

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AUGUSTO FERREIRA CABAU
LUIZ GUSTAVO COSSICH

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO NO TORNEAMENTO INTERNO
UTILIZANDO FERRAMENTAS COM A RELAÇÃO COMPRIMENTO
DIÂMETRO ALTA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

(Tcc2 - Nº de Inscrição - 36)

CURITIBA

2015

AUGUSTO FERREIRA CABAU

LUIZ GUSTAVO COSSICH

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO NO TORNEAMENTO INTERNO
UTILIZANDO FERRAMENTAS COM A RELAÇÃO COMPRIMENTO
DIÂMETRO ALTA**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Milton Luiz Polli

CURITIBA

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "ANÁLISE DE VIBRAÇÃO NO TORNEAMENTO INTERNO UTILIZANDO FERRAMENTAS COM A RELAÇÃO COMPRIMENTO DIÂMETRO ALTA", realizado pelos alunos AUGUSTO FERREIRA CABAU e LUIZ GUSTAVO COSSICH, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Eng. Milton Luiz Polli
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Orientador

Prof. Dr. Eng. Marcio Henrique de Avelar Gomes
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Avaliador

Prof. Me. Eng. Maro Roger Guerios
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 30 de Novembro de 2015.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o entendimento das vibrações durante processos de torneamento interno. Ferramentas com grande comprimento em balanço são susceptíveis a ocorrência de vibrações auto excitadas durante a usinagem, impossibilitando o processo. Testes realizados para a obtenção de dados são feitos utilizando equipamentos de medição como microfones e plataformas de carga. Estes dados são utilizados para o levantamento de uma carta de estabilidade. O material usinado nos ensaios é o latão. Para aquisição e análise dos resultados, é utilizado algumas ferramentas do MATLAB. Observa-se que durante os processos instáveis, a vibração ocorre na frequência natural do sistema. Os dados das medições de esforços de corte durante a usinagem são registrados pela plataforma de carga. São realizadas análises matemáticas, no domínio do tempo, pelo método iterativo de Euler a fim de comparar os resultados obtidos nos ensaios. Esta modelagem é feita utilizando o programa MATLAB. Os resultados obtidos nos ensaios serão comparados com os simulados, buscando avaliar a fidelidade do modelo e justificar eventuais resultados discrepantes.

Palavras-chave: Usinagem interna, Análise de Vibrações, Relação comprimento diâmetro alto

ABSTRACT

This paper aims the understanding of vibrations during internal turning processes. Tools with great length in balance are more likely to present self excited vibrations during machining. Tests conducted for obtaining data were performed using microphones and loading platforms. This data are used to survey a chart of stability. The material machined is brass. An open source MATLAB toolbox was used for data acquisition and analysis. It was possible to observe that during the unstable processes, the vibrations occurs in the natural frequency of the system. Measurement data of cutting forces during machining are recorded by the loading platform. Mathematical analysis are performed in the time domain, using the interactive Euler method to compare the test results obtained. This modeling is done using MATLAB software. Results from tests were compared with simulations, seeking to evaluate the fidelity of the model and justify divergent results.

Keywords: Internal machining, Vibration Analysis, Ratio length by diameter high

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no torneamento ..	17
Figura 2 - Força de Usinagem e suas Diversas Componentes na Operação de Torneamento	18
Figura 3 - Geometria de corte	20
Figura 4 - Variação da pressão específica de corte com o avanço	21
Figura 5 - Variação da pressão específica de corte com a profundidade de corte	21
Figura 6 - Representação de um sistema com um grau de liberdade	22
Figura 7 - Partes imaginária e real da função transferência	24
Figura 8 - Mecanismo de Vibração Auto Excitada.....	26
Figura 9 - Rugosidade superficial devido a vibrações	27
Figura 10 - Carta de Estabilidade.....	29
Figura 11 - Processo de amortecimento	30
Figura 12 - Plataforma de Medição de Esforços fixada no carro transversal do Torno.	35
Figura 13 - Montagem do Amplificador de Carga, Dispositivo de Aquisição e do Computador.....	35
Figura 14 - Placa de aquisição e Computador	36
Figura 15 - Montagem do microfone	37
Figura 16 – Forças resultantes dos processos de corte.....	38
Figura 17 - Microscópio Taylor Hobson CCI.....	41
Figura 18 - Resposta em Frequência	42
Figura 19 – Acelerância	43
Figura 20 - Análise para o ensaio com 1000 rpm e $a_p=1,0$ mm.....	44
Figura 21 - Análise para o ensaio com 5000 rpm e $a_p=0,5$ mm.....	44
Figura 22 - Resposta em frequência no processo a 5000 rpm	45
Figura 23 - Resposta em frequência no processo a 1000 rpm.....	45
Figura 24 - Acabamento superficial para processos à 5000 e 1000 rpm, respectivamente	46
Figura 25 - Perfil 2D da peça usinada a 1000 rpm	47
Figura 26 - Perfil 2D da peça usinada a 5000 rpm	47
Figura 27 - Usinagem à 1000 rpm e a_p de 1,0 mm; 2,0 mm e 3,0 mm	48
Figura 28 - Comparação entre os processos a 2000 rpm e diferentes profundidades de corte	49
Figura 29 - Acabamento superficial na usinagem a 2000 rpm e $a_p=0,5$, 0,625 e 0,75 mm, respectivamente	49
Figura 30 - Usinagem à 3000 rpm e a_p de 0,125 mm, 0,25 mm e 0,5 mm	50
Figura 31 - Acabamento superficial na usinagem a 3000 rpm e $a_p=0,125$ mm	50
Figura 32 - Gráfico obtido na medição das forças e médias de F_c e F_f	51
Figura 33 - Gráfico obtido na medição das forças e média de F_p	51
Figura 34 - Carta de Estabilidade obtida a partir do MATLAB.....	53
Figura 35 - Comparação entre resultados simulados e ensaiados.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de Usinagem.....	37
Tabela 2 – Forças de usinagem.....	52
Tabela 3 – Pressão específica de corte.	52

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

Letras maiúsculas

A	μm	Amplitude das vibrações
D	mm	Diâmetro da ferramenta
E	N/m ²	Módulo de elasticidade
F ₀	N	Amplitude da força de excitação
F	N	Força
F _u	N	Força de Usinagem
F _{ap}	N	Força de Apoio
F _c	N	Força de corte
F _t	N	Força Ativa
F _f	N	Força de avanço
F _p	N	Força na passiva
F _r	N	Força na direção radial
F _t	N	Força na direção tangencial
F _x	N	Força na direção x
Im [G]	m/N	Componente imaginária da função transferência
L	mm	Comprimento da ferramenta
M _t	N.m	Momento torçor
Re[G]	m/N	Componente real da função transferência
X	m	Amplitude das vibrações na direção x

Letras minúsculas

a _p	mm	Profundidade de corte
f	Hz	Frequência
g	m/s ²	Aceleração da gravidade
h	mm	Espessura de usinagem
k	N/m	Rigidez
K _s	Kg/mm ²	Pressão específica de corte
m	kg	Massa
n	min ⁻¹ , rpm	Rotação por minuto
r	-	Razão entre a frequência de excitação e a natural
r _p	mm	Raio da pastilha
r _ε	mm	Raio de quina
t	s	Tempo
v _c	m/min	Velocidade de corte
v _f	m/min	Velocidade de avanço
v _z	m/min	Velocidade de ajuste
x	m	Deslocamento na direção x
x'	m/s	Velocidade na direção x
x''	m/s ²	Aceleração na direção x

Letras gregas

γ_0	graus	Ângulos de saída da ferramenta
λ_s	graus	Ângulo de inclinação da ferramenta
α_0	graus	Ângulo de folga
α	rad	Ângulo de fase medido a partir de um tempo de referência
φ	rad	Ângulo de fase das vibrações
ρ	kg/m	Massa por unidade de comprimento
ω	rad/s	Velocidade angular
ω_n	rad/s	Frequência natural
ω_d	rad/s	Frequência natural com amortecimento
ω_c	rad/s	Frequência das vibrações regenerativas
ξ	-	Razão de amortecimento
Φ	m/N	Função transferência (função resposta em frequência, receptância)
φ	rad	Fase das vibrações

Sumário

1 INTRODUÇÃO	13
2 ESTADO DA ARTE	15
2.1 REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1.1 Usinagem.....	15
2.1.2 Forças de Corte	17
2.1.3 Fundamentos de vibrações livres e forçadas.....	22
2.1.4 Origem das Vibrações	25
2.1.5 Modelos de Processos.....	27
2.1.6 Carta de Estabilidade.....	29
2.1.7 Detecção de Vibrações na Usinagem.....	31
3 METODOLOGIA.....	33
3.1 DETERMINAÇÃO DAS FUNÇÕES RESPOSTA EM FREQUÊNCIA (FRF'S)..	33
3.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO DOS SINAIS DE ÁUDIO	33
3.3 FERRAMENTAS.....	34
3.4 MÁQUINA-FERRAMENTA	34
3.5 FORÇAS NA USINAGEM.....	34
3.6 METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	36
3.7 SIMULAÇÕES DO PROCESSO.....	38
3.8 RUGOSIDADE	41
3.9 MATERIAL.....	41
4 RESULTADO DOS ENSAIOS.....	42
4.1 FUNÇÃO RESPOSTA EM FREQUÊNCIA (FRF)	42
4.2 ENSAIOS NO TORNO CNC	43
4.2.1 Comparação entre processos a 1000 e 5000 rpm	43
4.2.2 Ponto de estabilidade de um processo	47
4.3 DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS DE USINAGEM.....	51
4.4 SIMULAÇÕES NO MATLAB.....	52
5 CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS.....	56
ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DO ACELERÔMETRO ICP 352C65	59

1 INTRODUÇÃO

No século XX, máquinas e ferramentas tiveram uma evolução considerável. Devido aos avanços tecnológicos estas se tornaram mais potentes, precisas e automáticas. Esta evolução considerável se deu graças ao desenvolvimento da indústria em geral. As primeiras preocupações com vibrações em máquinas ferramentas surgiram no início do século XX, em 1907, Taylor afirmou que a vibração é o “mais obscuro e delicado de todos os problemas enfrentados pelo operador” e até hoje autores referem-se à vibração como um fator limitante nos processos de usinagem. (Quintana et al, 2011)

Com o passar dos anos ocorreu um grande aumento na demanda de materiais industrializados. Este consumo influencia diretamente a qualidade dos produtos e a velocidade em que devem ser produzidos e entregues aos clientes. Como consequência, novas tecnologias nos processos de fabricação, montagem, logística, entre outras devem ser estudadas e implantadas.

Este trabalho destaca um dos processos que impactam diretamente na velocidade em que os produtos são entregues. As técnicas de usinagem, por fresamento ou torneamento, são provedoras de grande parte dos produtos que conhecemos.

Além da velocidade com que estas peças devem ser entregues, também é de extrema importância que estes produtos, dentro de suas finalidades, tenham uma qualidade e acabamento superficial em parâmetros aceitáveis.

Os processos de usinagem são sempre acompanhados de vibrações e estas são limitadas de acordo com o processo que está sendo executado. Nos processos de desbaste, o nível de vibração é limitado pela influência que a mesma tem sobre a vida da ferramenta. Já nos processos de acabamento, o nível é limitado pela influência que este tem sobre a qualidade da superfície e precisão dimensional. (Polli, 2005)

As operações de usinagem são influenciadas pela dinâmica da estrutura da máquina-ferramenta e pela dinâmica do processo de corte. A primeira é analisada usando métodos e teorias da dinâmica estrutural. A dinâmica do processo de corte é menos conhecida, uma vez que métodos teóricos e experimentais para seu estudo ainda estão em desenvolvimento (Ehmann et al, 1997). As vibrações relativas entre

ferramenta e peça podem ter fonte externa à máquina-ferramenta, ser causadas pela máquina-ferramenta ou ainda geradas pela própria usinagem.

Máquinas-ferramenta desenvolvidas nas últimas décadas resolveram boa parte dos problemas de vibração. Projetistas de máquinas-ferramenta em fases iniciais de desenvolvimento estão preocupados com características de vibração, engenheiros de produção sabem que as vibrações diminuem a vida da ferramenta, geram acabamentos de superfície inaceitáveis sobre as peças usinadas e reduzem a produtividade. (Quintana et al, 2011)

No processo de torneamento, três diferentes tipos de vibrações mecânicas estão presentes devido à falta de rigidez dinâmica e da rigidez do sistema, que compreendem a ferramenta, o porta-ferramenta, a peça e a máquina (Tobias, 1958). Podemos classificar estas vibrações de três maneiras, Livres, Forçadas e Auto Excitadas ou regenerativas.

As vibrações Auto Excitadas são mais complexas e mais prejudiciais aos processos de torneamento (Crede, 1961). A vibração Auto Excitada pode ser reconhecida pelo ruído produzido, pelas marcas de vibração sobre a superfície usinada, e pelo aparecimento de cavacos com variação da espessura produzida no torneamento. Nesses casos, a usinagem acompanhada de vibração é inaceitável por causa das marcas geradas sobre a superfície usinada e devido à grande variação da força de corte, que pode causar a ruptura da ferramenta ou de qualquer outra parte da máquina (Huang, 2006).

O foco deste trabalho são as vibrações regenerativas durante o processo de usinagem interna. Utilizando uma ferramenta longa para forçar este tipo de vibração, simulações e experimentos são realizados para o levantamento de uma carta de estabilidade, onde as curvas do gráfico representam a fronteira entre regiões de estabilidade e instabilidade onde ocorrem vibrações (Tobias e Fishwick, 1968). Em posse desta carta de estabilidade, é possível realizar operações em regiões de estabilidade dinâmica. Contribuindo assim com a disponibilidade de informações a quem interessar sobre os processos de torneamento.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 REVISÃO DA LITERATURA

2.1.1 Usinagem

A maioria dos livros especializados na área de fabricação define que fabricar é transformar matéria-prima em produtos acabados, por vários processos seguindo planos bem organizados em todos os aspectos. A importância da fabricação pode ser melhor entendida ao observar que todos os objetos culturais ao nosso redor, com raras exceções, têm formas e dimensões diferentes.

Usinagem é um processo de fabricação do qual se retira material da peça a fim de gerar superfícies definidas, dando a ela formas e dimensões. Uma definição bem generalista diz que “como operações de usinagem entendemos aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou qualquer combinação destes três itens, produzem cavaco”. (Ferraresi, 1970)

“O torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado a obter superfícies através de rotações com a ajuda de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para isso a peça rotaciona em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo.” (ABNT NBR ISO 23125, 2013)

Este processo pode ser para dois fins, torneamento de desbaste e torneamento de acabamento. O primeiro tem como objetivo retirar grande quantidade de material da peça e por isso é realizado com valores altos de avanço e profundidade de corte. O segundo tem por finalidade conferir à peça precisão mais elevada e melhor acabamento superficial e por isso é realizado com baixos valores de avanço e profundidade de corte. (Biblioteca Digital - UFRGS, 2007)

Para executar o torneamento são necessários movimentos entre peça e ferramenta. Por convenção, os movimentos sempre estarão ocorrendo supondo que a peça está parada e, portanto, todo movimento é realizado pela ferramenta. Este procedimento permite padronizar sinais algébricos aos movimentos sempre tendo como referência a peça. Os movimentos podem ser classificados em ativos -

aqueles que promovem a remoção de material- e passivos - que apesar de fundamentais para o processo de usinagem, não promovem remoção de material (Diniz, 2013).

Movimentos ativos são divididos em:

- Movimento de corte: é o movimento entre a peça e a ferramenta que provoca a remoção de cavaco, caso ocorra sem o movimento de avanço, a remoção de cavaco ocorreria somente em uma única rotação;
- Movimento de avanço: é o movimento entre a ferramenta e a peça que, junto do movimento de corte, permite a remoção continua de cavaco durante várias rotações. Este movimento é continuo nos processos de torneamento e furação;
- Movimento efetivo de corte: é o movimento a partir do qual resulta o processo de usinagem. No torneamento, onde o avanço é continuo, o movimento efetivo é a resultante da composição dos movimentos de corte e de avanço.

Já os movimentos passivos são divididos em:

- Movimento de ajuste: movimento no qual é predeterminada a espessura da camada de material a ser removida;
- Movimento de correção: é o movimento empregado para compensar alterações de posicionamento devido, por exemplo, ao desgaste da ferramenta, variações térmicas ou deformações plásticas;
- Movimento de aproximação: movimento com o qual a ferramenta, antes de iniciar o processo, é aproximada da peça;
- Movimento de recuo: movimento com o qual a ferramenta, após a usinagem, é afastada da peça.

A todos estes movimentos são associadas direções, sentidos, velocidades e percursos como mostra a Figura 1 (Diniz, 2013), onde identificamos os mais importantes ao estudo.

- Direção efetiva, velocidade efetiva (V_e) e percurso efetivo (l_e);
- Direção de corte, velocidade de corte (V_c) e percurso de corte (l_c);
- Direção de avanço, velocidade de avanço (V_f) e percurso de avanço (l_f);

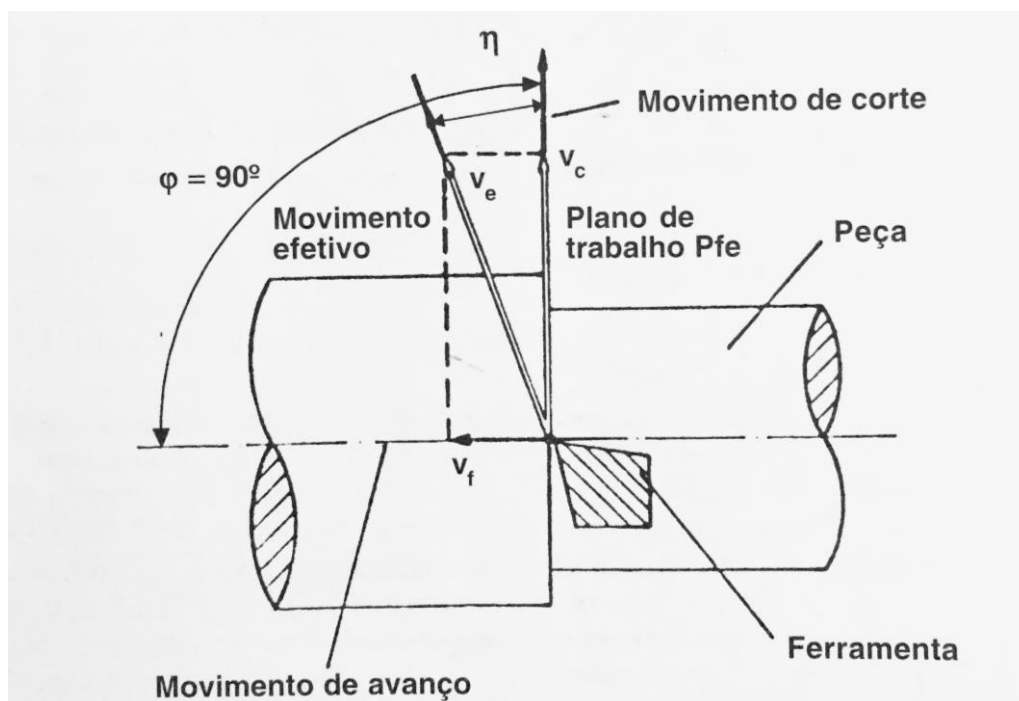


Figura 1- Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no torneamento
 Fonte: Diniz, 2013

2.1.2 Forças de Corte

O conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte nos processos de torneamento é de fundamental importância, pois eles afetam a potência necessária para o corte, a capacidade de obtenção de tolerâncias, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta. (Diniz, 2013).

2.1.2.1 Forças Durante o Torneamento

As forças são consideradas como uma ação da peça sobre a ferramenta, a força total resultante que atua sobre a cunha cortante durante a usinagem é chamada de força de usinagem (F_u). Porém não se trabalha com a força de usinagem propriamente, mas sim com suas componentes (Diniz, 2013).

A decomposição da força de usinagem a seguir,

Figura 2- Força de Usinagem e suas Diversas Componentes na Operação de Torneamento², será descrita de acordo com a norma DIN 6584. Portanto F_u pode

ser decomposta em uma componente no plano de trabalho, força ativa (F_t), e uma perpendicular ao plano de trabalho, força passiva ou de profundidade (F_p). A força ativa pode ser decomposta em diversas outras (Diniz, 2013).

2.1.2.1.1 Componentes da força Ativa (F_t)

Estas forças contribuem para a potência de usinagem, pois estão no plano de trabalho, onde os movimentos de torneamento são realizados (Diniz, 2013):

- Força de corte (F_c): projeção de F_u sobre a direção de corte;
- Força de avanço (F_f): projeção de F_u sobre a direção de avanço;
- Força de apoio (F_{ap}): mesma direção e sentido de F_c ;

2.1.2.1.2 Componentes de força passiva (F_p)

Esta componente não contribui para a potência de usinagem, pois é perpendicular ao movimento (perpendicular ao plano de trabalho), mas é importante conhecer os parâmetros desta força, pois ela é responsável pela deformação elástica da peça e da ferramenta durante o corte (Diniz, 2013).

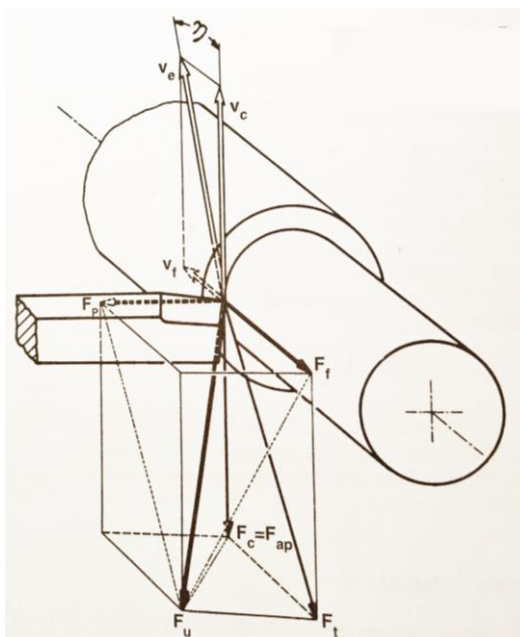


Figura 2- Força de Usinagem e suas Diversas Componentes na Operação de Torneamento

Fonte: Diniz, 2013

2.1.2.2 Variação da força de corte

Pode ser expressa pela relação

$$F_c = k_s A \quad (1)$$

Onde K_s representa a pressão específica de corte e A é a área da seção de corte, no torneamento pode ser obtida pelo produto do avanço (f) pela profundidade de corte (a_p) (Diniz, 2013).

2.1.2.2.1 Fatores que influenciam a pressão específica de corte (K_s)

Vários fatores são determinantes na variação de K_s . Em geral, quanto maior a dureza do material usinado, maior será a pressão específica de corte. Salvo algumas ligas que durante sua usinagem apresentam planos de baixa resistência ou inclusões que acabam funcionando como lubrificantes na interface cavaco-superfície, reduzindo a pressão específica de corte (Diniz, 2013)

O material da ferramenta apresenta uma pequena variação no coeficiente de atrito entre cavaco-ferramenta, não influenciando os valores de K_s . Quando se varia o material da ferramenta entre as diversas classes de metal duro, adequados para a usinagem de aços, a variação dos esforços de corte é desprezível (Nakayama e Arai, 1976).

Os ângulos de saída (γ_o) e de inclinação (λ_s) provocam uma diminuição de K_s à medida que seu valor aumenta, pois a deformação do cavaco diminui. Porém, o aumento do ângulo de saída diminui a resistência da ferramenta e aumenta sua sensibilidade aos choques. Pode-se observar a representação destes ângulos e seus planos na Figura 3. Sendo assim, indica-se a utilização de ângulos de saída e de inclinação negativos quando o torneamento é feito em materiais frágeis, pois os mesmos se deformam bem pouco antes da ruptura, tornando a influência destes ângulos na pressão de corte desprezíveis (Diniz, 2013).

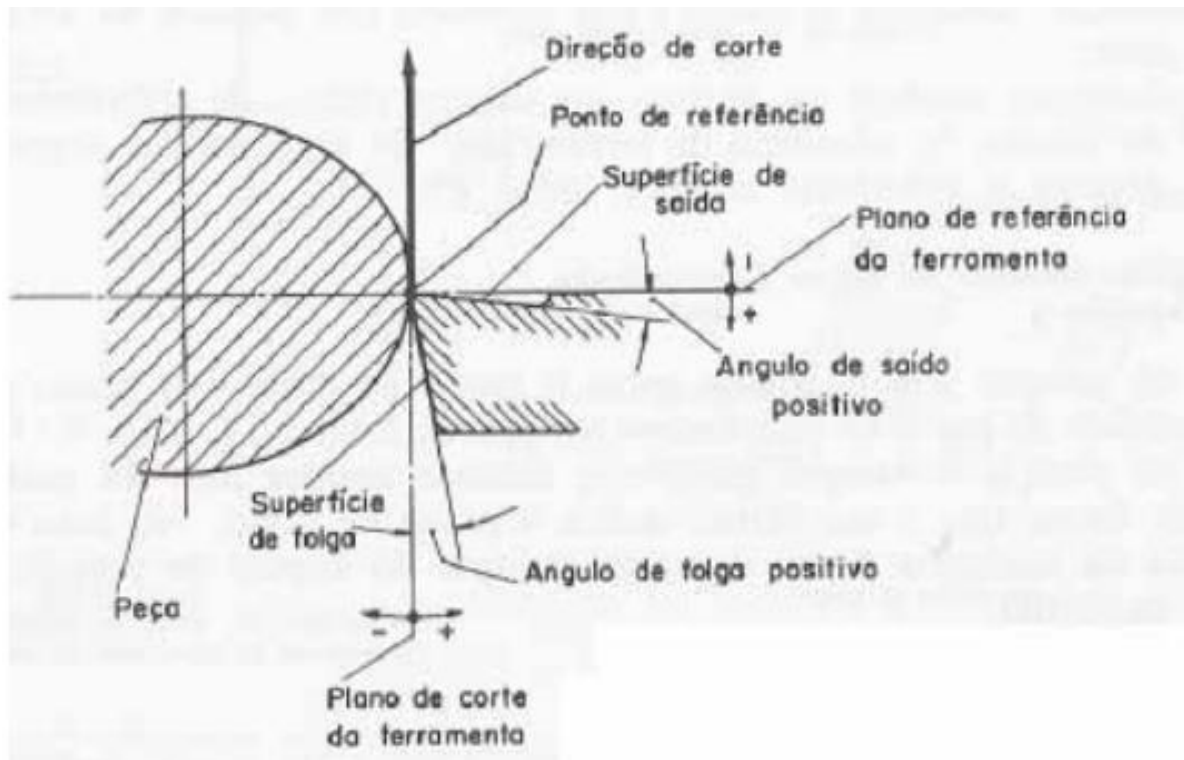


Figura 3 - Geometria de corte

Fonte: NBR-6163

Em geral, nos processos de torneamento é indicada a utilização de ferramentas com geometrias negativas, mesmo para materiais dúcteis, pois assim a cunha da ferramenta apresentara uma maior resistêcia ao choque e também pelo fato de que pastilhas intercambiáveis com geometrias negativas possuem arestas dos dois lados, diminuindo o custo por aresta (Diniz, 2013).

Quando há uma diminuição do ângulo de folga (α_0), o atrito entre a peça e a ferramenta aumenta e com isso o valor de K_s também aumenta.

Secção de Corte (A): a pressão especifica de corte diminui com o aumento da área da secção de corte, essa diminuição é devida principalmente pelo aumento do avanço f , como se observa na Figura 4. Já uma alteração da profundidade de corte não é tão relevante na variação de K_s , Figura 5, pois o aumento de a_p só faz aumentar o comprimento de contato ferramenta-peça, sem aumentar as velocidades envolvidas, a não ser para pequenos valores de profundidade de corte (Diniz, 2013).

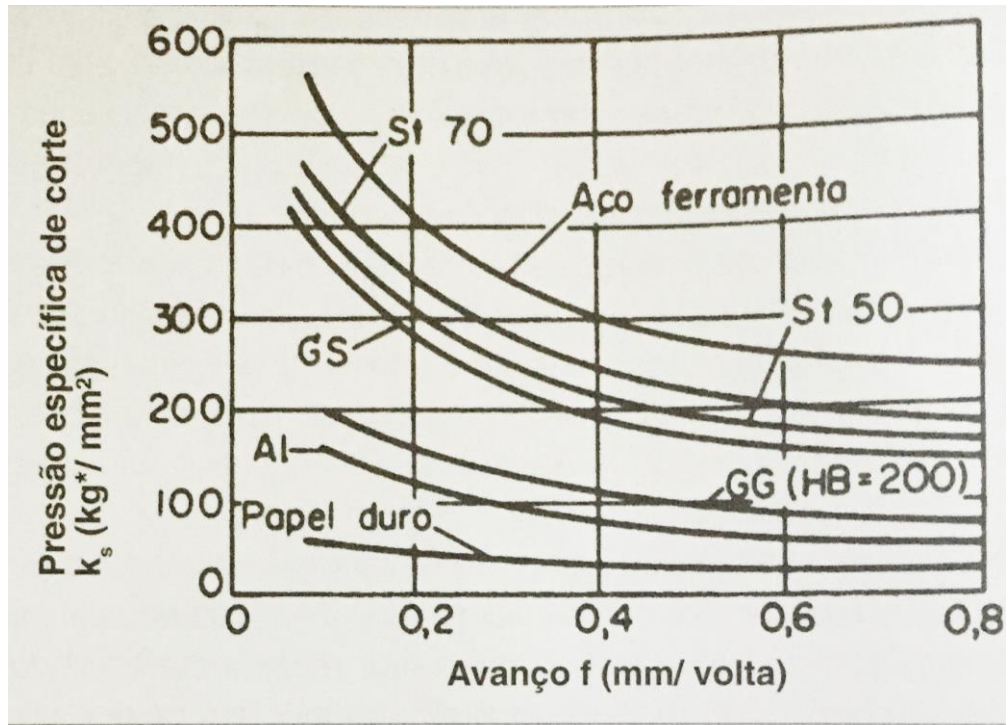


Figura 4- Variação da pressão específica de corte com o avanço
Fonte: Diniz, 2013.

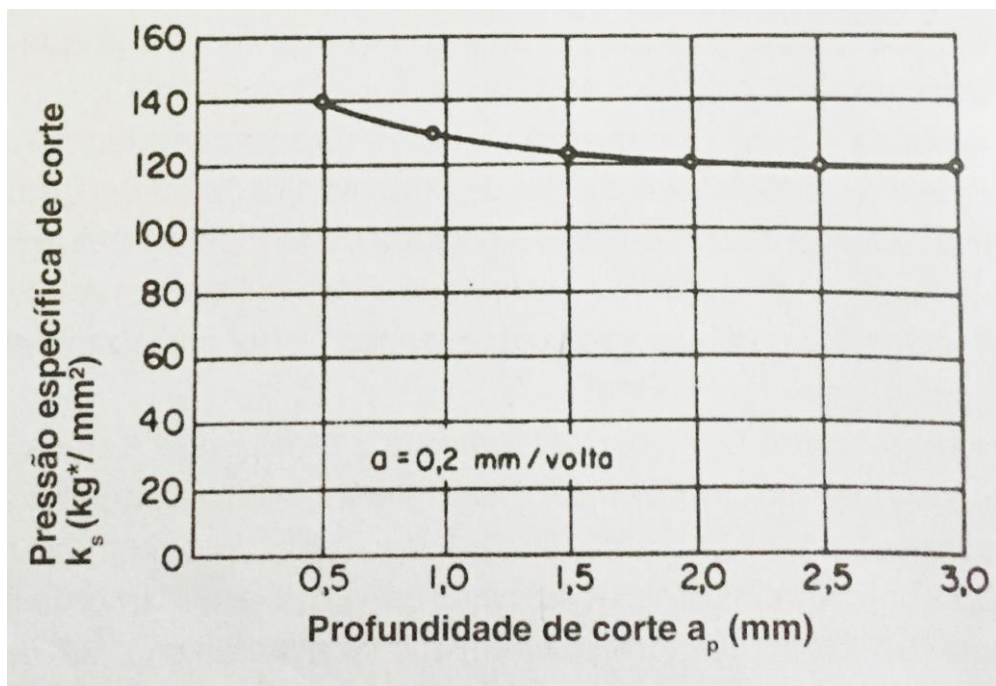


Figura 5- Variação da pressão específica de corte com a profundidade de corte
Fonte: Diniz, 2013.

2.1.2.3 Fatores que Influenciam as Forças de Avanço e Profundidade

Muito dos fatores que influenciam a força de corte, também influenciam as forças de avanço e profundidade, mas alguns fatores, como o raio da ponta da ferramenta e os ângulos de posição e de inclinação têm uma influência mais marcante nestas duas componentes da força de usinagem. A medida que o raio de ponta cresce a força de profundidade aumenta de uma maneira substancial e a força de avanço diminui. Já um crescimento do ângulo de posição gera um aumento da força de avanço, e o oposto ocorre com a força de profundidade. A influência do ângulo de inclinação (λ_s) nos valores da força de profundidade é inversa, F_p cresce com a diminuição de λ_s (Diniz, 2013).

2.1.3 Fundamentos de vibrações livres e forçadas

Uma estrutura simples com um sistema de um único grau de liberdade, pode ser modelada pela combinação de massa (m), mola (k) e amortecimento (c). Quando uma força externa $F(t)$ é exercida sobre a estrutura a sua mobilidade é descrita pela seguinte equação diferencial:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (2)$$

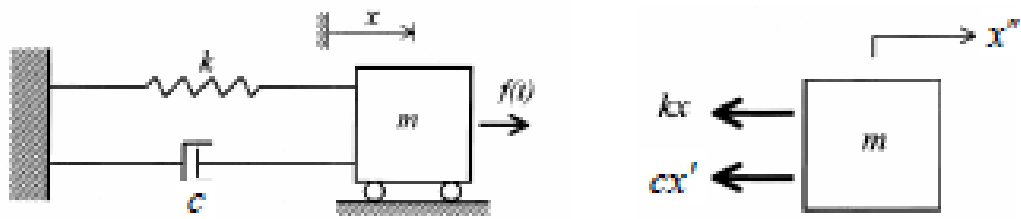


Figura 6 - Representação de um sistema com um grau de liberdade

Fonte: Ewins, 1984

Se o sistema recebe um impacto, ou quando está em repouso e é estaticamente retirado do seu equilíbrio e em seguida liberado, o sistema experimenta vibrações livres. A amplitude das vibrações decai com o tempo em função da constante de amortecimento do sistema. A frequência das vibrações é dominada pela rigidez e pela massa e é pouco influenciada pela constante de amortecimento viscoso, que é muito pequeno em estruturas mecânicas. Quando a constante de amortecimento é nula ($C=0$), o sistema oscila na sua frequência natural.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

Onde ω_n representa a frequência natural, m é a massa do sistema e k a rigidez do material. A razão de amortecimento é definida por $\zeta = c / 2 km$, que nas estruturas mecânicas é sempre menor que um. Na maioria das estruturas metálicas $\zeta < 0,05$. A frequência natural amortecida da estrutura é definida por:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta} \quad (4)$$

Onde ω_d simboliza a frequência amortecida do sistema. Segundo (Altintas, 2000) na usinagem as excitações externas são geralmente periódicas, mas não harmônicas. Qualquer força periódica pode ser representada por suas componentes harmônicas.

É mais conveniente matematicamente usar funções harmônicas complexas em vibrações forçadas. A força harmônica pode ser expressa por $F(t) = F_0 e^{i\alpha} e^{i\omega t}$ onde α é a fase medida a partir de um tempo de referência ou posição angular em um plano complexo (Altintas, 2000). A resposta harmônica correspondente é $x(t) = X e^{i(\omega t + \Phi)}$, e quando esta é substituída na equação do movimento (2) obtém-se:

$$(k - \omega^2 m + j\omega c) X e^{i\phi} e^{i\omega t} = F(t) = F_0 e^{i\alpha} e^{i\omega t} \quad (5)$$

A amplitude resultante e a fase das vibrações harmônicas são respectivamente,

$$|\Phi(\omega)| = \left| \frac{X}{F_0} \right| = \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (6)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{-2\zeta r}{1-r^2} + \alpha \quad (7)$$

Onde a relação entre a frequência de excitação e a natural é $r = \omega / \omega_n$. A equação (6) é chamada função transferência, função resposta em frequência ou admitância da estrutura. A função transferência $\Phi(\omega)$ pode ser separada em componentes real $\text{Re}[\Phi]$ e imaginária $\text{Im}[\Phi]$ de $\frac{x}{F_0} e^{i(\Phi-\alpha)}$, (Altintas, 2000).

As partes imaginária e real da função transferência são mostradas separadamente na Figura 7.

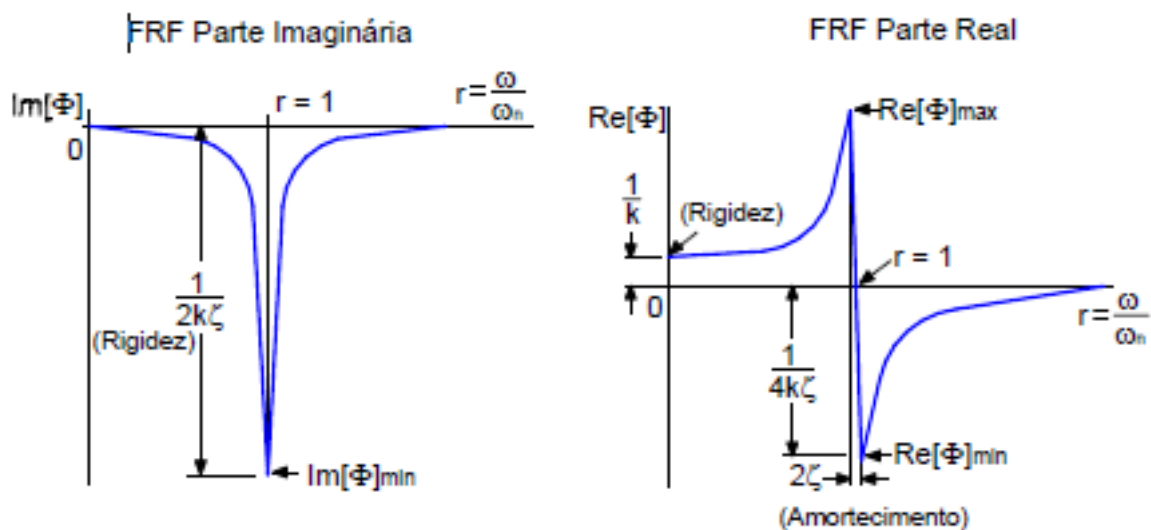


Figura 7 - Partes imaginária e real da função transferência
Fonte: Altintas, 2000.

A razão de amortecimento, rigidez e frequência natural podem ser estimadas a partir da função transferência. As funções transferência dos sistemas de múltiplos graus de liberdade são identificadas por testes dinâmicos estruturais. Os instrumentos de excitação mais efetivos são os vibradores eletromagnéticos ou eletro-hidráulicos. Estes são capazes de gerar forças em uma larga faixa de

frequências contendo os modos naturais dominantes das estruturas testadas (Ewins, 1984).

2.1.4 Origem das Vibrações

Nos processos de usinagem em geral estão presentes vibrações, elas podem ter origens em uma ou mais fontes e são provenientes do próprio processo de usinagem, do sistema vibratório da máquina ou de meios externos.

No processo de torneamento, diferentes tipos de vibrações mecânicas estão presentes devido à falta de rigidez dinâmica e da rigidez do sistema, que compreendem a ferramenta, o porta-ferramenta, a peça e a máquina (Tobias, 1958). Podemos classificar estas vibrações de três maneiras, Livres, Forçadas e Auto Excitadas.

Vibrações Livres são causadas por choques no processo de corte e as Vibrações Forçadas são geradas por problemas na máquina-ferramenta, como rotação de massas desbalanceadas, acionamentos por engrenagens e correias, rolamentos com irregularidades e por forças periódicas nos próprios motores de acionamento. Estas vibrações podem ser facilmente detectadas e controladas. No entanto, as vibrações Auto Excitadas são mais complexas e mais prejudiciais aos processos de usinagem, incluindo o torneamento (Crede, 1961).

As vibrações Auto Excitadas são conhecidas também como regenerativas. Segundo (Altintas, 2000), elas resultam de um mecanismo de auto-excitação na geração da espessura do cavaco durante as operações de usinagem. Um dos modos estruturais do sistema máquina-ferramenta-peça é excitado, inicialmente, por forças de corte. Uma superfície ondulada resultante da passagem de um gume é removida pelo subsequente, que também deixa uma superfície ondulada devido a vibrações estruturais. Dependendo da diferença de fase entre duas ondulações sucessivas as vibrações podem ser atenuadas ou ampliadas.

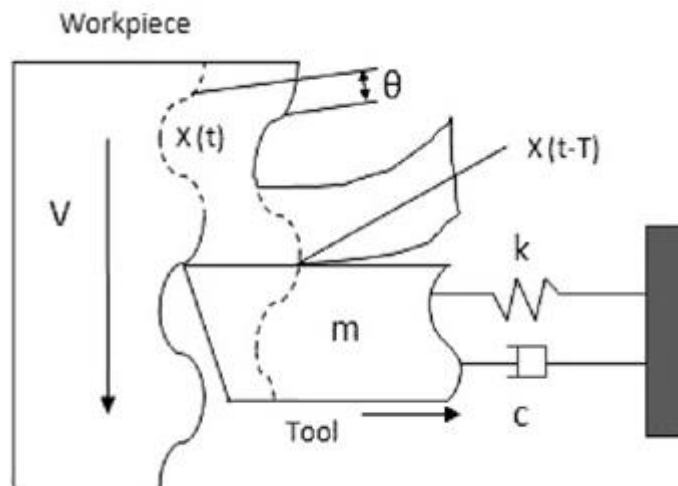


Figura 8 - Mecanismo de Vibração Auto Excitada
 Fonte: Siddhpura e Paurobally, 2012

O sistema massa (m), mola (k) e amortecedor (c), representado na Figura 8, mostra os parâmetros da ferramenta e V é a velocidade de corte da peça. $X(t)$ é a onda gerada na atual revolução e $X(t-T)$ é a onda gerada na revolução anterior da peça. A variação (θ) entre as ondas da revolução anterior $X(t-T)$ e da revolução atual $X(t)$ é o fator determinante da ocorrência de vibrações no torneamento. Se as duas ondas estão na mesma fase ($\theta=0$), as ondulações sobre a peça não crescerão e o processo irá manter-se estável, devido à variação da espessura do cavaco ser insignificante, resultando numa força relativamente constante sobre a ferramenta. Do ponto de vista da transferência de energia no sistema de torneamento, o aparecimento da vibração pode ser considerado como o limite da estabilidade do sistema no qual a energia fornecida para o sistema é igual à energia dissipada pelo sistema.

Então, quando não há variação entre ondas ($\theta=0$), não há excedente de energia no sistema, resultando em um processo de corte estável. No entanto, quando as ondas não estão na mesma fase ($\theta \neq 0$), as ondulações sobre a peça crescem, pois a somatória da energia a ser fornecida à ferramenta de corte e da energia dissipada são menores do que a energia fornecida. Essa variação de energia resulta em um processo de corte instável. Durante essas vibrações, a espessura do cavaco varia continuamente, que por sua vez, cria forças de corte

dinâmicas a uma frequência próxima de um dos modos naturais, e excita ainda mais o sistema (Siddhpura e Paurobally, 2012).

A vibração regenerativa pode ser reconhecida pelo ruído produzido, pelas marcas de vibração sobre a superfície usinada, e pelo aparecimento de cavacos com variação da espessura produzida no torneamento. Nesses casos, a usinagem acompanhada de vibração é inaceitável por causa das marcas geradas sobre a superfície usinada e devido à grande variação da força de corte, que pode causar a ruptura da ferramenta ou de qualquer outra parte da máquina (Huang, 2006).

A vibração é muitas vezes o fator limitante para altas taxas de remoção de material, que acaba ficando abaixo da capacidade da máquina, onde muitas vezes os operadores acabam selecionando parâmetros de corte conservadores e, em alguns casos, operações manuais adicionais são necessárias para remover as marcas das vibrações da peça. Devido a estas práticas comuns, há grandes perdas na produtividade.

2.1.5 Modelos de Processos

Assumindo que a ferramenta de corte está posicionada perpendicularmente a peça usinada, e a geração de vibrações é causada pela força de corte (F_c). Considerando que inicialmente não há irregularidades na superfície da peça, mas que a partir da primeira revolução, a ferramenta começa a deixar ondulações sobre a peça na direção x , que é a direção radial da força de corte (Altintas, 2000)

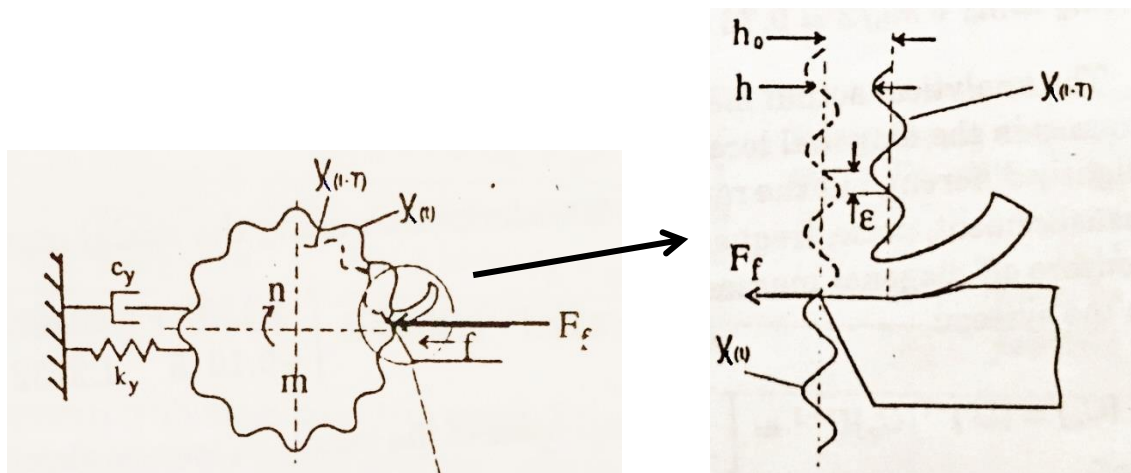


Figura 9 - Rugosidade superficial devido a vibrações
Fonte: Altintas, 2000

Durante a segunda revolução, a superfície já apresenta irregularidades representadas por $x(t)$, Figura 9, gerada pelas vibrações causadas durante a primeira revolução $x(t-T)$. Portanto, a espessura do cavaco não será mais constante e irá variar como uma função das frequências de vibração e velocidade de corte. Uma equação geral para a espessura pode ser definida abaixo:

$$h(t) = h_0 - [x(t) - x(t - T)] \quad (8)$$

Onde $h(t)$ representa a espessura do cavaco e $[x(t)-x(t-T)]$ é a variação da espessura do cavaco gerada pelas vibrações no tempo presente t e do período T anterior. Assumindo que a peça pode ser representada aproximadamente por um sistema de um grau de liberdade na direção radial, a equação de movimento para o sistema pode ser expressa como:

$$m_x \ddot{x}(t) + c_x \dot{x}(t) + k_x x(t) = F_c(t) \quad (9)$$

Como esta função depende dos resultados das vibrações anteriores e instantâneas, a parte esquerda da expressão, que representa as vibrações auto excitadas, é uma equação diferencial atrasada. A função da força do lado direito é calculada com base na pressão específica de corte do material (K_s), do avanço (b) e espessura do cavaco ($x(t)-x(t-T)$).

$$F_c(t) = K_s b [x(t) - x(t - T)] \quad (10)$$

Caso a vibração gerada for muito alta, a ferramenta irá desencostar da peça, deixando de produzir cavaco e zerando a força de corte (Altintas, 2000).

A estabilidade, das vibrações auto excitadas, é analisada utilizando a teoria linear de (Tlustý e Tobias, 1958). Não linearidades como o descolamento da ferramenta da superfície de corte, múltiplas regenerações e parâmetros de corte não lineares são negligenciados por esta teoria.

Para uma análise onde estas não linearidades devem ser consideradas, pode-se utilizar a solução no domínio do tempo. Esta abordagem é uma solução iterativa resolvida pelo método de Euler. As acelerações são calculadas a partir das

forças para cada grau de liberdade e duplamente integradas para se chegar aos deslocamentos da ferramenta. (Tlusty e Ismail, 1981)

$$x'' = \frac{F_x - C_x x' - K_x x}{m_x} \quad (11)$$

$$x' = x'' dt + x' \quad (12)$$

$$x = x' dt + x \quad (13)$$

2.1.6 Carta de Estabilidade

A carta de estabilidade teve seu conceito estabelecido a mais de 40 anos por Tobias e Fishwick. A Figura 10 mostra um exemplo deste diagrama, onde a coordenada vertical representa a profundidade de corte radial e a horizontal corresponde à rotação do sistema. As curvas do gráfico representam a fronteira entre regiões de estabilidade (abaixo das curvas) e instabilidade (acima) onde ocorrem vibrações (Tobias e Fishwick, 1968).

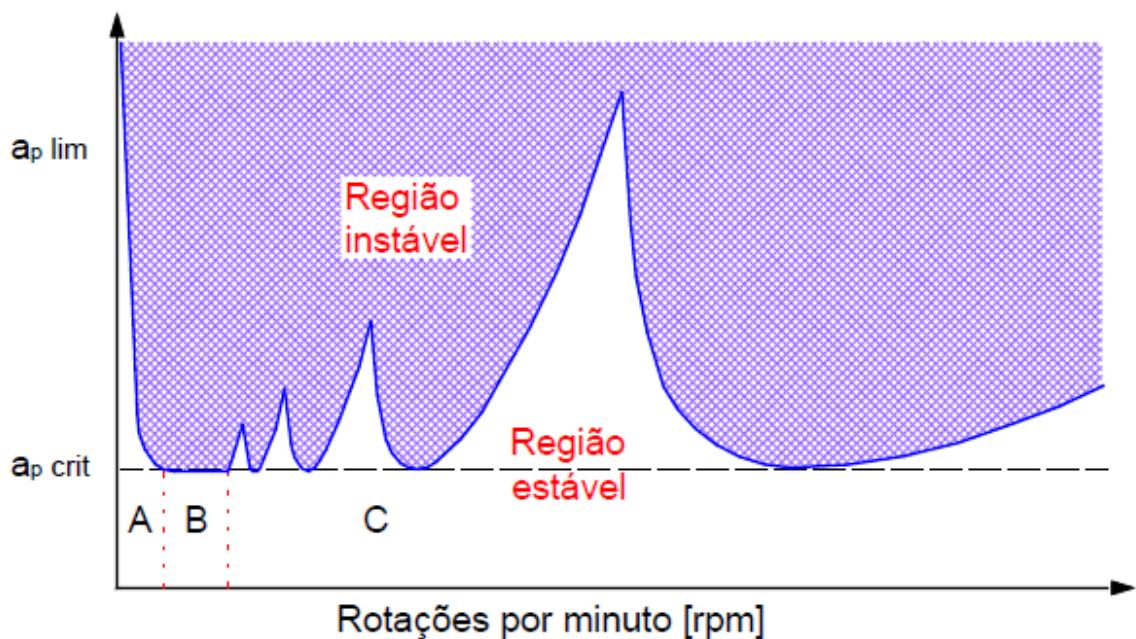


Figura 10 - Carta de Estabilidade
Fonte: Smith e Tlusty, 1992

Segundo (Smith e Tlusty, 1992) para rotações mais baixas ocorre o efeito de amortecimento devido ao pequeno comprimento de onda das vibrações do modo dominante. O mecanismo de amortecimento pode ser explicado com auxílio da Figura 11. A ferramenta se desloca da esquerda para a direita vibrando na direção vertical. Quando esta segue sua trajetória descendo a curva de A para B, o ângulo de incidência efetivo diminui, enquanto que subindo de C para D, este aumenta. A componente vertical da força de usinagem depende do valor do ângulo de incidência efetivo. Ela aumenta à medida que ele tende a zero ou torna-se negativo. Isto ocorre devido à maior interferência e atrito no flanco da ferramenta. A componente é máxima em B e mínima em D, variando em fase com a velocidade das vibrações, e está 90° defasada em relação ao deslocamento vibracional, que é máximo em A, caracterizando-se, portanto, uma força de amortecimento (Smith e Tlusty, 1992).

À medida que a rotação se eleva, o processo de amortecimento deixa de existir e os efeitos dos lóbulos de estabilidade começam a ser visíveis. Em velocidades de rotação mais altas, os lóbulos do diagrama passam a ser evidentes e as regiões de estabilidade aumentam. A maior estabilidade permite maior valor de profundidade de corte estável, obtida com a velocidade de rotação do eixo na qual a frequência de passagem de um dente se iguala à frequência natural do sistema. O sistema é estável na ressonância da força de corte periódica com a frequência de passagem de um dente e a frequência natural do sistema. As vibrações forçadas estarão no seu máximo, mas isto na maioria dos casos não é problema (Tlusty, 2000).

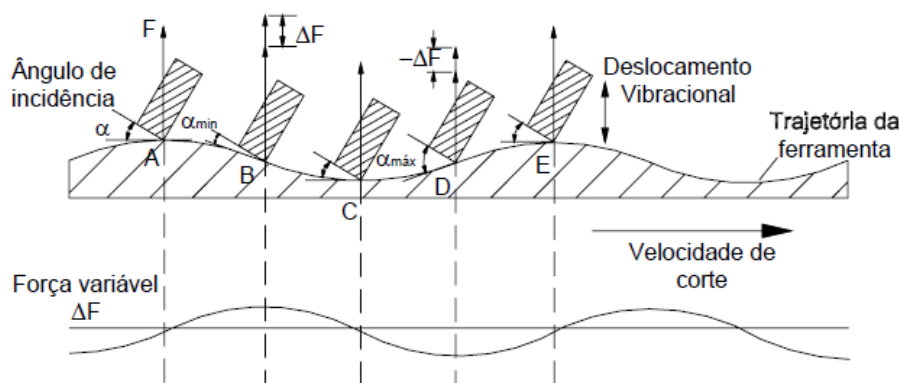


Figura 11 - Processo de amortecimento

Fonte: Smith e Tlusty, 1992

2.1.7 Detecção de Vibrações na Usinagem

A faixa de frequência do sensor e sua localização relativa ao evento a ser medido são aspectos críticos na detecção e controle de vibrações. Além disso, os sensores devem ser capazes de detectar vibrações emanadas de várias fontes, uma vez que o sinal pode resultar das vibrações da peça, ferramenta, eixo-árvore ou da estrutura da máquina. Geralmente, quanto mais próximo o sensor estiver da região de corte, mais confiáveis serão as medições. Mas a formação do cavaco e fluídos de corte podem danificar ou afetar seriamente sensores delicados, como os de deslocamento por capacitância ou ópticos (Smith, 1992 apud Tlustý et al).

Segundo (Tobias e Fishwick, 1968), os microfones fornecem um sinal aceitável para o uso na detecção e controle de vibrações na usinagem. São capazes de detectar sinais de vibrações provenientes da ferramenta, da peça e da máquina, mesmo para cortes com pequenas seções de usinagem. Sua banda de frequência é adequada e pode ser posicionada relativamente distante da região de corte sem perda de sensibilidade. Um problema significativo pode existir quando os microfones são empregados em ambientes com muitas fontes de ruído. Estes podem comprometer as medições da pressão sonora obtidas do processo de corte. Técnicas de direcionamento podem ser empregadas para isolar o processo de outras fontes potenciais de ruído (Tobias, 1968 apud Fishwick et al).

Segundo (Müller, 2002), máquinas-ferramentas que possuem eixos-árvores com mancais magnéticos são capazes de identificar vibrações a partir de leituras dos seus sensores de posicionamento. A análise é feita a partir das órbitas do eixo que correspondem a curvas descritas pelo rotor em um plano perpendicular ao seu eixo de rotação. Se não houver vibrações, o processo é suave e o eixo descreve aproximadamente a mesma curva em duas rotações consecutivas. Quando ocorrem vibrações, o eixo descreve uma curva diferente a cada rotação (Müller, 2002).

Thomas e Beauchamp realizaram uma investigação estatística dos parâmetros de ferramentas de corte durante um torneamento a seco. Forças de corte foram medidas utilizando *Strain Gauges* nas direções radial e tangencial. Um acelerômetro de três eixos foi montado na ferramenta a fim de medir a aceleração nas direções do avanço, corte e também na direção radial (Thomas e Beauchamp, 2003).

Davies utilizou dois sensores de capacitância montados em um dispositivo de fixação, para medir os deslocamentos da ferramenta durante a usinagem. Para a análise da estabilidade foi considerada a trajetória do eixo da fresa e os espectros dos sinais de deslocamento (Davis et al, 1998).

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho foi baseada no desenvolvimento de ensaios sistemáticos em laboratório procurando reproduzir uma situação encontrada em um ambiente industrial, o torneamento interno utilizando uma ferramenta com a relação comprimento/diâmetro elevado, que geram instabilidades no processo e podem causar danos a ferramenta e a peça.

A avaliação da estabilidade do processo foi realizada a partir de sinais de áudio. Posteriormente, simulações computacionais no MATLAB foram realizadas para serem comparadas com os resultados encontrados nos ensaios em laboratório com a finalidade de montar uma carta de estabilidade.

3.1 DETERMINAÇÃO DAS FUNÇÕES RESPOSTA EM FREQUÊNCIA (FRF'S)

Através de teste de impacto foi obtida a função resposta em frequência na ponta da ferramenta. Para isto, com a máquina parada, foi fixado um acelerômetro tipo ICP 352C65, Anexo A, na extremidade da ferramenta montada na máquina e esta excitada por um martelo munido de um transdutor de força piezolétrico tipo ICP 086C03. A análise dos sinais foi posteriormente realizada com o programa ITAtoolbox. Desta maneira, a frequência natural necessária para a interpretação dos resultados experimentais foi identificada.

3.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO DOS SINAIS DE ÁUDIO

Um microfone foi utilizado como sensor para a detecção do surgimento de vibrações durante o processo, o mesmo foi escolhido devido a sua adequada banda de frequência e a capacidade de detectar sinais de vibração provenientes da ferramenta, da peça ou da máquina.

Para a medição do sinal de áudio durante a usinagem, foi utilizado um sistema composto dos seguintes elementos: microfone (01dB-Metravib, MCE212, número de série 65518), placa de aquisição de sinais (Roland Quad-Capture, Analog 2x2 Digital 2x2), microcomputador e o software ITAtoolbox para a análise dos sinais.

3.3 FERRAMENTAS

Para os ensaios, foram utilizados insertos intercambiáveis CCMT 09T304-SM IC9150 e um porta-ferramenta de 160,0 mm de comprimento e 16,0 mm de diâmetro. Pré-testes foram realizados para definir a relação comprimento/diâmetro, pois os ensaios deverão começar com vibrações estáveis e com a variação dos parâmetros de corte atingir a instabilidade. Foi utilizada uma montagem de ferramenta com 100,0mm de comprimento em balanço e 16,0mm de diâmetro, caracterizando uma relação comprimento/diâmetro de 6,25, para levantamento da carta de estabilidade.

3.4 MÁQUINA-FERRAMENTA

Os ensaios foram realizados no laboratório de CNC do Departamento de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Foram utilizados o Centro de Torneamento ROMI GL 240 e o Torno Convencional Nardini MS205, pois este permite a adaptação da placa de medição de esforços.

3.5 FORÇAS NA USINAGEM

A obtenção dos esforços durante o processo de usinagem foi feita por uma Plataforma de Medição de Esforços fixada no carro transversal de um Torno convencional.

O sistema de medição de forças foi composto por plataforma piezelétrica KISTLER Type 9257, Amplificador de Carga Multicanal KISTLER Type 5070, Dispositivo de Aquisição de Dados NI USB-6259 BNC junto com o Software NI SignalExpress LE instalado no computador do Laboratório de CNC, ambos da National Instruments (NI).

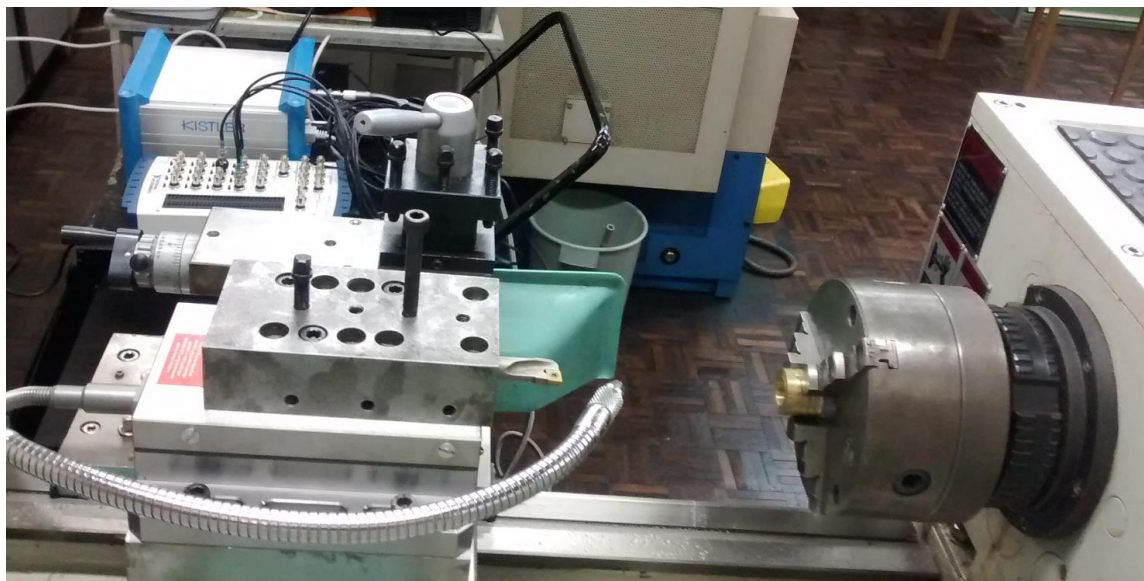


Figura 12 - Plataforma de Medição de Esforços fixada no carro transversal do Torno.

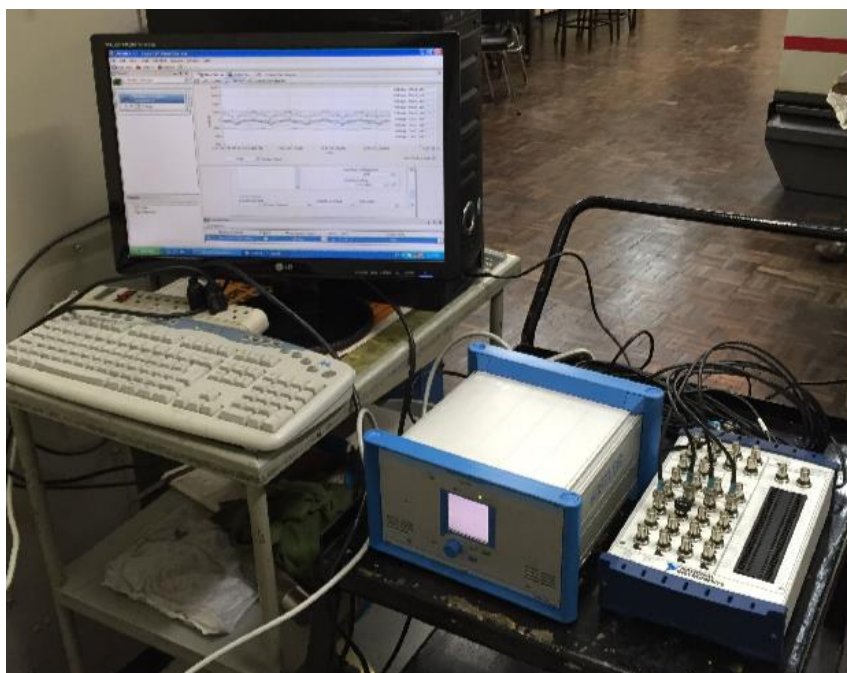


Figura 13 - Montagem do Amplificador de Carga, Dispositivo de Aquisição e do Computador.

Fixando valores de avanço (f) em $0,094\text{mm/rot}$, e de rotação em 1000 rpm , foi variado o valor da profundidade de corte (a_p) para serem medidas: forças de corte (F_c), forças passivas (F_p) e forças de avanço (F_f).

Foi utilizado uma relação comprimento por diâmetro baixa, para garantir um processo estável e medir com mais precisão as forças durante o processo de usinagem.

3.6 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Como foi especificado anteriormente, ensaios variando a rotação e a profundidade de corte foram realizados afim de obter-se uma carta de estabilidade para os processos de torneamento interno.

Nos ensaios realizados foi utilizado microfone para a captação da pressão sonora gerada pelo processo, uma placa de aquisição para a coleta dos sinais do microfone e um computador de mesa com o software ITAtoolbox. A montagem dos equipamentos pode ser observada na Figura 14 e 15.



Figura 14 - Placa de aquisição e Computador

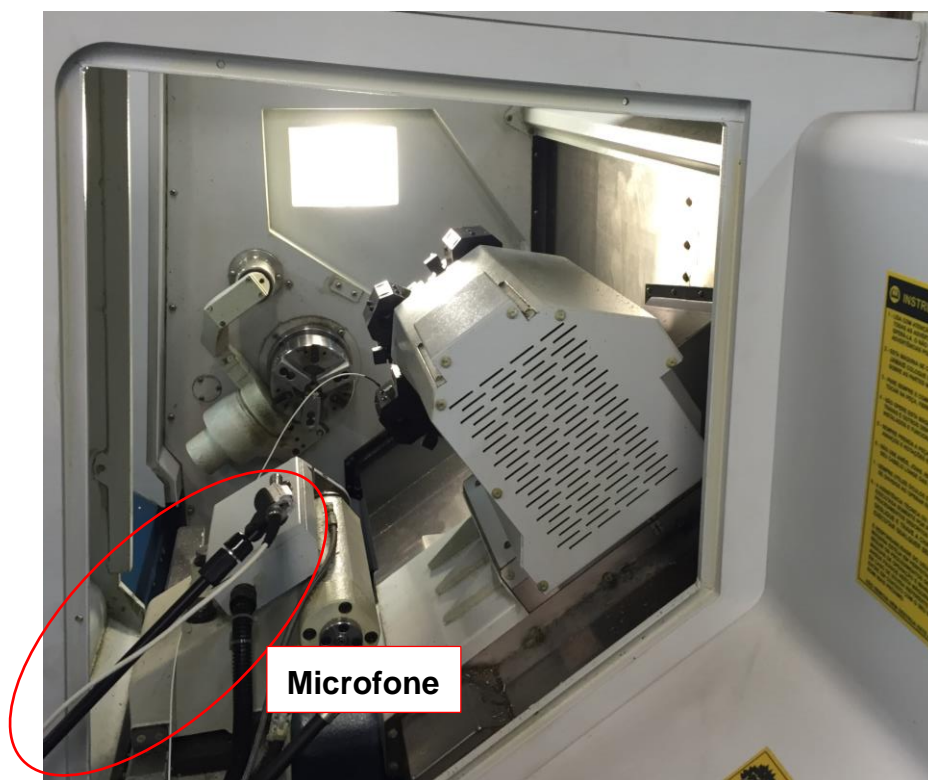


Figura 15 - Montagem do microfone

No total, foram realizados onze (11) ensaios, com um avanço de 0,1 mm/rot, variando a rotação e profundidade de corte (a_p). As profundidades de corte em cada rotação foram acrescidas ou decrescidas até atingirem o ponto de estabilidade ou quando jugamos suficiente. Como pode-se observar na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de Usinagem

ROTAÇÃO DA MÁQUINA (RPM)	PROFUNDIDADE DE CORTE (a_p) (mm)
1000	1,0
	2,0
	3,0
2000	0,5
	0,625
	0,75
3000	0,125
	0,25
	0,5
4000	0,5
5000	0,5

Feitos os ensaios e com os dados gerados, foi realizada uma análise individual para cada parâmetro utilizado.

Espectros no domínio do tempo e da frequência foram analisados afim de observar as diferenças entre os processos estáveis e instáveis, possibilitando, assim, a determinação de pontos para a carta de estabilidade.

3.7 SIMULAÇÕES DO PROCESSO

As simulações foram realizadas empregando o software MATLAB. O sistema adotado para simular o processo de usinagem pode ser observado na Figura 16. Um sistema de dois graus de liberdade, $x(t)$ e $y(t)$, perpendiculares entre si representando, respectivamente, a força passiva (F_p) e a força de avanço (F_f). A simulação é feita pelo método iterativo Euler, em pequenos intervalos de tempo dt com base nas equações de movimento e balanço de forças nas direções x e y .

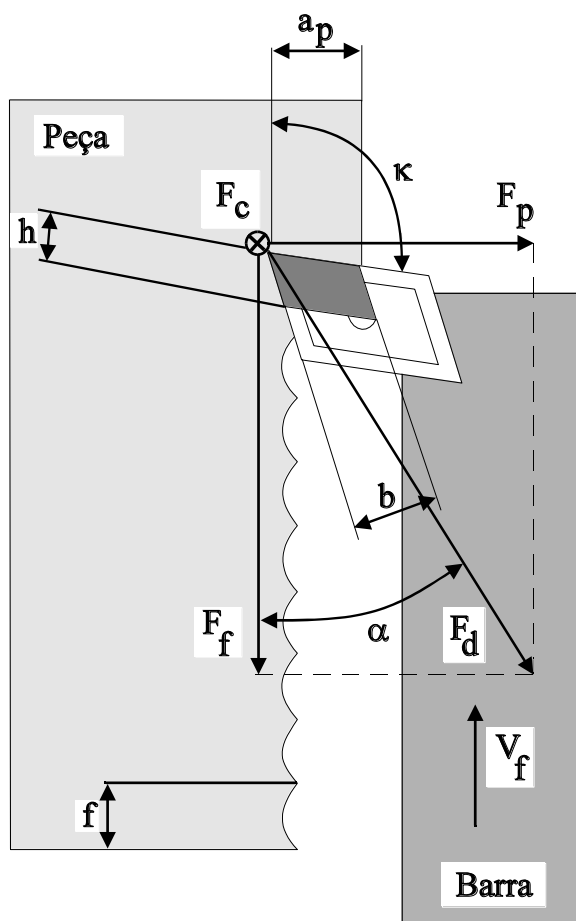


Figura 16 – Forças resultantes dos processos de corte

Onde,

F_c –força de corte;

F_d –força de desvio lateral;

F_p –força passiva;

F_f –força de avanço;

h – altura do cavaco;

f –avanço;

a_p –profundidade de corte;

α – direção da força de desvio lateral e

v_f –velocidade de avanço.

A força de corte é calculada a partir da equação:

$$F_c = K_s a_p h_1 \quad (14)$$

Onde K_s representa a pressão específica de corte, a_p é a profundidade de corte e h_1 a espessura do cavaco. Em geral h_1 é determinado pela diferença entre a posição instantânea da ferramenta em dois instantes subsequentes.

Uma parcela desta força de corte, determinada pelo fator η , dá origem a força de desvio lateral

$$F_d = \eta F_c \quad (15)$$

E a partir desta, é possível determinar as forças de avanço e passiva.

$$F_p = F_d \sin \alpha \quad (16)$$

$$F_f = F_d \cos \alpha \quad (17)$$

Onde F_p representa a força na direção X e F_f a força na direção Y. O ângulo α indica a direção da força de desvio lateral no desbaste e pode ser determinado matematicamente pela equação dada abaixo.

$$\alpha = \operatorname{atan}\left(\frac{r_e \kappa \cos \frac{\kappa}{2} + \operatorname{ctn} \kappa (a_p - r_e (1 - \cos \kappa))}{\kappa \cdot r_e \operatorname{sen} \frac{\kappa}{2} + (a_p - r_e (1 - \cos \kappa))}\right) \quad (18)$$

Onde r_e representa o raio de quina da ferramenta e κ é o ângulo de entrada da ferramenta. Após determinado este ângulo, é possível calcular as forças nas duas direções, X e Y.

Em posse das forças de usinagem, realiza-se uma abordagem no domínio do tempo, por meio de uma solução iterativa, resolvida pelo método de Euler. As acelerações são calculadas a partir das forças para cada grau de liberdade e duplamente integradas para se chegar aos deslocamentos da ferramenta e analisar se o processo é estável ou instável.

$$x'' = \frac{F_x - C_x x' - K_x x}{m_x} \quad (19)$$

$$x' = x'' dt + x' \quad (20)$$

$$x = x' dt + x \quad (21)$$

Onde K_x representa o módulo de rigidez e foi calculado com a equação 22, a partir do módulo de elasticidade (E), do comprimento em balanço da ferramenta (L) e do momento de inércia (I_x)

$$k_x = \frac{3EI_x}{L^3} \quad (22)$$

$$I_x = \frac{\pi D^4}{64} \quad (23)$$

Com D representando o diâmetro da ferramenta. A massa m_x foi calculada a partir da equação (3).

3.8 RUGOSIDADE

As medições da superfície usinada foram feitas utilizando o microscópio Taylor Hobson CCI, Figura 17, para medição sem contato de superfícies 3D. Os dados captados pelo microscópio são transmitidos para o software TalyMap Platinum, fornecido pela Taylor Hobson, que filtra os resultados e gera um relatório contendo uma representação 3D da superfície e o perfil 2D da rugosidade na superfície da peça. Para esta medição foi necessário cortar os corpos de prova, permitindo a leitura da superfície pelo microscópio.

Neste trabalho, o resultado utilizado foi o perfil 2D. Com ele é possível comparar o acabamento superficial das peças ensaiadas e evidenciar ainda mais a diferença entre os processos de usinagem estáveis e instáveis.



Figura 17 - Microscópio Taylor Hobson CCI

3.9 MATERIAL

O material utilizado foi o latão (liga cobre-zinco), que foi escolhido devido as suas propriedades mecânicas, por possuir baixa dureza em caso de altas vibrações, a probabilidade de ocorrer danos na ferramenta de corte é menor.

Os corpos de prova são cilíndricos, com 25,0 mm de comprimento e um furo de 19,0mm, dimensionados e fixados na máquina de tal forma que possam ser considerados rígidos e que a instabilidade dinâmica se resuma exclusivamente à flexibilidade do porta-ferramenta.

4 RESULTADO DOS ENSAIOS

4.1 FUNÇÃO RESPOSTA EM FREQUÊNCIA (FRF)

Com um martelo de medição e um acelerômetro fixado na ferramenta, testes de impacto foram realizados para a determinação da função resposta em frequência (FRF).

A partir da FRF é possível determinar a frequência natural do porta-ferramenta, que será utilizado nas simulações de MATLAB e análise dos resultados experimentais. Durante o ensaio foram coletados os dados do acelerômetro fixado a ferramenta e do martelo de excitação, o resultado obtido pode ser observado na Figura 18.

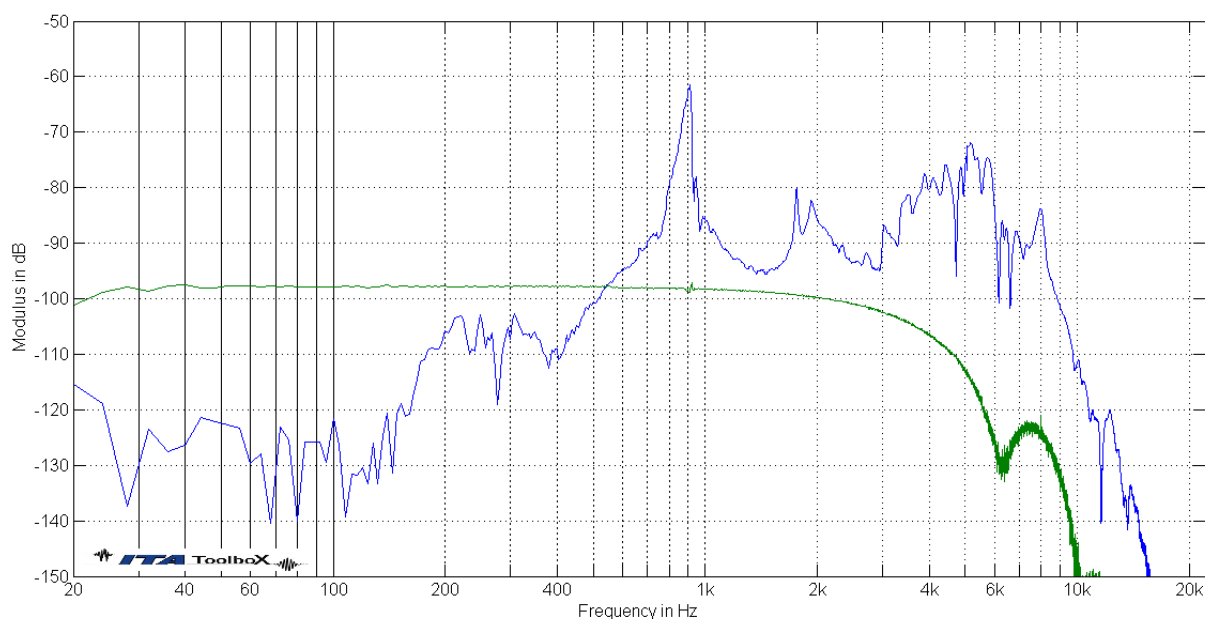


Figura 18 - Resposta em Frequência

Os espectros azul e verde representam o sinal do acelerômetro e do martelo de impacto, respectivamente.

Existem algumas unidades de medida que caracterizam a função resposta em frequência, para melhor observar a frequência natural do sistema será utilizada a aceleração $\left[\frac{m}{s^2} \right]$, esta é obtida a partir da divisão entre o sinal do acelerômetro (resposta) e o sinal do martelo (excitação), Figura 19.

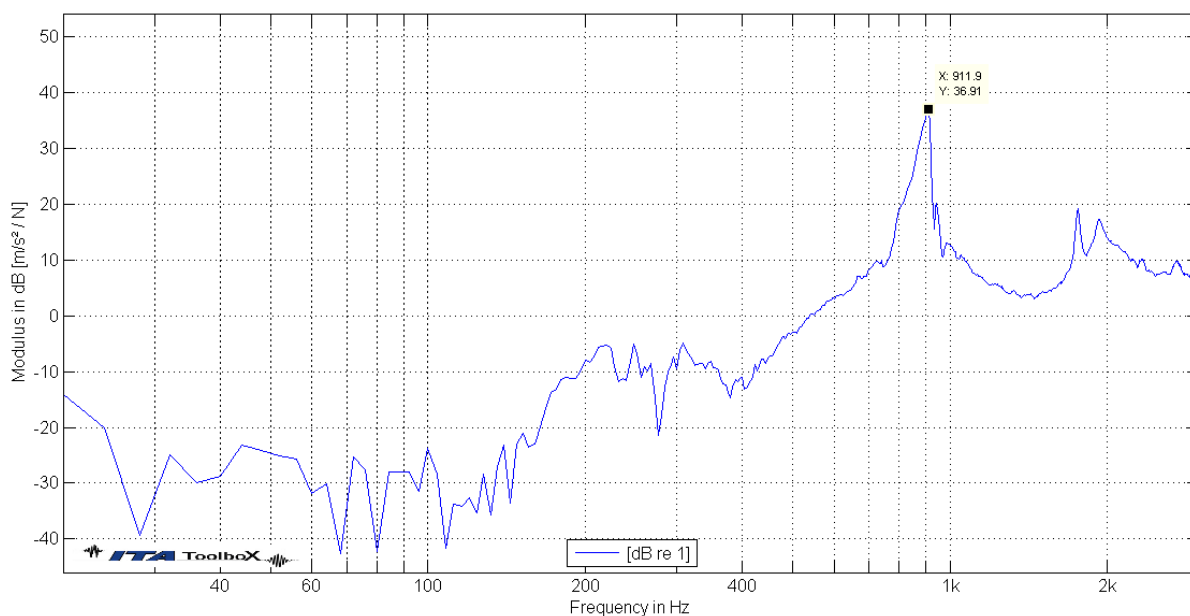


Figura 19 – Aceleração

Observando os resultados obtidos nos ensaios de impacto, conclui-se que a frequência natural do sistema é de 911,9 Hz.

4.2 ENSAIOS NO TORNO CNC

4.2.1 Comparação entre processos a 1000 e 5000 rpm

Comparando os resultados obtidos no processo a 1000 rpm e a 5000 rpm, fica evidente a diferença entre o processo estável em relação ao instável. A amplitude do sinal de áudio captada pelo microfone, quando usinando a 5000 rpm, Figura 21, está em torno de 0,3 a 0,4 V, já para o processo com 1000 rpm, Figura 20, esta amplitude cai para o intervalo de 0,02 a 0,03 V.

Para melhor visualizar esta diferença, foi calculado o fator RMS dos dois sinais, com ele é possível quantificar esta diferença de amplitudes. Quanto maior o valor RMS, maior é o ruído do sinal de áudio. Para o processo a 1000 rpm obteve-se um valor RMS de 0,0078, já no processo a 5000 rpm o valor foi de 0,2393. Como previsto, um valor muito maior para o processo onde há vibrações auto excitadas.

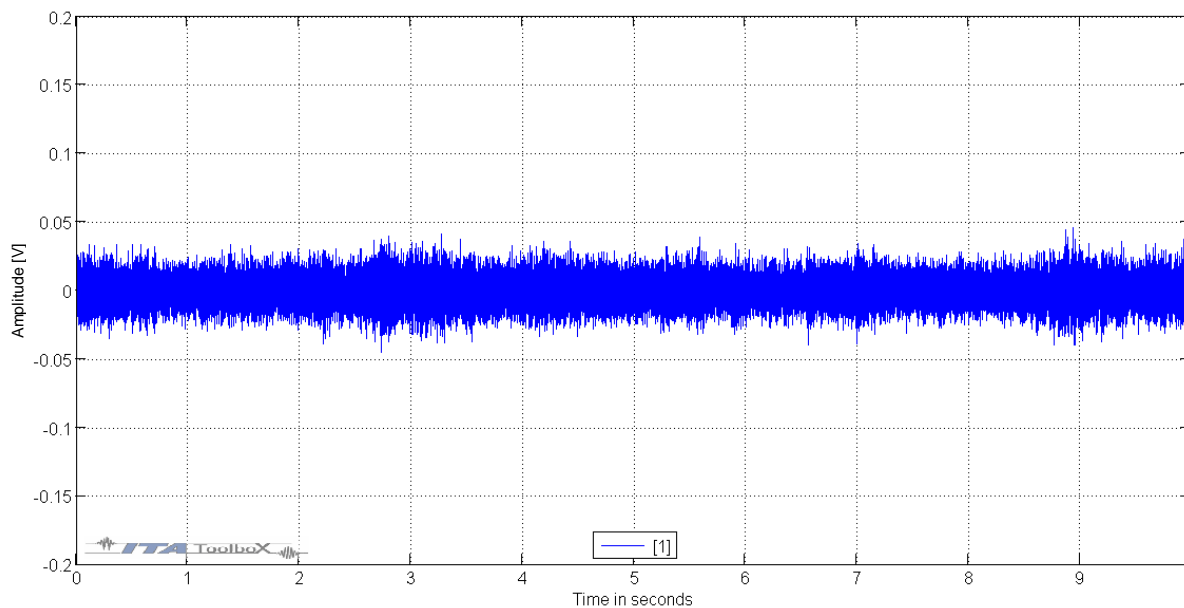


Figura 20 - Análise para o ensaio com 1000 rpm e $a_p=1,0$ mm

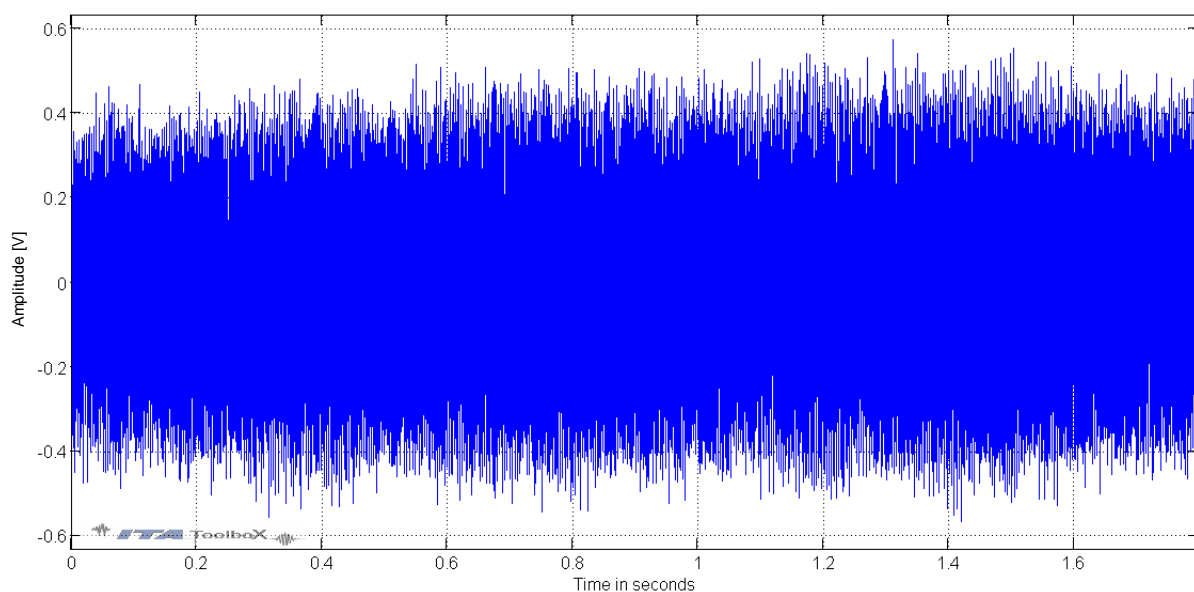


Figura 21 - Análise para o ensaio com 5000 rpm e $a_p=0,5$ mm

Segundo (Smith e Tlustý, 1992) para rotações mais baixas ocorre o efeito de amortecimento devido ao pequeno comprimento de onda das vibrações do modo dominante, como ocorreu durante a usinagem a 1000 rpm.

Analisando os dados no domínio da frequência, Figuras 22 e 23, é possível observar a diferença nas amplitudes das frequências. Quando usinando a 5000 rpm, a magnitude do sinal de áudio é de aproximadamente 0,2 V, já para o processo com

1000 rpm esta amplitude diminui consideravelmente para o intervalo de 5E-3 a 6E-3 V.

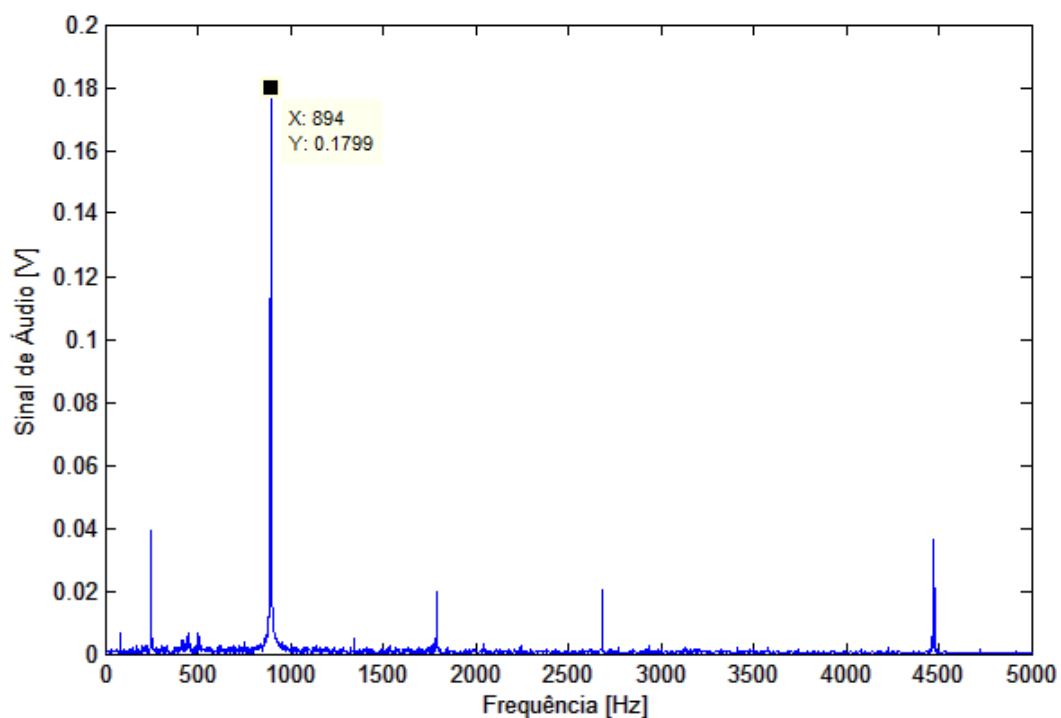


Figura 22 - Resposta em frequência no processo a 5000 rpm

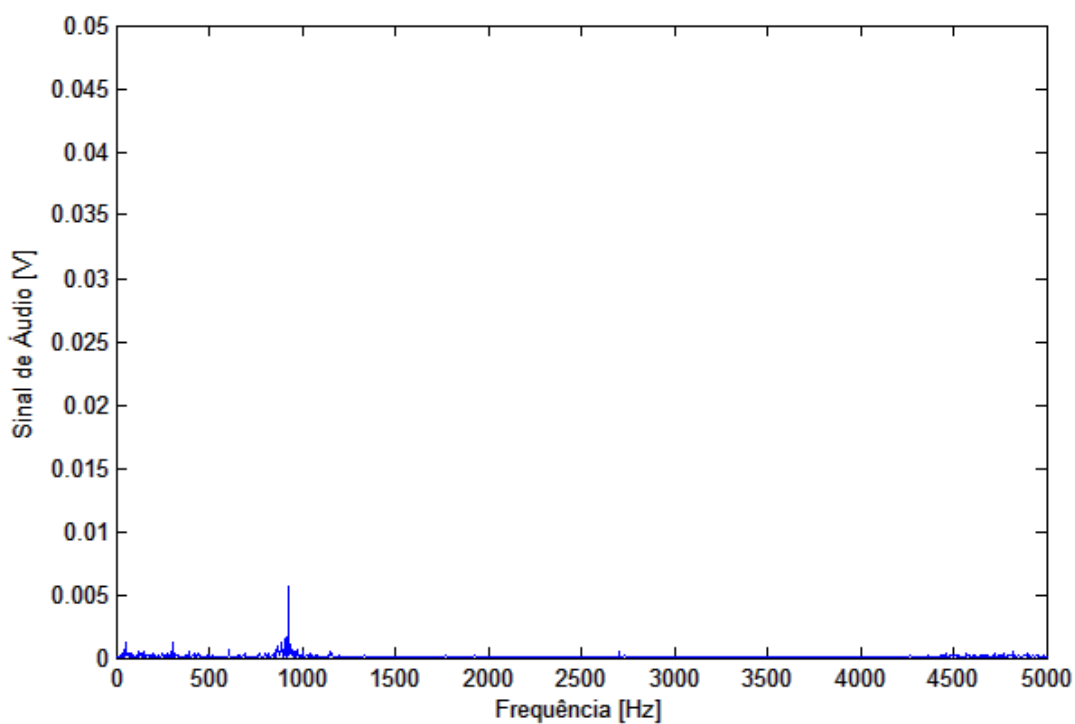


Figura 23 - Resposta em frequência no processo a 1000 rpm

Estes picos estão próximos a frequência natural, e quanto maior sua amplitude, maior é a instabilidade do processo. Isto se comprova observando a diferença entre o acabamento superficial das peças nos dois ensaios. A 5000 rpm a vibração é muito acentuada, danificando profundamente a superfície, pode-se observar esta diferença de acabamentos na Figura 24.



Figura 24 - Acabamento superficial para processos à 5000 e 1000 rpm, respectivamente

Medições da rugosidade superficial dos dois corpos de prova foram feitas, a fim de evidenciar ainda mais esta diferença. Na peça usinada a 5000 rpm foi detectado picos maiores que $20\ \mu\text{m}$, já na usinagem a 1000 rpm os picos forma menores que $5\ \mu\text{m}$. Segue nas Figuras 25 e Figuras 26 o perfil 2D das superfícies usinadas.

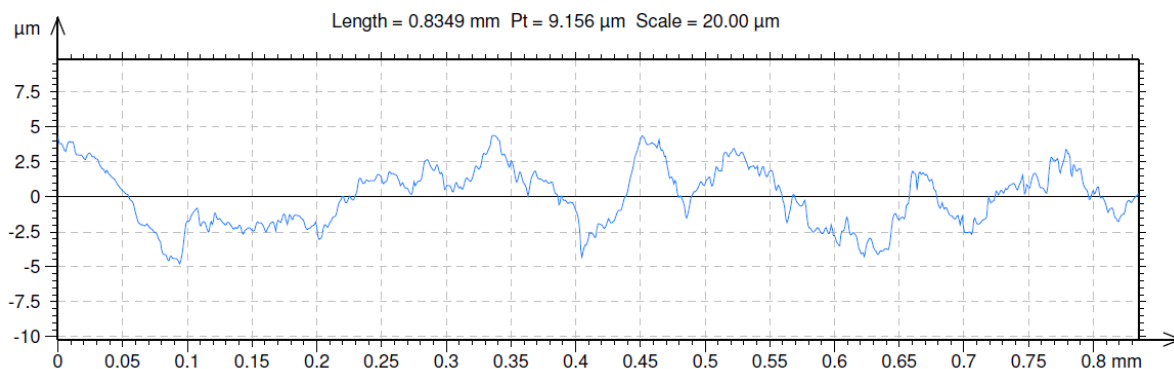


Figura 25 - Perfil 2D da peça usinada a 1000 rpm

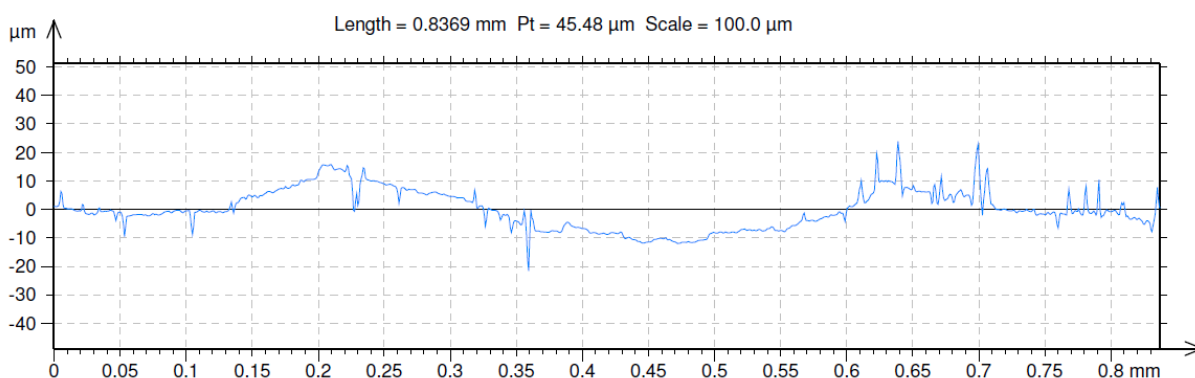


Figura 26 - Perfil 2D da peça usinada a 5000 rpm

4.2.2 Ponto de estabilidade de um processo

Como objetivo do trabalho, realizamos os testes afim de encontrar o limiar entre a estabilidade e instabilidade. Analisando os resultados, foi possível identificar quais parâmetros dividiam estes dois processos.

Todos os ensaios feitos para a rotação de 1000 rpm resultaram em um processo estável. Foram realizados ensaios com profundidades de corte de 1,0, 2,0 e 3,0 mm, Figura 27.

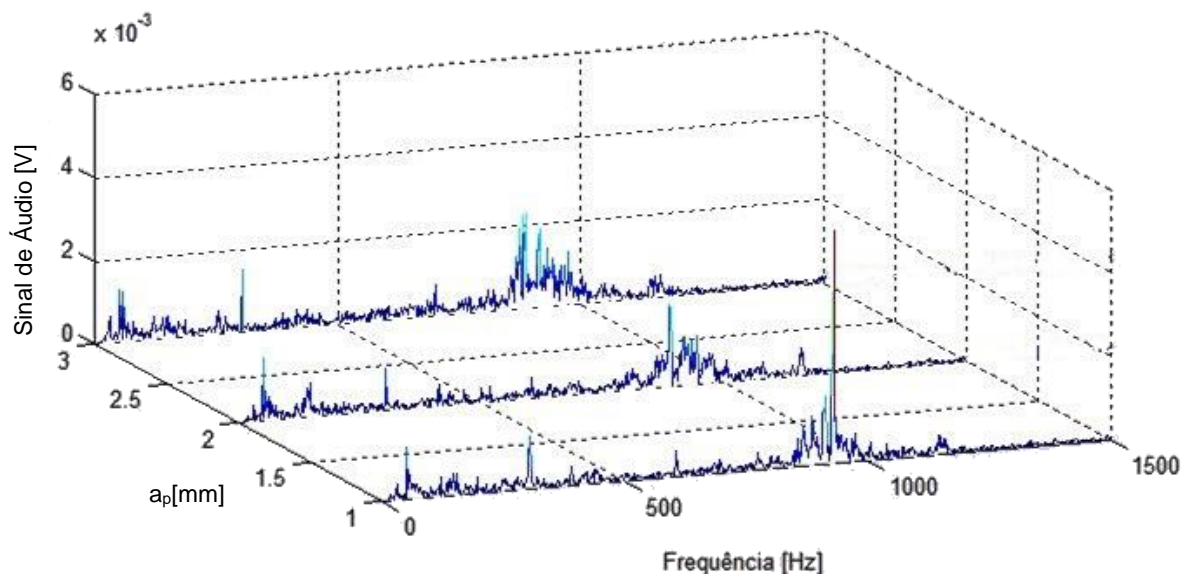


Figura 27 - Usinagem à 1000 rpm e a_p de 1,0 mm; 2,0 mm e 3,0 mm

Os processos de usinagem a 2000 rpm, Figura 28, mostraram-se estáveis com profundidade de corte de até 0,5 mm. Para esta afirmativa, foram realizados três ensaios com profundidades de corte de 0,5, 0,625 e 0,75 mm. Os testes realizados com profundidade de corte superiores a 0,5 mm apresentam picos maiores, que caracterizam cortes instáveis, a diferença de amplitudes entre estes picos é tão grande que nesta escala o gráfico com 0,5 mm aparece como uma linha. Estes picos ocorrem próximo a frequência natural do sistema, os picos menores que aparecem são harmônicos da frequência de rotação do torno, 2000 rpm para este caso.

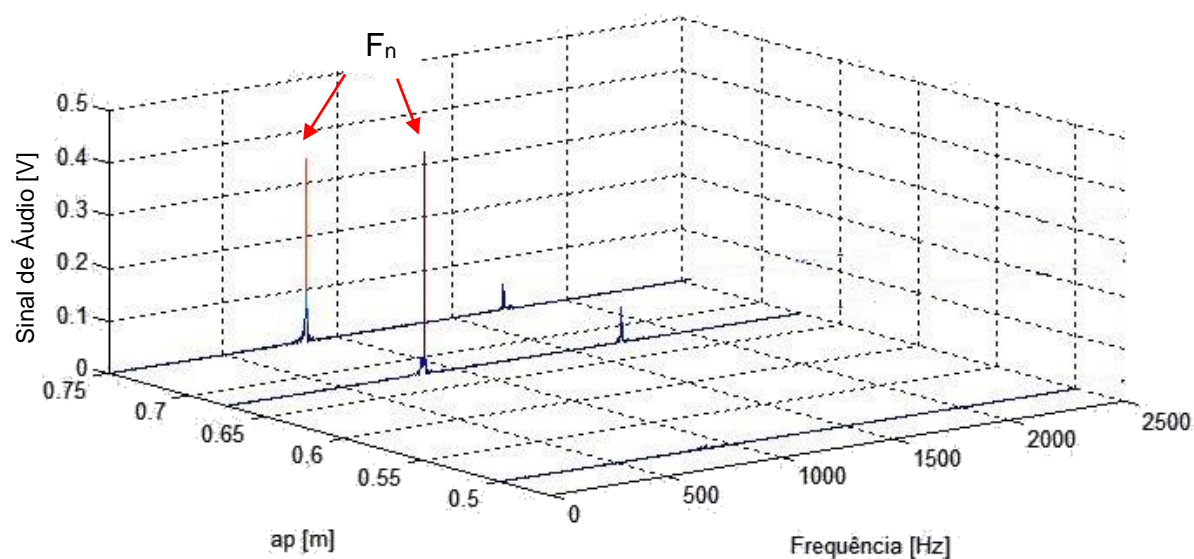


Figura 28 - Comparação entre os processos a 2000 rpm e diferentes profundidades de corte

E como esperado, nos processos onde ocorreram as vibrações, a superfície usinada ficou muito danificada, estes resultados podem ser observados na Figura 29.

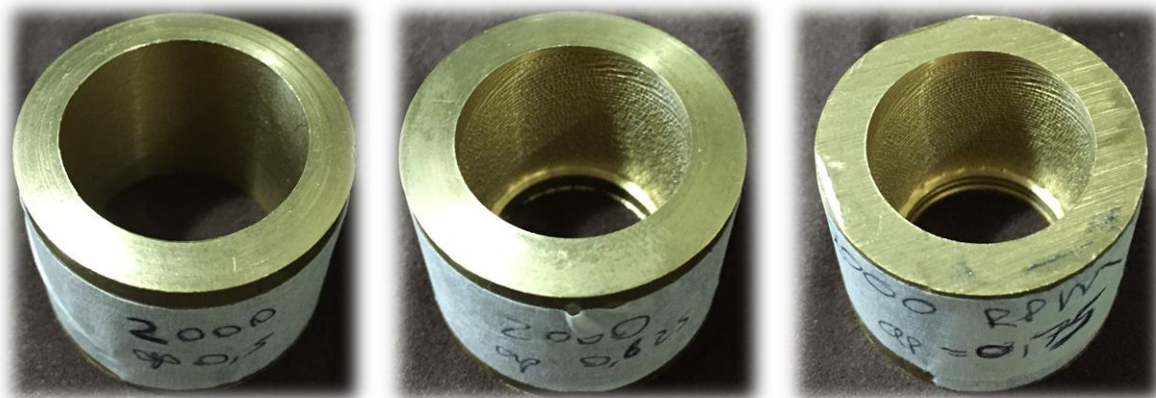


Figura 29 - Acabamento superficial na usinagem a 2000 rpm e $a_p=0,5$, $0,625$ e $0,75$ mm, respectivamente

Usinagens com rotações acima de 2000 rpm e 0,625 mm de profundidade de corte sempre se mostraram instáveis, lembrando sempre que foi utilizado uma relação comprimento/diâmetro de 6,25.

Os ensaios para 3000 rpm também foram feitos com o intuito de comprovar sua estabilidade, porém, mesmo utilizando uma profundidade de corte de 0,125 mm,

valor inferior ao utilizado em um processo de acabamento, a ferramenta apresentou vibrações e mostrou-se impraticável. A Figura 30 apresenta os picos de frequência gerados durante os ensaios e a Figura 31 mostra o acabamento superficial da peça.

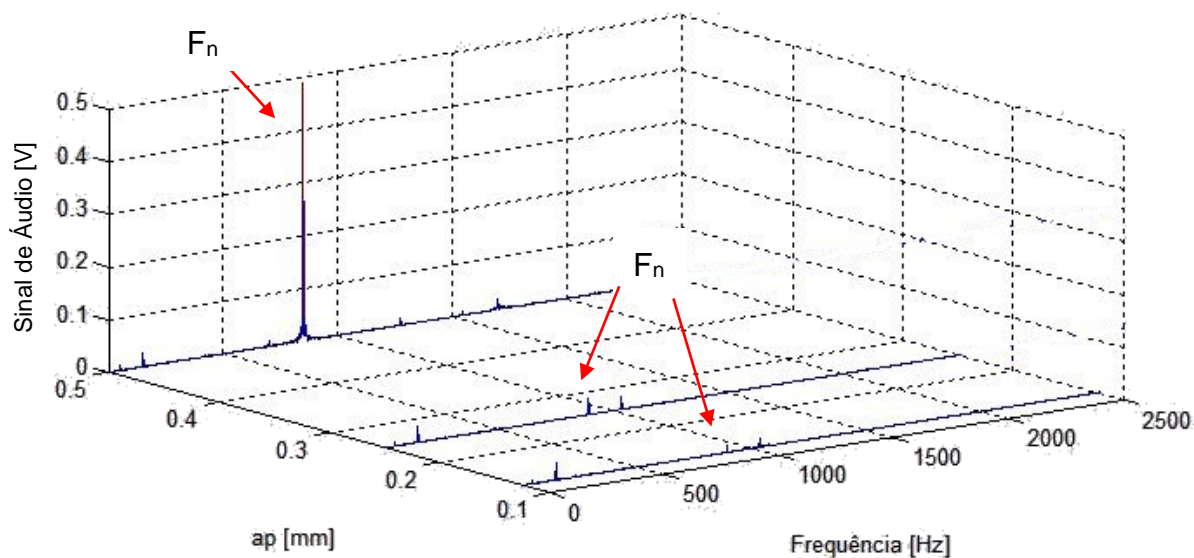


Figura 30 - Usinagem à 3000 rpm e ap de 0,125 mm, 0,25 mm e 0,5 mm



Figura 31 - Acabamento superficial na usinagem a 3000 rpm e ap=0,125 mm

Para o ensaio a 0,125 mm, é interessante observar que o nível de ruído captado foi menor e as marcas de vibração geradas sobre a superfície usinada são mais suaves. Possivelmente este ponto está próximo a estabilidade e com profundidades de corte menores a vibração provavelmente não ocorrerá.

4.3 DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS DE USINAGEM

Com a realização dos ensaios foram obtidos gráficos das amplitudes das forças em função do tempo. As Figuras 32 e 33 mostram um exemplo dos resultados da plataforma de medição de forças para uma profundidade de corte $a_p = 2,0$ mm.

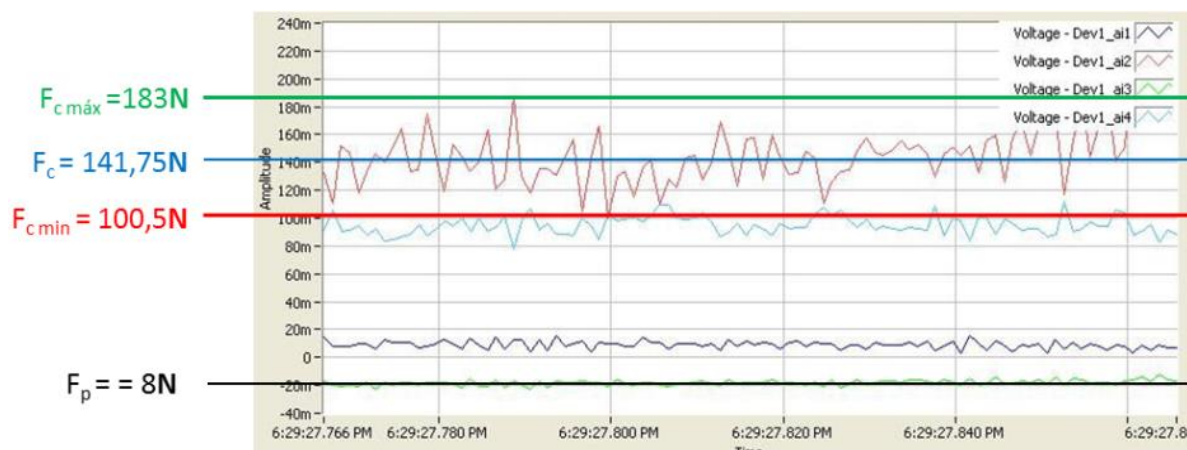


Figura 32 - Gráfico obtido na medição das forças e médias de F_c e F_f .

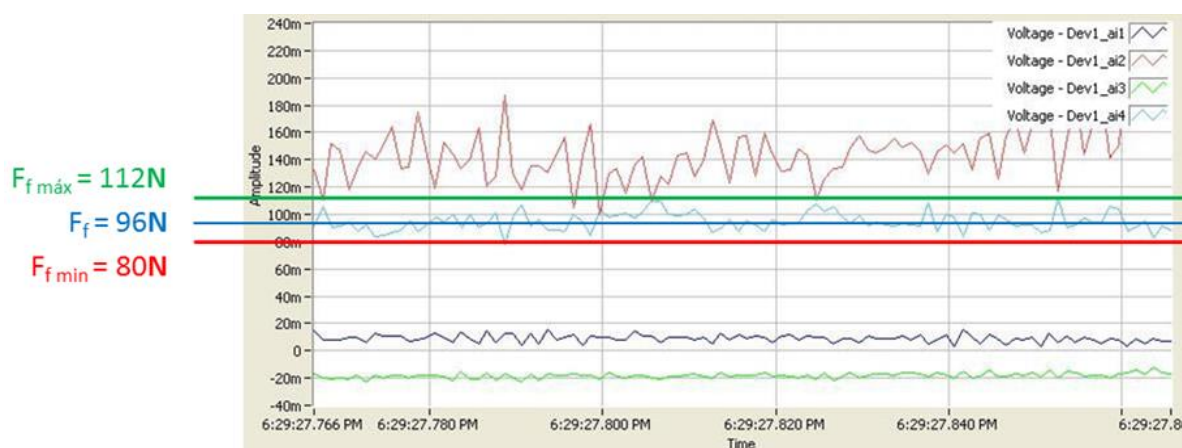


Figura 33 - Gráfico obtido na medição das forças e média de F_p .

Os resultados obtidos durante os ensaios feitos com a plataforma de medições podem ser observados na tabela 2.

Tabela 2 – Forças de usinagem.

PROFUNDIDADE DE CORTE (a_p) (mm)	FORÇA DE CORTE (F_c) (N)	FORÇA AVANÇO (F_f) (N)	FORÇA DE PASSIVA (F_p) (N)
0,75	58	45	8
1	62,5	56,5	10
1,5	109,5	79	14
2	141,75	96	20

Através da Força de corte (F_c) é possível calcular a pressão específica de corte utilizando a equação 14, cujos resultados se encontram na Tabela 3.

Tabela 3 – Pressão específica de corte.

PROFUNDIDADE DE CORTE (a_p) (mm)	FORÇA DE CORTE (F_c) (N)	PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE (K_s) (N/mm ²)
0,75	58	822,7
1	62,5	664,9
1,5	109,5	776,6
2	141,75	754,0

A média dos valores encontrados para pressão específica de corte $K_s=754,55$ N/mm², foi utilizada para a realização das simulações no MATLAB.

4.4 SIMULAÇÕES NO MATLAB

Tendo como um dos objetivos pré-estabelecidos neste trabalho, a modelagem matemática para simular os processos de usinagem interna foi feita utilizando o software MATLAB.

Após realizada a implementação das equações e aplicado o método proposto, os pontos da carta de estabilidade foram obtidos e plotados, como mostra a Figura 34.

Os parâmetros de corte adotados foram os mesmos utilizados nos ensaios práticos, tendo como o avanço fixo em 0,1 mm e o comprimento em balanço da ferramenta de 100 mm. A profundidade de corte e a rotação variaram com a finalidade de montagem da carta de estabilidade.

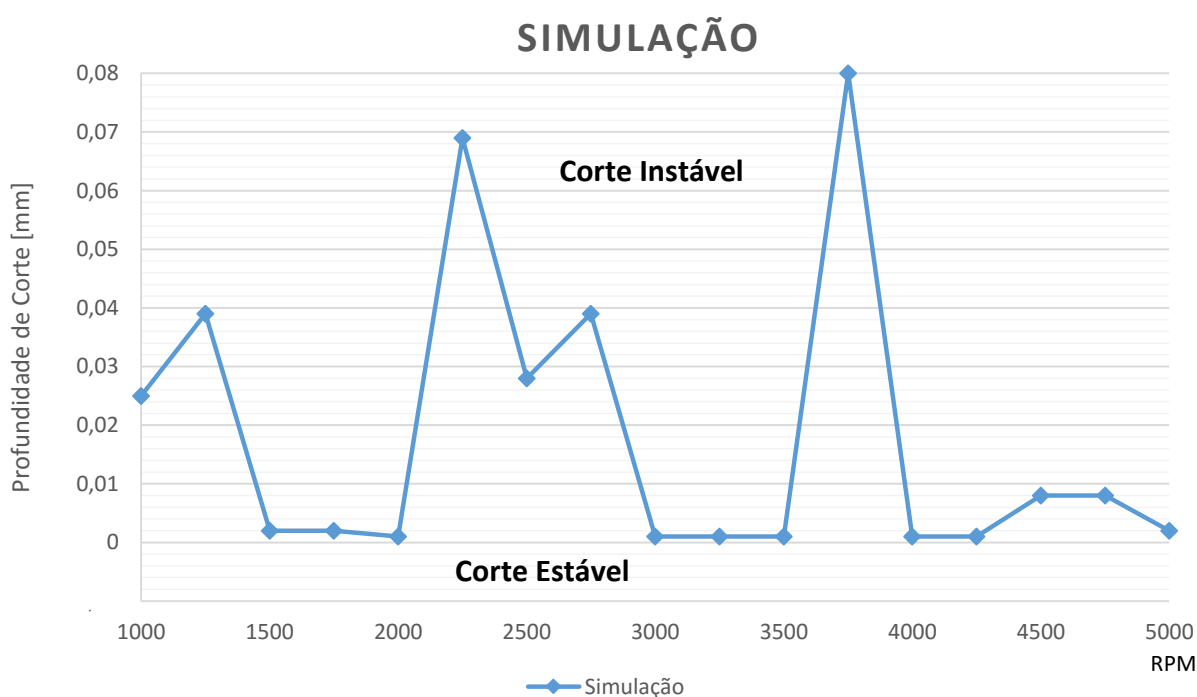


Figura 34 - Carta de Estabilidade obtida a partir do MATLAB

A coordenada vertical é a profundidade de corte axial e a horizontal corresponde à rotação. Para interpretar o gráfico considera-se as linhas como fronteira entre regiões de estabilidade (abaixo das curvas) e instabilidade (acima) onde ocorrem vibrações.

Com os resultados dos ensaios e da simulação sobrepostos, Figura 35, observar-se uma discrepância dos resultados, mas à medida que a rotação aumenta, os resultados se aproximam.

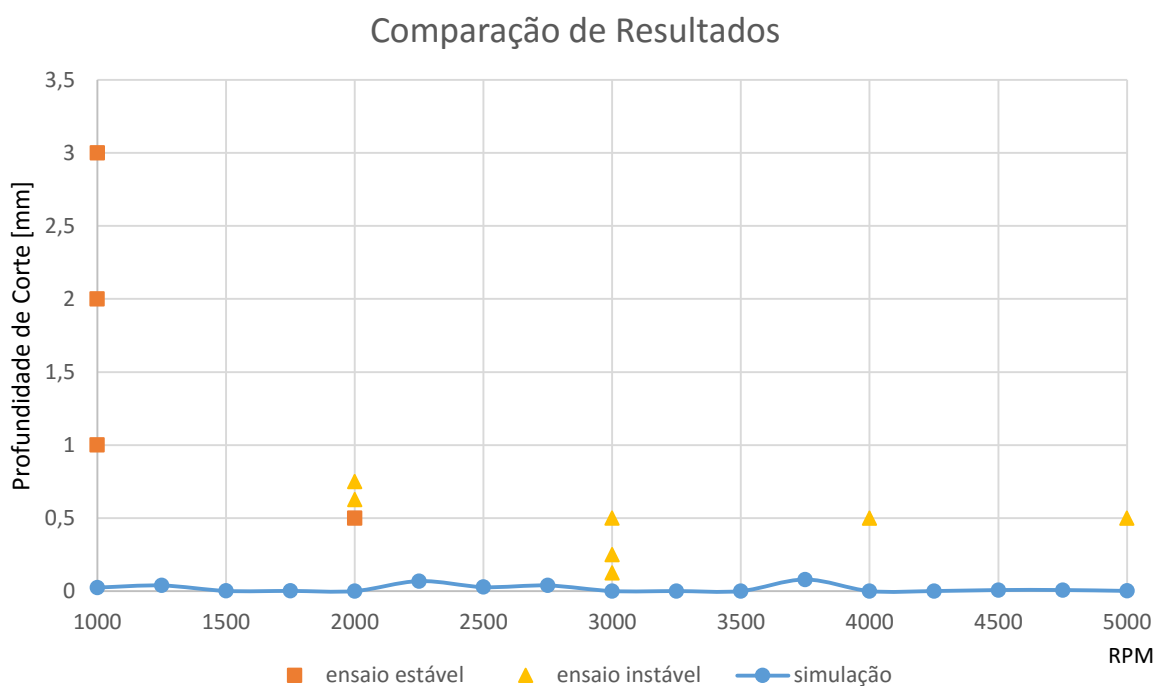


Figura 35 - Comparação entre resultados simulados e ensaiados

Isto acontece graças ao efeito de amortecimento presente em baixas rotações. No algoritmo implementado, este fator não foi considerado, por isso os resultados divergem daqueles obtidos pelos ensaios no torno.

À medida que a rotação se eleva, o processo de amortecimento deixa de existir e os efeitos dos lóbulos de estabilidade começam a ser visíveis. Em velocidades de rotação mais altas, os lóbulos do diagrama passam a ser evidentes e as regiões de estabilidade aumentam.

O sistema é estável na ressonância da força de corte com a frequência de passagem de um dente e a frequência natural do sistema. As vibrações forçadas estarão no seu máximo, mas isto na maioria dos casos não é problema (Tlustý, 2000).

5 CONCLUSÃO

Após os ensaios e comparação dos resultados, observou-se uma discrepância entre os resultados simulados no MATLAB e os obtidos a partir dos ensaios no torno. O algoritmo implementado não leva em consideração o amortecimento em baixas rotações, por isto os pontos de estabilidade encontrados nos ensaios e no simulador só se aproximam a medida que as rotações aumentam.

Comprova-se a impossibilidade de usinagem quando as vibrações auto excitadas estão presentes. A superfície da peça usinada apresenta aspecto irregular e com marcas de vibração, que resultam em grande rugosidade, quando comparado com um processo estável.

Durante os ensaios ficou evidente a diferença entre os processos estáveis e instáveis. Os sinais de áudio no domínio do tempo apresentam uma amplitude significativamente menor quando o processo é estável. No domínio da frequência, observa-se picos muito elevados na frequência natural do sistema, caracterizando a instabilidade do processo.

O algoritmo implementado apresenta resultados plausíveis para rotações altas. Como sugestão para futuros trabalhos, fica a possibilidade de implementar cálculos que considerem o amortecimento em baixas rotações.

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, Oswaldo L.; VILELLA, Ronaldo C.; BUTTON, Sérgio T.. **Processos de Fabricação e Planejamento de Processos**. Disponível em <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/graduacao/EM335/apostila.pdf>. Acessado em 10 de abril de 2007.

ALTINTAS Y. **Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design**. New York: 1. ed. Cambridge University Press, 288 p. 2000.

AMORIM, Heraldo J.de. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste da ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002, 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3791/000343470.pdf?sequence=1>. Acessado em 22 de junho de 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 4287. **Especificações Geométricas do Produto (GPS) – Rugosidade: Método do Perfil – Termos, Definições e Parâmetros de Rugosidade**. Rio de Janeiro, 2002. 18p.

BIBLIOTECA DIGITAL - UFRGS. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=000343470&loc=2002&l=3ce3da267b123f4>. Acessado em 20 de abril de 2007

C.Y. Huang, **Analysis of Process Damping and System Dynamics in Milling**, Ph.D. Thesis, 2006.

CREDE, C. E. ; HARRIS, C. M. **Shock and Vibration Handbook**. v. 3, Mc. Graw-Hill, 1961.

DAVIES, M. A.; DUTTERER B.; PRATT J. R.; SCHAUT A. J. **On the Dynamics of High-Speed milling with Long, Slender Endmills**. Annals of the CIRP, v. 47, n.1, 55-60, 1998.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6.ed. São Paulo: Artliber Editora, 2008.

EHMANN, K. F.; KAPOOR S. G.; DEVOR R. E.; LAZOGLU I. **Machining Process Modeling: A Review**. Annals of the CIRP, v. 119, n.1, p. 665-663, 1997.

EWINS, D. J. **Modal Testing Theory and Practice**. Letchworth: 1. ed. Research Studies Press, 268 p. 1984.

FUNDAMENTOS DA FABRICAÇÃO POR REMOÇÃO DE MATERIAL. Disponível em <http://www.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/Fundamentos.pdf>. Acessado em 10 de abril de 2007.

GUEDES, Luiz F. M.. **Processo de Fabricação por usinagem/conformação**. Porto Alegre, 17 de março de 2006. Disponível em <http://www.em.pucrs.br/gati/downloads/proposta2.pdf>. Acessado em 20 de abril de 2007.

ITA-toolbox. **A MATLAB toolbox for the needs of acousticians**. Disponível em: <<http://www.ita-toolbox.org>> Acesso em: 20 de julho de 2015

KELLY, S. Graham. **Fundamentals of mechanical vibrations**. New York: McGraw-Hill, 1993. FERRARESI, D.. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1970.

M. THOMAS, Y. BEAUCHAMP, **Statistical investigation of modal parameters of cutting tools in dry turning**, International Journal of Machine Tools and Manufacture 43 (2003) 1093–1106.

MANUFACTURING LABORATORIES. Harmonizer. Disponível em: <<http://www.mfg-labs.com/Harmonizer> > Acesso em: 25 de julho de 2015.

MÜLLER, K. M. **On-line Process Monitoring in High Speed Milling with an Active Magnetic Bearing Spindle**. Zurique, 2002. 163 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – ETH Zürich, 2002.

NAKAYAMA, K. ; ARAI, M. **On the Storage of Data on Metal Cutting Forces**. Annals of the CIRP, v. 25/1/76, p. 13-18.

ÖSTERLIND, Tomas. **Investigation of Vibrations During Internal Turning: An Experimental and Numerical Study**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – KTH, School of Industrial Engineering and Management (ITM), Production Engineering, Uppsala University. Uppsala, Suécia, 2011. Disponível em: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:452806/FULLTEXT01.pdf>. Acessado em: 11 de agosto de 2014.

POLLI, Milton Luiz. **Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Fresamento a Altas Velocidades de Corte**. Florianópolis, 2005.

QUINTANA, Guillem; CIURANA, Joaquim. **Chatter in Machining Processes: A Review**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 51, 2011, p. 363–376.

SANDVIK COROMANT. **Guia de Aplicação: Silent Tools**. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/pt-pt/c-1020-17.pdf>. Acessado em 10/07/2014. Acessado em 10 de julho de 2014.

SANDVIK DO BRASIL S.A. **Manual Técnico de Usinagem**. C-2900:3 POR/01. Suécia: Elanders. © AB Sandvik Coromant 2005.10p.

SCHULTZ, H.; WÜRZ, T. **Balancing Requirements for Fast Rotating Tools and Spindle Systems**. Annals of the CIRP, v. 47, n.1, 321-324, 1997.

SIDDHPURA, M. PAUROBALLY, R. **A review of chatter vibration research in turning**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 61, 2012, p. 27-47.

SMITH, S.; TLUSTY, J. **Stabilizing Chatter by Automatic Spindle Speed Regulation**. Annals of the CIRP, v.41, n.1, 433-436, 1992.

TAVARES, João Manuel R. S. **Indicação dos Estados de Superfície**. 2007. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~tavares/ensino/CFAC-G/Downloads/Apontamentos/Estado%20de%20Superficies.pdf>. Acessado em 22 de junho de 2014.

TELECURSO 2000. **Metrologia – Aula 19: Parâmetros de Rugosidade**. Disponível em: <http://www.clubedaeletronica.com.br/Mecanica/Metrologia%20TC-2000/metr19.pdf>. Acessado em 25 de junho de 2014.

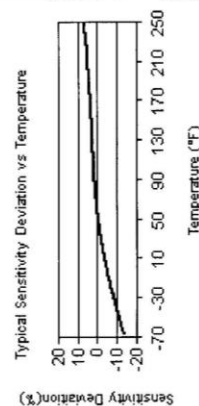
TLUSTY, G. Manufacturing Process and Equipment. 1.ed. New Jersey: TLUSTY, J.; ISMAIL, F. **Basic Nonlinearity in Machining Chatter**. Annals of the CIRP, v. 30, n. 1, p. 299-304, 1981.

TOBIAS, S. A., FISHWICK, W. **Theory of Regenerative Machine Tool Chatter**. Engineering, London, v. 205, 1958.

TRENT, M. C., WRIGHT, P. K.. **Metal Cutting Principles**. 4th edition. USA: Butterworth-Heinemann, 2000. Prentice Hall, 928 p. 2000

ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DO ACELERÔMETRO ICP 352C65

Model Number 352C65		Revision: L ECN #: 16511	
ICP® ACCELEROMETER			
<p>Performance</p> <p>Sensitivity (±10 %) 100 mV/g</p> <p>Measurement Range ±50 g pk</p> <p>Frequency Range (±5 %) 0.5 to 10000 Hz</p> <p>Frequency Range (±10 %) 0.3 to 12000 Hz</p> <p>Frequency Range (±3 dB) 0.2 to 20000 Hz</p> <p>Resonant Frequency >35 kHz</p> <p>Phase Response (±5°) (at 70° F [21° C]) 2 to 6000 Hz</p> <p>Broadband Resolution (1 to 10000 Hz) 0.00016 g rms</p> <p>Non-Linearity ±1 %</p> <p>Transverse Sensitivity ±5 %</p> <p>Environmental</p> <p>Overload Limit (Shock) ±5000 g pk</p> <p>Temperature Range (Operating) -65 to +200 °F</p> <p>Temperature Response See Graph</p> <p>Base Strain Sensitivity <0.005 g/µε</p> <p>Electrical</p> <p>Excitation Voltage 18 to 30 VDC</p> <p>Constant Current Excitation 2 to 20 mA</p> <p>Output Impedance <300 ohms</p> <p>Output Bias Voltage 8 to 12 VDC</p> <p>Discharge Time Constant 0.8 to 2.4 sec</p> <p>Settling Time (within 10% of bias) <10 sec</p> <p>Spectral Noise (1 Hz) 60 µg/√Hz</p> <p>Spectral Noise (10 Hz) 16 µg/√Hz</p> <p>Spectral Noise (100 Hz) 5 µg/√Hz</p> <p>Spectral Noise (1 kHz) 1.5 µg/√Hz</p> <p>Physical</p> <p>Sensing Element Ceramic</p> <p>Sensing Geometry Shear</p> <p>Housing Material Titanium</p> <p>Sealing Welded Hermetic</p> <p>Size (Flex x Height) 0.31 in x 0.42 in</p> <p>Weight 0.070 oz</p> <p>Electrical Connector 5-44 Coaxial</p> <p>Electrical Connection Position Side</p> <p>Mounting Thread 5-40 Male</p> <p>Mounting Torque 8 to 12 in-lb</p>	<p>SI</p> <p>10.2 mV/(m/s²)</p> <p>±491 m/s² pk</p> <p>0.5 to 10000 Hz</p> <p>0.3 to 12000 Hz</p> <p>0.2 to 20000 Hz</p> <p>>35 kHz</p> <p>2 to 6000 Hz</p> <p>0.0015 m/s² rms</p> <p>±1 %</p> <p>±5 %</p> <p>±49050 m/s² pk</p> <p>-64 to +93 °C</p> <p>See Graph</p> <p><0.005 (m/s²)/µε</p> <p>18 to 30 VDC</p> <p>2 to 20 mA</p> <p><300 ohms</p> <p>8 to 12 VDC</p> <p>0.8 to 2.4 sec</p> <p><10 sec</p> <p>588 (µm/s²)/√Hz</p> <p>157 (µm/s²)/√Hz</p> <p>49 (µm/s²)/√Hz</p> <p>14.7 (µm/s²)/√Hz</p> <p>Ceramic</p> <p>Shear</p> <p>Titanium</p> <p>Welded Hermetic</p> <p>7.9 mm x 10.7 mm</p> <p>2.0 gm</p> <p>5-44 Coaxial</p> <p>Side</p> <p>5-40 Male</p> <p>80 to 135 N-cm</p>	<p>ENGLISH</p> <p>100 mV/g</p> <p>±50 g pk</p> <p>0.5 to 10000 Hz</p> <p>0.3 to 12000 Hz</p> <p>0.2 to 20000 Hz</p> <p>>35 kHz</p> <p>2 to 6000 Hz</p> <p>0.00016 g rms</p> <p>±1 %</p> <p>±5 %</p> <p>±5000 g pk</p> <p>-65 to +200 °F</p> <p>See Graph</p> <p><0.005 g/µε</p> <p>18 to 30 VDC</p> <p>2 to 20 mA</p> <p><300 ohms</p> <p>8 to 12 VDC</p> <p>0.8 to 2.4 sec</p> <p><10 sec</p> <p>60 µg/√Hz</p> <p>16 µg/√Hz</p> <p>5 µg/√Hz</p> <p>1.5 µg/√Hz</p> <p>Ceramic</p> <p>Shear</p> <p>Titanium</p> <p>Welded Hermetic</p> <p>0.31 in x 0.42 in</p> <p>0.070 oz</p> <p>5-44 Coaxial</p> <p>Side</p> <p>5-40 Male</p> <p>8 to 12 in-lb</p>	<p>OPTIONAL VERSIONS</p> <p>Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.</p> <p>A - Adhesive Mount</p> <p>Supplied Accessory : Model 080A90 Quick Bonding Gel (1) replaces Model 080A15 [6]</p> <p>HT - High temperature, extends normal operation temperatures</p> <p>Frequency Range (5 %) 5 Hz</p> <p>Frequency Range (10 %) 3 Hz</p> <p>Frequency Range (3 dB) 2 Hz</p> <p>Temperature Range (Operating) -65 to +250 °F</p> <p>Discharge Time Constant 0.08 to 0.24 sec</p> <p>Broadband Resolution (1 to 10000 Hz) 0.0002 g rms</p> <p>Spectral Noise (1 Hz) 75 µg/√Hz</p> <p>Spectral Noise (100 Hz) 25 µg/√Hz</p> <p>Spectral Noise (1 kHz) 1.5 µg/√Hz</p> <p>J - Ground Isolated</p> <p>Frequency Range (5 %) 8 kHz</p> <p>Frequency Range (10 %) 10 kHz</p> <p>Frequency Range (3 dB) 16 kHz</p> <p>Resonant Frequency ≥30 kHz</p> <p>Electrical Isolation (Base) >10⁸ ohms</p> <p>Size (Flex x Height) 0.37 in x 0.55 in</p> <p>Weight 0.1 oz</p> <p>M - Metric Mount</p> <p>Mounting Thread M3 x 0.50 Male</p> <p>Supplied Accessory : Model M080A15 Adhesive Mounting Base (1) replaces Model 080A15</p> <p>W - Water Resistant Cable</p> <p>Electrical Connector Sealed Integral Cable</p> <p>Electrical Connection Position Side</p>
<p>NOTES:</p> <p>(1) Typical.</p> <p>(2) 200°F to 250°F data valid with HT option only.</p> <p>(3) Zero-based, least-squares, straight line method.</p> <p>(4) Transverse sensitivity is typically <= 3%.</p> <p>(5) See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.</p> <p>(6) Mounting stud removed, adhesive mounting base not required.</p>			
<p>SUPPLIED ACCESSORIES:</p> <p>Model 080A109 Petro Wax (1)</p> <p>Model 080A15 Adhesive Mounting Base (1)</p> <p>Model ACS-1 NIST traceable frequency response (10 Hz to upper 5% point).</p>			
<p>Entered: DA Engineer: DS Sales: WOL Approved: BA Spec Number: 8339</p> <p>Date: 11/22/02 Date: 11/22/02 Date: 11/22/02</p>		<p>Phone: 716-684-0001</p> <p>Fax: 716-685-3886</p> <p>E-Mail: vibration@pcb.com</p>	
<p>PCB PIEZOTRONICS™</p> <p>VIBRATION DIVISION</p> <p>3425 Middlesex Avenue, Danvers, NV 14043</p>			



All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.

