

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR DANIEL DE  
MORAES E APROVADA  
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 01/07/2011

Arvanstany  
ORIENTADOR

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

Daniel de Moraes

# **Uma Contribuição ao Fresamento Frontal de Superfícies Irregulares em Blocos de Motores em Ferro Fundido Cinzento**

Campinas, 2011.

Daniel de Moraes

**Uma Contribuição ao Fresamento Frontal de Superfícies Irregulares em Blocos de Motores em Ferro Fundido Cinzento**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Automobilística.

Área de concentração: Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

Campinas

2011

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

M791c  
Moraes, Daniel de  
Uma contribuição ao fresamento frontal de superfícies irregulares em blocos de motores em ferro fundido cinzento / Daniel de Moraes. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.  
Orientador: Amauri Hassui.  
Dissertação de Mestrado (Profissional) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.  
  
1. Vibração. 2. Espectros vibracionais. 3. Ferro fundido. 4. Fresamento. I. Hassui, Amauri. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: A contribution to the face milling of irregular grey cast iron surface

Palavras-chave em Inglês: vibration, Vibrational spectra, Cast iron, Milling

Área de concentração: Manufatura

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilstica

Banca examinadora: Anselmo Eduardo Diniz, João Roberto Ferreira

Data da defesa: 01/07/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL**

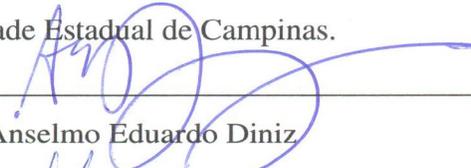
**Uma Contribuição ao Fresamento Frontal de Superfícies Irregulares em Blocos de  
Motores em Ferro Fundido Cinzento**

Autor: Daniel de Moraes

Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Amauri Hassui

Universidade Estadual de Campinas.  
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

Universidade Estadual de Campinas.  
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. João Roberto Ferreira  
Universidade Federal de Itajubá.

Campinas, 01 de julho de 2011.

Dedico este trabalho,

À minha esposa Michela, pela paciência comigo devido a minha dedicação ao desenvolvimento deste trabalho e as intermináveis viagens que me deixavam todas as sextas e sábados durante dois anos longe de casa.

Ao meu filho Lucas que com certeza sentiu minha falta durante todo este tempo, mas que é o motivo de todo o meu esforço e dedicação.

Aos meus pais Noeli Terezinha de Moraes e Sebastião de Moraes, que são os percussores de todas as minhas conquistas.

Às minhas irmãs Carla e Franciele que de forma indireta auxiliaram neste trabalho.

## **Agradecimentos**

Aos meus pais pelo esforço e dedicação ao me apoiar e incentivar durante toda a trajetória da minha vida, fornecendo as bases para que eu me tornasse o que sou hoje:

Em especial à minha querida esposa e filho que estiveram sempre presentes no apoio e incentivo para superar este grande desafio:

Ao professor Amauri Hassui, pela orientação deste trabalho e também pela amizade e confiança:

Aos professores e colegas de curso que reforçaram os ensinamentos de trabalho em equipe, união e respeito:

Ao colega Silas (Teknikao) que suportou todas as minhas solicitações de medição de vibração, com intuito apenas de desenvolver novos conhecimentos:

Aos colegas do departamento de usinagem da MWM International, em especial aos operadores, pois sem a ajuda deles não poderia concluir este trabalho:

E a todos que de forma direta ou indireta auxiliaram na conclusão deste trabalho.

A todos com quem pude conviver, meus sinceros agradecimentos.

*É melhor atirar-se à luta em busca de dias melhores, mesmo correndo o risco de perder tudo, do que permanecer estático, como os pobres de espírito, que não lutam mas também não vencem, que não conhecem a dor da derrota, nem a glória de ressurgir dos escombros. Esses pobres de espírito, ao final de sua jornada na Terra não agradecem a Deus por terem vivido, mas desculpam-se perante Ele, por terem apenas passado pela vida.*

## Resumo

Atualmente a competitividade das empresas é um objetivo que vem sendo buscado de forma bastante intensa. Por outro lado, fatores como o meio ambiente e a preocupação com o conforto e a saúde dos seus colaboradores também tem sido motivo de preocupação. Esses dois fatores são as vezes antagônicos e para conseguir atingi-los simultaneamente é necessário a aplicação de conhecimento técnico ao meio produtivo. O ruído do processo de fresamento está relacionado com a vibração do mesmo e pode ser danoso à saúde e ao bem estar dos operadores bem como prejudicar o acabamento superficial e até mesmo causar avarias as ferramentas de corte. O presente trabalho teve como objetivo diminuir o ruído da operação de fresamento de uma das faces do bloco do motor. Uma das características desse fresamento é a presença de diferentes larguras de corte, que faz com que o diâmetro da fresa não seja o ideal em todo o processo. Para atingir o objetivo mencionado, foram feitos ensaios variando-se a velocidade de corte, o avanço por dente, o ângulo de posição e a profundidade de corte, em cada ensaio foram adquiridos os sinais de vibração. Os resultados obtidos mostram que a menor largura de corte, maior avanço por dente, maior profundidade de corte e maior ângulo de posição tendem a gerar maiores vibrações. A velocidade de corte não apresentou uma influência consistente na vibração. Com esses resultados, sugere-se, para menor vibração da operação estudada, trabalhar-se com os níveis mais baixos de avanço por dente e velocidade de corte, com ângulo de posição menor.

Palavras-chaves: vibração, espectro vibracional, ferro fundido, fresamento.

## **Abstract**

Nowadays the competitiveness of the companies is a target that has been searched in a very intense way. On the other hand, factors like environment and the concerning about workers health and confort has also been important. These two factors are sometimes antagonics and to reach them simultaneously is necessary the application of technical knowledge to the shop floor. The milling process noise is related with the process vibrations and can be harmful to the workers health and welfare as well as to the surface roughness and it can even damage the cutting tools. The present work aimed decrease the milling process noise of engine block surface. One of the features of this milling is the presence of differents cutting width, this makes the diameter of the cutting tool not the ideal one along all the trajectory. To reach the mentioned goal, it was carried out several tests with different cutting speed, feed per tooth, entering angle and cutting depth, in each test they were acquired the vibration signal. The obtained results show that lower cutting width, higher feed per tooth, higher cutting depth and higher entering angle tend to generate higher level of vibration. The cutting speed didn't present a consistent influence on the vibration. With these results, it was suggested, to decrease of vibration of the studied operation, work with the lower level of feed per tooth and cutting speed, with lower entering angle.

Keyword: vibration, vibrational spectra, cast iron, milling.

## Lista de Ilustrações

Figura 1- Diagrama Fe-C (VAN VLACK, 1984).....	5
Figura 2 - Grafita Tipo A 100x (ASTM, 1985).....	9
Figura 3 - Grafita Tipo D, tamanho entre 60 e 120 microns, hipoeutético 100x (RADZIKOWSKA, 2000).....	9
Figura 4 - Grafita Tipo D, tamanho da grafita entre 250 e 500 microns, hipoeutético 100x (RADZIKOWSKA, 2000).....	10
Figura 5 - Flocos de grafita desordenados no ferro fundido cinzento hipereutético, 100x, Tipo B e D, poucas rosetas (RADZIKOWSKA, 2000).....	10
Figura 6- Usinabilidade dos ferros fundidos (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006). .....	22
Figura 7 - Dureza a quente do metal duro com variação de percentual de cobalto e do aço rápido (FERRARESI, 1977).....	32
Figura 8 - Parâmetros de corte no fresamento tangencial (CIMM, 2006).....	37
Figura 9 - - Direção dos movimentos de corte, avanço efetivo em uma operação de fresamento discordante. (SANDVIK, 1994). ....	38
Figura 10 - Avanço por dente $f_z$ , avanço de corte $f_c$ e avanço efetivo $f_e$ em uma operação de fresamento concordante. (SANDVIK, 1994). ....	40
Figura 11 - Percurso de corte $L_c$ , percurso de avanço $L_f$ e percurso efetivo $L_e$ para uma operação de fresamento discordante. (SANDVIK, 1994). ....	41
Figura 12 - Representação de fresamento tangencial. (a) Alguns exemplos de fresas tangenciais ou discos; (b) Modelo de fresa caracol utilizada na usinagem de engrenagens de dentes retos. (SANDVIK, 2003).....	43
Figura 13 - Representação de fresamento frontal. (SANDVIK, 2003). ....	44
Figura 14 - Representação de fresamento de topo. (SANDVIK, 2003). ....	45
Figura 15 - Representação do ângulo de inclinação $\lambda_s$ , ângulo de posição $\chi_r$ e ângulo de saída $\gamma_0$ (SANDVIK, 2003). ....	47

Figura 16 - Representação do ângulo de saída radial $\gamma_f$ e do ângulo de saída axial $\gamma_p$ (SANDVIK, 2003). .....	48
Figura 17 - a) Representação de uma pastilha de fresamento em um corte com geometria duplo-negativa; b) Representação de uma pastilha de fresamento em um corte com geometria duplo-positivo (SANDVIK, 1994). .....	50
Figura 18 - Representação de uma pastilha de fresamento em um corte com geometria positiva-negativa (SANDVIK, 1994). .....	51
Figura 19 - Representação de fresamento discordante e concordante. (SANDVIK, 1994). .....	52
Figura 20 - Representação de fresamento discordante e concordante simultâneo em fresamento frontal simétrico em relação à peça. (SANDVIK, 1994). .....	53
Figura 21 - Representação de fresas com vários passos e número de dentes. (SANDVIK, 1994). .....	54
Figura 22 - Representação de uma fresa com passo diferencial. (SANDVIK, 1994). .....	55
Figura 23 - Influência do posicionamento relativo ferramenta-peça na entrada da ferramenta no corte. (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2006). .....	56
Figura 24 - Característica de saída da ferramenta do corte conforme posicionamento ferramenta-peça. (SANDVIK, 1994). .....	57
Figura 25 - Detalhe das tensões ocorridas na saída da ferramenta com ângulo zero em relação a peça. (SANDVIK, 1994). .....	57
Figura 26 – (a) Representação das forças resultantes com o centro da fresa alinhada com o centro da peça; (b) e o centro da fresa fora da linha de centro da peça (SANDVIK, 1994). .....	58
Figura 27 - Espessura média do cavaco ( $h_m$ ) em função do posicionamento entre ferramenta e peça. (SANDVIK, 1994). .....	59
Figura 28 - Espessura máxima ( $h$ ) em função do posicionamento entre ferramenta e a peça. (SANDVIK, 1994). .....	60
Figura 29 - Vibrações livres sem e com amortecimento. (RAO, 2009). .....	64
Figura 30 - Mecanismo de Scotch Yoke gerando um movimento harmônico. (RAO, 2009). .....	65
Figura 31 - Esquema demonstrativo da amplitude e o período. (RAO, 2009). .....	66

Figura 32 - Esquema demonstrativo do deslocamento, velocidade e aceleração. (RAO, 2009).....	66
Figura 33 - Representação da intensidade da vibração. (RAO, 2009).....	68
Figura 34 - Componentes de um acelerômetro piezoelétrico. (FERNANDES, 2000). ....	70
Figura 35 - Esquema demonstrativo da faixa útil de um acelerômetro piezoelétrico. (FERNANDES, 2000).....	71
Figura 36 - Principais incômodos da vibração ao organismo. (FERNANDES, 2000).....	75
Figura 37 - Vista em perspectiva do bloco de motor NGD 3.0E.....	77
Figura 38 - Vista lateral do bloco de motor NGD 3.0E com trecho fresado demonstrado pelas setas vermelhas.....	77
Figura 39 - Fresa dos testes de 1 a 4.....	81
Figura 40 – Exemplos de fresas semelhantes a utilizadas nos testes 5 e 6, desbaste à esquerda e acabamento à direita. ....	82
Figura 41 – Exemplo de fresa semelhante à utilizada nos testes de 7 a 10. ....	83
Figura 42 - Foto transdutor e acelerômetro piezoelétrico utilizado na medição de vibração em todos os testes realizados.....	85
Figura 43 - Máquina comando numérico horizontal. ....	87
Figura 44 - Figura com os trechos do fresamento indicando a posição onde foi fixado o acelerômetro durante os ensaios. ....	89
Figura 45 - Gráfico com o evolução do ruído em decibéis (dB) nos trechos ao longo do fresamento dos testes 1 a 4. ....	93
Figura 46 - Espectro de vibração do teste 1 durante o fresamento do trecho 7#8 (aceleração $m/s^2$ e Hertz).....	94
Figura 47 - Gráfico com valores médios de vibração RMS (vertical) entre os testes 1 a 4. ....	95
Figura 48 - Gráfico com valores médios de vibração em RMS (vertical), separados entre os trechos do fresamento dos testes de 1 a 4 (horizontal). ....	95
Figura 49 - Gráfico com o evolução do ruído em decibéis (dB) nos trechos de fresamento dos testes 5 e 6 (desbaste e acabamento).....	96

Figura 50 - Espectro de vibração do teste 5 durante o fresamento do trecho 7#8 (aceleração $m/s^2$ e Hertz).....	97
Figura 51 - Gráfico com valores médios de vibração RMS (vertical) entre os testes 5 e 6. .....	98
Figura 52 - Gráfico com valores médios de vibração em RMS(vertical), separados entre os trechos do fresamento dos testes de 5 e 6. ....	99
Figura 53 - Gráfico com o evolução do ruído em decibéis (dB) nos trechos ao longo do fresamento nos testes de 7 ao 10. ....	100
Figura 54 - Espectro de vibração do teste 8 durante o fresamento do trecho 7#8 (aceleração $m/s^2$ e Hertz).....	101
Figura 55 - Gráfico com valores médios RMS (vertical) entre os testes 7 a 10. ....	102
Figura 56 - Gráfico com valores médios de vibração em RMS (vertical), separados entre os trechos do fresamento dos testes de 7 a 10. ....	103
Figura 57 - Gráfico das diferenças entre as forças axial e radial nos testes 1 e 4.....	104
Figura 58 - Gráfico das diferenças entre as forças axial e radial nos testes 7 e 10.....	104

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - O efeito de microestrutura e dureza da matriz sobre o índice de vida da ferramenta de corte dos ferros fundidos cinzentos (MILLS e REDFORD, 1983 apud BEZERRA, 2003).....	25
Tabela 2 - Graus de ferro fundido cinzento para aplicação automotiva, em função da dureza Brinell - Norma SAE J431 (VAN DE VELDE, 2000b). ....	26
Tabela 3 - Faixas de dureza do ferro fundido cinzento (VAN DE VELDE, 2000b).....	27
Tabela 4 - Força coercitiva (Hc) em função do tamanho de grão do metal duro. ....	32
Tabela 5 - Unidades do SI utilizadas em vibração. ....	69
Tabela 6 - Especificações de projeto do bloco de motor NGD 3.0E.....	78
Tabela 7 - Composição química do bloco. ....	79
Tabela 8 - Parâmetros de corte para testes no processo atual de fresamento das laterais do bloco. ....	90
Tabela 9 - Parâmetros de corte para teste no processo proposto em desbaste e acabamento. ....	91
Tabela 10 - Parâmetros de corte para testes no processo de fresamento das laterais do bloco com ângulo de posição alterado.....	91

## Lista de Abreviaturas e Siglas

### Letras Latinas

A	Ampères (unidade de corrente elétrica)
B	Dimensão bruta considerando sobremetal
bit	Impulso elétrico de uma parte de oito bits que compõe um byte.
C	Carbono
D	Diâmetro da fresa
$F_Y$ ou $F_r$	Força radial
$F_x$ ou $F_f$	Força axial
$F_z$ ou $F_t$	Força principal
F	Dimensão final considerando sobremetal
f	Avanço
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.
N	Newton (unidade de força)
n	Rotações por minuto
m	Metro

$m^2$	Unidade de área
P	Potência elétrica
Q	Taxa de remoção de material.
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
~	aproximado
%	Percentual

#### **Abreviações**

Al	Alumínio
$a_e$	penetração de trabalho
$a_p$	profundidade de usinagem
$\cos\Phi$	Função matemática trigonométrica
Ca	Cálcio
$C_e$	Carbono equivalente
Co	Cobalto

Cr	Cromo
Cu	Cobre
$D_c$	Diâmetro útil de corte da fresa
Dens	Densidade
$dm^3$	Unidade de volume equivalente a 1 litro
esp.	Específica
Fe	Ferro
$f_z$	avanço por dente
ff duct	ferro fundido dúctil
ff cinz	ferro fundido cinzento
ff. maleav	ferro fundido maleável
FoFo	Ferro Fundido
GE	Grafita em forma de esferóide
HB	dureza Brinell
$h_m$	espessura média do cavaco
$h_i$	espessura de corte em um plano determinado de corte
Int	Dimensão intermediária considerando sobremetal
$K_c$	Força de corte específico
$K_{sm}$	Pressão específica de corte média

$K_{s1}$	Pressão específica de corte de um material (constante de Kienzle)
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
Mi	Massa inicial
Mn.	Mínimo
Mn	Manganês
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

$P_C$	Potência de corte
$Pot_{\text{esp/corte}}$	Potência específica de corte
$P_{\text{max.}}$	Potência máxima
Ra	Rugosidade média de uma superfície
$R_{\text{max.}}$	Rugosidade máxima de uma superfície
Si	Silício
Ti	Titânio
$v_c$	Velocidade de corte
Vol	Volume de material removido considerando sobremetal
$VB_{\text{Bmax.}}$	Desgaste de flanco de um inserto
$VB_B$	Desgaste de flanco médio
$V_B$	Desgaste de flanco
$v_f$	Velocidade de avanço
W	Tungstênio
Watt	Unidade de potência elétrica
WC	Carboneto de tungstênio
°C	Temperatura em graus centígrados
$\chi_r$	Ângulo de posição principal da ferramenta
Y	Ítrio

Zn            Zinco

#### Letras Gregas

$\alpha$             Alfa – “ferrita ou solução sólida de carbono em ferro alfa”

$\pi$             número Pi = 3,14159

$\phi_1$             ângulo de entrada da ferramenta

$\phi_2$             ângulo de saída da ferramenta

$\gamma$             austenita ou ferro gama

$\eta$             rendimento (%)

$\tau$             tensão cisalhante com deformação plástica

$\mu\text{m}$             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
RES	Rover Engineering Standard

## SUMÁRIO

<b>Abstract</b> .....	viii
<b>Lista de Ilustrações</b> .....	ix
<b>Lista de Tabelas</b> .....	xiii
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b> .....	xiv
1. Introdução .....	1
1.1 Situação do problema .....	2
1.2 Objetivos .....	2
2. Revisão bibliográfica .....	4
2.1 Fundamentos teóricos da usinagem do ferro fundido .....	4
2.2 Tipos de Ferro Fundido .....	6
2.2.1 Ferro fundido cinzento .....	6
2.2.2 Ferro Fundido dúctil ou nodular .....	7
2.2.3 Formas da grafita .....	8
2.2.4 Fatores que influenciam a estrutura do ferro fundido .....	11
2.2.5 Velocidade de resfriamento .....	12
2.2.6 Usinabilidade do ferro fundido .....	13
2.2.7 Desenvolvimento das ferramentas de corte específicas para a usinagem do ferro fundido .....	30
2.3 O Fresamento .....	35
2.3.1 Introdução .....	36
2.3.2 Definições e nomenclatura .....	37
2.3.3 Tipos de fresamento .....	42
2.3.4 Nomenclatura e relação geométrica entre a ferramenta e a peça .....	46
2.3.5 Fresamento com movimento concordante e discordante .....	51
2.3.6 Efeitos do número de dentes da fresa .....	54
2.3.7 Efeitos do posicionamento da fresa sobre a peça .....	55
2.3.8 Monitoramento da usinagem através da vibração .....	60

2.4 Vibração.....	63
2.4.1 Conceitos básicos de vibração.....	63
2.4.2 Movimento harmônico.....	65
2.4.3 Quantificando o nível de vibração.....	67
2.4.4 Equipamento de medição da vibração.....	69
2.4.5 Efeitos da vibração.....	73
3. Materiais e equipamentos.....	76
3.1 Materiais.....	76
3.1.1 Bloco do Motor.....	76
3.2 Equipamentos.....	80
3.2.1 Ferramentas de corte.....	80
3.2.2 Aparelho de análise de vibrações.....	83
3.2.3 Máquina-ferramenta.....	86
4. Procedimentos experimentais.....	88
4.1 Ensaio com variação de $v_c$ e $f_z$ no processo atual.....	89
4.2 Ensaio com variação de estratégia de usinagem e geometria das fresas.....	90
4.3 Ensaio com variação de $v_c$ , $f_z$ e $\kappa_r$ com relação ao processo atual.....	91
5. Resultados e Discussão.....	92
5.1 Processo atual com variação de velocidade de corte e avanço por aresta.....	92
5.2 Processo atual com variação de estratégia de fresamento (desbaste e acabamento).....	96
5.3 Processo atual com variação de velocidade de corte, avanço por aresta e ângulo de posição.....	99
5.4 Comparação da forças axial e radial entre os testes 1 e 4 e os testes 7 a 10.....	103
6. Conclusões e sugestões para próximos trabalhos.....	105
Referências.....	106

# 1. Introdução

A usinagem tem importância fundamental dentre os processos de fabricação, pois este processo, que tem suas raízes na revolução industrial, continua expandindo suas fronteiras em resposta à crescente demanda de uma grande gama de indústrias. A importância econômica da usinagem para a fabricação não pode ser subestimada: “Em 2000, nos países industrializados, os custos que representavam a parcela da usinagem no valor final de um produto manufaturado representavam mais de 15%” (TRENT E WRIGHT, 2000). Desta maneira, qualquer aumento de produtividade nesta área certamente causará um relevante impacto econômico na empresa.

Muito se tem pesquisado sobre o processo de fresamento frontal no tocante à posição relativa fresa-peça, diâmetro da fresa em relação à largura da superfície usinada, melhores condições de usinagem, melhores parâmetros de corte, trajetórias de corte, geometrias e classes de insertos, revestimentos de insertos, geometrias de fresas, etc. Porém, quase a totalidade destes estudos teóricos/práticos são realizados usinando-se superfícies planas sem interrupções, o que nos processos industriais raramente ocorre, principalmente na indústria automobilística moderna.

Na prática, normalmente são encontradas superfícies interrompidas com furos, rebaixos, entranhas, ou seja, geometrias muito complexas, com larguras de corte variáveis, nas quais fresas de diâmetro grande são necessárias para usinar somente uma parte da superfície da peça (que apresenta largura compatível com o diâmetro da fresa). Desta forma, em outras partes da peça que apresentam larguras menores, a fresa opera em condições desfavoráveis, gerando desgaste prematuro das pastilhas e principalmente vibrações que afetam todo o conjunto composto por máquina, dispositivo de fixação, ferramenta e principalmente operadores.

Além dos parâmetros de corte, a definição da trajetória de usinagem e geometria da ferramenta são de fundamental importância para garantir maior vida da ferramenta e menor vibração possível. Cada trajetória de corte, geometria de ferramenta e estratégia de corte apresenta limitações e sua influência deve ser analisada em função da geometria da peça a ser usinada.

## **1.1 Situação do problema**

O processo atual de fresamento das faces laterais do bloco de motor NGD 3.0E, que é realizado em um centro de usinagem horizontal, apresenta um ruído excessivo em função da vibração gerada pelo processo de fresamento e também pela geometria da peça. Este processo é alvo de várias reclamações, tanto de origem de segurança do trabalho devido ao ruído excessivo, quanto de reclamações dos operadores no que diz respeito ao desconforto gerado pela vibração.

Em função destas reclamações, este problema foi escolhido como alvo de estudo para determinar uma melhor estratégia de fresamento, no que diz respeito a parâmetros de corte e geometria da fresa.

O valor em decibéis do ruído durante o fresamento atual que tem uma média de 92 dB, e um pico num determinado trecho de 96,8 db. Esses valores são excessivamente elevados, já que a segurança do trabalho recomenda um valor máximo de 85 dB.

## **1.2 Objetivos**

Isso posto, os principais objetivos deste trabalho são:

- Avaliar a influência da velocidade de corte, avanço por aresta e ângulo de posição no espectro de vibração e ruído no processo de fresamento lateral do bloco;
- Avaliar a evolução do ruído a partir do monitoramento do espectro de vibração;
- Avaliar a possibilidade de substituição do processo convencional com apenas um único passe para uma estratégia com desbaste e acabamento, de forma que garanta um espectro de vibração e ruído aceitáveis;

·Estabelecer critérios para a seleção correta de velocidade de corte, avanço por aresta e ângulo de posição do inserto, levando em consideração limites aceitáveis de espectro de vibração e ruído.

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1 Fundamentos teóricos da usinagem do ferro fundido

Os produtos siderúrgicos obtidos por fusão, com menos de 2% de carbono são considerados aços e, aqueles com teores mais elevados que esses, ferros fundidos. A passagem dos aços para os ferros fundidos é gradual e o limite de 2% corresponde apenas a um determinado ponto do diagrama de equilíbrio, que foi tomado como separação convencional entre os dois produtos.

No diagrama de fases do sistema Fe-C mostrado na Figura 1, pode-se ver que, para teores crescentes de carbono, é cada vez mais baixa a temperatura necessária para a fusão completa do produto, até 4,3%. Além desse limite, a referida temperatura se eleva de novo, à medida que o teor de carbono continua a aumentar. A liga com 4,3% é a com menor ponto de fusão dentre todas, por isso recebe o nome de eutética, que significa bem fusível. Os ferros fundidos com menos de 4,3% chamam-se hipoeutéticos e os com mais de 4,3% hipereutéticos.

O carbono pode existir nestes materiais sob duas formas diferentes: combinado ( $\text{Fe}_3\text{C}$ , cementita) e grafítico (grafita).

Quando se fala do teor de carbono de um ferro fundido, entende-se o carbono total, isto é, o carbono combinado mais o carbono grafítico, mais o carbono em solução no Fe.

A formação da maior parte da grafita se dá normalmente na solidificação do eutético e depois do metal solidificado, acima de  $700^\circ\text{C}$ . No microscópio, ela se apresenta sob a forma de veios ou então partículas vermiformes agrupadas.

A grafita raramente se forma entre as linhas “liquidus” e “solidus”, nos ferros fundidos hipoeutéticos sem silício. Seu aparecimento, nesse intervalo, é mais freqüente nos ferros fundidos hipereutéticos, apresentando-se em grandes palhetas que, em seção polida, aparecem como veios, em geral, bem maiores do que os do primeiro caso.

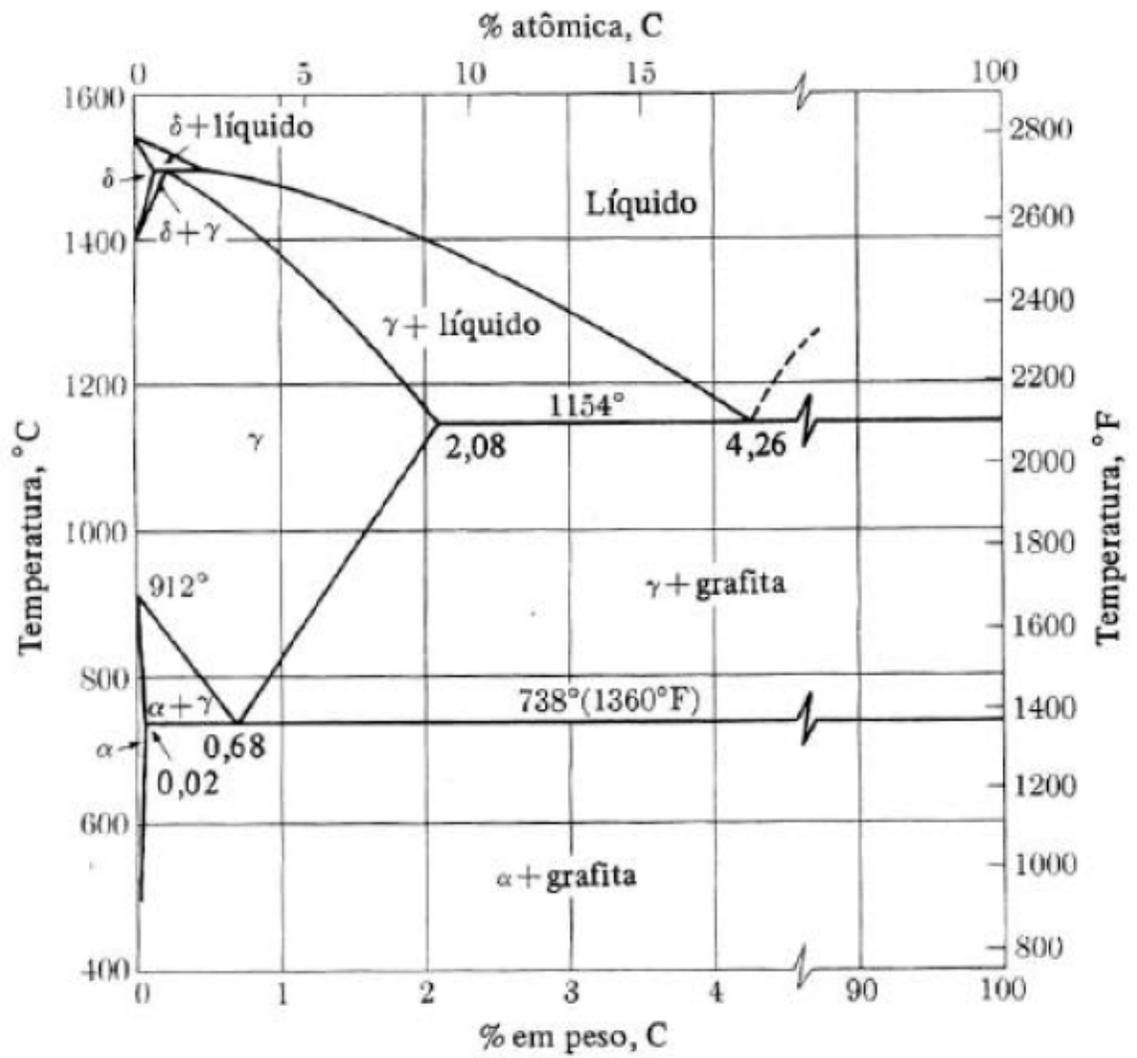


Figura 1- Diagrama Fe-C (VAN VLACK, 1984)

## **2.2 Tipos de Ferro Fundido**

### 2.2.1 Ferro fundido cinzento

O aspecto da fratura do ferro fundido cinzento é escuro (daí a sua denominação). Na sua estrutura uma parcela relativamente grande do carbono está no estado livre (grafita lamelar) e outra parcela no estado combinado ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) (CHIAVERINI, 1990).

As propriedades dos ferros fundidos cinzentos são influenciadas pelo tamanho, forma e distribuição da grafita, e pela relativa dureza da matriz metálica que envolve a grafita. Esses fatores são controlados principalmente pelos teores de carbono e silício do metal e pela velocidade de resfriamento do fundido. Um resfriamento lento e elevados teores de C e Si incentivam o crescimento e quantidade dos veios de grafita e, a formação de uma estrutura de matriz ferrítica de baixa resistência. A microestrutura é o fator de maior influência na usinabilidade do ferro fundido cinzento, mais importante que a dureza ou outras propriedades mecânicas. As condições que promovem a grafitização melhoram a usinabilidade do material. Isso ocorre porque a grafita provoca descontinuidades no ferro fundido que facilitam a quebra do cavaco e produzem um efeito lubrificante durante a usinagem (ASMT, 1996). Os veios de grafita melhoram a usinabilidade do ferro fundido cinzento mesmo em níveis de dureza elevados, aumentam sua resistência ao desgaste e o amortecimento de vibrações (VAN DE VELDE, 2000b).

Devido à fragilidade que o ferro fundido cinzento comum apresenta, ele não pode ser empregado na fabricação de peças sujeitas a choques, ou que necessitem sofrer uma eventual deformação sem ruptura. Isso devido aos veios de grafita, que limitam a coesão do material.

### 2.2.2 Ferro Fundido dúctil ou nodular

O ferro fundido dúctil foi desenvolvido na década de 1940. Na Europa é também conhecido como ferro fundido com grafita nodular. Na década de 50, foi objeto de intensos trabalhos de pesquisa e seu uso como material de engenharia ganhou espaço.

O ferro fundido nodular caracteriza-se pela ductilidade, tenacidade e resistência mecânica, sendo essa última de maior importância. Seu limite de escoamento é superior ao do ferro fundido cinzento e ao dos aços-carbono comuns (CHIAVERINI, 1994).

A grafita do ferro fundido nodular apresenta-se na forma esferoidal, que não interrompe a continuidade da matriz tanto quanto a grafita em veio, resultando na sua melhor ductilidade e tenacidade. A forma de solidificação da grafita é obtida pela adição de pequenas quantidades de magnésio na fundição. Este elemento reage com o enxofre e o oxigênio presentes no material fundido e provoca a mudança na forma da grafita. Os ferros fundidos dúcteis apresentam uma boa relação tensão/deformação linear, uma considerável faixa de resistência ao escoamento e, sobretudo, ductilidade. As peças elaboradas com esse ferro fundido podem ser formadas numa grande faixa de tamanhos, com seções que podem ter paredes muito finas ou muito grossas (VAN DE VELDE, 2000a).

Este tipo de ferro fundido apresenta uma faixa larga de propriedades de resistência e ductilidade, o que permite escolher o grau requerido de ferro fundido dependendo das condições de operação do elemento mecânico ou máquina, além de possuir uma elevada resistência ao desgaste, resistência à corrosão, elevada capacidade de amortecimento, elevada ductilidade e usinabilidade satisfatória. Em relação aos aços, apresenta melhores propriedades de fundição e uma baixa temperatura para ser vazado no molde, o que permite uma redução da energia consumida (DRONYUK e EKSANOV, 1989).

Um recente desenvolvimento para melhorar as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular é o tratamento térmico de austêmpera. O ferro fundido dúctil austemperado (ADI) é usado como alternativa para substituir os ferros fundidos de alta resistência frequentemente usados em aplicações em que o carregamento de fadiga é crítico (HARDING, 1986).

A microestrutura consiste em grafita nodular numa matriz de ferrita acicular e austenita estabilizada (chamada de ausferrita). Os finos grãos de ferrita acicular fornecem boa combinação de resistência mecânica, ductilidade e tenacidade (KENNAMETAL, 2003).

Ainda segundo Kennametal (2003), as propriedades mecânicas evoluem continuamente conforme muda a temperatura de austêmpera. As temperaturas de austêmpera mais elevadas e a quantidade de austenita retida associada com a ferrita bainítica têm uma influência forte em certas propriedades mecânicas, particularmente na ductilidade, resistência à fratura, à fadiga e ao impacto. Os valores máximos das propriedades normalmente são obtidos através de austêmpera dentro da faixa de 350-400°C usando períodos que produza quantias máximas de austenita retida. Os ferros fundidos dúcteis sempre tiveram certas vantagens técnicas e comerciais sobre os aços fundidos e forjados, e estas vantagens foram mais notórias com o ADI, que começou a substituir alguns aços forjados de alta resistência.

### 2.2.3 Formas da grafita

A Norma ASTM A247 (1984 apud ASM, 1985) classifica a grafita pelo seu aspecto e forma de apresentação em cinco tipos:

Tipo A: Irregular de orientação aleatória:

Tipo B: Em roseta, caracterizado por partículas vermiformes, circundadas por veios em disposição aproximadamente radial, dando ao conjunto um aspecto de roseta.

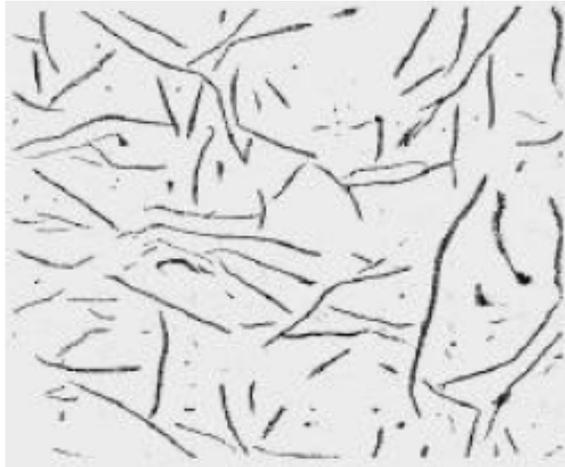
Tipo C: Desigual irregular, característico dos ferros fundidos hipereutéticos, mostram veios muito maiores.

Tipo D: Interdentritic de orientação aleatória.

Tipo E: Interdentritic orientada.

A mesma norma classifica a grafita em oito tamanhos, N°1 correspondendo às dimensões maiores (veios mais longos) e o N°8 às dimensões menores. A Figura 2 mostra um ferro fundido cinzento com grafita Tipo A. O ferro fundido cinzento utilizado neste trabalho corresponde a este tipo, com tamanho de grafita entre 4 e 5. A Figura 3 mostra a grafita em flocos Tipo D, numa liga

hipoeutética, com comprimento dos veios de grafita entre 60-120  $\mu\text{m}$ . A Figura 4 mostra flocos mais grossos (comprimentos na faixa de 250-500  $\mu\text{m}$ ) em um ferro fundido de alto conteúdo de C, ainda hipoeutético.



**Figura 2 - Grafita Tipo A 100x (ASTM, 1985)**



**Figura 3 - Grafita Tipo D, tamanho entre 60 e 120 microns, hipoeutético 100x (RADZIKOWSKA, 2000)**



**Figura 4 - Grafita Tipo D, tamanho da grafita entre 250 e 500 microns, hipoeutético 100x (RADZIKOWSKA, 2000)**

A Figura 5 mostra um ferro fundido cinzento hipereutético em que vários flocos tipo agulha grossa são formados antes das agulhas finas eutéticas. Esta estrutura é a grafita tipo C.



**Figura 5 - Flocos de grafita desordenados no ferro fundido cinzento hipereutético, 100x, Tipo B e D, poucas rosetas (RADZIKOWSKA, 2000)**

## 2.2.4 Fatores que influenciam a estrutura do ferro fundido

São dois os fatores preponderantes na determinação da estrutura do ferro fundido: a composição química e a velocidade de resfriamento (CHIAVERINI, 1990).

### 2.2.4.1 Composição química

Os ferros fundidos são ligas de ferro, carbono e silício nas quais a maior parte do carbono está retida em solução sólida em austenita à temperatura eutética. O carbono em excesso precipita em forma de grafita lamelar. Os ferros fundidos cinzentos geralmente contêm de 1,7 a 4,5% de C e de 1 a 3% de Si (ASM, 1961). Além desses elementos, existem outros tais como: manganês, enxofre, fósforo, etc. Esses elementos exercem notável influência sobre a textura e as propriedades dos ferros fundidos, pois dependendo das proporções nas quais se apresentem, haverá ou não formação de grafita e, portanto, formação de ferro fundido cinzento ou branco. A seguir é dada uma descrição da influência de cada elemento químico na estrutura do ferro fundido.

**Carbono:** com teores baixos de carbono há tendência para formação do tipo branco. À medida que o teor de carbono aumenta, melhoram as condições para o material se tornar cinzento. Nos ferros fundidos brancos, a dureza aumenta com o conteúdo de carbono, porque aumenta a quantidade de cementita (COLPAERT, 1974).

**Silício:** depois do carbono é o elemento mais importante nos ferros fundidos. O silício é um elemento grafitizante, favorecendo a decomposição do carboneto de ferro. Sua presença, independentemente do teor de carbono, pode fazer um ferro fundido tender para o cinzento ou para o branco (CHIAVERINI, 1990).

Para se obter ferros fundidos cinzentos com melhor resistência, convém que a quantidade de silício seja suficiente para promover a grafitização até a temperatura da formação da perlita (700° C), porém em quantidade insuficiente para decompor a cementita da perlita. Se isso

acontecer, o ferro fundido terá baixa resistência e menor dureza. O silício forma solução sólida com a ferrita e por essa razão não se pode detectá-lo ao microscópio (COLPAERT, 1974).

Manganês: o manganês em teores de 0,5 – 1,0% aumenta a resistência e tenacidade do ferro fundido (SANDVIK, 1994). Este elemento tem ação contrária à do silício, pois dificulta a decomposição da cementita. Se o teor for muito elevado, pode anular a ação do silício e o ferro fundido então resultar branco. Seu principal papel nos ferros fundidos comuns é, porém, neutralizar o enxofre. O sulfato de manganês resultante é uniformemente distribuído na matriz na forma de inclusões (KENNAMETAL, 1993).

Fósforo: quando em teores normais é grafítizante e não desempenha um papel preponderante; em teores elevados, contribui para a fragilidade e atua como estabilizador da cementita. Contudo, sua presença é, às vezes, desejada por aumentar a fluidez do metal líquido, o que permite moldar peças de paredes mais finas e de contornos mais nítidos. Entretanto, se a peça tiver partes finas e for de certa responsabilidade, prefere-se empregar ferros fundidos com menos fósforo e vazá-lo a temperaturas mais altas (COLPAERT, 1974).

Enxofre: atua de forma semelhante ao manganês, formando sulfeto de ferro. Torna o material mais sensível ao resfriamento rápido. A fratura branca causada pelo enxofre é muito mais quebradiça e de dureza mais irregular do que quando é branca por outras razões. O manganês em quantidade suficiente neutraliza o enxofre pela formação de sulfeto de manganês.

Além destes elementos, a presença de outros em quantidades mínimas é fundamental para a produção do ferro fundido. Por exemplo, agentes nucleantes, chamados inoculantes, são usados para controlar o tipo e tamanho da grafita (VAN DE VELDE, 2000b).

### 2.2.5 Velocidade de resfriamento

Segundo Colpaert (1974), como a decomposição da cementita em ferro gama e grafita requer certo tempo para se efetuar (embora muito curto em altas temperaturas), pode-se atenuá-la, ou mesmo evitá-la totalmente, por meio de um resfriamento rápido desde o início da

solidificação. Esse procedimento pode dificultar a decomposição, de tal forma que, ferros fundidos que seriam cinzentos com o resfriamento lento habitual, tornam-se brancos.

Ainda segundo Colpaert (1974), a velocidade de resfriamento depende de dois fatores principais: material do molde e espessura das peças vazadas. Moldes de areia permitem um resfriamento lento, ao passo que moldes metálicos (coquilhas) provocam um resfriamento rápido, especialmente se forem espessos. O resfriamento lento favorece a formação de grafita.

A velocidade de resfriamento não influi apenas na grafítização; outra ação importante é na forma, distribuição e tamanho dos veios de grafita. Velocidades altas produzem veios finos, com uma distribuição dendrítica, comumente indesejável. Velocidades médias resultam em distribuição e tamanhos normais, e velocidades muito lentas em uma distribuição de veios grosseiros de grafita (CHIAVERINI, 1990).

Um fundido com seções apreciavelmente diferentes em espessura, pode ter diferenças em tamanho de grafita e dureza de matriz entre esas seções, embora a fundição inteira tenha sido vertida com o mesmo material. Isto é devido às diferentes velocidades de resfriamento. Estas diferenças na estrutura produzem propriedades mecânicas diferentes (VAN DE VELDE, 2000a).

## 2.2.6 Usinabilidade do ferro fundido

Por ser a usinabilidade uma característica mecânica de especial interesse no desenvolvimento do presente trabalho, será estudada com maior detalhamento. Para definir a usinabilidade é necessário primeiro entender o conceito de vida da ferramenta de corte.

### 2.2.6.1 Vida da ferramenta de corte

Em situações práticas, o tempo em que uma ferramenta de corte perde sua capacidade de produzir peças com dimensões e qualidade superficial desejadas determina o fim de sua vida.

Não obstante, os critérios adotados para determinar o fim de vida da ferramenta podem ser diferentes em cada caso, dependendo das condições de corte. (ISO 3685, 1993)

A norma ISO 3685 sugere um padrão para o teste de vida da ferramenta. Neste padrão o tempo de vida da ferramenta é determinado pelo máximo desgaste permitido. Os critérios mais usados para avaliar vida da ferramenta de metal duro são:

- Largura máxima do desgaste de flanco da superfície de folga ( $VB_{B \max}$ ) igual a 0,6 mm, se o desgaste da superfície de folga é irregular.
- Média da largura do desgaste de flanco ( $VB_B$ ) igual a 0,3 mm, se o desgaste da superfície de folga é regular.
- De forma semelhante ao desgaste de flanco, o lascamento também é avaliado em termos de  $VB_{B \max}$  adotando-se frequentemente o mesmo valor limite.
- No caso do processo de acabamento, a rugosidade também é um critério a ser adotado (não abordado na ISO 3685).
- O uso das características da formação de cavaco não é recomendado para a determinação de vida da ferramenta, embora seja usado como um instrumento de controle (anexo G da ISO 3685).
- A ocorrência de uma falha catastrófica da ferramenta desqualifica o ensaio de vida.

Para Dieter (1988), a vida da ferramenta pode ser calculada baseada na degradação do acabamento superficial, até atingir um valor admissível, ou quando o incremento das forças de corte ultrapassa um valor, ou quando a amplitude da vibração atingir um valor limite.

#### 2.2.6.2 Conceito de usinabilidade

A usinabilidade refere-se à facilidade com que consegue-se usinar determinado material e pode ser medida em termos de vida da ferramenta, velocidade de remoção de cavaco, acabamento superficial, facilidade de formação de cavaco ou forças de corte, dentre outros. Não é uma propriedade intrínseca do material, mas resulta de uma complexa interação entre as propriedades

mecânicas do material da peça, ferramentas de corte e condições de usinagem (KENNAMETAL, 2003).

Em termos gerais, pode ser dito que quanto maior a dureza e a resistência de um tipo de ferro fundido pior é sua usinabilidade (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006).

A dureza Brinell é um indicador de usinabilidade porque a dureza é dependente da microestrutura, mas apenas a dureza não é consistente como uma medida de usinabilidade. Uma maneira de avaliar melhor a usinabilidade do ferro fundido é combinar o teste de dureza com uma avaliação da microestrutura, por causa de alguns micro-constituintes que adversamente afetam a usinabilidade (ASM, 1989 apud BEZERRA, 2003).

#### 2.2.6.3 Efeito da microestrutura sobre a usinabilidade

A usinabilidade do ferro fundido depende fortemente de sua microestrutura. A forma da grafita no ferro fundido determina o seu tipo. A presença de grafita proporciona características de fácil usinagem, enquanto sua forma e quantidade estabelecem o possível acabamento da superfície a ser obtido com um processo de corte, além da força de corte necessária. A microestrutura do metal ao redor da grafita determina a vida da ferramenta e estabelece os níveis de velocidades de corte e avanço a serem utilizados (ASM, 1989 apud BEZERRA, 2003).

Esse grupo de material pode variar desde muito fácil de se usar, como o ferro fundido cinzento ferrítico (HB 120), até muito difícil, como o ferro fundido branco (HB 550). Entre estes dois extremos estão situados os vários tipos de ferros fundidos. É evidente, portanto que, como no caso dos aços, a larga faixa de usinabilidade dos ferros fundidos vai depender da microestrutura e da composição química (MILLS e REDFORD, 1983 apud BEZERRA, 2003).

A presença de inclusões de areia e carbonetos livres, normalmente duras e abrasivas, é muito negativa para efeitos de usinabilidade. Um ferro fundido com dureza 200 HB e com uma quantidade de carbonetos livres apresenta uma usinabilidade pior que um ferro fundido da mesma dureza com estrutura 100% perlítica sem carbonetos livres (SANDVIK, 2003).

Na usinagem dos ferros fundidos, a vida da ferramenta e as velocidades de corte são diretamente influenciadas pela microestrutura. Grafita no ferro fundido é importante para suas características de fácil usinagem, mas a vida da ferramenta é dependente da microestrutura do metal da matriz ao redor da grafita. A influência dos vários constituintes da matriz sobre a vida da ferramenta é discutida a seguir (ASM, 1989).

#### Morfologia da grafita

Em relação à classificação da Norma ASTM A247 (1984 apud ASM, 1985), se a solidificação aconteceu com baixa velocidade de resfriamento na presença de uma nucleação potente, um pequeno sub-resfriamento acontece e a grafita tipo A será formada. Os veios de grafita serão finos, distribuídos aleatoriamente e orientados na matriz do ferro fundido.

Numa condição de sub-resfriamento maior, a solidificação acontece rapidamente, com menos substratos efetivos e uma fina grafita tipo D será formada nas regiões interdendríticas e distribuídas aleatoriamente (MARWANGA, VOIGT e COHEN, 1999).

Ainda segundo Marwanga, Voigt e Cohen (1999), a grafita tipo A melhora as propriedades mecânicas e favorece a usinabilidade. Um tamanho médio de grafita tipo A fornece maior resistência e alongamento que uma grafita tipo D, que apresenta veios mais finos e propicia uma maior concentração de tensões. Adicionalmente, uma grafita tipo A apresenta maior ductilidade que a tipo D. O efeito da grafita tipo A nas propriedades mecânicas é mais sensível quanto maior é o índice de carbono equivalente (CE). Os veios de grafita tipo D favorecem um acabamento superficial mais fino por minimizar o efeito do *pitting* na superfície.

O papel preciso dos mecanismos pelos quais a grafita dos ferros fundidos cinzentos influencia as propriedades de usinabilidade, não são totalmente entendidos. Alguns pesquisadores sugerem que a grafita atua como um elevador de tensões durante o processo de formação do cavaco, facilitando assim a usinagem. Tem sido sugerido também que a grafita age como um lubrificante interno, facilitando o deslizamento. Porém não existe consenso entre os especialistas.

#### Ferrita

Os ferros fundidos com matriz ferrítica e com pouca ou nenhuma perlita são fáceis de usinar. Eles têm baixa resistência e normalmente uma dureza inferior a 150 HB. Devida à alta ductilidade da ferrita, este material pode ser muito aderente e formar aresta postiça quando se usina em baixas velocidades de corte (SANDVIK, 2003).

A ferrita é essencialmente um constituinte livre de carbono que compõe a matriz inteira dos ferros completamente recozidos. Se presente numa concentração superior a 10%, causará um enfraquecimento do ferro fundido além de indicar uma taxa de resfriamento lenta. Com exceção da grafita, a ferrita tem a menor dureza que qualquer outro constituinte no ferro, conforme mostrado na tabela 1.

Entretanto, não é tão mole quanto à ferrita do aço de baixo carbono, pois a ferrita no ferro fundido contém silício. O efeito endurecedor do silício dissolvido proporciona à ferrita uma propriedade bem definida. O silício tem na faixa de 1 a 3%, influência desprezível sobre a vida da ferramenta, mas os ferros fundidos com altos conteúdos de silício possuem usinabilidade reduzida (SHAW, 1986 apud BEZERRA, 2003).

Quando a porcentagem de ferrita diminui e a de perlita aumenta, a vida da ferramenta, obtida em operações de usinagem diminui.

As estruturas recozidas dos ferros fundidos dúcteis e maleáveis possuem uma matriz quase toda de ferrita e podem ser usinadas em velocidades relativamente altas, comparáveis àquelas usadas para a usinagem do ferro fundido cinzento (ASM, 1989 apud BEZERRA, 2003).

#### Perlita

A perlita tem uma estrutura resistente, dura e menos dúctil que a ferrita, sua resistência e dureza dependem das características das lamelas. Quanto mais fino o grão e mais finas as lamelas da perlita, maior a sua resistência e dureza. A perlita é um constituinte comum em ferros de média resistência e dureza. É composta de placas alternadas de ferrita dúctil (baixa dureza) e cementita de alta dureza. A estrutura mais fina é mais resistente, mais dura e, por isso, deve ser usinada em menores velocidades. A perlita no ferro fundido proporciona uma melhor combinação de usinabilidade e resistência ao desgaste do que outras estruturas da matriz (ASM, 1989 apud BEZERRA, 2003).

#### Martensita

A martensita é uma estrutura metaestável extra dura formada por têmpera. Para reduzir sua dureza e permitir sua usinagem é necessário submeter o ferro fundido ao revenimento. Após tal tratamento térmico, em geral, a martensita torna-se pouco mais usinável que a perlita de mesma dureza.

Quando a martensita é revenida até uma baixíssima dureza forma-se uma estrutura de carbonetos coalescidos na ferrita, aproximando-se da usinabilidade da ferrita (ASM, 1989 apud BEZERRA, 2003).

#### Acicular

Estruturas aciculares, incluindo a bainita, normalmente ocorrem em ferros ligados ou são obtidos por um tratamento de calor por têmpera em meio quente. Elas geralmente possuem dureza intermediária e são difíceis de usinar, um pouco menos usinável que a martensita revenida de mesma dureza (ASM, 1989 apud BEZERRA, 2003).

#### Austenita

A austenita é o principal constituinte dos ferros fundidos cinzentos com alto níquel e alguns dúcteis. A austenita é um constituinte relativamente mole, e é comparável à ferrita em usinabilidade. Entretanto, alguns tipos de ferros austeníticos possuem cromo suficiente para produzir carbonetos de cromo na microestrutura. Isto reduz a usinabilidade (ASM, 1989 apud BEZERRA, 2003).

#### Carbonetos

Os carbonetos são componentes extremamente duros constituídos de cementita pura ou contendo algum material de liga. Em placas finas como na perlita, a cementita pode ser usinada, porém a sua usinabilidade se reduz drasticamente no caso de partículas maiores (SANDVIK, 2003). Com percentual de aproximadamente 5% de carbonetos livres na estrutura da matriz, já se tem um significativo efeito prejudicial à usinabilidade. Os carbonetos podem estar presentes na periferia das peças de ferro fundido por causa da solidificação muito rápida neste ponto (ASM, 1989 apud BEZERRA, 2003).

#### Esteadita

A esteadita é um constituinte duro, com baixo ponto de fusão (982°C), que se forma nos contornos de grão e é formado pelo fósforo no ferro. Sua concentração é mantida abaixo de 10% pela manutenção do conteúdo de fósforo com percentual inferior a 1%. Em quantidade inferior a 5% tem mínima influência sobre a vida da ferramenta (SHAW, 1986 apud BEZERRA, 2003).

#### 2.2.6.4 Efeitos dos elementos de liga sobre a usinabilidade

O elevado teor de carbono das ligas de ferro fundido e a presença sempre obrigatória do silício tornam necessários considerá-los como ligas ternárias Fe-C-Si, de modo que os fenômenos de transformação da austenita, no resfriamento lento, são mais complexos, originando estruturas em que um novo constituinte se apresenta, o carbono livre ou grafita cuja forma, disposição e quantidade alteram profundamente as propriedades desses materiais (CHIAVERINI, 1986) e, por conseguinte, influenciam significativamente a usinabilidade dos ferros fundidos.

Além da influência do silício na usinabilidade via transformação do carbono em grafita para a formação de ferro fundido cinzento (que tem boa usinabilidade como já visto), o comportamento da usinagem dos ferros fundidos é fortemente influenciado pela composição química através dos efeitos de elementos de liga sobre a formação de carboneto ou de grafita (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006).

Os aditivos no ferro fundido afetam a usinabilidade porque auxiliam ou impedem a formação de carbonetos, que por sua vez influencia a resistência e/ou dureza. A estrutura interna do ferro fundido é afetada pelos materiais de liga, os quais, dependendo das suas características individuais, podem ser divididos em dois grupos (SANDVIK, 2003): formadores de carbonetos (Cr, Co, Mn, Mo e V) e grafitizantes (Si, Ni, Al, Cu e Ti).

Um exemplo do uso de materiais de liga, ocorre no caso da fabricação de blocos de motor. Para aumentar a potência desenvolvida e reduzir o peso do bloco do motor, este é feito com paredes finas (SANDVIK, 2003). O ferro fundido cinzento é frequentemente ligado com Cr e Ni e outros elementos como Cu. Dessa forma é obtido um grão fechado, estrutura fina lamelar com propriedades de elevada resistência. A seguir as principais características e influências de alguns elementos de liga sobre as propriedades do ferro fundido:

**Carbono:** como visto no item anterior, a presença de grafita melhora a usinabilidade do ferro fundido cinzento, porém a presença de carbonetos duros como a cementita tem efeito contrário.

**Silício:** o conteúdo de silício varia geralmente entre 1-3% (SANDVIK, 2003). Nessa quantidade, o Silício atua como um elemento grafitizante e, portanto, melhora a usinabilidade.

Em porcentagens inferiores pode estabilizar os carbonetos de forma que o ferro fundido será composto predominantemente de cementita com pouca grafita, gerando o ferro fundido branco, de difícil usinabilidade.

Manganês: o manganês é um formador de carbonetos, tem efeito oposto ao do silício, isto é, tende a estabilizar a cementita e contrabalança, de certo modo, o efeito do silício. Portanto, diminui a usinabilidade do ferro fundido. Além disso, o manganês atua, como se sabe, como elemento dessulfurante, por esta razão, quando um ferro fundido está com alta concentração de enxofre, um excesso de manganês é normalmente adicionado para prender o enxofre na forma de inclusões de MnS (CHIAVERINI, 1986).

Fósforo: quando presente em quantidades inferiores a 0,15%, forma na microestrutura um composto eutético chamado esteadita, independentemente se o ferro fundido é cinzento ou nodular. A excessiva dureza da esteadita e sua abrasividade reduzem significativamente a vida da ferramenta. Em quantidades acima de 0,2%, o fósforo provoca diminuição da usinabilidade, dependendo da microestrutura que pode ser contornada transformando-se a matriz original perlítica, em uma estrutura relativamente mole ferrítica. Posteriormente, após um tratamento de inoculação, a matriz mole minimiza a intensidade do contato abrasivo entre as partículas de esteadita e a ferramenta de corte. Dessa maneira, o efeito adverso sobre a usinabilidade é minimizado (ASM, 1967).

Enxofre: nos teores normais, na faixa de 0,02 – 0,25% o enxofre não tem ação significativa. Em quantidades superiores, o enxofre tem tendência a promover a formação de cementita, sendo prejudicial à usinabilidade. Por esta razão, quando um ferro fundido está com alta concentração de enxofre, um excesso de manganês é normalmente adicionado para reter o enxofre na forma de inclusões MnS menos nociva (CHIAVERINI, 1986; VAN DE VELDE, 2000).

Níquel: o níquel é um elemento grafitizante, e um fraco formador de perlita. Em quantidades acima de 5% tenderá a promover a formação de grafita, melhorando a usinabilidade do ferro fundido. (CHIAVERINI, 1990).

Estanho: em contraste ao efeito do fósforo, a adição do estanho em pequenas quantidades (0,05 a 0,15%), no ferro fundido cinzento, aumenta a usinabilidade e a vida da ferramenta pela

redução da dureza em toda a peça fundida e pela eliminação de pontos duros nos cantos (ASM, 1967).

#### 2.2.6.5 Usinabilidade e usinagem dos diversos tipos de ferros fundidos

A usinabilidade dos ferros fundidos varia significativamente dependendo do tipo de Fe e da sua microestrutura (KENNAMETAL, 2003). Os ferros fundidos ferríticos são de fácil usinabilidade, já os ferros fundidos brancos são extremamente difíceis de usinar. Outros tipos de ferros fundidos, tais como o maleável, o dúctil, o de grafita compactada e os ferros fundidos ligados estão numa posição intermediária entre os dois extremos.

Adicionalmente, estruturas duras formadas no fundido durante o rápido resfriamento e na presença de níveis excessivos de carbonetos formados podem seriamente degradar a usinabilidade do ferro fundido.

A Figura 6 mostra uma comparação entre alguns tipos de ferros fundidos em relação à usinabilidade. Pode se observar nesta figura que a usinabilidade varia muito entre as ligas, pois o ferro fundido branco (cheio de carbonetos duros e abrasivos) tem uma usinabilidade da ordem de 10 vezes menor que o cinzento (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006).

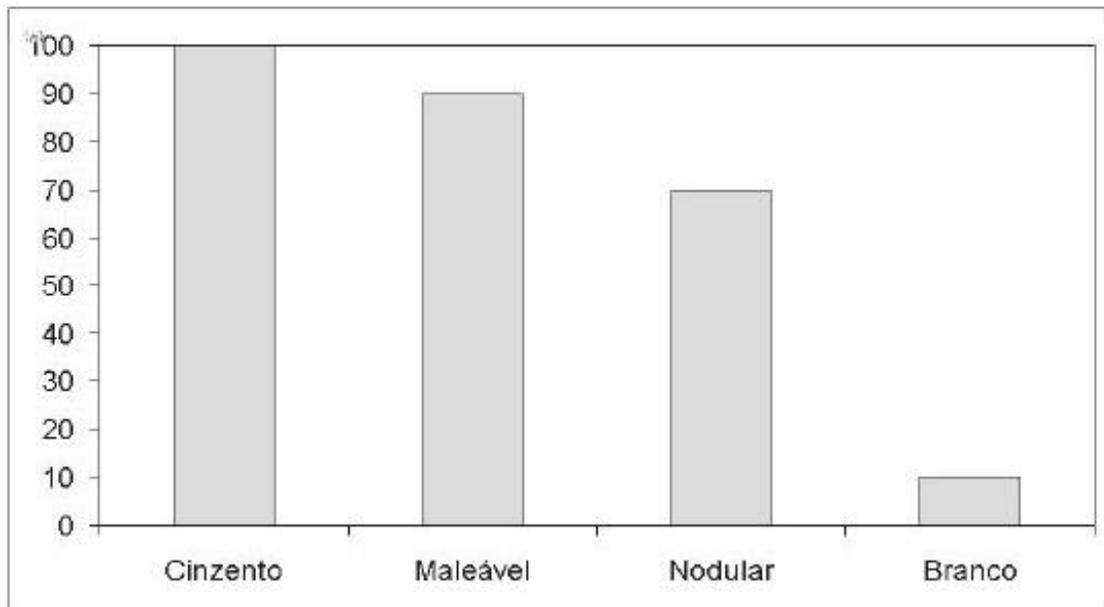


Figura 6- Usinabilidade dos ferros fundidos (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006).

#### 2.2.6.6 Ferro fundido vermicular

A morfologia da grafita facilita a quebra do cavaco, porém este ferro fundido é suficientemente resistente para prevenir a formação de cavaco tipo pó. A usinabilidade do ferro fundido vermicular está numa faixa intermediária entre os ferros fundidos cinzentos e os nodulares para uma mesma estrutura de matriz. Na usinagem deste tipo de material, recomenda-se seguir as recomendações para ferros fundidos dúcteis de baixa resistência (KENNAMETAL, 2003).

Dawson et al. (1999), classificaram as principais variáveis envolvidas na usinabilidade do ferro fundido vermicular da seguinte maneira:

- Efeito da forma da grafita;
- Efeito da perlita;
- Efeito de elementos químicos (Sb, Mn, Si, S, Ti, Cr);
- Efeito das inclusões.

**Efeito da forma da grafita.** A formação de cavacos dos ferros fundidos é diretamente afetada pela grafita, que possui pouca resistência mecânica e gera descontinuidades e efeitos de entalhe na matriz, auxiliando o processo de remoção de material.

**Influência da proporção perlita / ferrita.** Um aumento na proporção de perlita não implica necessariamente em um maior desgaste da ferramenta de usinagem. Ensaios de torneamento realizados por Dawson (1999) foram conduzidos em ferros fundidos vermiculares com diferentes quantidades de perlita. Como elementos estabilizadores da perlita, foram utilizados Cu e Sn. Para atingir 100% de perlita adicionou-se Mn. Foram realizados testes com metal-duro nas velocidades de 150 e 250 m/min. Considerando a faixa entre de 70% e 97,5% de perlita, para a velocidade de corte de 150 m/min, a vida da ferramenta apresenta, curiosamente, o maior dos valores na proporção intermediária de 75%. A vida da ferramenta utilizada na liga com Mn (100% perlítica) foi reduzida bruscamente, o que não foi atribuído ao aumento no teor de perlita, mas a alterações de microdureza da ferrita e outras variações microestruturais.

**Efeito do enxofre.** O enxofre, juntamente com o manganês, forma o sulfeto de manganês (MnS). Boehs (1974) verificou que a presença do MnS no ferro fundido maleável preto ferrítico melhora sua usinabilidade principalmente por melhorar a quebra dos cavacos. Inclusões de MnS tendem a melhorar a usinabilidade de ferros fundidos cinzentos e dos chamados aços de corte fácil, agindo como lubrificante e aderindo sobre a superfície da ferramenta, formando uma camada lubrificante e protetora contra oxidação e difusão. Já no vermicular, não se observa a formação da referida camada, pois o teor de enxofre normalmente presente é da ordem de 0,01%, dez vezes menor do que no cinzento. Além disso, este enxofre residual do vermicular combina-se preferencialmente com o magnésio, elemento nodulizante, não ficando quantidades remanescentes para se combinar com o manganês e formar a camada protetora de MnS (REUTER, 2000).

#### 2.2.6.7 Ferro fundido cinzento

O ferro fundido cinzento, pela sua fácil fusão e vazamento, usinabilidade superior aos outros ferros fundidos de dureza equivalente, resistência mecânica satisfatória, boa resistência ao desgaste e boa capacidade de amortecimento, é, dentre os ferros fundidos, o mais usado (CHIAVERINI, 1986).

Segundo Heath, (1989 apud SUDO, 2001), a microestrutura do ferro fundido cinzento é o principal indicador de sua usinabilidade. A perlita aumenta a resistência mecânica do ferro fundido e diminui a sua usinabilidade. Além da influência da própria matriz ou da porcentagem relativa de ferrita e perlita, os veios de grafita (quantidade, distribuição e tamanho) também são fatores importantes na usinabilidade do material. Os veios de grafita introduzem descontinuidades na matriz do metal e agem como um quebra cavacos, formando cavacos de ruptura. A grafita é um lubrificante natural.

Os ferros fundidos cinzentos apresentam maior usinabilidade que outros ferros fundidos de dureza semelhante e praticamente maior que todos os aços. Porém este material apresenta uma tendência à quebra de cantos, especialmente na saída da ferramenta do corte (KENNAMETAL, 2003).

Variações no processo de fundição das peças podem produzir diferentes características de usinabilidade ao interior da mesma peça. Um rápido resfriamento de uma seção fina, por exemplo, pode provocar uma dureza elevada, dificultando a usinagem.

A Tabela 1 lista um índice de vida da ferramenta para diferentes microestruturas de matriz de ferros fundidos cinzentos contendo 2,5% de grafita e de diferentes valores de dureza.

Pode ser visto nessa tabela que as taxas de desgaste da ferramenta aumentam com o aumento das proporções de perlita em matrizes perlita/ferrítica e com a diminuição do espaçamento interlamelar da perlita; um aumento adicional nas taxas de desgaste da ferramenta ocorre quando a matriz perlítica contém excesso de carboneto de ferro. A dureza do ferro fundido cinzento, e, portanto, o desgaste da ferramenta, aumenta com o aumento da porcentagem de perlita e cementita (MILLS e REDFORD, 1983 apud BEZERRA, 2003).

**Tabela 1 - O efeito de microestrutura e dureza da matriz sobre o índice de vida da ferramenta de corte dos ferros fundidos cinzentos (MILLS e REDFORD, 1983 apud BEZERRA, 2003).**

Microestrutura da matriz	Dureza Brinell	Índice de vida da ferramenta
Ferrita	120	20
50% de ferrita e 50% de perlita	150	10
perlita grossa	195	2
perlita média	215	1,5
perlita fina	218	1
perlita fina com 5% em excesso de carboneto de ferro	240	0,3

Com o conteúdo de ferrita diminuindo e o de perlita aumentando, a vida da ferramenta diminui rapidamente. Ferros fundidos com conteúdos de P elevados (próximos de 4%) formam um constituinte muito duro, chamado esteadita, que tem um efeito na redução da vida da ferramenta (KENNAMETAL, 2003).

Segundo Marwanga, Voigt e Cohen (1999) nos ferros fundidos, a grafita em forma de escamas, assim como a microestrutura, influenciam na quantidade de trincas e lascas que acontecem durante o processo de usinagem de engrenagens, blocos de motor, e outras peças acabadas. Os autores realizaram estudos analisando diversos graus comerciais de ferros fundidos cinzento e dúcteis, usando baixa velocidade de usinagem assim como um dispositivo de alta velocidade e rápida parada. Foi utilizado um sistema de câmara de vídeo de alta ampliação para registrar o processo e também as amostras usinadas foram examinadas com um microscópio óptico e outro eletrônico de varredura. As fitas demonstram claramente que as trincas acontecem ao longo das lâminas (escamas) de grafita e também que uma deformação severa acontece nas proximidades da estrutura da matriz. A pesquisa também revelou a existência de grafita livre fina na interface ferramenta/cavaco de todos os ferros fundidos cinzentos, a qual realiza um papel de lubrificação importante. A grafita na interface forma um filme fino sólido que separa a ferramenta da peça e reduz o esforço e o atrito. O resultado é uma temperatura mais baixa na interface ferramenta/peça aumentando também a usinabilidade. Confirmando os resultados mostrados na Tabela 2, foi comprovado que o tipo de matriz ou a microestrutura fina na qual a

grafita foi embutida influencia na usinabilidade. Examinando microestruturas de ferro fundido típicas, incluindo ferrita, ferrita/perlita, e totalmente perlita, foi verificado que, quanto maior a quantidade de ferrita, maior é a usinabilidade.

O ferro fundido cinzento é classificado geralmente pela sua resistência mínima à tração. Um ferro fundido cinzento classe 30 indica que tem uma resistência à tração nominal de 30.000 psi. No Sistema Internacional (SI) um ferro fundido semelhante teria um grau 220, com uma resistência à tração de 220 MPa ou 220 N/mm<sup>2</sup>. O ferro fundido cinzento também pode ser designado satisfatoriamente pela sua dureza Brinell, conforme tabela 2.

A dureza normalmente dá uma indicação boa da vida da ferramenta em usinagem, porém, a presença de carbonetos livres na microestrutura poderá reduzir a usinabilidade muito mais do que aumentar a dureza.

**Tabela 2 - Graus de ferro fundido cinzento para aplicação automotiva, em função da dureza Brinell - Norma SAE J431 (VAN DE VELDE, 2000b).**

Grau SAE	Dureza HB*	Resistência à tração mínima (para projeto)		Outros Requerimentos
		psi	MPa	
G1800	187 max	18	124	
G2500	170-229	25	173	
G2500	170-229	25	173	min 3.4% C e microestrutura específica
G3000	187-241	30	207	
G3500	207-255	35	241	
G3500b	207-255	35	241	min 3.4% C e microestrutura específica
G3500c	207-255	35	241	min 3.5% C e microestrutura específica
G4000	217-269	40	276	
*Dureza a uma determinada profundidade na fundição				

A faixa de dureza típica do ferro fundido cinzento é mostrada na Tabela 3. O ensaio de dureza Brinell é usado para todos os ferros fundidos porque a sua escala é ampla o bastante para calcular a média da dureza dos componentes na microestrutura. As escalas Rockwell B ou C podem ser usadas satisfatoriamente em superfícies usinadas em que a superfície de apoio também é usinada (VAN DE VELDE, 2000b).

A resistência básica e a dureza do ferro fundido são devidas à matriz metálica na qual a grafita está presente. As propriedades da matriz metálica podem variar desde aquelas suaves, como a do aço de baixo carbono até as mais duras, como a dos aços de alto carbono. A matriz pode ser completamente de ferrita que tem alta usinabilidade, porém baixa resistência ao desgaste. Uma matriz completamente perlítica é característica de ferro fundido cinzento de alta resistência.

**Tabela 3 - Faixas de dureza do ferro fundido cinzento (VAN DE VELDE, 2000b).**

Tipo de ferro fundido cinzento	Estrutura da matriz envolta dos flocos de grafita	Dureza Brinell
Recozido suave	100% Ferrita	110-140
Ordinário	Perlita e Ferrita	140-200
Alta resistência	Perlita Fina	200-270
Ligado acircular	Bainita	260-350
Austenítico (Ni-Resist)	Austentita	140-160
Endurecido por trat. Térmico	Martensita	480-550
Endurecido e Temperado	Martensita Temperada	250-450
Resfriado (ferro fundido branco)	Perlita e Carbonetos	400-500

Muitas fundições produzem peças fundidas com uma microestrutura de matriz de ferrita e perlita, para obter dureza e resistência médias. Adições de ligas e tratamentos térmicos podem ser usadas para produzir ferro fundido cinzento com perlita muito fina ou com uma estrutura de matriz acicular.

O ferro fundido cinzento pode ser usinado a seco, propiciando melhores resultados, ou com ar (às vezes com aspiração do cavaco), para evitar dano à máquina-ferramenta. Pode

proporcionar bons resultados com materiais de ferramenta de corte cerâmicos ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) usados sem fluido de corte (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006).

#### 2.2.6.8 Ferro fundido dúctil

Os nódulos de grafita no ferro fundido dúctil agem em forma semelhante aos veios de grafita nos ferros fundidos cinzentos, quebrando o cavaco e lubrificando a interface na usinagem.

A usinabilidade aumenta com o aumento do conteúdo de Si (próximo de 3%), porém diminui significativamente com o aumento de Si acima desse valor. A estrutura de perlita fina também diminui a usinabilidade deste tipo de ferro fundido. A perlita do ferro fundido nodular é considerada como a fase que fornece a melhor combinação usinabilidade/resistência ao desgaste dentre as presentes nos diversos tipos de ferros fundidos.

A estrutura martensítica temperada apresenta uma melhor usinabilidade que a estrutura perlítica do mesmo nível de dureza. Outras microestruturas, tais como a bainita acicular e a ferrítica acicular, formadas durante o tratamento térmico do ferro fundido nodular, apresentam usinabilidade semelhante aos da estrutura martensítica temperada, do mesmo nível de dureza.

Ferros fundidos dúcteis de alta resistência, comparados com ferros fundidos cinzentos requerem um sistema de usinagem com melhor rigidez (fixação de peças e ferramental). A vida da ferramenta pode diminuir na usinagem com velocidades típicas das usadas nos ferros fundidos cinzentos (KENNAMETAL, 2003).

A usinabilidade do ferro fundido dúctil austemperado (ADI) de grão pequeno é igual ou superior à atingida nos aços com resistência mecânica equivalente. Estudos demonstram que a vida da ferramenta diminui com o aumento da dureza do ADI. Como regra geral, na usinagem deste tipo de material se recomenda seguir as recomendações para ferros fundidos dúcteis de alta resistência (KENNAMETAL, 2003).

Alguns dos fatores que influenciam na usinabilidade deste tipo de ferro fundido incluem macro-inclusões, microcarbonetos, distribuição da grafita, resistência, carbonetos e carbonitretos, e em forma menos decisiva, as condições de limpeza do processo de fundição. Óxidos,

carbonetos, nitretos, areia e outras fases que podem estar presentes no ferro são muito abrasivas e podem acelerar o desgaste da ferramenta. Algumas fases que degradam a usinabilidade incluem (BATES, 2000):

- Óxidos de ferro e silicatos formados durante o ato de vaziar o metal fundido;
- Carbonetos e fosfatos de ferro ternários formados durante a solidificação eutética;
- Titânio, vanádio e carboneto de nióbio, nitretos e carbonitretos formados por reações no ferro;
- Carbonetos de cromo e de molibdênio, formados durante o resfriamento do fundido;
- Carbonetos finamente distribuídos que se formam durante a solidificação do ferro fundido.

Dependendo das condições do tratamento térmico empregado, os componentes do ADI poderão ter uma elevada dureza (até aproximadamente 50 HRC). Embora certos graus sejam mais facilmente usináveis que outros, é recomendado que a maior parte da usinagem seja levado a cabo antes do tratamento térmico, quando o material está em sua condição mais mole. Foi verificado em produção que o ferro fundido dúctil é mais facilmente usinável que o aço forjado de uma dureza semelhante (AUSTEMPERED, 1992).

Ainda, segundo Austempered (1992), idealmente, toda a usinagem deveria ser realizada antes da austêmpera. Isto requer que a informação esteja disponível para prever a quantidade pequena de crescimento das estruturas presentes que acontecerá durante o tratamento térmico.

Alguns dos dados atualmente disponíveis mostram que inicialmente a estrutura ferrítica (com uma dureza de cerca de 150 HB) sofre um maior crescimento que a estrutura perlítica (com uma dureza de cerca de 250 HB). Nos casos em que é necessário realizar o acabamento depois da austêmpera (como é o caso de mudanças dimensionais depois do tratamento térmico), o uso de ferramentas de metal duro permite o torneamento, fresamento, furação e roscamento dos graus mais dúcteis do ADI.

Segundo Klocke e Klöpper (2002), a usinagem deste ferro fundido deve ser seguida uma das três estratégias seguintes:

- Usinagem completa antes do tratamento térmico;
- Operações de desbaste antes e acabamento depois do tratamento térmico;
- Usinagem completa depois do tratamento térmico.

A usinagem completa antes do tratamento térmico permite realizar todas as operações de corte na condição ferrítica ou ferrítica-perlítica, utilizando elevadas velocidades de corte e avanço. Porém, mudanças dimensionais depois do tratamento térmico, ou diminuição das propriedades de superfície pela perda de carbonetos das camadas superficiais, exigem operações suplementares de acabamento. A alternativa de desbaste antes e acabamento depois do tratamento térmico envolve complicações logísticas uma vez que as instalações de tratamento térmico nem sempre se encontram dentro do chão de fábrica. Finalmente, a usinagem completa depois do tratamento térmico é viável hoje em dia porque a tecnologia das ferramentas de corte e os processos de usinagem permitem a usinagem de novos materiais com elevada resistência.

Segundo Klocke e Klöpper, (2000), os primeiros resultados sobre usinabilidade do ADI foram publicados pelos mesmos autores em trabalho anterior, no qual foram realizados ensaios de usinagem em torneamento, fresamento e furação. No caso do fresamento frontal, foi feito um estudo de otimização da geometria da ferramenta, em que foram comparados insertos com ângulos de saída e geometria de aresta de corte diferentes, utilizando insertos de metal duro classe ISO K15. Os resultados mostram que uma aresta protegida do impacto (com arredondamento de ponta ou chanfro) em combinação com um ângulo de saída positivo (para minimizar o esforço de corte) apresenta melhor resultado em termos de vida da ferramenta, que uma aresta afiada e ângulo de saída negativo. O uso de fluido de corte não foi recomendado para fresamento com pastilhas resistentes ao desgaste, porque os insertos de metal duro mostraram-se sensíveis ao choque térmico, gerando trincas térmicas.

### 2.2.7 Desenvolvimento das ferramentas de corte específicas para a usinagem do ferro fundido

A história dos novos materiais para ferramentas de corte iniciou-se com o desenvolvimento da ferramenta de aço rápido. Essas ferramentas têm sido substituídas pelas ferramentas de metal duro que são hoje as predominantes no processo de fresamento. O metal

duro está sendo substituído em muitas aplicações pela cerâmica e outros materiais de maior dureza.

#### 2.2.7.1 Metal Duro

O metal duro sofreu uma evolução que melhorou sensivelmente suas propriedades: estrutura micro-grão, revestimentos duros e projetos de arestas de corte com geometria melhorada (QUINTO, 1996). Como todo material cortante, o metal duro apresenta diversas propriedades físicas e químicas, mas sua importância resulta principalmente da boa combinação entre dureza a penetração, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade.

Considerando-se uma mistura básica do metal duro, o aumento da quantidade de carbonetos fará com que a propriedade da dureza a quente seja implementada, ao mesmo tempo em que são diminuídas a tenacidade e a resistência a choques térmicos. Quando o carboneto de tungstênio cede lugar para outros tipos de carbonetos como o tântalo e o titânio, verifica-se o aumento da estabilidade química em relação ao Fe.

Como os carbonetos de tântalo e titânio são considerados cerâmicos e esses apresentam baixa afinidade química com a maioria dos materiais, em elevadas temperaturas impede-se a reação química entre os elementos constituintes do aço e do metal duro. Obviamente, quanto maior for a quantidade de carbonetos de tântalo e titânio, maior será a resistência ao desgaste do composto. O mecanismo de desgaste de origem química (difusão) é responsável principalmente pelo desgaste da superfície de saída da ferramenta. Como o ferro fundido cinzento forma cavacos pequenos que não atiram muito com esta superfície, não é necessário que a ferramenta que o usine tenha alta estabilidade química. Por isso, ferramentas adequadas à usinagem do ferro fundido cinzento não possuem os carbonetos de titânio e tântalo em sua composição, mas somente o carboneto de tungstênio (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006).

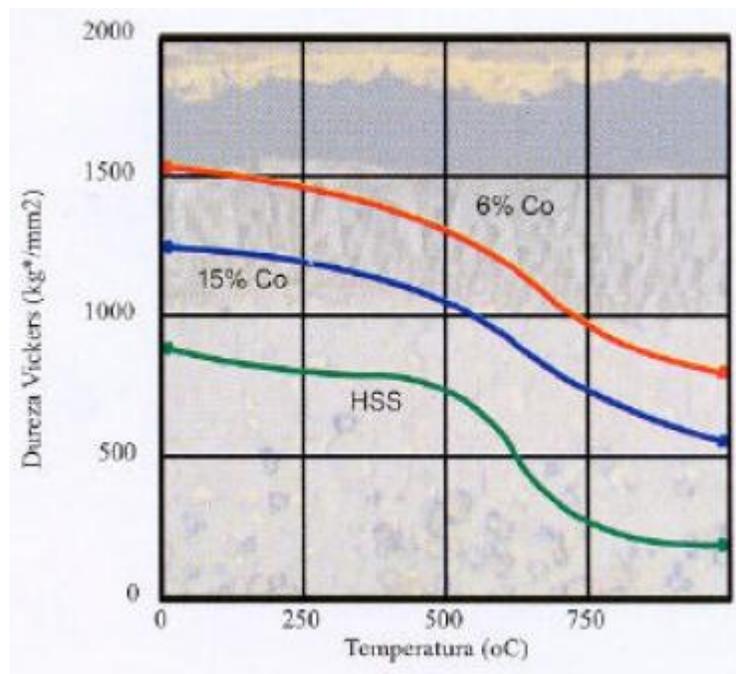
Além do teor de cobalto, a tenacidade também é afetada diretamente pelo tamanho de grão. Quanto mais fino o grão, maior a tenacidade da ferramenta. O tamanho de grão afeta o

fluxo de calor do composto (SECO TOOLS, 2005). A força coercitiva (Hc) entre os grãos do substrato diminui com o aumento do tamanho de grão, de acordo com a Tabela 4:

**Tabela 4 - Força coercitiva (Hc) em função do tamanho de grão do metal duro.**

Tamanho do grão	Força coercitiva (Hc)
Grande	110
Médio	140
Fino	285

A dureza a quente é importantíssima na manutenção da integridade da aresta, porque evita a ocorrência da deformação plástica. A Figura 8 mostra uma comparação entre a dureza do metal duro na sua composição mais simples e o aço rápido em termos de dureza a quente.



**Figura 7 - Dureza a quente do metal duro com variação de percentual de cobalto e do aço rápido (FERRARESI, 1977).**

O metal duro puro (WC-Co), classe ISO K, apropriado para ferro fundido e materiais não ferrosos possui as seguintes características:

- Conteúdo de Co: 5 - 12%;

- Tamanho dos grãos de WC: 1 - 5  $\mu\text{m}$ ;
- Excelente resistência ao desgaste por abrasão.

Atualmente, a grande maioria das pastilhas de metal duro, usada na usinagem do ferro fundido possui camadas de cobertura de espessura microscópica. Os principais materiais utilizados nestas coberturas são o carboneto de titânio e/ou óxido de alumínio, nitreto de titânio e carbonitreto de titânio. A finalidade destas camadas é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça, sendo que o núcleo da pastilha permanece com a tenacidade característica do metal duro mais simples, composto por cobalto e carboneto de tungstênio (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006).

König, Fritsch e Kammermeier (1992), afirmam que a cobertura dura deve reduzir drasticamente todos os efeitos de superfície envolvidos com o desgaste, tais como difusão, oxidação, abrasão e adesão e que o processo de revestimento não deve reduzir a resistência interna do substrato, especialmente a tenacidade do metal duro.

Na década de 60, o processo utilizado para a aplicação das coberturas era o CVD (deposição química de vapor), utilizando-se temperaturas da ordem de 1000°C. Este processo cria uma camada na interface entre substrato e a cobertura, denominada Fase *eta*, que fragiliza o revestimento.

Em 1985 foi criado o processo de revestimento CVD com temperatura moderada, denominado MTCVD. Este processo consiste na aplicação da camada de TiCN pelo processo CVD com uma temperatura de 850°C, sendo que as outras coberturas, normalmente TiN e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são aplicadas a uma temperatura de 1000°C. Este processo permite diminuir a espessura da fase *eta* e com isso aumentar a tenacidade da pastilha.

Posteriormente, foi aprimorado esse processo com o objetivo de diminuir a temperatura da aplicação. O CVD auxiliado com plasma, denominado PCVD, permitia a aplicação na faixa de temperaturas entre 500-700°C, já o aprimoramento do processo CVD permitiu atingir uma faixa de temperaturas de aplicação entre 700-900°C (ICKS, 1989).

O processo PVD (deposição física de vapor) possibilitou a aplicação do revestimento com temperaturas mais baixas, em relação ao processo CVD. A temperatura de aplicação encontra-se na faixa entre 450-500°C. Esse processo é realizado em uma câmara de alto vácuo com a presença de um gás inerte, o argônio. O tempo de permanência também é diferente em ambos os

processos. Geralmente de 10 horas para o processo CVD contra 1 hora do processo PVD. Essas características tempo/temperatura de processo provocam mudanças no substrato influenciando na eficiência da cobertura. Existe uma significativa redução nas propriedades do substrato resultante da elevada temperatura do processo CVD. No processo PVD as características tempo/temperatura de processo não provocam mudanças nas propriedades do substrato. O processo PVD possui as seguintes vantagens:

- Livre de trincas na cobertura;
- Grãos finos, cobertura com superfície lisa;
- Tensão residual de compressão;
- Não gera a fase *eta* frágil;
- Pode ser aplicado sobre aresta de corte afiada.

O processo CVD fornece uma elevada resistência ao desgaste, superior ao processo PVD. Essa característica é desejável num processo de usinagem contínua (torneamento, por exemplo). Porém, em aplicações de corte interrompido, a tenacidade do conjunto substrato/cobertura é mais importante que a resistência ao desgaste. Mesmo existindo uma perda de tenacidade do substrato no processo CVD, esta perda pode ser parcialmente compensada pelo aquecimento da aresta de corte no processo de usinagem.

A espessura da cobertura é um fator importante. Uma cobertura muito fina reduz a sua eficiência, uma cobertura muito grossa acaba se tornando frágil. A espessura da cobertura no processo CVD está na faixa de 5-20  $\mu\text{m}$ , enquanto no processo PVD está na faixa de 2- 8 $\mu\text{m}$ .

A rugosidade da ferramenta depende também da dureza da cobertura. Uma cobertura lisa gera bom acabamento na peça, é resistente à formação de microlascas no inserto, gera menor atrito na ferramenta e, portanto menos calor. A tensão residual também é importante na cobertura.

O processo CVD gera tensões de tração com as seguintes características:

- Origem: Diferença entre os coeficientes de dilatação da cobertura e do substrato;
- Trincas na cobertura;
- Sem grandes problemas em torneamento, a menos que haja corte interrompido;
- Trincas prematuras no inserto em operações de fresamento;

O processo PVD gera tensões de compressão com as seguintes características:

- Origem: Bombardeamento da superfície por íons metálicos/gases;

- Sem trincas na cobertura;
- Retarda o início/propagação de trincas;
- Favorável em cortes interrompidos;
- A microestrutura da cobertura influencia da seguinte forma:
- Coberturas com grãos finos são mais duras;
- Coberturas de PVD possuem grãos mais finos que as atingidas com o processo CVD.

Multi-camadas alternadas de diversos revestimentos, entre eles: Nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN), nitreto de titânio e alumínio (TiAlN), nitreto de cromo (CrN), nitreto de titânio zircônio (TiZrN), carbonitreto de titânio alumínio (TiAlCN), e boreto de titânio (TiB<sub>2</sub>), sendo os mais usuais o TiN e o TiAlN. Esses revestimentos possuem grãos mais finos que uma única cobertura de mesma espessura, aumentando assim a resistência ao desgaste (SANTHANAM, 2005).

## **2.3 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.

O fresamento destaca-se por apresentar grande versatilidade em relação à capacidade de gerar geometrias, bem como custos relativamente reduzidos. (DINIZ, MARCONDES E 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).

### 2.3.1 Introdução

Dentre os processos convencionais de usinagem que existem atualmente, o fresamento apresenta-se como um dos mais importantes. Sua importância se deve principalmente pela boa versatilidade na usinagem de peças, alta taxa de remoção de material e também pela característica do cavaco produzido, que é relativamente curto, o que não compromete a qualidade da superfície gerada.

Uma das principais vantagens do processo de fresamento, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2006), é que esta operação é a mais versátil na geração de superfícies planas não de revolução. Sua versatilidade é devido principalmente à grande variedade de geometrias que suas ferramentas podem apresentar, tornando possível, por consequência, a geração de um número igualmente vasto de superfícies.

Alguns pré-requisitos devem ser levados em consideração para a utilização deste processo, dentre estes, um é fundamental: o fresamento requer uma máquina-ferramenta que tenha alta rigidez, pois durante o processo de corte há uma grande flutuação das cargas mecânicas (devido ao corte interrompido). Esta variação de cargas que ocorre durante o corte se deve ao impacto de cada uma das arestas ao entrar em contato com o material e durante o período que estas estiverem cortando. Este período é denominado fase ativa. Assim que a ferramenta sai do material, há uma queda brusca da carga a que a ferramenta está submetida. Esta fase é denominada inativa e não apresenta remoção de material.

Estas grandes variações de cargas mecânicas que ocorrem propiciam o aparecimento de elevados ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento. Durante o corte, a ferramenta fica submetida a elevadas temperaturas, que são rapidamente atingidas. Mas, durante a fase inativa, a ferramenta também é submetida a um rápido resfriamento. Este agressivo ciclo térmico pode gerar na ferramenta trincas perpendiculares à aresta de corte, fragilizando-a diante das intensas solicitações mecânicas sofridas durante o corte.

### 2.3.2 Definições e nomenclatura

Para uma melhor compreensão do fresamento, algumas definições sobre parâmetros de corte (ABNT NBR 6162/1989 – Nomenclatura e relações Geométricas na Usinagem dos Metais – Terminologia), ângulos (ABNT NBR 6163/1980 – Conceitos da Técnica de Usinagem – Geometria da Cunha Cortante – Terminologia) e maneiras como esta operação pode ser executada são importantes.

#### Parâmetros de corte

Penetração de trabalho ( $a_e$ ): é a penetração da ferramenta em relação a peça, medida no plano de trabalho e numa direção perpendicular à direção de avanço.

Profundidade ou largura de corte ( $a_p$ ): é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho.

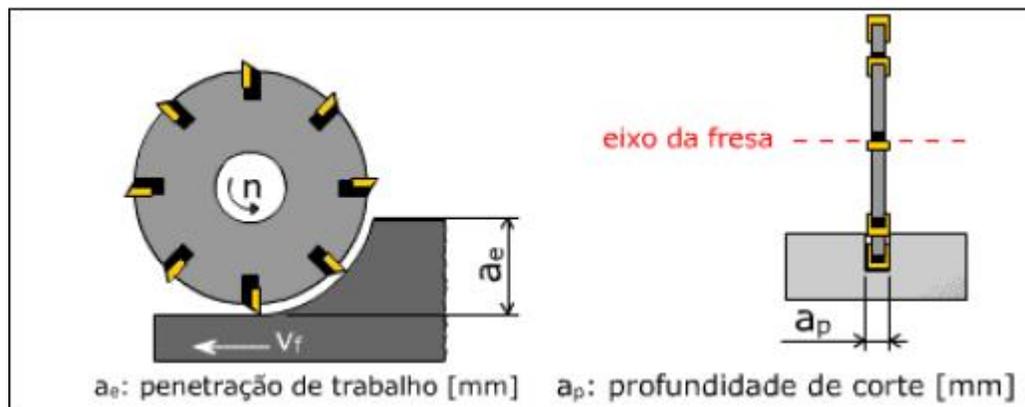


Figura 8 - Parâmetros de corte no fresamento tangencial (CIMM, 2006).

Velocidade de corte ( $v_c$ ): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte. A equação 2.1 expressa como é

realizado o cálculo do módulo da velocidade de corte.

$$v_c = \frac{(\pi \times D \times n)}{1000} \text{ (m/min)} \quad \text{Equação 2.1}$$

onde:

D = diâmetro da ferramenta (mm):

n = número de rotações por minuto da ferramenta:

Velocidade de avanço ( $v_f$ ): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço. A equação 2.2 expressa como é realizado o cálculo do módulo da velocidade de avanço.

$$v_f = f \times n \text{ (mm/min)} \quad \text{Equação 2.2}$$

onde:

f = avanço (mm/rotação)

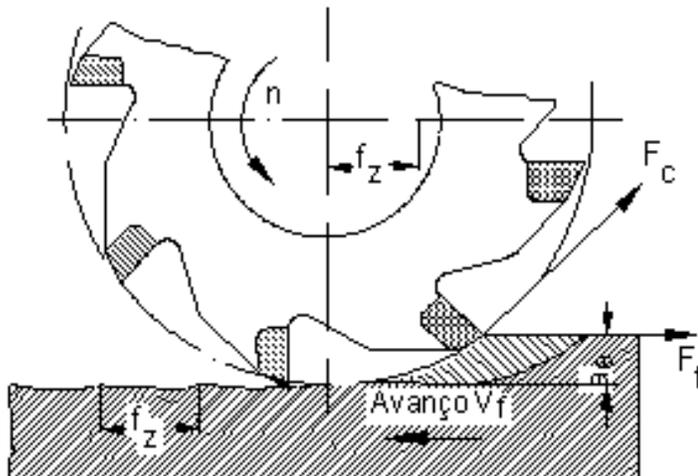


Figura 9 - - Direção dos movimentos de corte, avanço efetivo em uma operação de fresamento discordante. (SANDVIK, 1994).

Avanço por rotação ( $f_n$ ): é o percurso de avanço em cada rotação da fresa. A equação 2.3 expressa como é realizado o cálculo do módulo do avanço por rotação.

$$f_n = \frac{v_f}{n} \text{ (mm/rot)} \quad \text{Equação 2.3}$$

onde:

$v_f$  = avanço linear (mm/min);

$n$  = rotações (rpm).

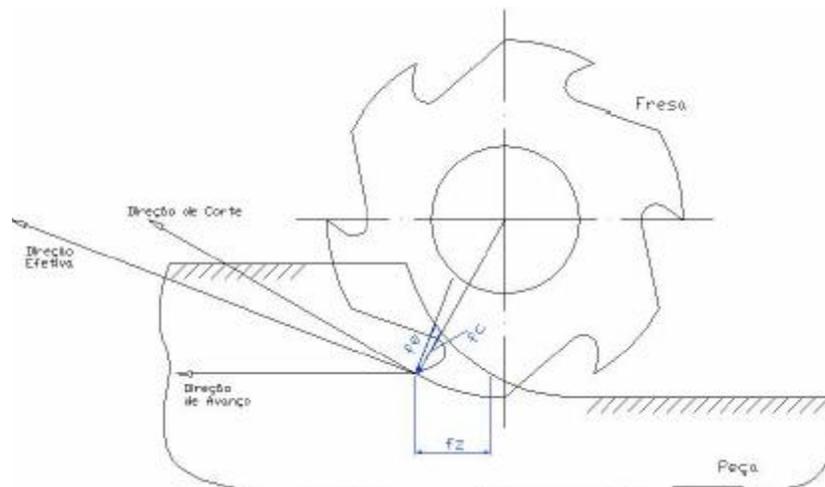
Avanço por dente ( $f_z$ ): é o percurso de avanço de cada dente da fresa, medido na direção de avanço da ferramenta, e corresponde a geração de duas superfícies consecutivas em usinagem medida na direção perpendicular à direção de corte no plano de trabalho. A equação 2.4 expressa como é realizado o cálculo do módulo do avanço por dente.

$$f_z = \frac{f}{Z} = \frac{v_f}{Z \times n} \text{ (mm/dente)} \quad \text{Equação 2.4}$$

onde:

$Z$  = número de dentes da fresa.

Avanço Efetivo de Corte ( $f_e$ ): é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medidas na direção efetiva de corte no plano de trabalho.

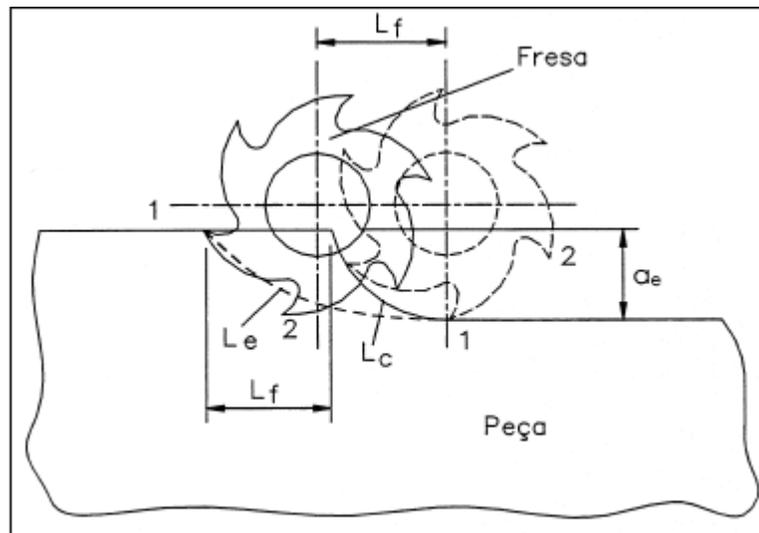


**Figura 10 - Avanço por dente  $f_z$ , avanço de corte  $f_c$  e avanço efetivo  $f_e$  em uma operação de fresamento concordante. (SANDVIK, 1994).**

Espessura de corte em um plano determinado do corte ( $h_i$ ): é a espessura calculada da seção transversal de corte a ser retirada no instante  $i$  de corte, medida normalmente a superfície em usinagem principal e segundo a direção perpendicular à direção de corte.

Percurso de corte ( $L_c$ ): é a distância percorrida sobre a peça pelo ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção de corte.

Percurso de avanço ( $L_f$ ): é a distância percorrida pela ferramenta, segundo a direção de avanço.



**Figura 11 - Percurso de corte  $L_c$ , percurso de avanço  $L_f$  e percurso efetivo  $L_e$  para uma operação de fresamento discordante. (SANDVIK, 1994).**

Força de corte ( $F_c$ ): entende-se a força de corte como uma pressão aplicada sobre uma área.

$$F_c = K_{c1,1} \times b \times Z_c \times h_m^{1-mc} \quad (\text{N}) \quad \text{Equação 2.5}$$

onde:

$K_{c1,1}$  = pressão específica de corte ( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

$b$  = comprimento do gume ativo (mm);

$Z_c$  = número efetivo de dentes em contato com a peça;

$h_m$  = espessura média do cavaco (mm);

$1-mc$  = expoente Kienzle.

Espessura do cavaco (mm): espessura média do cavaco

$$h_m = \left( \frac{360}{W_e} \right) \times \left( \frac{f_z}{\pi} \right) \times \left( \frac{a_e}{d} \right) \times \text{sen} \kappa_r \quad (\text{mm}) \quad \text{Equação 2.6}$$

onde:

$W_e$  = ângulo de contato ferramenta peça (graus);

$f_z$  = avanço por dente (mm/dente);

$a_e$  = penetração de trabalho (mm);

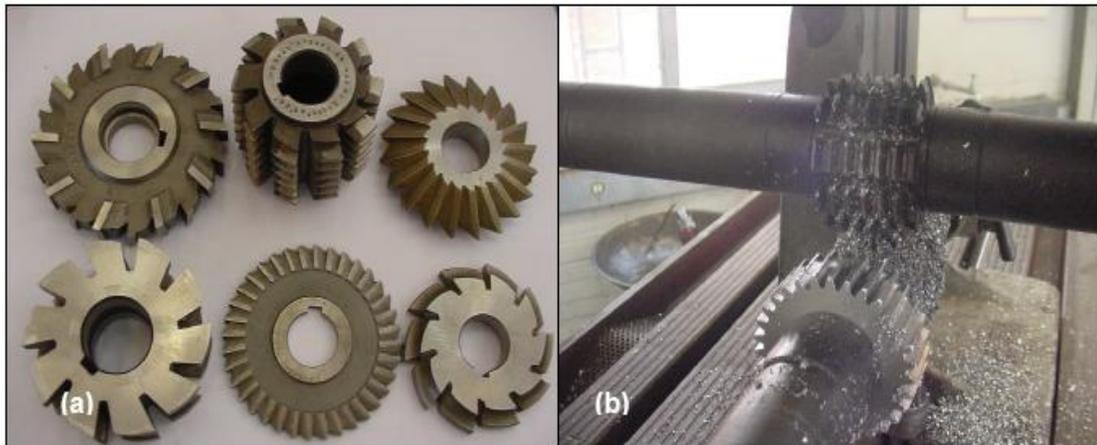
$d$  = diâmetro da fresa (mm);

$\kappa_r$  = ângulo de direção do gume principal (mm).

### 2.3.3 Tipos de fresamento

Existem três tipos de fresamento: frontal, tangencial e de topo (METALS HANDBOOK, 1989). Cada método de fresamento é determinado em função do tipo de fresa utilizada e da disposição do eixo de rotação da ferramenta em relação à superfície que esta sendo fresada.

No fresamento tangencial o corte é feito por uma ferramenta cujos dentes estão dispostos na sua periferia, conforme mostrado na figura 12, e que o eixo de rotação é paralelo à superfície fresada.

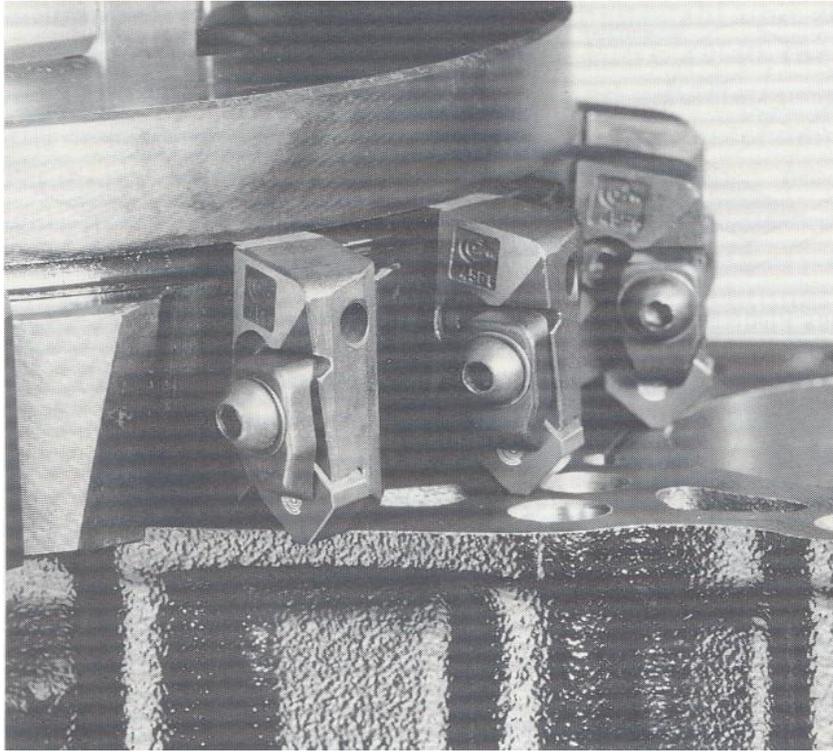


**Figura 12 - Representação de fresamento tangencial. (a) Alguns exemplos de fresas tangenciais ou discos; (b) Modelo de fresa caracol utilizada na usinagem de engrenagens de dentes retos. (SANDVIK, 2003).**

As ferramentas para o fresamento tangencial são normalmente utilizadas em máquinas fresadoras universais e montadas em um trecho intermediário do eixo árvore da máquina.

O fresamento tangencial pode ser utilizado para remoção de material de superfícies planas além de confeccionar rasgos de chaveta, rasgos profundos, superfícies com dois ou mais planos e superfícies de formas complexas.

O fresamento frontal é uma operação para usinagem de superfícies planas, onde a fresa apresenta dentes na sua superfície frontal e o eixo é perpendicular à superfície que está sendo gerada. A figura 13 mostra uma representação de uma fresa frontal.



**Figura 13 - Representação de fresamento frontal. (SANDVIK, 2003).**

Ao contrário do que normalmente ocorre no fresamento tangencial, no frontal o corte é profundo radialmente e estreito axialmente. Apesar disto, o fresamento frontal apresenta uma melhor relação de remoção de material por potência consumida por ter um maior número de dentes engajados no corte simultaneamente.

O fresamento frontal apresenta outras vantagens sobre o tangencial, tais como:

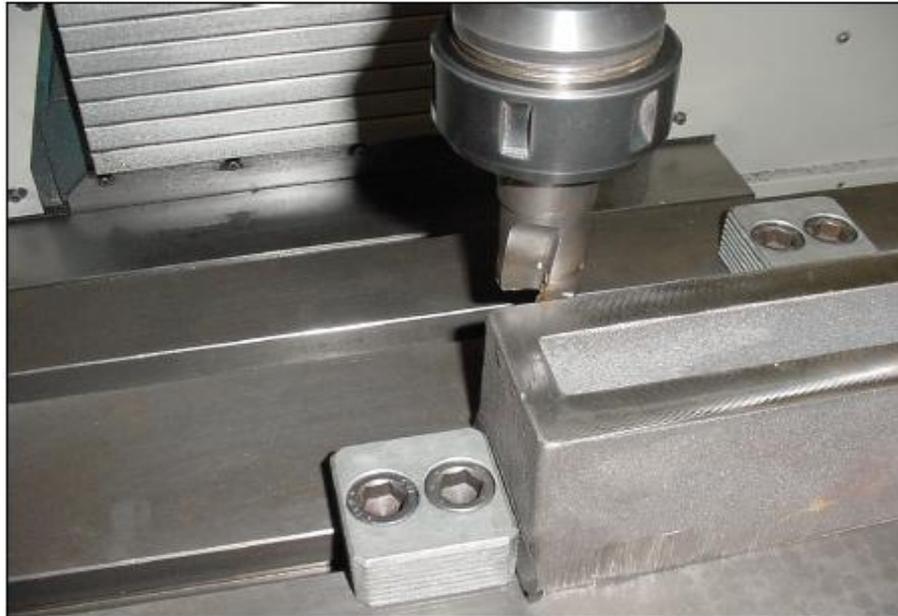
.maior rigidez da fresa por esta ter menor comprimento em balanço e por estar presa diretamente no eixo árvore da máquina, podendo assim usinar uma área maior;

.as forças de corte são uniformemente distribuídas.

Algumas desvantagens do fresamento frontal que podem ser destacadas são:

.o uso restrito a superfícies planas e também o aumento dos esforços na direção do avanço à medida que aumenta o número de dentes simultaneamente no corte.

Uma ferramenta típica para o fresamento de topo apresenta arestas de corte tanto na face frontal quanto na face lateral. É considerada como uma combinação do fresamento frontal e tangencial e é diferenciado mais pelo tipo de aplicação que pela definição. A figura 14 mostra uma fresa de topo ou mista.



**Figura 14 - Representação de fresamento de topo. (SANDVIK, 2003).**

O fresamento de topo é um processo desaconselhável para operações de corte mais severas, pois a relação comprimento-diâmetro da ferramenta é relativamente elevada, favorecendo deflexão da fresa.

As fresas de topo são ferramentas muito versáteis, sendo utilizadas na confecção de formas tais como cavidades, bordas, ranhuras, relevos, fresamento lateral, etc.

### 2.3.4 Nomenclatura e relação geométrica entre a ferramenta e a peça

A eficiência do corte no fresamento está diretamente ligada a uma boa escolha nas relações angulares entre ferramenta e peça a ser usinada. Para isso é preciso possuir conhecimento dos conceitos básicos sobre ângulos e geometria de uma fresa.

Torna-se também necessário a distinção destes ângulos quando se toma como referência apenas a ferramenta (ângulos da ferramenta) ou quando se toma como referência a ferramenta em operação (ângulos efetivos ou de trabalho).

Os principais ângulos que influenciam no corte, segundo Metals Handbook (1989) são:

Ângulos auxiliares

. Ângulo da direção de avanço ( $\varphi$ ): é o ângulo entre a direção de avanço e a direção de corte e no fresamento. Este ângulo varia durante o corte.

. Ângulo de Direção Efetiva de Corte ( $\eta$ ): é o ângulo da direção efetiva de corte e a direção de corte. A equação 2.7 expressa como é realizado o cálculo do ângulo de direção efetiva de corte.

$$\tan \eta = \left\{ \frac{\operatorname{sen} \varphi}{\left( \cos \varphi + \frac{v_c}{v_f} \right)} \right\} \quad \text{Equação 2.7}$$

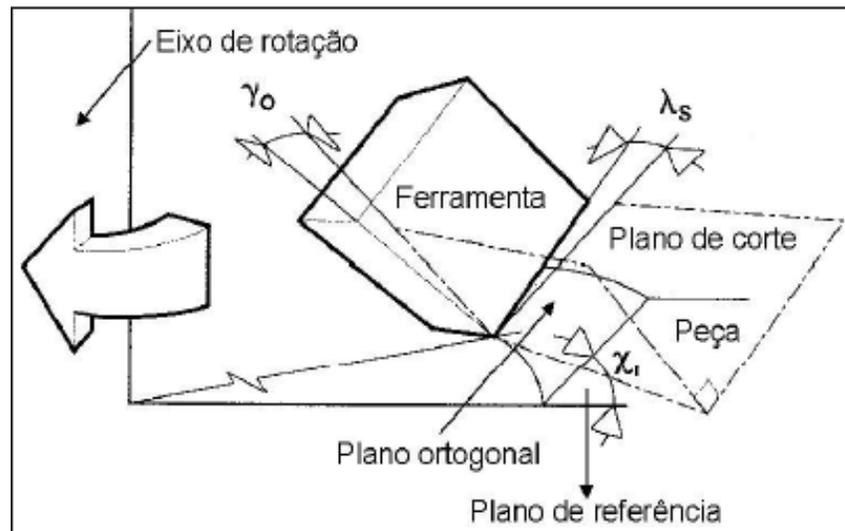
Ângulos da ferramenta

. Ângulo de saída ( $\gamma_0$ ): é o ângulo entre a superfície de saída e o plano de referência da ferramenta, medido no plano ortogonal.

. Ângulo de inclinação ( $\lambda_s$ ): é o ângulo entre a aresta de corte e o plano de referência da ferramenta, medido no plano de corte.

. Ângulo de posição ( $\kappa_r$ ): é o ângulo entre o plano de corte da ferramenta e o plano de trabalho, medido no plano de referência.

A figura 15 mostra os ângulos citados em um inserto para fresamento.

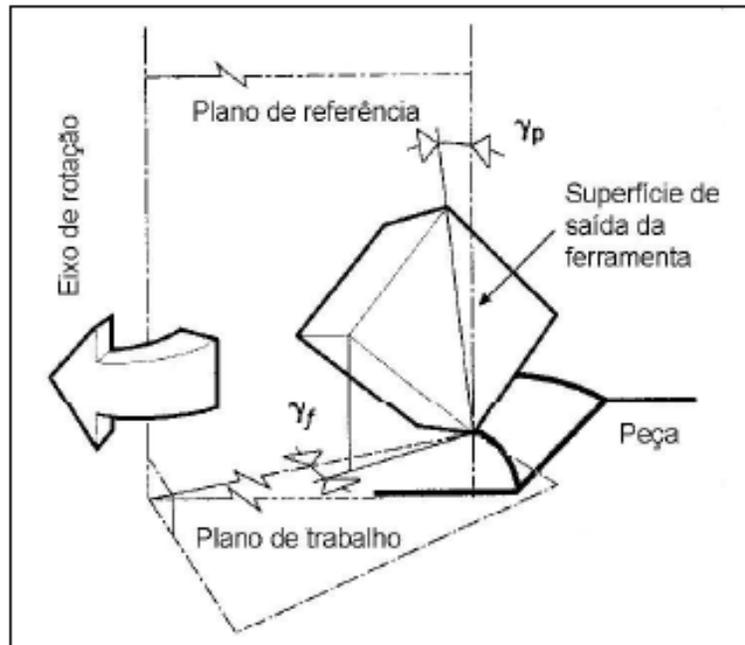


**Figura 15 - Representação do ângulo de inclinação  $\lambda_s$ , ângulo de posição  $\chi_r$  e ângulo de saída  $\gamma_o$  (SANDVIK, 2003).**

. Ângulo de saída radial ( $\gamma_f$ ): é o ângulo entre o plano de referência da ferramenta e sua superfície de saída, medido no plano de trabalho.

. Ângulo de saída axial ( $\gamma_p$ ): é o ângulo entre o plano de referência da ferramenta e sua superfície de saída, medido no plano dorsal.

A figura 16 mostra uma representação esquemática do ângulo de saída axial e do ângulo de saída radial.



**Figura 16 - Representação do ângulo de saída radial  $\gamma_f$  e do ângulo de saída axial  $\gamma_p$  (SANDVIK, 2003).**

O ângulo considerado mais importante em uma operação de fresamento é o de saída efetivo  $\gamma_0$ . Esse ângulo afeta o ângulo de cisalhamento durante o processo de formação do cavaco, portanto tem grande influência sobre a força de corte, a potência e as temperaturas geradas na zona de corte. Normalmente, quanto mais positivo este ângulo, menores as forças atuantes na ferramenta e a potência requerida para o corte. Vale lembrar que o aumento desse ângulo afeta diretamente a resistência mecânica da ferramenta. Valores positivos altos são indicados para materiais dúcteis.

Outro ângulo de grande importância é o de inclinação  $\lambda_s$ , que determina a direção de escoamento do cavaco da região de corte. No fresamento frontal, a adoção de ângulos de inclinação positivos direciona o cavaco para fora da ferramenta, enquanto que os negativos o direcionam para o centro.

O ângulo de posição  $\kappa_r$ , influencia principalmente a espessura do cavaco, a direção das forças de corte, adequação da entrada da ferramenta no corte e também a potência consumida.

Com relação à potência, à medida que o ângulo de posição diminui, a largura de corte  $b$  aumenta e a espessura de corte  $h$  diminui. Portanto, ocorrer uma maior pressão específica de corte, já que a força de corte necessária para o cisalhamento do material é então distribuída sobre uma seção transversal mais fina. Em operações de corte mais sensíveis ao aparecimento de vibrações, um maior equilíbrio das forças axiais e radiais é indicado e isso pode ser conseguido com ângulos de posição variando entre 45 e 60 graus.

Em algumas aplicações mais específicas, como usinar rebaixos com paredes em esquadro ou livre de componentes axiais de força, ângulos de posição de 90 graus são aplicados, mas esta situação é bastante limitada, pois gera altos níveis de vibração, favorecem a quebra da ponta da ferramenta além de dificultar a saída dos cavacos.

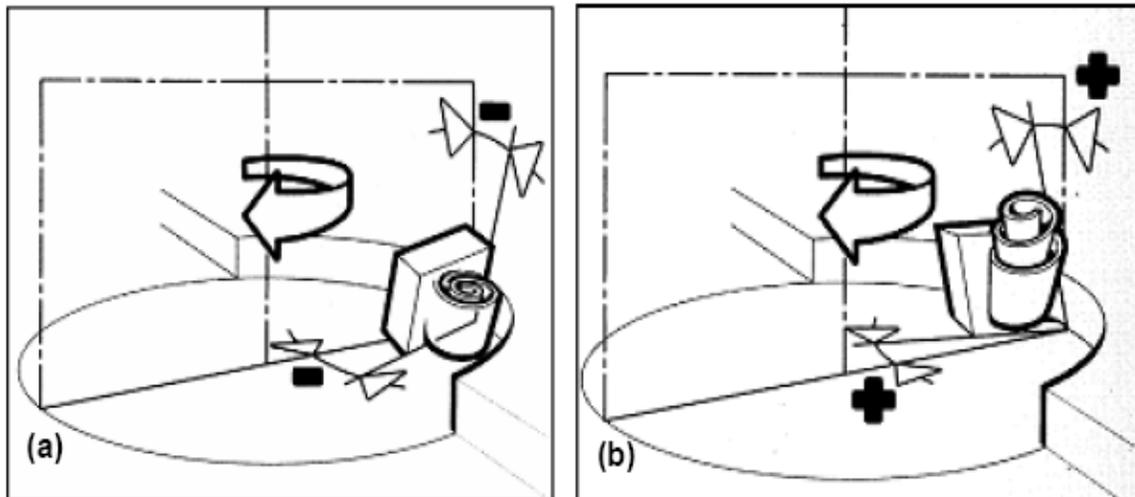
O ângulo de saída  $\gamma_f$  afeta principalmente a eficiência e a quantidade de cavaco bem como a vida da ferramenta. Ângulos de saída radiais para materiais com menor tenacidade costumam variar de zero a valores negativos enquanto para materiais dúcteis costumam ser positivos.

O ângulo de saída axial  $\gamma_p$  afeta principalmente a resistência das arestas de corte da ferramenta além de atuar também na facilitação do escoamento do cavaco e nas forças de corte.

As ferramentas, ou o processo de fresamento, podem ser classificados também de acordo com os ângulos de saída radial e axial. Nas fresas com geometria de inserto duplo-negativo, os ângulos de saída radial e axial da fresa são negativos, como mostrado na figura 17a. Estas ferramentas podem ser usadas dos dois lados, o que significa uma boa economia e arestas mais reforçadas. É uma geometria adequada para condições de corte mais severas, em que se usina materiais de elevada dureza com fortes impactos na entrada, ou cortes severamente interrompidos tal como o ferro fundido.

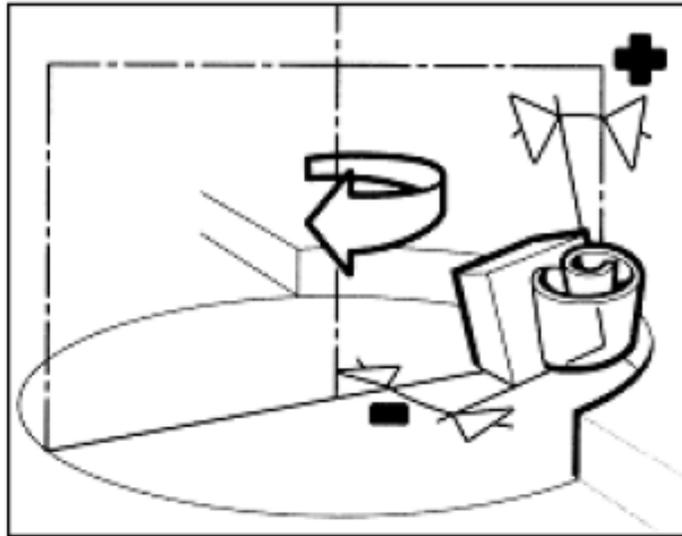
Na geometria denominada duplo-positiva, mostrada na figura 17b, os ângulos de saída radiais e axiais da fresa são positivos. Estas ferramentas são menos econômicas, pois suas pastilhas só podem ser usadas de um lado. Os esforços de corte são menores, pois os cavacos estão submetidos a menores deformações além de terem menor contato com a superfície de saída da ferramenta. São indicados para usinar materiais em que os esforços de corte são fortemente

influenciados pelo ângulo de saída (não ferrosos, aços inoxidáveis e aços de baixo carbono), quando se emprega fresadoras de baixa potência e também quando a máquina e/ou a peça tem pouca rigidez.



**Figura 17 - a) Representação de uma pastilha de fresamento em um corte com geometria duplo-negativa; b) Representação de uma pastilha de fresamento em um corte com geometria duplo-positivo (SANDVIK, 1994).**

Finalmente, nas fresas com geometria positivo-negativa, mostrada na figura 18, o ângulo de saída radial é negativo e o ângulo de saída axial é positivo. Comparativamente, este tipo de geometria consome mais potência da máquina do que as fresas duplo-positivas e menos que as duplo-negativas. É indicada para desbaste pesado, pois este tipo de geometria gera cavacos helicoidais que se levantam dos bolsões de armazenamento, além de conseguir altas taxas de remoção de material, altos avanços por dente e grandes profundidades de corte.



**Figura 18 - Representação de uma pastilha de fresamento em um corte com geometria positiva-negativa (SANDVIK, 1994).**

### 2.3.5 Fresamento com movimento concordante e discordante

No fresamento, a relação entre o sentido de rotação da ferramenta e o avanço da peça também é de grande importância. O sentido de rotação da ferramenta e o avanço da peça distinguem o fresamento concordante do fresamento discordante. No fresamento discordante o avanço e o movimento de corte têm mesma direção, mas sentidos contrários em um determinado momento, ao passo que no fresamento concordante ocorre o oposto, conforme mostrado na figura 19. Porém, de acordo com a posição da fresa em relação à peça, um processo de fresamento pode apresentar uma parte concordante e outro discordante.

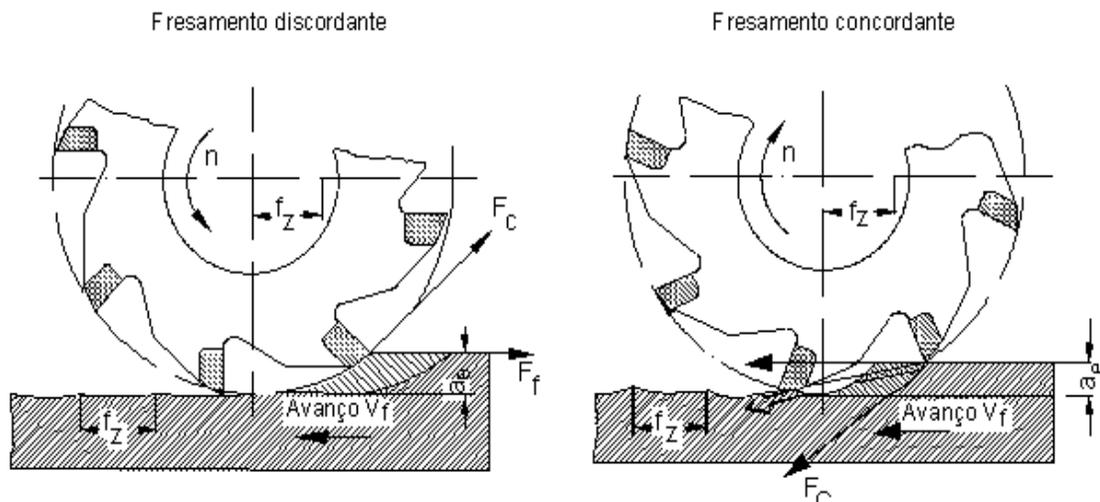


Figura 19 - Representação de fresamento discordante e concordante. (SANDVIK, 1994).

No fresamento concordante puro, a aresta deixa a peça com uma espessura de usinagem igual a zero ( $h=0$ ). No fresamento discordante puro, a aresta de corte entra na peça com a espessura igual a zero, o que pode gerar esmagamento do material da peça e aumentando, portanto, a taxa de desgaste da ferramenta. O fresamento concordante é vantajoso sobre o discordante na maioria das situações, especialmente porque:

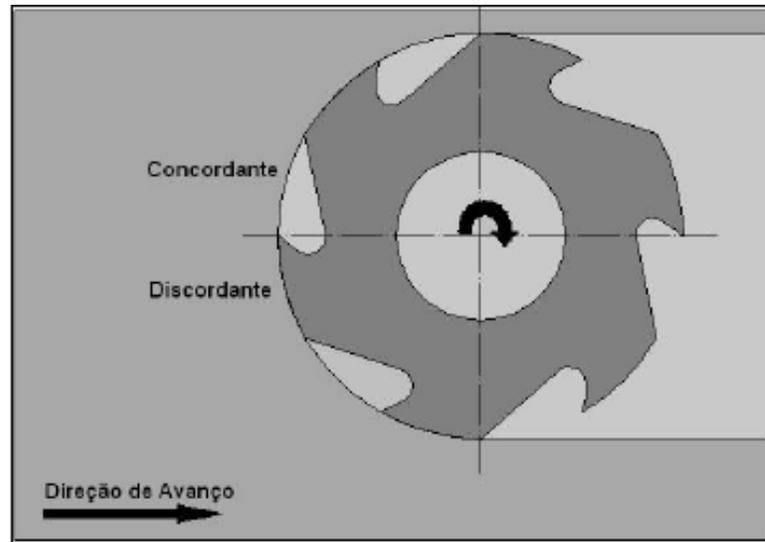
- . as fresas podem ter maiores ângulos de saída, fazendo com que a potência requerida seja menor;
- . o acabamento superficial é melhorado, pois há uma menor possibilidade dos cavacos serem arrastados, o que danificaria a superfície usinada além de acabar com a tendência de escorregamento quando do início da formação do cavaco;
- . os cavacos são jogados para a parte de trás da ferramenta.

O fresamento discordante pode ser vantajoso nas seguintes situações (METALS HANDBOOK, 1989):

- . se há folgas no mecanismo de avanço;
- . no fresamento de superfícies em que a profundidade de corte varia excessivamente;

. no fresamento de peças fundidas ou forjadas com superfícies muito rugosas, que contém carepa ou areia.

Pode haver situações no fresamento frontal em que o eixo de avanço da fresa está posicionado de maneira simétrica em relação à peça, como mostrado na figura 20. Quando isto ocorre, parte do fresamento será concordante e parte será discordante.



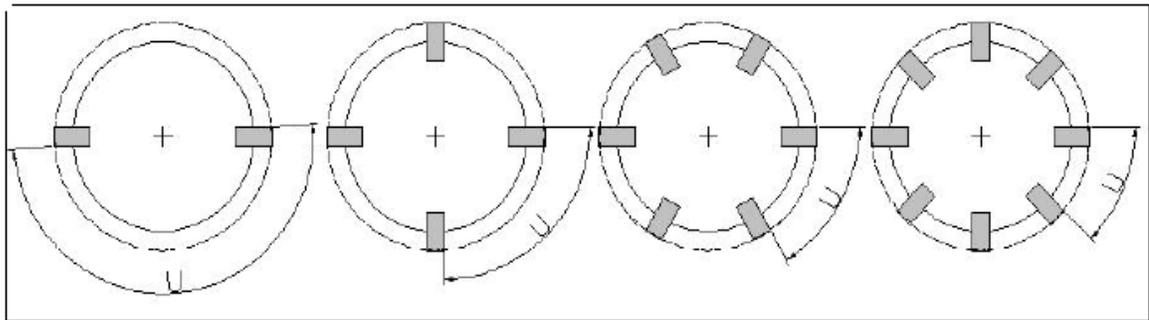
**Figura 20 - Representação de fresamento discordante e concordante simultâneo em fresamento frontal simétrico em relação à peça. (SANDVIK, 1994).**

A formação do cavaco no fresamento segue os mesmos princípios básicos dos outros processos de usinagem. No entanto, o fresamento é uma operação em que o corte é interrompido, uma determinada aresta passa a maior parte do tempo sem usinar o material. Esta característica faz com que surjam conseqüências na qualidade da superfície gerada e também na vida da ferramenta.

### 2.3.6 Efeitos do número de dentes da fresa

Normalmente, ao escolher uma fresa mais indicada para uma determinada operação, alguns aspectos devem ser levados em consideração. Entre eles, o número de dentes que esta possui, é de vital importância, como mostrado a figura 21. Um número excessivo de dentes (passo fino) pode causar problemas com o excesso de cavacos na região de corte e também elevar o consumo de energia. Já um número insuficiente de dentes (passo largo) pode causar problemas com o acabamento da superfície usinada, peças fora de dimensão requerida e também desgaste excessivo das arestas de corte.

Para se escolher uma fresa com número ideal de dentes deve-se levar em consideração as características do material a ser usinado. Para materiais frágeis, por exemplo, o mais indicado é um maior número de dentes, pois seus cavacos são menores causando menos interferência com a qualidade da superfície gerada.



**Figura 21 - Representação de fresas com vários passos e número de dentes. (SANDVIK, 1994).**

Em certas situações em que há limitação da potência e das velocidades disponíveis na máquina-ferramenta, o mais indicado é fazer um estudo prévio para adequar o número de dentes. Normalmente, no fresamento frontal, em que o comprimento de contato entre a ferramenta e a peça é longo, pode-se usar um número menor de dentes em casos onde a máquina-ferramenta dispõe de pouca potência.

Existem ferramentas cujas pastilhas, não estão distribuídas uniformemente ao longo do perímetro da fresa. Estas ferramentas, conforme mostrado na figura 22, são chamadas de ferramentas com passo diferencial e têm função de evitar vibrações devido a problemas de ressonância, mesmo em condições de corte favoráveis, modificando a frequência de entrada das arestas no corte.

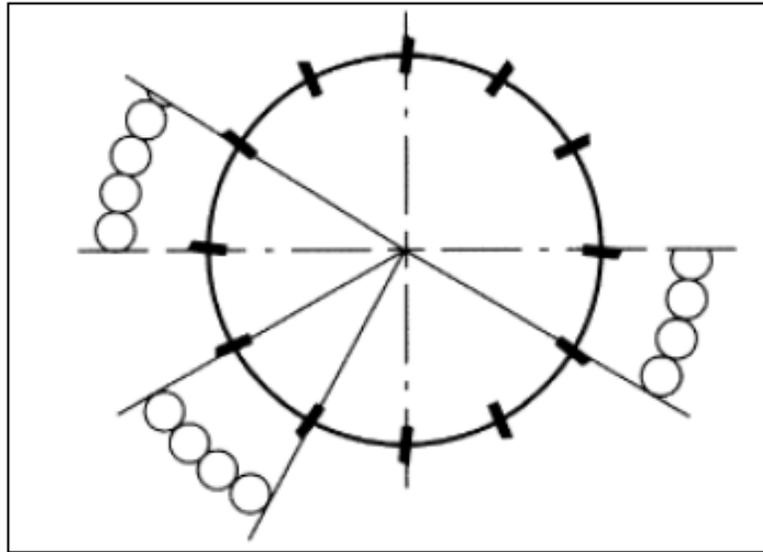


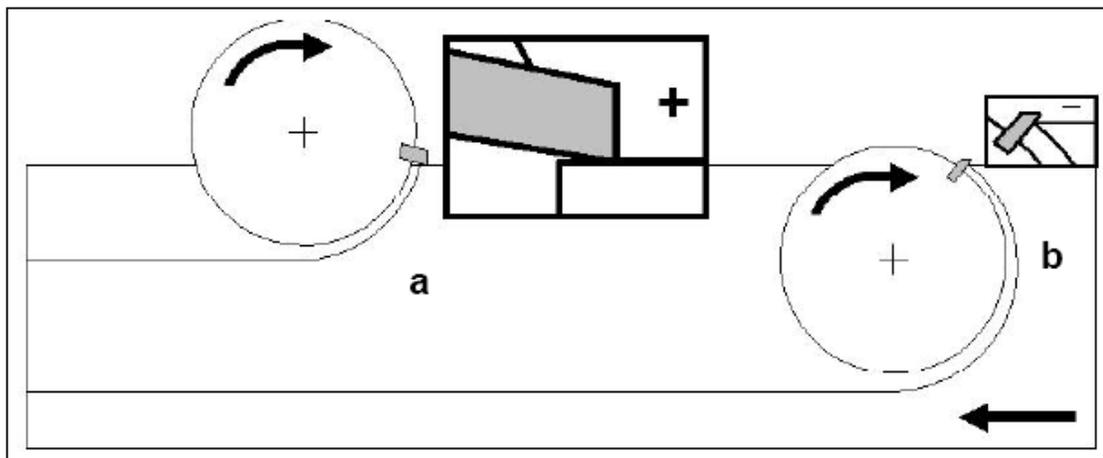
Figura 22 - Representação de uma fresa com passo diferencial. (SANDVIK, 1994).

### 2.3.7 Efeitos do posicionamento da fresa sobre a peça

O correto posicionamento relativo entre fresa e peça tem grande influência no resultado final da usinagem. Portanto, alguns parâmetros devem ser observados para garantir um contato favorável entre a aresta de corte e a peça a ser usinada.

A pastilha ao entrar no corte sofre um impacto. Para que esta entrada aconteça em condições mais favoráveis, um correto posicionamento relativo entre a ferramenta e a peça deve ser levado em consideração.

Quando o centro da fresa está posicionado dentro da peça, conforme figura 23b, o contato inicial é mais distante da aresta de corte, ou seja, numa parte mais robusta da aresta. O ângulo de entrada é negativo e o corte se inicia mais favoravelmente. Quando o centro da fresa fica posicionado fora da peça de trabalho, mostrado na figura 23a, o contato entre a aresta e a peça é desfavorável. Considerando o caso do faceamento com o centro da fresa fora da peça, a ferramenta está mais susceptível à quebra, pois o ângulo de entrada é positivo.



**Figura 23 - Influência do posicionamento relativo ferramenta-peça na entrada da ferramenta no corte. (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2006).**

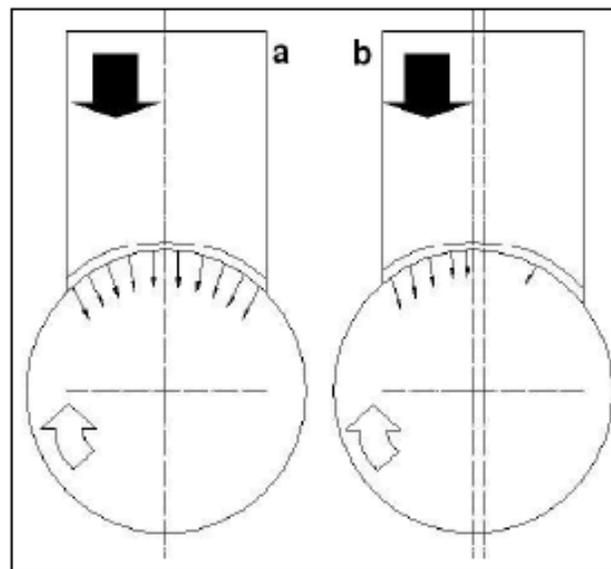
Durante a saída da ferramenta, a situação mais desfavorável é quando a pastilha sai do corte, se afastando da peça. As pastilhas de metal duro foram feitas para resistir a tensões de compressão. No caso citado essas estarão submetidas a tensões de tração durante a saída. Isto pode acarretar avarias nas arestas de corte.

Os ângulos negativo e positivo de saída do dente da peça, mostrados na figura 24a e 24c, são os mais favoráveis, enquanto que a posição de saída do dente paralela à superfície da peça, visto na figura 24b e também no detalhe da figura 25, é o mais desfavorável, pois o ângulo de saída é zero, impondo tensões na aresta de corte e portanto diminuindo a vida da ferramenta (SANDVIK, 1994).



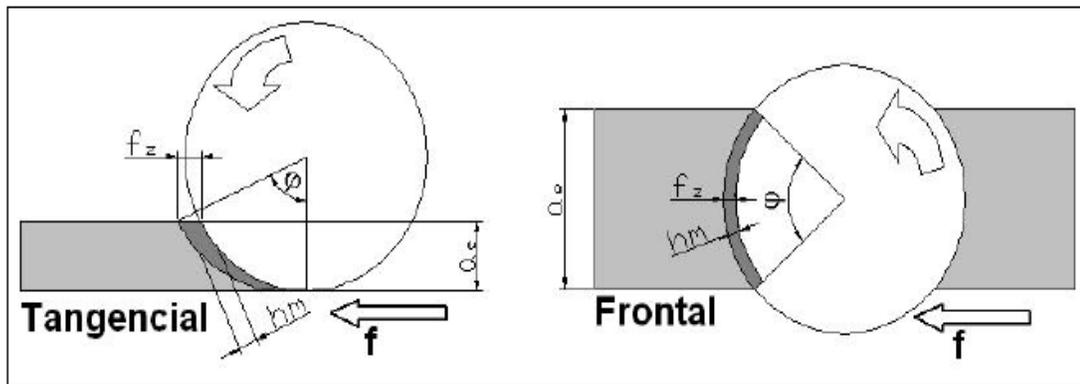
simultaneamente, podem ocorrer vibrações devido ao desbalanceamento. Para esta situação é indicado que se use o centro da fresa deslocado da linha de centro da peça, conforme figura 26b. O controle da espessura do cavaco em operações de fresamento é um fator de extrema relevância quando se quer evitar sobrecargas, controlar a potência e volume de material removido, além de melhorar a vida da pastilha.

Estimar a espessura de um cavaco em um processo de fresamento não é uma tarefa simples. No fresamento, há um grande número de variáveis envolvidas, além do fato da espessura não ser constante ao longo do comprimento do cavaco.



**Figura 26 – (a) Representação das forças resultantes com o centro da fresa alinhada com o centro da peça; (b) e o centro da fresa fora da linha de centro da peça (SANDVIK, 1994).**

No fresamento é costume adotar uma espessura média do cavaco ( $h_m$ ), figura 27, que é definida através de uma relação entre a penetração de trabalho  $a_e$  e o diâmetro da fresa que forma o arco  $\phi$  percorrido pela ferramenta na peça.

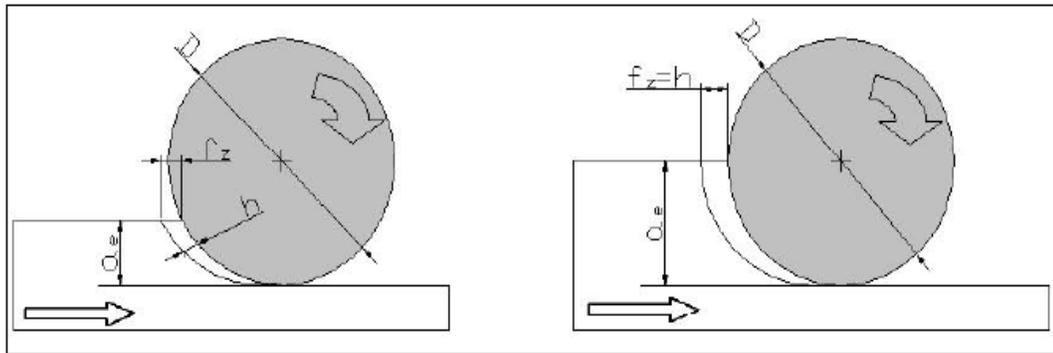


**Figura 27 - Espessura média do cavaco ( $h_m$ ) em função do posicionamento entre ferramenta e peça. (SANDVIK, 1994).**

Já a máxima espessura ( $h$ ), que é a representação da espessura teórica do cavaco, é mostrada na figura 28. Esta espessura tem seu valor definido pela distância entre dois passos consecutivos da ferramenta de corte e é importante para estimar a força máxima que irá atuar durante o corte sobre a ferramenta.

A espessura do cavaco pode ser influenciada pelo diâmetro da fresa, seu posicionamento e também pelo ângulo de entrada e saída das pastilhas na peça. No caso em que o eixo de avanço não intercepta a penetração de trabalho  $a_e$ , a espessura do cavaco assume valores menores que o valor do avanço por dente  $f_z$ . Portanto, uma penetração de trabalho menor gera uma espessura de cavaco menor.

Na situação em que o eixo de avanço da fresa trabalha dentro da região da penetração de trabalho, a espessura máxima do cavaco será igual ao avanço por dente da ferramenta. Portanto, quanto maior o  $a_e$ , mais espessos são os cavacos formados, até o limite em que o eixo de avanço coincida com a superfície lateral da peça.



**Figura 28 - Espessura máxima (h) em função do posicionamento entre ferramenta e a peça.  
(SANDVIK, 1994).**

### 2.3.8 Monitoramento da usinagem através da vibração.

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

Vibrações mecânicas resultam geralmente de movimentos ondulatórios periódicos. A natureza do sinal de vibração originado em processos de usinagem incorpora também aspectos de vibrações livres, forçadas e aleatórias.

Na usinagem, as vibrações são consequência das variações cíclicas nas componentes dinâmicas das forças de corte (DIMLA, 2000). Normalmente, estas vibrações começam como pequenas trepidações, responsáveis pelo aspecto ondulado na superfície usinada e também por irregularidades na espessura do cavaco e, posteriormente, progride para a vibração propriamente dita.

Dimla (1998), em um trabalho de monitoramento do desgaste de uma ferramenta no torneamento, verificou que, no domínio do tempo, a amplitude dos sinais de vibração não era um bom indicador da evolução do desgaste, mas distinguiam claramente fraturas e lascamento. No domínio das frequências, as vibrações captadas na direção do corte (eixo z) se mostraram mais sensíveis às condições da ferramenta que os outros eixos, enquanto que no eixo x foi a que apresentou a pior correlação.

El-Wardany et al. (1996) investigaram o uso das características do sinal de vibração para monitorar o desgaste e a quebra de uma ferramenta de corte no processo de furação. Dentre os parâmetros que o autor empregou no domínio do tempo, a curtose dos valores aumentou rapidamente com a quebra da ferramenta. No domínio das frequências, uma análise revelou formação de picos que indicam uma fratura na aresta da broca. O autor sugere que uma combinação das duas técnicas é possível para monitorar de modo consistente o processo de furação.

Dan e Mathew (1990) empregam um método de modelagem discreto chamado “Dependent System” para correlacionar os sinais de vibração com o desgaste de uma ferramenta. A implementação deste método envolveu a seleção de uma banda do sinal que fosse representativo do desgaste. Os resultados obtidos mostraram que uma variação na parcela da energia de vibração de uma banda de frequência foi consistentemente observada, independentemente da influência da variação dos parâmetros de corte no sinal. Analisando o espectro de frequências notou-se uma relação linear entre a velocidade de corte e o desgaste, revelando que o sinal de vibração foi sensível ao desgaste da ferramenta.

Pesquisas sobre o comportamento do sinal de vibração com relação ao estado de desgaste de uma ferramenta no corte interrompido foram realizadas por Rotberg et al. (1987). Os autores procuraram enfatizar a entrada e a saída da ferramenta no fresamento e mediram o desgaste de flanco e de cratera das pastilhas. Também separaram o desgaste da ferramenta em três fases: afiada, meia vida e desgastada; e estabeleceram uma descrição destas fases via espectro de frequências do sinal de vibração. Esta descrição mostrou ser um bom indicador do estado da ferramenta durante sua vida.

Jiang et al. (1987) investigaram os efeitos das vibrações na direção de corte e de avanço no desgaste da ferramenta. Os autores empregaram condições fixas de corte e de avanço, usaram

uma pastilha ISO P10 com ângulo de saída neutro e passes de 10 minutos, na qual a ferramenta sofria um desgaste progressivo até acontecer a falha catastrófica. Foi feita a análise do sinal de vibrações no domínio da frequência. Neste domínio foram observadas três bandas de frequências sensíveis à evolução do desgaste: acima de 110 Hz, entre 117 e 510 Hz e entre 510 e 1000 Hz. Eles concluíram que a vibração foi sensível aos diferentes estados de desgaste ao longo da vida de uma ferramenta.

O comportamento estático do desgaste é governado pelas forças de corte e pelo torque no eixo-árvore e o comportamento dinâmico envolve vibração e certos aspectos dinâmicos das forças de corte (DIMLA, 1998). Com isto, o autor afirma que a combinação entre sinais de vibração e das forças de corte é uma combinação consistente no desenvolvimento de sistemas de monitoramento do estado da ferramenta.

Dos Santos (2001) realizou um trabalho em que usou alguns parâmetros de entrada (velocidade de corte, profundidade de corte, avanço, percurso de avanço, potência e a vibração adquirida em dois pontos da máquina-ferramenta) para realizar o treinamento de uma rede neural *feedforward* com um algoritmo de aprendizado *backpropagation*. O objetivo da pesquisa foi monitorar o desgaste de flanco máximo e a rugosidade média. Em uma análise gráfica qualitativa, a vibração aparece com uma tendência de comportamento mais definida em relação ao desgaste da ferramenta do que com a rugosidade média. Porém, ao analisar a sensibilidade dos parâmetros de entrada da rede, verificou-se que a vibração contribui para o aumento dos erros da rede quando esta estima o valor do desgaste. O autor explica que o aumento dos erros verificados ao se empregar a vibração na estimativa do desgaste se deve a elevada correlação desse parâmetro com as demais variáveis do processo, o que torna mais difícil o processo de treinamento da rede neural devido à redundância de informações.

No monitoramento da usinagem através do sinal de vibração, é também muito importante conhecer o comportamento dinâmico da máquina-ferramenta. Souza (1993) realizou um mapeamento dos locais mais apropriados para o acoplamento dos acelerômetros em uma fresadora CNC. Para isto, ele determinou 80 possíveis locais de acoplamento do sensor na fresadora. A partir daí, foi realizado uma análise de sensibilidade utilizando-se Funções de Resposta em Frequência (FRF). Após esta análise, o autor verificou que muitos dos locais de acoplamento apresentavam características dinâmicas muito semelhantes, permitindo reduzir os

possíveis pontos a vinte e nove, a maioria próxima do mancal inferior do eixo porta fresa e na mesa de trabalho e um na própria peça a ser usinada.

## **2.4 Vibração**

Um corpo é dito em vibração quando ele descreve um movimento oscilatório em torno de um ponto de referência. O número de vezes de um ciclo completo de um movimento durante um período de um segundo é chamado de frequência e é medido em Hertz (Hz).(RAO, 2009).

### 2.4.1 Conceitos básicos de vibração

#### Vibração

É qualquer movimento que se repete, regular ou irregularmente, depois de um intervalo de tempo. Em engenharia estes movimentos ocorrem em elementos de máquinas e nas estruturas, quando estes estão submetidos a ações dinâmicas. (RAO, 2009)

#### Vibração Livre e Forçada

Vibração livre é aquela produzida por uma perturbação inicial que não persiste durante o movimento vibratório.

Vibração forçada é provocada por um efeito externo que persiste durante o tempo em que o movimento vibratório existir.

#### Vibração Amortecida e Não Amortecida

Vibração amortecida é aquela em que a energia vibratória se dissipa com o transcorrer do tempo de forma que os níveis vibratórios diminuem progressivamente.

Vibração não amortecida é aquela em que a energia vibratória não se dissipa de forma que o movimento vibratório permanece imutável com o passar do tempo. Os sistemas em que ocorre

a vibração não amortecida são sistemas ideais, pois sempre alguma energia será dissipada em um sistema físico. A figura 29 ilustra uma vibração não amortecida e uma amortecida.

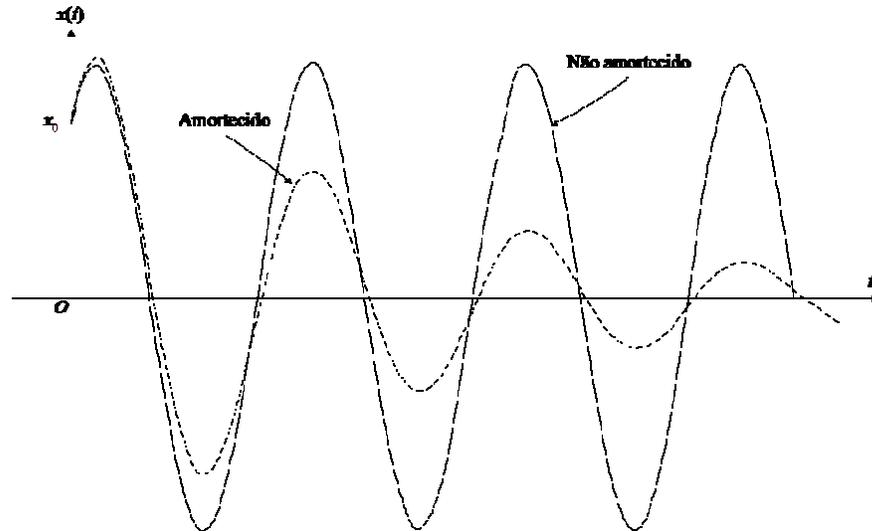


Figura 29 - Vibrações livres sem e com amortecimento. (RAO, 2009).

#### Vibração Linear e Não Linear

Vibração linear é aquela que ocorre em um sistema cujos componentes atuam linearmente.

Vibração não linear é aquela em que um ou mais componentes do sistema não se comporta linearmente, ou seja, a força produzida não apresenta uma relação linear com a variável cinemática a que se associa.

#### Vibração Determinística e Aleatória

Vibração determinística é aquela em que se podem prever todas as características do movimento vibratório em qualquer instante de tempo.

Vibração aleatória ou não determinística é aquela em que não é possível prever o que irá acontecer no movimento vibratório. (RAO, 2009).

### 2.4.2 Movimento harmônico

O movimento harmônico é a forma mais simples com que uma vibração se apresenta. A figura 30 ilustra a geração deste movimento, representado matematicamente pela equação 2.8:

$$x = A \sin \omega t \quad \text{Equação 2.8}$$

ou, se a origem do movimento não coincidir com  $\sin \omega t = 0$

$$x = A \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{Equação 2.9}$$

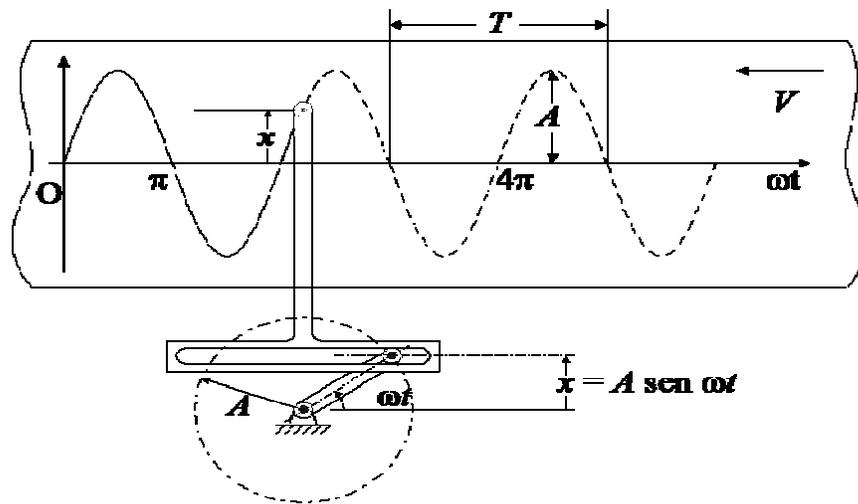


Figura 30 - Mecanismo de Scotch Yoke gerando um movimento harmônico. (RAO, 2009).

A forma do movimento harmônico não muda se ao invés de seno se utilizar cosseno ou uma soma de seno e cosseno com o mesmo argumento. Estas formas apenas provocam um deslocamento da função no tempo, refletida no valor de  $\varphi$ .

As principais características do movimento harmônico são, conforme mostrado na figura 31:

- Amplitude (A) é o máximo valor atingido por x. A unidade utilizada é a mesma da variável x;
- Período (T) é o tempo transcorrido até que o movimento se repita. O período é expresso por uma unidade de tempo, normalmente o segundo. (RAO, 2009).

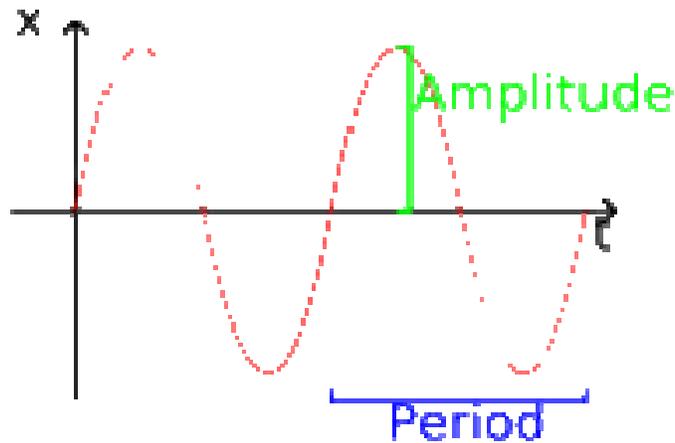


Figura 31 - Esquema demonstrativo da amplitude e o período. (RAO, 2009).

Frequência ( $f$ ): é o número de repetições que ocorrem em uma determinada unidade de tempo. É definida como o inverso do período, normalmente medida em ciclos por segundo (Hz).

A velocidade e a aceleração com que se movimenta verticalmente a haste do mecanismo de Scotch Yoke são obtidas derivando-se a expressão  $x = A \sin \omega t$ , chegando-se a:

$$v = \dot{x} = \omega A \cos \omega t \quad \text{Equação 2.10}$$

$$a = \ddot{x} = -\omega^2 A \sin \omega t \quad \text{Equação 2.11}$$

A figura 32 mostra uma representação das três variáveis que descrevem o movimento vertical da haste do mecanismo da figura 29.

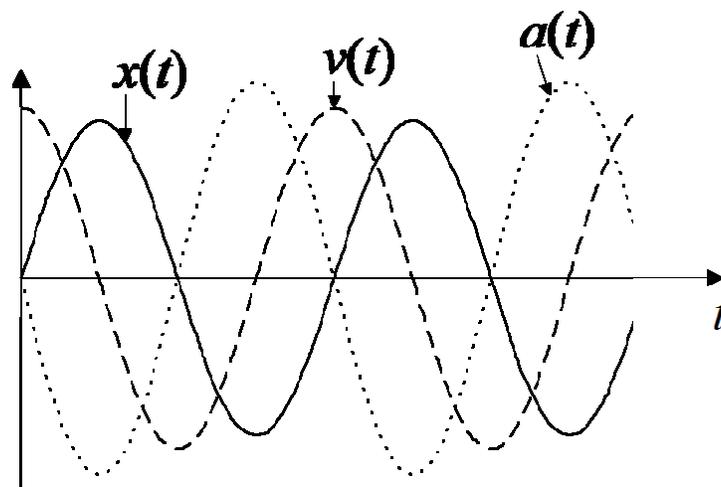


Figura 32 - Esquema demonstrativo do deslocamento, velocidade e aceleração. (RAO, 2009).

## Decibel

A unidade técnica decibel é utilizada para expressar valores relativos da amplitude do deslocamento, da velocidade e da aceleração. É definida como  $dB = 20 \log_{10} (z/z_0)$ , onde  $z$  é a quantidade em consideração e  $z_0$  um valor de referência para a mesma quantidade. Alguns valores de referência em uso são  $v_0 = 10^{-8}$  m/s para a velocidade e  $a_0 = 9,81 \times 10^{-6}$  m/s<sup>2</sup> para a aceleração e  $p_0 = 2 \times 10^{-5}$  N/m<sup>2</sup> para pressão acústica,  $I_0 = 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> para intensidade acústica e  $W_0 = 10^{-12}$  W para potência acústica. Estes últimos valores correspondem aos limiares de percepção do ouvido humano. (RAO, 2009).

O significado do decibel é exemplificado observando alguns valores:

20 dB ==> a quantidade medida é igual a 10 vezes o valor de referência

40 dB ==> a quantidade medida é igual a 100 vezes o valor de referência

60 dB ==> a quantidade medida é igual a 1000 vezes o valor de referência

## Oitava

É a medida relativa geralmente utilizada para a frequência: se duas frequências possuem a relação 2:1 se diz que estão separadas por uma oitava.

Valor RMS (root mean square = valor médio quadrático): é uma medida de vibração muito utilizada. É definido por:

$$X^2_{rms} = \frac{1}{T} \int_0^1 x^2(t) dt \quad \text{Equação 2.12}$$

Para funções harmônicas:

$$X^2_{rms} = X \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707 X \quad \text{Equação 2.13}$$

O valor RMS é utilizado porque os instrumentos que medem vibrações convertem o movimento vibratório  $x(t)$  em um sinal elétrico  $V(t) = cx(t)$  medindo a sua potência que é dada por:

$$\frac{1}{T} \int_0^1 V^2(t) dt = \frac{C^2}{T} \int_0^1 X^2(t) dt = c^2 X^2_{rms} \quad \text{Equação 2.14}$$

### 2.4.3 Quantificando o nível de vibração

A amplitude da vibração, que caracteriza e descreve a severidade da vibração, pode ser classificada de várias formas. A figura 33 mostra a relação entre o nível pico-a-pico, nível de pico, nível médio e nível RMS de um sinal senoidal.

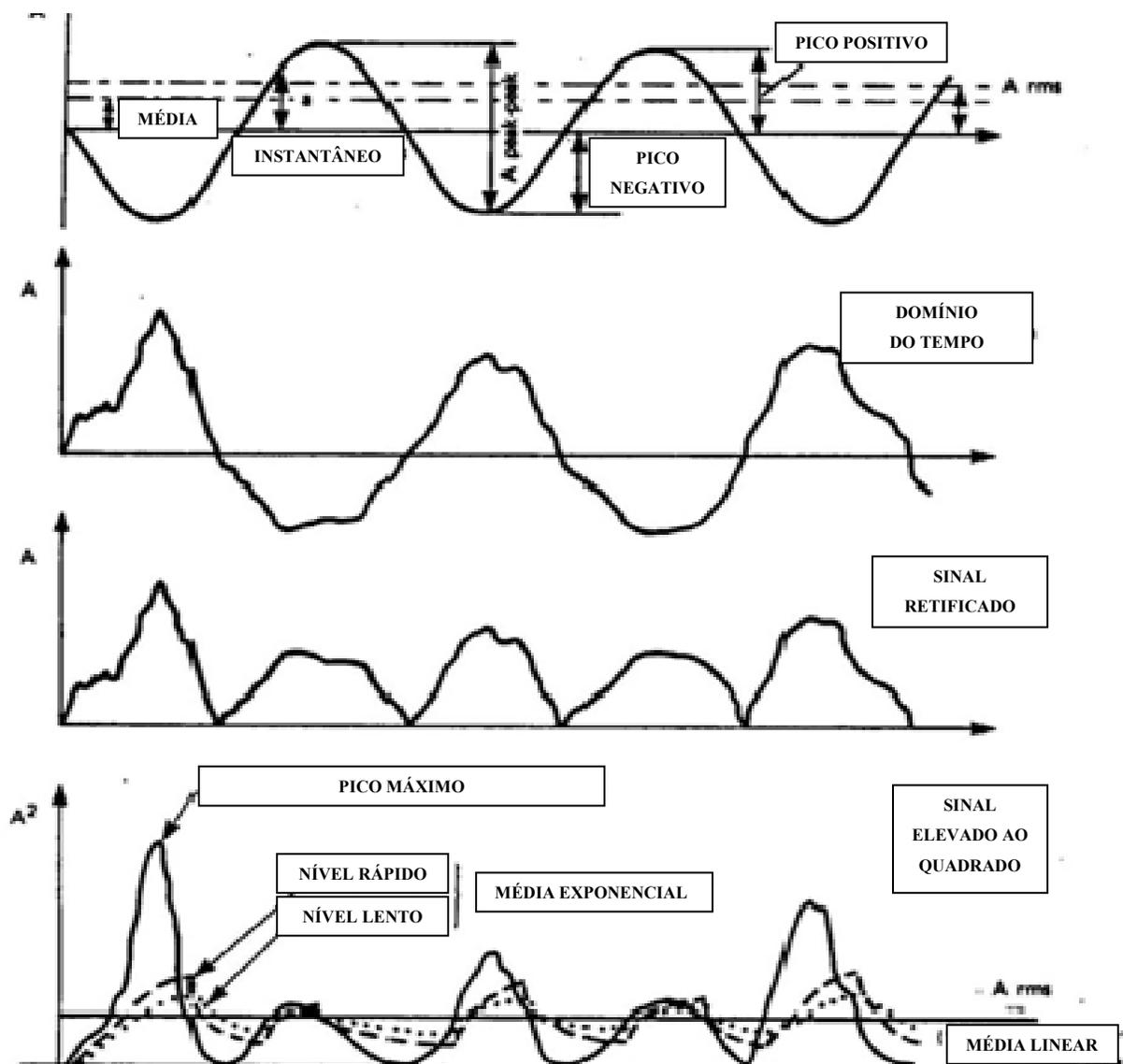


Figura 33 - Representação da intensidade da vibração. (RAO, 2009).

O valor pico-a-pico indica a máxima amplitude da onda e é usado, por exemplo, onde o deslocamento vibratório da máquina é parte crítica na tensão máxima de elementos de máquina.

O valor de pico é particularmente usado na indicação de níveis de impacto de curta duração.

O valor médio, por outro lado, é usado quando se quer se levar em conta um valor da quantidade física da amplitude em um determinado tempo.

O valor RMS é a mais importante medida da amplitude porque ele mostra a média da energia contida no movimento vibratório. Portanto, mostra o potencial destrutivo da vibração. (RAO, 2009).

Os parâmetros de vibração devem ser medidos em unidades métricas de acordo com a norma ISO, conforme a tabela 5.

**Tabela 5 - Unidades do SI utilizadas em vibração.**

Unidades de vibração (ISO 1000)	
Deslocamento	m, mm, $\mu\text{m}$
Velocidade	m/s, mm/s (ou $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
Aceleração	$\text{m}/\text{s}^2$ (ou $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) $\rightarrow 1\text{g} = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$

A constante gravitacional  $g$  também pode ser usada nos níveis de aceleração, tomado como  $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$ .

#### 2.4.4 Equipamento de medição da vibração

O transdutor universalmente usado na captação de uma vibração é o acelerômetro piezoelétrico, que se caracteriza por ter uma banda dinâmica maior, com boa linearidade. Acrescente-se que os acelerômetros piezoelétricos são altos geradores de sinal, não necessitando de fonte de potência. Além disso, não possuem partes móveis e geram um sinal proporcional à aceleração, que pode ser integrado, obtendo-se a velocidade e o deslocamento do sinal. (FERNANDES, 2000).

A essência de um acelerômetro piezoelétrico é o material piezoelétrico, usualmente uma cerâmica ferro-elétrica artificialmente polarizada. Quando ela é mecanicamente tensionada, proporcionalmente à força aplicada, gera uma carga elétrica que polariza suas faces, conforme mostrado na figura 34.

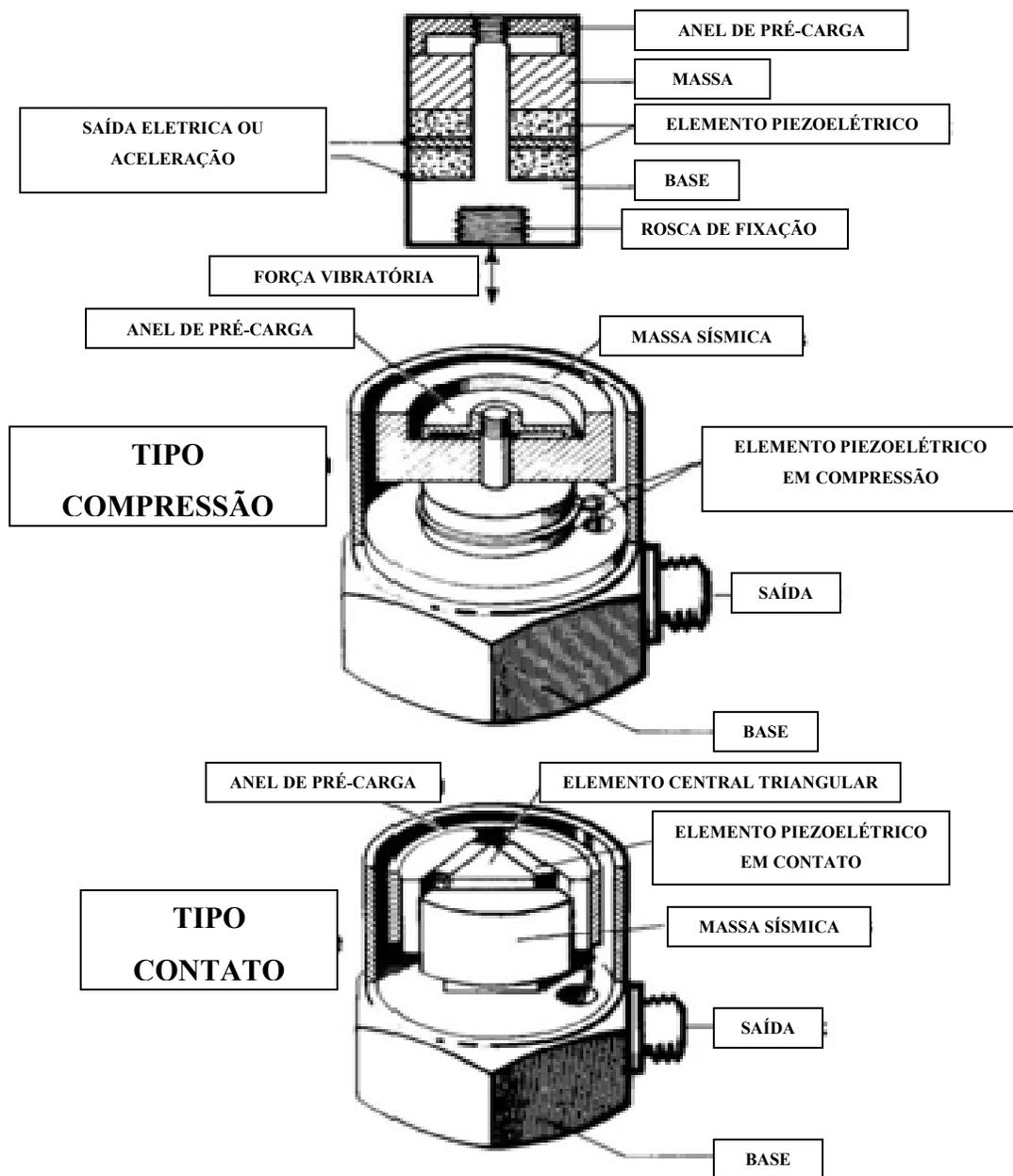


Figura 34 - Componentes de um acelerômetro piezoelétrico. (FERNANDES, 2000).

Os acelerômetros possuem uma faixa dinâmica útil, abaixo da sua frequência de ressonância, conforme mostrado na figura 35.

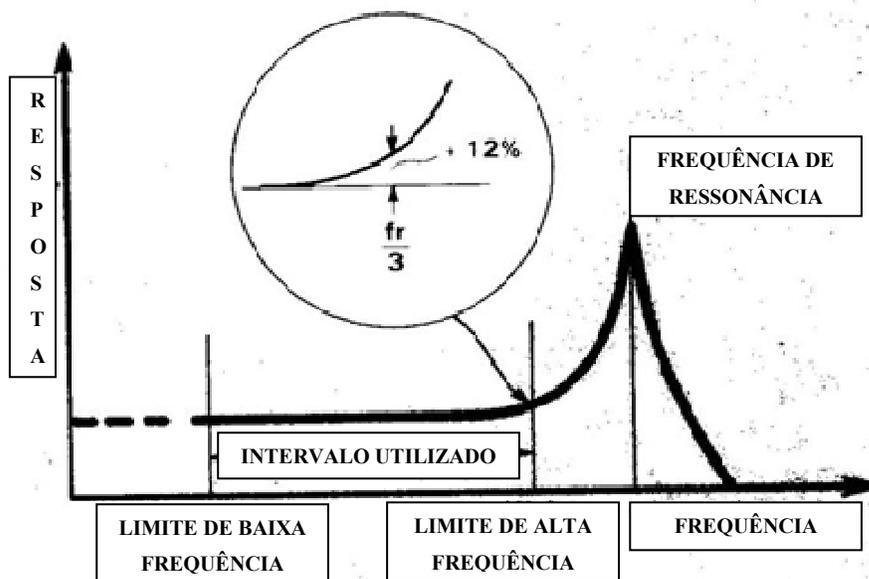


Figura 35 - Esquema demonstrativo da faixa útil de um acelerômetro piezoelétrico. (FERNANDES, 2000).

Nas medições de vibrações, há necessidade de se escolher o acelerômetro correto para cada frequência a ser medida. Na medição da vibração é necessário usar-se um medidor de vibração conectado ao acelerômetro. Esse medidor contém um pré-amplificador, que indica o nível RMS da aceleração ou velocidade ou deslocamento. Também pode ser usado um medidor portátil de vibração. (FERNANDES, 2000).

Taxa de amostragem ou taxa de aquisição.

Durante o processo de conversão analógico-digital, é importante que o sinal digital seja o mais próximo possível do sinal analógico coletado. Para isso é necessário que a taxa de amostragem seja a mais elevada possível, porém, se essa taxa for muito elevada, a conversão poderia demorar várias horas, por outro lado, se a taxa for muito baixa, o resultado pode ser um espectro quadrado, sem resolução. Por essa razão é um ponto fundamental escolher uma taxa de amostragem adequada, que permita um processamento de sinal rápido, e ao mesmo tempo gerar um espectro com resolução tal que permita ao analista encontrar os picos de vibração existentes

sem máscaras. (FERNANDES, 2000).

#### Frequência de corte.

Vibrações em uma máquina existem em todas as frequências. Desde aquelas tão baixas que o ouvido humano não pode ouvir (abaixo de 20 Hz), até aquelas em que a análise de vibrações torna-se ineficiente, onde as técnicas empregadas são as de emissão acústica (acima de 10 kHz). Para analisar problemas específicos (que acontecem em uma determinada faixa de frequência) estabelecemos os filtros, ou seja, para encontrar um evento que acontece a 100 Hz e analisá-lo até sua 7ª harmônica, dever-se-ia filtrar o sinal em 1000 Hz. (FERNANDES, 2000).

#### Amplificação

Em operação, a caixa do acelerômetro acompanha a vibração do objeto vibrante e a massa, no seu interior, tende a manter-se estacionária no espaço. Com a massa estacionária e a caixa movendo-se com a vibração, o cristal piezoelétrico é submetido alternadamente a tração e compressão gerando assim uma carga alternadamente positiva e negativa. A carga gerada pelo cristal é reprodução fiel do movimento da superfície na direção do eixo sensível do acelerômetro. A carga é proporcional à força e, como  $F=m*a$ , é proporcional à aceleração, daí o nome acelerômetro.

Normalmente são encontrados 2 tipos de acelerômetros:

- acelerômetros com circuitos eletrônicos integrados e
- acelerômetros de carga.

Os acelerômetros com circuitos eletrônicos integrados possuem circuitos internos (*ICP Integrated Circuit Piezoelectric*) que convertem o sinal de muito pequena amplitude e elevada impedância, proveniente do cristal, numa tensão de pequena impedância, tipicamente de 10 ou 100 mV/g. Estes acelerômetros, internamente amplificados, aceitam a alimentação. Em suma, a necessidade de amplificação deve-se ao fato de que o acelerômetro tem uma alta impedância na saída, e o amplificador (interno) faz a conversão para baixa impedância. Essa amplificação é feita através de um circuito eletrônico montado dentro da própria carcaça do acelerômetro

#### 2.4.5 Efeitos da vibração

Os efeitos da vibração são complexos e difíceis de medir, sendo obtidos por experimentos com animais e aplicados ao homem como extensão.

##### 2.4.5.1 Vibração transmitida ao corpo humano

Esses elementos podem sofrer variações em função da alimentação, massa muscular, sexo, estatura, bem como doenças. Os efeitos psicológicos como a percepção, desconforto e dor, têm sido estudados em mais detalhes. Muitos desses estudos têm sido realizados com motoristas, pilotos, onde sua habilidade é testada em trabalhos complexos, em condições adversas.

A maioria dos testes foi feita com as pessoas sentadas ou em pé. Estes resultados foram usados na criação da norma ISO 2631, que estabelece critérios para vibração sobre o corpo humano na faixa de frequência de 1 a 80 Hz. Na faixa de frequência abaixo de 1 Hz ocorrem outros efeitos que são completamente diferentes dos produzidos em frequências maiores. Esses efeitos não podem ser simplesmente relatados através dos três parâmetros (intensidade, duração e frequência) como é relatado na faixa de 1 a 80 Hz. As reações abaixo de 1 Hz são extremamente variáveis, dependendo de um grande número de fatores externos não relacionados com a vibração (idade, sexo, visão, atividade, odor).(FERNANDES, 2000).

Acima de 80 Hz as sensações e efeitos são muito dependentes do local do ponto de aplicação, da direção e da posição e área em que a vibração é transmitida, e do amortecimento do ponto. Esses fatores externos influenciam grandemente a resposta da pele e dos tecidos superficiais afetados por frequências acima de 80 Hz.

#### 2.4.5.2 Vibração transmitida à mão

A vibração transmitida ao sistema mão-braço é o segundo grande problema na área de transmissão de vibração sobre o corpo humano, diferentemente da vibração sobre o corpo todo, pelo tipo de problemas que apresenta. Ao passo que a vibração transmitida ao corpo de pé ou sentado aumentam problemas de natureza geral, por exemplo, desconforto, náusea, redução da eficiência no trabalho etc., a vibração aplicada na mão pode, em adição, produzir danos físicos localizados para níveis de exposição suficientemente altos. Os níveis de vibração encontrados em muitas ferramentas manuais comuns são suficientemente altos para causar danos quando operados por longos períodos. Para baixos níveis de vibração haverá desconforto e redução da eficiência do trabalho. Para altos níveis e longos períodos de exposição, ocorrem doenças que afetam os vasos sanguíneos, juntas e circulação. (FERNANDES, 2000).

Exposições severas levam a uma desordem progressiva da circulação, em que parte do corpo – usualmente os dedos da mão, quando a mão está presa em uma ferramenta – sofre um altíssimo nível de vibração. Em casos extremos pode haver danos permanentes ou gangrena. Essas doenças e suas causas são constantemente estudadas por pesquisadores médicos e engenheiros.

A norma ISO 5349 avalia e mede o risco da exposição de vibração sobre a mão, cobrindo uma faixa de frequência de 8 Hz a 1 kHz. Através de curvas de exposição para bandas de 1/3 de oitava, pode-se encontrar os limites de níveis de vibração na mão quando esta está presa a uma ferramenta. Muito dos dados usados advém de curvas obtidas em experimentos onde se usavam uma excitação vibratória utilizando sinais senoidais ou de banda estreita de frequência. Estes dados podem ser provisoriamente aplicados a outros tipos de experimentos que utilizem uma excitação vibratória não senoidal ou em situações em que o tipo de sinal não pode ser determinado com exatidão.

A figura 36 mostra as frequências em que ocorrem perturbações fisiológicas no organismo.

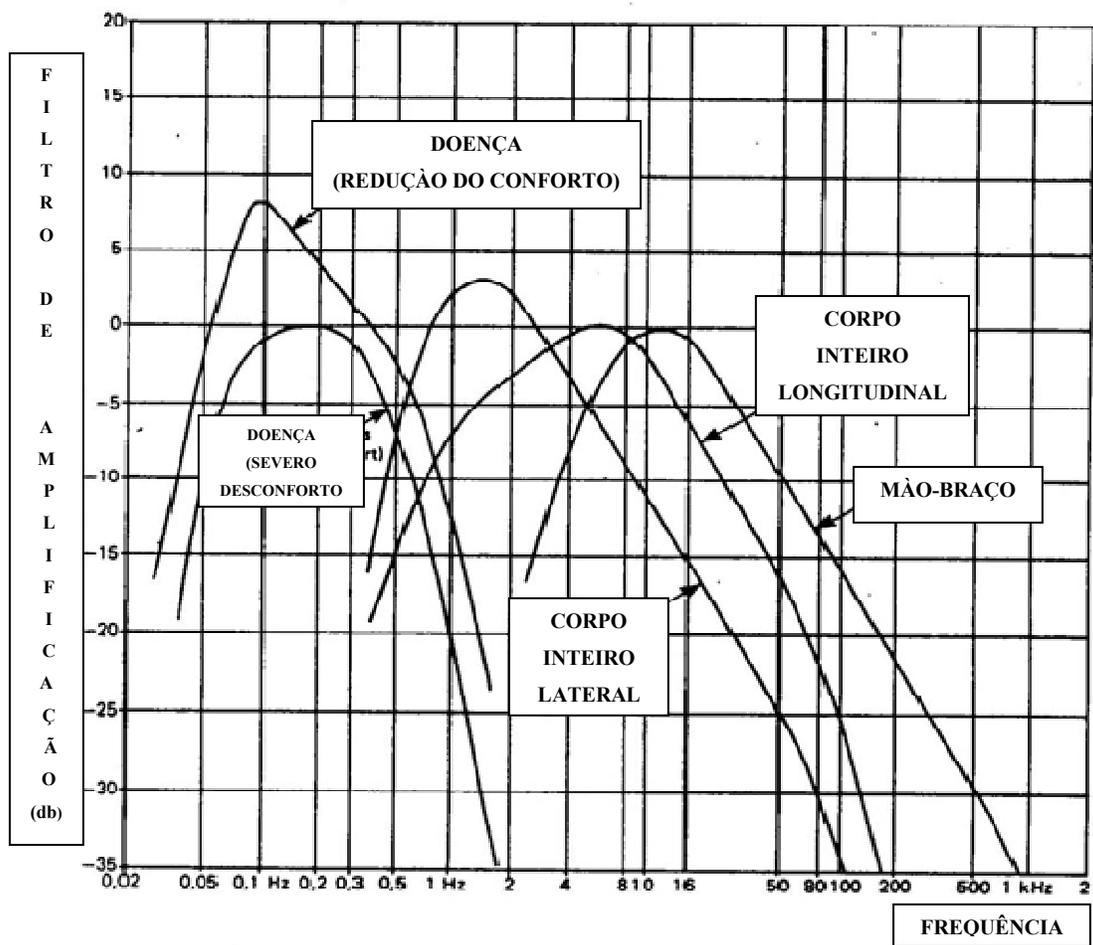


Figura 36 - Principais incômodos da vibração ao organismo. (FERNANDES, 2000).

## **3. Materiais e equipamentos**

### **3.1 Materiais**

Os testes foram conduzidos em sua totalidade na área de manufatura da MWM International, em Canoas/RS, mais especificamente no setor de usinagem de blocos de motor diesel. O modelo de bloco alvo dos testes foi o NGD 3.0E.

#### **3.1.1 Bloco do Motor**

Nas figuras 37 e 38 é mostrado o bloco de motor em perspectiva, nelas pode-se visualizar a lateral que foi foco dos testes.

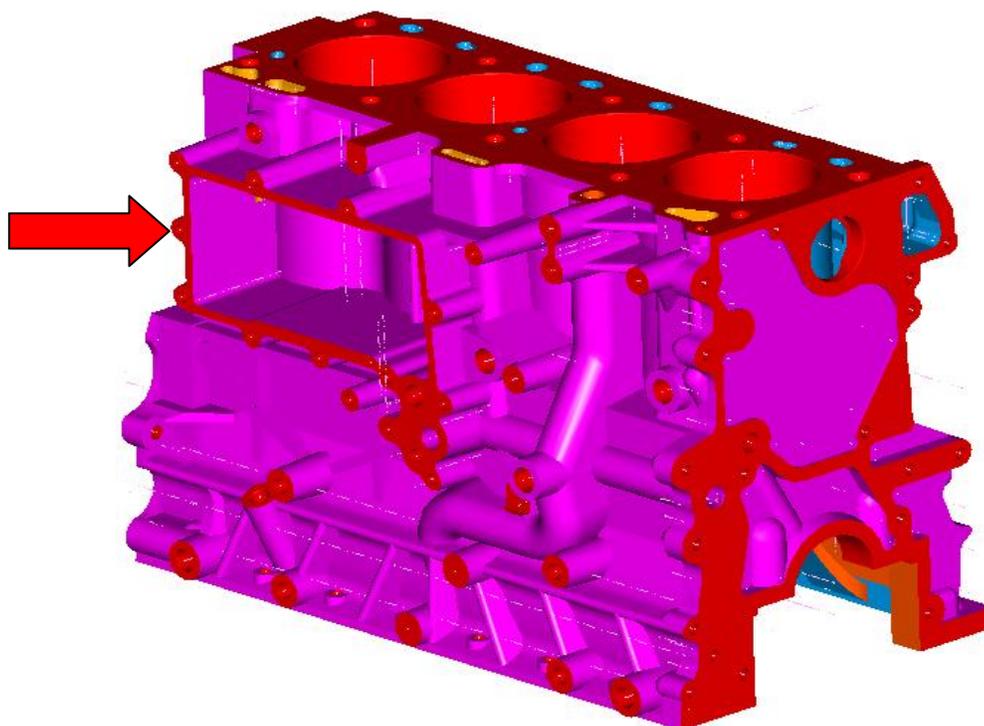


Figura 37 - Vista em perspectiva do bloco de motor NGD 3.0E.

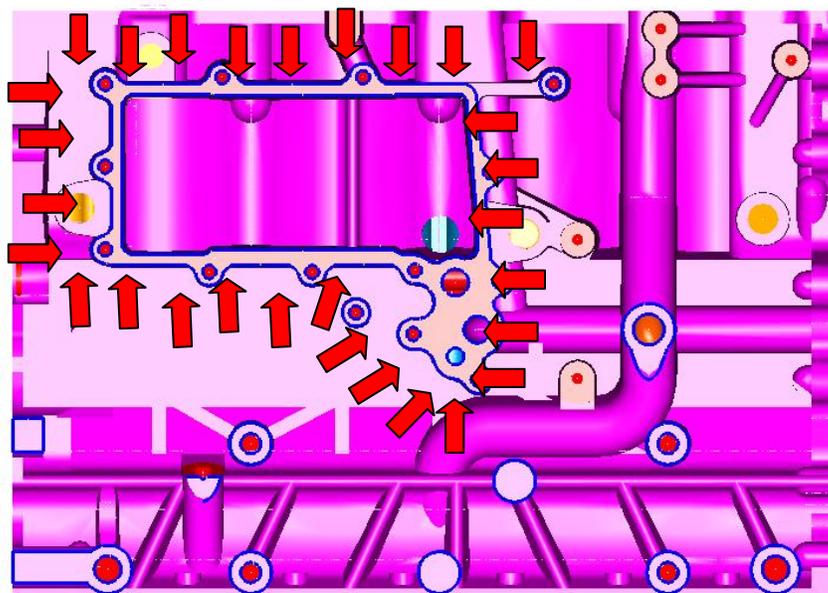


Figura 38 - Vista lateral do bloco de motor NGD 3.0E com trecho fresado demonstrado pelas setas vermelhas.

O bloco utilizado nos testes é destinado à fabricação do motor veicular diesel NGD3.0E. 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 6 apresenta as propriedades mecânicas exigidas.

**Tabela 6 - Especificações de projeto do bloco de motor NGD 3.0E.**

Material	Norma	Resistência a tração	Dureza	
			Face do cabeçote	Demais regiões
FC250 OU GG25	RES21FC01	184 N/mm <sup>2</sup>	200 a 255 HB	187 a 255 HB

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

- Resistência à tração e ao cisalhamento: 184N/mm<sup>2</sup> mínimo ou 18,4 kgf / mm<sup>2</sup>;
- Resistência à flexão: de 350 a 490 N/mm<sup>2</sup> ou 35 a 49 kgf / mm<sup>2</sup>;
- Resistência à compressão: de 700 a 1000 N/mm<sup>2</sup> ou 70 a 100 kgf / mm<sup>2</sup>;
- Dureza Brinell de pré-carga HB30; entre 180 e 240 HB;
- Módulo de elasticidade: entre 105000 e 120000 N/m<sup>2</sup>;

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 resfriamento 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 7 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 testes é de ferro fundido, FC250 ou GG25. As características do material foram fornecidas pela Fundição Tupy, e mostra uma variação no  $C_e$  entre 3,71 e 4,27. Carbono equivalente significa teores mais elevados de carbono, estabelecem melhores condições grafitizantes nos banhos metálicos. Até um determinado valor, o carbono equivalente contribui significativamente para a formação de veios, no caso do ferro fundido cinzento, significa também a representação dos elementos de liga do material na forma de uma quantidade de carbono. Como estes valores são inferiores ao ponto eutético (4,3%) o material é considerado hipoeutético. Na determinação da densidade do ferro fundido cinzento foi utilizado o procedimento de Arquimedes. Uma proveta, uma balança de precisão (g) e uma amostra de ferro fundido cinzento. Enche-se a proveta com água pura até uma marca conhecida juntamente com a mostra 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/dm<sup>3</sup>.

**Tabela 7 - Composição química do bloco.**

<b>Composição</b>	Carbono	Silício	Manganês	Enxofre	Fósforo	Níquel	Cromo
<b>Percentual</b>	3,10 a 3,45	1,85 a 2,45	0,60 a 0,90	Mx. 0,12	Mx. 0,15	Mx. 0,25	Mx. 0,15

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 fundido 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.

## **3.2 Equipamentos**

Os equipamentos utilizados nos testes são compostos basicamente por: fresas, acelerômetro, transdutor e máquina.

O detalhamento de cada item citado será feito da forma mais completa e simples possível.

### 3.2.1 Ferramentas de corte

Todas as ferramentas de usinagem (fresas) utilizadas nos testes são do diâmetro de 80 mm em função da geometria da peça e foram utilizados insertos de metal duro. Os parâmetros de corte variaram conforme os planejamentos dos testes e o que a ferramenta pode suportar, sempre com indicação do fornecedor e o que sugere o catálogo.

#### 3.2.1.1 Ferramentas de corte dos testes de 1 a 4

A fresa dos testes do 1 a 4 possui 9 insertos octogonais, ou seja, inserto com oito arestas de corte e com ângulo de posição de 43° e diâmetro de 80mm, conforme figura 39.

A fresa é duplo-positiva do modelo R220.43-0080-07-9T da Seco e o inserto de metal duro é OFER 070405-TN-M16 de classe T150M (ISO K20), com cobertura de  $Al_2O_3$  (óxido de alumínio) específica para ferro fundido.



**Figura 39 - Fresa dos testes de 1 a 4.**

### 3.2.1.2 Ferramentas de corte dos testes 5 e 6

As fresas dos testes 5 e 6 consistem em duas fresas, uma de desbaste e outra de acabamento e com ângulos de posição  $88^\circ$  e  $89^\circ$ , respectivamente, diâmetro de 80mm, conforme figura 40.

A fresa de desbaste é do modelo R220.88-0080-15-12M, com 12 arestas de corte da Seco e o inserto de metal duro é SNHF150412TN-M14 de classe MP1500 (ISO P15).

A fresa de acabamento é do modelo R220.30-0080-12ST, com 9 arestas de corte da Seco e o inserto de metal duro é SEEX 1203 AFTN-MD14 da classe MK1500 (ISO K20), com cobertura de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de alumínio).



**Figura 40 – Exemplos de fresas semelhantes a utilizadas nos testes 5 e 6, desbaste à esquerda e acabamento à direita.**

### 3.2.1.3 Ferramentas de corte dos testes de 7 a 10

A fresa dos testes 7 a 10 possui 5 insertos octogonais, ou seja, inserto com oito arestas de corte e com ângulo de posição de  $60^\circ$  e diâmetro de 80mm, conforme figura 41.

A fresa é positiva do modelo R220.66-0080-12-5CM da Seco e o inserto de metal duro é HPMN 12062ETR-D25 de classe F30M (ISO K30), com cobertura de  $Al_2O_3$  (óxido de alumínio).



**Figura 41 – Exemplo de fresa semelhante à utilizada nos testes de 7 a 10.**

### 3.2.2 Aparelho de análise de vibrações.

O aparelho de medição de vibração utilizado nos ensaios foi o SDAV (Sistema Digital de Análise de vibrações), sendo o mesmo com inúmeras características.

#### 3.2.2.1 Características do hardware.

- Monitor e Analisador de vibrações com 2 ou 4 canais e comunicação com PC por USB;
- Várias unidades podem operar sob comando de um único computador;
- Entradas compatíveis com a maioria dos sensores, transmissores e condicionadores de sinais de vibração comerciais, inclusive acelerômetros ICP e proximímetros;
- Conversor analógico-digital de 12 bits com controle automático de ganho e filtro anti-aliasing de 70 dB/oitava;

- Sensor de fase óptico para leitura da velocidade de rotação e aquisição síncrona de sinais;
- Integrador analógico de precisão para medidas de velocidade de vibração a partir do sinal de aceleração;
- Demodulador analógico para detecção antecipada de defeitos em rolamentos por análise de envelope;
- Análises de espectro com frequência máxima de 50 Hz a 10k Hz;
- Espectros com resolução de 400 a 3200 linhas;
- Cálculo de espectros médios com até 100 amostras.

#### 3.2.2.2 Características do *software*.

- Telas para monitoração contínua dos níveis de vibração, com gráficos de tendência, valores numéricos e indicação de alarmes;
- Registros de forma de onda e espectro de frequência por comando manual ou automático;
- Acesso imediato ao espectro e forma de onda a partir dos gráficos de tendência;
- Configuração independente de cada canal, incluindo: tipo e sensibilidade do sensor, grandeza de medida (velocidade, aceleração ou envelope), frequência máxima, número de linhas e de médias por espectro;
- Arquia as configurações de medida e análise para uso em outras medições;
- Permite medições seqüenciais no mesmo canal com diferentes configurações;
- Cursor simples e duplo, com indicação de harmônicas e localizador da amplitude máxima e da frequência central das componentes do espectro;
- Sobreposição de frequências de defeitos de rolamentos nos gráficos de espectros, a partir de banco de dados com mais de 20.000 rolamentos comerciais;
- Sistema de arquivos de sinais de fácil identificação, acesso e manutenção;

- Capacidade de impressão rápida e exportação dos registros de sinais, espectros e gráficos de tendência.

### 3.2.2.3 Parâmetros para medição de vibrações.

Amplificação: depende de cada medida, este parâmetro o próprio SDAV decide que quantidade de ganho dará ao sinal, dependendo de sua magnitude.

Frequência natural do sensor: 25 kHz

Filtro: 10 kHz

Taxa de amostragem: 25 kHz



**Figura 42 - Foto transdutor e acelerômetro piezoelétrico utilizado na medição de vibração em todos os testes realizados.**

### 3.2.3 Máquina-ferramenta

O processo atual de fresamento das faces laterais do bloco de motor NGD 3.0E, é realizado em um centro de usinagem horizontal com as seguintes características:

- Tamanho de pallet: 630 x 630 mm;
- Carga máxima do pallet: 800 kg;
- Refrigeração alta pressão: 40 bar;
- Detector de quebra de ferramentas;
- Comando: Unipro 90;
- Deslocamentos dos eixos: 800 x 800 x 710 mm;
- Fixação da ferramenta: ISO 50;
- Mesa (giro): 360 graus x 0,001;
- Potência: 36 kW;
- Rotação máxima: 10000 rpm;
- Avanço (deslocamento) linear: 24 m/min;
- Capacidade de ferramentas: 52;
- Ano fabricação: 1996.



**Figura 43 - Máquina comando numérico horizontal.**

## 4. Procedimentos experimentais

Este trabalho partiu da necessidade de redução do ruído no fresamento da lateral do bloco. Como a vibração está associada à geração do ruído, essa foi medida. A fim de diminuir essa vibração e consequentemente o ruído, variou-se a geometria das ferramentas e alguns parâmetros de corte visando uma menor excitação do sistema. Em suma, foram adotadas como variáveis de entrada algumas condições de corte e vibração e ruído no processo, variáveis de saída. Foram realizadas oito réplicas para cada condição proposta nos ensaios.

A superfície fresada conta com diferentes larguras de corte ao longo da trajetória da fresa. Isso faz com que o diâmetro da fresa, na maior parte do tempo seja excessivamente grande para o fresamento que está ocorrendo. Neste trabalho, a trajetória da fresa foi dividida em trechos, em função da largura de corte, conforme pode ser visto na figura 44.

Na figura 44, também esta esquematizada a localização exata de fixação do acelerômetro para medição da vibração em todos os testes realizados. Este local foi determinado devido a melhor condição de fixação e maior proximidade a face fresada.

Os trechos do fresamento tem diferentes  $a_c$ , são eles: trechos 1#2 = 21,8mm, 2#3 = 21,8mm, 3#4 = 45mm, 4#5 = 45mm, 6#7 = 21,8mm, 7#8 = 13mm, 8#9 = 16mm, 10#11 = 16mm.

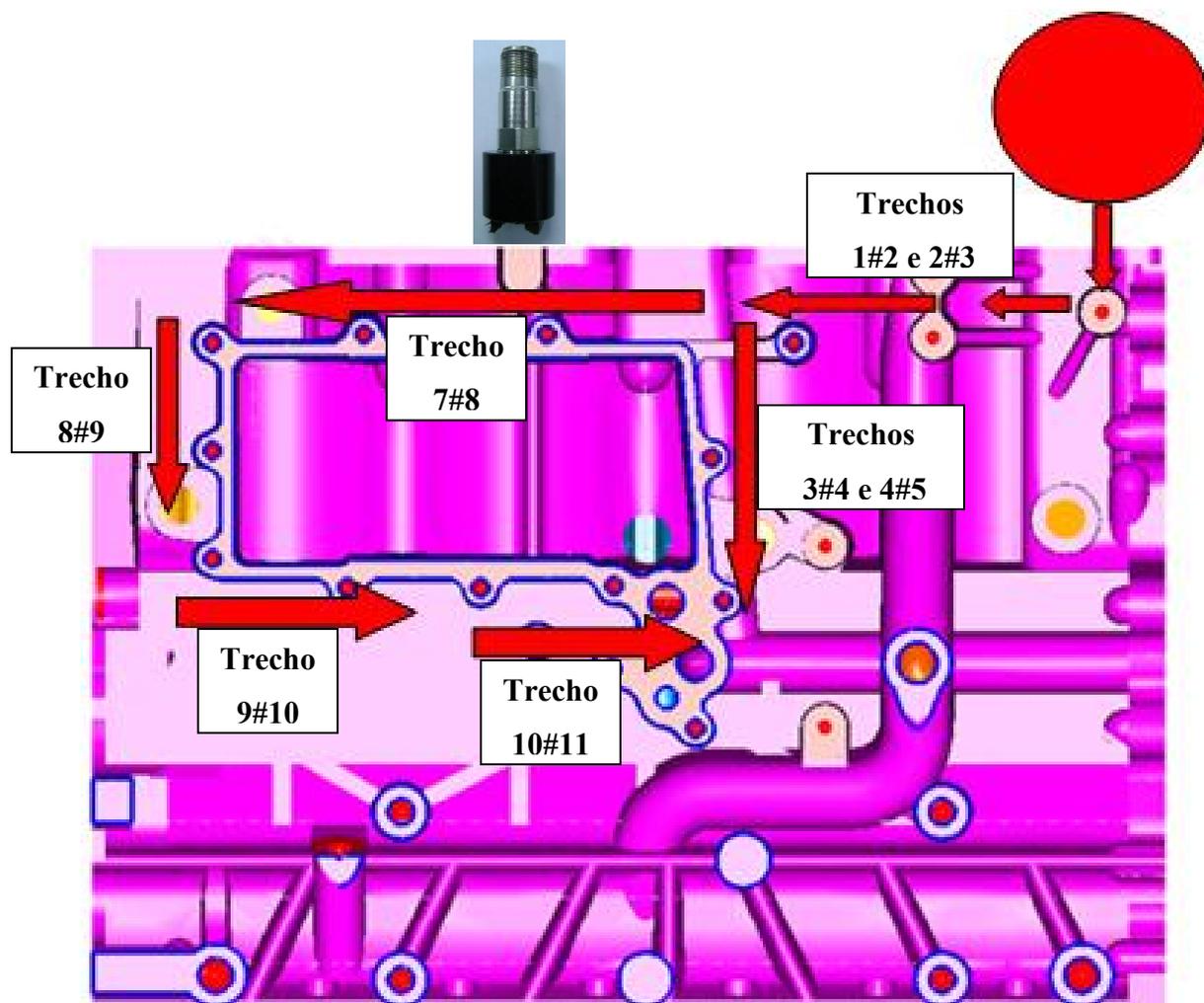


Figura 44 - Figura com os trechos do fresamento indicando a posição onde foi fixado o acelerômetro durante os ensaios.

#### **4.1 Ensaios com variação de $v_c$ e $f_z$ no processo atual**

Para analisar a influência da velocidade de corte e do avanço por dente foram realizados quatro ensaios no processo atual de fresamento da face lateral do bloco. Os ensaios ocorreram em condições normais de produção, nos quais foram alterados os parâmetros de rotação 'S', para

variando a velocidade de corte, e o parâmetro de avanço linear 'F', para variar o avanço por dente, sendo todos com a mesma profundidade de corte de 4 a 5 mm (1 passe).

Conforme mostrado na tabela 8, foram realizados quatro ensaios, nos quais as variáveis 'S' e 'F' foram alteradas.

**Tabela 8 - Parâmetros de corte para testes no processo atual de fresamento das laterais do bloco.**

<b>TABELA COM OS PARÂMETROS DE CORTE PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES NO PROCESSO ATUAL DE FRESAMENTO DAS LATERAIS DO BLOCO</b>						
Testes	Velocidade de corte (m/min)	avanço por aresta (mm/aresta)	rotação (rpm)	avanço linear (mm/min)	Diametro (mm)	Dentes
1	260	0,08	1035	745	80	9
2	260	0,16	1035	1490	80	9
3	340	0,08	1353	974	80	9
4	340	0,16	1353	1948	80	9

É relevante salientar que os outros parâmetros de corte ou critérios de usinagem, tais como: profundidade de corte, engajamento, trajetórias, quantidade de passes, volume de cavaco, número de dentes não foram alterados. Também é muito importante deixar registrado que as ferramentas testadas, ou seja, as arestas de corte eram todas novas, para minimizar-se a interferência do desgaste na análise da vibração, assim como a quantidade de réplicas de cada ensaio, que foram 8.

## **4.2 Ensaio com variação de estratégia de usinagem e geometria das fresas**

Para analisar a influência da geometria da ferramenta, foram realizados alguns ensaios tomando como padrão a alteração da estratégia de corte, ou seja, passou-se a fresar com duas ferramentas, uma para desbaste e outra para acabamento. Os parâmetros de corte neste caso foram estabelecidos em conjunto com o fornecedor da ferramenta, conforme tabela 9.

**Tabela 9 - Parâmetros de corte para teste no processo proposto em desbaste e acabamento.**

TABELA COM PARÂMETROS DE CORTE PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES NO PROCESSO ATUAL DE FRESAMENTO DAS LATERAIS DO BLOCO, COM DESBASTE E ACABAMENTO.								
Testes		Velocidade de corte (m/min)	Avanço por aresta (mm/aresta)	Profundidade de corte (mm)	rotação (rpm)	avanço linear (mm/min)	Diâmetro (mm)	dentes
5	Fresa A (desbaste)	350	0,4	4,0 à 4,8	1393	5014	80	9
6	Fresa B (acabamento)	600	0,18	0,2	2388	5158	80	12

### **4.3 Ensaio com variação de $v_c$ , $f_z$ e $\kappa_r$ com relação ao processo atual**

Para analisar a influência da velocidade de corte, avanço por dente e ângulo de posição de  $60^\circ$ , foram realizados mais quatro ensaios.

Conforme mostrado na tabela 10, as variáveis ‘S’ e ‘F’ foram alteradas, sendo todos com o mesma profundidade de corte de 4 a 5mm (1 passe).

**Tabela 10 - Parâmetros de corte para testes no processo de fresamento das laterais do bloco com ângulo de posição alterado.**

TABELA COM OS PARÂMETROS DE CORTE PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES NO PROCESSO ATUAL DE FRESAMENTO.						
Testes	Velocidade de corte (m/min)	avanço por aresta (mm/aresta)	rotação (rpm)	avanço linear (mm/min)	Diâmetro (mm)	dentes
7	260	0,08	1035	414	80	5
8	260	0,16	1035	828	80	5
9	340	0,08	1353	541	80	5
10	340	0,16	1353	1082	80	5

## 5. Resultados e Discussão

Inicialmente serão apresentados os resultados obtidos da análise de vibrações e medição de ruído nos ensaios da operação de fresamento nas laterais do bloco, tendo como base o processo atual, porém variando velocidade de corte e avanço por dentes, sem alteração de geometria da ferramenta. Foram analisados primeiramente a influência da velocidade de corte e o avanço por aresta, em especial a influência desses parâmetros de corte na emissão de vibração e ruído no processo de fresamento.

Na segunda parte dos ensaios, foi analisada a influência da alteração da geometria da ferramenta e da estratégia de corte (desbaste e acabamento) na emissão de vibrações no processo de fresamento, levando em consideração, também como nas primeiras análises a emissão de ruído.

Na terceira e última parte dos ensaios, foi analisada a influência dos parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço por aresta) agora com alteração do ângulo de posição ( $\chi_r$ ) na ferramenta na emissão de vibração no processo de fresamento.

### ***5.1 Processo atual com variação de velocidade de corte e avanço por aresta***

Observando-se a figura 45, nota-se que como esperado, o aumento de  $f_z$  causa aumento do ruído em todos os trechos, isso é feito pela comparação dos ensaios 1 com 2 e 3 com 4. Já a velocidade de corte não tem uma influência clara no processo. Em avanços por dente menores, o ruído apresenta-se praticamente igual nos trechos 1#2 e 2#3, menos com maior velocidade de corte no trecho 3#4 e maior com maior velocidade nos demais trechos. Com avanços maiores, o comportamento é diferente, a menos de dois trechos (3#4 e 10#11) que apresentam níveis de

ruído iguais, nos demais trechos, o ruído é maior com maiores valores de velocidades de corte. Vale lembrar que maiores avanços implicam em maiores espessuras de cavaco, que por sua vez geram maiores esforços de corte, daí ser natural que a vibração e conseqüentemente o ruído sejam maiores. Por outro lado, maiores velocidades de corte implicam em maior taxa de deformação e maiores temperaturas, que não tem maior influência na vibração e ruído, principalmente em função do material ser frágil. Caso o material usinado fosse dútil, talvez o aumento da temperatura reduzisse os esforços de corte, gerando menor vibração e ruído. Por outro lado, maiores velocidades de corte implicam em um impacto com maior intensidade da ferramenta na peça, porém, como o ferro fundido cinzento tem a característica de absorver vibrações, pode ter tornado o comportamento da influência desse parâmetro não muito clara. De qualquer forma, como mencionado anteriormente, para os propósitos deste trabalho, recomenda-se a utilização de níveis mais baixos de velocidade de corte e de avanço por dente, mas essa condição é a que apresenta menor produtividade.

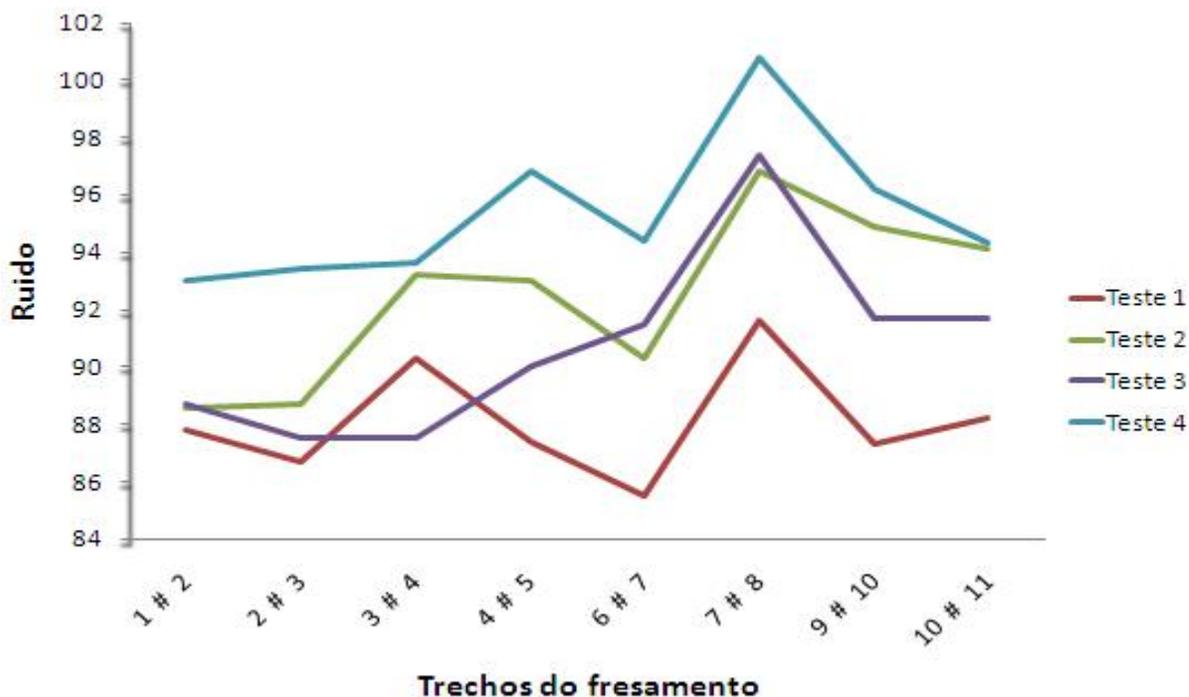
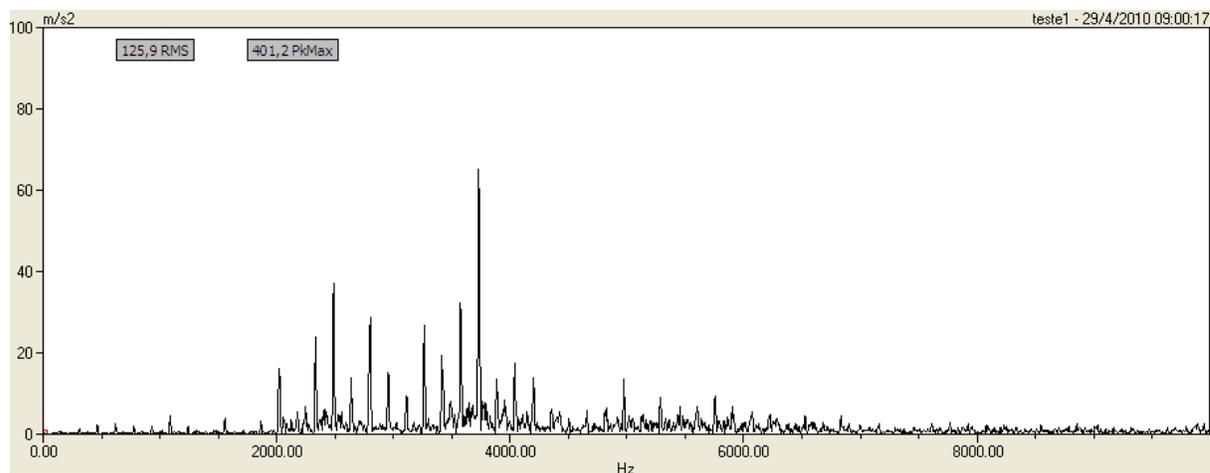


Figura 45 - Gráfico com o evolução do ruído em decibéis (dB) nos trechos ao longo do fresamento dos testes 1 a 4.

Vê-se no figura 46 o espectro de vibração do teste 1 no trecho 7#8, considerado crítico por ter apresentado maior nível de ruído. Nota-se na figura que também são apresentados os valores RMS e pico máximo.

Ainda na figura 46, nota-se que as frequências com maiores amplitudes presentes situam-se entre 2 kHz e 6,5 kHz. A frequência de entrada dos dentes, que é considerada importante é de 155,25 Hz, portanto, ela está, provavelmente, excitando alguma frequência mais elevada nesse trecho. Novamente, devido à pouca rigidez da peça, isso pode estar ocasionando a maior vibração nesse trecho.



**Figura 46 - Espectro de vibração do teste 1 durante o fresamento do trecho 7#8 (aceleração  $m/s^2$  e Hertz).**

Vê-se na figura 47 a média dos valores RMS de cada trecho para os testes 1 a 4. Pode-se notar claramente a diferença entre o teste 1 com os menores parâmetros de corte e o teste 4 com os maiores. No trecho em questão, nota-se que tanto a velocidade de corte quanto o avanço influenciam a vibração no processo. Nota-se que o aumento dos valores RMS da vibração apresentam uma relação constante, dobrar o avanço por dente aumenta em 50% a vibração, por outro lado, aumentando a velocidade de corte em 30% multiplica por 3,3 (aproximadamente) a vibração. Isso indica que nesse trecho, a velocidade de corte é o fator mais significativo.

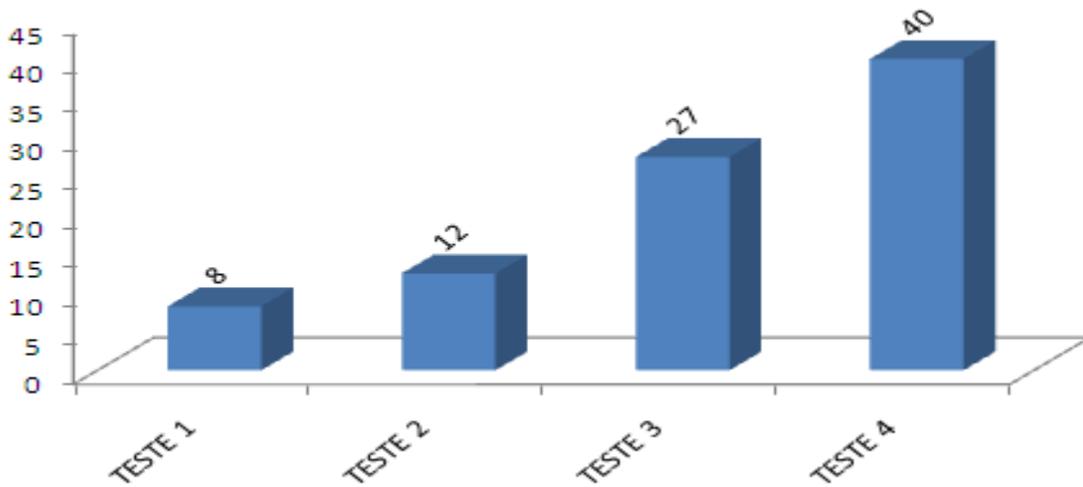


Figura 47 - Gráfico com valores médios de vibração RMS (vertical) entre os testes 1 a 4.

Vê-se na figura 48 os valores médios RMS dos testes de 1 a 4, porém separados em trechos do fresamento, nele verifica-se claramente que independente dos parâmetros de corte o trecho que apresenta maior valor RMS é o trecho 7#8, provavelmente por se tratar do menos  $a_c$  de todo o fresamento.

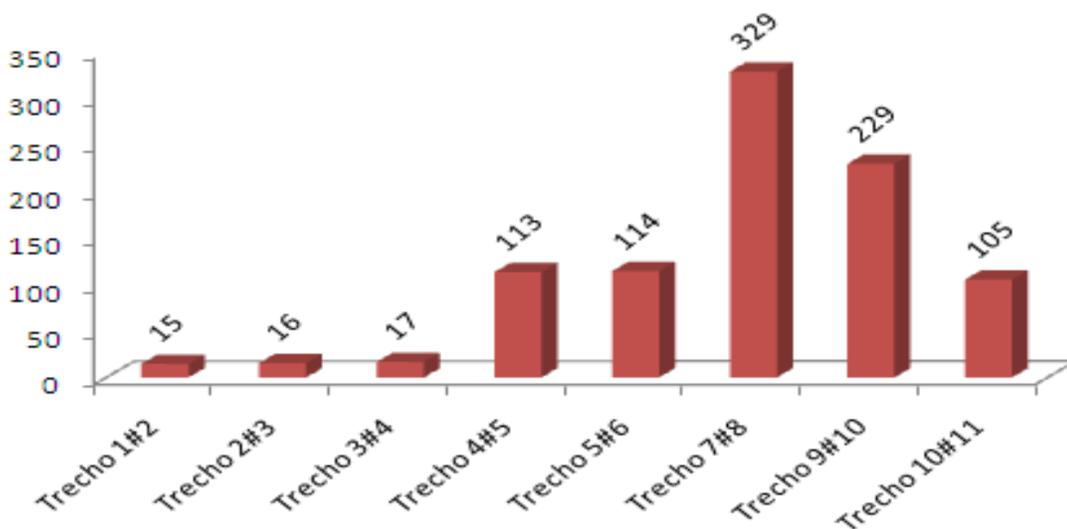


Figura 48 - Gráfico com valores médios de vibração em RMS (vertical), separados entre os trechos do fresamento dos testes de 1 a 4 (horizontal).

## 5.2 Processo atual com variação de estratégia de fresamento (desbaste e acabamento)

Observando-se a figura 49, nota-se que o teste 6 foi o que gerou menor ruído, como se trata de uma nova estratégia de fresamento com desbaste e acabamento o teste 5 (desbaste) ficou muito acima em se tratando de ruído. Nesse caso, a explicação para o maior ruído do teste 5 fica dificultado, pois a velocidade de corte teve influência bastante significativa. Por outro lado, o avanço por dente do teste 6 é mais do que 2 vezes maior, além disso, o sobremetal no teste 5 é muito maior (17,5 vezes maior). Profundidades de corte maior tendem a gerar maiores esforços também. Aparentemente essa combinação de maior velocidade e profundidade de corte acarretou em maior vibração do processo. Desta forma, mesmo com o menor ruído do teste 6 em relação ao teste 1, o ruído gerado pelo teste 5 inviabiliza a aplicação dessa estratégia de corte.

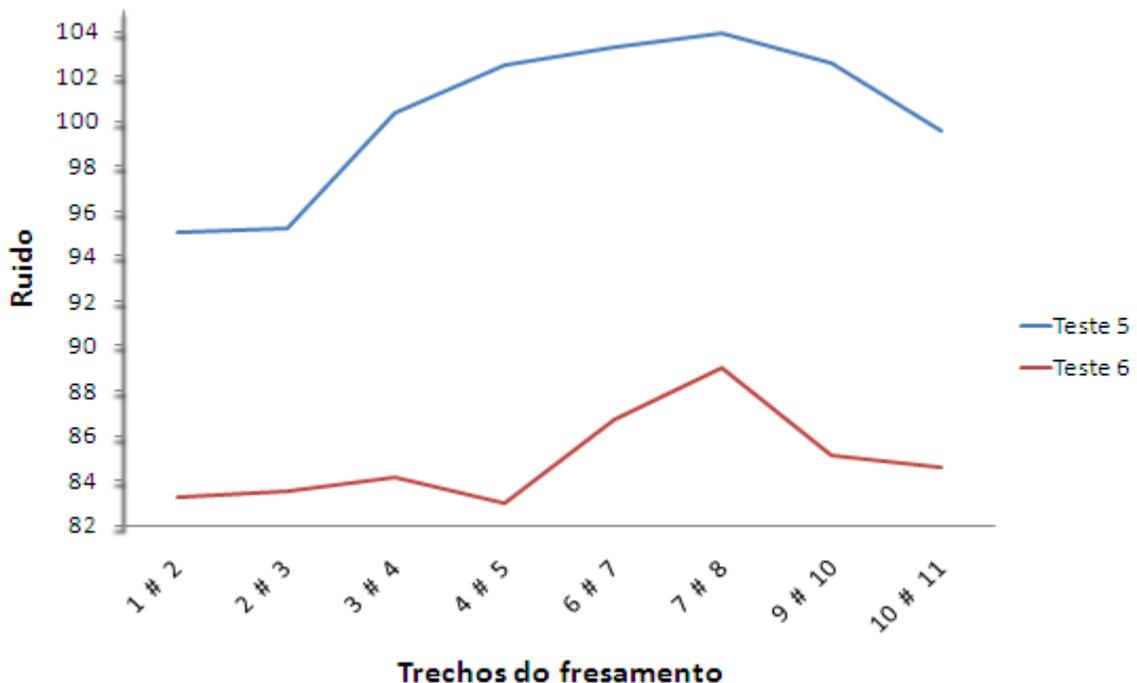
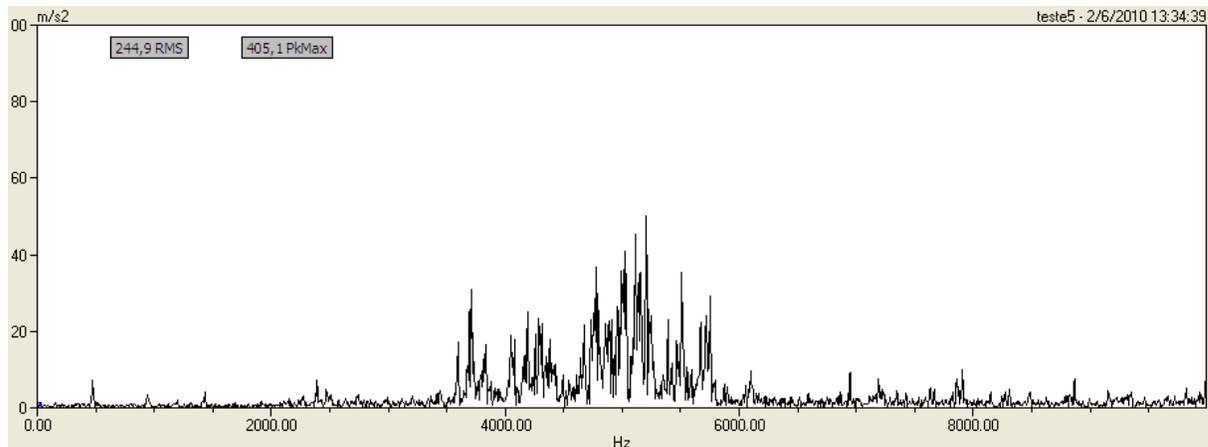


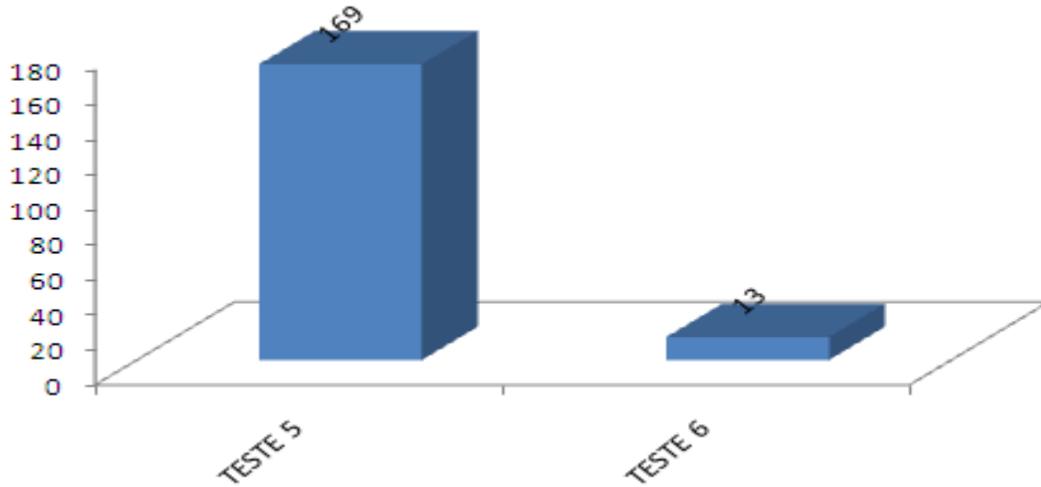
Figura 49 - Gráfico com o evolução do ruído em decibéis (dB) nos trechos de fresamento dos testes 5 e 6 (desbaste e acabamento).

Vê-se no gráfico da figura 50 o espectro de vibração do teste 5 durante a usinagem do trecho 7#8, ou seja, o trecho de maior valor RMS, como já citado anteriormente é a mais importante medida da amplitude porque ele mostra a média da energia contida no movimento vibratório. Novamente observa-se que o valor RMS da vibração relaciona-se com o ruído gerado no processo.



**Figura 50 - Espectro de vibração do teste 5 durante o fresamento do trecho 7#8 (aceleração  $m/s^2$  e Hertz).**

Vê-se no gráfico da figura 51 que a média dos valores RMS entre os testes 5 e 6, nota-se uma diferença considerável, porque além de parâmetros de corte muito diferentes, também há uma considerável diferença nas geometrias de corte das ferramentas. Esses valores servem para ilustrar a comparação dessa estratégia (desbaste mais acabamento) em relação ao processo convencional, já que as diferenças inviabilizam a explicação do fenômeno envolvido. Além disso, é notório que essa estratégia está descartada, segundo os objetivos desse trabalho.



**Figura 51 - Gráfico com valores médios de vibração RMS (vertical) entre os testes 5 e 6.**

Vê-se no gráfico da figura 52 que as médias RMS entre os trechos dos testes 5 e 6, são maiores do que os valores apresentados nos testes 1 a 4. Isso se dá basicamente por causa da operação de desbaste, que apresenta  $v_c$  e  $f_z$  muito diferentes, mas principalmente  $a_p$  maiores. A operação de acabamento pouco contribuiu para essa média, como pode ser observado na figura 52, onde o valor RMS médio dessa operação é da ordem de 10% do valor observado no desbaste. Por outro lado, no trecho considerado crítico, a saber, 7#8, o nível de vibração diminuiu em relação aos testes 1 a 4.

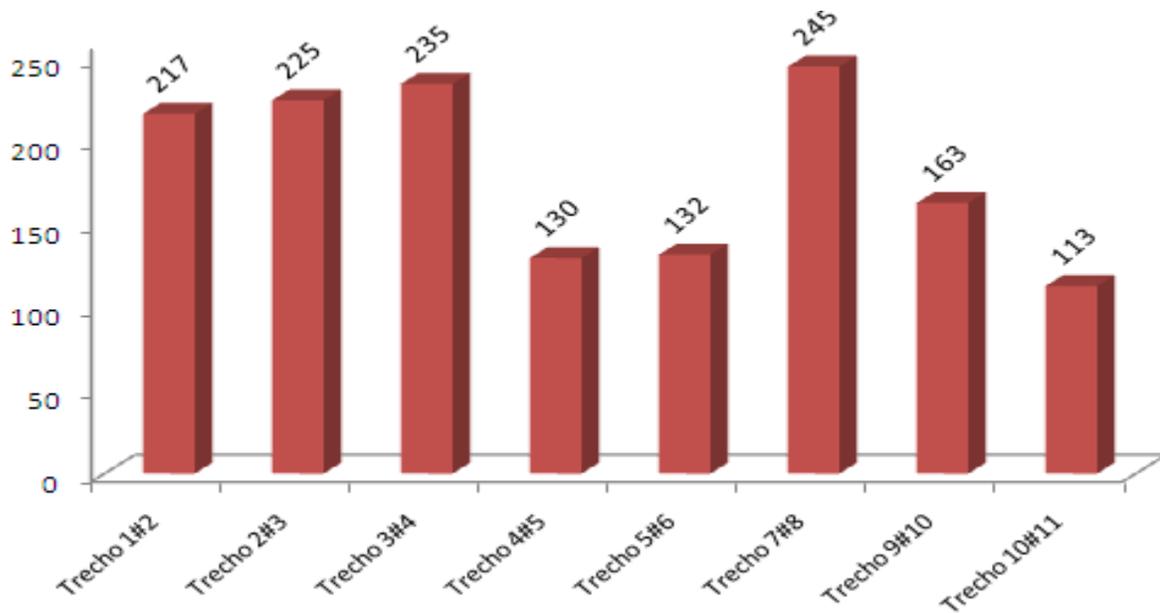
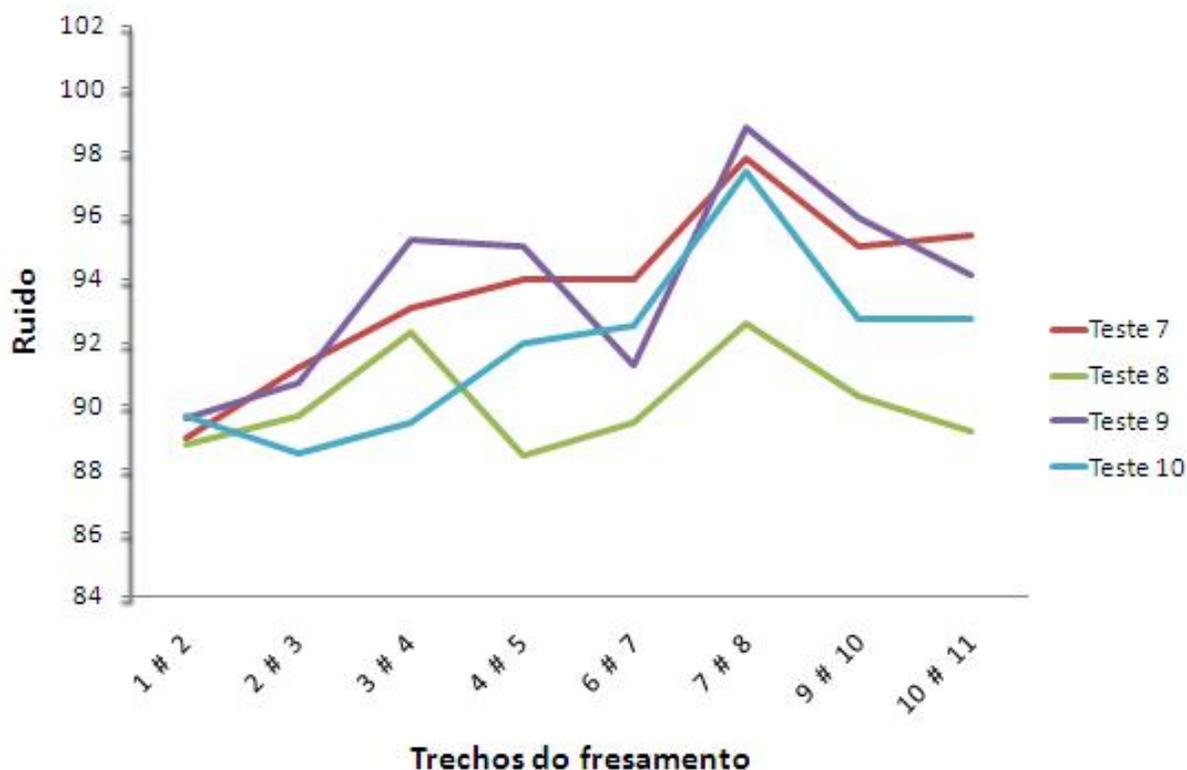


Figura 52 - Gráfico com valores médios de vibração em RMS(vertical), separados entre os trechos do fresamento dos testes de 5 e 6.

### **5.3 Processo atual com variação de velocidade de corte, avanço por aresta e ângulo de posição**

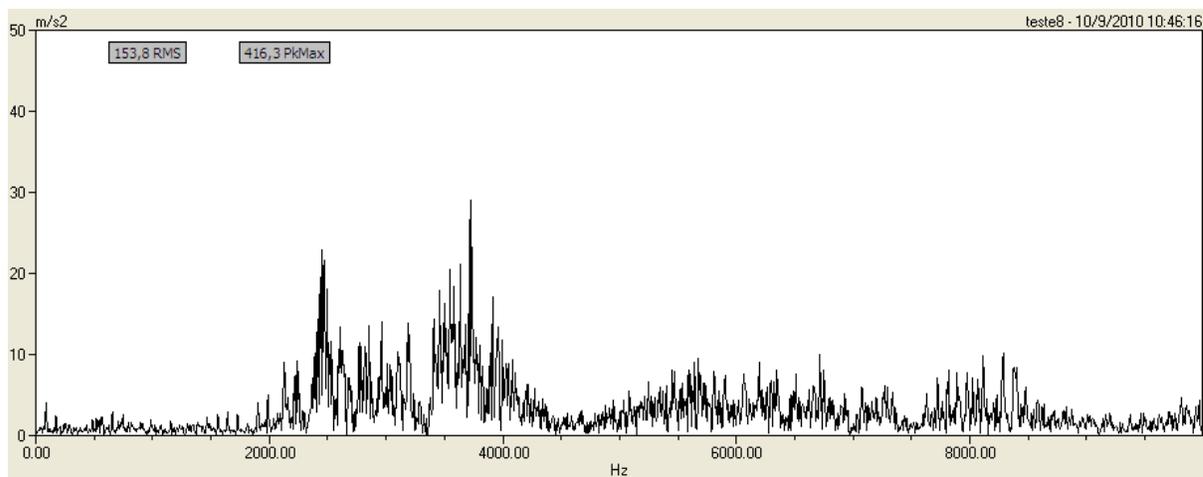
Analisando as figuras 53 e 55, nota-se que os ensaios de 7 a 10 apresentaram, em média, maior vibração do que os ensaios de 1 a 4. Vale lembrar que esses ensaios trabalharam com os mesmos parâmetros de corte dois a dois (1 igual a 7, 2 igual a 8, 3 igual a 9 e 4 igual a 10). A diferença está no número de insertos (9 para os testes de 1 a 4 e 5 para os de 7 a 10) e ângulo de posição. Um menor número de insertos deveria gerar uma menor vibração, haja vista que essa condição, teoricamente apresentaria um menor número de arestas em corte simultaneamente. Nesse caso, percebe-se que com mais arestas, a área total de contato é maior (pois seria a soma das áreas de contato) e, conseqüentemente, a força também deveria ser maior. Analisando a figura 53 nota-se que o teste 8 foi o que gerou menor ruído no trecho 7#8, objeto do presente

estudo. Isso ocorreu contrariando a literatura, já que o ensaio 7 cortou com a mesma velocidade de corte e com metade do avanço por dente. O trecho 7#8 foi aquele dentre todos os testes que apresentou a maior intensidade de ruído em todo o fresamento. Este trecho (7#8) do fresamento apresenta o menor  $a_e$  de todo o processo de fresamento. Esse pode ser o motivo, dos maiores sinais de ruído. Mesmo este trecho do fresamento tendo o impacto da entrada do inserto reduzida devido à posição de engajamento da fresa com relação à superfície fresada, ou seja, o inserto não colide toda sua superfície sobre a área fresada, não foi o suficiente para que se obtivesse um ruído abaixo do esperado, ou seja, 85 dB. Provavelmente por sua menor rigidez, que favorecia a vibração mesmo com esforços de corte menor.



**Figura 53 - Gráfico com o evolução do ruído em decibéis (dB) nos trechos ao longo do fresamento nos testes de 7 ao 10.**

Na figura 54 pode-se observar que mudando-se o ângulo de posição, o espectro de frequências apresenta-se mais espalhado ao longo das frequências, ou seja, surgem novos componentes de frequência no sinal. Diferente dos demais testes que concentraram as frequências em torno de 2000 a 4500 Hz.



**Figura 54 - Espectro de vibração do teste 8 durante o fresamento do trecho 7#8 (aceleração  $m/s^2$  e Hertz).**

Observando-se a figura 55 nota-se que diferente do que aconteceu nos ensaios de 1 a 4, com ângulo de posição  $\kappa_r$   $43^\circ$ , nos testes de 7 a 10, com  $\kappa_r$   $60^\circ$ , nota-se que em velocidades de corte mais baixas, um maior avanço por dente implicou em menores vibrações. Por outro lado, em velocidades maiores, o sinal de vibração apresentou-se muito parecido, na maioria dos trechos.

Nota-se também que para a usinagem como um todo, os efeitos de maior vibração do teste 7 no trecho 7#8 foi atenuado pelos valores da demais regiões. Aqui nota-se que um aumento do avanço por dente implica em aumento da vibração. Nesse caso, dobrando-se o avanço, obteve-se um aumento de 22% e 33% nas velocidades de 260 e 340 m/min., respectivamente. Novamente, a velocidade de corte mostrou-se uma influência mais significativa no sinal de vibração.

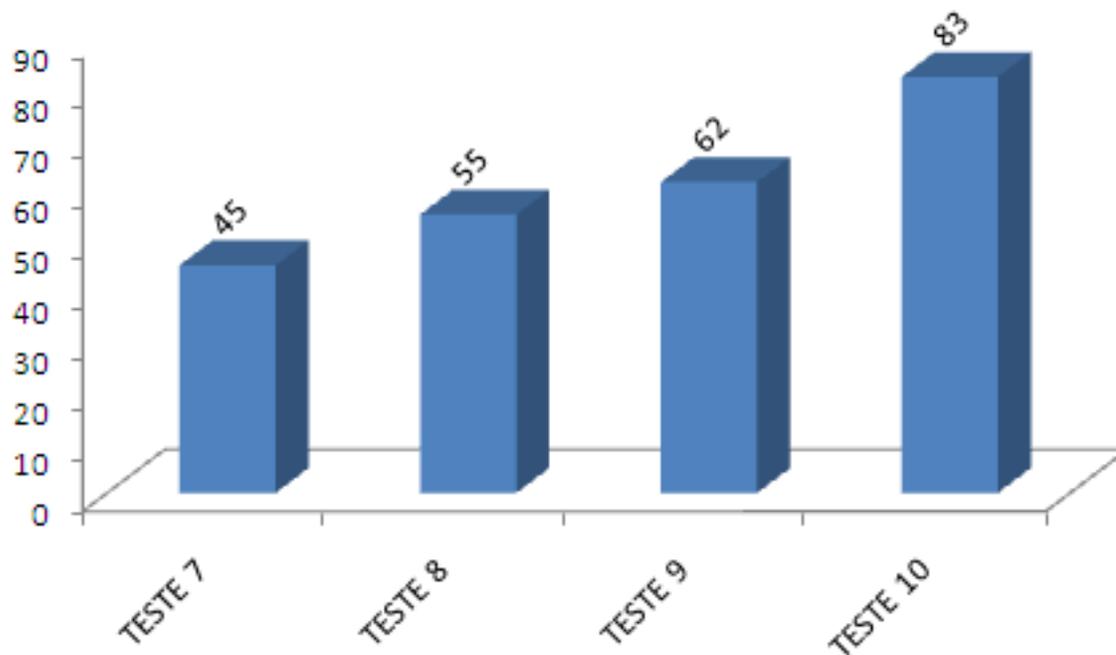


Figura 55 - Gráfico com valores médios RMS (vertical) entre os testes 7 a 10.

A figura 56 mostra que a mudança no ângulo de posição aumentou os níveis de vibração em todos os trechos. Isso mostra que o ângulo de posição da ferramenta possui uma grande influência no nível de vibração, além disso, a mudança testada não solucionou o problema, de baixar a vibração na usinagem como um todo, mas em especial no trecho 7#8.

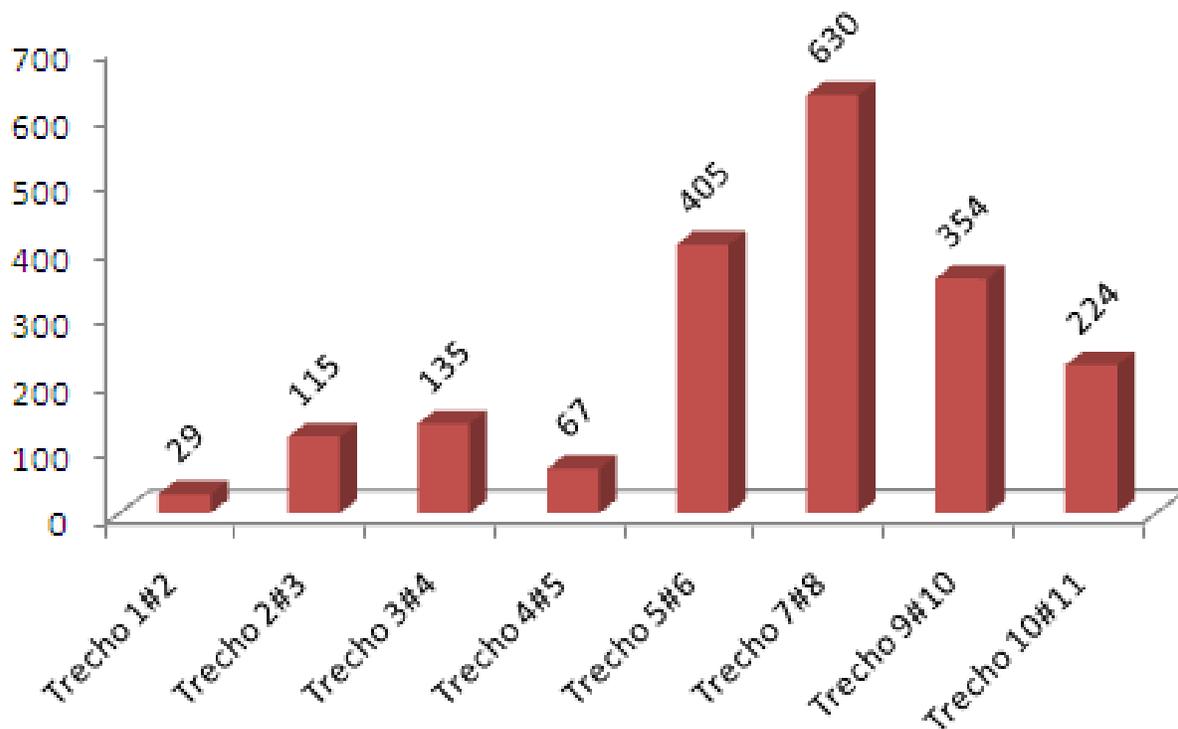


Figura 56 - Gráfico com valores médios de vibração em RMS (vertical), separados entre os trechos do fresamento dos testes de 7 a 10.

#### **5.4 Comparação da forças axial e radial entre os testes 1 e 4 e os testes 7 a 10**

Analisando as figuras 57 e 58, onde foram calculadas a componente radial e axial das forças de corte, sendo esta obtida através da equação 2.5, nota-se uma diferença maior entre estas forças nos testes de 7 a 10 do que nos testes 1 a 4, isso demonstra, conforme a teoria que, com a alteração do ângulo de posição ( $\kappa_r$ ) consegue-se um maior equilíbrio entre as forças radial e axial, gerando com isso menor vibração. Isso pode ser comprovado nas comparações entre as medições de vibração nos testes de 1 a 4 e 7 a 10.

Nota-se que na figura 57, os testes 1 e 3 tiveram os mesmos valores das forças, assim como os testes 2 e 4, na figura 58 os testes 7 e 9 e os testes 8 e 10 também tiveram os mesmos

valores entre si, isso se deve ao fato de que, todos os testes que obtiveram os mesmos valores tem o mesmo parâmetro avanço por aresta ( $f_z$ ).

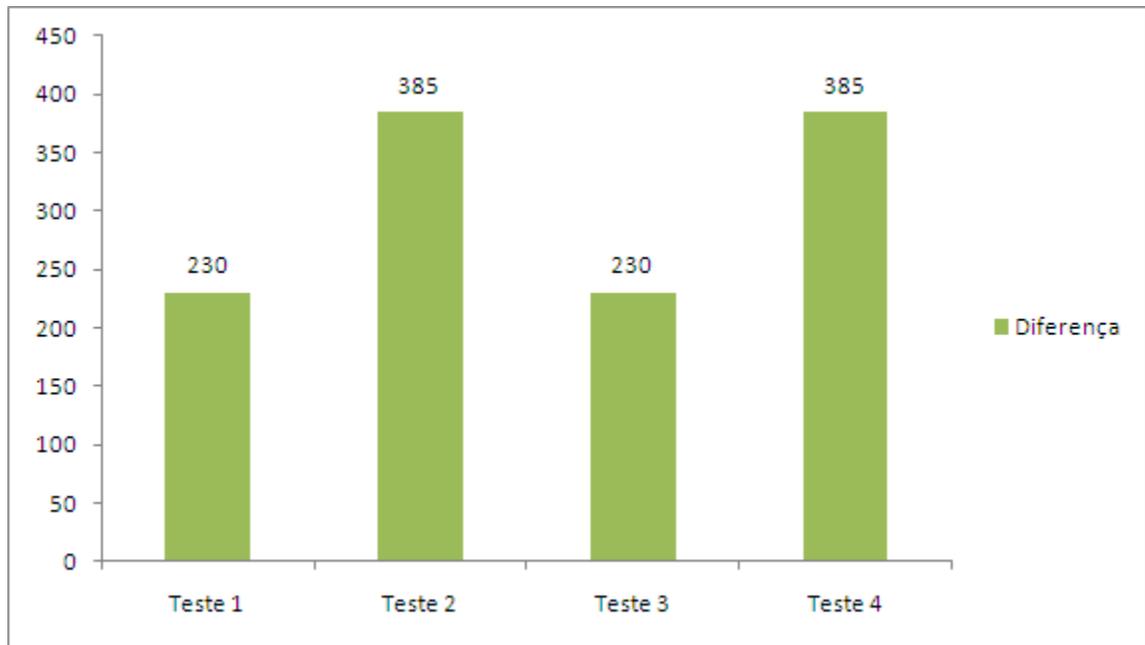


Figura 57 - Gráfico das diferenças entre as forças axial e radial nos testes 1 e 4.

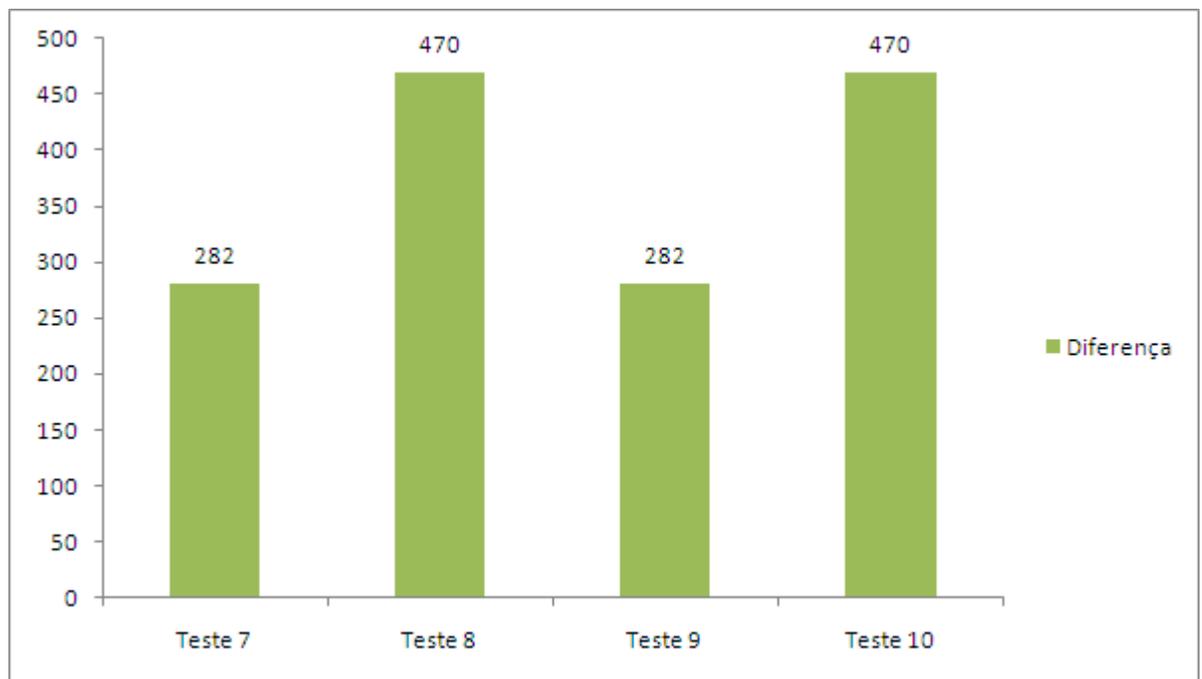


Figura 58 - Gráfico das diferenças entre as forças axial e radial nos testes 7 e 10.

## 6. Conclusões e sugestões para próximos trabalhos

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas nos testes realizados.

O avanço por dente influenciou, dentro das condições testadas, a vibração do processo. Em todas as condições testadas, avanços por dente maiores implicaram em maiores níveis de vibração;

A velocidade de corte não apresentou uma tendência bem definida de influência na vibração;

Larguras de corte diferentes apresentaram níveis de vibração diferentes, provavelmente por modificar a rigidez da fixação da peça;

Para ângulo de posição de  $43^\circ$  a condição de menor avanço por dente e menor velocidade de corte apresentou menor vibração, porém essa é a situação de menor produtividade;

A profundidade de corte influenciou a vibração, por isso, adotar uma condição de desbaste com esse parâmetro é inviável em termos de vibração e principalmente de ruído;

O ângulo de posição da fresa influenciou a vibração, ângulos maiores geraram vibrações mais elevadas, provavelmente por causa da maior componente radial da força de corte.

Como sugestões para continuação deste trabalho:

Testar as mesmas condições de corte com variação de  $j$ ;

Testar geometrias diferentes de fresa, com ângulos positivos;

Trabalhar com fresas de alto avanço;

Fresas com diâmetro menor.

## Referências

ABNT, NBR 6162. Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais - terminologia. 1989.

ABNT, NBR 6163. Conceitos da técnica de usinagem – Geometria da cunha cortante – Terminologia. 1980.

ALTINTAS Y., **Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design**. ed. Cambridge University Press, 2000.288p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-6175: **Processos Mecânicos de Usinagem**. Rio de Janeiro: 1971. 19p.

BECK, W. B. **Alta velocidade e ferramentas de alto desempenho reduzem o tempo de usinagem**. Máquinas e Metais, n. 387, p. 40-47, setembro 1998.

BEZERRA, A. A. **Estudo do desgaste no roscamento com alta velocidade em ferro fundido**. São Carlos, SP, 2003. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

BOFF, C. R. 2003, 157p, **Metodologia de análise de blocos de motores**. Dissertação de mestrado: Universidade federal de Santa Catarina.

CALDEIRANI Filho, J. **Estudo e Monitoramento do Processo de Fresamento Frontal com Fresas de Insertos Intercambiáveis**. 1998. Tese de doutorado: Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

CABRAL, G. F. **Seleção de parâmetros para otimização do processo de usinagem de componentes aeronáuticos em alumínio.** 2006. 62f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos.** 6.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1977. 576 pg.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** 3 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1974. pg.318.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 5. ed. São Paulo: Artiliber Editora, 2006. 244p.

DOS SANTOS, Rezende G. **Transformações de fases em materiais metálicos.** Ed. Unicamp, 2006.

DUARTE, M. A. V. **Manutenção Preditiva Via Análise de Vibrações.** Apostila Didática. Laboratório de Vibração e Acústica, FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia, 2005, Uberlândia, MG.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos de Usinagem dos Metais.** São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1970.

FERRER, Jorge A. G. Uma Contribuição ao Fresamento Frontal de Superfícies Irregulares de Ferro Fundido Cinzento. 2006. Tese de Doutorado: Escola de Engenharia de São Carlos.

FRITZ, K.; KONIG, Wilfried. “**Fertigungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen**”, 1997, Traduzido por Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter, Prof. Dr.-Eng. Walter Lindolfo Weingaertner - **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida.**

FERNANDES, JOÃO CANDIDO. “**Segurança nas vibrações sobre o corpo humano.**” Prof. Dr. João Candido Fernandes, 2000.

KENNAMETAL. Cast iron turning guide. Latrobe, PA: Kennametal Inc., 2003. 98p.

KENNAMETAL, **Fresamento** - 301.00 PSA. Catálogo. Alemanha: Kennametal Hertel. [2002]. 240p.

LAND ROVER, Norma RES 21 FC 01, Rover Engineering Standard, Title: **High Duty Grey Cast Iron**, Issue nº10, de Julho de 1996.

MACHADO, A.R.; Silva, M.B., **Usinagem dos metais**, 1999. 4ª edição. Uberlândia MG: Editora da UFU. 172 pg. Apostila.

Maia, Luís H. A., Jânes 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](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/4950-boletim-11)

MARCONDES, Francisco. **A História do Metal Duro** – Unida Artes Gráficas e Editora, 1990., pg.159 e 160.

Mehta, N. K., P.C. Pandey and G. Chakravarti, 1983, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Roorkee (India). ScienceDirect. [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6V5B-47WTSD8-65&\\_user=10&\\_coverDate=11%2F01%2F1983&\\_rdoc=1&\\_fmt=high&\\_orig=search&\\_sort=d&\\_docanchor=&\\_view=c&\\_searchStrId=1343735431&\\_rerunOrigin=google&\\_acct=C000050221&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=10&md5=77856724845c04f8042e24ca2ba8871b](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V5B-47WTSD8-65&_user=10&_coverDate=11%2F01%2F1983&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&_view=c&_searchStrId=1343735431&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=77856724845c04f8042e24ca2ba8871b)

MELO, Anderson C. A., **Estudo das trincas de origem térmica geradas em ferramentas de metal duro durante o fresamento frontal**. 2001 Dissertação pós-graduação: Escola Engenharia de São Carlos – São Carlos, SP.

MÜHLE, H. B. **Mandrilamento com Cabeçotes de Excentricidade Regulável e Sistema de Balanceamento**. Florianópolis, 2000. 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina.

NEVES, D. **Uma contribuição ao fresamento de matrizes com fresa de topo esférica.** Campinas, 2002. 142 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica: Universidade Estadual de Campinas.

NUNES, Jacson M. **Análise do efeito das interpolações sobre a qualidade do fresamento de superfícies complexas.** 2007. 151f. Tese de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

ORHAN, Sadettin; ALI, Osman, NECIP, Camuscu;, ERSAN, Aslan. 2006, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kirikkale University - **Tool wear evolution by vibration analysis during end milling of AISI 3D cold work tool steel whit 35 HRC harness.**

<http://www.kku.edu.tr/~orhan/ndt3.pdf>

PIGARI, A. C. **Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Torneamento Usando Emissão Acústica.** 1995, 130p, Dissertação de Mestrado, DEF – FEM – UNICAMP, Campinas, SP.

POLLI, M. L., **Análise de estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte,** 2005. 214p. Tese doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina.

QUINTO, D. Cutting Tools: The future, **Tooling & Production.** Huebcore Communications Inc., maio 1996.

Rao, Singiresu. **Vibrações Mecânicas.** Editora Pearson, Prentice Hall (Grupo Pearson), 2009. 448p.

RIBEIRO, José L., **Forças de Usinagem no Fresamento de aços para Matrizes.**

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

Rotberg, J.; Braun, S.; Lenz, E. **Mechanical Signature Analyses in Interrupted Cutting.** CIRP Annals. 36 (1), pp. 249-252, 1987.

SANDVIK. [Ferros fundidos].Disponível em: <<http://www.cimm.com.br/>>. Acesso: abril 2003.

SANDVIK. **Fabricação de Moldes e Matrizes**. Catálogo. Suécia: Sandvik Coromant, 2002. 258p.

SANDVIK, **Modern Metal Cutting** – A Pratical Handbook, Suecia: Sandvik Coromant Technical Editorial, 1994.

Sandvik Coromant (2009), Catálogo de Ferramentas.

SALES, W. F.; BONNEY, J.; EZUGWU, E. O.; FADARE, D. A.; **Influence of Cutting Parameters on Acoustic Emission Signal when High Speed Turning of the Ti-6Al-4V Alloy** . In Press 2009.

Seco fresamento (2009), Catálogo de Ferramentas.

SHIN, K.; HAMMOND, J. K.; **Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers**. 1. Ed., West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2008.

SOUTO, Ulisses B. **Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica**, Tese de Doutorado: Universidade federal de Uberlandia, 2007.

SOUZA JÚNIOR, A. M.; **Estudos da Utilização de PCBN e Cerâmica Mista no Fresamento de Blocos de Motores de Ferro Fundido Cinzento**. 2001. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PUCMINAS, Belo Horizonte.

SIMAS, Alberto. **Uma contribuição ao estudo do fresamento frontal em blocos de motores de ferro fundido cinzento**. 2009. Dissertação de mestrado: Universidade estadual de Campinas – Unicamp.

SUDO, T. T.; BRAGHINI Junior, A.; COELHO, R. T. **O desgaste de ferramentas na usinagem de ferro fundido cinzento a alta velocidade**. O Mundo da Usinagem – Sandvik Coromant do Brasil, n.1, p. 27-31, 2009.

TRENT, E. M. ;Wright, P. K. **Metal Cutting**, Butterworth/Heinemann, Oxford, 2000, 446 p.