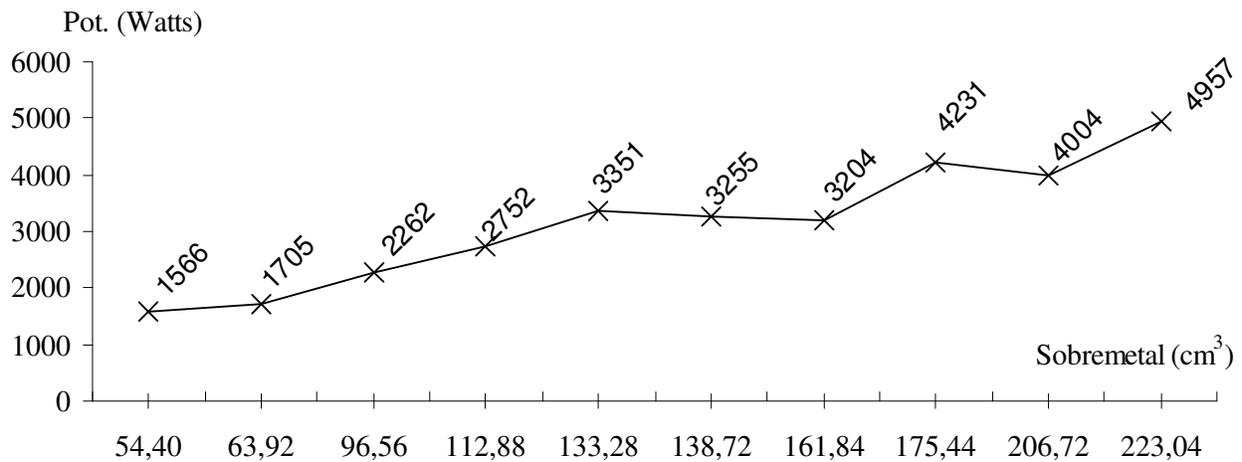


Figura 4.7: Potência média na remoção de sobremetal entre a face bruta e final para o volume removido (carter + cabeçote).

As figuras 4.5, 4.6 e 4.7 mostram que computando valores médios para cada peça, é possível estabelecer a relação entre volume de material removido e potência de corte. Confirma-se então a teoria dessa relação. Nota-se que a curva relacionando a remoção entre a face em bruto e a cota intermediária é menos linear do que a que relaciona as faces intermediária e final. Isso se deve, provavelmente porque a face bruta apresenta irregularidades, com isso, existe maior deformação, menores espessuras de cavaco, que afetam mais a potência de corte do que o volume removido. Por outro lado, a curva que relaciona a diferença de material entre as faces intermediária e final, é bem linear. Nesse caso, o material é efetivamente removido na profundidade de corte especificada, ou seja, a face inicial é mais homogênea, daí o comportamento aproximar-se mais do previsto teoricamente.

Observando-se as figuras 4.5 e 4.6, nota-se, ainda, que para a mesma profundidade ajustada, o volume de material removido quando da usinagem entre as faces bruta e intermediária

foi quase sempre menor do que quando da usinagem entre as faces intermediária e final, novamente porque a primeira (Intermediária) torna a face de referência homogênea.

Por outro lado, nos gráficos de potência por volume removido, mostrados nas figuras 4.8 e 4.9 é possível perceber uma tendência na redução da potência necessária para a remoção de sobremetal com o aumento de volume, ou seja, uma economia de energia é possível com a redução de volume, mas quanto maior a massa removida melhor é o rendimento da máquina. Isso pode ser explicado pela diminuição do K_s com a profundidade de corte. Como todos os demais parâmetros permaneceram constantes, a diminuição do K_s implicou em diminuição da força de corte e conseqüentemente da potência de corte.

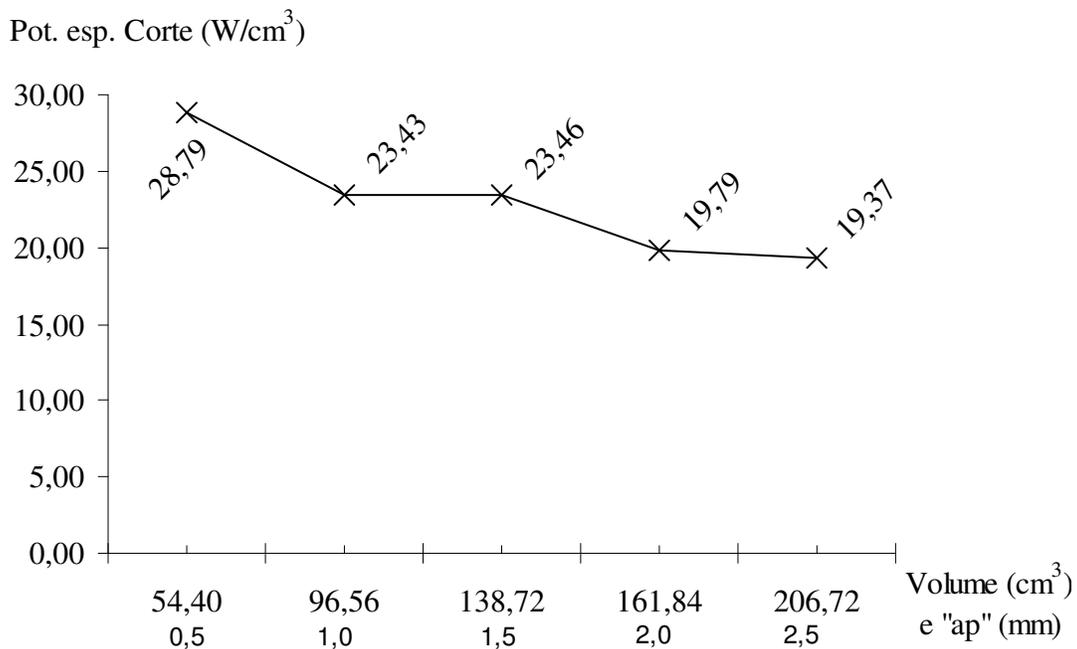


Figura 4.8: Relação entre a Potência e o volume removido na região superficial desde a posição bruta até a intermediária com “ap” entre 0,5 a 2,5mm (carter + cabeçote).

Vê-se da figura 4.8, que a taxa de Potência por volume (Watts/cm³) reduz-se de 28,79 para 19,37, cerca de 32% a menos, com o acréscimo de volume removido na região superficial definidas entre a posição bruta e a intermediária.

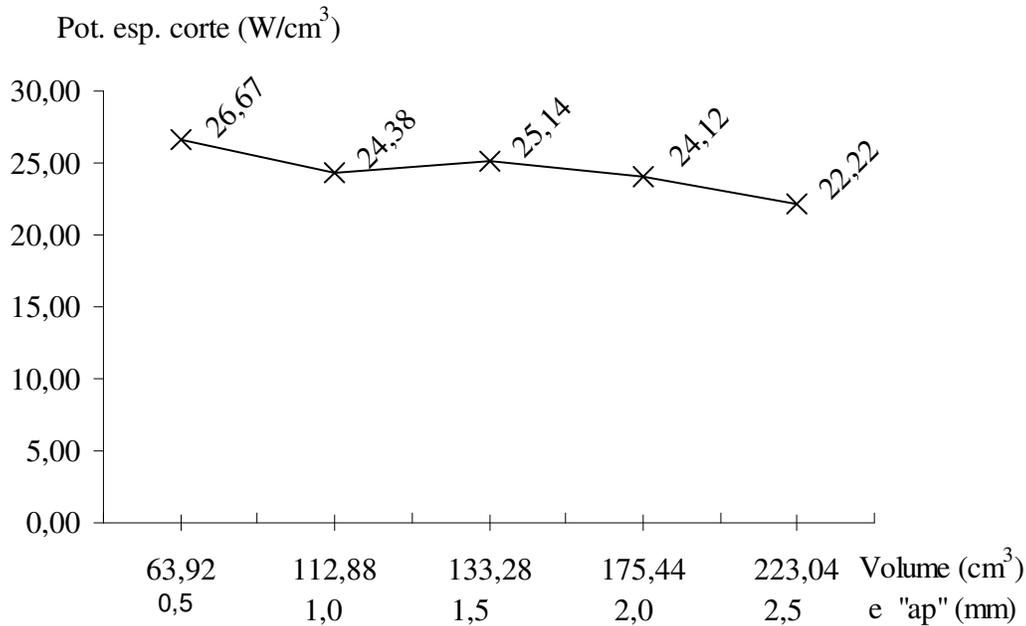


Figura 4.9: Relação entre a Potência e o volume removido na região interna desde a posição intermediária até a final com “ap” entre 0,5 a 2,5mm (carter + cabeçote).

O mesmo observa-se na região mais interna, entre a posição intermediária e a final, com uma redução na potência específica de 26,67 para 22,22, cerca de 16% a menos, para o acréscimo de volume removido, com uma variação menor. Comparando as figuras 4.8 e 4.9, tem-se também, que existe uma tendência da potência específica ser maior na região mais interna, para “ap” maior que 0,5mm.

Tomando-se a primeira medida indicada no gráfico da figura 4.8 e considerando o tempo de usinagem de cada “ap” em 130s, temos:

$$Pot_{\text{esp/corte}} = 28,8(\text{W/cm}^3) \times (130/60) \text{ min} = 62,4 \text{ W min / cm}^3 = 0,0624 \text{ kW min / cm}^3$$

Para o FoFo (190 – 300 HB), o $K_s = 0,050$ a $0,070 \text{ kW min / cm}^3$ [De Garmo et al, 1997].

Na figura 4.10 pode-se visualizar o gráfico que engloba os dados gerais com a tendência de redução da potência por volume de material removido com aumento da profundidade de corte.

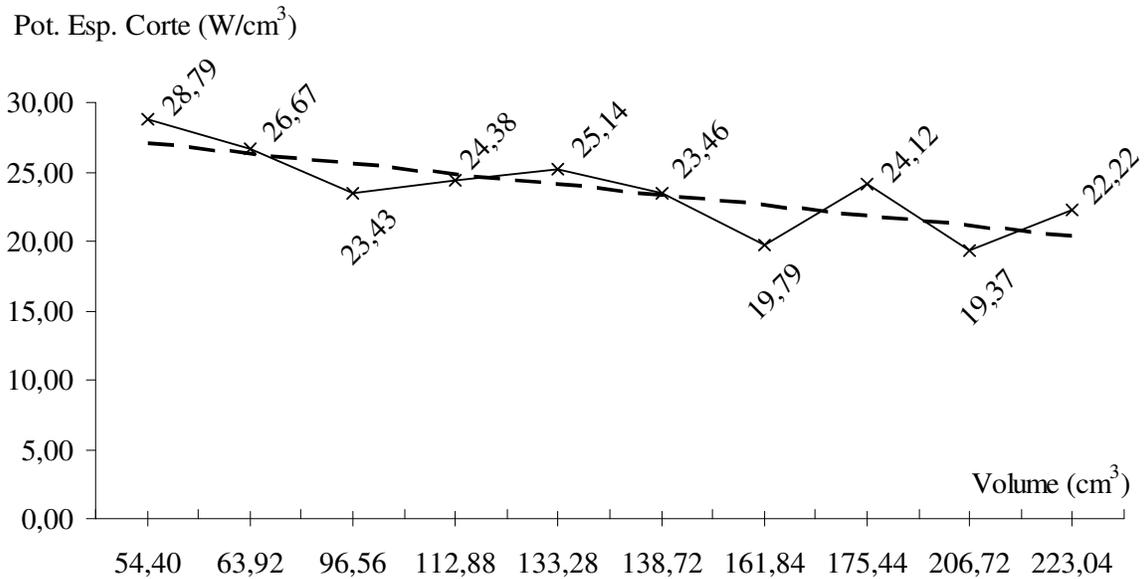


Figura 4.10: Relação entre a Potência e o volume de sobremetal removido desde a posição bruta até a posição final com crescentes volumes (carter + cabeçote).

A menor eficiência do corte a partir da superfície bruta pode ser explicada pela usinagem de uma superfície mais irregular. Esse fator interfere mais na potência consumida no corte do que propriamente no volume, ou seja, a usinagem continua acontecendo, em alguns casos consumindo maior potência porque o K_s tende a aumentar, já que a profundidade de corte efetiva varia muito na face em bruto.

Como conclusão parcial desse tópico, pode-se afirmar que o aumento da profundidade de corte diminui o K_s , ou seja, com profundidades de corte maiores, necessita-se de uma menor potência específica para o fresamento. Além disso, o equipamento para monitoramento do sinal de potência foi efetivo na aquisição desse sinal, que apresentou dados coerentes com a literatura de usinagem. Na verdade, as figuras 4.8 a 4.10 são K_s , na forma de potência.

4.2. Avaliação da qualidade da superfície usinada por rugosidade

A rugosidade é um parâmetro importante quando se deseja avaliar a qualidade de uma superfície. Nos experimentos realizados, estas leituras foram feitas com auxílio de um rugosímetro portátil. É importante salientar que a operação escolhida para a análise foi a primeira operação da usinagem envolvendo o bloco do motor. Ela é uma operação de desbaste. Portanto,

não há uma especificação de grau de acabamento. Sabe-se que nas operações subseqüentes, algum material ainda será removido, mas em quantidade reduzida e suficiente para que seja possível dar o devido acabamento. Daí, essas leituras de rugosidade foram feitas apenas para fins de estudo, ou seja, para ter-se um parâmetro comparativo relacionado à superfície da peça. Essa peça, após o acabamento, deve ter uma rugosidade média igual ou menor a $3,8\mu\text{m}$. Foram fixados dez pontos, na face do cabeçote e outros seis pontos na face do carter para realização das medidas de rugosidade. O rugosímetro foi previamente calibrado utilizando-se um padrão fornecido pelo fabricante. Além disso, foram levantadas algumas fotos para auxiliar esta análise. Para uma avaliação que contemplasse o valor máximo de rugosidade, foi escolhido o sentido perpendicular às marcas de fresamento. Na figura 4.11 estão indicados os pontos escolhidos para medição da rugosidade. O cut-off foi ajustado em $17,5\text{mm}$, por ser um padrão adotado por toda a linha de usinagem. Nas tabelas 7.9 a 7.13 do apêndice item 7.3 são apresentadas as 16 medições feitas, tanto do R_a como $R_{\text{máx.}}$, em cada ponto. Após o preenchimento de todos os resultados, foram feitas as médias parciais, por ponto escolhido e as médias envolvidas nos subtotais (em cada face) e totais (em todo o bloco).



Figura 4.11: Definição de posicionamento para deslocamento do sensor do rugosímetro.

As leituras foram feitas no nível da redução parcial de $0,5\text{ mm}$, $1,0\text{ mm}$, $1,5\text{mm}$ e $2,0\text{mm}$ antes do limite necessário para o bloco seguir na próxima operação. As dez primeiras leituras pertencem à face do cabeçote enquanto as restantes pertencem à face do carter.

Rugosidade Ra(μm) em 0,5mm:

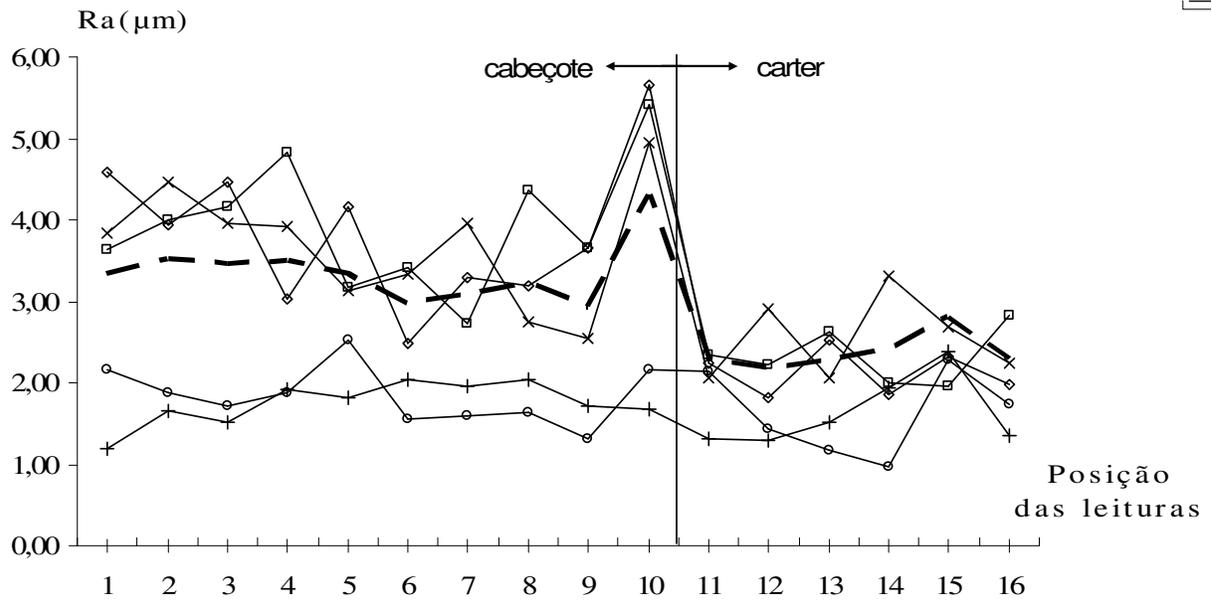


Figura 4.12: Distribuição e média das 16 leituras de rugosidade Ra(μm) p/5 pçs. em 0,5mm.

Rugosidade Ra(μm) em 1,0mm:

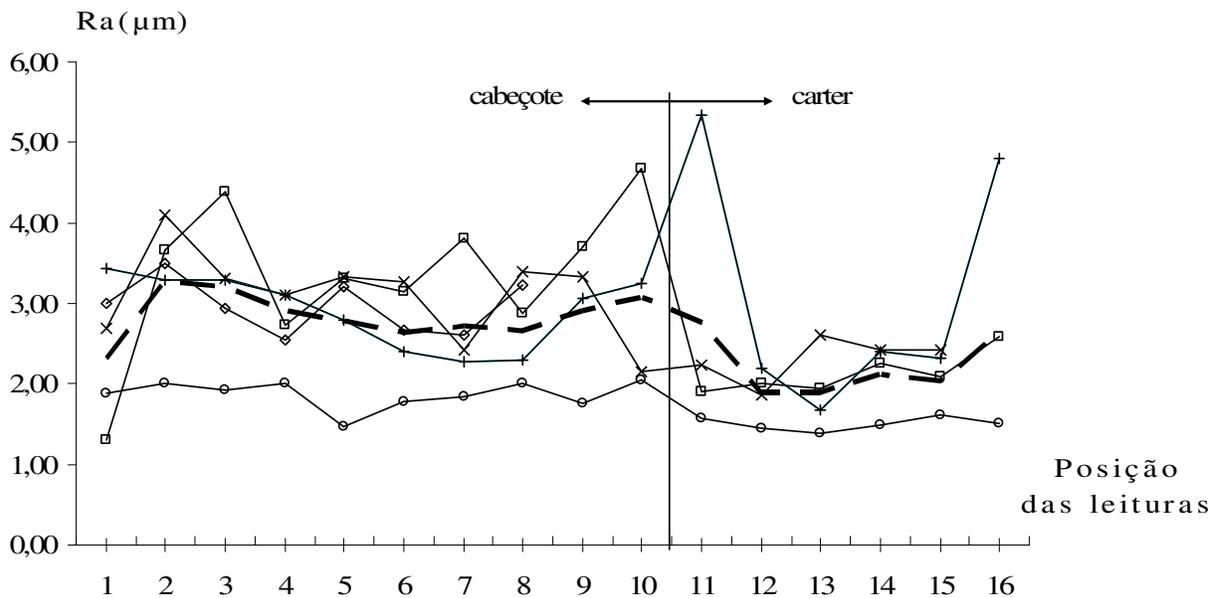


Figura 4.13: Distribuição e média das 16 leituras de rugosidade Ra(μm) p/5 pçs. em 1,0mm.

Rugosidade Ra(μm) em 1,5mm:

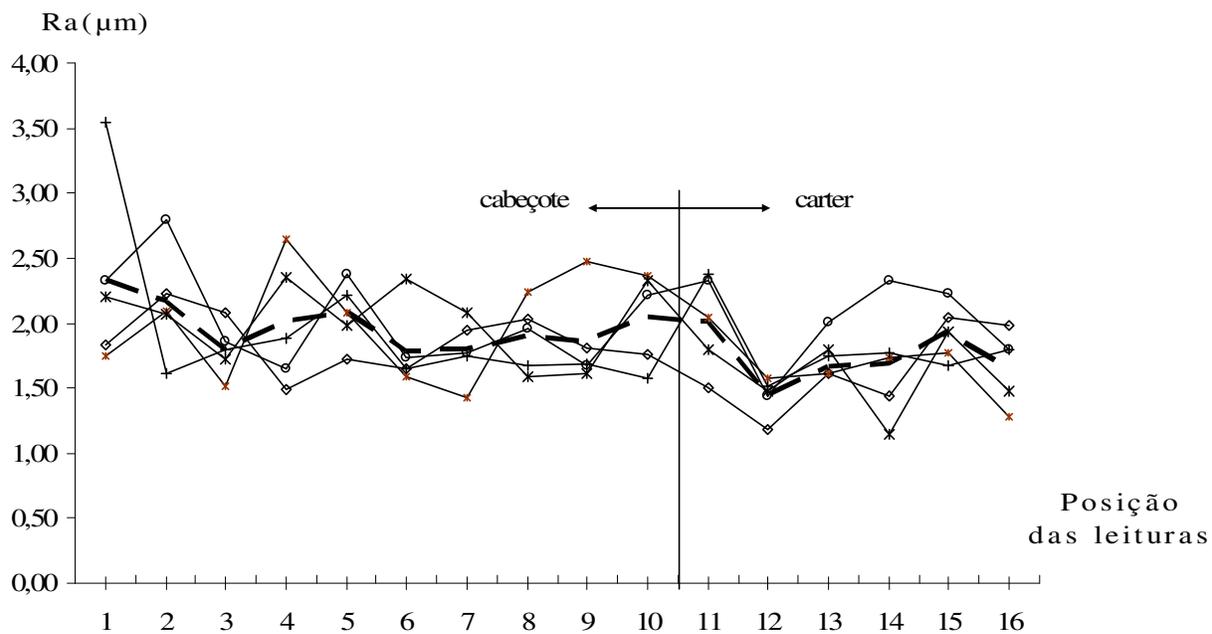


Figura 4.14: Distribuição e média das 16 leituras de rugosidade Ra(μm) p/5 pçs. em 1,5mm

Rugosidade Ra(μm) em 2,0mm:

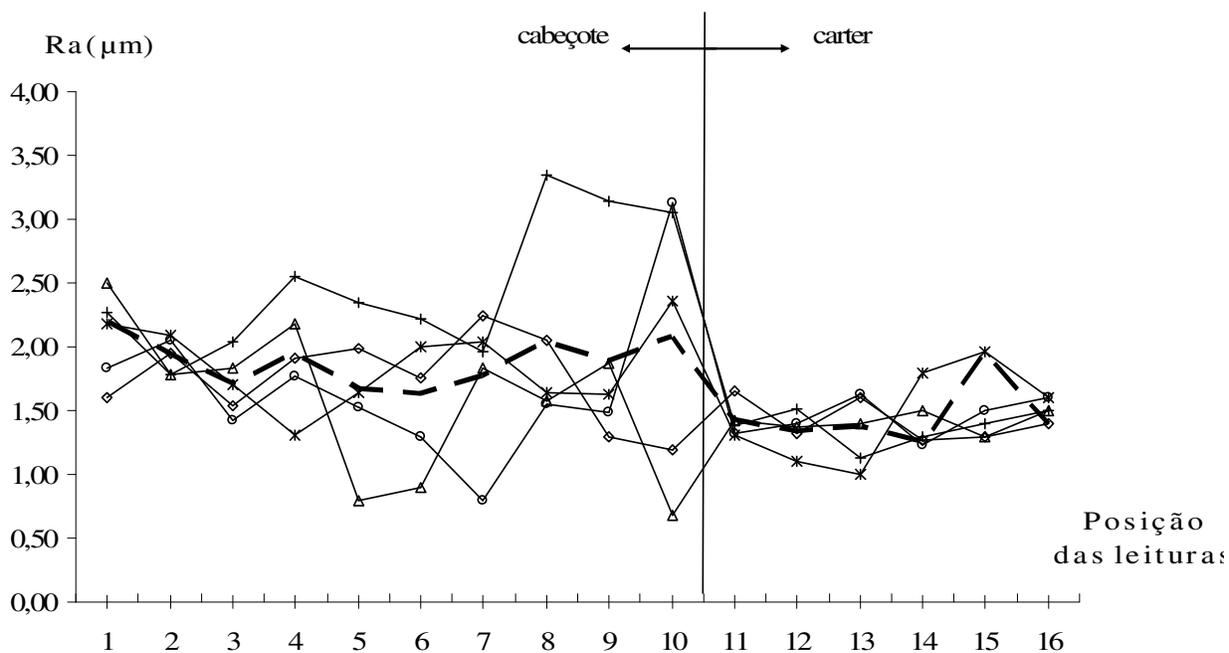


Figura 4.15: Distribuição e média das 16 leituras de rugosidade Ra(μm) p/5 pçs. em 2,0mm

Rugosidade média Ra(μm) de 0,5 a 2,5mm:

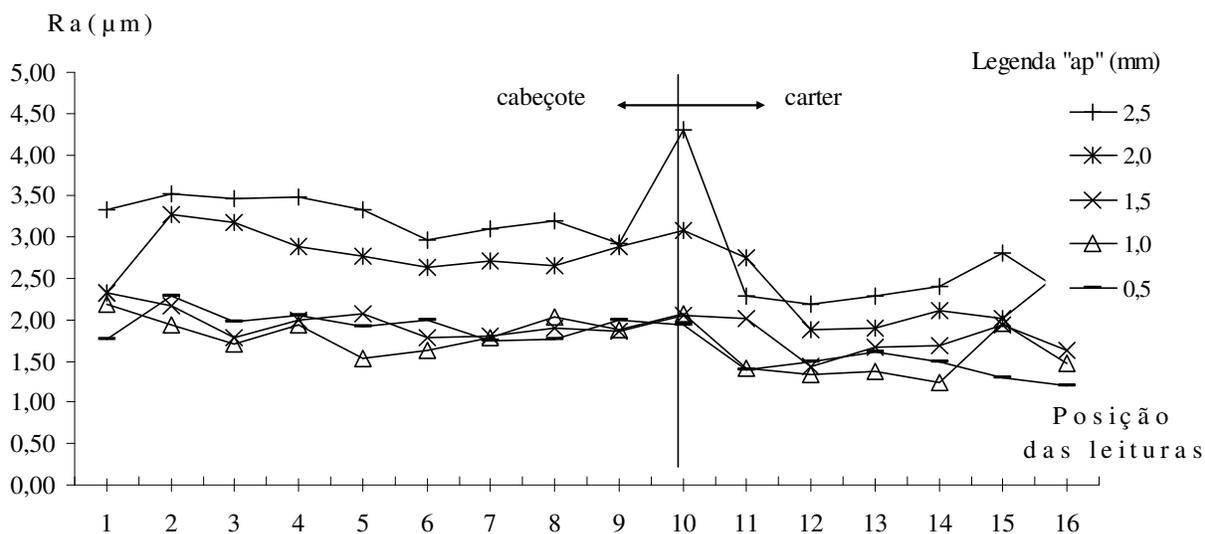


Figura 4.16: Média progressiva de rugosidade Ra(μm) entre 0,5 e 2,5mm das 16 leituras obtidas expressas nos gráficos das figuras 4.12 a 4.15.

Observa-se, na figura 4.16, uma grande dispersão nos valores lidos de rugosidade média (Ra) entre todos os blocos medidos e em cada gráfico específico feito nas profundidades de 0,5 mm da cota final até a cota de 2,5mm. O gráfico da média de Ra máximo, da figura 4.17, também apresenta uma grande dispersão e as mesmas tendências verificadas em Ra. Essa dispersão já era esperada, haja vista tratar-se de uma operação de desbaste. Além disso, peças fundidas tendem a apresentar rugosidade elevada.

Rugosidade Ra máximo (μm) de 0,5 a 2,5mm:

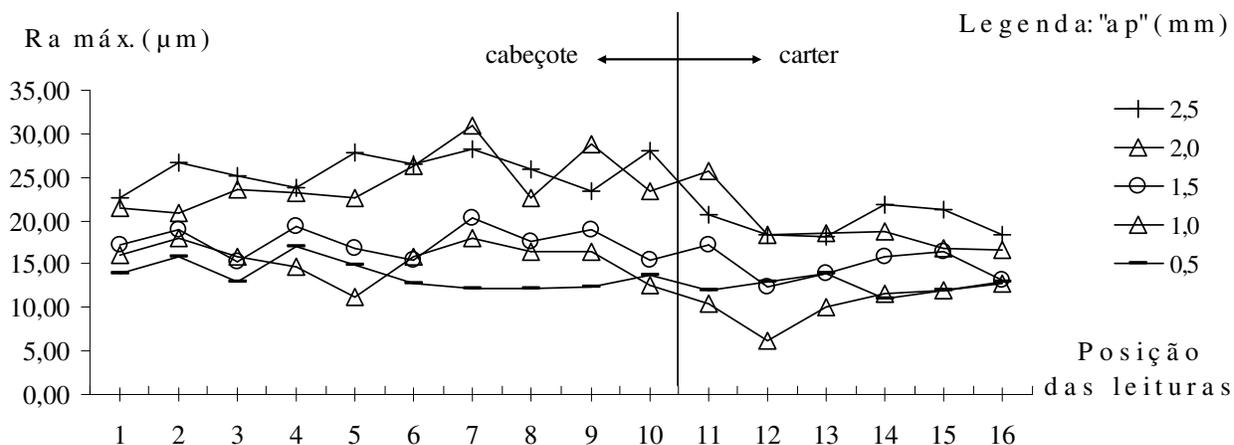


Figura 4.17: Média progressiva de rugosidade Ra máx. (μm) entre 0,5 e 2,5mm das 16 leituras obtidas distribuídas no cabeçote e no carter

Em cada gráfico, das figuras 4.12 a 4.15 foi traçada uma linha tracejada para representar a média dos valores lidos ao longo das 16 leituras obtidas. A figura 4.17, apesar de apresentar a mesma dispersão observada nos demais gráficos, nota-se que as médias individuais obedecem a uma tendência de redução, ou seja, indicam uma melhora na qualidade da superfície usinada para espessuras menores de sobremetal, provavelmente porque os esforços de corte também são menores. Um fato observado é que o lado do carter, representado pelas leituras 10 a 16 tem uma tendência de rugosidade menor do que o cabeçote, possivelmente devido ao menor esforço aplicado durante a usinagem dessa face. Também verificou-se que na entrada da fresas, leituras 10 e 11, ocorreram picos de rugosidade, provavelmente pelo impacto da ferramenta, que gera uma espessura de cavaco próxima à máxima nesses pontos.

De uma forma geral, na figura 4.18 é possível observar uma melhora na qualidade da superfície em termos de rugosidade com a redução da profundidade de corte, sendo que com um “ a_p ” de 3,5 mm observa-se uma média 3,363 μm à medida que a profundidade de corte vai reduzindo até 1,5mm ocorre uma diminuição da rugosidade média até 1,946, que representa uma melhora de quase 42%, mantendo-se estável, nesse patamar com os demais aumentos de profundidade. Quanto à dispersão de máximos e mínimos temos que as variações ficaram entre 17% com “ a_p ” em 3,5 mm decaindo para 9% nas restantes espessuras de sobremetal.

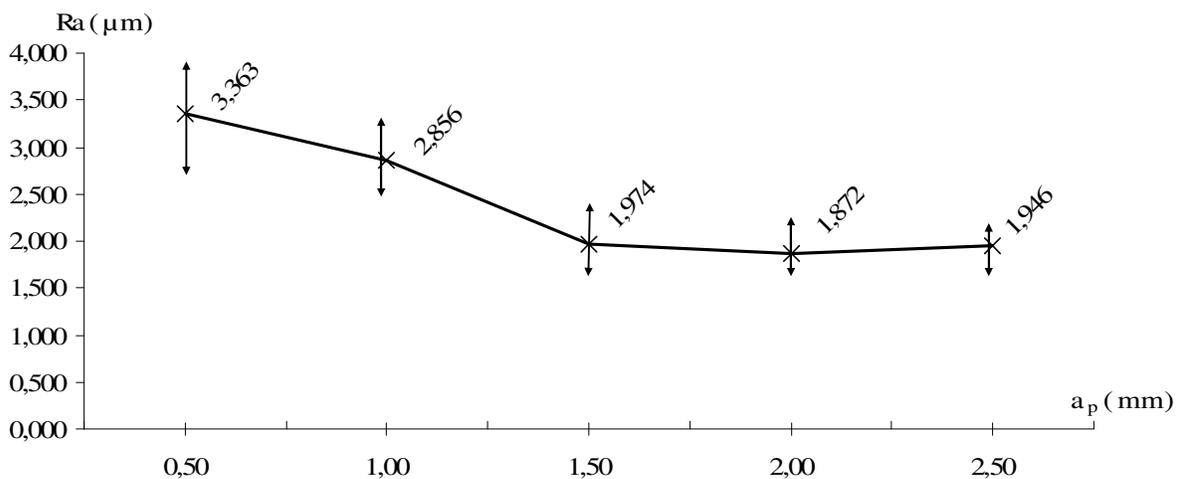


Figura 4.18: Gráfico de tendência da média de R_a (μm) juntamente com as dispersões para a redução de sobremetal “ a_p ”, mantendo constante os parâmetros de corte e de avanço.

Posteriormente novas verificações foram feitas com variações na velocidade de corte e avanço, mas mantendo-se as mesmas profundidades de corte estudadas até aqui.

Apesar da quantidade de leituras realizadas e de uma certa dispersão destes valores, através da análise dos dados, constatou-se que a rugosidade mostrou-se sensível como indicador da qualidade da superfície usinada diante das variações de profundidade de corte e de esforços de corte.

Na operação 20, objeto desse estudo, o acompanhamento da qualidade da superfície é feito pelo controle de planeza, que obedece à norma NBR 6409 de 1997. A medição é feita numa máquina tridimensional DEA e a tolerância máxima permitida é 0,25mm. Assim, o fim de vida das ferramentas é definido pelo desvio de planeza das superfícies usinadas. Portanto, o acompanhamento da progressão desse parâmetro, durante a vida dos insertos, também foi monitorado e será apresentado a seguir. Reuniram-se cinco leituras de comportamento da planeza que geraram os gráficos das figuras 4.19 a 4.23, nas condições variáveis de produtividade alcançadas em 465, 780, 795, 500 e 475 peças, respectivamente.

Os limites observados no rendimento dos insertos, frente ao número de peças, divergem devido à precisão com que são fixados à fresa. Mínimas diferenças de ajuste, nesta fixação, e a variação de desgaste, engendram o comportamento aleatório da resistência mecânica. Além dos efeitos citados, diversos outros fatores estão presentes, e afetam nesta performance. Também é possível, em cada caso, verificar que a função que melhor representa este aumento é uma função de terceira ordem.

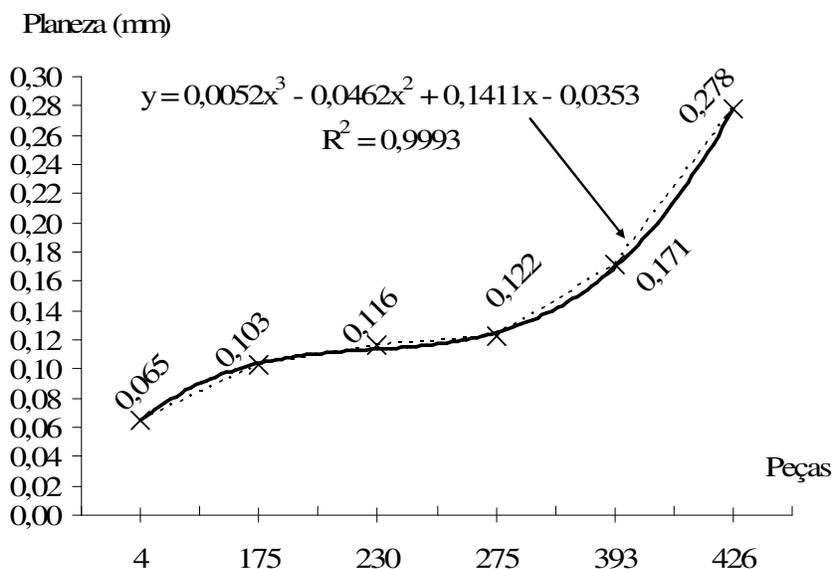


Figura 4.19: Primeira avaliação de planeza para vida da ferramenta em 465 pçs

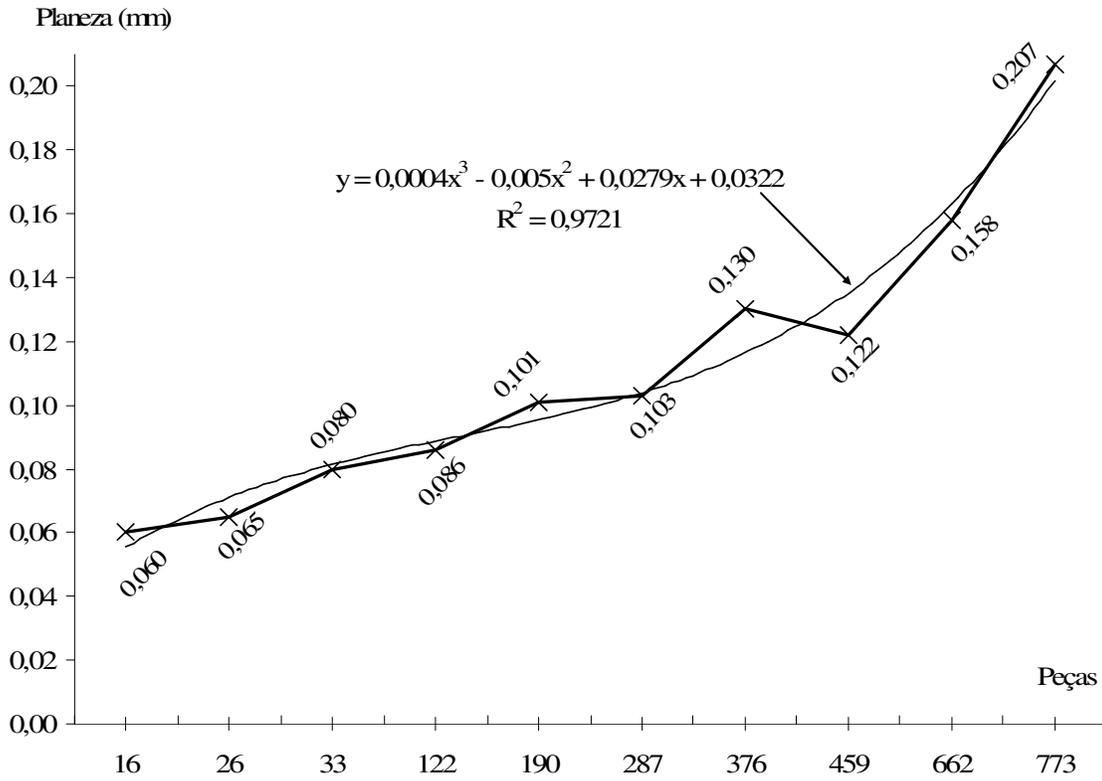


Figura 4.20: Segunda avaliação da planeza para vida da ferramenta em 780 pçs

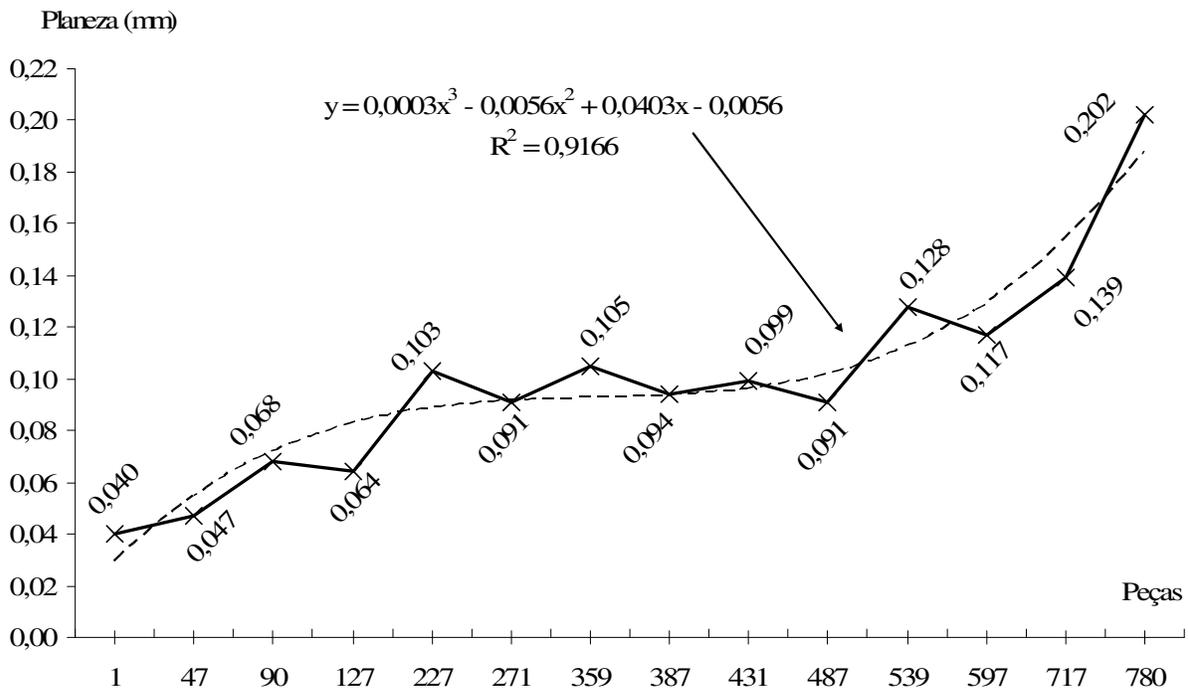


Figura 4.21: Terceira avaliação da planeza para vida da ferramenta em 795 pçs

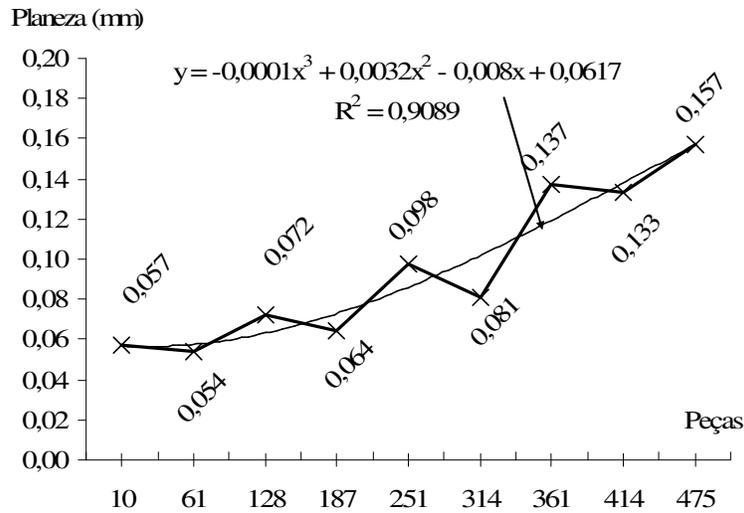


Figura 4.22: Quarta avaliação da planeza para vida da ferramenta em 500 pçs

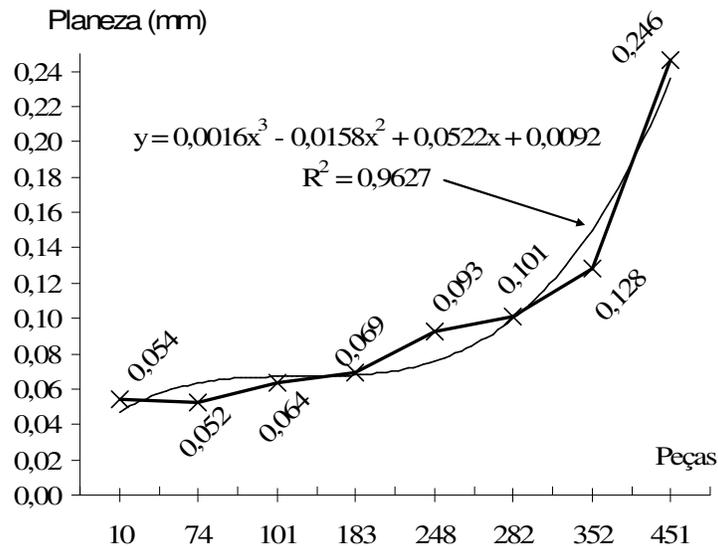


Figura 4.23: Quinta avaliação de planeza para vida da ferramenta em 475 pçs

Nesta situação, quando a ferramenta está na fase inicial de uso, ou bem desgastada acontece uma maior aceleração na degradação da ferramenta, ao passo que no intervalo compreendido entre estes limites, a ferramenta experimenta um patamar de acomodação com uma estabilidade de comportamento por determinado período. Às vezes a progressão da planeza chega a regredir em face de uma nova acomodação previsível pelo desgaste que de forma desigual ocorre, mas, neste caso, age corrigindo a diferença de *presets* na média de posicionamento entre todos os insertos e que acaba corrigindo inversamente ao processo que tem direcionamento contínuo pela degradação, constatado pela curva de tendência de terceira ordem onde os gráficos enunciam. Os

gráficos de planeza revelam uma constância de comportamento iniciando e terminando com um declive acentuado, durante os ensaios, mas com uma divergência quanto às leituras versus quantidade de peças. Para tanto, foi construído o gráfico da figura 4.24, onde os eixos x e y ficam invertidos para uma comparação. Neste gráfico, são agrupadas as diversas leituras de planeza em função da quantidade de peças respectivamente encontrados ao longo das sucessivas avaliações que, de forma geral, admite a mesma tendência de piora da planeza com o desgaste da ferramenta. A planeza determina o fim de vida das ferramentas. Aparentemente a relação entre desgaste da ferramenta e planeza pode ser aproximada por uma função linear. Porém, como está se estudando o fresamento que é por natureza, um corte interrompido, além do material usinado ser ferro fundido, que tem uma característica frágil, a tendência é de avaria da ferramenta, como será mostrado posteriormente. Avarias são falhas súbitas, portanto, dificilmente conseguir-se-á estabelecer relações lineares que captem esse comportamento. Uma prova dessa afirmação é o coeficiente de correlação da curva apresentada na figura 4.24, cujo valor pode ser considerado baixo. Em suma, há uma tendência de crescimento, mas a dispersão em torno da linha de tendência pode ser considerada elevada.

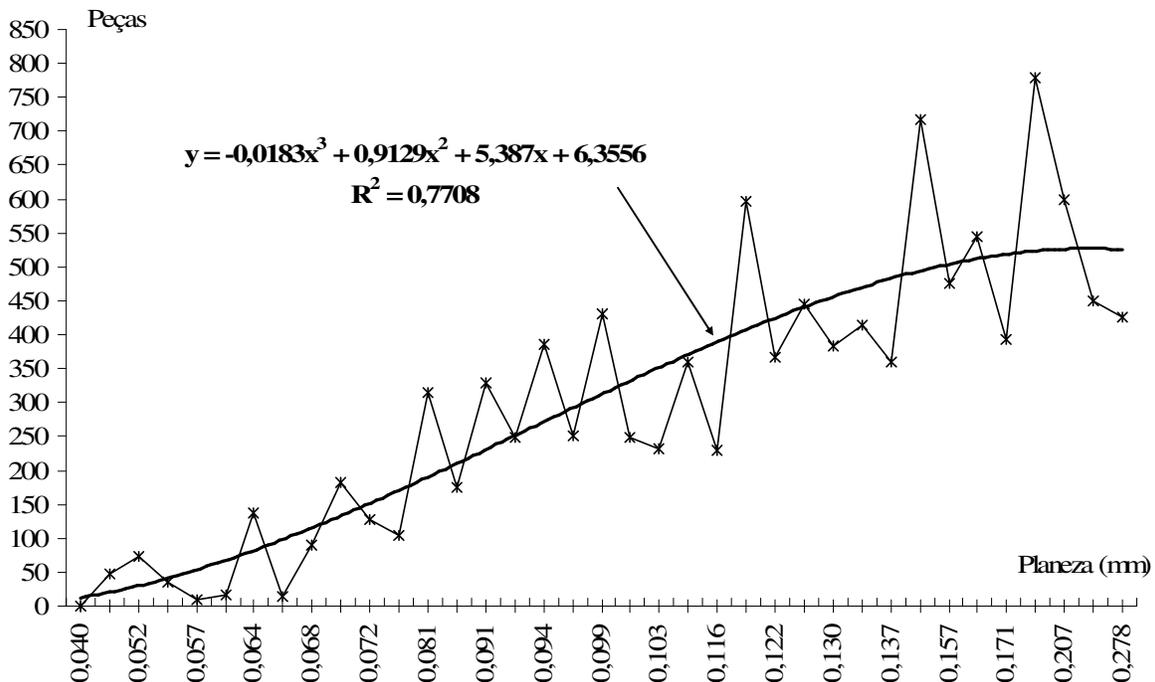


Figura 4.24: Variações possíveis na quantidade de peças produzidas e a respectiva planeza encontrada durante as cinco medições anteriores.

A evolução da planeza, mesmo que irregular, segue uma crescente redução de qualidade, proporcional ao desgaste. Durante o processo é realizado o controle da planeza apenas no lado do carter. Um dos motivos é que o sobremetal é menor deste lado e está próximo à operação seguinte de acabamento. Outra razão é que já constata-se um desgaste maior da ferramenta nesta face. Na figura 4.25 é mostrada a condição ao final de vida.

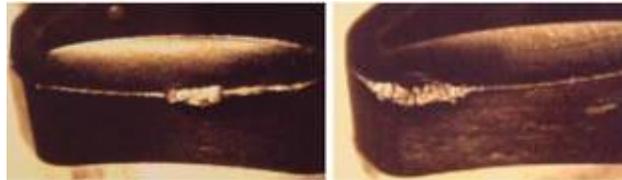


Figura 4.25: Condição do inserto após fim da vida útil na face com uso (à esquerda face do cabeçote) e (à direita face do carter).

O corte é mais interrompido no carter do que no cabeçote. O sobremetal é 25% menor na espessura. Somando Φ_1 e Φ_2 na figura 3.7 temos que a fresa percorre quase que continuamente, em $59,6^\circ$ na face do cabeçote, ao passo que descontinuamente em $118,6^\circ$ na outra face, figura 3.8, num percurso de curta duração de aproximadamente $29,6^\circ$, do lado do carter, com quatro interrupções por revolução, contra apenas duas. Isto impõe mais oscilações de temperatura. Este efeito explica a redução na vida útil da ferramenta. Isto também é comprovado no cavaco conforme figura 4.26 e 4.29:

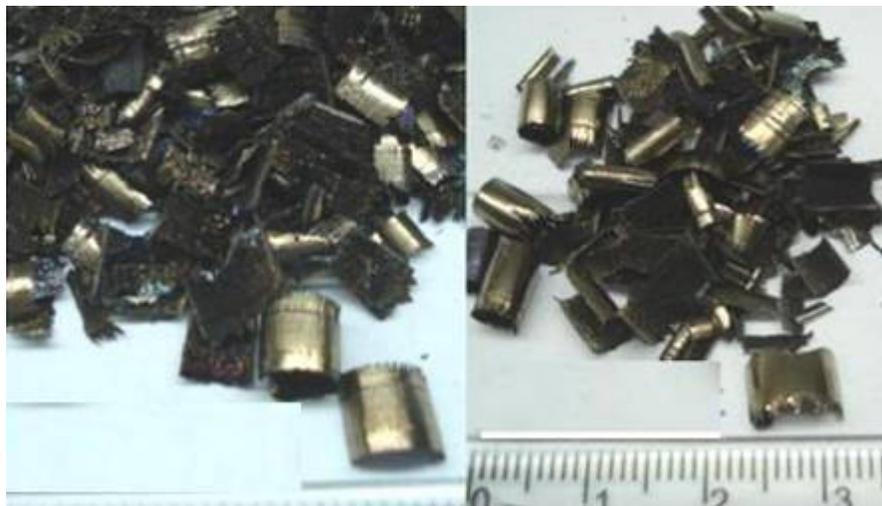


Figura 4.26: Aspecto do cavaco gerado na face do carter à esquerda e do cabeçote à direita, com a ferramenta na condição inicial de uso.

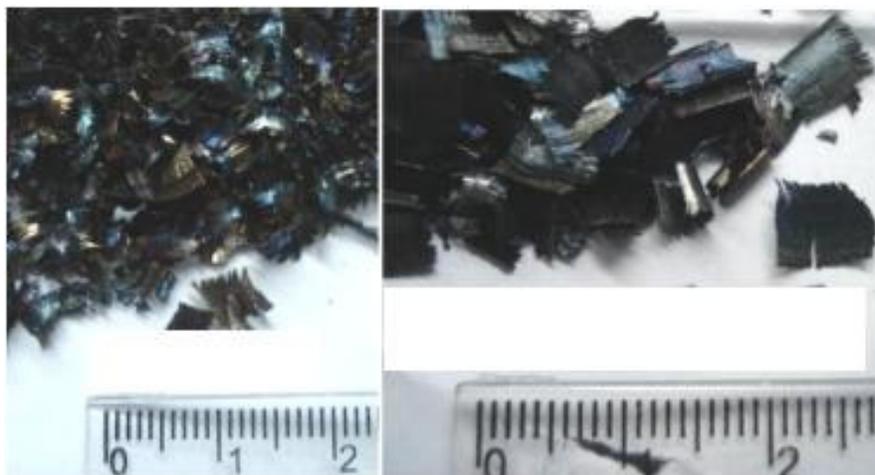


Figura 4.27: Aspecto do cavaco gerado na face do carter à esquerda e do cabeçote à direita, com a ferramenta na condição final de uso.

No início dos trabalhos, figura 4.26, vê-se que o cavaco, apesar de curto, tem aproximadamente 5 mm de largura, no lado do carter, e quase 8 mm no lado do cabeçote, com a cor amarela. Ao final da vida do inserto, esta cor tende ao matiz azulado e até preto, em partículas reduzidas, no lado do carter. Isto demonstra o grau de degradação que o atrito provoca no próprio cavaco. Seu tamanho reduzido influencia reduzindo a capacidade de dissipação do calor gerado, comprometendo sua resistência mecânica.

Pelas fotos das figuras 4.26 e 4.27 temos que a potência crescente expressa no capítulo 4.3.1, nas figuras 4.37 e 4.38, é visível a comprovação do desgaste maior. Da comparação entre a potência com inserto na fase inicial e o na fase final da vida útil constatou-se um aumento de 26% para o cabeçote contra 46% para o carter, ou seja, esta progressão é um indicador do grau de degradação observado. E isto é importante, porque apesar do valor da potência ser maior no cabeçote, temos que a progressão foi bem menor enquanto no carter, com menor potência a progressão é bem maior. Isto explica que a flutuação térmica exerce grande influência na vida do inserto que trás por consequência a comprovação de que a medida da planeza apenas na face do carter, mais a tonalidade na cor do cavaco, estabelecem o momento adequado para a troca dos insertos, porque esta é feita simultaneamente nos dois lados da máquina. Infelizmente a informação sobre a tonalidade escura do cavaco não é quantificável através de instrumentos como um fluxímetro, mas pode ser muito promissor para uma avaliação quantificável por outro instrumento adequado, como o que foi empregado no diagnóstico do estado da ferramenta no

processo de usinagem com o uso de imagens de uma câmera de infravermelho, [Borelli et al, 2000].

4.3. Avaliação visual das superfícies usinadas com diferentes profundidades

Trata-se simplesmente de uma avaliação visual com auxílio de fotos obtidas com uma máquina fotográfica de boa definição. O objetivo dessa análise é verificar qual a quantidade de sobremetal necessária para obter-se uma superfície sem falhas oriundas da fundição. Foram avaliados cinco blocos em cada etapa da análise. Para economia de espaço, mostrar-se-á apenas imagens significativas em cada condição. Vale lembrar que todos os blocos devem se mostrar totalmente isentos de falhas. A figura 4.28 mostra imagens representativas das condições apresentadas pelos cinco blocos diferentes usinados de forma que restasse 0,5 mm de sobremetal para a operação de desbaste.

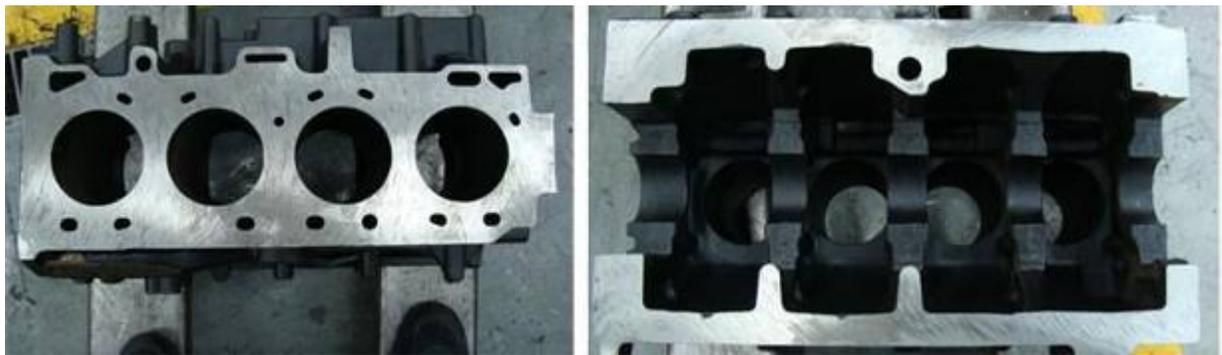


Figura 4.28: Bloco 1 – face cabeçote e carter - amostra 0,5mm.

A idéia era visualizar a presença de falhas a 0,5 mm da superfície final. A figura mostra as faces do cabeçote e do carter, à esquerda e à direita respectivamente. Visualmente observa-se que a 0,5 mm da dimensão final não aparecem falhas na fundição, dentro da amostra observada.

A figura 4.29 mostra imagens representativas dos blocos usinados de forma que restasse 1mm de sobremetal. Nota-se nesta figura uma falha denominada mancha, ou seja, a profundidade de corte utilizada não foi suficiente para remover material de toda face do carter. A mesma situação ocorreu em todos os blocos analisados, sempre na mesma face. Por outro lado, a face do cabeçote foi totalmente usinada. Como no nível de 2,5 mm, ou seja, a uma distância da cota final

de 2,5 mm, pouco material foi removido da face do carter, pode-se afirmar que são necessários pelo menos, 1,5mm de sobremetal nessa face. Este padrão de comportamento tem origem nas imperfeições, de forma, originadas na fundição.

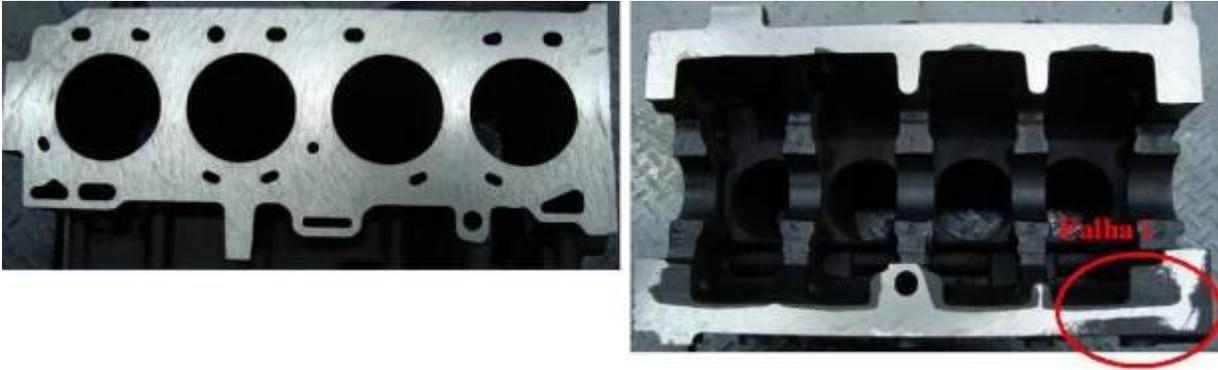


Figura 4.29: Bloco 1 – face cabeçote e carter - amostra 1,0mm.

A figura 4.30 revela o detalhe da falha visualizada na figura 4.29. Nota-se que não há porosidade ou inclusões, apenas ausência de material para usinar, ou ainda, desvio de forma da peça.



Figura 4.30: Bloco 1 – falha1 face carter - amostra 1,0mm.

A figura 4.31, aponta imagens significativas dos blocos usinados com a superfície a 1,5mm da cota final. Novamente percebe-se falhas na superfície do carter, enquanto na face do cabeçote o processo de usinagem encontra-se em condições ainda aceitáveis.

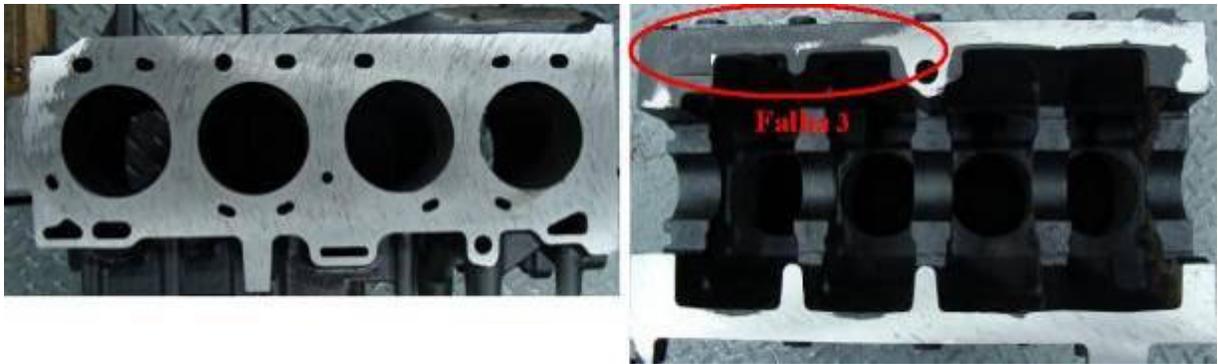


Figura 4.31: Bloco 3 – face cabeçote e carter - amostra 1,5mm.

A figura 4.32 mostra o detalhe da figura 4.31, onde nota-se que a parcela mostrada praticamente não foi usinada. Novamente não foram detectados defeitos de fundição, apenas desvio de forma. Isso era esperado, haja vista, que na etapa anterior (nível 1,0mm), já haviam sido detectados defeitos. A busca, nesse momento, era pelo limite da face do cabeçote.



Figura 4.32: Bloco 3 – falha3 face carter - amostra 1,5mm.

A figura 4.33 apresenta imagens significativas da usinagem dos blocos de forma que a superfície usinada se situasse a 2,0 mm da cota final. Novamente são mostradas as faces do cabeçote e carter. Como já ocorrera anteriormente, figura 4.31, a face do carter apresentou falha na usinagem, fato esse que não ocorreu na face do cabeçote.

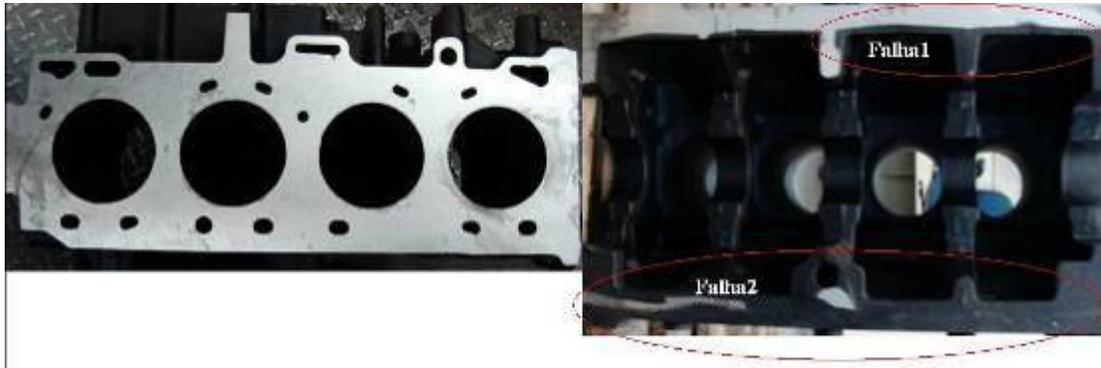


Figura 4.33: Bloco 1 – face cabeçote e carter - amostra 2,0mm.

A figura 4.34 mostra imagens significativas da usinagem dos blocos de forma que a superfície usinada se situasse a 2,5 mm da cota final. Novamente são mostradas as faces do cabeçote e carter. Nesse ponto, a face do carter, praticamente, não é mais tocada pela fresa, além disso, nesse patamar de sobremetal, a face do cabeçote também apresentou falhas.

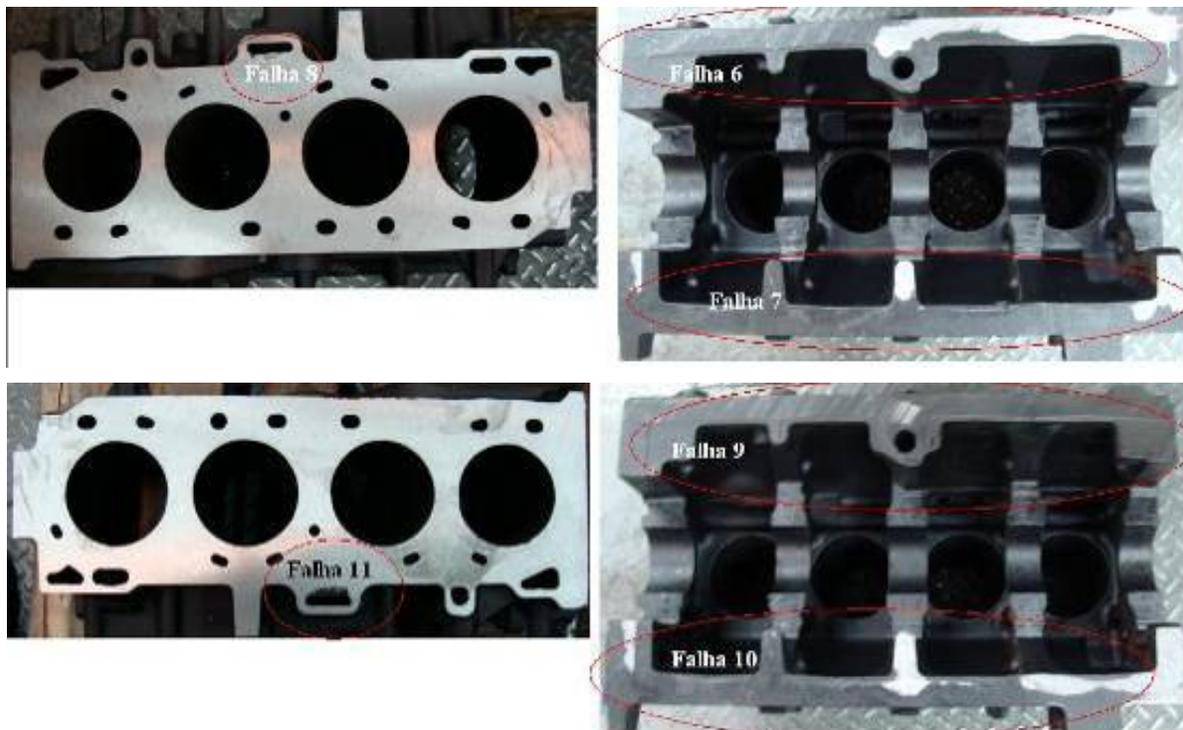


Figura 4.34: Bloco 3 e 4 – face cabeçote e carter - amostra 2,5mm.

Isso leva a conclusão de que para a face do carter, um sobremetal de 0,5 mm e na face do cabeçote em 2,0mm, seria suficiente do ponto de vista de defeitos de fundição. Cabe ressaltar que

essa foi uma análise visual, baseada apenas em um critério, a saber, defeitos de fundição. Não foram considerados aspectos tecnológicos do processo de fundição. Desta forma, conclui-se a limitação, valendo especificamente para os blocos de motor em questão e para as condições de fundição utilizadas no processo. De qualquer maneira, essa análise indica que seria interessante um estudo visando a diminuição do sobremetal, haja vista que de ambas as faces pode ser removido algum material sem indícios de falha por problemas de fundição.

4.4. Avaliação da energia consumida com variações de velocidades

Neste item, será avaliado o comportamento da potência consumida no corte variando-se a velocidade de corte e avanço.

4.4.1. Avaliação da energia consumida com variação de velocidade de corte

Adotando o mesmo método utilizado para quantificar a energia consumida variando-se a profundidade de corte, foi feito aqui aquisição do sinal de potência alternando-se a velocidade de corte, lembrando-se que foi tomado o cuidado de subtrair-se a energia em vazio, que passa a ser variável com a rotação das fresas. É conhecido que existe uma variação na vida dos insertos, e isto pode afetar as leituras. Em razão disto e das necessidades produtivas da fábrica, as aquisições foram feitas em lotes de cinco peças por velocidade, sem intervalo entre os lotes, no período intermediário da vida histórica dos insertos.

A vida média histórica, adotado o critério estabelecido na fábrica, varia entre 600 e 800 peças. As aquisições de sinais aconteceram entre a usinagem das peças 340 e 400, também para atender um critério de semelhança com os testes relacionados às variações de profundidade de corte. Os testes conduziram aos resultados apresentados nas tabelas no apêndice item 7.4 e ao gráfico da figura 4.35, onde observa-se que é possível distinguir-se dois níveis de rotações, um compreendendo 100% e 105% e outro compreendendo 110% e 115% da nominal.

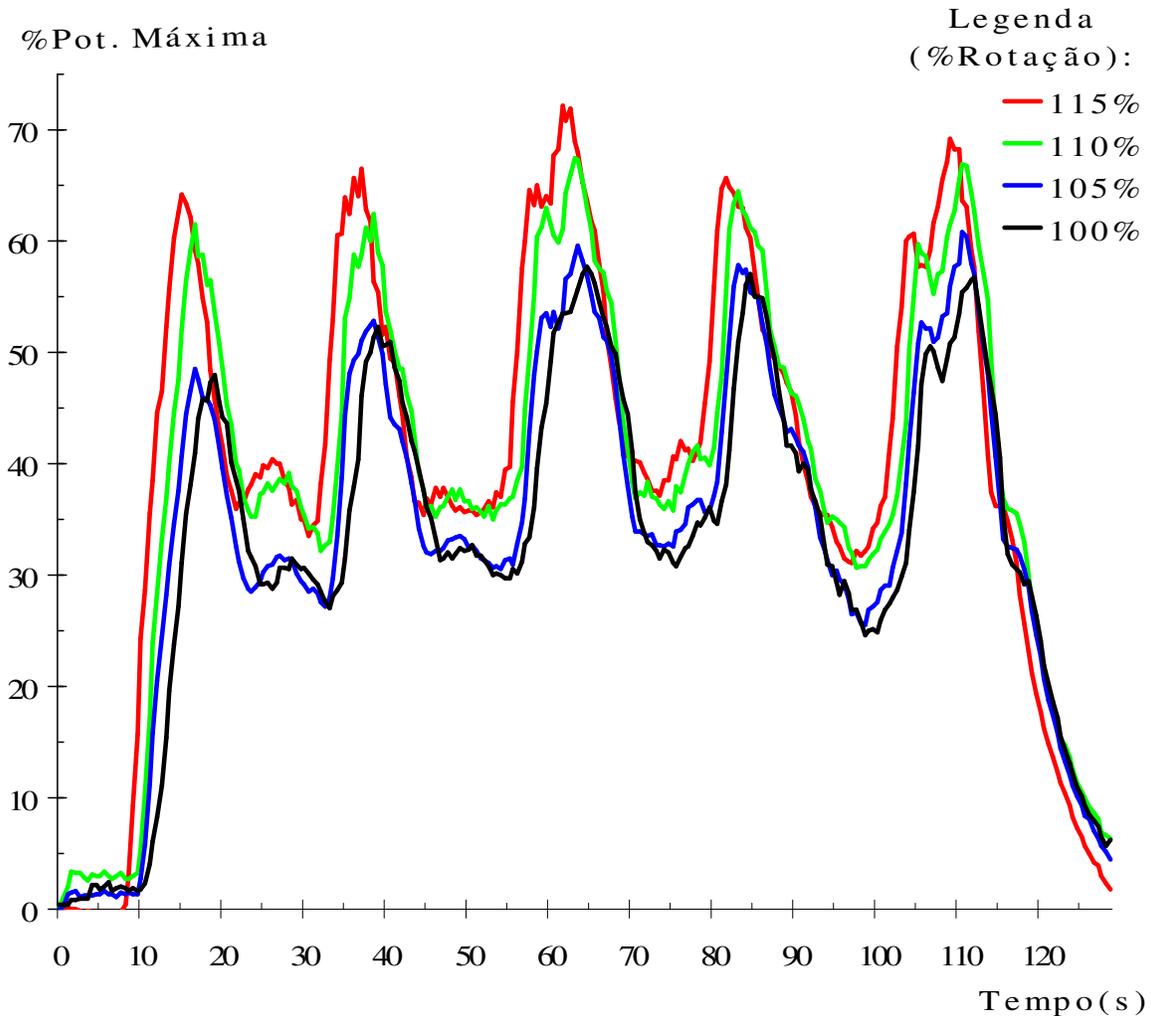


Figura 4.35: Perfil de energia para rotações maiores que a nominal 100%

Conforme figura 4.35, um aumento na velocidade de corte implica em maior esforço de usinagem. No caso do ferro fundido cinzento a velocidade de corte não tem muita influência nos esforços de corte porque este material apresenta uma característica frágil gerando cavacos descontínuos em forma de lascas, fato comprovado pelas figuras 4.26 e 4.27. Além disso, em aço é comum ter-se maiores temperaturas quando são utilizadas velocidades de corte mais elevadas, o que facilita o corte. Novamente, devido à morfologia do cavaco, esse fenômeno não ocorre ou é minimizado. Baseado nesses fatos, o que aparece na figura 4.35 é a influência da velocidade diretamente na potência de corte.

Nota-se que o sistema desenvolvido foi capaz de detectar variações de velocidade de corte da casa de 5%. Da figura 4.36 temos que maiores velocidades de corte demandam em maior potência.

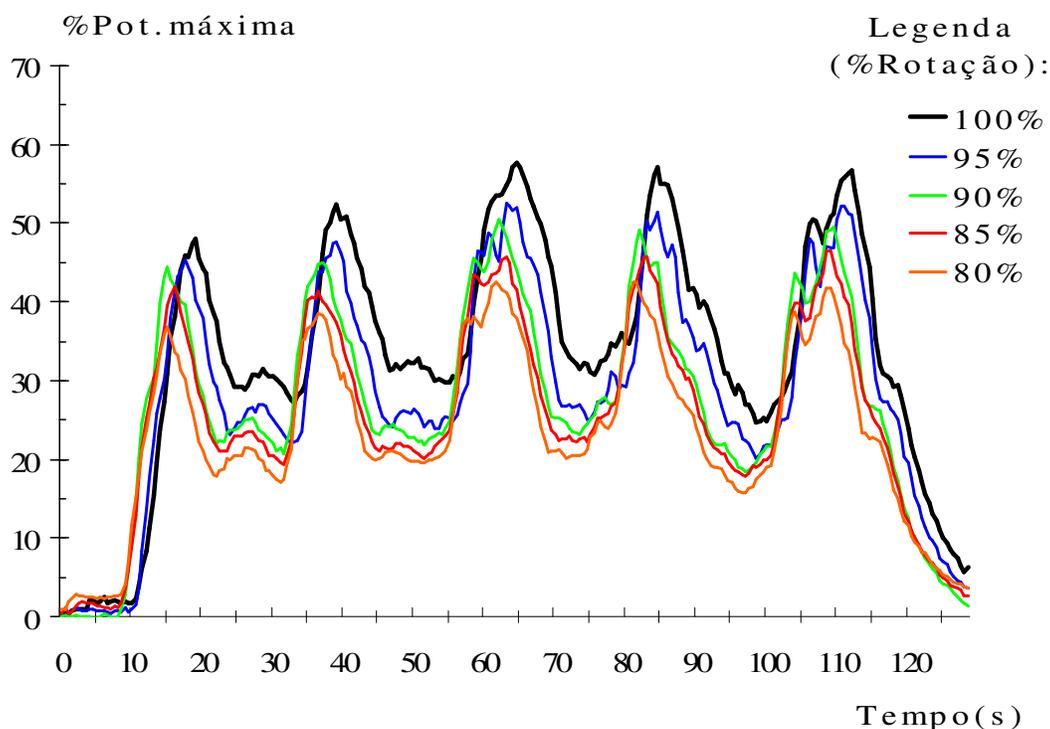


Figura 4.36: Perfil de energia para rotações menores que a nominal 100%

Comparando-se as figuras 4.35 e 4.36 nota-se que os valores acima e abaixo de 100% apresentam patamares distintos. Outro ponto a se ressaltar é que o sinal foi capaz de detectar variações de esforços dentro da usinagem, tais como ausência de contato durante a passagem do dente sobre os furos da face do cabeçote ou no vazio da face do carter. A figura 4.35 mostra patamares levemente distintos, enquanto que na figura 4.36 encontram-se mais distanciados entre si. Isso parece indicar que o sistema precisa de variações maiores para detectar diferenças. Novamente, as variações de potência de corte, quando perceptíveis, decorrem de variações na velocidade em si. Em termos de potência consumida, então, quanto menor a velocidade de corte, melhor. Vale lembrar que isso, a princípio implicaria em maior vida da ferramenta, porém em maior tempo de usinagem. Das tabelas do apêndice, item 7.4, também foram gerados os gráficos de potência consumida (W) por volume de material removido (cm³) considerando a variação na

velocidade de corte, tanto para ferramenta com insertos em início de uso como para insertos já desgastados.

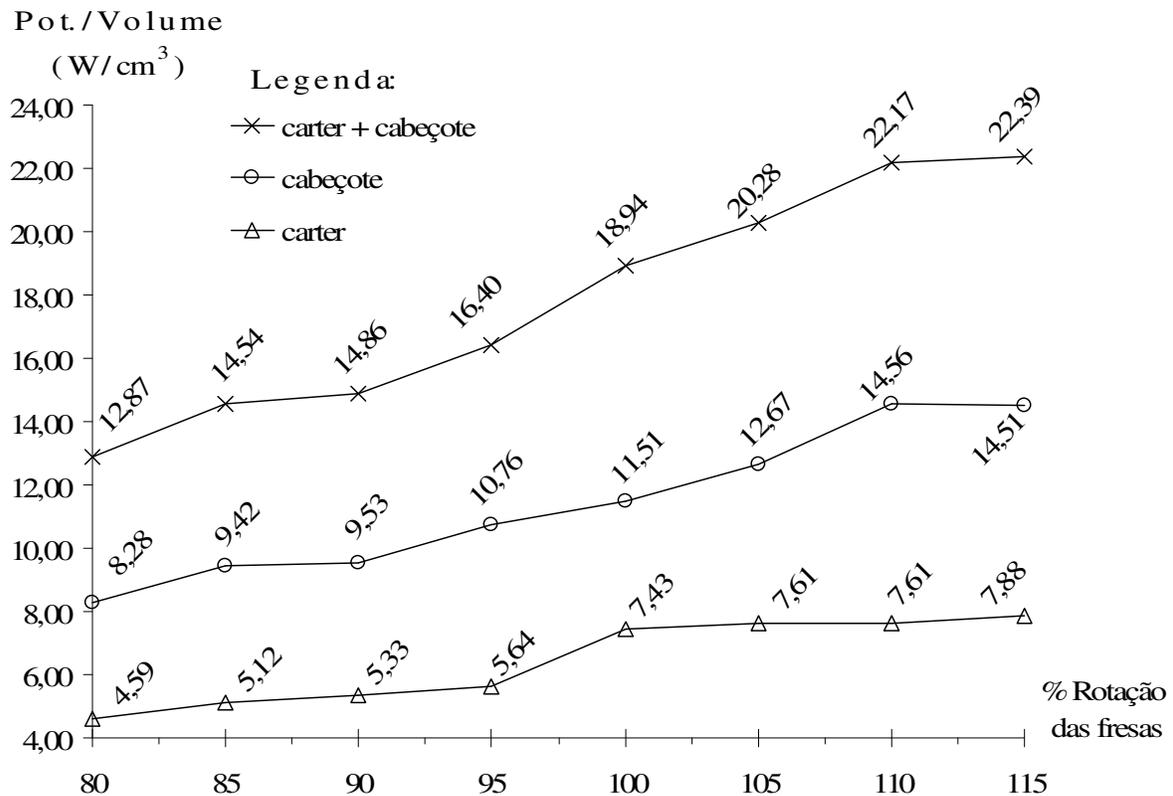


Figura 4.37: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (%de Rotação das fresas) com a ferramenta no início de uso - lado do carter, cabeçote e o somatório.

Como é conhecida a participação percentual da usinagem das faces do carter e do cabeçote, traçou-se as correspondentes curvas de comportamento da relação na figura 4.37.

Analisando-se a figura 4.37 nota-se que do ponto de vista da potência para remoção de material mostra-se que os melhores resultados estão nas velocidades de corte mais baixas onde a potência por cm^3 de massa apresenta valores relativamente menores. Vale lembrar que esta é uma característica que considera apenas a potência necessária para o corte, sem levar em conta o que ficou evidenciado no rendimento a vazio. A tendência crescente da potência específica está relacionada à maior velocidade de corte empregada. Nesse caso, a maior velocidade de corte implica em maior potência de corte necessária. A maior variável no caso não foi representada e diz respeito ao tempo para remoção desse volume. No equipamento em questão, a velocidade de avanço é definida de forma independente da rotação do fuso.

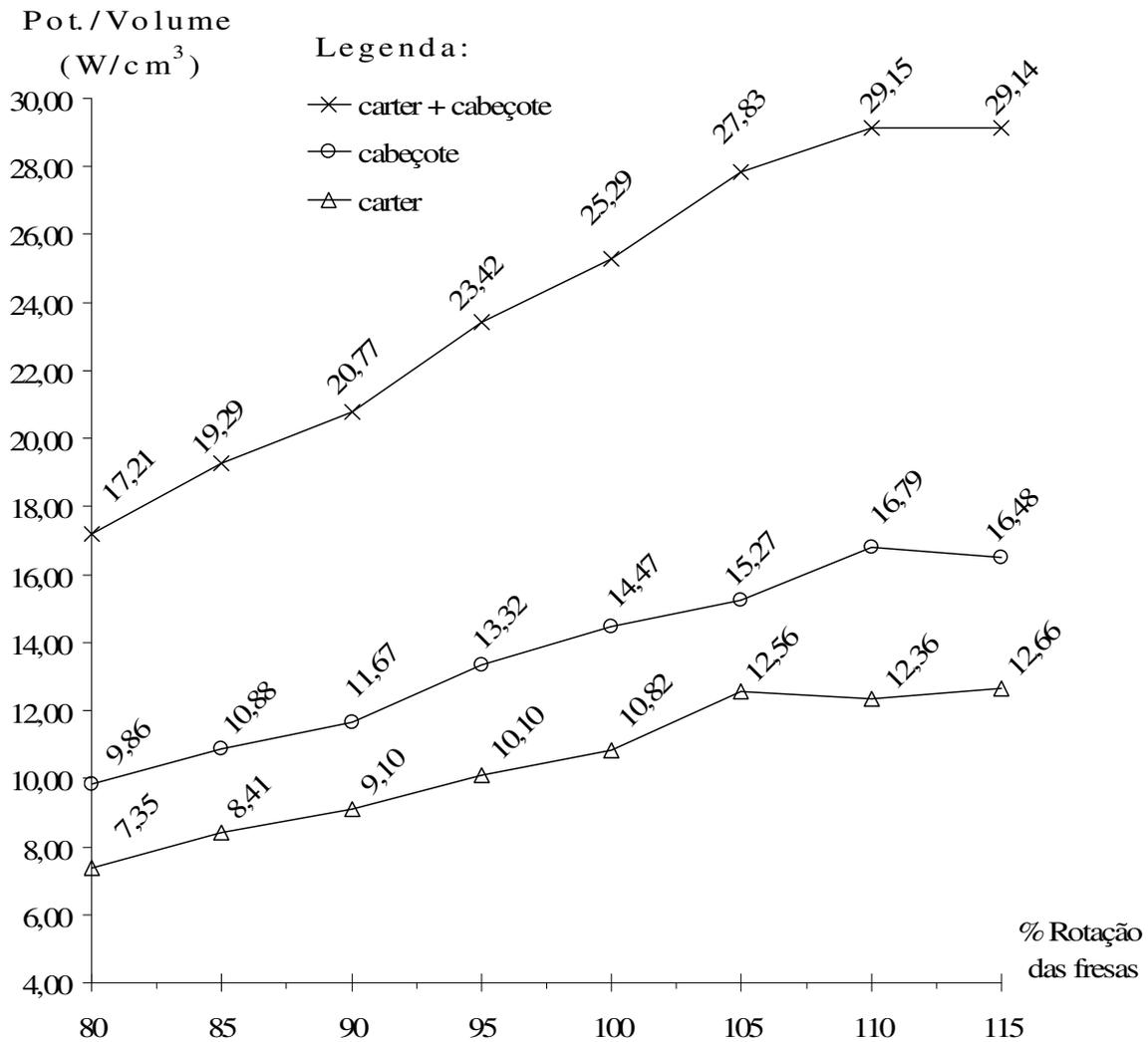


Figura 4.38: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (%de Rotação das fresas) com a ferramenta ao final do uso - lado do carter, cabeçote e o somatório.

A utilização de uma maior velocidade de corte é alcançada com aumento da rotação da fresa, que permite então a utilização de uma maior velocidade de avanço com o mesmo avanço por dente.

O rendimento apresenta um comportamento decrescente com o aumento da velocidade de corte da ordem de 50% quando a velocidade ultrapassa 5% a nominal. Por outro lado, quando a velocidade fica abaixo da nominal, a perda de rendimento atinge cerca 20% e o ruído da máquina aumenta em quase 10 dB, provavelmente pela nova dinâmica do processo. Velocidades de corte maiores fazem com que o dente possua uma energia cinética maior ao entrar em corte (nos gráficos das figuras 4.35 e 4.36, a área sob a curva representa a energia), o contrário ocorre com

velocidades menores. Nas velocidades de corte mais altas o rendimento cai e aumenta o ruído de transmissão, mas não se observa ruído de esforço excessivo nos insertos. As figuras 4.37 e 4.38 informam a potência por volume com inserto no início e no final de vida, para o carter, cabeçote e somatório dos dois. A figura 4.39, para facilitar a visualização das informações, apresenta apenas o somatório desta relação de massa e potência consumida entre as duas situações.

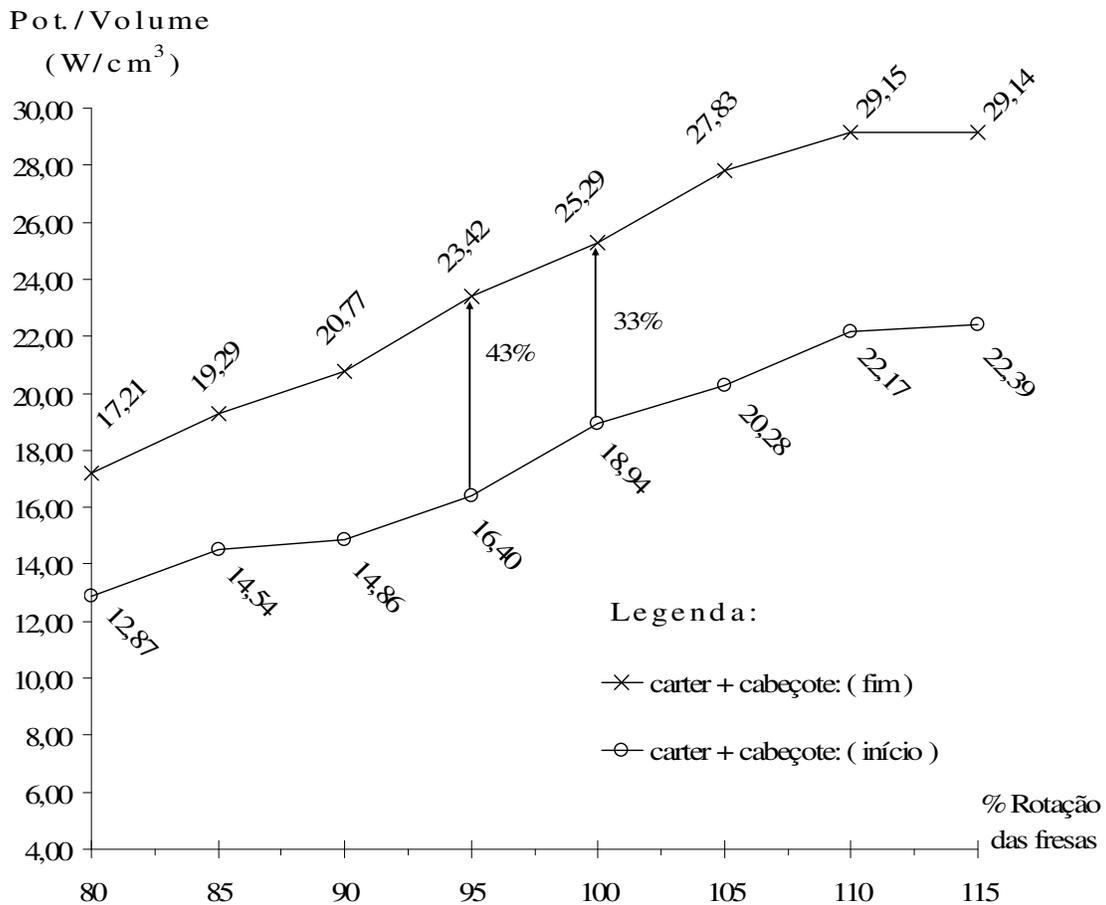


Figura 4.39: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (%de Rotação das fresas) entre a ferramenta ao início e final de uso - lado do carter + cabeçote.

Conforme indicado no gráfico da figura 4.39 observa-se um afastamento médio de 33% na potência específica (W/cm^3), necessária para o corte, oscilando entre 30 e 43% entre a ferramenta no início e no final de vida, em todo o espectro de variações de velocidades de corte testado. A pior condição se deu na velocidade de corte onde esta diferença ficou em 43% a 95% da rotação nominal e uma estabilização, sem crescimento após ultrapassar a rotação de 110% da rotação nominal. Pode-se notar que a diferença entre os dois casos é quase constante. A figura 4.39

mostra que a potência consumida no corte pode ser um bom indicador do fim de vida da ferramenta. Comparando-se as figuras 4.37 e 4.38, nota-se que as diferenças são significativas para as duas faces.

Como processo normal de troca de ferramentas adota-se a troca completa das fresas que operam nas duas faces da peça de uma só vez, em cada troca.

Devido à dimensão das fresas, bem como ao número de insertos, o número de paradas deve ser reduzido, porém o monitoramento da potência é capaz de indicar o final de vida de cada fresa.

As figuras mostram a potência específica de corte. Para isso foi necessário pesar-se os blocos usinados, como mencionado anteriormente. Porém, a diferença de massa removida entre os blocos foi relativamente pequena, isso faz com que o monitoramento da potência pura e simplesmente seja suficiente para indicar o fim de vida das ferramentas.

Do conhecimento das respectivas potências envolvidas, no carter e no cabeçote, traçou-se uma investigação das variações da potência específica (W/cm^3) para uma progressão entre ferramenta no início de uso e ao final de vida.

Obteve-se, então, os gráficos das figuras 4.40 e 4.41 com as projeções individuais.

Nestas figuras é possível observar a diferença de crescimento da potência necessária para realizar o corte, ou seja, no lado do carter, a progressão é de 46% enquanto no cabeçote foi de 26% na velocidade nominal. A partir dos gráficos podemos afirmar que, além da capacidade de avaliar o desgaste de uma ferramenta pela monitoração do limite de potência média alcançada, temos um novo parâmetro, o da velocidade desta progressão, pois esta define o quanto uma usinagem é desfavorável em relação à outra e independe da quantidade de material que esta sendo removido.

O exemplo foi dado, o carter é o pior caso, porque, mesmo removendo menos material, teve o maior desgaste, e é a face que eleita na decisão pela troca das 2 fresas, com a substituição por outro conjunto com insertos novos, pois chega ao final de vida mais cedo e como processo é feita a substituição dos 2 jogos de ferramenta.

Assim há que considerarmos não só a potência média específica, mas também, a velocidade com que esta variação acontece.

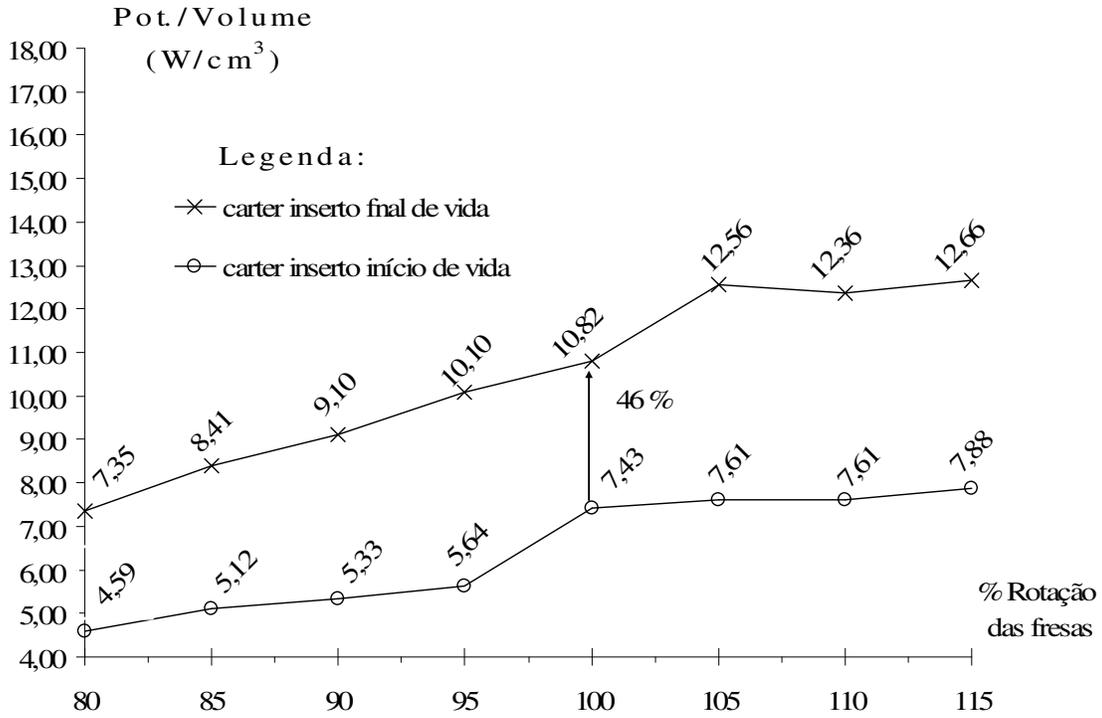


Figura 4.40: Relação de Potência por volume (W/cm³) x (% de Rotação das fresas) entre a ferramenta ao início e final de uso - lado do carter.

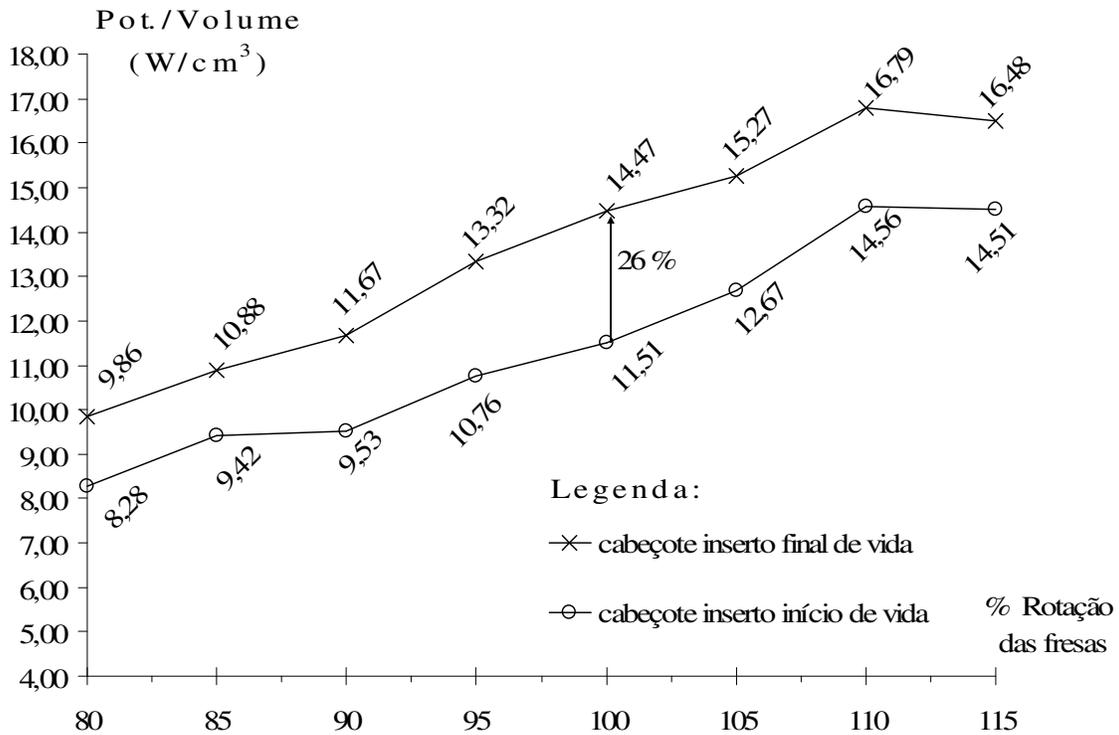


Figura 4.41: Relação de Potência por volume (W/cm³) x (% de Rotação das fresas) entre a ferramenta ao início e final de uso - lado do cabeçote.

4.4.2. Avaliação da energia consumida com variação de velocidade de avanço

Com uma velocidade de avanço menor ocorre uma sensível melhora na qualidade da peça usinada devido às condições geométricas do contato peça-ferramenta.

No gráfico da figura 4.42 verifica-se que quando a velocidade de avanço aumenta, aumenta também a energia necessária para remoção do mesmo material. A variação na velocidade de avanço gerou tabelas constantes do apêndice item 7.5.

Pode-se observar na figura 4.42 que o sistema de aquisição de potência foi sensível para captar a entrada e saída do corte. Avanços maiores implicam em espessuras de cavaco maiores, portanto, forças de corte maiores, conforme equação 5. Essas forças maiores são, possivelmente, responsáveis pela maior potência consumida. Por outro lado, o tempo de corte diminui, ou seja, maiores avanços geram piores acabamentos, demandam mais potência, mas aumentam a produtividade do sistema. Além disso, a área sob a curva representa a energia consumida no processo.

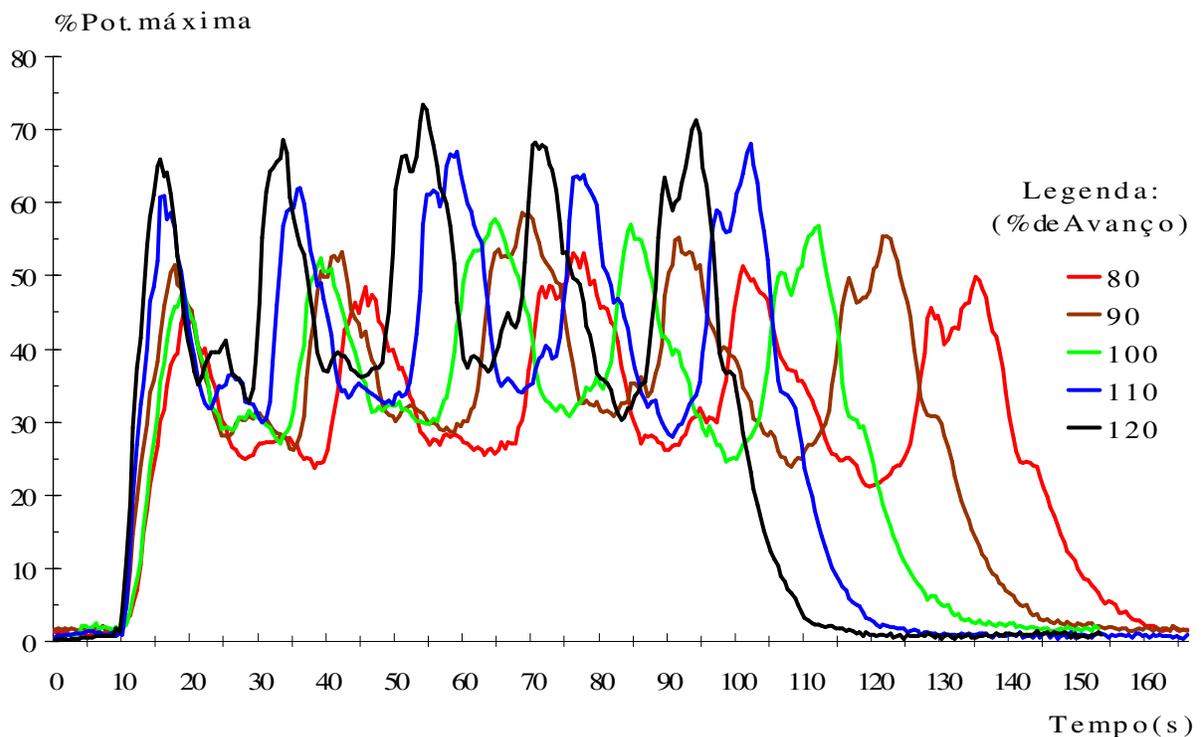


Figura 4.42: Perfil de energia para diversos avanços da mesa em relação à nominal 0%.

A velocidade de avanço normalmente é definida em função da capacidade da ferramenta, bem como do acabamento desejado para a peça. A operação em questão é de desbaste, com isso,

não há preocupação com o acabamento. Torna-se importante frisar que no presente trabalho, não foram feitos ensaios de vida das ferramentas trabalhando com as diferentes velocidades de avanço. Pois, a grosso modo, a energia consumida com velocidades de avanço maiores é aproximadamente igual à consumida com avanços menores. A diferença é que nesse último caso, o tempo dispendido é maior. A dúvida é se a ferramenta suportaria impactos com uma amplitude de força maior e uma duração menor ou o contrário. Aparentemente, a segunda opção seria melhor, pois as micro trincas, típicas de fresamento, originam-se em função da intensidade do impacto. Além disso, um maior tempo de contato contribuiria para assimilação da energia pela ferramenta.

A figura 4.43 apresenta as médias de potência específica para as diferentes velocidades de avanço para os insertos em início de uso.

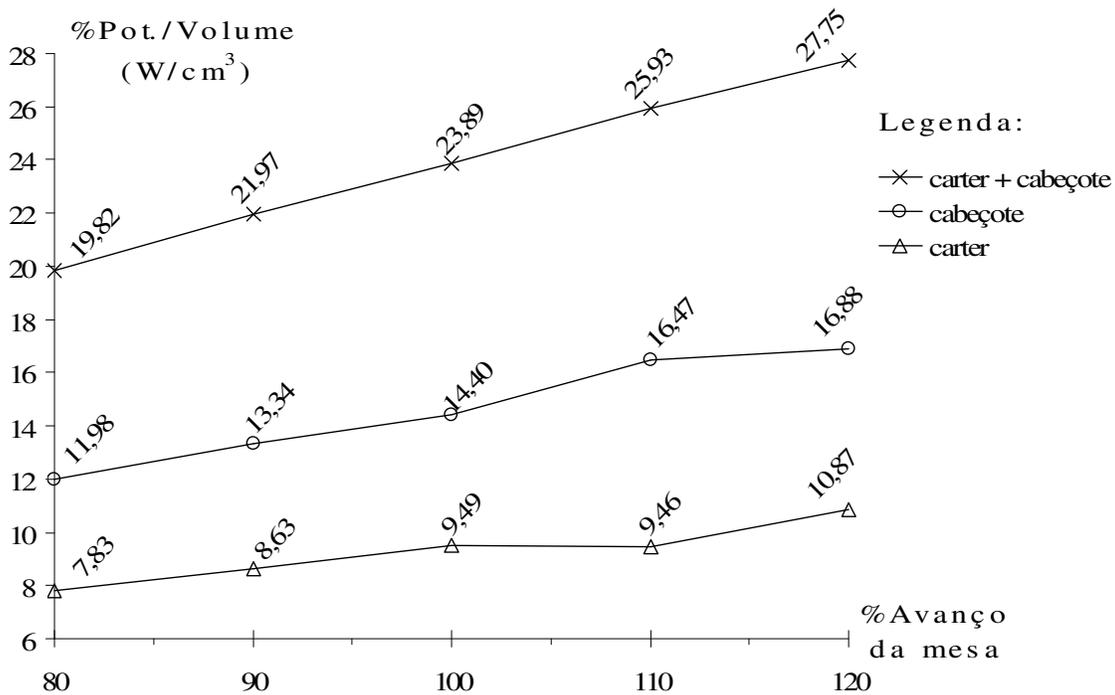


Figura 4.43: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (% de Avanço da mesa) com a ferramenta ao início de uso - lado do carter, cabeçote e o somatório.

Nota-se que para a face do carter, a velocidade de avanço apresentou um patamar, entre 100 e 110%, onde a influência na potência consumida pelo corte praticamente não existiu. Nos demais intervalos houve crescimento da potência específica consumida com o aumento da velocidade de avanço. Isso provavelmente ocorreu porque maiores velocidades de avanço com

velocidades de corte iguais implicam em maiores avanços por dente e consequentemente maiores espessuras de cavaco, que geram maiores esforços de corte. Como a potência de corte pode ser entendida como o produto da velocidade de corte pela força tangencial, maior força, maior potência. A face do cabeçote apresentou crescimento da potência específica consumida com o aumento da velocidade de avanço, mas esse crescimento foi bem mais tênue do que o que ocorreu com a variação de velocidade de corte e mesmo com a variação de profundidade de corte. A explicação para o aumento é a mesma dada anteriormente para a face do carter.

A figura 4.44 apresenta a potência específica consumida no corte em função das diferentes velocidades de avanço com os insertos em fim de vida. Nota-se que nesse caso, tanto a face do carter quanto a do cabeçote apresentaram crescimento da potência com a velocidade de avanço.

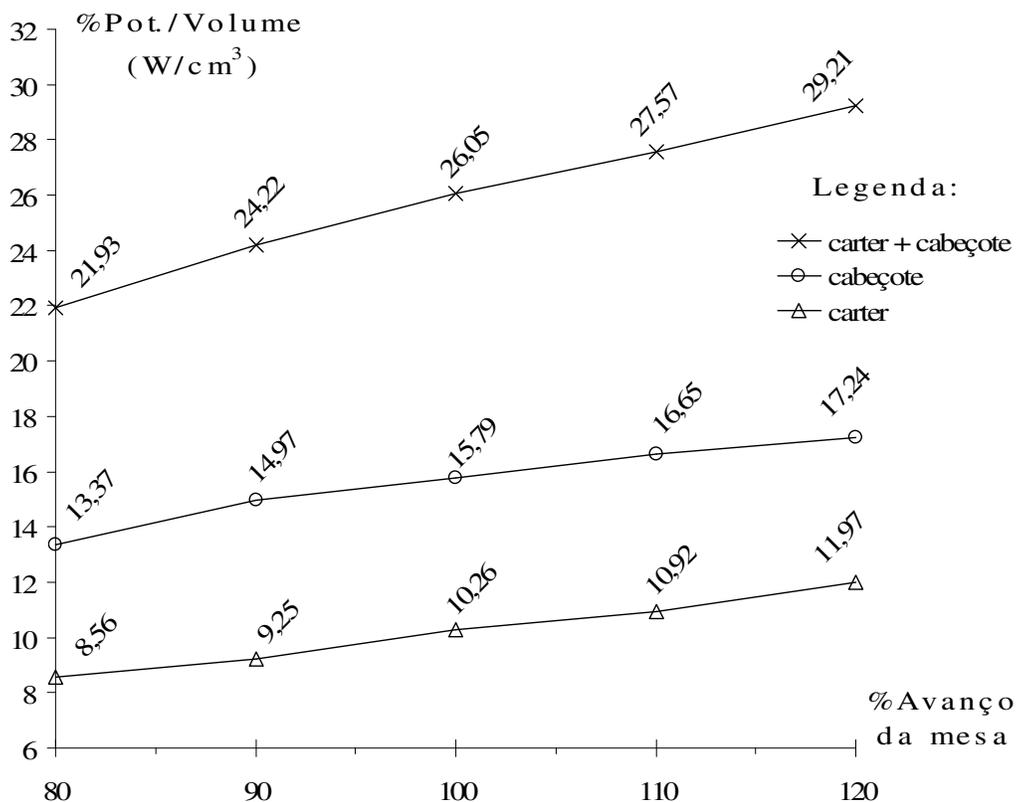


Figura 4.44: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (% de Avanço da mesa) com a ferramenta ao final do uso - lado do carter, cabeçote e o somatório.

A figura 4.45 apresenta a somatória das potências consumidas nas faces do carter e cabeçote com insertos em início e fim de vida. Observando-se a figura 4.45 nota-se que novamente o sinal de potência específica consumida no corte foi sensível o suficiente para captar

o desgaste da ferramenta. Esse maior consumo de potência específica se dá, provavelmente, porque o desgaste das ferramentas tendem a gerar maiores esforços de corte.

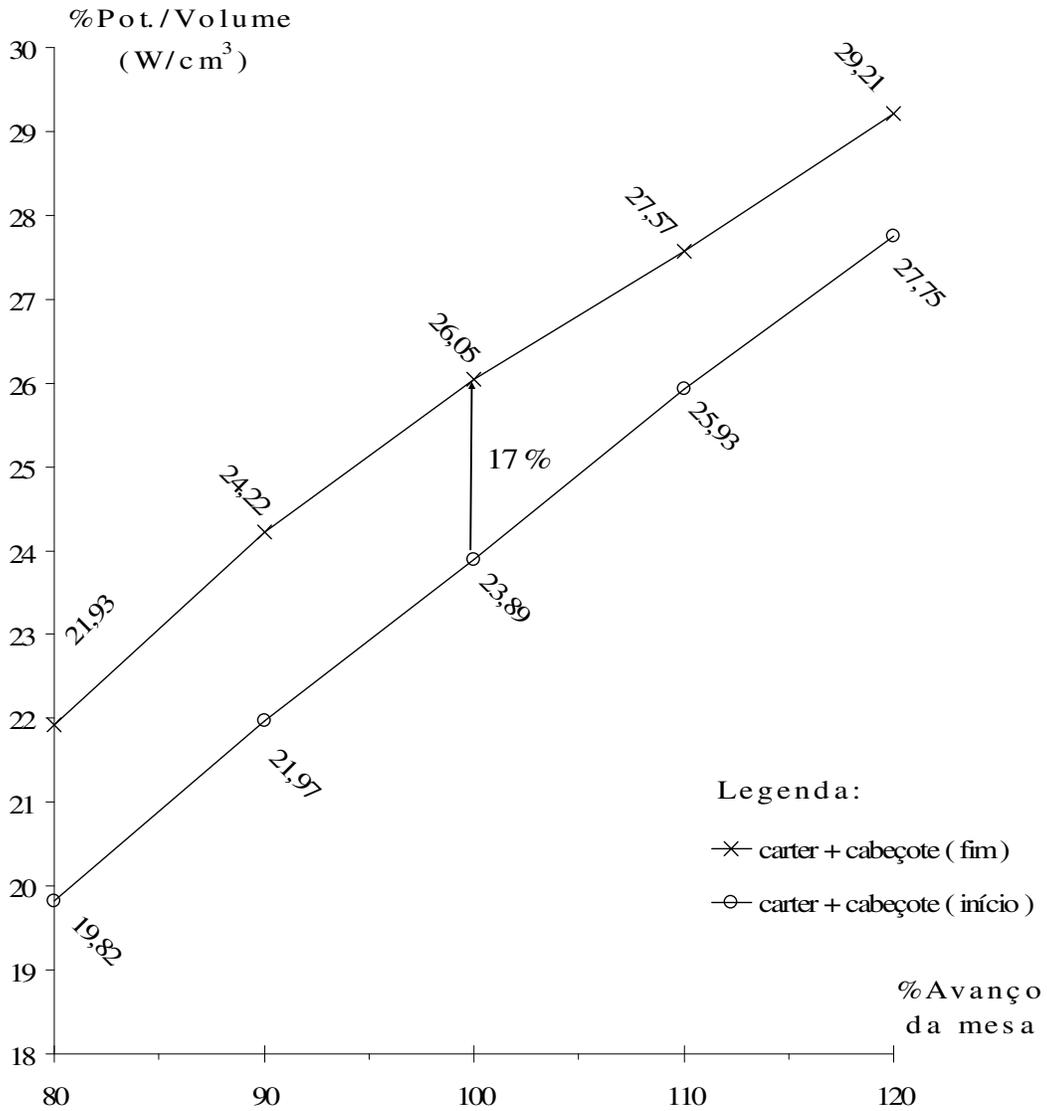


Figura 4.45: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (% de Avanço da mesa) entre a ferramenta ao início e final de uso - lado do carter + cabeçote.

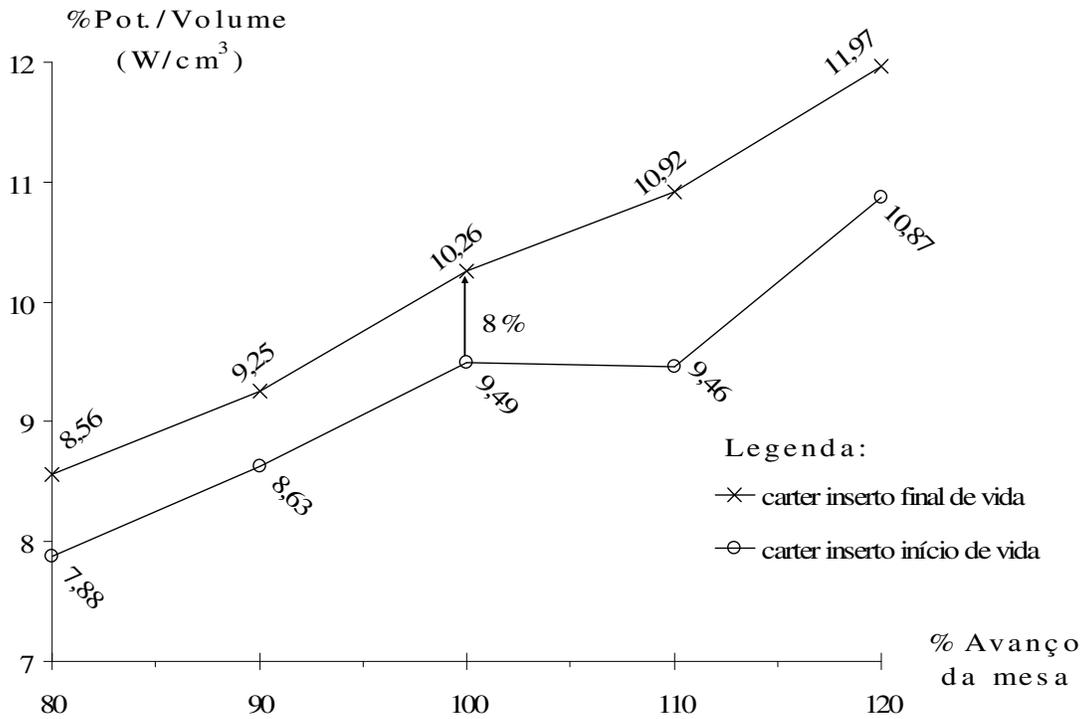


Figura 4.46: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (% de Avanço da mesa) entre a ferramenta ao início e final de uso - lado do carter.

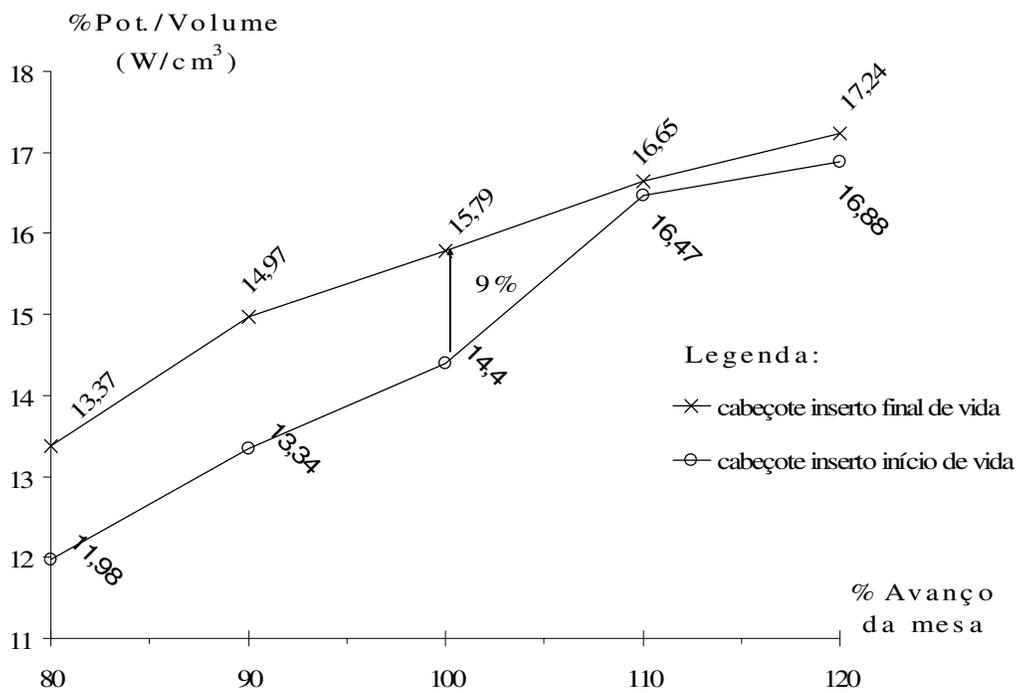


Figura 4.47: Relação de Potência por volume (W/cm^3) x (% de Avanço da mesa) entre a ferramenta ao início e final de uso - lado do cabeçote.

As figuras 4.46 e 4.47 mostram os comparativos de potência específica consumida para as faces do cabeçote e carter isoladamente, com insertos no início de uso e na fase final de vida, com variação da velocidade de avanço. Observando-se as figuras 4.45, 4.46 e 4.47, nota-se que é possível adotar-se o sinal de potência específica, ou mesmo o sinal de potência para definir de forma mais objetiva o fim de vida da ferramenta. Como mencionado anteriormente, essa definição pode ser feita tanto de forma global, ou seja somando-se os sinais das duas faces, quanto de forma isolada para cada face. Na prática, trocam-se os insertos das duas faces simultaneamente, haja vista que a máquina não consegue manter-se usinando apenas uma face isoladamente.

Da variação de avanço, a diferença de potência, resultou em 17%, no carter e 9% no cabeçote, praticamente a metade do que foi observado nos ensaios com variações de velocidade de corte, onde destaca-se a menor influência entre as 2 situações.

A diferença percentual entre as potências necessárias para usinar o carter e o cabeçote, com o uso de insertos desgastados e novos, depende da velocidade de avanço. Abaixo do avanço nominal (100%), a diferença alcança 10% aproximadamente para ambas as faces. Acima do avanço nominal, a diferença reduz a cerca de 5 % para o carter e 2 % para o cabeçote.

Análise dos desgastes da ferramenta:

Realizados os testes, foram separados dois insertos, para análise em microscopia eletrônica por energia dispersiva EDS, um do lado do carter e o outro do lado do cabeçote. As amostras para análise mantiveram-se na velocidade de corte e de avanço nominais. Da figura 4.48 vê-se uma região desgastada indicando a evidência de pequenas fissuras perpendiculares à aresta de corte.

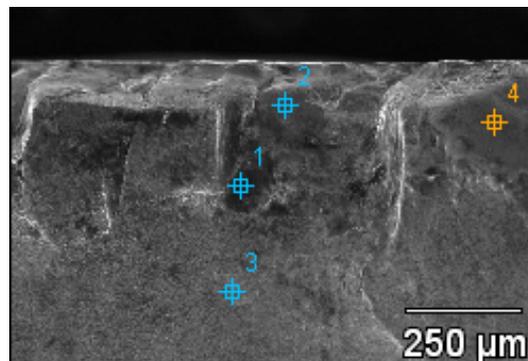


Figura 4.48: Lascamento da pastilha da fresa - lado do carter – Microscopia eletrônica de varredura com elétrons secundários (25 kV)

Tabela 4.1: Análise química por energia dispersiva (EDS) – lado do carter

Concentração em peso % em cada ponto:

Pto.	O	Al	Si	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Zn	Y	W
1	19,27	1,99	7,02	31,20	0,58	0,33		33,34	4,30				1,96
2	24,39	6,72	12,31	11,61		0,62	0,48	29,92	13,93				
3	29,65								21,71	10,16		0,54	37,93
4	24,85	7,95	12,34	6,96		0,90		28,57	18,41		0,02		

O corte interrompido com sucessivos choques mecânicos causa súbitas variações térmicas em que o material da ferramenta não consegue acompanhar as variações bruscas de temperatura. Neste processo cíclico de compressão (na região fria do corte) e de expansão (na região em corte) com aquecimentos e resfriamentos sucessivos acabam fragilizando as diferentes camadas da pastilha e expondo-a para um enfraquecimento prematuro. No lado do carter ocorrem, em média, quatro impactos por volta da fresa em 16% do tempo de corte. Em 211 revoluções praticamente apenas 34 são efetivas para o corte durante um minuto e cada inserto recebe 844 impactos. Pela análise química, da figura 4.48, expresso na tabela 4.1, temos que no ponto 1 existe forte adesão de material com presença do enxofre e do manganês à pastilha de inserto. No ponto 2, além da presença de manganês, ocorre material utilizado no revestimento da pastilha com o cromo. O ponto 3 praticamente não foi afetado pelo desgaste apresentando basicamente elementos da cobertura da ferramenta enquanto no ponto 4 existiu forte adesão de ferro e manganês do material usinado. Os choques térmicos provocados pelos sucessivos impactos foram decisivos no lascamentos gerados, diferentemente do que poderíamos ter em um desgaste gradual. A evolução do lascamento pode acelerar as condições propícias para uma quebra e a perda definitiva da ferramenta.

Quanto ao inserto empregado na face do cabeçote, figura 4.49, vê-se que este foi submetido a dois impactos por volta em 33% do tempo de corte onde das 154 revoluções, 51 são efetivas para corte em um minuto, mas receberam 308 impactos, em média, 36% do número de impactos ocorridos na outra face, (cerca de 1/3). Isto atesta o quanto ficou reduzido o desgaste para uma condição em que o corte ocorre com menor frequência de impactos. Na figura 2.13 temos o aspecto resultante em que predomina o desgaste por micro fraturas, com maior tempo de contato

da aresta de corte com a peça. Na tabela 4.2 vê-se a concentração química dos elementos encontrados. No ponto 1 foi encontrado material de revestimento da ferramenta, mas no ponto 2, além de material de revestimento foi encontrado forte aderência de Ferro, Manganês, Enxofre e Silício que são da peça usinada e o ponto 3 com Manganês e Enxofre por aderência.

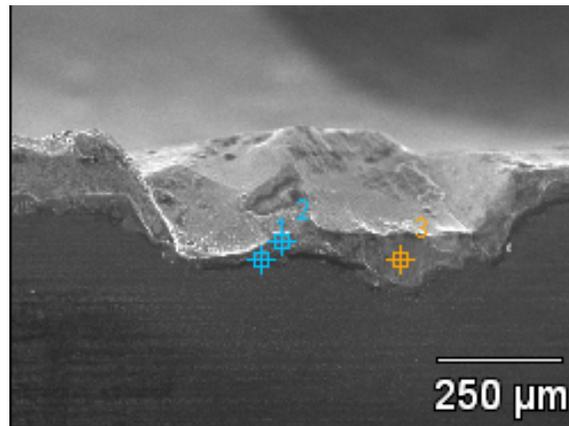


Figura 4.49: Lascamento da pastilha da fresa - lado do cabeçote –Microscopia eletrônica de varredura com elétrons secundários (25 kV)

Tabela 4.2: Análise química por energia dispersiva (EDS) – lado do cabeçote
Concentração em peso % em cada ponto:

Pto.	O	Al	Si	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	W
1	52,98	37,04	0,35			9,63					
2		2,18	9,12	23,03			0,64	20,77	24,02	2,99	17,24
3		1,17	5,95	34,26	0,39			58,23			

Os esforços mecânicos e os efeitos térmicos de usinagem causam micro fraturas na face de corte do inserto. Os esforços mecânicos geram tensões residuais de compressão, enquanto os efeitos térmicos no processo de corte geram tensões residuais de tração, [Arunachalam, 2004].

As tensões residuais influenciam na resistência mecânica alterando as propriedades entre a superfície e o interior do material. Esta diferença deve ser a menor possível, porque tende a fragilizar a estrutura contribuindo para a formação de trincas, deixando o material exposto à corrosão. Por isto, a diferença de propriedades entre a superfície e o núcleo deve ser a menor possível, [Oliveira, 2004].

5. Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos

Foi realizada a análise do sobremetal aplicando reduções sucessivas, de 0,5 em 0,5 mm a cada fresamento, tendendo até a cota zero do desbaste final previsto para a operação onde se conclui que a superfície resultante apresentou um acabamento aceitável, sem falhas, na cota de 2,0mm para o cabeçote e de 0,5mm para o carter. Uma redução de 50% de sobremetal na face do cabeçote e 16% na face do carter.

A potência média foi diretamente proporcional ao volume de material removido, ou seja, é favorável ao aumento na espessura ou na largura, mas admite que a densidade de potência utilizada por volume tem melhor rendimento quando mais material está sendo removido de cada vez. Dos experimentos com sobremetal, é possível afirmar que o rendimento desta densidade de potência por volume decai de 32% entre o material da zona intermediária para a final.

Nas avaliações de rugosidade, durante os ensaios em que se variou apenas a espessura fresada, foi possível identificar um acabamento superior destas superfícies em que se removeu menos sobremetal e proporcionalmente exigiu-se menos potência de usinagem. Também é comprovada que os pontos de entrada da fresa na peça oferecem redução na qualidade da superfície. Nas avaliações de planeza, ficou confirmada pelo comportamento das curvas que a qualidade da planeza decai com o número de peças produzidas.

Baseado na relação entre a potência gasta com a ferramenta na fase inicial de uso e a ferramenta desgastada, foi possível estabelecer um novo critério para a troca da ferramenta de forma mais objetiva.

A potência de corte é diretamente proporcional à velocidade de corte, mas deve-se atentar ao rendimento da máquina que pode afetar estes resultados em diferentes níveis de velocidade.

Foi possível identificar que mesmo em ordem de grandeza reduzida quanto à potência exigida, tanto na face do carter como na face do cabeçote, que o fenômeno da flutuação térmica

do corte interrompido é capaz de desgastar mais rapidamente a ferramenta, entre 46% no carter contra 26% para o cabeçote, confirmando a característica desfavorável do corte mais interrompido no lado do carter.

A ferramenta sofreu um desgaste proporcional ao avanço, mas não sentiu o reflexo do rendimento como a variação de rotação das fresas e a variação de densidade de potência entre ferramenta na fase inicial de uso e na fase desgastada que foi de apenas 17%, inferior aos resultados obtidos com variação apenas na velocidade de corte. Diferenças de desgaste entre carter e cabeçote não são comprovadas por simples variação no avanço haja vista que as diferenças mantiveram-se entre 8 e 9% durante os ensaios.

Aliada a esta constatação tem-se que as variações de corrente, durante os ensaios, no inversor de frequência da mesa, foram desprezíveis (entre 3,3 e 3,4A durante usinagem).

A proporção entre os índices medidos para o nível da potência média na remoção de material desde o início até o fim da vida da ferramenta oferece-se como um instrumento poderoso para definir o momento de troca dos insertos de uma fresa em um processo contínuo, dispensando interrupções em avaliações freqüentes no desgaste através de *preseters*.

Em uma mesma proposta de trabalho poderíamos alcançar melhores resultados através de balanças mais precisas. Quanto ao sistema de aquisição de dados desenvolvido para o experimento, por exemplo, poderíamos utilizar o software dedicado da WEG, o *superdriver* juntamente com a placa serial KCS código 1093.3548, ou até mesmo em outras aplicações com disponibilidade apenas da tensão analógica de 0 a 10 volts. A taxa de amostragem, ou frequência de aquisição na atualização da corrente elétrica consumida pelo inversor de frequência CFW09 é de 2 Hz e do CLP é de 20ms. Existe também a alternativa de utilizar-se placas eletrônicas com seletividade dedicada para adquirir dados em frequências maiores. Na coleta da corrente elétrica e conversão para valores digitais, poderia se expandir de 12 bits para uma placa eletrônica com maior capacidade, além de aumentar a quantidade de leituras por segundo aumentando a precisão das leituras. Atenção poderia ser dada, também, quanto à cor do cavaco, com o desenvolvimento de um instrumento para uma investigação precisa.

Como sugestão para trabalhos futuros podería-se expandir os objetivos do trabalho atual, agregando mais variáveis de estudo. Por exemplo: Avaliar a potência medida em paralelo com o desgaste obtido na ferramenta. Avaliar a tensão residual frente aos esforços impostos à peça.

6. Referências

[Agostinho et al, 2004] – Agostinho, O.L, Vilella, R.C. & Button, S.T. 2004. Processos de Fabricação e Planejamento de Processos. 2ª Ed.Campinas, UNICAMP, Processos Produtivos em Engenharia de Produção – Usinagem.

<http://mmborges.com/processos/>, 01/11/2009

[Diniz, 1999] - Diniz, A e; Calderini Filho, J., Influence of the Relative Positions of Tool and Workpiece on Tool Life, Tool Wear and Surface Finish in the Face Milling Process. 1999.

[ASM, 1967] - American Society for Metals, c1967, ASM HANDBOOK COMMITTEE. Metals Handbook. V3. Machining. 8th Ed. Ohio.

[Arunachalam, 2004] - Arunachalam R. M., Mannan M. A., Spowage A. C. Surface Integrity when machining age hardened inconel 718 with coated carbide cutting tools. International Journal of Machine and Manufacture 44, 2004 – p1481-1491, dissertação - “Caracterização da Integridade de Peças Usinadas”, Alfredo Tomé, Diego C. Calza, Marcus V. R. Braghini, Rodrigo P. Zeilmann, http://www.cbecimat.com.br/Trab_Completos/311-005.doc, 02/07/2009

[Baker, 2006] - Bezerra, Alexandre Araújo, Dissertação: Estudo do desgaste no roscamento com alta velocidade em ferro fundido. São Carlos, SP em 2003, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

[Boff, 2003] – Boff, Cristiano Ramos, 2003, Dissertação: Metodologia de análise de blocos de motores, pg.14.

[Borelli et al, 2000] - João Eduardo Borelli, Aldo Branchini Junior, Reginaldo Teixeira Coelho, Adilson Gonzaga, 2000, Diagnóstico de estados de ferramenta nos processos de usinagem de alto desempenho com o uso de lógica Fuzzy e imagens de infravermelho.

<http://iris.sel.eesc.usp.br/lavi/pdf/usinagem8.pdf> , 01/11/2009

[Calderini, 1998] - Calderini, José Filho, 1998, Dissertação: Estudo e Monitoramento do Processo de Fresamento Frontal com Fresas de Insertos Intercambiáveis.

[Carneiro, 2005] – Carneiro, Paulo Augusto Osório, 2005, Dissertação: Metalografia e Tratamentos Térmicos II Ferro Fundido,

<http://www.perdiamateria.eng.Br/Trabalhos/ferrofundido.doc> , 14/05/2009

[Chiaverini, 1994] - Chiaverini, Vicente, 1994, Aços e ferros fundidos. 6. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, pg.498,510.

[Colpaert, 1974] - Colpaert, Hubertus, 1974, Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 3 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, pg.318.

[Coppini, 2006] - Nivaldo Coppini, Francisco Marcondes e Anselmo Diniz, 2006, Tecnologia da Usinagem dos Materiais.

[CIMM, 2009] - Centro de Informação Metal Mecânico, 2009,

http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/4862

[De Garmo et al, 1997] - De Garmo, E. Paul ; BLACK, J.T. e KOHSET, Ronaldo A., 1997, Materials and Processes in Manufacturing, Prentice Hall, NJ, 1997, - pg.1259.

[http://www.amazon.ca/Materials-Processes-Manufacturing-Paul-](http://www.amazon.ca/Materials-Processes-Manufacturing-Paul-DeGarmo/dp/0471656534%3FSubscriptionId%3D1NNRF7QZ418V218YP1R2%26tag%3Dbf-ns-author-lp-1-20%26linkCode%3Dxm2%26camp%3D2025%26creative%3D165953%26creativeASIN%3D0471656534)

[DeGarmo/dp/0471656534%3FSubscriptionId%3D1NNRF7QZ418V218YP1R2%26tag%3Dbf-ns-author-lp-1-20%26linkCode%3Dxm2%26camp%3D2025%26creative%3D165953%26creativeASIN%3D0471656534.](http://www.amazon.ca/Materials-Processes-Manufacturing-Paul-DeGarmo/dp/0471656534%3FSubscriptionId%3D1NNRF7QZ418V218YP1R2%26tag%3Dbf-ns-author-lp-1-20%26linkCode%3Dxm2%26camp%3D2025%26creative%3D165953%26creativeASIN%3D0471656534)

[Eduardo et al, 2008] - Eduardo Schwinden Leal, Musa Morena Marcusso Manhães, Roni Gabriel Rigoni, 2008, Controle de Desgaste de Ferramentas de Corte,

<http://s2i.das.ufsc.br/tikiwiki/tiki-index.php>, 02/07/2008, S2i/DAS/UFSC - Campus Universitário

[Ferrer, 2006] – Ferrer, Jorge Antonio Giles, 2006. Tese de Doutorado, Uma Contribuição ao Fresamento Frontal de Superfícies Irregulares de Ferro Fundido Cinzento.

[Engprod, 2009] – Engenharia de Produção, 2009 –

<http://www.engprod.ufjf.br/processos/USINAGEM/FRESAMENTO.htm>, 10/06/2009

[Ferraresi, 1970] - Ferraresi, Dino. Fundamentos de Usinagem dos Metais. São Paulo, 1970. Editora Edgard Blucher.

[Guesser et al, 2004] – Guesser, Wilson Luiz; Duran, Pedro Ventrela; Krause, Walmor, 2004, Compacted Graphite Iron for Diesel Engine Cylinder Blocks, p.6

[Infomet, 2009] - Informações Britadas Fundidas e Laminadas - Efeito dos elementos de liga,

[http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-](http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=86&cod_conteudo=148)

[ler.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=86&cod_conteudo=148](http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=86&cod_conteudo=148), em 10/06/2009.

[ISO 3685, 1993] - "Tool Life Testing with Single-point Turning Tools "

[Machado, 1999] - Machado, A.R.; Silva, M.B., (1999), Usinagem dos metais. 4ª edição. Uberlândia: Editora da UFU. 172pg. Apostila.

[Maia et al, 2009] – Maia, Luís Henrique Andrade, Jánes Landre Júnior, Marcelo Becker, Wisley Falco Sales, 06/09/2007, Dissertação: Avaliação vibro-acústica das condições de corte no fresamento de aço de baixa liga ABNT 4140 , Fonte: II Assembléia Geral IFM.

http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/4950-boletim-11, 13/05/2009

[Marcondes, 1990] – Marcondes, Francisco. A História do Metal Duro – Unida Artes Gráficas e Editora, 1990., pg.159 e 160.

[Marquard, 1998] - Marquard, Ralf e Helfried, Sorger e McDonald, Malcolm, 1998, Crack it up: New materials create new possibilities. Engine Technology International.

[MCM, 2005] - Modern Casting Magazine, 2005.

http://www.moderncasting.com/content/section/5/77/, 39th Annual Census of World

Casting Production, MODERN CASTING / December 2005, pg.27,28 e30, 01/10/2009.

[Melo, 2001] – Melo, Anderson Clayton Alves de, 2001 Dissertação - Estudo das trincas de origem térmica geradas em ferramentas de metal duro durante o fresamento frontal, pg.20.

[Melo, 2005] - Melo, A.C.; Silva, M.B da; Machado A. R., 2005, Types of damage in cemented carbide tools. Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, junho 2005.

[Mocelin, 2002] - Mocellin, Fabiano, 2002, Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular em ensaios de furação.

[Müller, 2009] – Müller, G. I., 2009, Apostila / Anotações do professor Müller: Aula9_Ferros Fundidos.doc com referências de: Steel Foundry Melting Practice, Rudolf W. Zillmann, Steel Founders' Society of America, 1973, 762 p., Steelmaking for Steelfounders, Jackson e Hubbard.
http://www.exatec.unisinos.br/~fortis/arquivos/Aula9_FerrosFundidos.doc, 11/11/2009.

[MSPC, 2009] - Multivariate Statistical Process Control - Ferros & Aços II - 30: Ferros Fundidos, <http://www.mspc.eng.br/ciemat/aco230.shtml>, 27/05/2009.

[Oliveira et al, 2004] - Oliveira, J. M., Alfredo Tomé, Diego C. Calza, Marcus V. R. Braghini, Rodrigo P. Zeilmann, 2004, Caracterização da integridade de superfícies usinadas para produção de moldes e matrizes.
http://www.cbecimat.com.br/Trab_Completos/311-005.doc, 02/07/2009.

[Ribeiro, 2006] – Ribeiro, José Luis, 2006, Forças de Usinagem no Fresamento de aços para Matrizes.

<http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/16/PDF/PM16-0085.pdf>, 07/2009.

[Rover, 1996] - Land Rover, Norma RES 21 FC 01, Rover Engineering Standard, Title: High Duty Grey Cast Iron, Issue nº10, de Julho de 1996.

[Sandvik, 1994] - Sandvik Coromant (1994), Modern Metal Cutting – Sandvik Coromant Technical Editorial Dept, Tofters Tryckeri AB, 1º Edition ISBN 91-972299-0-3 Sweden, pp. X1 - X159.

[Sandvik, 2002] apud [Ferrer, 2006] - Sandvik Coromant (2002), Fabricação de Moldes e Matrizes. Catálogo. Suécia: Sandvik Coromant, 2002, 258p.; Ferrer, Jorge Antonio Giles, 2006. Tese de Doutorado, Uma Contribuição ao Fresamento Frontal de Superfícies Irregulares de Ferro Fundido Cinzento.

[Sandvik, 2003] – Sandvik Coromant, Ferros fundidos, 2003.

<http://www.cimm.com.br/>, 01/04/2003.

[Sandvik, 2009] - Sandvik Coromant (2009), Catálogo de Ferramentas – pg173.

[Taegutec, 2009] – Metal Cutting Tools, Cutting Tools, 2009. Simulador de Potência.

<http://www.taegutec.co.kr/main.asp?countryID=5>, 01/10/2009.

[Zillmann et al, 2009] - Zillmann, Rudolf W., Ferros Fundidos, Steel Foundry Melting Practice, 2009, Steel Founders' Society of America, 1973, 762 p., Steelmaking for Steelfounders, Jackson e Hubbard, Steel Casting Research and Trade Association, Inglaterra, 1979, 334 p.

<http://www.exatec.unisinos.br/~fortis/arquivos/- FerrosFundidos.doc em 1/7/2009>, 01/07/2009.

[Webcalc, 2009] - Steel Casting Research and Trade Association, Inglaterra, 1979, 334 p., 2009,

<http://www.webcalc.com.br/frame.asp?pag=http://www.webcalc.com.br/conversoes/torque.html>

em 29/07/09.

[Workfer, 2009] – Ferramentas de Corte.

<http://www.ferramentas-de-corte-widia.com.br/Fresamento.asp>, 05/06/2009.

[Zoqui, 2007] – Zoqui, E.J., 2008, Material de apostila do Professor Eugênio José Zoqui do DEF – FEM – Unicamp.

7. APÊNDICE:

7.1 Relação de Parâmetros, e Velocidades X Corrente do motor a vazio

Tabela 7.1: Relação de corrente (A) a vazio do carter e do cabeçote em função da velocidade.

%	Parâmetro no inversor	Carter		cabeçote	
		rpm	A	rpm	A
-25	2310	158	16,20	115	16,20
-20	2464	169	14,40	123	14,10
-15	2618	179	13,80	130	13,40
-10	2772	190	13,50	138	13,00
-5	2926	200	13,20	146	12,40
0	3080	211	13,00	154	12,20
+5	3234	221	12,90	162	11,70
+10	3388	232	12,60	169	11,20
+15	3542	243	13,00	177	11,60
+20	3696	253	14,40	184	12,00

7.2 Relação de Potência e sobremetal removido em diversos níveis

Tabela 7.2: Relação de Potência e sobremetal removido para níveis (Bruto – Intermediário 0,5mm) e (Intermediário 0,5mm – nível final).

Bloco 0,5mm				Bruto - Intermediário			Intermediário - Final		
n°	Bruto	Interm.	Final	kg	%Pot.	Pot/kg	Kg	%Pot	Pot.%/kg
1	90,80	89,20	88,75	1,60	24,01	15,00	0,45	10,65	23,66
2	91,00	89,50	89,05	1,50	25,30	16,87	0,45	11,04	24,53
3	90,85	89,40	88,85	1,45	23,61	16,28	0,55	11,09	20,16
4	90,50	89,05	88,55	1,45	25,89	17,86	0,50	11,41	22,81
5	90,60	89,00	88,60	1,60	28,13	17,58	0,40	9,87	24,67
Média	90,75	89,23	88,76	1,52	25,39	16,72	0,47	10,81	23,17

Tabela 7.3: Relação de Potência e sobremetal removido para níveis (Bruto – Intermediário 1,0mm) e (Intermediário 1,0mm – nível final).

Bloco 1,0mm				Bruto - Intermediário			Intermediário - Final		
n°	Bruto	Interm.	Final	kg	%Pot.	Pot/kg	Kg	%Pot	Pot.%/kg
1	90,35	89,25	88,40	1,10	21,86	19,87	0,85	17,91	21,07
2	90,50	89,35	88,50	1,15	19,75	17,18	0,85	17,95	21,11
3	90,55	89,20	88,45	1,35	21,13	17,65	0,75	17,65	23,54
4	90,60	89,40	88,60	1,20	19,42	16,19	0,80	17,52	21,90
5	90,75	89,60	88,70	1,15	19,41	16,87	0,90	16,23	18,03
Média	90,55	89,36	88,53	1,19	20,31	17,15	0,83	17,45	21,13

Tabela 7.4: Relação de Potência e sobremetal removido para níveis (Bruto – Intermediário 1,5mm) e (Intermediário 1,5mm – nível final).

Bloco 1,5mm			Bruto - Intermediário			Intermediário - Final			
n°	Bruto	Interm.	Final	kg	%Pot.	Pot/kg	Kg	%Pot	Pot.%/kg
1	90,90	89,90	88,90	1,00	22,25	22,25	1,00	21,85	21,85
2	91,00	90,00	89,05	1,00	20,95	20,95	0,95	21,11	22,23
3	90,75	89,65	88,65	1,10	22,41	20,38	1,00	20,72	20,72
4	91,20	90,20	89,20	1,00	19,25	19,25	1,00	20,53	20,53
5	91,15	90,15	89,20	1,00	18,32	18,32	0,95	22,02	23,18
Média	91,00	89,98	89,00	1,02	20,64	20,23	0,98	21,25	21,70

Tabela 7.5: Relação de Potência e sobremetal removido para níveis (Bruto – Intermediário 2,0mm) e (Intermediário 2,0mm – nível final).

Bloco 2,0mm			Bruto - Intermediário			Intermediário - Final			
n°	Bruto	Interm.	Final	kg	%Pot.	Pot/kg	Kg	Pot	Pot.%/kg
1	90,90	90,30	88,95	0,60	13,44	22,40	1,35	27,58	20,43
2	91,00	90,20	88,90	0,80	15,14	18,93	1,30	26,78	20,60
3	90,90	90,15	88,90	0,75	14,42	19,23	1,25	26,23	20,98
4	90,75	90,05	88,80	0,70	14,12	20,18	1,25	26,21	20,97
5	91,05	90,35	89,05	0,70	14,59	20,84	1,30	27,36	21,04
Média	90,92	90,21	88,92	0,71	14,34	20,31	1,29	26,83	20,81

Tabela 7.6: Relação de Potência e sobremetal removido para níveis (Bruto – Intermediário 2,5mm) e (Intermediário 2,5mm – nível final).

Bloco 2,5mm				Bruto - Intermediário			Intermediário - Final		
n°	Bruto	Interm.	Final	kg	%Pot.	Pot/kg	Kg	%Pot	Pot.%/kg
1	90,65	90,35	88,45	0,30	11,23	37,44	1,90	30,67	16,14
2	90,95	90,60	88,95	0,35	9,96	28,47	1,65	31,56	19,13
3	91,00	90,50	88,90	0,50	10,91	21,82	1,60	31,02	19,39
4	90,95	90,65	89,05	0,30	9,03	30,12	1,60	31,70	19,81
5	91,25	90,70	89,25	0,55	8,52	15,50	1,45	32,20	22,21
Média	90,96	90,56	88,92	0,40	9,93	26,67	1,64	31,43	19,34

Tabela 7.7: Relação entre massa e energia na remoção de sobremetal entre os níveis Bruto e Intermediário - resumo tabelas 7.2 a 7.6

Remoção de Sobremetal entre nível Bruto e Intermediário									
Variável	Massa	Volume	Potência média					Pot/M	Pot/V
Unidade	Kg	cm ³	%				Watts	% /kg	W/cm ³
Nível			carter	cabeç	Total	DP	Total		
2,50	0,40	54,40	3,89	6,04	9,93	1,17	1566	26,67	28,79
2,00	0,71	96,56	1,86	12,48	14,34	0,63	2262	20,31	23,43
1,50	1,02	138,72	4,60	16,03	20,64	1,81	3255	20,23	23,46
1,00	1,19	161,84	5,48	14,84	20,31	1,12	3204	17,15	19,79
0,50	1,52	206,72	8,17	17,39	25,39	1,79	4004	16,72	19,37

Tabela 7.8: Relação entre massa e energia na remoção de sobremetal entre os níveis Intermediário e Final – resumo tabelas 7.2 a 7.6

Remoção de Sobremetal entre nível Interm. e Final									
Variável	Massa	Volume	Potência média					Pot/M	Pot/V
Unidade	Kg	cm ³	%				Watts	% /kg	W/cm ³
Nível			carter	cabeç	Total	DP	Total		
0,50	0,47	63,92	4,89	5,92	10,81	0,59	1705	23,17	26,67
1,00	0,83	112,88	8,70	8,75	17,45	0,71	2752	21,13	24,38
1,50	0,98	133,28	8,20	13,04	21,25	0,67	3351	21,70	25,14
2,00	1,29	175,44	10,06	16,77	26,83	0,63	4231	20,81	24,12
2,50	1,64	223,04	16,05	15,38	31,43	0,60	4957	19,34	22,22

7.3 Rugosidades em diversos níveis antes da posição final de desbaste

Tabela 7.9: Rugosidade medida no nível de 0,5 mm da medida final.

8	7	6	5	4	3	2	1	Ponto	
Cabeçote								Face	
2,746	3,962	3,338	3,125	3,921	3,957	4,461	3,842	Ra	1
21,300	27,400	32,200	30,400	26,800	28,700	29,000	25,100	Rmax.	
4,363	2,728	3,410	3,170	4,830	4,156	3,999	3,645	Ra	2
29,700	32,500	22,500	29,700	31,900	27,700	28,100	25,500	Rmax.	
3,184	3,289	2,492	4,161	3,026	4,463	3,947	4,586	Ra	3
31,400	28,600	22,200	27,700	23,800	24,600	26,200	24,900	Rmax.	
2,045	1,968	2,034	1,821	1,915	1,518	1,656	1,199	Ra	4
17,800	17,900	20,100	12,200	12,700	13,200	19,100	10,700	Rmax.	
1,634	1,586	1,562	2,528	1,877	1,709	1,884	2,156	Ra	5
11,800	16,700	15,400	26,600	11,000	18,600	11,900	16,400	Rmax.	
3,203	3,100	2,974	3,325	3,497	3,464	3,521	3,325	Ra	Média /Peça
25,960	28,200	26,500	27,760	23,780	25,200	26,680	22,600	Rmax.	

TOTAIS	16	15	14	13	12	11	10	9	Ponto	
	Carter						Cabeçote		Face	
	2,237	2,682	3,311	2,051	2,903	2,053	4,955	2,540	Ra	1
	19,600	20,900	24,600	16,900	27,100	15,300	30,900	19,700	Rmax.	
	2,834	1,967	2,005	2,618	2,230	2,348	5,405	3,658	Ra	2
	21,200	17,900	15,300	22,400	20,200	17,500	42,900	25,000	Rmax.	
	1,978	2,328	1,865	2,524	1,816	2,246	5,661	3,654	Ra	3
	15,400	17,800	16,300	19,400	15,300	15,400	28,800	26,700	Rmax.	
	1,351	2,379	1,934	1,521	1,283	1,320	1,670	1,722	Ra	4
	11,000	21,900	21,600	12,400	9,7400	10,500	11,200	16,100	Rmax.	
1,745	2,28	0,972	1,169	1,438	2,134	2,155	1,313	Ra	5	
13,900	6,400	9,720	7,650	10,200	34,200	15,600	13,300	Rmax.		
2,299	2,803	2,404	2,281	2,191	2,284	4,303	2,922	Ra	Média /Peça	
18,420	21,360	21,824	18,230	18,456	20,680	28,120	23,380	Rmax.		

Somas	Média do Carter	Média do Cabeçote	0,5 mm	
			Ra	
3,112	2,540	3,685	Ra	1
23,942	20,733	27,150	Rmax.	
3,135	2,334	3,936	Ra	2
24,317	19,083	29,550	Rmax.	
2,986	2,126	3,846	Ra	3
21,545	16,600	26,490	Rmax.	
1,693	1,631	1,755	Ra	4
14,812	14,523	15,100	Rmax.	
1,732	1,623	1,840	Ra	5
14,704	13,678	15,300	Rmax.	
2,870	2,377	3,363	Ra	Média /Peça
22,826	19,828	25,824	Rmax.	

8	7	6	5	4	3	2	1	Ponto	
Cabeçote								Face	
2,868	3,807	3,155	3,305	2,727	4,391	3,672	1,297	Ra	1
23,700	32,500	29,600	25,600	19,700	25,400	19,000	18,300	Rmax.	
3,403	2,417	3,270	3,340	3,096	3,302	4,103	2,682	Ra	2
25,400	27,100	30,700	26,100	28,400	26,200	30,500	27,000	Rmax.	
2,661	3,205	2,535	2,946	3,493	2,992	X	X	Ra	3
18,400	30,700	25,400	26,500	29,800	22,500	X	X	Rmax.	
2,300	2,272	2,400	X	3,100	3,289	3,300	3,440	Ra	4
27,000	33,100	30,000	X	24,000	23,300	21,000	23,500	Rmax.	
2,005	1,843	1,783	1,466	2,017	1,934	1,999	1,882	Ra	5
19,000	31,600	16,200	12,200	14,300	20,100	12,800	16,900	Rmax.	
2,647	2,709	2,629	2,764	2,887	3,182	3,269	2,325	Ra	Média /Peça
22,700	31,000	26,380	22,600	23,240	23,500	20,825	21,425	Rmax.	

Tabela 7.10: Rugosidade medida no nível de 1,0 mm da medida final.

TOTAIS	16	15	14	13	12	11	10	9	Ponto	
	Carter						Cabeçote		Face	
	2,094	2,682	2,263	1,950	2,016	1,899	4,679	3,697	Ra	1
	17,400	20,900	18,000	23,300	22,900	14,400	28,300	25,300	Rmax.	
	2,431	1,967	2,412	2,609	1,856	2,229	2,162	3,336	Ra	2
	20,000	17,900	24,000	18,700	17,000	16,700	19,200	44,900	Rmax.	
	1,663	2,328	1,961	1,833	1,898	X	3,218	2,616	Ra	3
	17,200	17,800	18,900	20,900	19,900	X	27,100	32,600	Rmax.	
	2,322	2,379	2,400	1,667	2,200	5,332	3,252	3,052	Ra	4
	15,700	6,400	18,200	16,800	19,400	61,500	25,100	26,700	Rmax.	
1,608	21,900	1,496	1,392	1,438	1,564	2,050	1,758	Ra	5	
14,200	6,400	14,600	12,900	12,600	10,500	17,000	14,500	Rmax.		
2,024	6,251	2,106	1,890	1,882	2,756	3,072	2,892	Ra	Média /Peça	
16,900	13,880	18,740	18,520	18,360	25,775	23,340	28,800	Rmax.		

Somas	Média Carter	Média Cabeçote	1,0 mm	
2,747	2,134	3,360	Ra	1
22,253	19,767	24,700	Rmax.	
2,709	2,307	3,111	Ra	2
23,915	19,280	28,550	Rmax.	
2,381	1,804	2,958	Ra	3
22,903	19,180	26,625	Rmax.	
3,027	3,120	2,934	Ra	4
25,058	24,150	25,967	Rmax.	
1,710	1,501	1,919	Ra	5
15,364	12,683	18,044	Rmax.	
2,536	2,216	2,856	Ra	Média /Peça
21,963	19,141	24,785	Rmax.	

8	7	6	5	4	3	2	1	Ponto	
Cabeçote								Face	
2,026	1,949	3,155	1,651	1,722	2,076	2,233	1,832	Ra	1
24,900	17,400	29,600	13,400	11,300	19,300	18,400	12,100	Rmax.	
2,239	1,426	3,270	1,582	2,078	1,513	2,097	1,744	Ra	2
20,500	13,100	30,700	13,300	17,800	12,100	19,900	12,000	Rmax.	
1,591	2,076	2,535	2,338	1,984	1,717	2,063	2,205	Ra	3
12,000	29,100	25,400	19,200	21,300	14,200	25,600	16,500	Rmax.	
1,963	1,777	2,400	1,730	2,380	1,651	2,797	2,325	Ra	4
15,600	25,300	30,000	17,000	13,700	11,300	11,600	21,500	Rmax.	
1,668	1,743	1,783	1,651	2,217	1,878	1,617	3,540	Ra	5
14,600	17,100	16,200	14,700	20,100	20,900	19,700	24,300	Rmax.	
1,897	1,794	2,629	1,790	2,076	2,003	2,161	2,329	Ra	Médias /Peça
17,550	20,400	26,380	15,520	16,840	19,280	19,040	17,280	Rmax.	

Tabela 7.11: Rugosidade medida no nível de 1,5 mm da medida final.

TOTAIS	16	15	14	13	12	11	10	9	Ponto	
	Carter						Cabeçote		Face	
	1,979	2,043	1,437	1,614	1,176	1,500	1,756	1,811	Ra	1
	18,500	14,100	15,000	12,000	12,700	13,100	13,600	17,400	Rmax.	
	1,278	1,769	1,739	1,616	1,581	2,048	2,364	2,479	Ra	2
	9,900	11,300	13,700	15,200	13,700	19,000	16,100	35,200	Rmax.	
	1,475	1,934	1,145	X	1,479	1,793	2,325	1,616	Ra	3
	12,500	21,700	13,400	X	12,800	12,900	15,800	14,300	Rmax.	
	1,802	2,231	2,325	X	1,440	2,328	2,215	1,674	Ra	4
	12,000	22,300	15,800	X	8,500	17,200	19,700	15,500	Rmax.	
X	1,675	1,774	1,747	1,520	2,370	1,571	1,685	Ra	5	
X	13,000	21,700	14,700	14,500	24,300	12,100	12,300	Rmax.		
1,634	1,930	1,684	1,659	1,439	2,008	2,046	1,853	Ra	Médias /Peça	
13,225	16,480	15,920	13,967	12,440	17,300	15,460	18,940	Rmax.		

Somas	Média Carter	Média Cabeçote	1,5 mm	
1,740	1,625	1,855	Ra	1
15,242	14,233	16,250	Rmax.	
1,844	1,672	2,017	Ra	2
16,030	13,800	18,260	Rmax.	
1,796	1,565	2,026	Ra	3
17,075	14,660	19,490	Rmax.	
2,031	2,025	2,037	Ra	4
15,920	15,160	16,680	Rmax.	
1,877	1,817	1,937	Ra	5
17,355	17,640	17,070	Rmax.	
1,870	1,765	1,974	Ra	Médias /Peça
16,543	15,535	17,550	Rmax.	

8	7	6	5	4	3	2	1	Ponto	
Cabeçote								Face	
1,636	2,034	1,999	1,646	1,304	1,705	2,096	2,185	Ra	1
14,000	18,000	20,200	12,000	9,270	21,400	18,400	15,100	Rmax.	
3,351	1,956	2,215	2,343	2,549	2,044	1,784	2,266	Ra	2
24,900	14,800	15,500	15,600	19,400	12,900	15,500	18,700	Rmax.	
1,551	0,797	1,298	1,529	1,766	1,426	2,056	1,834	Ra	3
14,300	18,100	22,100	11,300	12,000	14,500	12,900	10,800	Rmax.	
1,583	1,836	0,897	0,141	2,182	1,835	1,778	2,494	Ra	4
13,500	19,800	4,970	1,580	16,100	16,000	16,400	19,700	Rmax.	
2,049	2,250	1,756	1,991	1,915	1,540	1,951	X	Ra	5
15,000	19,500	16,100	15,300	17,100	14,400	26,300	X	Rmax.	
2,034	1,775	1,633	1,530	1,943	1,710	1,933	2,195	Ra	Médias /Peça
16,340	18,040	15,774	11,156	14,774	15,840	17,900	16,075	Rmax.	

Tabela 7.12: Rugosidade medida no nível de 2,0 mm da medida final.

TOTAIS	16	15	14	13	12	11	10	9	Ponto	
	Carter								Face	
	X	1,966	X	X	1,101	1,310	2,362	1,622	Ra	1
	X	12,000	X	X	8,410	10,100	18,600	11,900	Rmax.	
	X	X	X	1,131	1,512	1,387	3,046	3,146	Ra	2
	X	X	X	8,490	13,800	10,300	18,000	24,200	Rmax.	
	X	X	1,230	1,623	X	1,325	3,124	1,490	Ra	3
	X	X	7,990	11,500	X	9,850	7,830	9,990	Rmax.	
	X	X	X	X	1,376	1,426	0,681	1,870	Ra	4
	X	X	X	X	1,190	11,300	7,010	17,200	Rmax.	
X	X	1,264	X	1,324	1,648	1,194	1,297	Ra	5	
X	X	15,200	X	16,400	10,700	11,300	18,800	Rmax.		
X	1,966	1,247	1,377	1,328	1,419	2,081	1,885	Ra	Médias /Peça	
X	12,000	11,595	9,995	7,124	10,450	12,548	16,418	Rmax.		

Sommas	Média Carter	Média Cabeçote	2,0 mm	
			Ra	1
1,659	1,459	1,859	Ra	
13,029	10,170	15,887	Rmax.	
1,907	1,343	2,470	Ra	2
14,407	10,863	17,950	Rmax.	
1,540	1,393	1,687	Ra	3
11,581	9,780	13,382	Rmax.	
1,465	1,401	1,530	Ra	4
9,736	6,245	13,226	Rmax.	
1,592	1,412	1,771	Ra	5
15,594	14,100	17,089	Rmax.	
1,670	1,467	1,872	Ra	Médias /Peça
12,765	10,044	15,487	Rmax.	

Tabela 7.13: Rugosidade medida no nível de 2,5 mm da medida final.

Ponto	Bloco	
	Variável	1
1	Cabeçote	
2	Ra	Rmax.
3	1,756	14,000
4	2,287	15,800
5	1,974	12,900
6	2,056	17,100
7	1,925	14,900
8	1,998	12,700
9	1,751	12,100
10	1,765	12,100
	2,002	12,400
	x	x

7.4 Tabelas de energia com variação apenas na rotação das fresas

7.4.1 Medição com as fresas com insertos no início de vida

Tabela 7.14: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 15% superior à rotação nominal com inserto novo.

115%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	90,50	88,35	2,15	15,32	27,81	43,13	20,06
2	90,70	88,55	2,15	15,53	25,69	41,22	19,17
3	91,10	89,05	2,05	13,79	26,70	40,49	19,75
4	91,20	89,00	2,20	14,96	26,20	41,16	18,71
5	91,10	88,95	2,15	13,13	27,47	40,60	18,88
Média	90,92	88,78	2,14	14,55	26,77	41,32	19,31

Tabela 7.15: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 10% superior à rotação nominal com inserto novo.

110%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	90,45	88,40	2,05	14,70	25,04	39,74	19,39
2	90,85	88,60	2,25	14,25	28,68	42,93	19,08
3	90,70	88,65	2,05	13,33	26,67	40,00	19,51
4	90,75	88,60	2,15	13,28	26,56	39,84	18,53
5	90,50	88,45	2,05	13,44	25,11	38,55	18,80
Média	90,65	88,54	2,11	13,80	26,41	40,21	19,06

Tabela 7.16: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 5% superior à rotação nominal com inserto novo.

105%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	90,75	88,75	2,00	13,96	22,38	36,34	18,17
2	90,05	88,15	1,90	12,60	20,78	33,38	17,57
3	90,65	88,65	2,00	13,28	20,94	34,22	17,11
4	90,65	88,65	2,00	12,75	21,85	34,61	17,30
5	90,35	88,30	2,05	12,63	22,47	35,10	17,12
Média	90,49	88,50	1,99	13,04	21,69	34,73	17,46

Tabela 7.17: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal (100%) com inserto novo.

100%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	90,70	88,70	2,00	13,23	20,41	33,63	16,82
2	91,00	88,95	2,05	13,15	19,74	32,90	16,05
3	90,20	88,05	2,15	13,00	21,73	34,73	16,15
4	90,00	88,00	2,00	12,95	18,63	31,59	15,79
5	90,75	88,70	2,05	13,14	20,93	34,07	16,62
Média	90,53	88,48	2,05	13,10	20,28	33,38	16,29

Tabela 7.18: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 5% inferior à rotação nominal com inserto novo.

95%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	90,40	88,35	2,05	10,69	18,10	28,79	14,04
2	90,50	88,40	2,10	11,28	18,81	30,09	14,33
3	90,80	88,65	2,15	9,67	19,22	28,89	13,44
4	90,75	88,75	2,00	9,67	19,22	28,89	14,44
5	90,90	88,90	2,00	8,74	20,20	28,94	14,47
Média	90,67	88,61	2,06	10,01	19,11	29,12	14,14

Tabela 7.19: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 10% inferior à rotação nominal com inserto novo.

90%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	90,55	88,50	2,05	9,09	16,69	25,77	12,57
2	90,30	88,15	2,15	10,48	17,00	27,48	12,78
3	90,45	88,30	2,15	9,99	17,30	27,29	12,69
4	90,85	88,70	2,15	9,86	18,28	28,13	13,09
5	90,85	88,70	2,15	9,46	18,01	27,48	12,78
Média	90,60	88,47	2,13	9,78	17,46	27,23	12,78

Tabela 7.20: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 15% inferior à rotação nominal com inserto novo.

85%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	91,00	88,85	2,15	8,45	17,55	26,00	12,09
2	90,75	88,70	2,05	9,16	15,91	25,07	12,23
3	90,65	88,60	2,05	10,62	16,31	26,93	13,14
4	90,90	88,80	2,10	10,16	16,48	26,64	12,69
5	90,75	88,85	1,90	6,69	16,79	23,49	12,36
Média	90,81	88,76	2,05	9,02	16,61	25,62	12,50

Tabela 7.21: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 20% inferior à rotação nominal com inserto novo.

80%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	90,75	88,75	2,00	8,12	14,24	22,37	11,18
2	90,70	88,50	2,20	8,05	15,23	23,28	10,58
3	90,55	88,35	2,20	8,09	15,80	23,89	10,86
4	90,50	88,40	2,10	8,89	15,21	24,09	11,47
5	90,60	88,50	2,10	8,68	15,19	23,87	11,37
Média	90,62	88,50	2,12	8,37	15,13	23,50	11,09

Tabela 7.22: Relações de Potência para remoção completa de sobremetal com variação na rotação das fresas mantendo avanço constante com inserto novo – resumo tabelas 7.14 a 7.21.

Variável	Massa	Volume	Potência				Pot/M	Pot/V	fz		
Unidade	kg	cm ³	%				Watts	% /kg	W/cm ³	mm/dente	
Rotação			carter	cabeç	Total	DP	Total			carter	cabeç.
115%	2,14	291	14,55	26,77	41,32	1,06	6516	19,31	22,39	0,0462	0,0634
110%	2,11	286	13,80	26,41	40,21	1,63	6341	19,06	22,17	0,0483	0,0664
105%	1,99	270	13,04	21,69	34,73	1,10	5477	17,46	20,28	0,0505	0,0692
100%	2,05	278	13,10	20,28	33,38	1,21	5264	16,29	18,94	0,0532	0,0728
95%	2,06	280	10,01	19,11	29,12	0,55	4592	14,14	16,40	0,0561	0,0768
90%	2,13	289	9,78	17,46	27,23	0,88	4296	12,78	14,86	0,0590	0,0813
85%	2,05	278	9,02	16,61	25,62	1,39	4042	12,50	14,54	0,0627	0,0863
80%	2,12	288	8,37	15,13	23,50	0,70	3706	11,09	12,87	0,0664	0,0912

7.4.2 Medição com as fresas com insertos no final de vida

Tabela 7.23: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 15% superior à rotação nominal com inserto desgastado.

115%			RELAÇÕES				
n°	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	91,05	88,90	2,15	22,46	29,88	52,35	24,35
2	91,30	89,20	2,10	22,19	27,92	50,11	23,86
3	91,10	89,05	2,05	20,47	28,67	49,13	23,97
4	90,75	88,75	2,00	24,09	30,46	54,55	27,28
5	90,90	88,85	2,05	23,59	29,93	53,52	26,11
Média	91,02	88,95	2,07	22,56	29,37	51,93	25,09

Tabela 7.24: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 10% superior à rotação nominal com inserto desgastado.

110%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot.%	Pot/kg
1	90,90	88,85	2,05	19,06	31,32	50,38	24,57
2	90,75	88,75	2,00	22,68	29,32	52,00	26,00
3	90,70	88,55	2,15	23,85	30,28	54,12	25,17
4	90,90	88,85	2,05	21,81	29,07	50,88	24,82
5	90,90	88,90	2,00	21,52	28,03	49,54	24,77
Média	90,83	88,78	2,05	21,78	29,60	51,38	25,06

Tabela 7.25: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 5% superior à rotação nominal com inserto desgastado.

105%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot.%	Pot/kg
1	91,10	88,95	2,15	20,80	28,77	49,58	23,06
2	90,65	88,75	1,90	22,03	25,75	47,78	25,15
3	91,15	89,15	2,00	22,03	25,75	47,78	23,89
4	90,85	88,85	2,00	20,82	26,85	47,67	23,83
5	90,55	88,55	2,00	23,05	25,01	48,06	24,03
Média	90,86	88,85	2,01	21,75	26,43	48,18	23,97

Tabela 7.26: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal (100%) com inserto desgastado.

100%			RELAÇÕES				
n°	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	90,80	88,80	2,00	19,02	26,50	45,52	22,76
2	90,20	88,25	1,95	17,68	23,86	41,54	21,30
3	90,40	88,40	2,00	17,83	24,90	42,73	21,36
4	90,55	88,55	2,00	17,62	25,39	43,02	21,51
5	90,70	88,70	2,00	20,44	23,23	43,67	21,84
Média	90,53	88,54	1,99	18,52	24,78	43,30	21,76

Tabela 7.27: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 5% inferior à rotação nominal com inserto desgastado.

95%			RELAÇÕES				
n°	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	90,50	88,40	2,10	18,72	23,76	42,48	20,23
2	91,25	89,15	2,10	18,03	24,62	42,65	20,31
3	90,40	88,40	2,00	18,15	22,75	40,91	20,45
4	91,05	88,90	2,15	16,51	26,01	42,52	19,78
5	90,80	88,80	2,00	18,52	21,57	40,09	20,04
Média	90,80	88,73	2,07	17,99	23,74	41,73	20,16

Tabela 7.28: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 10% inferior à rotação nominal com inserto desgastado.

90%			RELAÇÕES				
n°	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	91,40	89,30	2,10	17,56	20,37	37,93	18,06
2	90,95	88,90	2,05	15,73	20,02	35,76	17,44
3	91,15	89,05	2,10	16,88	20,21	37,09	17,66
4	91,20	89,10	2,10	17,22	21,36	38,58	18,37
5	91,00	88,95	2,05	13,95	22,38	36,33	17,72
Média	91,14	89,06	2,08	16,27	20,87	37,14	17,86

Tabela 7.29: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 15% inferior à rotação nominal com inserto desgastado.

85%			RELAÇÕES				
n°	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	90,70	88,60	2,10	14,47	19,54	34,01	16,19
2	91,05	88,95	2,10	14,43	20,04	34,46	16,41
3	91,00	88,95	2,05	15,91	18,39	34,30	16,73
4	90,50	88,55	1,95	13,64	19,27	32,91	16,88
5	90,60	88,60	2,00	15,42	18,33	33,75	16,87
Média	90,77	88,73	2,04	14,77	19,11	33,88	16,61

Tabela 7.30: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas em 20% inferior à rotação nominal com inserto desgastado.

80%			RELAÇÕES				
n°	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	90,85	88,90	1,95	12,00	17,66	29,66	15,21
2	90,95	88,95	2,00	12,48	16,81	29,29	14,64
3	90,65	88,60	2,05	12,13	17,59	29,72	14,50
4	90,70	88,60	2,10	14,17	17,25	31,42	14,96
5	90,75	88,70	2,05	13,59	16,96	30,55	14,90
Média	90,78	88,75	2,03	12,87	17,25	30,12	14,84

Tabela 7.31: Relações de Potência para remoção completa de sobremetal com variação na rotação das fresas mantendo avanço constante com inserto no final de vida – resumo tabelas 7.23 a 7.30.

Variável	Massa	Volume	Potência				Pot/M	Pot/V	fz		
Unidade	kg	cm ³	%			Watts	% /kg	W/cm ³	mm/dente		
Rotação			carter	cabeç	Total	DP	Total			carter	cabeç.
115%	2,07	281	22,56	29,37	51,93	2,28	8189	25,09	29,14	0,0462	0,0634
110%	2,05	278	21,78	29,60	51,38	1,77	8103	25,06	29,15	0,0483	0,0664
105%	2,01	273	21,75	26,43	48,18	0,80	7598	23,97	27,83	0,0505	0,0692
100%	1,99	270	18,52	24,78	43,30	1,46	6828	21,76	25,29	0,0532	0,0728
95%	2,07	281	17,99	23,74	41,73	1,16	6581	20,16	23,42	0,0561	0,0768
90%	2,08	282	16,27	20,87	37,14	1,15	5857	17,86	20,77	0,0590	0,0813
85%	2,04	277	14,77	19,11	33,88	0,61	5343	16,61	19,29	0,0627	0,0863
80%	2,03	276	12,87	17,25	30,12	0,86	4750	14,84	17,21	0,0664	0,0912

7.5 Tabelas de energia com variação apenas no avanço da mesa

7.5.1 Medição com as fresas com insertos no início de vida

Tabela 7.32: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 120% do avanço nominal e com inserto novo.

120%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter %	Pot.Cabeç %	Pot. %	Pot/kg
1	91,30	89,20	2,10	18,75	29,99	48,74	23,21
2	90,75	88,85	1,90	18,78	26,97	45,75	24,08
3	90,60	88,65	1,95	17,73	27,41	45,15	23,15
4	90,95	89,00	1,95	18,28	29,41	47,70	24,46
5	90,85	88,85	2,00	19,20	30,16	49,36	24,68
Média	90,89	88,91	1,98	18,55	28,79	47,34	23,92

Tabela 7.33: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 110% do avanço nominal e com inserto novo.

110%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter %	Pot.Cabeç %	Pot. %	Pot/kg
1	91,00	88,90	2,10	16,62	30,32	46,94	22,35
2	91,10	88,95	2,15	16,98	29,16	46,14	21,46
3	91,30	89,15	2,15	16,57	29,15	45,72	21,26
4	91,25	89,25	2,00	17,63	30,31	47,95	23,97
5	91,15	89,10	2,05	17,41	29,36	46,77	22,82
Média	91,16	89,07	2,09	17,04	29,66	46,70	22,37

Tabela 7.34: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa nominal (100%) e com inserto novo.

100%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter %	Pot.Cabeç %	Pot. %	Pot/kg
1	90,90	88,80	2,10	15,97	28,74	44,68	21,27
2	90,75	88,75	2,00	16,54	23,31	39,85	19,93
3	90,55	88,55	2,00	16,89	24,17	41,05	20,53
4	90,45	88,45	2,00	17,13	23,03	40,15	20,08
5	91,10	89,00	2,10	16,85	27,26	44,11	21,01
Média	90,75	88,71	2,04	16,67	25,30	41,97	20,56

Tabela 7.35: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 90% do avanço nominal e com inserto novo.

90%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter %	Pot.Cabeç %	Pot. %	Pot/kg
1	90,80	88,80	2,00	14,72	22,02	36,74	18,37
2	90,70	88,70	2,00	15,48	21,73	37,22	18,61
3	90,70	88,70	2,00	14,77	21,85	36,62	18,31
4	90,65	88,70	1,95	14,83	24,92	39,75	20,38
5	91,10	89,00	2,10	14,92	24,92	39,85	18,98
Média	90,79	88,78	2,01	14,94	23,09	38,03	18,93

Tabela 7.36: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 80% do avanço nominal e com inserto novo.

80%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot.%	Pot/kg
1	91,05	89,95	2,10	13,02	19,91	32,93	15,68
2	90,75	88,80	1,95	14,36	21,17	35,53	18,22
3	91,35	89,35	2,00	13,77	20,22	33,99	17,00
4	90,85	88,85	2,00	13,20	20,94	34,15	17,07
5	91,25	89,15	2,10	14,20	22,61	36,81	17,53
Média	91,05	89,02	2,03	13,71	20,97	34,68	17,10

Tabela 7.37: Relações de Potência para remoção completa de sobremetal com variação no avanço da mesa e a rotação das fresas mantida constante com inserto novo – resumo tabelas 7.32 a 7.36.

Variável	Massa	Volume	Potência				Pot/M	Pot/V	fz		
Unidade	kg	cm ³	%				Watts	% /kg	W/cm ³	mm/dente	
Rotação			carter	cabeç	Total	DP	Total			carter	cabeç.
120%	1,98	269	18,55	28,79	47,34	1,84	7465	23,92	27,75	0,0693	0,0950
110%	2,09	284	17,04	29,66	46,70	0,85	7365	22,37	25,93	0,0612	0,0839
100%	2,04	277	16,67	25,30	41,97	2,27	6619	20,56	23,89	0,0532	0,0728
90%	2,01	273	14,94	23,09	38,03	1,63	5998	18,92	21,97	0,0478	0,0654
80%	2,03	276	13,71	20,97	34,68	1,51	5469	17,10	19,82	0,0424	0,0581

7.5.2 Medição com as fresas com insertos no final de vida

Tabela 7.38: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 120% do avanço nominal e com inserto desgastado.

120%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	90,40	88,35	2,05	21,72	33,22	54,94	26,80
2	90,85	88,75	2,10	21,27	30,52	51,79	24,66
3	90,90	88,80	2,10	23,22	31,61	54,83	26,11
4	90,80	88,60	2,20	20,56	30,76	51,33	23,33
5	90,50	88,40	2,10	22,17	30,64	52,86	25,17
Média	90,69	88,58	2,11	21,79	31,36	53,15	25,21

Tabela 7.39: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 110% do avanço nominal e com inserto desgastado.

110%			RELAÇÕES				
nº	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	90,95	89,05	1,90	20,57	27,05	47,62	25,06
2	90,75	88,65	2,10	20,22	29,46	49,68	23,66
3	91,25	89,10	2,15	19,73	30,89	50,62	23,54
4	91,15	88,90	2,25	19,60	33,52	53,12	23,61
5	91,10	89,00	2,10	18,74	29,88	48,61	23,15
Média	91,04	88,94	2,10	19,77	30,16	49,93	23,81

Tabela 7.40: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa nominal (100%) e com inserto desgastado.

100%			RELAÇÕES				
n°	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	91,25	89,20	2,05	18,25	29,55	47,80	23,32
2	91,30	89,10	2,20	18,98	30,85	49,83	22,65
3	91,00	88,80	2,20	18,17	31,35	49,52	22,51
4	90,95	88,75	2,20	20,02	27,80	47,83	21,74
5	91,00	88,90	2,10	19,71	26,82	46,53	22,16
Média	91,10	88,95	2,15	19,03	29,28	48,30	22,47

Tabela 7.41: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 90% do avanço nominal e com inserto desgastado.

90%			RELAÇÕES				
n°	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot. %	Pot/kg
1	90,75	88,65	2,10	17,19	26,11	43,31	20,62
2	91,05	88,95	2,10	16,90	25,81	42,71	20,34
3	91,25	89,10	2,15	17,49	28,86	46,35	21,56
4	90,95	88,90	2,05	16,63	26,15	42,79	20,87
5	91,05	89,00	2,05	15,13	27,94	43,07	21,01
Média	91,01	88,92	2,09	16,67	26,98	43,65	20,88

Tabela 7.42: Relação de Potência para remoção completa de sobremetal com fresas na rotação nominal e avanço da mesa 80% do avanço nominal e com inserto desgastado.

80%			RELAÇÕES				
n°	Bruto	Final	B-F	Pot.Carter%	Pot.Cabeç%	Pot.%	Pot/kg
1	90,85	88,75	2,10	15,40	23,13	38,53	18,35
2	90,80	88,60	2,20	15,61	24,63	40,24	18,29
3	90,50	88,50	2,00	14,93	23,72	38,64	19,32
4	90,80	88,75	2,05	16,70	24,49	41,19	20,09
5	91,05	88,90	2,15	14,86	25,12	39,98	18,59
Média	90,80	88,70	2,10	15,50	24,22	39,72	18,93

Tabela 7.43: Relações de Potência para remoção completa de sobremetal com variação no avanço da mesa e a rotação das fresas mantida constante e com inserto desgastado – resumo tabelas 7.38 a 7.42.

Variável	Massa	Volume	Potência					Pot/M	Pot/V	fz	
Unidade	kg	cm ³	%				Watts	% /kg	W/cm ³	mm/dente	
Rotação			carter	cabeç	Total	DP	Total			carter	cabeç.
120%	2,11	287	21,79	31,36	53,15	1,68	8382	25,21	29,21	0,0693	0,0950
110%	2,10	286	19,77	30,16	49,93	2,11	7874	23,81	27,57	0,0612	0,0839
100%	2,15	292	19,03	29,28	48,30	1,36	7617	22,47	26,05	0,0532	0,0728
90%	2,09	284	16,67	26,98	43,65	1,53	6883	20,88	24,22	0,0478	0,0654
80%	2,10	286	15,50	24,22	39,72	1,13	6263	18,93	21,93	0,0424	0,0581

Tabela 7.44: Resumo de variação de sobremetal e o comparativo da variação de potência medida e calculada segundo a equação 5.

Experimento	Variável de teste	Volume (cm ³)	Potência (Watts)		% entre M e C
			Medida	Calculada	
Variação de Sobremetal (Bruto – Intermediário)	2,5mm	54,40	1566	1013	65
	2,0mm	96,56	2262	1798	79
	1,5mm	138,72	3255	2583	79
	1,0mm	161,84	3204	3014	94
	0,5mm	206,72	4004	3849	96
Média Subtotal		658,24	14291	12257	86
Variação de Sobremetal (Intermediário - Final)	0,5mm	63,92	1705	1190	70
	1,0mm	112,68	2752	2098	76
	1,5mm	133,28	3351	2481	74
	2,0mm	175,44	4231	3267	77
	2,5mm	223,04	4957	4153	83
Média Subtotal		708,36	16996	13189	77
TOTAL		1366,60	31287	25446	81

Tabela 7.45: Cálculo da Taegutec para fresamento - face do carter - ($a_e=270$ mm),
[Taegutec, 2009]

Units Tech Support Help

Milling

Application : Face milling

Insert Type : Quadrilateral

Data for Face Milling

Tool diameter (D) : 315 mm

Cutting Width (a_e) : 270 mm

Number of inserts (z) : 25

Feed per tooth(f_z) : 0.053 mm

Depth of cut (a_p) : 3 mm

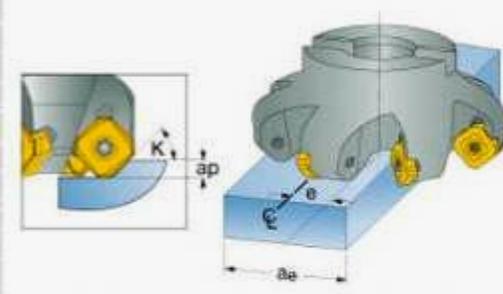
Spindle speed (n) : 209 rpm

Cutting velocity (Vc) : 206.8 m/min

Workpiece material : AISI A48-40 B

True rake angle (γ_T) : 0 deg. ?

Entering Angle (β) : 45 deg.



Results

Kc (effective):	2873 N/mm ²	410 KPsi
Net mean Power demand:	10.74 KW	14.59 HP
Material removal rate:	3.74 (cm ³ /sec)	13.69 (in ³ /min)
Max Spindle Bending Force :	2884.89 N	648.55 lb
Average chip thickness:	0.0312 mm	0.0012 inch
Mean torque :	490.7 Nm	4343 inch ² lb

Tabela 7.46: Cálculo da Taegutec para fresamento - face do carter - ($a_e=50$ mm),
[Taegutec, 2009]

Units Tech Support Help

Milling

Application : Face milling

Insert Type : Quadrilateral

Data for Face Milling

Tool diameter (D) : 315 mm

Cutting Width (a_e) : 50 mm

Number of inserts (z) : 25

Feed per tooth(f_z) : 0.053 mm

Depth of cut (a_p) : 3 mm

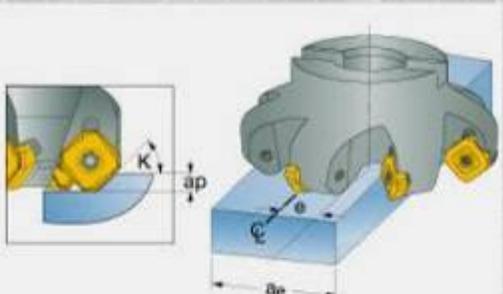
Spindle speed (n) : 209 rpm

Cutting velocity (Vc) : 206.8 m/min

Workpiece material : AISI A48-40 B

True rake angle (γ_T) : 0 deg. ?

Entering Angle (β) : 45 deg.



Results

Kc (effective):	2752 N/mm ²	393 KPsi
Net mean Power demand:	1.91 KW	2.59 HP
Material removal rate:	0.69 (cm ³ /sec)	2.53 (in ³ /min)
Max Spindle Bending Force :	899.32 N	202.17 lb
Average chip thickness:	0.0373 mm	0.0015 inch
Mean torque :	87.0 Nm	770.01 inch ² lb

Tabela 7.47: Cálculo da Taegutec para fresamento - face do cabeçote – ($a_e=156$ mm),
 [Taegutec, 2009]

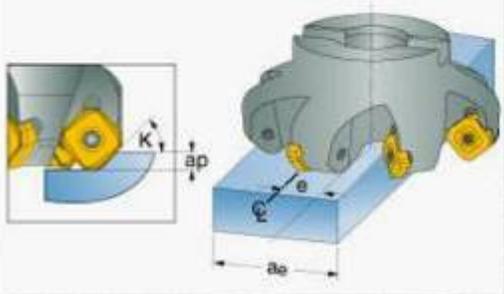
Units Tech Support Help

Milling

Application : Face milling
 Insert Type : Quadrilateral

Data for Face Milling

Tool diameter (D) : 315 mm
 Cutting Width (a_e) : 156 mm
 Number of inserts (z) : 25
 Feed per tooth (f_z) : 0.072 mm
 Depth of cut (a_p) : 4 mm
 Spindle speed (n) : 152 rpm
 Cutting velocity (V_c) : 150.4 m/min
 Workpiece material : AISI A48-40 B
 True rake angle (γ_T) : 0 deg.
 Entering Angle (κ) : 45 deg.



Results

Kc (effective):	2592 N/mm ²	369 KPsi
Net mean Power demand:	7.35 KW	9.98 HP
Material removal rate:	2.85 (cm ³ /sec)	10.42 (in ³ /min)
Max Spindle Bending Force :	3425.58 N	770.1 lb
Average chip thickness:	0.0487 mm	0.0019 inch
Mean torque :	461.5 Nm	4085 inch*lb