

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
ESCOLA POLITÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

GESSICA STAREPRAVO XAMBELAN

**ANÁLISE DINÂMICA DE FERRAMENTAS DE CORTE DURANTE O PROCESSO
DE USINAGEM**

CURITIBA

2019

GESSICA STAREPRAVO XAMBELAN

**ANÁLISE DINÂMICA DE FERRAMENTAS DE CORTE DURANTE O PROCESSO
DE USINAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Nilson Barbieri

CURITIBA

2019

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central
Edilene de Oliveira dos Santos CRB-9/1636

X1a Xambelan, Gessica Starepravo
2019 Análise dinâmica de ferramentas de corte durante o processo de usinagem /
Gessica Starepravo Xambelan ; orientador: Nilson Barbieri. -- 2019
110 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná,
Curitiba, 2019
Bibliografia: f. 105-108

1. Engenharia mecânica. 2. Vibração. 3. Usinagem – Controle de produção.
4. Metais – Corte. 5. Controle de qualidade. I. Barbieri, Nilson
II. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós- Graduação
em Engenharia Mecânica. III. Título

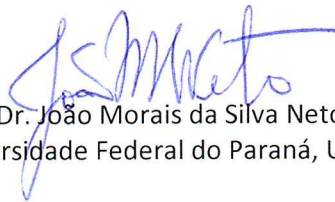
CDD. 20. ed. – 620.1

TERMO DE APROVAÇÃO

Géssica Starepravo Xambelan

Análise Dinâmica de Ferramentas de Corte Durante o Processo de Usinagem

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. João Morais da Silva Neto
Universidade Federal do Paraná, UFPR



Prof. Dr. Milton Luiz Polli
Universidade Tecnologia Federal do Paraná, UTFPR



Prof. Dr. Key Fonseca de Lima
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUCPR



Prof. Dr. Nilson Barbjeri
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR, Orientador

Curitiba, 29 de abril de 2019

Dedico este trabalho ao meu esposo
Edson Gabriel Xambelan e a minha filha
Alice Starepravo Xambelan, que sempre
me apoiaram e não me deixaram desistir.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me guiar e me dar sabedoria para o bom andamento deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Doutor Engenheiro Mecânico, Nilson Barbieri, pelo conhecimento compartilhado e o tempo dedicado para a orientação desta monografia ao Doutor Engenheiro Mecânico, Key Fonseca Lima, pela orientação e apoio dado desde o início da graduação.

Agradeço ao meu orientador profissional o Master da Renault do Brasil diplomado pela UFSC Engenheiro Mecânico Me. Marco Schmidt, por todo o seu conhecimento compartilhado e pela oportunidade de trabalhar com este tema. Ao Doutor Engenheiro Mecânico Hugo Carvalho pelo conhecimento compartilhado e pela ajuda com os testes práticos. Agradeço ao Engenheiro de Produção Sergio Sima e Luis Ferreira a sua disponibilidade e a ajuda com os testes práticos.

Agradeço ao Tecnólogo Mecânico Antônio Corpa por todo o auxílio e orientação na disponibilização de artigos técnicos e livros na parte de usinagem que enriqueceram este trabalho.

Meu agradecimento especial ao meu esposo, Edson Gabriel Xambelan, que teve paciência nos momentos que tive aula e nos finais de semanas que dediquei à monografia. E a minha mãe Edna Starepravo, por me ensinar a ser perseverante e nunca desistir dos meus sonhos e objetivos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“A combinação de vencer os desafios com
a possibilidade de aproveitar as
oportunidades “

(CLÁUDIO CAMACHO, 2006, p.3)

RESUMO

Usinagem é um dos processos de transformação mais difundidos na indústria de fabricação mecânica. Durante este processo, em combinações específicas de rotação e profundidade de corte, vibrações podem aparecer. Este fenômeno indesejável ocasiona diversos efeitos negativos tanto sobre a máquina quanto sobre a ferramenta de corte e a qualidade da peça usinada, trazendo prejuízos. Em busca da redução dos custos de fabricação dos veículos, as montadoras têm procurado constantemente novas técnicas de usinagem com intuito de redução dos tempos de produção e melhorar a qualidade dimensional e superficial de suas peças. Sem uma compreensão clara sobre as causas das vibrações no processo e as soluções disponíveis para sua eliminação, muitas máquinas e ferramentas de corte existentes são sub-utilizadas e os objetivos de redução dos tempos principais e aumento da produtividade tornam-se mais difíceis. Em virtude disso, este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar um método de análise de resultados de aceleração e força para diferentes processos de usinagem, o que auxilia a rápida detecção de vibrações e a definição de parâmetros ótimos para aplicação na linha de produção. O software LabView® foi usado para adquirir os dados e o método da transformada de Fourier foi usado no software Matlab® para tratar os resultados.

Palavras-chave: Vibrações em Usinagem, Otimização do Processo de Usinagem, Tratamento de Sinais.

ABSTRACT

Machining is one of the most widespread transformation processes in the mechanical manufacturing industry. During this process, in particular combinations of rotation and depth of cut, vibrations may appear. This undesirable phenomenon causes several negative effects on both the machine and the cutting tool and the quality of the machined part, causing damages. In order to reduce vehicle manufacturing costs, automakers have constantly sought new machining techniques to reduce production times and improve the dimensional and surface quality of their parts. Without a clear understanding of the causes of process vibrations and the solutions available for their disposal, many existing cutting machines and tools are underutilized and the goals of reducing lead times and increasing productivity become more difficult. By virtue of this, this work aims to develop and validate the method of analysis of acceleration and force results for different machining processes, which helps the rapid detection of vibrations and the definition of optimal parameters for application in the production line. LabView® software was used to acquire the data and the Fourier transform method was used in the Matlab® software to handle the results.

Keywords: Vibrations in Machining, Machining Process Optimization, Signal Processing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Peça sem e com vibração.	18
Figura 2 – Mancais do virabrequim do bloco.....	19
Figura 3 – Tolerâncias dimensionais mancais virabrequim.....	19
Figura 4 – Ferramenta CoroMill Century®.	22
Figura 5 – Desgaste dos insertos da ferramenta Century (Zoom 25x).....	22
Figura 6 – Peças com acúmulo de cavacos:.....	23
Figura 7 – Análise cinco porquês.....	23
Figura 8 – Tipos de Mandrilamento.....	26
Figura 9 – Tipos de geometria para pontas de alargadores.....	27
Figura 10 – Ângulos nos alargadores.....	27
Figura 11 – Ferramentas de alargamento (Segundo DIN 8589).	28
Figura 12 – Alargador de um gume com três réguas de guia na periferia.....	29
Figura 13 – Fresamento Frontal e Fresamento Periférico.....	31
Figura 14 – Fresamento tangencial concordante e discordante.....	31
Figura 15– Formação de cavaco.....	32
Figura 16– Tipos de Cavacos.....	33
Figura 17– Diagrama de forças para a ferramenta de Mandrilamento.	36
Figura 18– Diagrama de forças para a ferramenta de Fresamento.....	36
Figura 14 – Cinemática do processo de alargamento.	38
Figura 15 – Exemplo de vibração livre amortecida.....	39
Figura 16 – Exemplo de magnitude da vibração forçada.	40
Figura 17 – Vibrações regenerativas do processo de mandrilamento.....	41
Figura 18 – Modelo dinâmico vibração.....	41
Figura 19 – Ferramenta de corte de um único inserto.....	42
Figura 20 – Ferramenta de vários insertos de corte.....	43
Figura 21 – Perturbações quando a peça esta desalinhada.....	43
Figura 22 – Perturbações quando a ferramenta esta desalinhada.....	44
Figura 23 – Modelo esquemático do processo de usinagem.	44
Figura 24 – Análise sistemática da ferramenta.	45
Figura 25 – Funções de transferência.....	46
Figura 26 – Carta de estabilidade para um processo de usinagem.	51
Figura 27 - Modulo de aquisição de dados NI9234.....	53

Figura 28 - Hardware cDaq 9174	54
Figura 29 - Acelerômetro piezoelétrico PCB Modelo: 352C03	54
Figura 30 - Martelo de impacto PCB	54
Figura 31 – Configuração de montagem para o experimento.	54
Figura 32 – Centro de usinagem GROB.	55
Figura 33 – Configuração de montagem para o experimento fresa.	56
Figura 34 – Configuração de montagem para o experimento ferramenta de mandrilamento.....	57
Figura 35 – Configuração de montagem para o experimento ferramenta de mandrilamento mancalizada.....	57
Figura 36 – Configuração de montagem para o experimento ferramenta de mandrilamento mancalizada ensaio dinâmico.....	58
Figura 37 – Aceleração x N° de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento na condição livre Ensaio 1.....	60
Figura 38 – Aceleração x N° de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento na condição livre Ensaio 2.....	60
Figura 39 – Aceleração x N° de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento na condição livre Ensaio 3.....	61
Figura 40 – Aceleração x N° de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento na condição livre Ensaio 4.....	61
Figura 41 – Aceleração x N° de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento na condição livre Ensaio 5.....	62
Figura 42 – Resposta em frequência dos 5 ensaios da ferramenta de mandrilamento livre.....	63
Figura 43 – Resposta em frequência por acelerômetro dos 5 ensaios da ferramenta de mandrilamento livre.	63
Figura 43 – Aceleração x N° de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento mancalizada Ensaio 1.	66
Figura 44 – Aceleração x N° de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento mancalizada Ensaio 2.	66
Figura 45 – Aceleração x N° de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento mancalizada Ensaio 3.	67
Figura 46 – Aceleração x N° de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento mancalizada Ensaio 4.	67

Figura 47 – Resposta em frequência dos 5 ensaios da ferramenta de mandrilamento mandrilamento.....	68
Figura 48 – Resposta em frequência por acelerômetro dos 5 ensaios da ferramenta de mandrilamento mandrilamento.	68
Figura 49 – Aceleração x N° de pontos no tempo para a fresa Ensaio 1.	71
Figura 50 – Aceleração x N° de pontos no tempo para a fresa Ensaio 2.	71
Figura 51 – Aceleração x N° de pontos no tempo para a fresa Ensaio 3.	72
Figura 52 – Resposta em frequência dos 3 ensaios da fresa.	72
Figura 53 – Resposta em frequência por acelerômetro dos 3 ensaios da fresa.	73
Figura 54 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 1.....	75
Figura 55 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 1.....	76
Figura 56 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 2.....	77
Figura 57 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 2.....	77
Figura 58 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 3.....	78
Figura 59 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 3.....	79
Figura 60 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 4.....	80
Figura 61 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 4.....	80
Figura 62 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 5.....	81
Figura 63 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 5.....	82
Figura 64 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 1.	83
Figura 65 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 1.	83

Figura 66 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 2.	84
Figura 67 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 2.	85
Figura 68 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 3.	86
Figura 69 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 3.	86
Figura 70 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 4.	87
Figura 71 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 4.	88
Figura 72 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio Dinâmico.	89
Figura 73 - Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio Dinâmico.	90
Figura 74 – Diagrama de estabilização para a fresa Ensaio 1.	95
Figura 75 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a fresa Ensaio 1.	96
Figura 76 – Diagrama de estabilização para a fresa Ensaio 2.	97
Figura 77 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a fresa Ensaio 2.	97
Figura 78 – Diagrama de estabilização para a fresa Ensaio 3.	98
Figura 79 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a fresa Ensaio 3.	99
Figura 80 – Peça usinada com os novos parâmetros da fresa.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do Bloco de Alumínio ADC12.....	20
Tabela 2 – Composição química das capas de mancal FCA.....	21
Tabela 1 – Picos de frequência natural, e suas respectivas rotações críticas para a ferramenta de mandrilamento livre.....	64
Tabela 2 – Rotações adequadas de trabalho ferramenta de mandrilar livre.....	64
Tabela 3 – Velocidade de corte para Ø51,972 mm.....	65
Tabela 4 – Velocidade de avanço para Ø51,972 mm.....	65
Tabela 5 – Picos de frequência natural, e suas respectivas rotações críticas para a ferramenta de mandrilamento livre.....	69
Tabela 6 – Rotações adequadas de trabalho ferramenta de mandrilar livre.....	69
Tabela 7 – Velocidade de corte para Ø51,972 mm.....	70
Tabela 8 – Velocidade de avanço para Ø51,972 mm.....	70
Tabela 9 – Picos de frequência natural, e suas respectivas rotações críticas para a fresa.....	73
Tabela 10 – Rotações adequadas de trabalho fresa.....	74
Tabela 11 – Velocidade de corte para Ø80 mm.....	74
Tabela 12 – Velocidade de avanço para Ø80 mm.....	75
Tabela 13 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 1.....	76
Tabela 14 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 2.....	78
Tabela 15 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 3.....	79
Tabela 16 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 4.....	81
Tabela 17 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 5.....	82
Tabela 18 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 1.....	84
Tabela 19 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 2.....	85

Tabela 20 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar mancaizada Ensaio 3.	87
Tabela 21 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar mancaizada Ensaio 4.	88
Tabela 22 – Picos de frequência natural para o sistema dinâmico.	90
Tabela 23 – Comparação dos resultados do Ensaio 1 ferramenta de mandrilar mancaizada x Ensaio Dinâmico.	91
Tabela 24 – Comparação dos resultados do Ensaio 2 ferramenta de mandrilar mancaizada x Ensaio Dinâmico.	92
Tabela 25 – Comparação dos resultados do Ensaio 3 ferramenta de mandrilar mancaizada x Ensaio Dinâmico.	93
Tabela 26 – Comparação dos resultados do Ensaio 4 ferramenta de mandrilar mancaizada x Ensaio Dinâmico.	94
Tabela 27 – Comparação dos resultados da fresa Ensaio 1.	96
Tabela 28 – Comparação dos resultados da fresa Ensaio 2.	98
Tabela 29 – Comparação dos resultados da fresa Ensaio 3.	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

h	mm	Espessura de usinagem (antes da retirada de cavaco)
h_{ch}	mm	Espessura de corte (depois da retirada do cavaco)
α	graus	Ângulo de incidência
β	graus	Ângulo de cunha
γ	graus	Ângulo de saída
γ_0	graus	Ângulo de saída ortogonal
χ_r	graus	Ângulo de direção do gume
γ'_p	graus	Ângulo de saída passivo do gume secundário
α_0	graus	Ângulo de incidência ortogonal
α'_p	graus	Ângulo de incidência passivo do gume secundário
m	kg	Massa
k		Rigidez
ω	rad/s	Velocidade angular
C	Ns/m	Amortecimento
$F(t)$	N	Força externa
\dot{x}	m/s	Velocidade
\ddot{x}	m/s ²	Aceleração
\emptyset	mm	Diâmetro
F_x	N	Força na direção x
F_y	N	Força na direção y
F_c	N	Força de corte
F_b	N	Força passiva
F_f	N	Força de avanço
f_z	mm/dente	Avanço por dente
k_c	N	Força de corte específica
k_p	N	Força de corte passiva
k_z	N	Força de alimentação
b	mm	Largura do inserto
K_r	graus	Ângulo de contrução
a_p	Mm	Profundidade de corte
F_{res}	N	Resultante das forças
ϑ	graus	Ângulo da força resultante

a_y	graus	Ângulo entre a força passiva e a força resultante
l_c	mm	Deslocamento do centro
ρ	kg/m	Massa por unidade de comprimento
A	m ²	Área
V_c	mm/min	Velocidade de corte
V_f	mm/min	Velocidade de avanço
D	Mm	Diâmetro
N	Rpm	Velocidade de rotação
a_e	mm	Penetração de trabalho
N_{ot}	rpm	Rotação ótima de trabalho
Hz	hertz	Unidade de frequência

PCB	Piezotronics
FFT	Fast Fourier Transform
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná.
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
MEF	Método de elementos finitos
Z	Númeto de arestas cortantes
ed.	Edição
Ed.	Editor
f.	Folha
p.	Página

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	PROBLEMATIZAÇÃO	18
1.1.1	Caso 1 – Usinagem do alojamento do virabrequim	18
1.1.2	Caso 2 – Usinagem da face de fogo:	21
1.2	OBJETIVOS	24
1.2.1	Objetivo Geral	24
1.2.2	Objetivos Específicos	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	PROCESSO DE MANDRILAMENTO	25
2.2	PROCESSO DE ALARGAMENTO	26
2.3	PROCESSO DE FRESAMENTO.....	30
2.4	DINÂMICA DO PROCESSO DE CORTE	32
2.4.1	Remoção de material	32
2.4.2	Mecânica de Corte	35
2.5	PARAMETROS DE CORTE	37
2.5.1	Velocidade de Corte (V_c)	37
2.5.2	Velocidade de Avanço (V_f)	37
2.5.3	Profundidade de corte (Penetração passiva) (a_p)	37
2.6	CONCEITOS DE VIBRAÇÃO	38
2.6.1	Vibrações de ferramentas	38
2.6.2	Equacionamento	41
2.6.3	Tratamento dos sinais	45
2.6.4	Métodos no domínio do tempo	46
2.6.4.1	SSI-COV	47
2.6.5	Diagrama de Estabilização	49
2.6.6	Carta de estabilidade	50
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1	ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	59
4.1.1	Ferramenta de mandrilamento livre – Método FFT	60
4.1.2	Ferramenta de mandrilamento mancalizada – Método FFT	66

4.1.3	Fresa – Método FFT	71
4.1.4	Ferramenta de mandrilamento livre – Método modal SSI-COV	75
4.1.5	Ferramenta de mandrilamento mancalizada – Método modal SSI-COV	83
4.1.6	Ferramenta de mandrilamento mancalizada teste Dinâmico – Método modal SSI-COV	89
4.1.7	Fresa – Método modal SSI-COV	95
4.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS E TESTES PRÁTICOS	100
5	CONCLUSÃO	102
	REFERÊNCIAS	104
	APÊNDICE A – DESENHO FERRAMENTA MANDRILAMENTO	108
	APÊNDICE B – DESENHO FRESA	109

1 INTRODUÇÃO

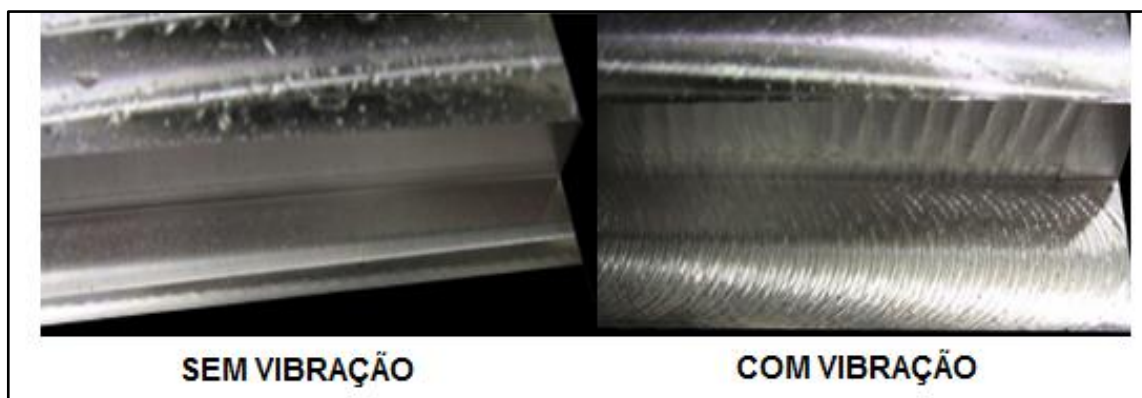
A usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizados para produzir a forma final dos produtos, e sua tecnologia continua avançando em paralelo com os desenvolvimentos de materiais, computadores, sensores e atuadores. Uma peça é convertida em um produto final ao remover material através dos processos de usinagem tais como: furar, fresar, brochar, mandrilhar e operações de esmerilhamento realizadas em máquinas-ferramenta numericamente controladas por computador CNC (YUSUF, 2012).

A atividade básica de fabricação é fornecer peças de características de qualidade específicas na quantidade necessária, de maneira eficiente e em menor custo e tempo. Todo processo de fabricação é afetado por perturbações variáveis, que podem ser externas e internas (ocorrendo dentro do próprio processo). Por esse motivo, as propriedades funcionais são fornecidas com tolerâncias. Se um valor característico estiver fora da tolerância permitida, ele estará com defeito. Assim, características funcionais importantes devem ser verificadas durante ou no final da fabricação (KLOCKE, 2011).

Durante o processo de usinagem, em combinações específicas de rotação, profundidade de corte, fixação dos componentes, tipo de ferramentas, peça, e entre outros podem gerar vibrações. Este fenômeno indesejável ocasiona diversos efeitos negativos tanto sobre a máquina quanto sobre a ferramenta de corte e a qualidade da peça usinada, trazendo prejuízos (FAASSEN, 2007).

O nível máximo das vibrações tolerável, ou seja, a máxima amplitude das vibrações no processo de usinagem, depende da sua aplicação. Em operações de desbaste, o que determina este nível é principalmente o efeito que a vibração exerce sobre a vida da ferramenta, desde que a superfície gerada seja adequada à operação posterior. Em operações de acabamento, este é determinado pela qualidade da superfície e precisão dimensional exigidas (POLLI, 2005), conforme figura 1.

Figura 1 – Peça sem e com vibração.



Fonte: FAASSEN, 2007.

As vibrações relativas que ocorrem entre a peça e a ferramenta podem ser causadas por uma fonte externa, pela própria máquina ou devido à ação de forças geradas durante o corte do material. Neste último, enquadram-se as vibrações forçadas e as geradas por um mecanismo de auto-excitação na formação do cavaco. Em geral, uma auto-excitação atinge uma ou outra frequência natural do sistema dinâmico, o que pode causar vibrações excessivas comprometendo o acabamento superficial da peça e provocando o desgaste prematuro da ferramenta (BAVASTRI *et Al.*, 2006).

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

Em busca da redução dos custos de fabricação dos veículos, as montadoras têm procurado constantemente investir em tecnologias de fabricação para seus motores com intuito de redução dos tempos de produção e melhorar a qualidade dimensional e superficial de suas peças.

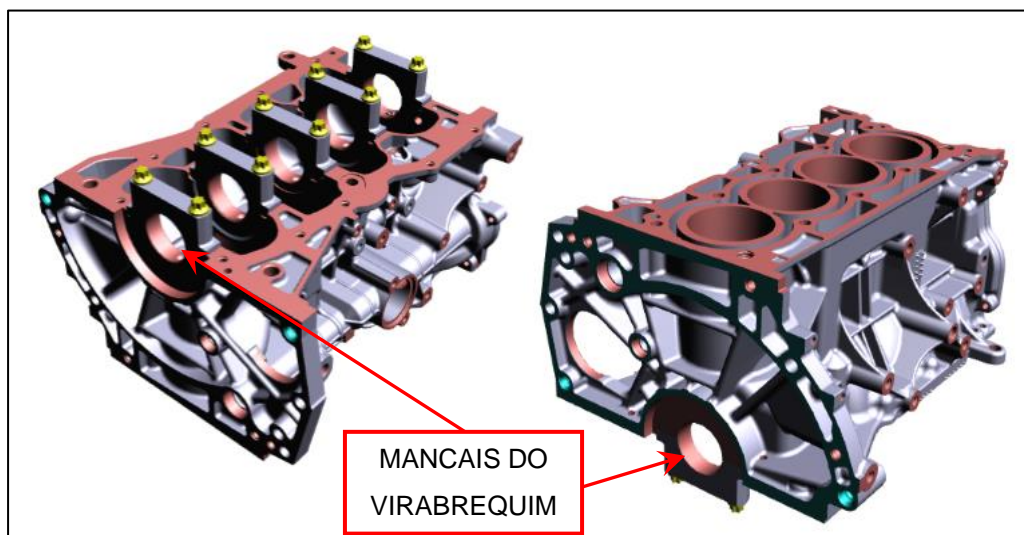
Um dos processos de fabricação é a usinagem das peças que apresenta um grande potencial para ganho de produtividade. Os casos apresentados a seguir são exemplos de como estas tecnologias estão sendo utilizadas e quais as dificuldades encontradas na sua aplicação.

1.1.1 Caso 1 – Usinagem do alojamento do virabrequim

O Primeiro estudo realizado foi em linha de usinagem de blocos, com arquitetura flexível, baseada em centros de usinagem horizontais. Essa linha de usinagem é constituída de 28 operações, com total de 75 máquinas das quais 58 são centros de usinagem e 4 são brunidoras.

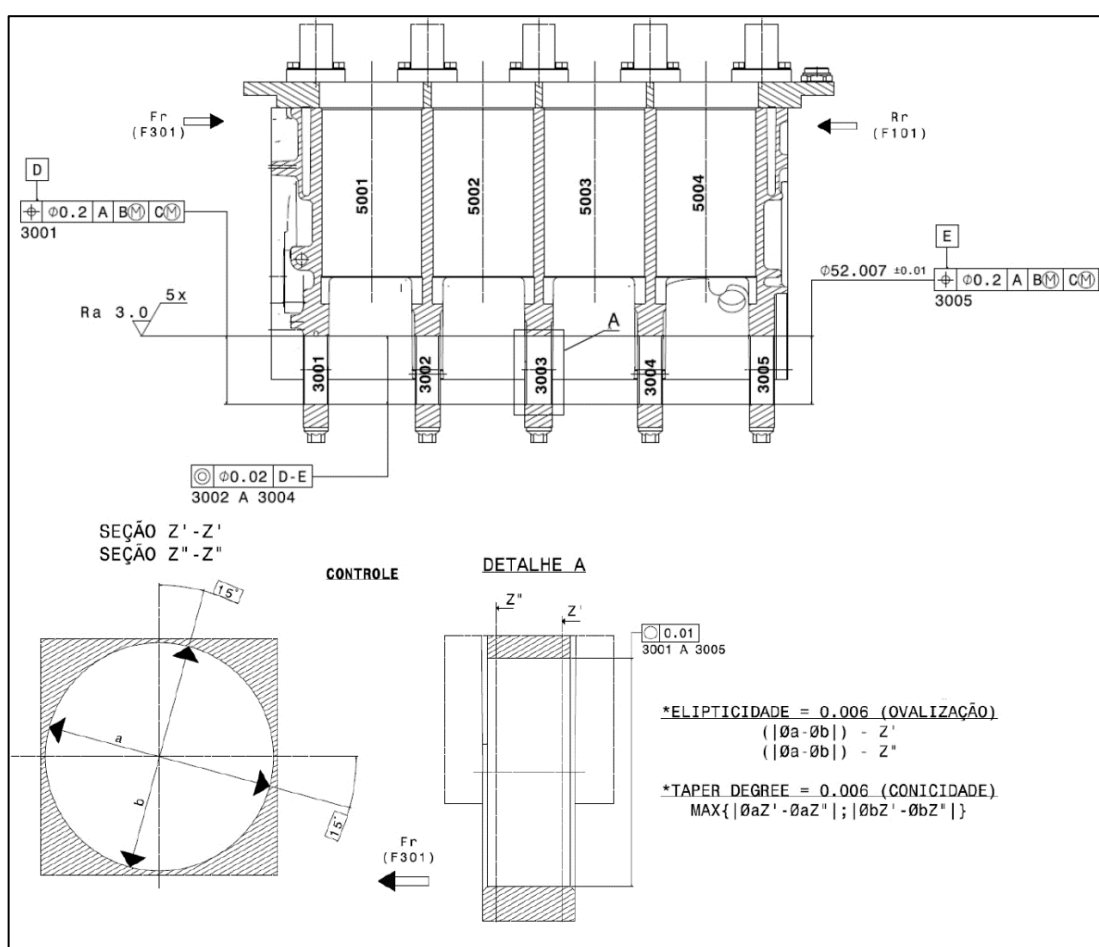
Uma das principais características de um bloco de motor são os mancais de alojamento do virabrequim, devido suas tolerâncias serem muito baixas é também uma das dimensões mais difíceis de serem atingidas, conforme figuras 2 e 3.

Figura 2 – Mancais do virabrequim do bloco.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 3 – Tolerâncias dimensionais mancais virabrequim



Fonte: Adaptado pelo autor, 2019.

No processo de fabricação atual as características geométricas e superficiais dos mancais são obtidas através de 5 etapas de fabricação (desbaste dos mancais do bloco bruto, desbaste dos mancais bloco após montagem das capas, semi-acabamento, acabamento e brunimento), sendo as 4 primeiras etapas feitas em centros de usinagem.

Outro fator que dificulta a usinagem deste tipo de bloco é a composição bi-material, bloco é de alumínio ADC12 e o das capas de mancal, é ferro fundido FCA (Ferro fundido classe 3), conforme tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Composição química do Bloco de Alumínio ADC12.

Características Químicas	Unidade	Valores
Cobre (Cu)	%	2,50 ± 1,00
Silício (Si)	%	10,80 ± 1,20
Magnésio (Mg)	%	0,26 ± 0,08
Zinco (Zn)	%	≤ 3,00
Ferro (Fe)	%	0,85 ± 0,25
Manganês (Mn)	%	≤ 0,50
Níquel (Ni)	%	≤ 0,50
Titânio (Ti)	%	≤ 0,10
Estanho (Sn)	%	≤ 0,30
Crômio (Cr)	%	≤ 0,10
Chumbo (Pb)	%	≤ 0,10
Antimônio (Sb)	ppm	≤ 500
Fósforo (P)	ppm	≤ 500
Cálcio (Ca)	ppm	≤ 500
Sódio (Na)	ppm	≤ 500
Bismuto (Bi)	ppm	≤ 500
Estrôncio (Sr)	ppm	≤ 500
Mercúrio (Hg)	ppm	≤ 500
Cádmio (Cd)	ppm	≤ 100
Densidade	g/cm ³	≥2.62

Fonte: Adaptado pelo autor, 2019.

Tabela 2 – Composição química das capas de mancal FCA.

Características Químicas	Unidade	Valores
Carbono (C)	%	3,20 a 3,40
Silício (Si)	%	1,80 a 2,20
Manganês (Mn)	%	0,60 a 0,90
Fósforo (P)	%	≤0,20
Enxofre (S)	%	≤ 0,30
Outros		Uma quantidade de Cu, Cr talvez adicionado

Fonte: Adaptado pelo autor, 2019.

O foco deste estudo é reduzir uma das operações de usinagem dos mancais do virabrequim, o brunimento. Para isso aplicou-se ferramentas de análises para identificar os parâmetros influentes do processo, que devem ser modificados para que se atinja o objetivo. Dentre os parâmetros identificados está uma possível vibração da ferramenta de mandrilamento que realiza o acabamento da peça.

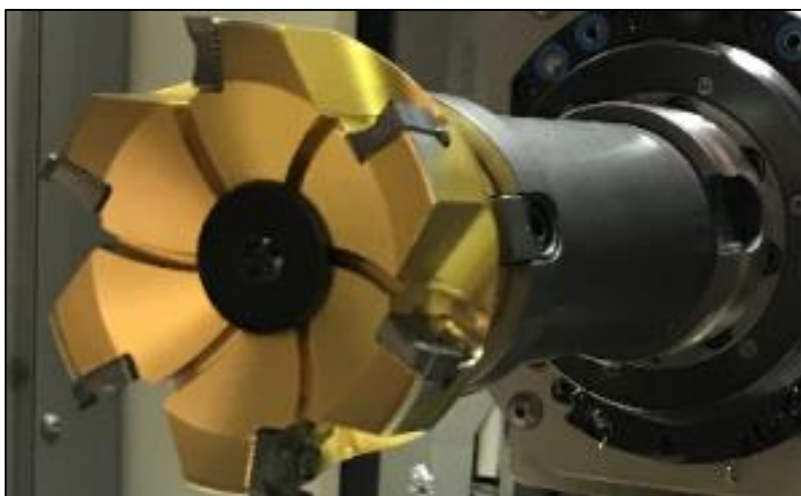
1.1.2 Caso 2 – Usinagem da face de fogo:

O segundo estudo realizado, assim como o primeiro foi em uma linha de usinagem de arquitetura flexível, baseada em centros de usinagem horizontais para cabeçotes de motor. Essa linha é composta de 24 operações, com total de 26 máquinas, das quais 15 são centros de usinagem de um único fuso e 8 bi-fusos (2 fusos por máquina).

Diferente do Bloco de motor, uma das características mais críticas para um cabeçote é a face de fogo, suas tolerâncias e dimensões são referências para todas as características usinadas da peça, e quando montada sobre a junta do cabeçote e o bloco garantem a estanqueidade do motor.

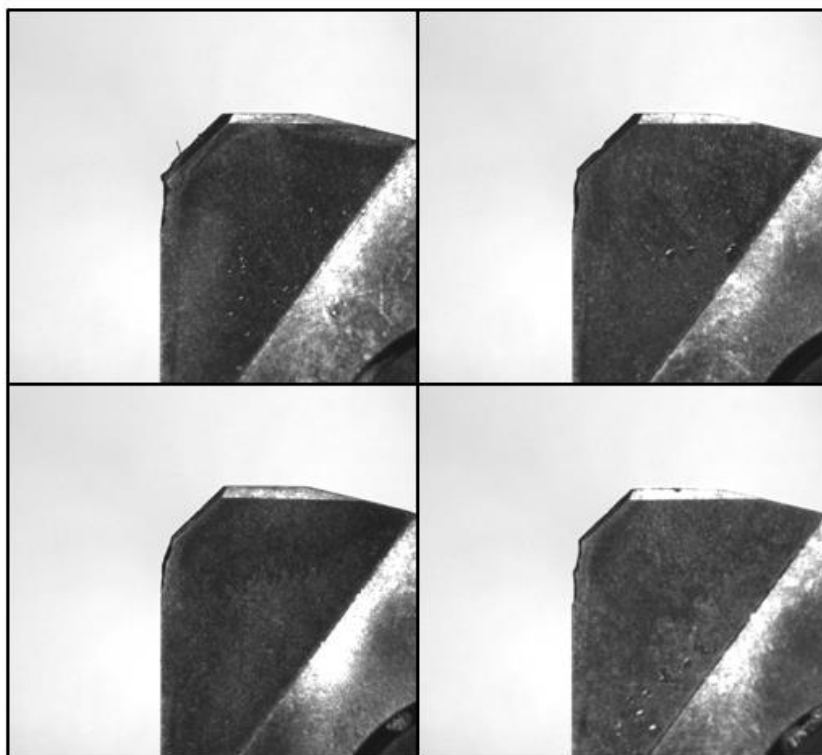
Durante o projeto de instalação de uma nova linha de usinagem de cabeçotes de alumínio, o processo definido para realizar o acabamento da face de fogo é o fresamento utilizando a ferramenta century do fornecedor Sandvik Coromant®, a vida útil prevista com esta ferramenta foi admitida em 1000 peças. Contudo, esta ferramenta não atingiu o objetivo de vida útil devido ao desgaste prematuro dos insertos da ferramenta e problemas de qualidade da peça, conforme figuras 4, 5 e 6.

Figura 4 – Ferramenta CoroMill Century®.



Fonte: O Autor, 2019

Figura 5 – Desgaste dos insertos da ferramenta Century (Zoom 25x)



Fonte: O Autor, 2019

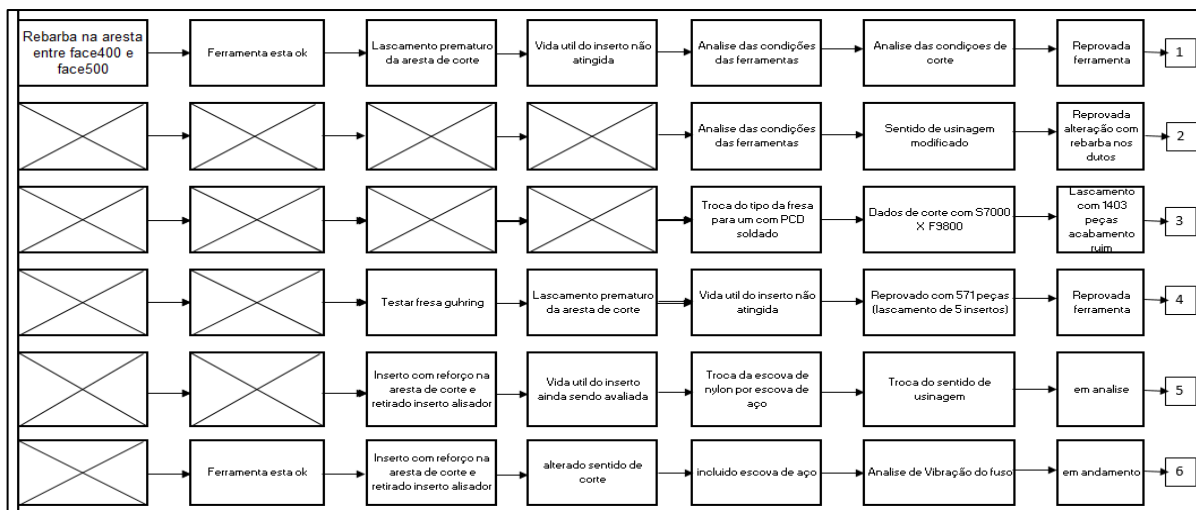
Figura 6 – Peças com acúmulo de cavacos:



Fonte: O Autor, 2019.

Aplicou-se então, uma ferramenta de análise para identificar a causa raiz do problema, conhecido como análise cinco porquês, conforme figura 7.

Figura 7 – Análise cinco porquês



Fonte: Adaptado pelo autor, 2019.

Após a análise realizada, contatou-se a possibilidade de vibração durante a dinâmica de corte entre ferramenta e a peça trabalho.

Como descrito por POLLI, 2005, sem um entendimento claro sobre as causas das vibrações no processo e as soluções disponíveis para sua eliminação, muitas máquinas e ferramentas de corte existentes são sub-utilizadas e os objetivos de redução dos tempos principais e aumento da produtividade tornam-se mais difíceis.

É o entendimento das causas das vibrações no processo citados acima que este trabalho tem por meta realizar, permitindo assim, a redução dos tempos e custos da operação.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar as causas de vibração dos casos 1 e 2 verificando o comportamento dinâmico das ferramentas de corte, utilizando para ambos o método de análise de sinais (aceleração x força x tempo).

O resultado da análise de sinais fará parte de uma metodologia a ser construída para a determinação das condições de corte das ferramentas que evitem a ocorrência de vibração durante o processo de usinagem.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Identificar experimentalmente os dados de aceleração x força x tempo para as ferramentas;
- b) Analisar os dados experimentais e transformá-los em respostas em frequência utilizando o Matlab;
- c) Definir parâmetros de corte que não coincidam com as frequências naturais das ferramentas;
- d) Realizar teste prático dos parâmetros previamente definidos;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO DE MANDRILAMENTO

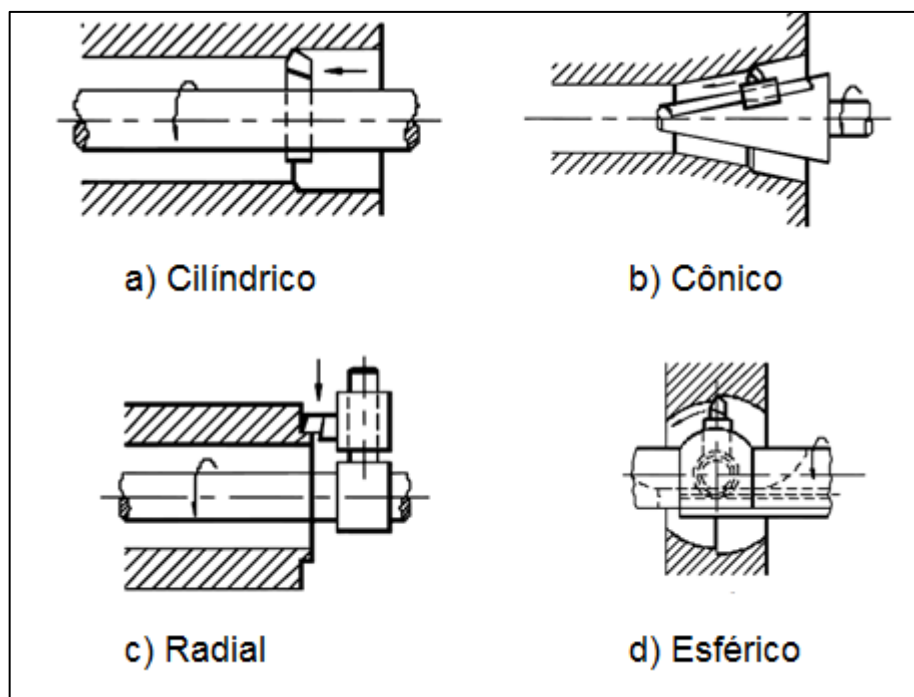
O mandrilamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou várias ferramentas de barra. Para tanto a ferramenta gira e se desloca segundo uma trajetória determinada (FERRARESI, 1970).

Dependendo do trabalho, o mandrilamento, também conhecido como mandrilagem ou broqueamento, pode ser cilíndrico, cônico, radial ou esférico. Através deste processo podem-se conseguir superfícies cilíndricas ou cônicas, internas, em espaços normalmente difíceis de serem atingidos, com eixos perfeitamente paralelos entre si (FERRARESI, 1970).

Ferraresi classifica o mandrilamento em quatro tipos, segundo a forma da superfície de revolução ou cavidade gerada:

- a) O mandrilamento cilíndrico é o processo em que a superfície usinada é cilíndrica e o seu eixo de rotação coincide com o eixo em torno do qual a ferramenta gira, conforme figura 8.a).
- b) O mandrilamento cônico é o processo em que a superfície usinada é cônica e seu eixo de rotação coincide com o eixo em torno do qual a ferramenta gira, conforme figura 8.b).
- c) O mandrilamento radial é o processo em que a superfície usinada é plana e perpendicular ao eixo em torno do qual gira a ferramenta, conforme figura 8.c).
- d) O mandrilamento esférico é o processo em que a superfície usinada é esférica e o eixo de rotação coincide com o eixo em torno do qual a ferramenta gira, conforme figura 8.d).

Figura 8 – Tipos de Mandrilamento



Fonte: FERRARESI, 1970.

As ferramentas de mandrilar são selecionadas em função das dimensões (comprimento e diâmetro) e características das operações a serem realizadas. Elas têm pequenas dimensões porque, geralmente, trabalham no interior de furos previamente executados por brocas. São feitas de aço rápido ou carboneto metálico e montadas em uma barra de mandrilar (ESSEL, 2015).

2.2 PROCESSO DE ALARGAMENTO

O Alargamento é um processo de usinagem fina que serve para a melhoria da qualidade do furo dimensional e superficial, sendo que a posição e a forma praticamente não são influenciadas. Em relação à cinemática, o processo de alargamento corresponde à furação de aumento de diâmetro com pequena espessura de usinagem (SCHROETER, 2001).

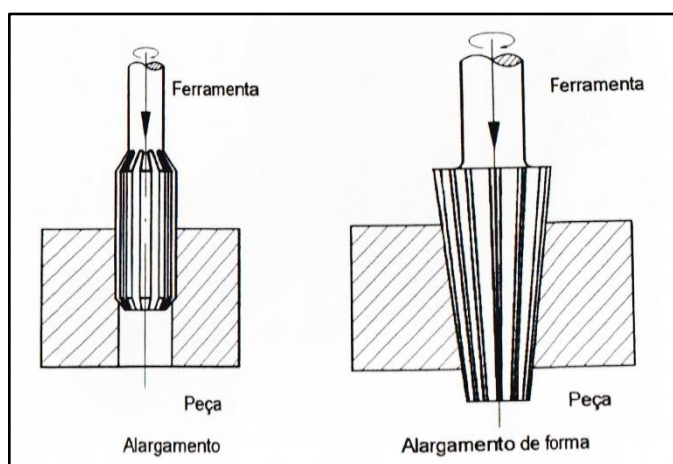
Os alargadores podem ser classificados quanto ao tipo de operação, desbaste ou acabamento, quanto ao tipo de dentes (canais), retos ou helicoidais, quanto a sua fixação, haste cilíndrica ou cônica, quanto ao sentido de corte, que em geral são de corte à direita, quanto ao uso, podem ser manuais ou de máquina, quanto à regulagem, podem ser fixos ou ajustáveis, quanto a geometria do furo, cônico ou paralelo, quanto ao número de dentes, de vários dentes ou de corte único e quanto à forma de entrada, conforme figura 9 (SCHROETER, 2001).

Ângulo de incidência ortogonal (α_0) – deve ser suficiente para que com o avanço normal a cunha cortante tenha um corte livre. Não podendo ultrapassar 5° .

Ângulo de incidência passivo do gume secundário (α'_p) – deve ter aproximadamente de 8° a 10° . A sua grandeza depende da largura da guia e do diâmetro do alargador.

De acordo com a norma DIN 8589, distingue-se o alargamento com ferramentas de múltiplos gumes e alargamento com ferramenta de gume único. A ferramenta de múltiplos gumes é guiada pelos gumes secundários dispostos na periferia. O alargador de gume único é guiado por guias dispostas na periferia. Os gumes de um alargador podem ser paralelos ao eixo ou de forma helicoidal, conforme figura 11 (SCHROETER, 2001).

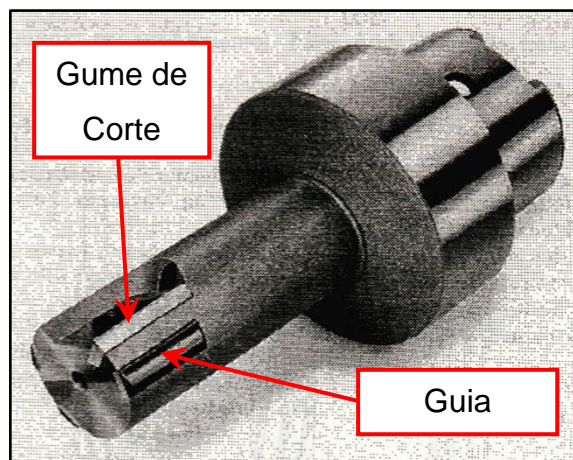
Figura 11 – Ferramentas de alargamento (Segundo DIN 8589).



Fonte: SCHROETER, 2001

Como consequência o projeto de alargadores de gume único, as funções de usinagens e de guia são executadas por elementos distintos, conforme Figura 12. As guias do alargador têm a função compensar a ação da força de corte e da força passiva. Os elementos de guia se apoiam na parede do furo e assim impedem a deflexão da ferramenta decorrente da força de usinagem. Em decorrência esta Configuração as velocidades de corte para os alargadores de gume único de situam nitidamente acima das empregadas convencionais de múltiplos gumes (SCHROETER, 2001).

Figura 12 – Alargador de um gume com três réguas de guia na periferia.



Fonte: König, 1997

Segundo (KRESS, 1974), os alargadores se diferem em monocortante e multicortante, sendo que o número das múltiplas arestas de corte é normalmente par e os dentes não são simétricos em algumas posições, evitando vibrações. Kress comenta que a precisão do furo alargado depende muito do alargador, sendo que a tolerância de construção recomendada do diâmetro do alargador deve ser 35% menor que a tolerância do furo desejado.

Os alargadores monocortantes executam furos com alta qualidade, e permitem utilizar maiores velocidades de corte (SCHROETER, 1989). A utilização de alargadores multicortantes pode se tornar interessante, visto que com um maior número de dentes há a possibilidade da utilização de uma maior velocidade avanço. Existe também a dificuldade em regular as ferramentas de aresta única de corte (monocortantes), além da manutenção dos componentes de fixação e regulagem.

As ferramentas multicortantes apresentam aresta de corte e guia no mesmo corpo e encontram-se simultaneamente em contato com a peça durante a usinagem (SCHROETER, 1989, KRESS 1974 e WEINERT et al 1998).

Quanto maior o número de dentes usinando simultaneamente, maior é a tendência do surgimento das vibrações regenerativas, devido ao efeito acumulativo da diferença de fase entre as ondulações de cortes subsequentes (TOBIAS, 1958; TLUSTY, 1970).

A precisão e acabamento do furo alargado dependem da fixação da peça, rigidez da máquina-ferramenta, parâmetros de corte, aplicação de fluido de corte e principalmente da condição do pré-furo – processo de alargamento necessita de um

furo pré-existente. Segundo (LUGSCHEIDER *et al*, 1997), a condição inicial do pré-furo a ser alargado, tais como a cilíndricidade, retilinidade e regularidade da superfície são de fundamental importância para o acabamento, pois os alargadores tendem a acompanhar a linha de centro do pré-furo.

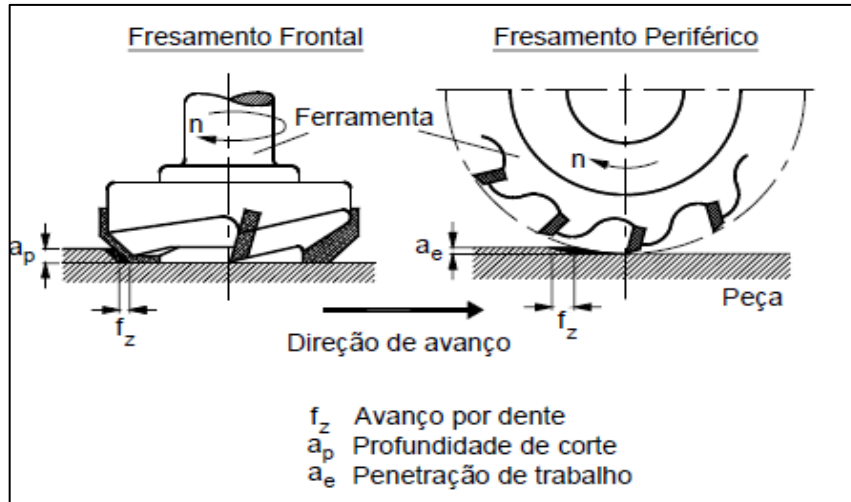
2.3 PROCESSO DE FRESAMENTO

Fresamento é um processo de usinagem no qual a remoção de material da peça se realiza de modo intermitente, pelo movimento rotativo da ferramenta, geralmente multi cortante, gerando-se superfícies de variadas formas. Neste processo tanto a ferramenta quanto a peça podem assumir movimentos rotativos, independentes ou combinados, permitindo a realização de uma ampla variedade de operações, gerando superfícies planas ou curvas, ranhuras, ressaltos, roscas, engrenagens e outras configurações (STEMMER, 1995).

Segundo (DINIZ *et Al.* 2013), os tipos fundamentais de fresamento são determinados segundo a posição do eixo árvore da máquina-ferramenta e é classificado como fresamento horizontal, fresamento vertical ou fresamento inclinado. A disposição dos dentes ativos da fresa, classifica-se a operação de fresamento é tangencial ou frontal.

No fresamento tangencial ou periférico, os dentes ativos da fresa estão na superfície cilíndrica da ferramenta, ou seja, o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo gerada e as ferramentas são chamadas de fresas cilíndricas ou tangenciais. O processo também pode ser classificado como concordante ou discordante. Na fresagem concordante, os movimentos de corte e de avanço tem o mesmo sentido, iniciando o corte com a espessura máxima do cavaco. Na fresagem discordante, os movimentos de corte e de avanço tem em média sentidos opostos, iniciando-se o corte com a espessura mínima do cavaco (STEMMER, 1995), conforme figuras 13 e 14.

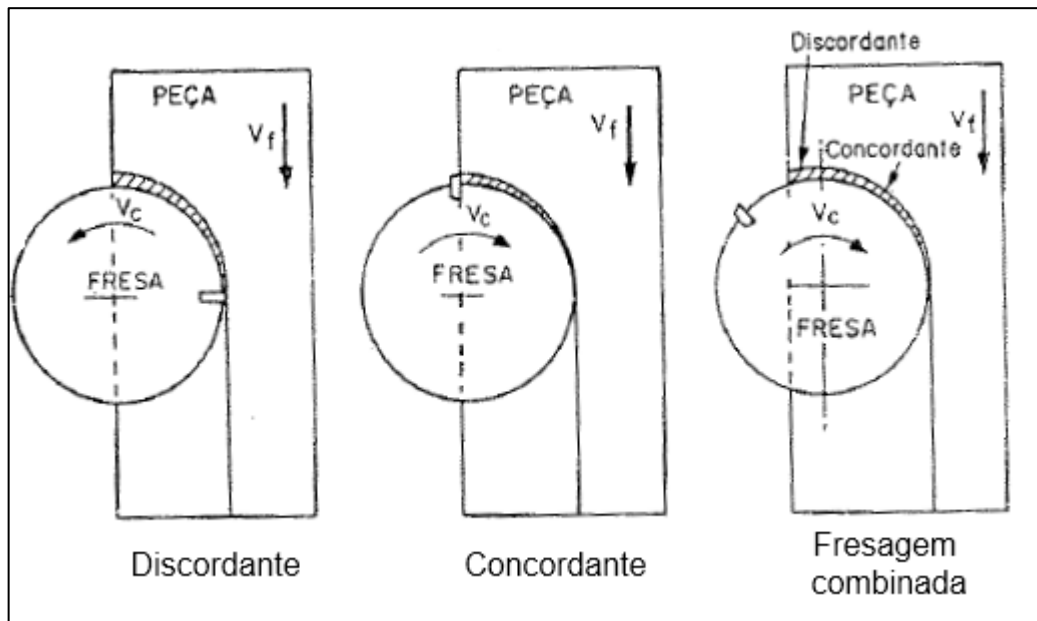
Figura 13 – Fresamento Frontal e Fresamento Periférico



Fonte: POLLI, 2005.

O fresamento frontal é a operação na qual os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta, ou seja, perpendicular a superfície. Neste caso as fresas são chamadas de fresas frontais ou de topo.

Figura 14 – Fresamento tangencial concordante e discordante



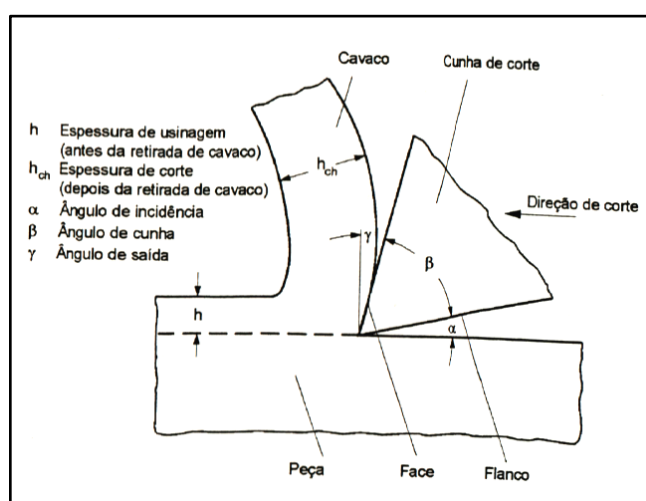
Fonte: STEMMER, 1995.

2.4 DINÂMICA DO PROCESSO DE CORTE

2.4.1 Remoção de material

O processo de remoção de material se inicia quando a cunha da ferramenta penetra no material da peça que se deforma elástica e plasticamente. Após ultrapassar a tensão de cisalhamento máxima do material este começa a escoar. Devido à forma da cunha da ferramenta o material escoado toma a forma de cavaco que desliza na face da ferramenta, conforme Figura 9 (KÖNIG, 1997).

Figura 15– Formação de cavaco



Fonte: KÖNIG, 1997.

Segundo (GREZESIK, 2017), os cavacos classificados em 4 grupos (cavaco contínuo, cavaco de lamelas, cavaco cisalhado e cavaco arrancado).

Cavacos contínuos são comuns na maioria dos materiais dúcteis, como ferro forjado, aço macio, cobre e alumínio, são usinados em velocidades de corte relativamente altas. A razão é que os metais dúcteis e as ligas não se fraturam no plano de cisalhamento. A formação contínua de cavacos de materiais dúcteis está associada a forças de corte reduzidas e geralmente resulta em um bom acabamento superficial (GREZESIK, 2017).

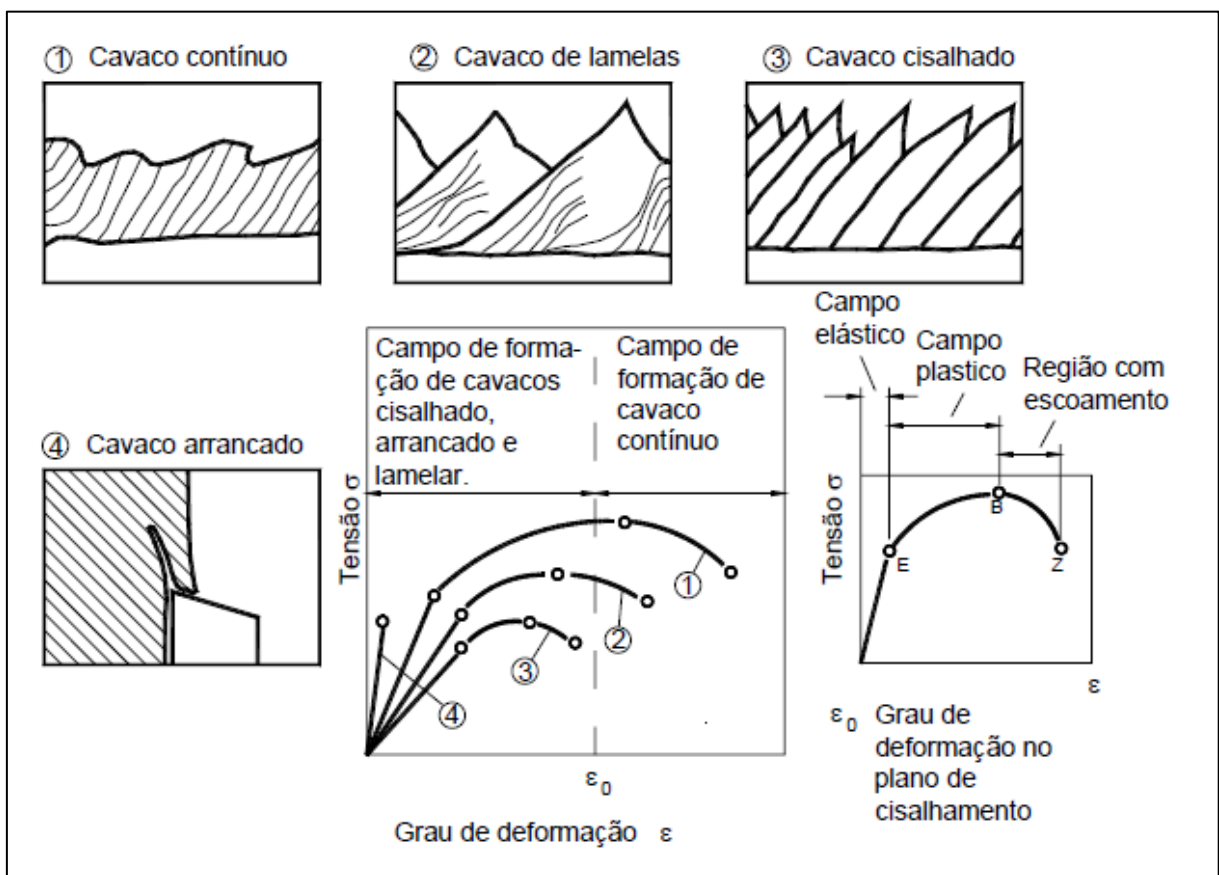
Cavacos do tipo lamelar são caracterizados por regiões de cisalhamento intenso separadas por regiões de material com deformação relativamente baixa. Esses cavacos são produzidos para a maioria dos materiais à medida que as velocidades de corte aumentam para níveis elevados (GREZESIK, 2017).

Cavacos cisalhados constam de segmentos de cavacos que são seccionados na região de cisalhamento e novamente se unem através de caldeamento. Este tipo

de cavaco ocorre quando $\epsilon_0 > \epsilon_z$, de forma que isto não ocorre somente para materiais frágeis como ferro fundido, mas também quando a deformação produz um encruamento acentuado na estrutura do material (POLLI, 2005).

Cavacos arrancados são geralmente formados ao usinar materiais frágeis ou materiais contendo pontos de concentração de tensão, como os flocos de grafite em ferro fundido ou as inclusões de sulfeto de manganês em aços de usinagem livre. Eles também podem ser produzidos na usinagem de materiais dúcteis em velocidades muito baixas e altos avanços (GREZESIK, 2017).

Figura 16– Tipos de Cavacos



Fonte: POLLI, 2005.

Um dos principais fatores que influenciam o processo de remoção de um determinado material é o fator de usinabilidade que pode ser definido como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão. Ou seja, pode-se entender a usinabilidade como o grau de dificuldade de se usinar um determinado material. Entende-se como propriedades de usinagem de um material aquelas que expressam seu efeito sobre as grandezas mensuráveis inerentes ao processo, tais como a vida da ferramenta,

acabamento superficial da peça, esforços de corte, temperatura de corte, profundidade, e características de cavaco (DINIZ, *et.al.*,2013).

A usinabilidade básica de um material é uma função de

1. química
2. estrutura
3. compatibilidade com material de ferramenta

As características básicas de usinagem de ferro, alumínio, titânio, níquel, cobalto e cobre e suas ligas são bastante diferentes devido à diferença nas propriedades químicas e físicas do metal base. Uma variedade tão ampla de materiais também terá diferentes classificações de usinabilidade, sobre o material da ferramenta utilizado. Aços da mesma composição química, mas estruturas metalográficas diferentes podem ter características de usinagem amplamente diferentes. Algumas combinações de materiais de trabalho e ferramentas são adequadas umas às outras, enquanto outras são relativamente incompatíveis (SHAW, 2005).

Materiais usinados podem ser classificados como:

1. materiais de usinagem fácil (alumínio e ligas de cobre)
2. aços comuns e ferros fundidos
3. materiais difíceis de usinar

Como o objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento dinâmico da usinagem da linha do virabrequim e o fresamento do cabeçote de Alumínio o estudo de influência da usinabilidade apresentará apenas os materiais alvo deste trabalho Alumínio (Al) e Ferro Fundido.

O alumínio e suas ligas são considerados de excelente usinabilidade. As forças de usinagem são geralmente baixas quando usinando as ligas de alumínio, e diminuem como aumento da velocidade de corte. Na usinagem do alumínio puro, entretanto, as forças são elevadas, principalmente a baixas velocidades de corte. Este comportamento é diferente das ligas de Mg e semelhante ao de outros metais. Um dos maiores problemas na usinagem do alumínio e suas ligas é o controle do cavaco. A estrutura CFC do alumínio permite que maiores deformações ocorram antes do metal se romper. Por esse motivo, os cavacos são contínuos, grossos, resistentes e difíceis de serem controlados, podendo se emaranhar na peça e promover baixa qualidade no acabamento superficial.

A usinabilidade de ferro fundido cinzento é geralmente muito boa, devido a presença de lamelas de grafite contínuas na microestrutura. A presença das lamelas

facilita a formação de cavacos, bem como ajuda na lubrificação durante a usinagem. Apesar disso, podem ocorrer situações em que a usinabilidade de um lote de peças fundidas para outro pode variar consideravelmente. Esta variação de usinabilidade geralmente é medida pela mudança na vida da ferramenta, consumo de energia, o volume de material removido até o desgaste da ferramenta, o acabamento da superfície e a precisão, ou mesmo uma alteração do número de peças usinadas por ferramenta. Às vezes, estas variações na usinabilidade podem ocorrer sem mudanças óbvias na microestrutura (BURKE, 1999).

2.4.2 Mecânica de Corte

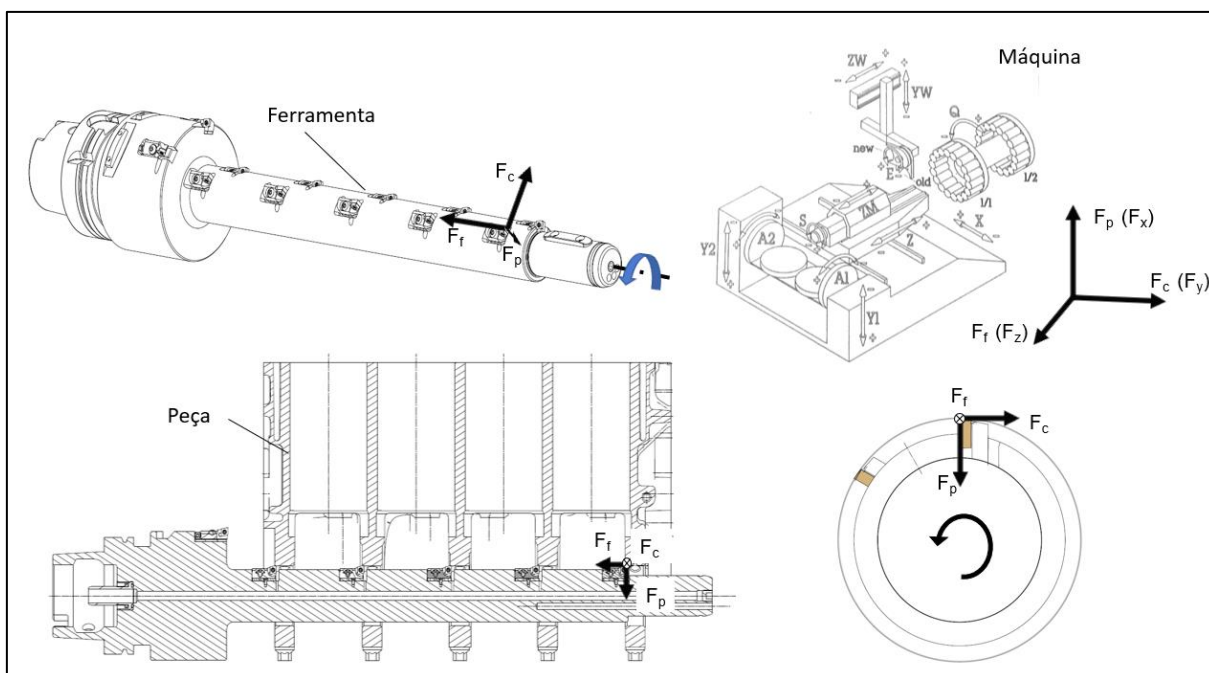
As formas finais da maioria das peças mecânicas são obtidas por operações de usinagem, essas operações de usinagem podem ser classificadas em duas categorias principais: processos de corte e retificação. As operações de corte são usadas para remover o material da peça. As operações de retificação subsequentes fornecem um bom acabamento superficial e dimensões de precisão para a peça. As operações de corte mais comuns são torneamento, fresamento e perfuração, seguidas por operações especiais, como perfuração, brochamento, modelagem e corte de formas. No entanto, todas as operações de corte de metal compartilham os mesmos princípios de mecânica, mas sua geometria e cinemática podem diferir umas das outras (ALTINTAS, 2012).

Segundo Stemmer (1989) no caso geral, a força total F que atua entre a ferramenta e a peça durante o processo de usinagem é uma força espacial, que pode ser considerada como formada por componentes:

- a) Geométricos, decorrentes da decomposição vetorial da força total segundo eixos quaisquer arbitrários, segundo as direções de corte F_p , F_f e F_c (força passiva, força de avanço e força de corte);
- b) Físicos, devidos a ações físicas específicas em certas direções (atrito, empuxo, cisalhamento, etc.) cuja a ação simultânea produz a força total.

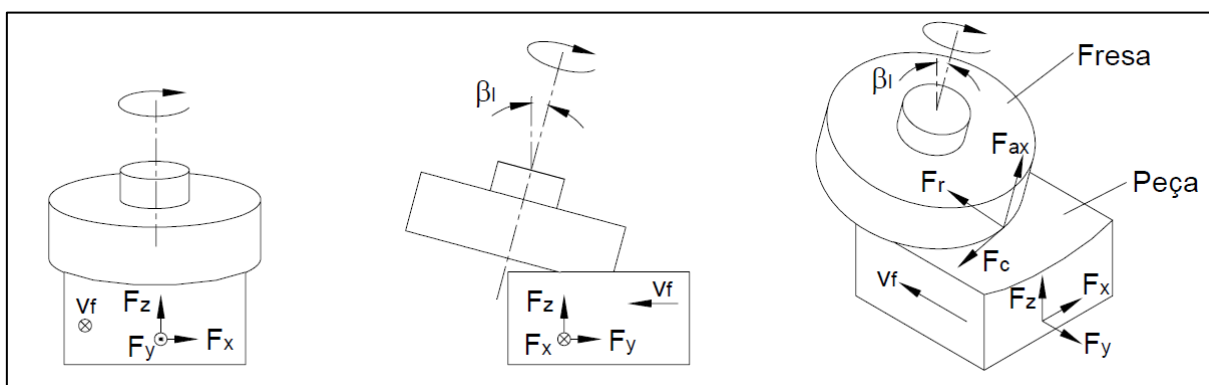
As figuras 17 e 18 demonstram a ação das forças para as ferramentas de mandrilamento e fresamento que são os alvos deste estudo.

Figura 17– Diagrama de forças para a ferramenta de Mandrilamento.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 18– Diagrama de forças para a ferramenta de Fresamento.



Fonte: POLLI, 2005.

A caracterização das forças envolvidas no corte é de fundamental importância para a pesquisa e o desenvolvimento de modelos, para a otimização, o monitoramento e o controle do processo. Em virtude de sua relevância física, as forças são, freqüentemente, elementos-chave para o entendimento da cinemática e da dinâmica de máquinas-ferramentas e dos processos de usinagem (POLLI, 2005).

2.5 PARAMETROS DE CORTE

No processo de usinagem, existe uma série de importantes parâmetros de corte a considerar. Eles descrevem quantitativamente os movimentos, as dimensões e outras características da operação de corte (PEIXOTO, 2013). Alguns destes parâmetros são definidos pelos fabricantes de acordo com as ferramentas utilizadas.

2.5.1 Velocidade de Corte (V_c)

Definido como velocidade instantânea do ponto de referencia da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte (FERRARESI, 1990). A velocidade de corte é, então, uma velocidade tangencial, conforme equação (1) e Figura 15.

$$V_c \left[\frac{mm}{min} \right] = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad (1)$$

onde D é o diâmetro da fresa em [mm] e N a velocidade de rotação do eixo-árvore em [rpm].

2.5.2 Velocidade de Avanço (V_f)

Definida como velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço (FERRARESI, 1990), ou seja, a velocidade de avanço é, então, radial ao eixo da ferramenta, conforme equação (2) e Figura 15.

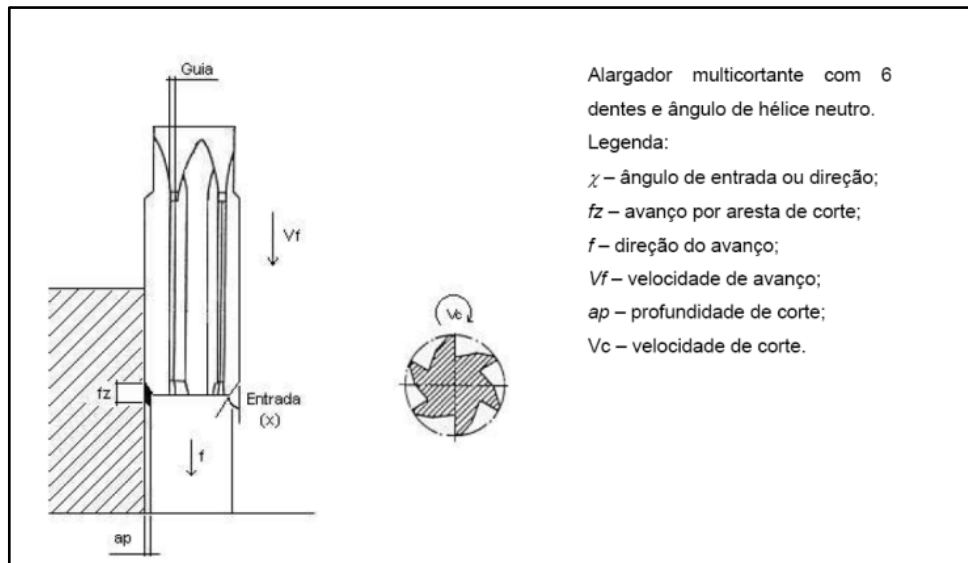
$$V_f \left[\frac{mm}{min} \right] = N \times Z \times f_z \quad (2)$$

onde N [rpm] é a velocidade de rotação do eixo-árvore, Z é o número de dentes (inserto) da fresa e f_z [mm/dente] é o avanço por dente (inserto).

2.5.3 Profundidade de corte (Penetração passiva) (a_p)

É a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho (na direção do eixo da ferramenta). No alargamento a profundidade de corte equivale a metade da diferença entre o diâmetro do pré-furo e o diâmetro do furo final (STEMMER, 1989), conforme Figura 14.

Figura 14 – Cinemática do processo de alargamento.



Fonte: SANTOS, 2004.

2.6 CONCEITOS DE VIBRAÇÃO

2.6.1 Vibrações de ferramentas

A máquina, ferramenta de corte e peça de trabalho formam um sistema estrutural com características dinâmicas complexas. Sob certas condições, este sistema pode ser submetido a vibrações excessivas (SANDVIK, 1994).

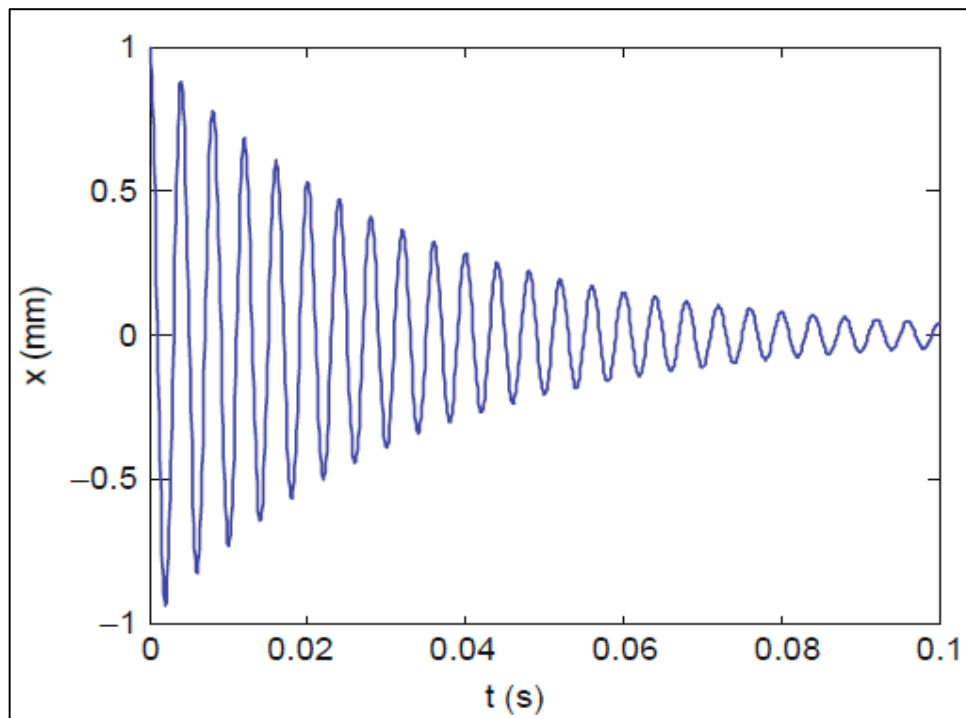
Nossa estrutura de interesse é uma ferramenta de corte com alguma geometria (aresta de corte única ou múltipla) conectada a um porta-ferramentas, fuso e fresadora. Ambos os casos podem ser representados como corpos combinados que possuem massa e elasticidade, ou a capacidade de se deformar sem alterar permanentemente a forma. A vibração dos corpos que exibem essas características pode ser dividida em três categorias principais: vibrações livres, forçadas e auto-excitadas (SCHMITZ *et al.*, 2009).

- Vibrações livres ou transientes:

A vibração livre ocorre quando não há uma força de excitação externa de longo prazo. É o resultado de algumas condições iniciais impostas ao sistema, como um deslocamento da posição de equilíbrio do sistema, por exemplo. A vibração livre produz movimento em uma ou mais das freqüências naturais do sistema e, como todas as estruturas físicas exibem alguma forma de amortecimento (ou dissipação de

energia), ela é vista como uma oscilação decadente com duração relativamente curta (SCHMITZ *et al.*, 2009). Em máquinas-ferramentas ela ocorre em quase todas as operações de usinagem. Surgem devido ao contato inicial da ferramenta e peça a ser usinada, ou são causadas pelo movimento recíproco rápido da mesa, da máquina-ferramenta. O sistema máquina-ferramenta vibra em seus modos naturais até que a vibração é amortecida (IMANI, *et al.*, 2009).

Figura 15 – Exemplo de vibração livre amortecida.

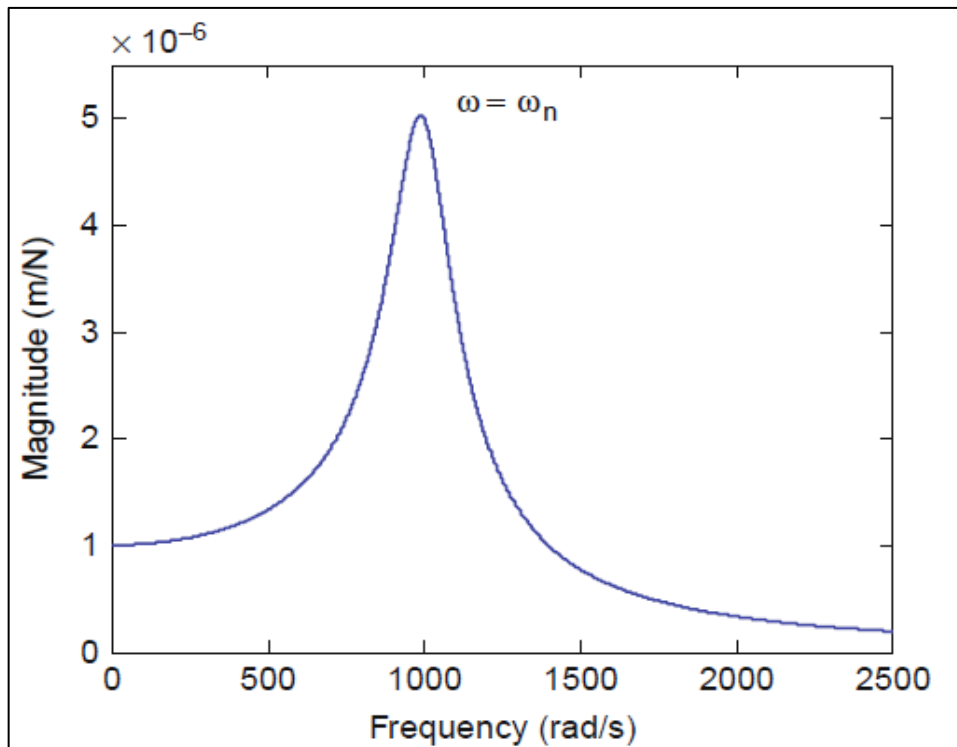


Fonte: SCHMITZ *et al.*, 2009.

- Vibrações forçadas:

A vibração forçada ocorre quando uma excitação periódica externa contínua produz uma resposta com a mesma frequência de excitação (após o decaimento dos transientes iniciais). Enquanto a vibração livre é frequentemente representada no tempo-limite, a vibração forçada é tipicamente analisada no domínio da frequência. Isso enfatiza a magnitude e a dependência de fase na frequência e permite a identificação conveniente de frequências naturais. Uma fonte típica de vibração forçada em sistemas mecânicos é o desequilíbrio rotativo. Grandes vibrações ocorrem quando a frequência de excitação, ω , está próxima da frequência natural do sistema, ω_n , como mostra a Figura 16. Essa condição é referida como ressonância e geralmente é evitada (SCHMITZ *et al.*, 2009).

Figura 16 – Exemplo de magnitude da vibração forçada.

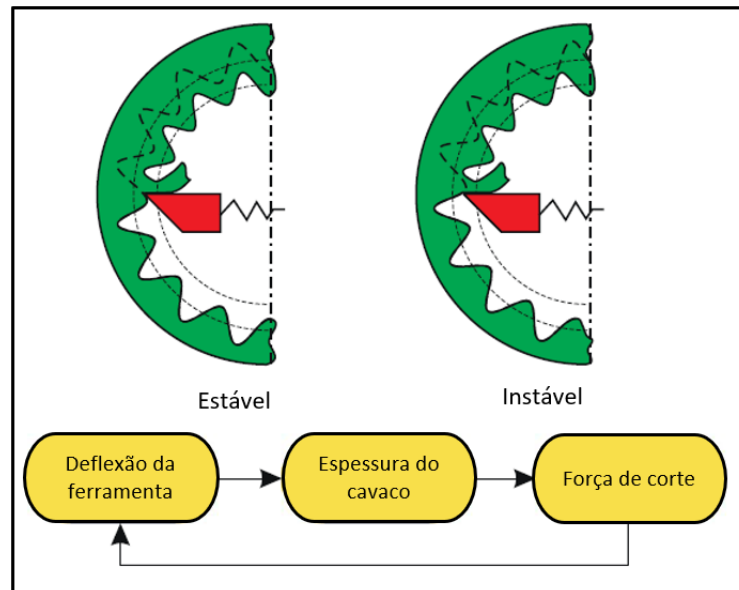


Fonte: SCHMITZ et al., 2009.

- Vibrações auto-excitadas:

É o tipo mais importante de vibração em processos de usinagem. Quando a ferramenta inicia o corte, ela está sob influência das vibrações transientes. Se os parâmetros de usinagem, como profundidade de corte, taxa de remoção de material e velocidade de corte não estão definidos corretamente, vibração transitória pode levar a vibrações auto-excitadas ou vibração. Se a ferramenta vibra, a espessura do cavaco mudará do seu valor nominal, haverá oscilações de força de corte e magnitude da mesma. A nova força de corte vai impor um novo desvio para a ferramenta de corte. Em consequência, a interação de forças de corte, a ferramenta de deformação e espessura de apra forma um laço, conforme Figura 17. Se os parâmetros de usinagem e características estruturais da estrutura da máquina-ferramenta não são mantidos em conformidade, ocorrerá e vibrações instáveis, conforme Figura 17. Como resultado, a amplitude de vibração aumenta em todas as partes da ferramenta de corte durante o processo de usinagem. Isto continua até que a ferramenta ou a peça de obra ou de um dos componentes de transmissão de energia falha, a menos que um fator limitante (como o salto para fora do corte da ferramenta) limita a amplitude de vibração (IMANI, et. al., 2009).

Figura 17 – Vibrações regenerativas do processo de mandrilamento.



Fonte: IMANI, et. al.,2009

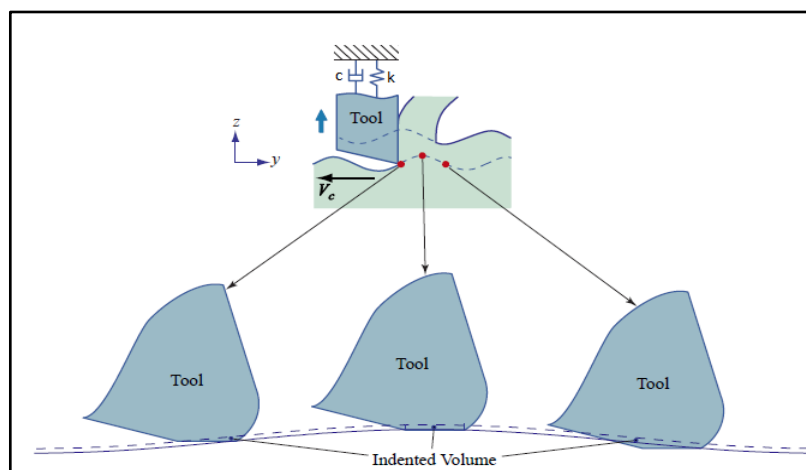
2.6.2 Equacionamento

Uma estrutura simples com um sistema de um grau de liberdade pode ser modelada pela combinação de elementos como: massa (m), rigidez (k) e o amortecimento (C), conforme Figura 18. Quando uma força externa $F(t)$ é aplicada na estrutura, seu movimento é descrito pela seguinte equação diferencial equação (3). (POLLI, 2005):

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (3)$$

onde \dot{x} é em $[m/s]$ e \ddot{x} é em $[m/s^2]$.

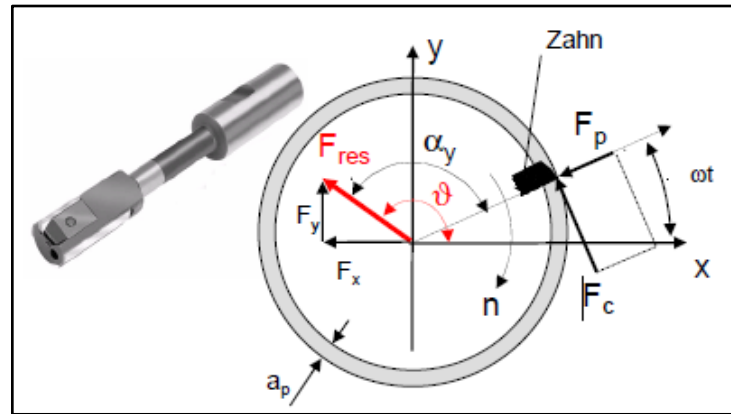
Figura 18 – Modelo dinâmico vibração.



Fonte: AYGÜN, 2010

Koppka realizou um estudo sobre vibrações no processo de usinagem, conforme Figura 19, e chegou às seguintes relações:

Figura 19 – Ferramenta de corte de um único inserto.



Fonte: KOPPKA, 2009.

Análise de forças na direção x e y, equações (4) e (5).

$$F_x = -F_c \times \text{sen}(-\omega \times t) - F_p \times \text{cos}(-\omega \times t) \quad (4)$$

$$F_y = -F_c \times \text{cos}(-\omega \times t) - F_p \times \text{sen}(-\omega \times t) \quad (5)$$

onde a_p é a profundidade de corte, f_z é o avanço por dente, k_c é a força de corte específica, k_p é a força de corte passiva, k_z é a força de alimentação, h é a espessura do inserto, b largura do inserto, K_r é o ângulo de construção, F_c é a força de corte, F_p é a força passiva, F_f é a força de avanço.

Resultante das forças é dada pela equação (6).

$$F_{res} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = f_z \times a_p \times \sqrt{k_c^2 + k_p^2} \quad (6)$$

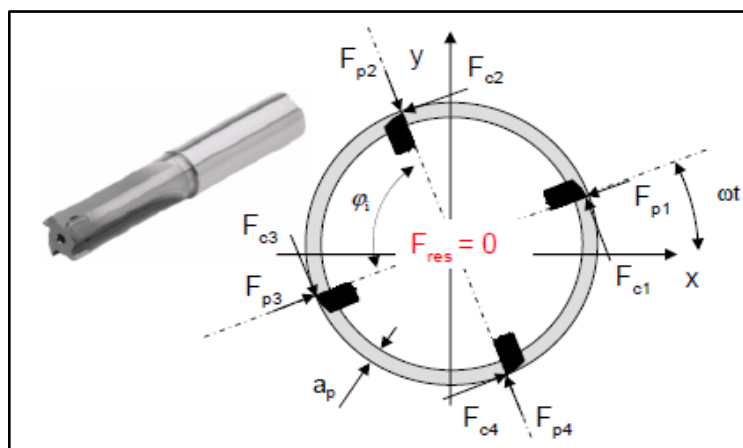
O ângulo da força resultante é dado por:

$$\vartheta = \text{arctang} \left(\frac{F_y}{F_x} \right) = \alpha_y - \omega \times t \quad (7)$$

O ângulo entre a força passiva e a força resultante é uma função de $\alpha_y = f(k_c, k_p)$

Analisando para múltiplos insertos, Figura 20, tem-se:

Figura 20 – Ferramenta de vários insertos de corte.



Fonte: KOPPKA, 2009.

Análise de forças na direção x e y, equações (8) e (9).

$$F_x = \sum_{i=1}^Z -F_{ci} \times \sin(\varphi_i - \omega \times t) - F_{pi} \times \cos(\varphi_i - \omega \times t) \quad (8)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^Z -F_{ci} \times \cos(\varphi_i - \omega \times t) - F_{pi} \times \sin(\varphi_i - \omega \times t) \quad (9)$$

Resultante das forças é dada pela equação 10.

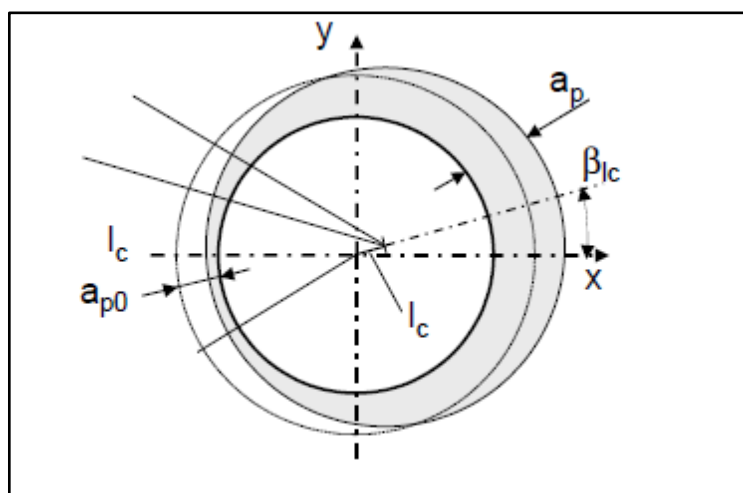
$$F_{res} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (10)$$

Considerando que o processo passa por perturbações obtém-se, a equação (11) para a Figura 21, e a equação (12) para a Figura 22.

$$a_p = a_{p0} + l_c \times \cos(\omega \times t + \beta_{lc} - \varphi_i) \quad (11)$$

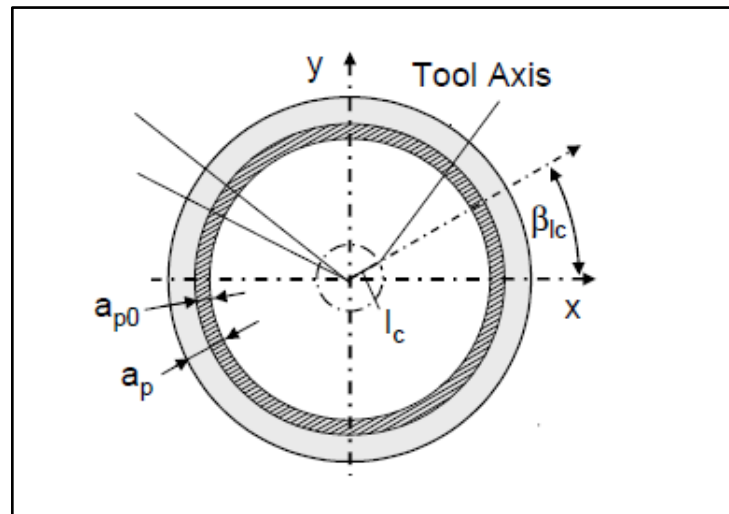
$$a_p = a_{p0} + l_c \times \cos(\beta_{lc} - \varphi_i) \quad (12)$$

Figura 21 – Perturbações quando a peça esta desalinhada



Fonte: KOPPKA, 2009.

Figura 22 – Perturbações quando a ferramenta esta desalinhada



Fonte: KOPPKA, 2009.

Considerando os erros de desalinhamento Koppka definiu que a força resultante para a união das ferramentas é igual a equação (13).

$$F_{res} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \frac{Z}{2} \times f_z \times l_c \times \sqrt{k_c^2 + k_p^2} \quad (13)$$

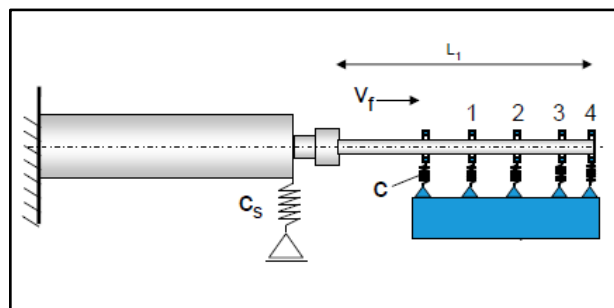
O ângulo da força resultante para a ferramenta fixa é dado pela equação (14) e o ângulo de força resultante para o conjunto todo fixado é dado pela equação (15).

$$\vartheta = \arctang\left(\frac{F_y}{F_x}\right) = \alpha_y \quad (14)$$

$$\vartheta = \arctang\left(\frac{F_y}{F_x}\right) = \alpha_y - \omega \times t \quad (15)$$

Analisando a Figura 23, Koppka obteve a equação (16).

Figura 23 – Modelo esquemático do processo de usinagem.



Fonte: KOPPKA, 2009.

$$\rho \times A \times \ddot{v} + (E \times I \times v) = 0 \quad (16)$$

Através do cálculo da função de transferência com a ajuda do método de diferenças finitas, Koppka obteve a equação (17).

$$H(j\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{v}_i \times \bar{v}_i^T}{m_i \times (\omega_i^2 - \omega^2 + j \times 2 \times D_i \times \omega_i \times \omega)} \quad (17)$$

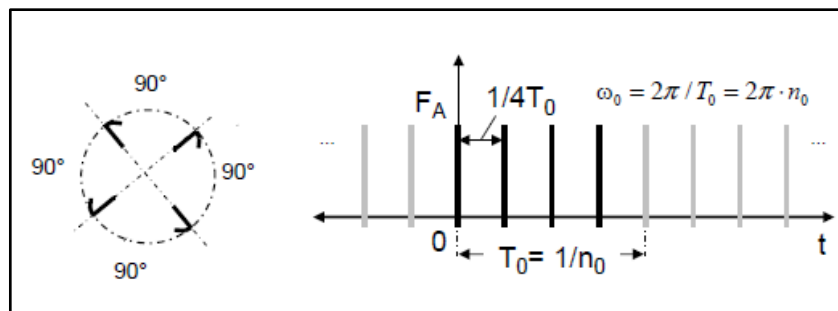
Sendo assim a função resposta frequência é demonstrada pela equação (18).

$$Q(j\omega) = H(j\omega) \times X(j\omega) \quad (18)$$

Realizando a transformada rápida de Fourier obtem-se a equação (19), conforme Figura 24.

$$X(j\omega) = F_A \times (e^{-j\omega \times t_0} + e^{-j\omega \times t_1} + e^{-j\omega \times t_2} + \dots + e^{-j\omega \times t_z}) \quad (19)$$

Figura 24 – Análise sistemática da ferramenta.



Fonte: KOPPKA, 2009.

No presente trabalho, as equações descritas acima que resultam na função resposta em frequência, foram obtidas de rotinas de cálculo desenvolvidas no ambiente Matlab®

2.6.3 Tratamento dos sinais

A transformada de Fourier equação (19), é um algoritmo que permite acelerar o processamento da interpolação de uma grande quantidade de dados por polinômios trigonométricos, que é um método usado em Óptica, Mecânica Quântica e inúmeros problemas de simulação.

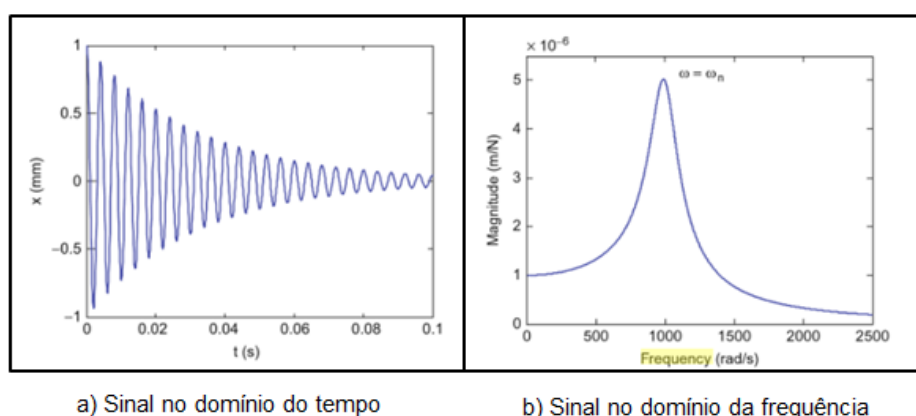
Neste trabalho a aplicação do algoritmo FFT (Fast Fourier Transform) foi realizada com decréscimo em frequência, por ser esta a forma mais adequada para trabalhar com tratamento de sinais (GONÇALVES, 2004).

O termo “resposta em frequência” pode ser obtida como a resposta em regime estacionário de um sistema com entrada senoidal. A análise deste sinal é um método utilizado para determinar a resposta estrutural no estado permanente de uma estrutura sujeita a excitação oscilatória. Esta excitação pode ser da forma de forças aplicadas

e/ou movimentos impostos ao sistema como deslocamentos, velocidades ou acelerações (PEIXOTO, 2013).

Na análise modal experimental a relação entrada-saída é calculada a partir da excitação e das respostas capturadas respectivamente nos pontos de excitação e de medição previamente selecionados (MAIA, 1997). Neste caso, obtém-se um conjunto de funções complexas, em que cada função representa a função de transferência entre a força de excitação aplicada no ponto “j” e a resposta medida no ponto “i” da estrutura, domínio do tempo (PEIXOTO, 2013). As funções de transferências podem também ser avaliadas no domínio da frequência, levando à definição das chamadas Funções de Resposta em Frequência (SCHMITZ, 2008), conforme Figura 25.

Figura 25 – Funções de transferência.



Fonte: SCHMITZ, 2008

Os modos de vibração na usinagem são gerados pelas excitações externas que são geralmente periódicas (ALTINTAS Y., 2000). Qualquer força periódica pode ser representada por suas componentes harmônicas, ou seja, uma vez encontrada a frequência harmônica do primeiro modo de vibração, pode-se encontrar rapidamente para alguns sistemas, a frequência do segundo modo que é o dobro do modo fundamental, a frequência do terceiro modo é o triplo, e assim sucessivamente.

f_1 fundamental

$f_n = n f_1$ harmônicos $n=2, 3, 4, \dots$ (20)

2.6.4 Métodos no domínio do tempo

O métodos de análise no domínio do tempo são muito utilizados para a identificação modal dos sistemas, através da avaliação das características dinâmicas dos modelos ajustados. Nesses métodos são determinados os parâmetros de

modelos que se consideram adequados para representar o comportamento dinâmico de sistemas estruturais, sob a forma da representação de estado de sistemas estocásticos discretos no tempo (RODRIGUES, 2004). A principal vantagem dos algoritmos baseados em dados, é que eles não requerem nenhum processamento adicional para obter espectros ou covariâncias, eles auto-detectam diretamente dos sinais do tempo (PEETERS, 2000).

2.6.4.1 SSI-COV

SSI-Cov, do inglês, *Covariance-Driven Stochastic Subspace Identification*, método de Identificação Estocástica em Subespaço dirigido pela covariância, utilizado para solucionar o problema de realização estocástica que consiste na identificação da matrizes de estado dos sistemas estocásticos no tempo (PEETERS, 2000).

Ao inserir os dados de entrada, é possível observar um sistema de ordem n somente se a chamada Matriz Observabilidade e a Matriz Controlabilidade são também de ordem n . Entretanto, como a ordem do sistema geralmente é desconhecida, é necessário fazer uma aproximação conservativa determinar a ordem do sistema. Esta ordem máxima superestimada, n_{max} , é usada como uma entrada para o problema, se a ordem máxima escolhida for menor que a ordem correta do sistema, não será possível obter resultados corretos. Se, contudo, for suposto que esse valor é muito alto, serão obtidos muitos modos não físicos e será difícil de derivar aqueles modos que são os modos físicos reais corretos, além do mais, o tempo computacional aumenta muito. Outra entrada exigida para o SSI-Cov é a Matriz de dados. Esta pode medir a deformação, velocidade ou aceleração com a influência de cargas ambientais. A Matriz de dados Y tem dimensões $l * N$, onde l é o número de canais de medição e N é o número de medições. O tempo entre cada medição é o espaço de tempo. A última entrada é a magnitude da linha do bloco (SCHANKE, 2015).

A primeira ação deste método é calcular as correlações de saída. $[R_i]$ indica a estimativa imparcial da Matriz Correlação no atraso de tempo i com base em um finito número de dados:

$$[R_i] = \frac{1}{N-i} [Y_{(1:N-i)}][Y_{(i:N)}]^T \quad (11)$$

Onde:

$[Y_{(1:N-1)}]$ é a matriz de dados Y com a última linha do bloco i removida;

$[Y_{(i:N)}]^T$ é a Matriz de dados transposta com a primeira linha i removida.

Em seguida o método organiza as matrizes de correlação calculadas em diferentes instantes de tempo são organizadas em uma matriz Toeplitz. Então, as matrizes do modelo espaço de estado são obtidas a partir das saídas da decomposição de valores singulares da matriz Toeplitz. Esta operação matemática é o passo crítico do método, pois a aplicação para uma matriz de ordem muito elevada pode levar à problemas de memória. Entretanto, cada matriz $[R_i]$ possui dimensões $l * l$. A correlação estimada para diferentes espaços de tempo são, então, coletados em uma matriz chamada Matriz Toeplitz.

$$[T_{1|i}] = \begin{bmatrix} [R_i] & [R_{i-1}] & \cdots & [R_1] \\ [R_{i+1}] & [R_i] & \cdots & [R_2] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [R_{2i-1}] & [R_{2i-2}] & \cdots & [R_i] \end{bmatrix} \quad (22)$$

A Matriz formada de Toeplitz contém matrizes $[R_i] i \times i$ e, portanto, de dimensões $li \times li$. Para a identificação dos parâmetros modais de um sistema de ordem n , a matriz Toeplitz precisa ser $n \times n$. Portanto, necessita que para o número de linhas i do bloco:

$$li \geq n \quad (23)$$

E n é a ordem do sistema. Entretanto, a ordem do sistema, geralmente, é desconhecida necessitando que:

$$i_{min} = \frac{n_{max}}{l} \quad (24)$$

Para estruturas complexas, o número de linhas do bloco deverá ser maior que o critério mínimo para melhores resultados. A magnitude x depende do problema e deve ser escolhido como uma entrada pelo usuário:

$$i_{min} = x \frac{n_{max}}{l} \quad (25)$$

Sendo assim, as matrizes do modelo espaço de estado são obtidas a partir das saídas da decomposição de valores singulares da matriz Toeplitz. Esta operação matemática é o passo crítico do método, pois a aplicação para uma matriz muito grande pode levar à problemas de memória (CAETANO, *et al.*, 2007).

Obtendo as matrizes unitárias $[U]$ e $[V]$, com dimensões $li \times n$ e $n \times li$, respectivamente e os valores singulares positivos (os quais são iguais à ordem) em ordem descendente na matriz diagonal $[\Sigma]$.

$$[T_{1|i}] = [U_1][\Sigma_1][V_1]^T \quad (26)$$

Nesse momento, o deslocamento da matriz Toeplitz também é calculado:

$$[T_{2|i+1}] = \begin{bmatrix} [R_{i+1}] & [R_i] & \cdots & [R_2] \\ [R_{i+2}] & [R_{i+1}] & \cdots & [R_3] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [R_{2i}] & [R_{2i-1}] & \cdots & [R_{i+1}] \end{bmatrix} \quad (27)$$

Portanto, obter um bom modelo para aplicações de análise modal é, provavelmente, a melhor ideia para construir um diagrama de estabilização, identificando todo um conjunto de modelos com diferente ordem.

2.6.5 Diagrama de Estabilização

Segundo Schanke (2015), o diagrama de estabilização só pode ser construído quando os parâmetros modais são encontrados e o seu objetivo é separar os parâmetros modais físicos dos matemáticos. Os polos matemáticos tendem a ser mais dispersos e, tipicamente, não estabilizados. Entretanto, modos físicos podem ser determinados a partir de um alinhamento dos polos estáveis. Para encontrar esses alinhamentos é necessário separar os polos estáveis dos polos instáveis. Isso está baseado na comparação dos polos associados a uma dada ordem do modelo com aquelas obtidas a partir de um modelo com ordem mais baixa. As frequências naturais e os fatores de amortecimento dos polos das duas ordens são, então, comparados.

$$\frac{|f(n-1) - f(n)|}{f(n-1)} < x \quad (28)$$

$$\frac{|\zeta(n-1) - \zeta(n)|}{\zeta(n-1)} < y \quad (29)$$

Onde:

x é o limite de frequência especificado pelo usuário;

e y é o limite para a taxa de amortecimento especificada pelo usuário.

Somente os polos que preenchem o critério de estabilização definido pelo usuário serão marcados como estáveis. O tamanho dos polos depende de uma série de fatores, entre eles, a complexidade da estrutura e a precisão das medições. Para a frequência natural os valores devem ter coincidência satisfatória e uma baixa exigência de estabilidade deve ser usada. Contudo, para o fator de amortecimento, os valores podem variar mais. Especialmente para modos pouco amortecidos, onde a variação da porcentagem pode ser relativamente grande. O valor escolhido inicialmente deve ser relativamente baixo e, então, aumentar se necessário (SCHANKE, 2015).

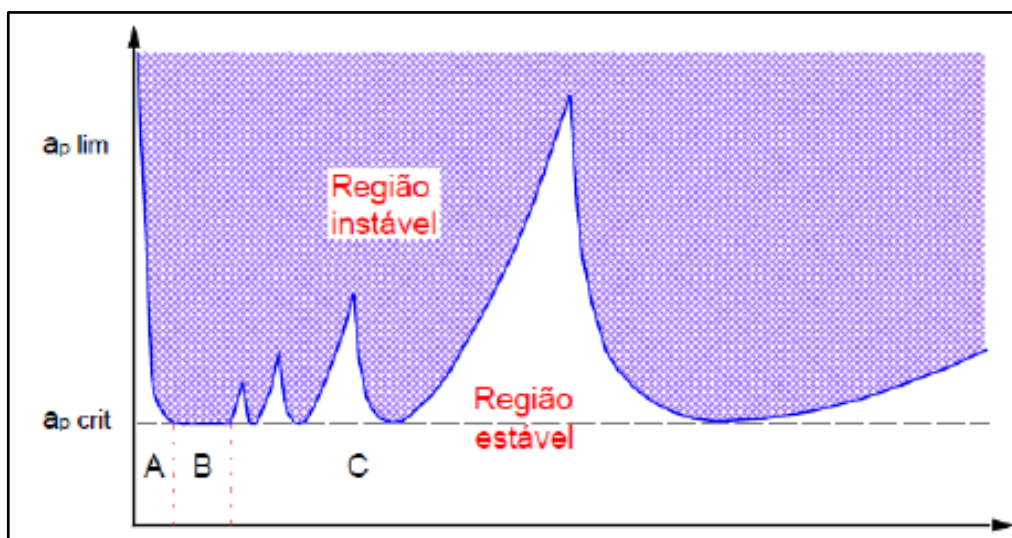
Os parâmetros modais são extraídos por uma série de ordem de modelo crescente até uma superestimação do sistema e os parâmetros obtidos em cada ordem são comparados com aqueles obtidos na ordem anterior em um diagrama de estabilização. A ferramenta usada para polos numéricos distintos a partir de polos físicos é o diagrama de estabilização. O diagrama mostra os polos de um sistema em diferentes ordens do modelo. A frequência é plotada na abcissa e a ordem do modelo é plotada na ordenada de um diagrama de estabilização. Os polos que correspondem a uma ordem são comparados com os polos de um sistema de ordem menor. Polos físicos ocorrem na mesma frequência ao aumentar a ordem do modelo formando uma coluna vertical dos polos. Ou seja, eles tendem a estabilizar, por isso o termo “diagrama de estabilização” Bakir (2011).

2.6.6 Carta de estabilidade

O conceito de cartas de estabilidade foi estabelecido há mais de 40 anos por (TOBIAS *et al.*, 1958). Entretanto, raramente foi colocado em prática, pelo menos de um modo sistemático até o advento da usinagem a altas velocidades (TLUSTY, 1986).

Os picos apresentados por este diagrama ocorrem aproximadamente em velocidades de rotação onde a frequência de passagem dos dentes é igual a uma função inteira da frequência natural correspondente ao modo mais flexível (CABRAL,2007), conforme Figura 25.

Figura 26 – Carta de estabilidade para um processo de usinagem.



Fonte: TLUSTY, 1986.

Sendo as curvas mostradas figura 26, como fronteira entre a região estável e a região instável (onde ocorrem as vibrações). A coordenada no eixo vertical é a profundidade de corte axial (a_p) e o eixo horizontal corresponde a rotação N .

A construção das cartas de estabilidade pode ser feita experimentalmente através da variação da rotação e profundidade de corte que é um método muito trabalhoso ou através de métodos de cálculo como o descrito por YUE, (2006).

Com base na carta de estabilidade é possível extrair as rotações adequadas de trabalho (fora da faixa instável), para a profundidade de corte correspondente.

Outra forma de encontrar as rotações adequadas de trabalho quando não se tem a carta de estabilidade construída é aplicar a equação (30) (BELLUCO, 2003). Para isso é necessário utilizar as frequências que não coincidam com as frequências naturais da ferramenta.

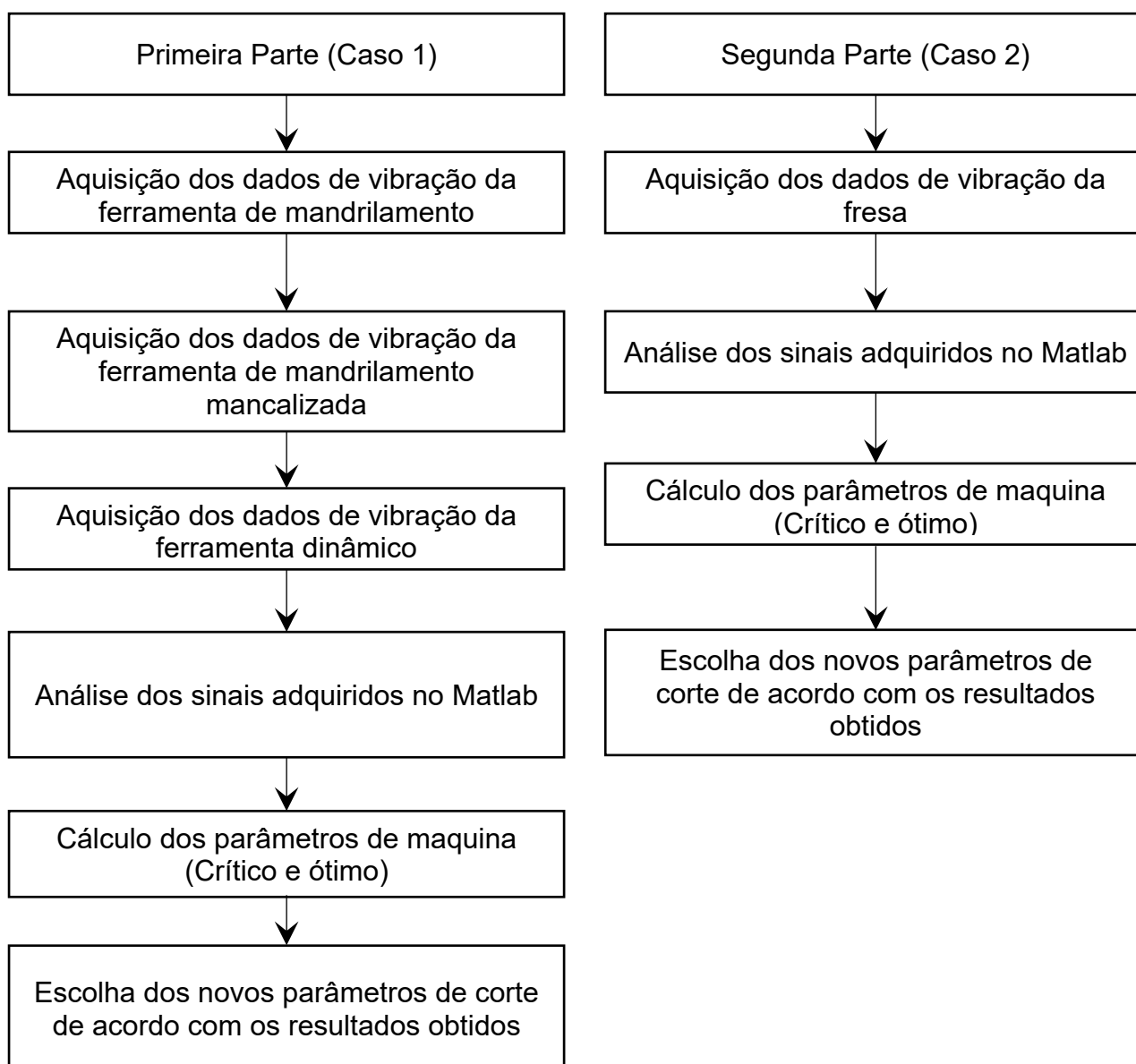
$$N_{ot} = \frac{f_z \times 60}{Z \times n} \quad (30)$$

onde N_{ot} é a rotação ótima de trabalho em [rpm], f_z é a frequência fora da faixa de ressonância [Hz], Z é o número de arestas cortantes e n são os modos de vibrar.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os dados experimentais da ferramenta foram obtidos por um conjunto de acelerômetros PCB Piezotronics colocados na ferramenta fixada no centro de usinagem da fabricante Grob. As excitações foram obtidas através de um martelo de impacto. Para preservar os dados a excitação foi aplicada sempre no mesmo ponto. Através do software de aquisição de dados foram extraídos o sinal no tempo da aceleração em g e da força em N, e tratados por rotinas no ambiente Matlab® para se obter as Funções Resposta em Frequência (FRFs) do sistema.

A metodologia de análise compõe as seguintes etapas:



A estrutura utilizada para realizar a análise de vibração em ferramenta de corte se baseia na utilização de um conjunto de equipamentos:

- Hardware chassis NI CompactDAQ;
- Fonte de Tensão modelo AEL15US12;
- Cabo USB tipo AB;
- Módulo amplificador Entradas analógica NI 9234 (VGA);
- Cabo de comunicação sensor chassis (Coaxial);
- Acelerômetro PCB;
- Martelo Excitador;
- Desktop PC / Laptop PC;
- Software de aquisição de dados (Labview SignalExpress).

O módulo de aquisição de dados (Figura 27) está conectado ao hardware chassis do fabricante da National Instruments CompactDAQ (Figura 28) através de entradas analógicas VGA. A comunicação do chassi com o acelerômetro do fabricante PCB (Figura 29) é feita através do cabo de comunicação (coaxial), da mesma forma ao martelo de excitação (martelo de impacto - Figura 30), o chassis é conectado ao PC através de um cabo USB e o sinal é tratado no software de aquisição de dados (LabView Signal Express), conforme Figura 31.

Figura 27 - Módulo de aquisição de dados NI9234



Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS, 2014.

Figura 28 - Hardware cDaq 9174



Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS, 2014.

Figura 29 - Acelerômetro piezoelétrico PCB Modelo: 352C03



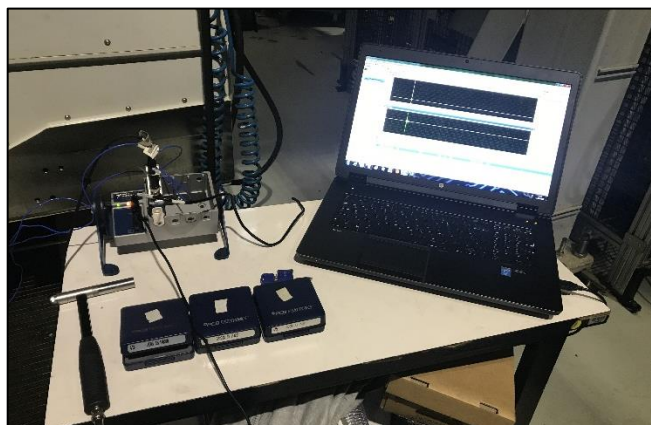
Fonte: PCB, 2014.

Figura 30 - Martelo de impacto PCB



Fonte: PCB, 2014.

Figura 31 – Configuração de montagem para o experimento.



Fonte: O Autor, 2019.

Para a determinação das funções resposta em frequência (FRF) do conjunto ferramenta, sistema de fixação e eixo-árvore, aplicou-se a excitação através do martelo de impacto (PCB – Piezotronics) e o sinal de saída foi obtido por um acelerômetro (PCB – Piezotronics modelo 353C03).

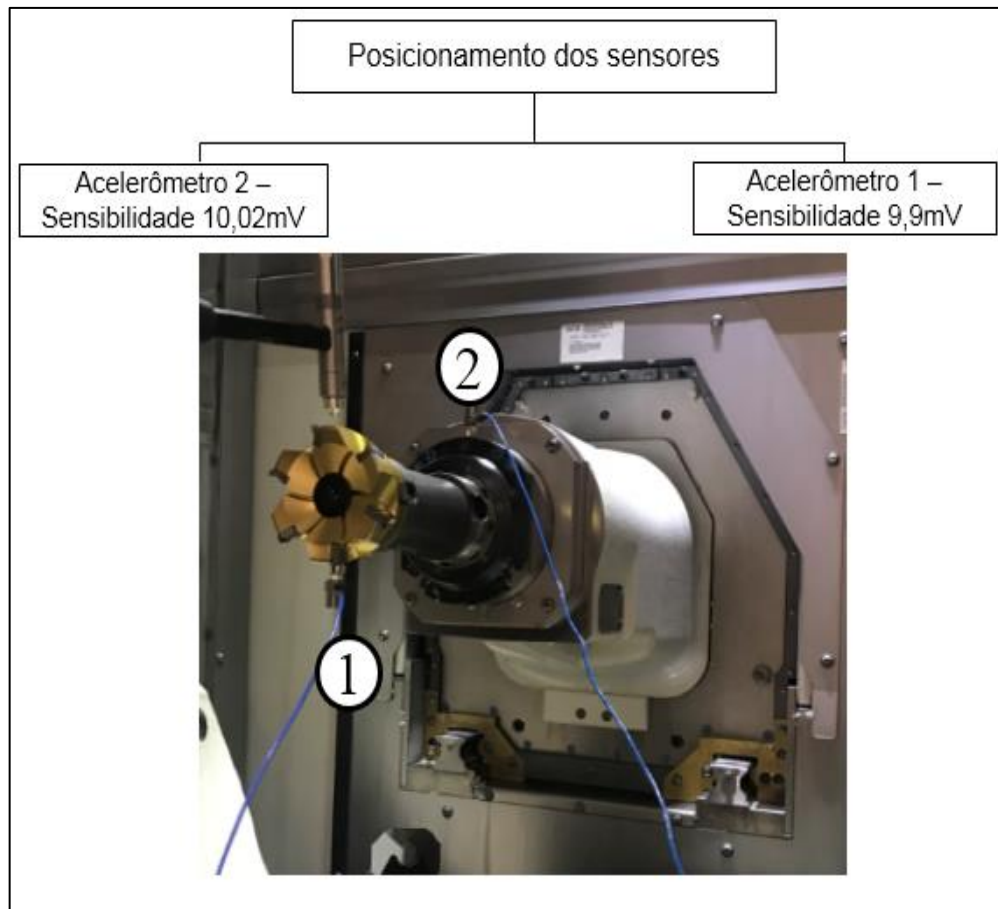
O acelerômetro é fixado à extremidade da ferramenta no inserto de corte para a fresa, a excitação foi realizada por meio de um impacto, conforme figura 33. Os sinais do acelerômetro e do martelo são obtidos utilizando o software “Labview – Signal Express®”.

Figura 32 – Centro de usinagem GROB.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 33 – Configuração de montagem para o experimento fresa.



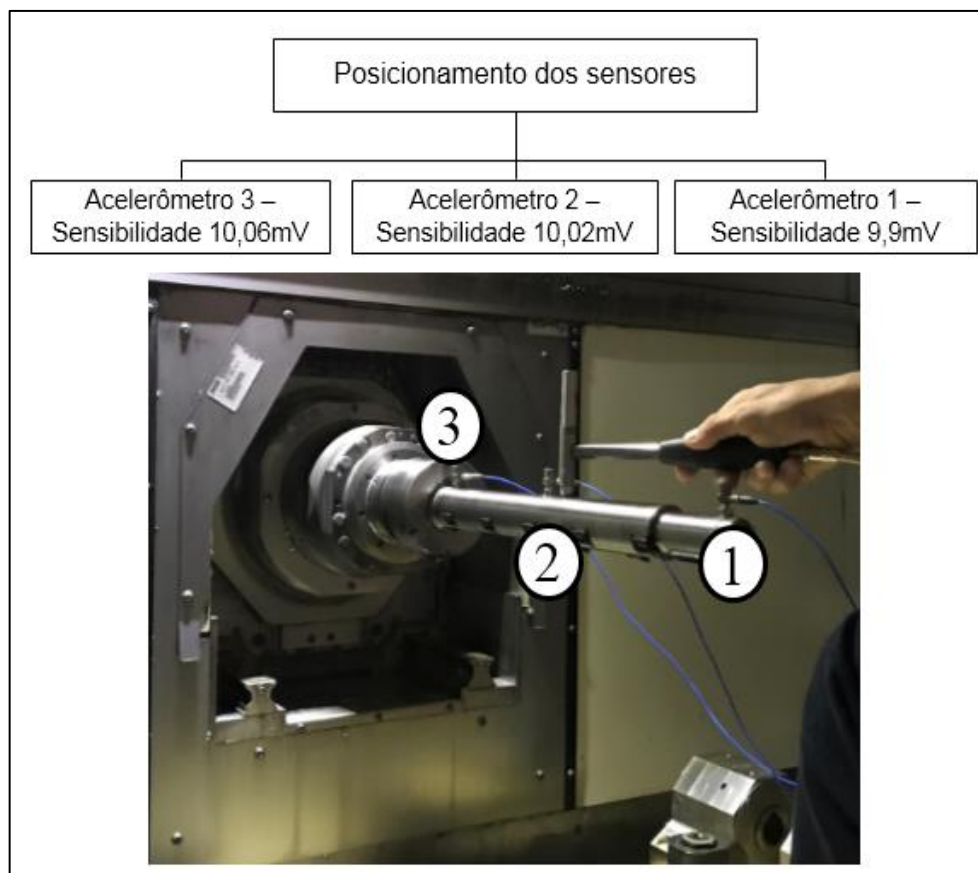
Fonte: O Autor, 2019.

Como o processo de mandrilamento alvo deste estudo sofreu uma inovação no seu processo convencional de trabalho, foram feitos 3 análises distintas de vibração sendo elas:

- 1- Barra livre (semelhante a fresa);
- 2- Barra Mancalizada;
- 3- Ensaio dinâmico (durante o processo de corte).

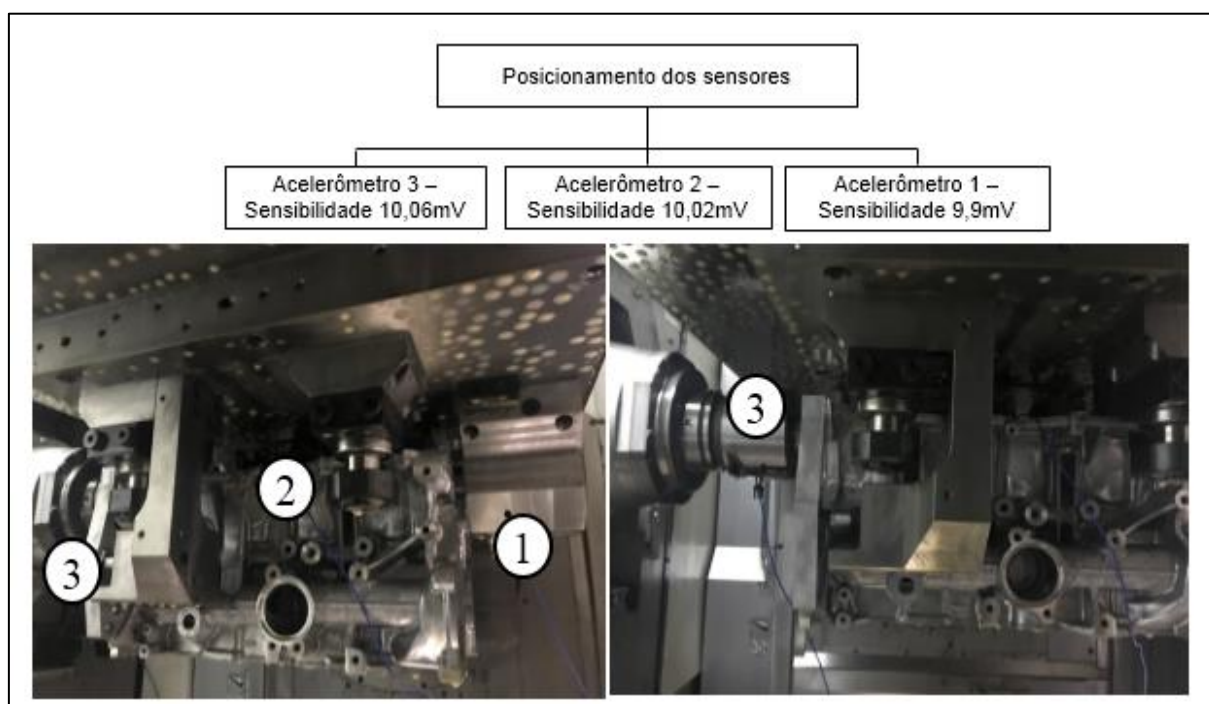
Os acelerômetros foram fixados nos insertos de corte, a excitação foi realizada por meio de um impacto no centro da ferramenta, conforme figura 34 e 35. Os sinais do acelerômetro e do martelo são obtidos utilizando o software “Labview – Signal Express®”.

Figura 34 – Configuração de montagem para o experimento ferramenta de mandrilamento.



Fonte: O Autor, 2019.

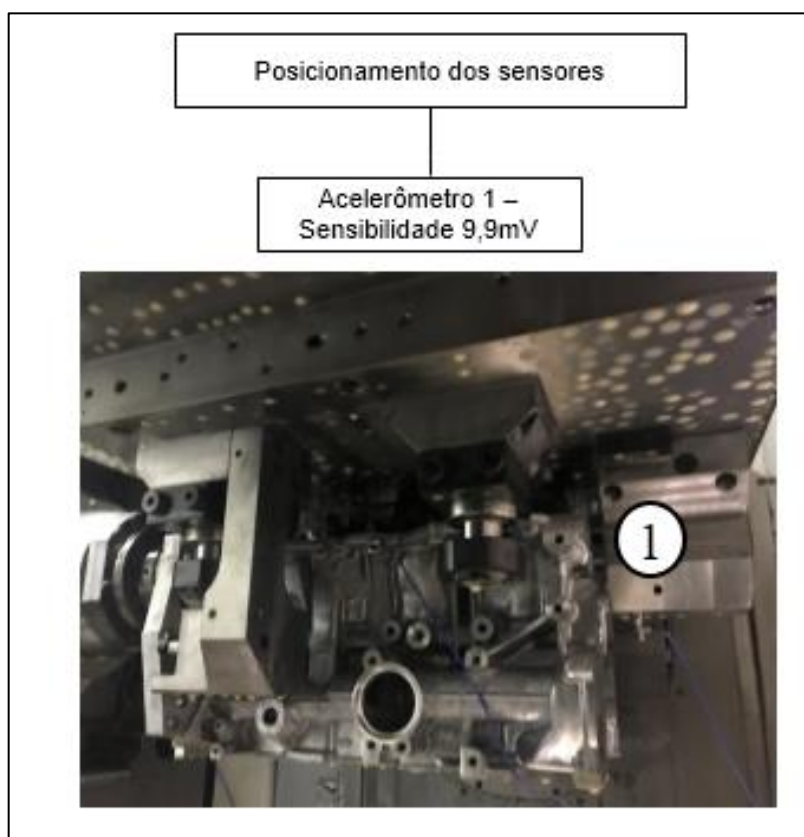
Figura 35 – Configuração de montagem para o experimento ferramenta de mandrilamento mancalizada.



Fonte: O Autor, 2019.

O acelerômetro para o ensaio dinâmico foi fixado na base que fixa a ferramenta e não foi utilizado o martelo de impacto, conforme figura 36.

Figura 36 – Configuração de montagem para o experimento ferramenta de mandrilamento mancalizada ensaio dinâmico.



Fonte: O Autor, 2019.

Os parâmetros utilizados para a medição da aceleração das ferramentas estão descritos nas figuras 33, 34 e 35. Para o martelo de impacto a sensibilidade é 2.193 mV/N.

Segundo o critério de Nyquist, o qual afirma que a taxa de aquisição a ser utilizada deve ser igual ou maior que o dobro da máxima frequência de interesse, para a ferramenta de mandrilamento seguindo este critério a faixa de interesse era 6.4kHz e para a fresa foi utilizado a faixa de 3.2kHz. O número de pontos de aquisição utilizado para a ferramenta de mandrilamento foi 6400 pontos, e para a fresa 3200 pontos seguindo este critério.

Para o ensaio dinâmico não foi utilizado o martelo de impacto e a faixa de interesse foi ampliada para 72kHz que gera 72000 pontos de aquisição.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Após a realização dos testes, através do software Labview – Signal Express® foi possível extrair os dados da aceleração e da força no domínio do tempo, em forma de arquivo texto.

Os ensaios foram realizados de maneira estatística, 5 ensaios para a ferramenta de mandrilar na condição livre, 4 para a ferramenta de mandrilar na condição fixa (mancalizada) e 3 para o ensaio da fresa. Devido a complexidade do ensaio dinâmico foi realizado apenas 1 teste.

Os resultados dos ensaios foram tratados no software Matlab® no qual são gerados os gráficos no domínio do tempo e utilizando a transformação de Fourier (FFT) obtém-se o sinal no domínio da frequência.

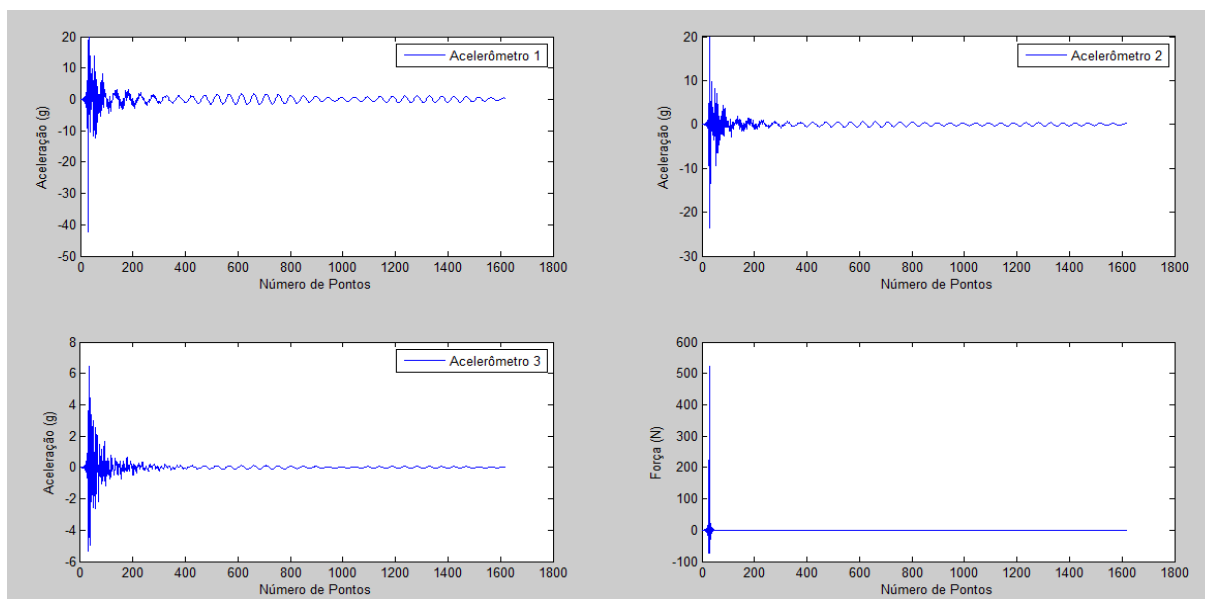
Também como efeito de comparação foi aplicado o método de análise modal SSICov para comparação dos resultados.

Foi utilizado o mesmo procedimento de análise do item 4.1.1, para os ensaios realizados do item 4.1.2 e 4.1.3. Os ensaios 4.1.5 seguiu o mesmo procedimento do ensaio 4.1.4.

4.1.1 Ferramenta de mandrilamento livre – Método FFT

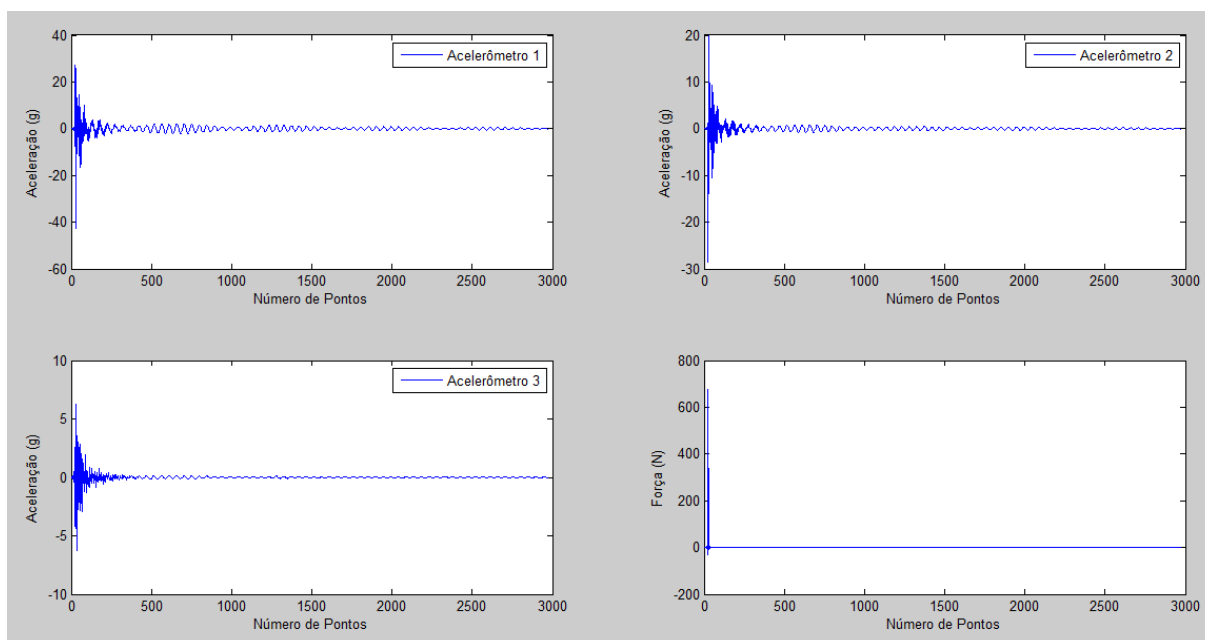
Os gráficos de aceleração e força gerados pelo Matlab® para a ferramenta de mandrilamento na condição livre estão representados pelas Figuras 37, 38, 39, 40 e 41.

Figura 37 – Aceleração x N° de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento na condição livre Ensaio 1.



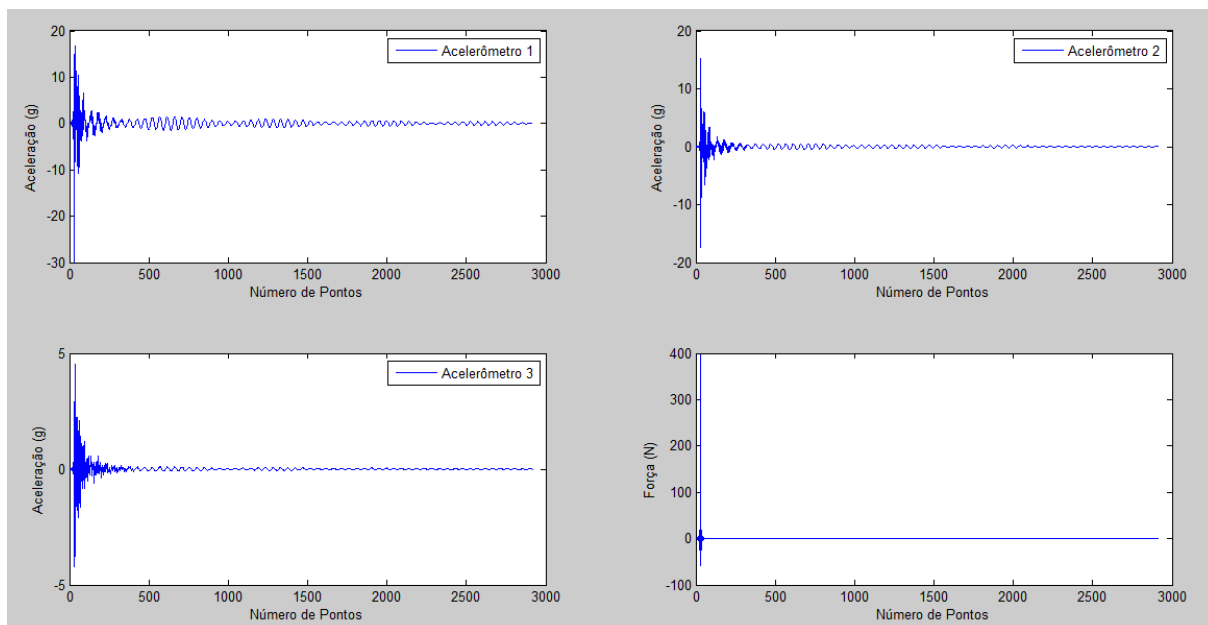
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 38 – Aceleração x N° de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento na condição livre Ensaio 2.



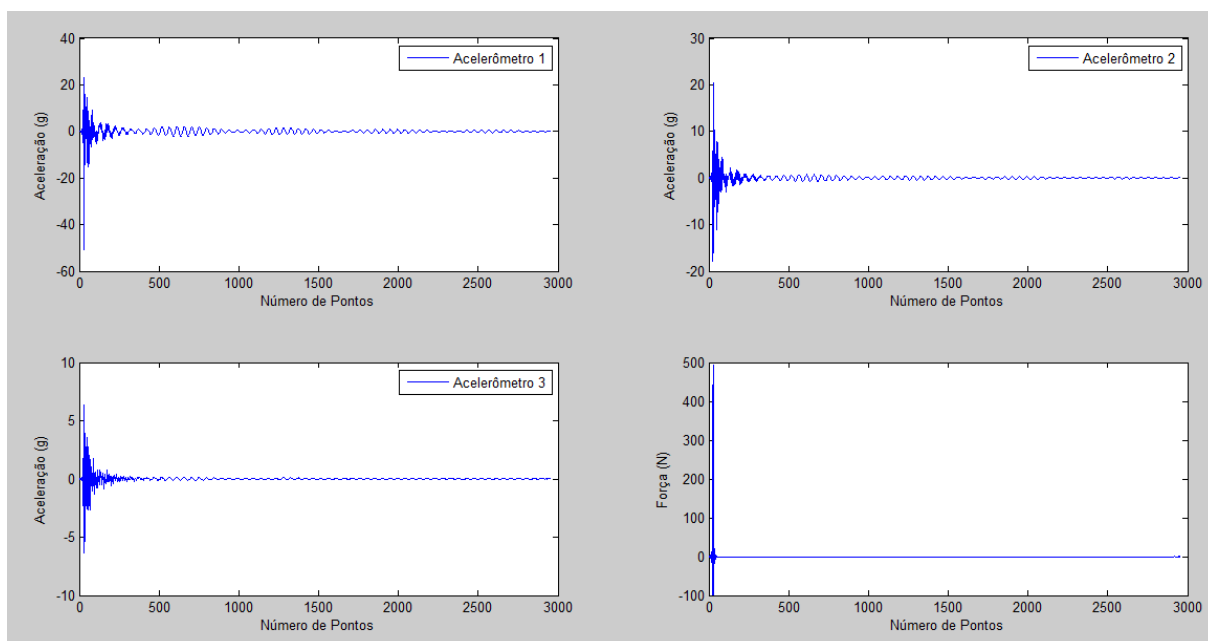
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 39 – Aceleração x N^o de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento na condição livre
Ensaio 3.



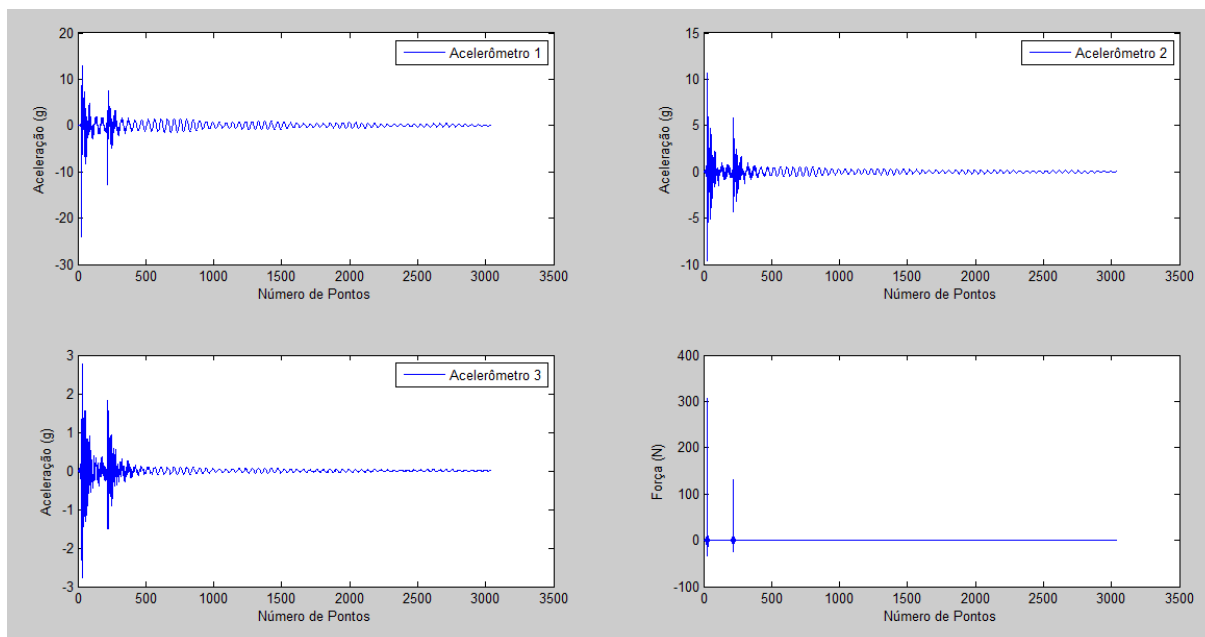
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 40 – Aceleração x N^o de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento na condição livre
Ensaio 4.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 41 – Aceleração x N^o de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento na condição livre Ensaio 5.

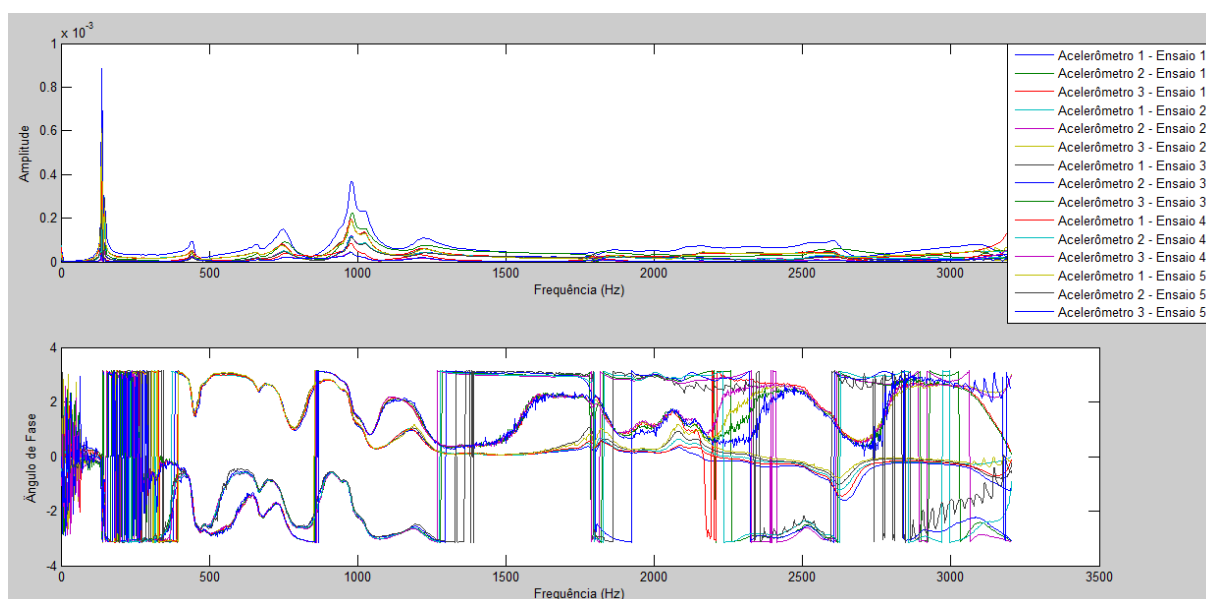


Fonte: O Autor, 2019.

Para transferir o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência é necessário aplicar a Transformada Rápida de Fourier (FFT) no sinal da aceleração e da força. O resultado da transformada para a aceleração é dividido pelo valor da transformada da força, o que resulta na amplitude H (FRF – Função respostra em Frequências).

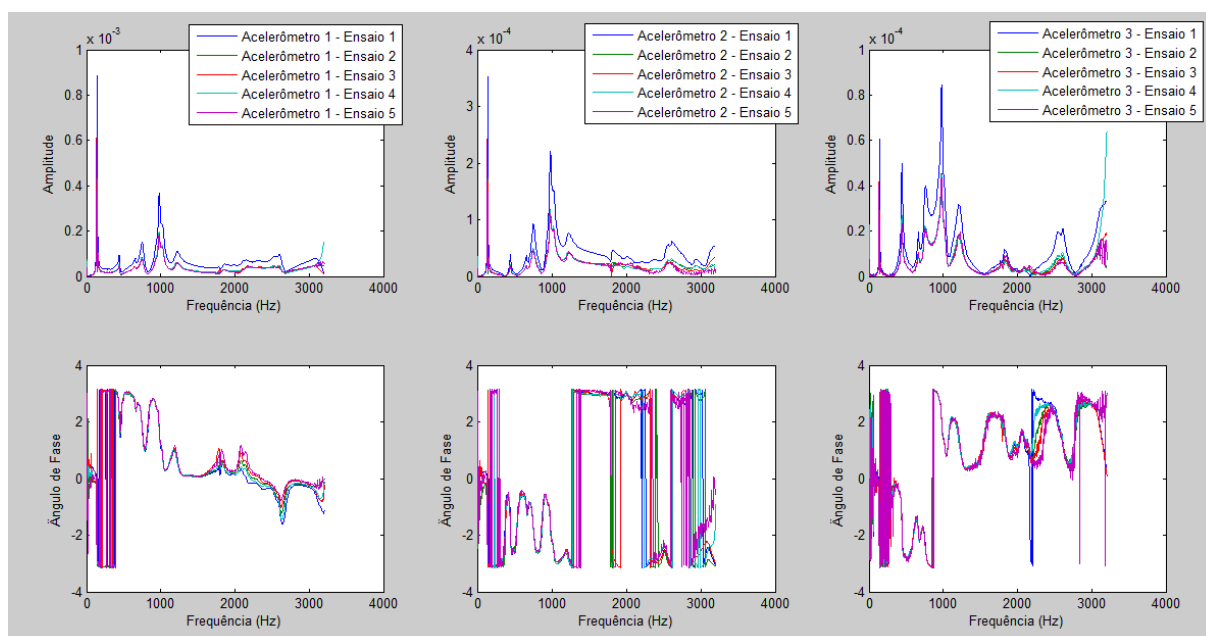
O valor absoluto de H , e o ângulo de fase no domínio da frequência são usados para melhor visualizar os picos. O resultado dos 5 ensaios foram plotados no mesmo gráfico para melhor visualização conforme figura 42.

Figura 42 – Resposta em frequência dos 5 ensaios da ferramenta de mandrilamento livre.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 43 – Resposta em frequência por acelerômetro dos 5 ensaios da ferramenta de mandrilamento livre.



Fonte: O Autor, 2019.

Com base na Figura 43, extraiu-se os picos de frequência natural e os vales diretamente do Matlab®, utilizou-se a equação 30 com $\varnothing 51.972\text{mm}$, $Z=2$ e $f_z=0.07\text{mm/rot}$ calculou-se as rotações críticas e ótimas de trabalho, conforme Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Picos de frequência natural, e suas respectivas rotações críticas para a ferramenta de mandrilamento livre.

Frequência natural															
Ordem	f_n	N_c [rpm]	n (modos de vibrar)												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1	139		4161	2081	1387	1040									
2	151		4515	2258	1505	1129									
3	444				4437	3328	2662	2219	1902	1664	1479	1331			
4	662					4962	3970	3308	2835	2481	2205	1985			
5	753					5645	4516	3764	3226	2823	2509	2258			
6	977						5860	4883	4185	3662	3255	2930			
7	1026							5130	4397	3848	3420	3078			
8	1220								5229	4575	4067	3660			
9	1822												5466		
10	2096														
11	2540														
12	2615														
13	2936														
14															
15	3205														

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 2 – Rotações adequadas de trabalho ferramenta de mandril livre.

Frequência ótima de trabalho															
Ordem	f_n	N_{opt} [rpm]	n (modos de vibrar)												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1	50		1500												
2	100		3000	1500	1000										
3	180		5400	2700	1800	1350	1080								
4	220			3300	2200	1650	1320	1100							
5	280			4200	2800	2100	1680	1400	1200	1050					
6	360			5400	3600	2700	2160	1800	1543	1350	1200	1080			
7	460				4600	3450	2760	2300	1971	1725	1533	1380			
8	835						5010	4175	3579	3131	2783	2505			
9	1140							5700	4886	4275	3800	3420			
10	1545									5794	5150	4635			
11	2191														
12	2789														
13	0														
14	0														
15	0														

Fonte: O Autor, 2019.

Para a definição dos parâmetros adequados para nosso processo, foram descartados valores que fogem do intervalo do conjunto $N \{1000 \leq \text{rpm} \leq 6000\}$ (área hachurada), devido a serem valores críticos para a ferramenta. Também foram eliminados as frequências ótimas que em algum modo coincidam com a frequência de ressonância.

Com base na equação 1, e os valores de rotação apresentados na tabela 2 foi possível obter as velocidades de corte para a ferramenta, conforme tabela 3.

Tabela 3 – Velocidade de corte para Ø51,972 mm.

Velocidade de corte ótima										
	n (modos de vibrar)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V _c [mm/min]	245									
	490	245	163							
	882	441	294	220	176					
		539	359	269	216	180				
		686	457	343	274	229	196	171		
		882	588	441	353	294	252	220	196	176
			751	563	451	376	322	282	250	225
					818	682	584	511	454	409
						931	798	698	620	558
								946	841	757

Fonte: O Autor, 2019.

Da mesma forma, utilizando como base a tabela 2 e a equação 2 foi possível obter as velocidades de avanço para a ferramenta de mandrilamento livre.

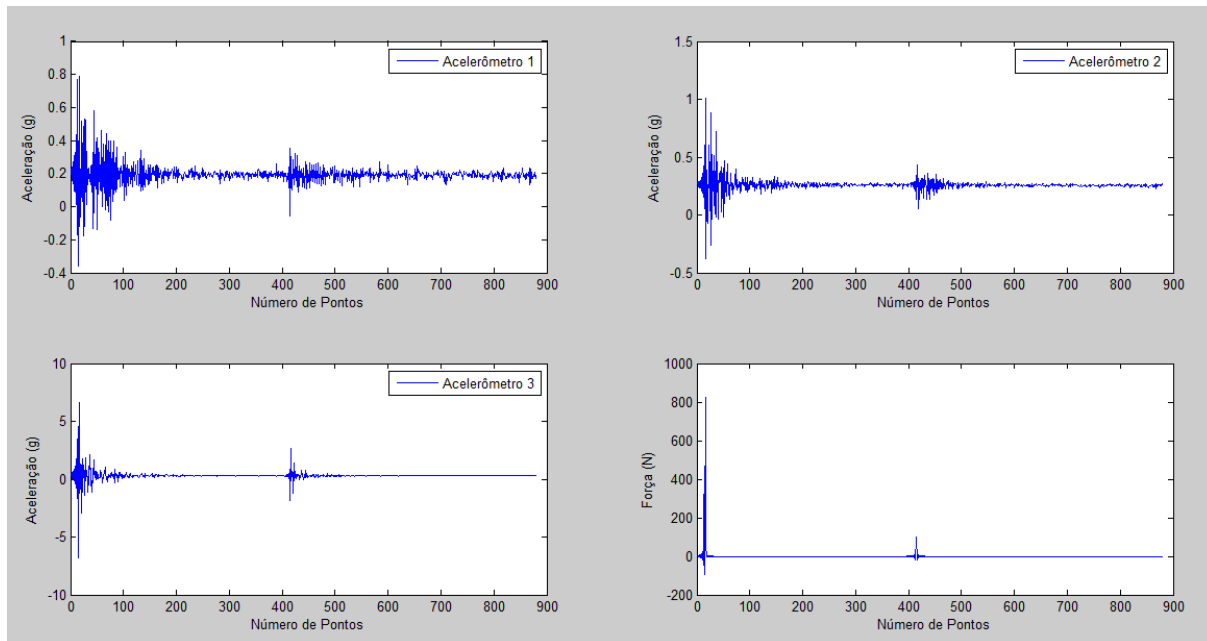
Tabela 4 – Velocidade de avanço para Ø51,972 mm.

Velocidade de avanço										
	n (modos de vibrar)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V _f [mm/min]	210									
	420	210	140							
	756	378	252	189	151					
		462	308	231	185	154				
		588	392	294	235	196	168	147		
		756	504	378	302	252	216	189	168	151
			644	483	386	322	276	242	215	193
					701	585	501	438	390	351
						798	684	599	532	479
								811	721	649

Fonte: O Autor, 2019.

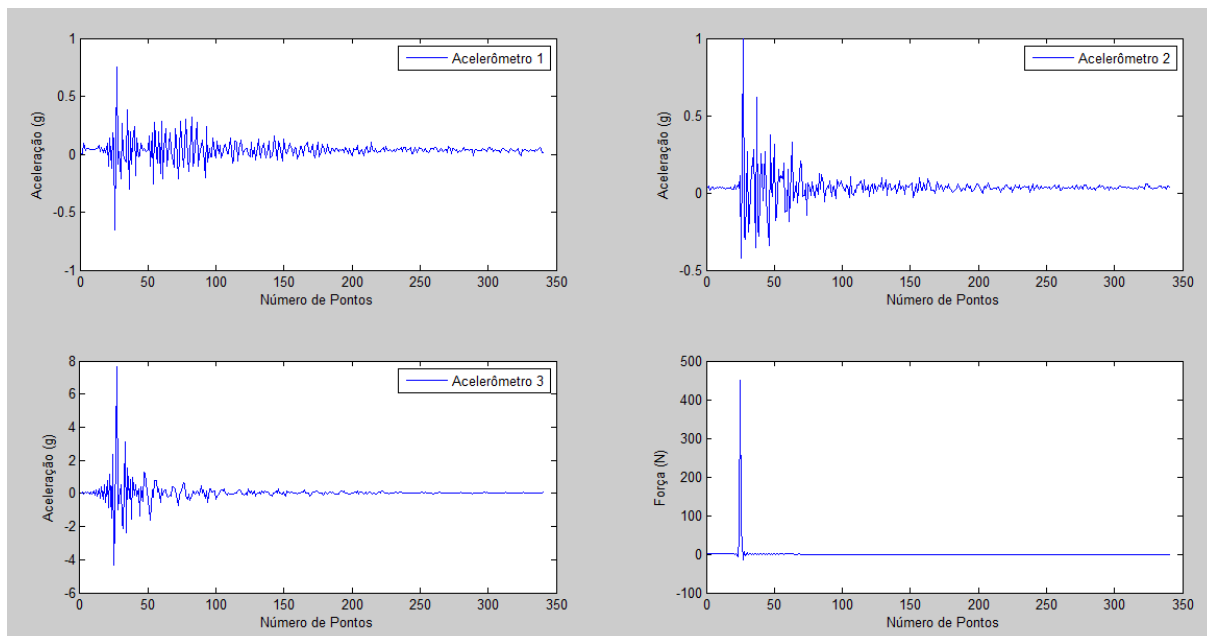
4.1.2 Ferramenta de mandrilamento mancalizada – Método FFT

Figura 43 – Aceleração x N^o de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento mancalizada Ensaio 1.



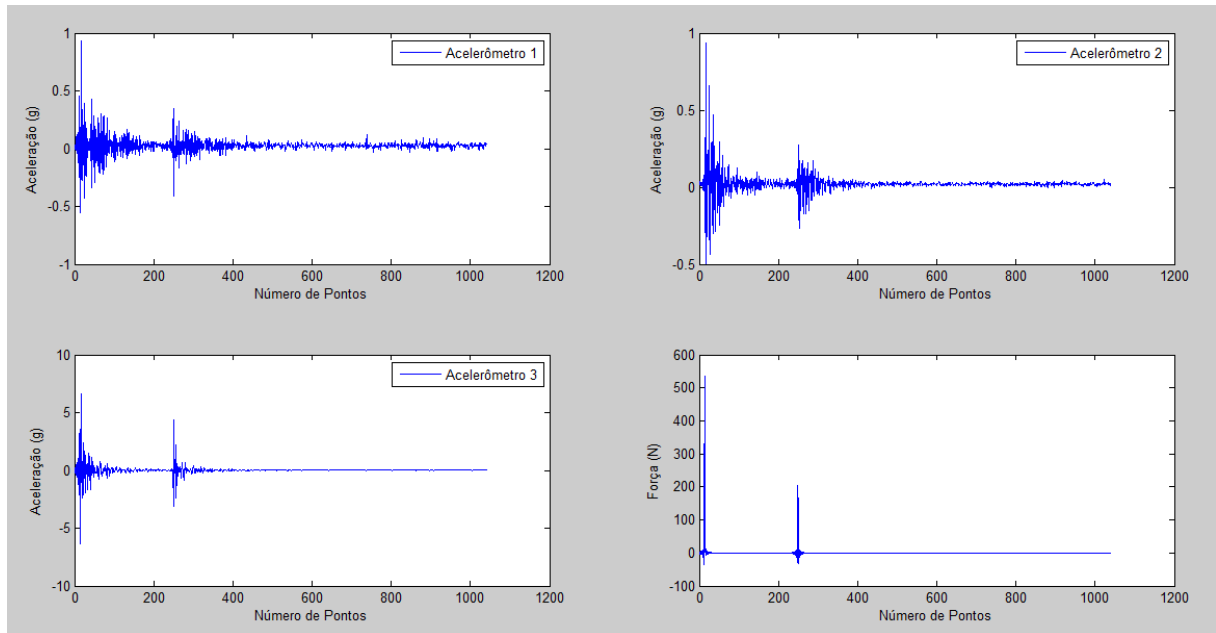
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 44 – Aceleração x N^o de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento mancalizada Ensaio 2.



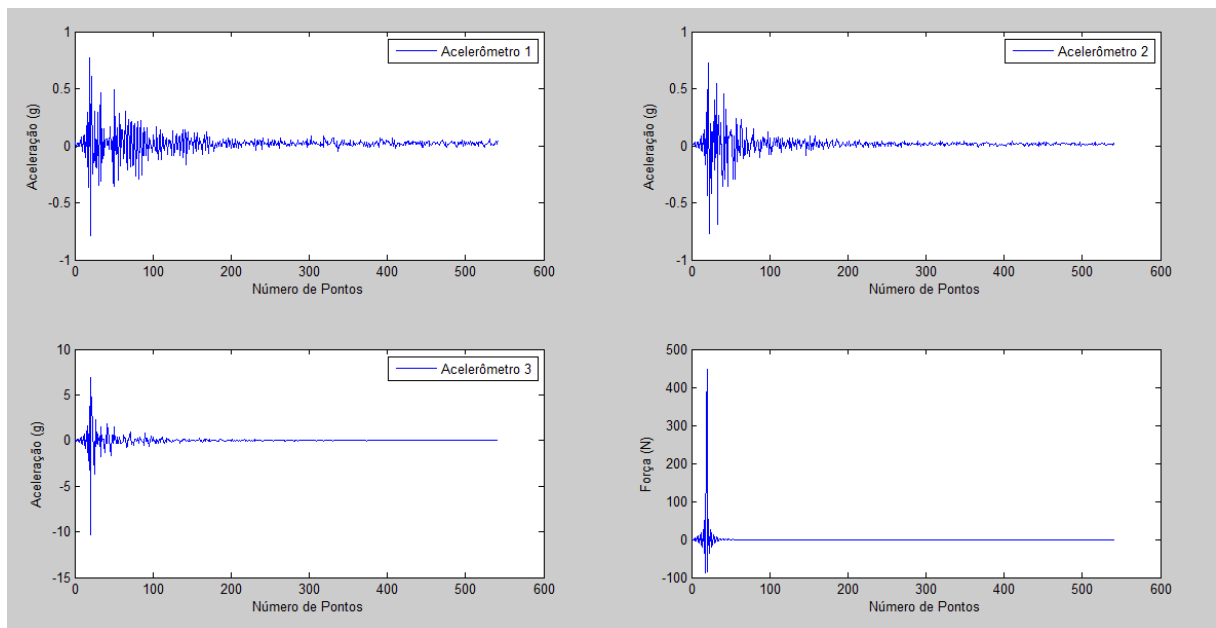
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 45 – Aceleração x N^o de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento mancalizada Ensaio 3.



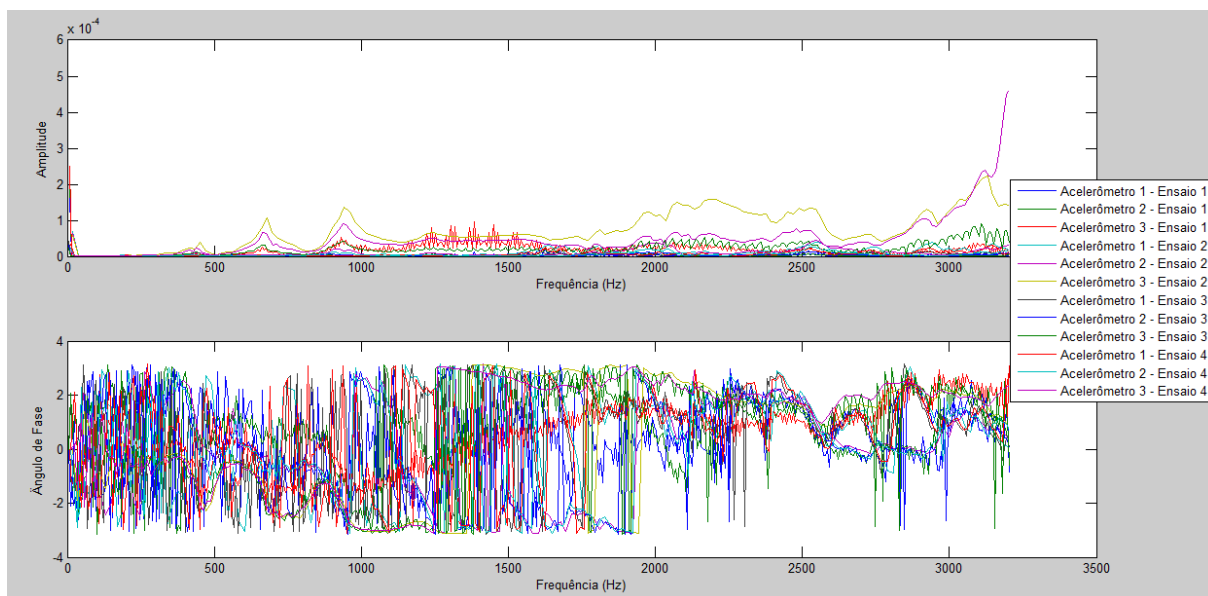
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 46 – Aceleração x N^o de pontos no tempo para a ferramenta de mandrilamento mancalizada Ensaio 4.



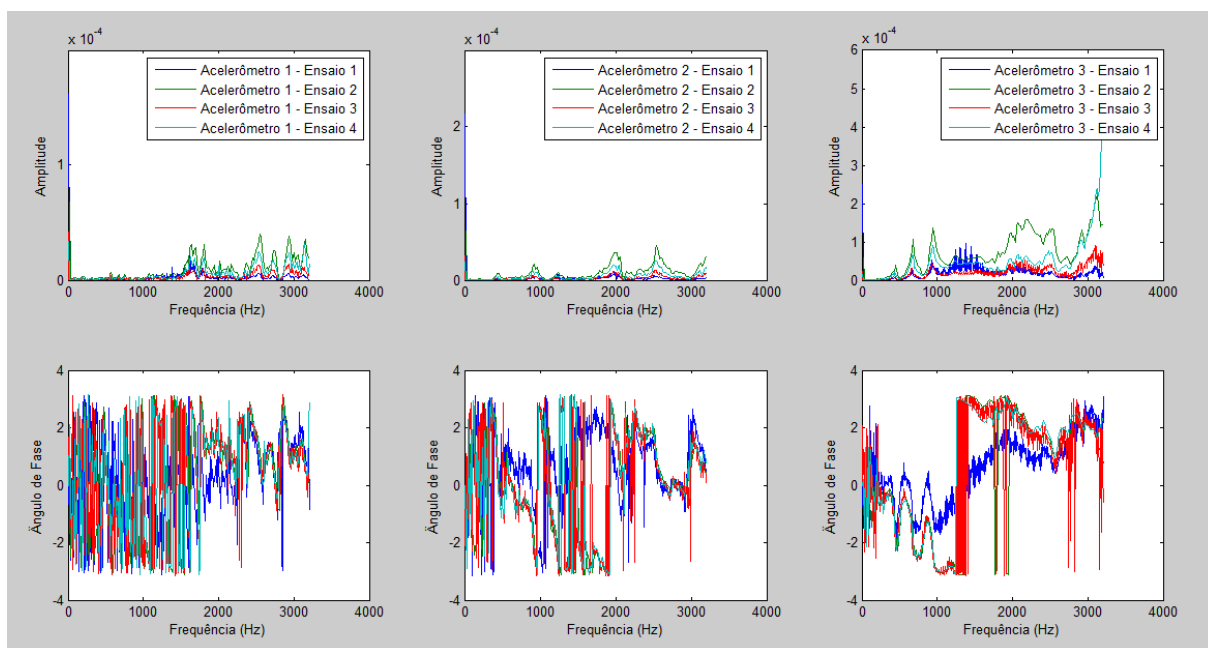
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 47 – Resposta em frequência dos 5 ensaios da ferramenta de mandrilamento mandrilamento.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 48 – Resposta em frequência por acelerômetro dos 5 ensaios da ferramenta de mandrilamento mandrilamento.



Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 5 – Picos de frequência natural, e suas respectivas rotações críticas para a ferramenta de mandrilamento livre.

Frequência natural												
Ordem	f_n	N_c [rpm]	n (modos de vibrar)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	437				4371	3278	2623	2186	1873	1639	1457	1311
2	663					4972	3977	3315	2841	2486	2210	1989
3	932						5594	4662	3996	3497	3108	2797
4	1093							5465	4684	4099	3643	3279
5	1173								5865	5027	4399	3910
6	1238									5306	4643	4127
7	1304									5589	4890	4347
8	1384									5931	5190	4613
9	1450										5438	4833
10	1530										5738	5100
11	1595										5981	5317
12	1981											5943
13	2061											
14	2156											
15	2506											
16	2906											
17	3096											

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 6 – Rotações adequadas de trabalho ferramenta de mandrilar livre.

Frequência ótima de trabalho												
Ordem	f_n	N_{opt} [rpm]	n (modos de vibrar)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	100											
2	200		6000		2000		1200					
3	300			4500		2250	1800		1286	1125		
4	495				4953	3715	2972	2477	2123	1857	1651	1486
5	816						4895	4080	3497	3060	2720	2448
6	1042							5210	4466	3908	3473	3126
7	1122								5610	4809	4208	3740
8	1726										5753	5178
9	2382											
10	2622											
11	2950											
12	0											
13	0											
14	0											
15	0											
16	0											
17	0											

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 7 – Velocidade de corte para Ø51,972 mm.

Velocidade de corte ótima										
	n (modos de vibrar)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V _c [mm/min]	490	245	163							
	980	490	327	245	196	163				
		735	490	367	294	245	210	184	163	
			809	607	485	404	347	303	270	243
					799	666	571	500	444	400
						851	729	638	567	510
						916	785	687	611	550
									939	845

Fonte: O Autor, 2019.

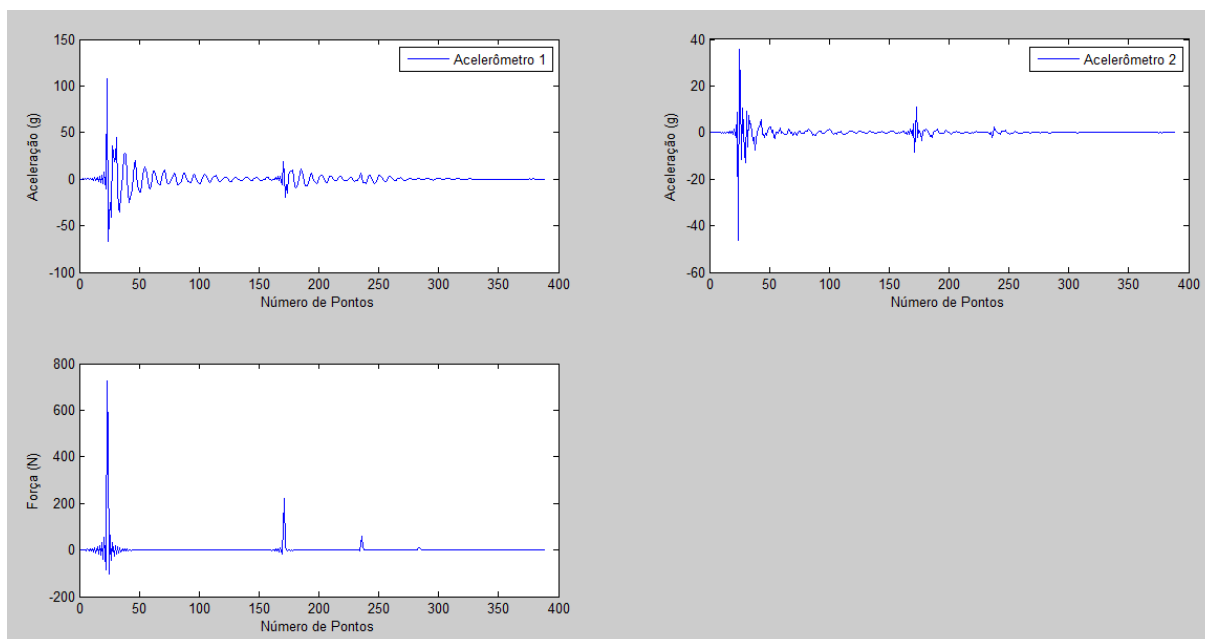
Tabela 8 – Velocidade de avanço para Ø51,972 mm.

Velocidade de avanço										
	n (modos de vibrar)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V _f [mm/min]	420	210	140							
	840	420	280	210	168	140				
		630	420	315	252	210	180	158	140	
			693	520	416	347	297	260	231	208
					685	571	490	428	381	343
						729	625	547	486	438
						785	673	589	524	471
									805	725

Fonte: O Autor, 2019.

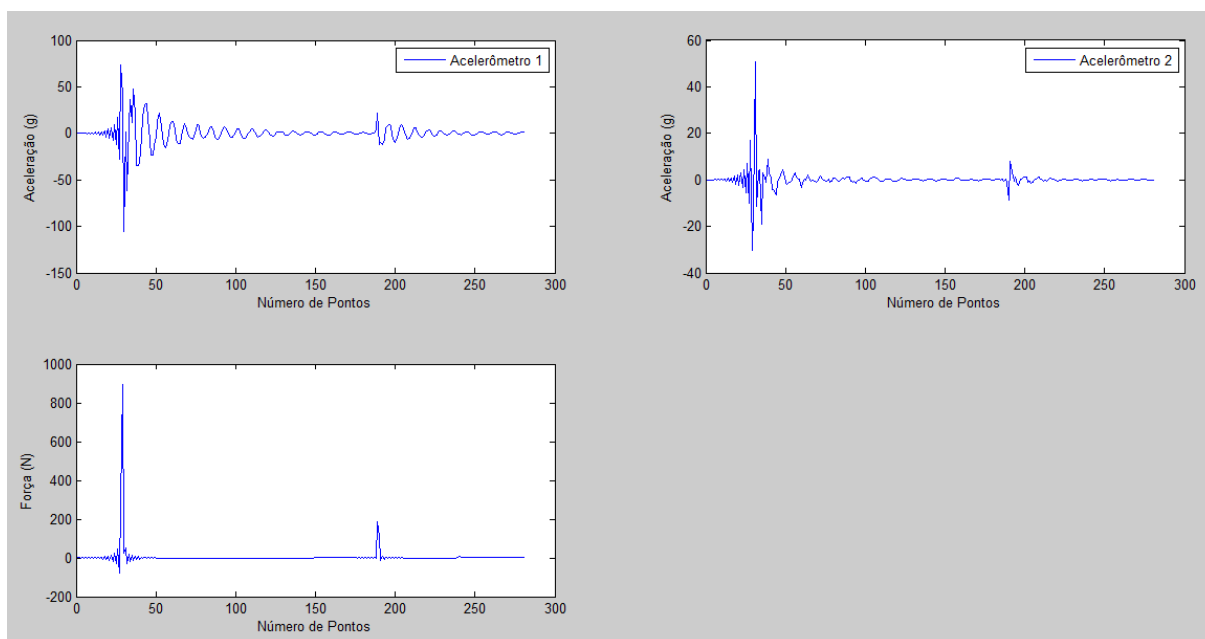
4.1.3 Fresa – Método FFT

Figura 49 – Aceleração x N^o de pontos no tempo para a fresa Ensaio 1.

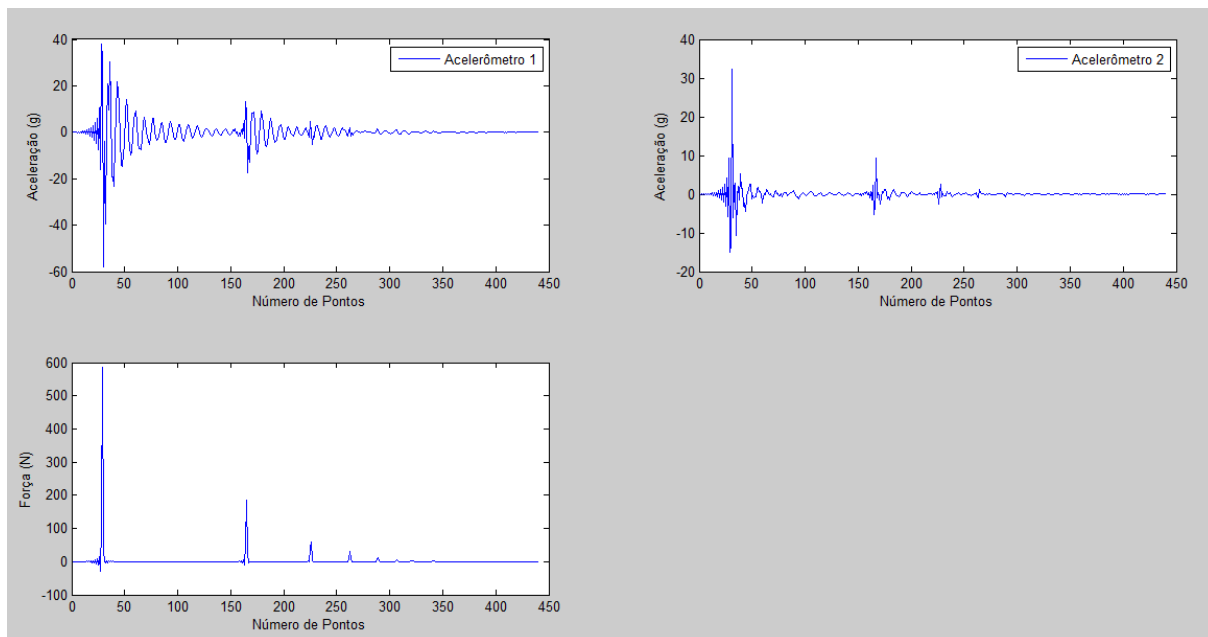


Fonte: O Autor, 2019.

Figura 50 – Aceleração x N^o de pontos no tempo para a fresa Ensaio 2.

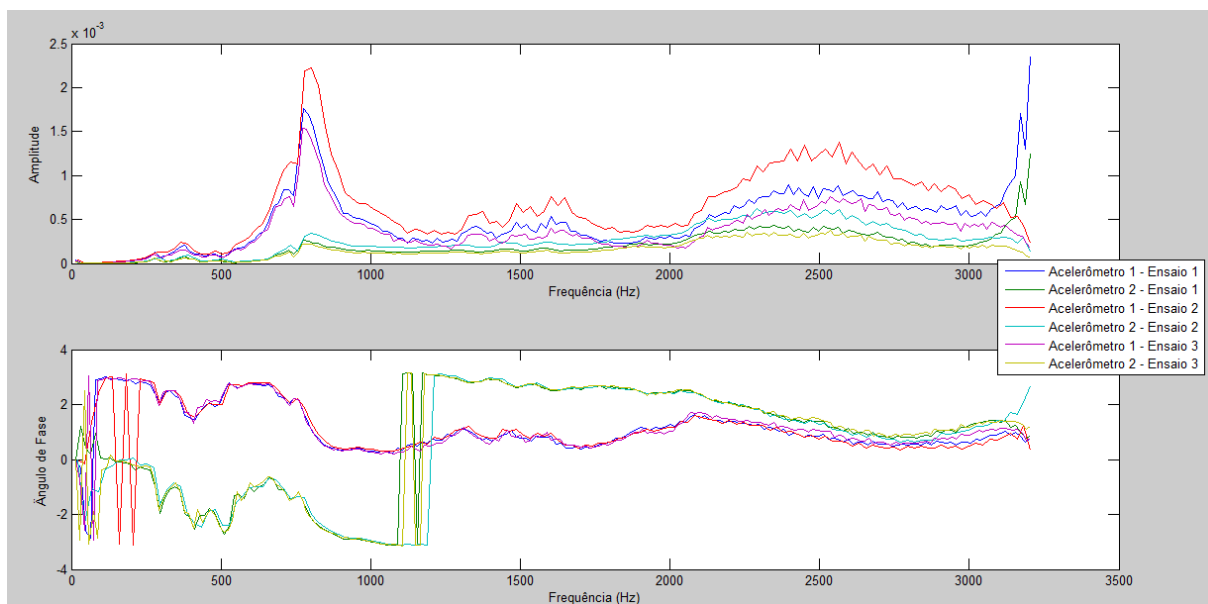


Fonte: O Autor, 2019.

Figura 51 – Aceleração x N^o de pontos no tempo para a fresa Ensaio 3.

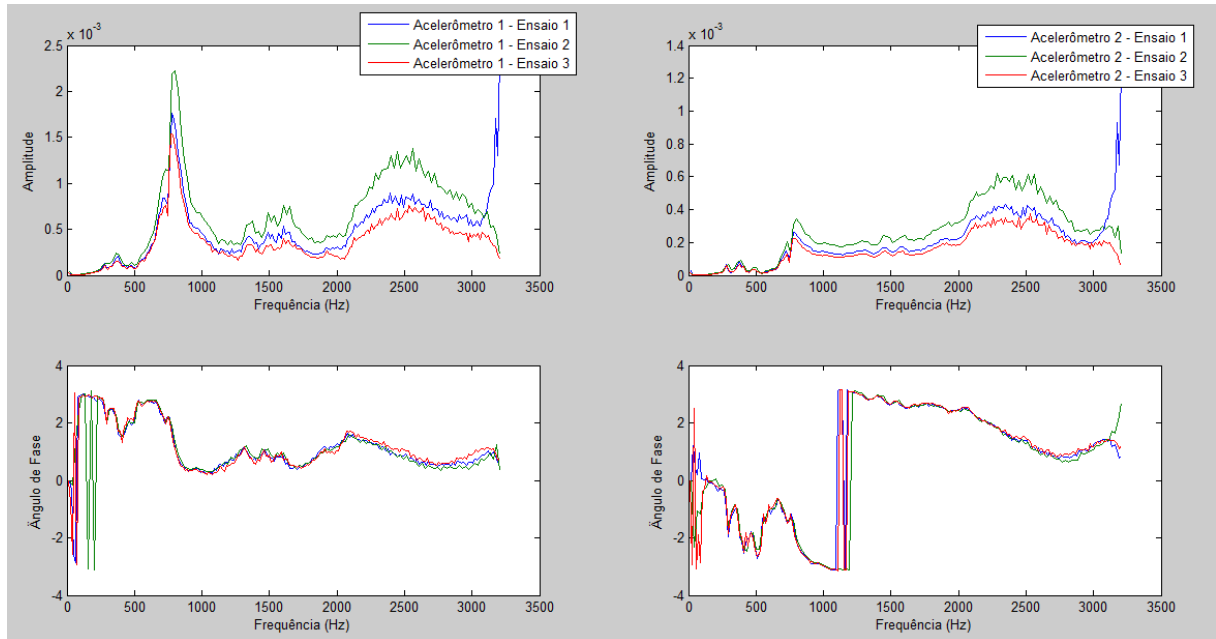
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 52 – Resposta em frequência dos 3 ensaios da fresa.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 53 – Resposta em frequência por acelerômetro dos 3 ensaios da fresa.



Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 9 – Picos de frequência natural, e suas respectivas rotações críticas para a fresa.

Frequência natural																						
Ordem	f_n	N_c [rpm]	n (modos de vibrar)																			
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
1	291																					
2	385																					
3	717																					
4	785																					
5	1362					4540																
6	1510					5033																
7	1614					5380	4035															
8	2398						5995	4796														
9	3184							6368	5307	4549												
10	0																					
11	0																					
12	0																					
13	0																					
14	0																					
15	0																					

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 10 – Rotações adequadas de trabalho fresa.

Frequência ótima de trabalho														
Ordem	f_n	N_{opt} [rpm]	n (modos de vibrar)											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	100													
2	200													
3	305													
4	435		4350											
5	510		5100											
6	1120			5600										
7	1220			6100	4067									
8	1300			6500	4333									
9	1800				6000	4500								
10	1900				6333	4750								
11	2050					5125	4100							
12	3100						6200	5167	4429					
13	0													
14	0													
15	0													

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 11 – Velocidade de corte para Ø80 mm.

Velocidade de corte ótima														
	V_c [mm/min]	n (modos de vibrar)												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
	1093													
	1282													
		1407												
		1533	1022											
		1634	1089											
			1508	1131										
			1592	1194										
				1288	1030									
					1558	1299	1113							

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 12 – Velocidade de avanço para Ø80 mm.

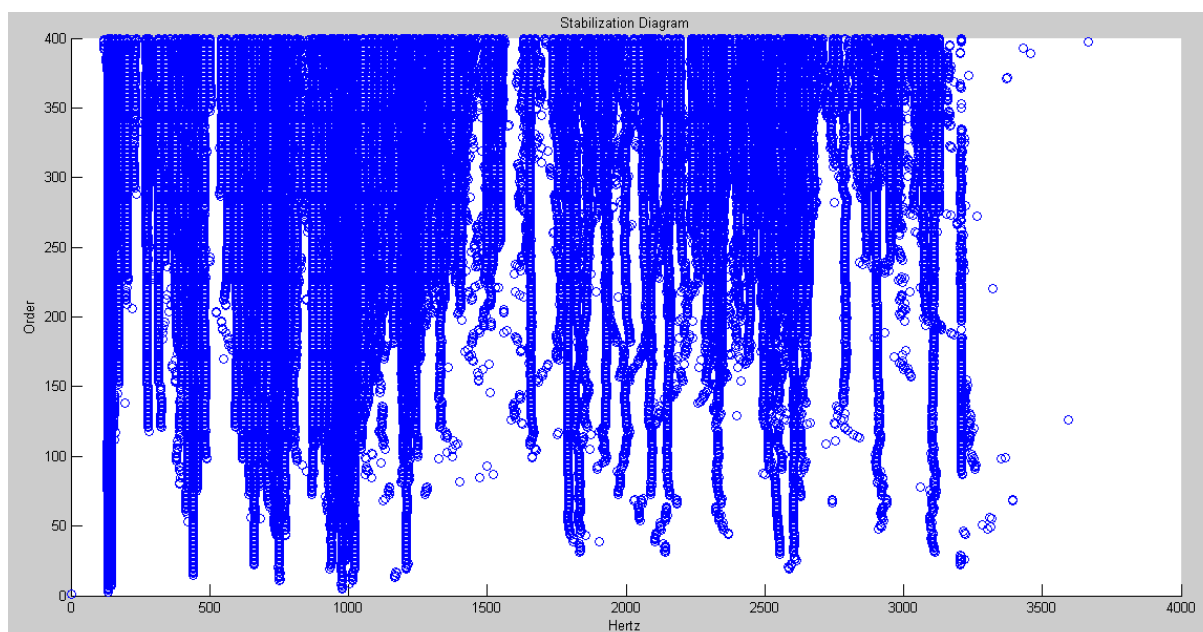
	Velocidade de avanço									
	n (modos de vibrar)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V _f [mm/min]										
	4176									
	4896									
		5376								
		5856	3904							
		6240	4160							
			5760	4320						
			6080	4560						
				4920	3936					
					5952	4960	4251			

Fonte: O Autor, 2019.

4.1.4 Ferramenta de mandrilamento livre – Método modal SSI-COV

Da mesma maneira que foi realizado para a análise do método FFT, foi extraído os dados no formato de texto do software Labview – Signal Express® dos ensaios realizados para a ferramenta na condição Livre. Estes dados foram utilizados como parâmetros de entrada para iniciar a análise pela rotina SSI-COV, o número de iterações escolhido foi n=400, com x=5 que representa o número de colunas nos dados de entrada e x=3 para o número de acelerômetros utilizados.

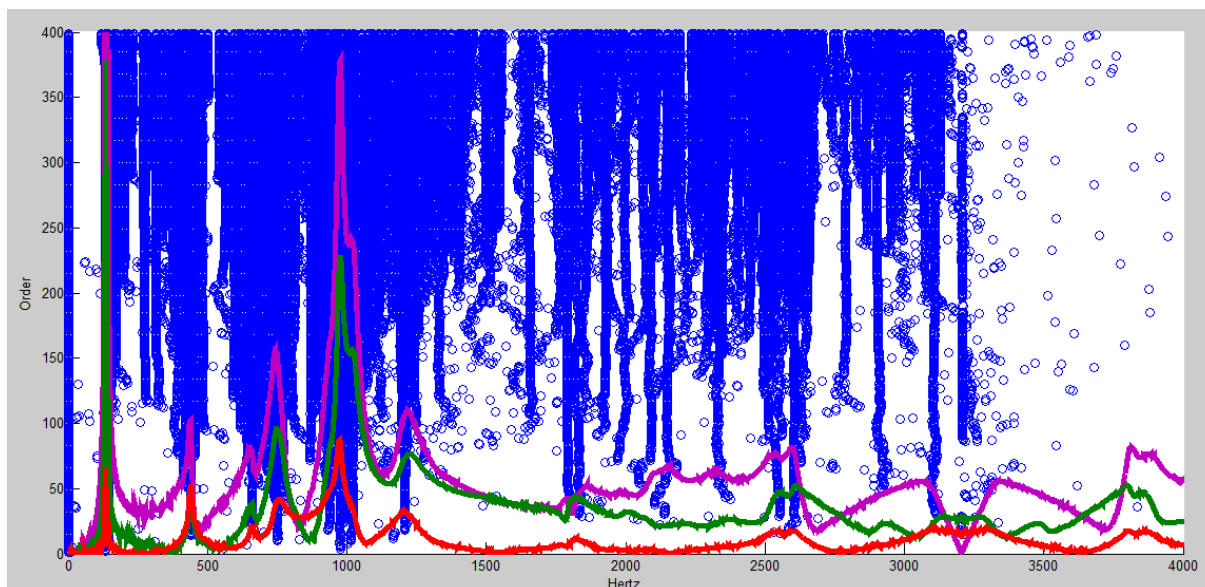
Figura 54 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 1.



Fonte: O Autor, 2019.

Para seleccionar os picos mais críticos foi inserido o *spectrum* da frequência no gráfico para que fique mais fácil de identificar as frequências naturais do sistema, conforme figura 55.

Figura 55 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 1.



Fonte: O Autor, 2019.

Selecionando as colunas que cruzam os picos apresentadas na figura acima foi possível extrair os valores críticos de frequência, e realizar a comparação entre o método FFT e SSI-COV, conforme tabela 13:

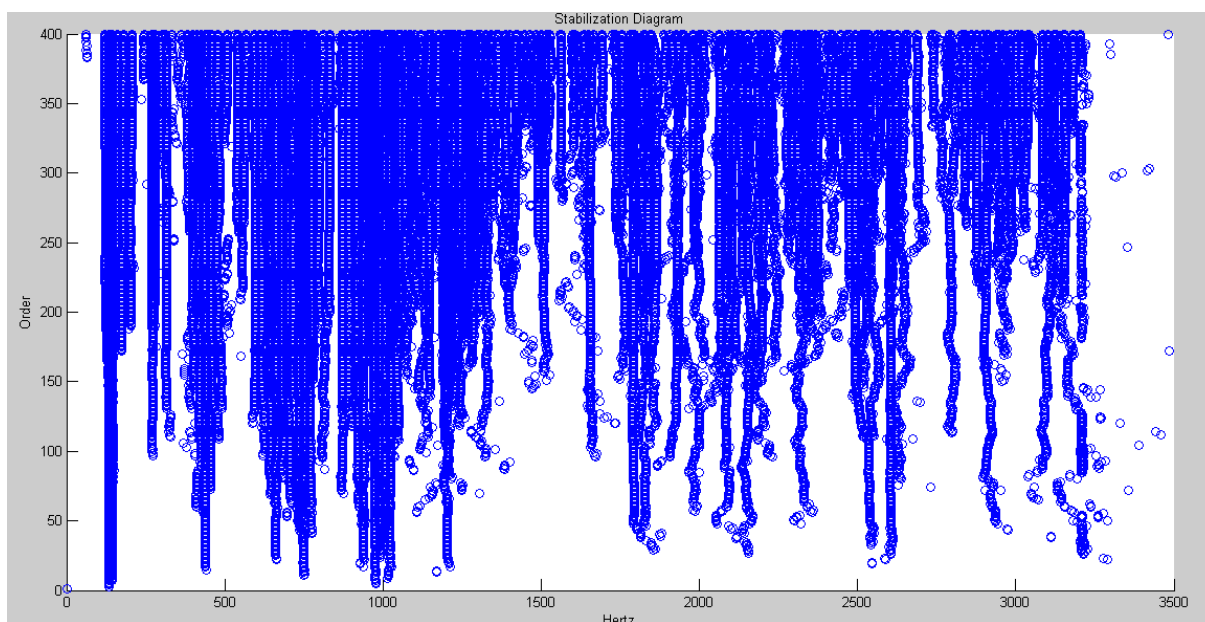
Tabela 13 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 1.

BARRA VIRABREQUIM NÃO MANCALIZADA			
ENSAIO 1			
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		
Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"	Erro entre os métodos (%)	COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO
138,7	134,2	3,4	-0,0014
150,5	144,2	4,4	0,0068
443,7	439,7	0,9	0,0172
661,6	660,1	0,2	0,0325
752,7	749,5	0,4	0,0036
976,6	975,9	0,1	0,0132
1026,0	1022,0	0,4	0,0199
1220,0	1210,0	0,8	0,0280
1822,0	1796,0	1,4	0,0063
2096,0	2156,0	2,8	0,0310
2540,0	2553,0	0,5	0,0153
2615,0	2603,0	0,5	0,0100
2936,0	2928,0	0,3	0,0005
	3098,0		0,0019
3205,0	3208,0	0,1	0,0269

Fonte: O Autor, 2019.

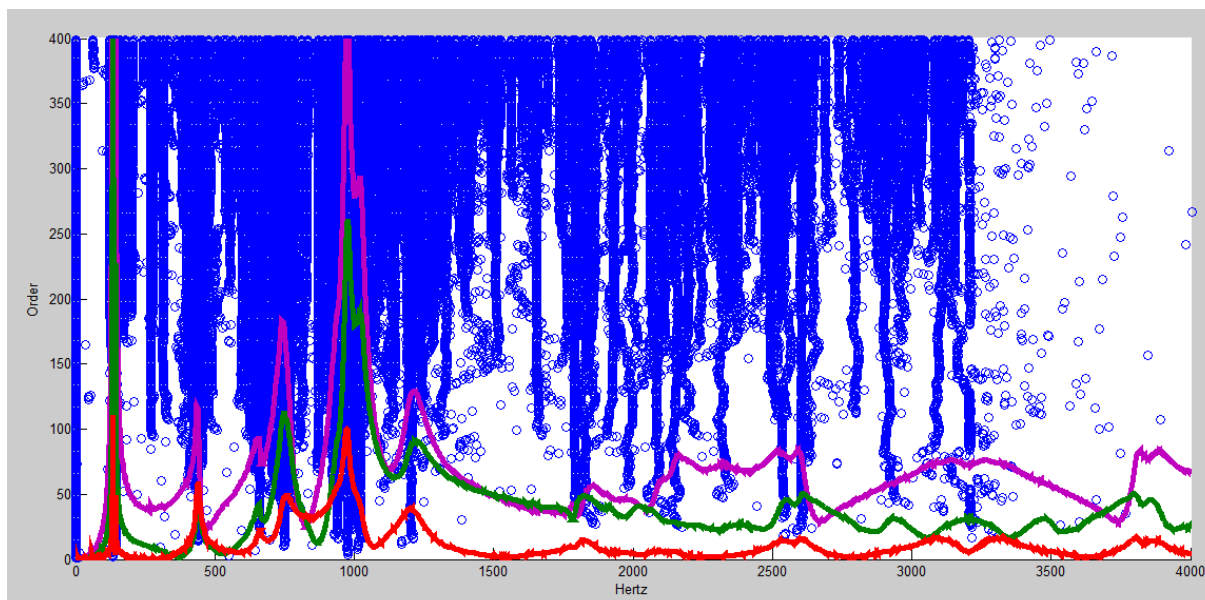
O mesmo procedimento foi realizado para todos os 5 ensaios da ferramenta de mandrilamento na condição livre.

Figura 56 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 2.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 57 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 2.



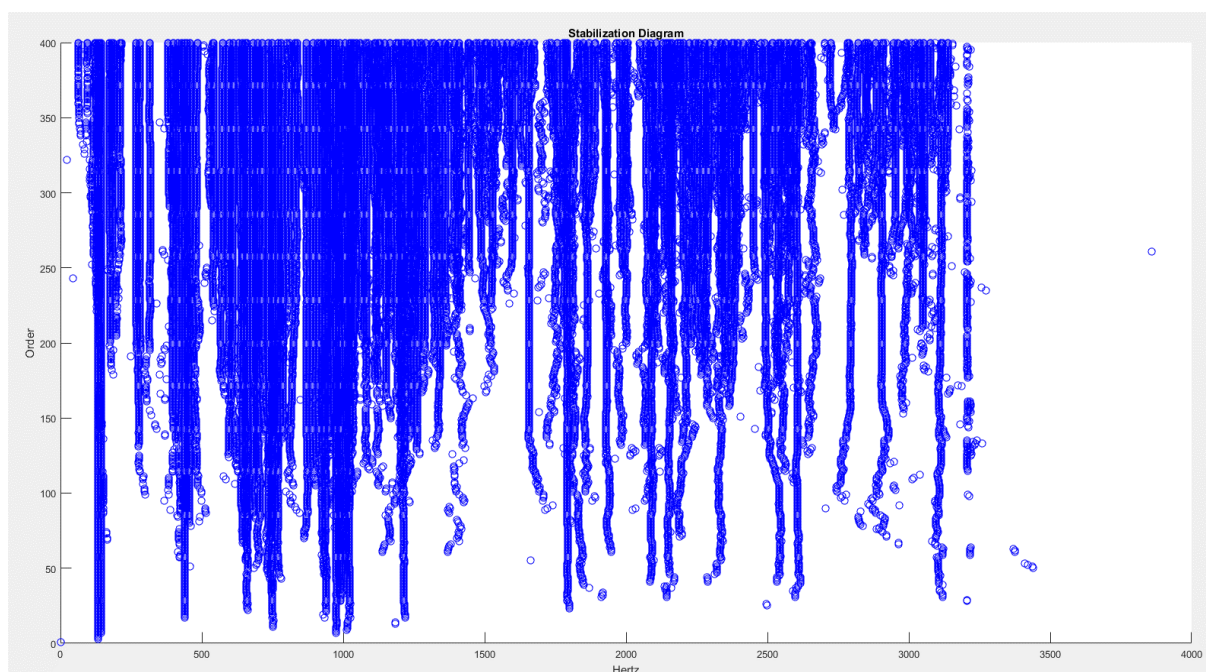
Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 14 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 2.

BARRA VIRABREQUIM NÃO MANCALIZADA			
ENSAIO 2			
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		
Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"	Erro entre os métodos (%)	COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO
135,8	134,3	1,1	0,0039
146,6	144,0	1,8	0,0231
441,9	439,0	0,7	0,0227
640,2	646,7	1,0	0,0079
663,9	661,7	0,3	0,0091
756,6	748,8	1,0	0,0112
941,8	938,8	0,3	0,0179
974,3	974,8	0,1	0,0005
1024	1024,0	0,0	0,0177
1203	1203,0	0,0	0,0234
1785	1790,0	0,3	0,0012
2020	2151,0	6,1	0,0033
2328	2326,0	0,1	0,0088
2552	2536,0	0,6	0,0200
2615	2603,0	0,5	0,0022
2923	2920,0	0,1	0,0159
3203	3208,0	0,2	0,0036

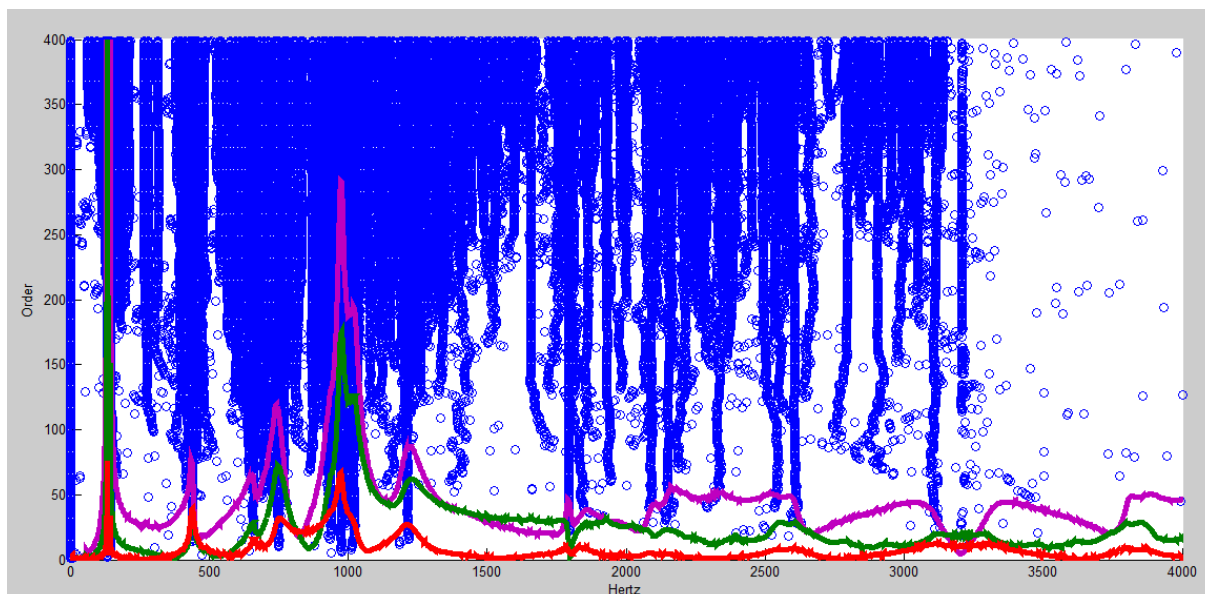
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 58 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 3.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 59 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 3.



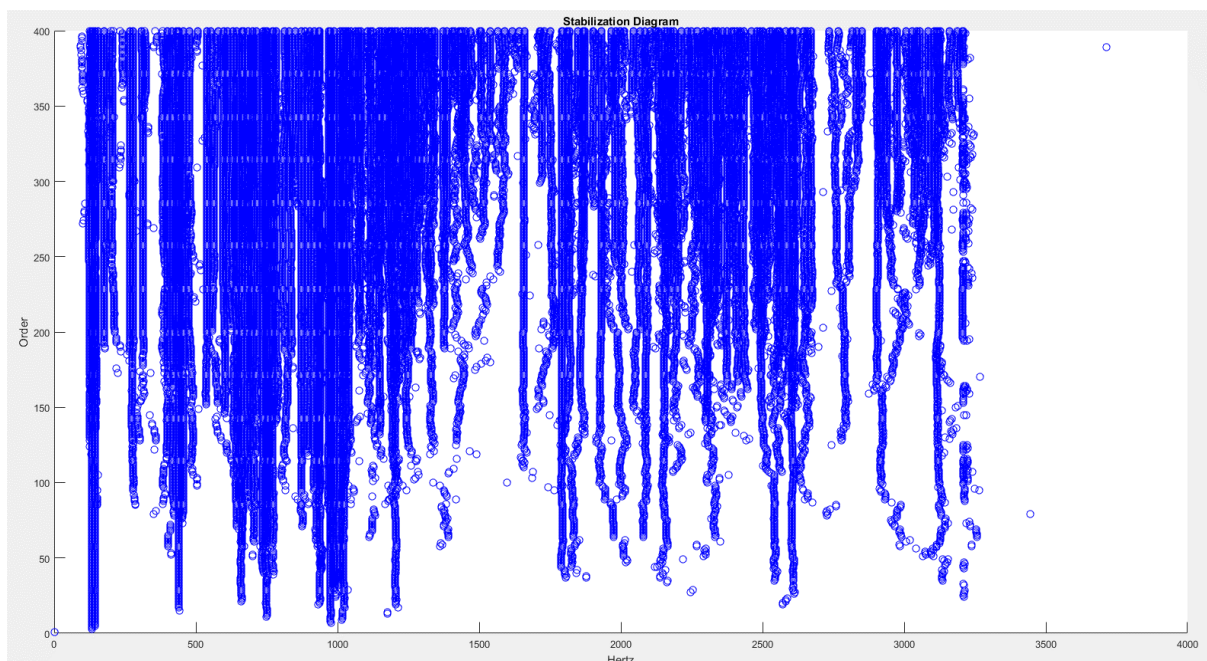
Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 15 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 3.

BARRA VIRABREQUIM NÃO MANCALIZADA			
ENSAIO 3			
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		
Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"	Erro entre os métodos (%)	COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO
136,1	134,3	1,3	0,0186
147,1	144,1	2,1	0,0308
441,3	439,2	0,5	0,0230
	644,8		0,0080
660,8	662,1	0,2	0,0073
742	737,7	0,6	0,0096
750,8	750,0	0,1	0,0022
941,8	937,5	0,5	0,0008
976,9	975,0	0,2	-0,0001
1025	1021,0	0,4	0,0061
1216	1215,0	0,1	0,0018
1783	1793,0	0,6	0,0052
2081	2092,0	0,5	0,0121
2158	2148,0	0,5	0,0008
2610	2606,0	0,2	0,0121
3126	3104,0	0,7	0,0468
3194	3206,0	0,4	0,0003

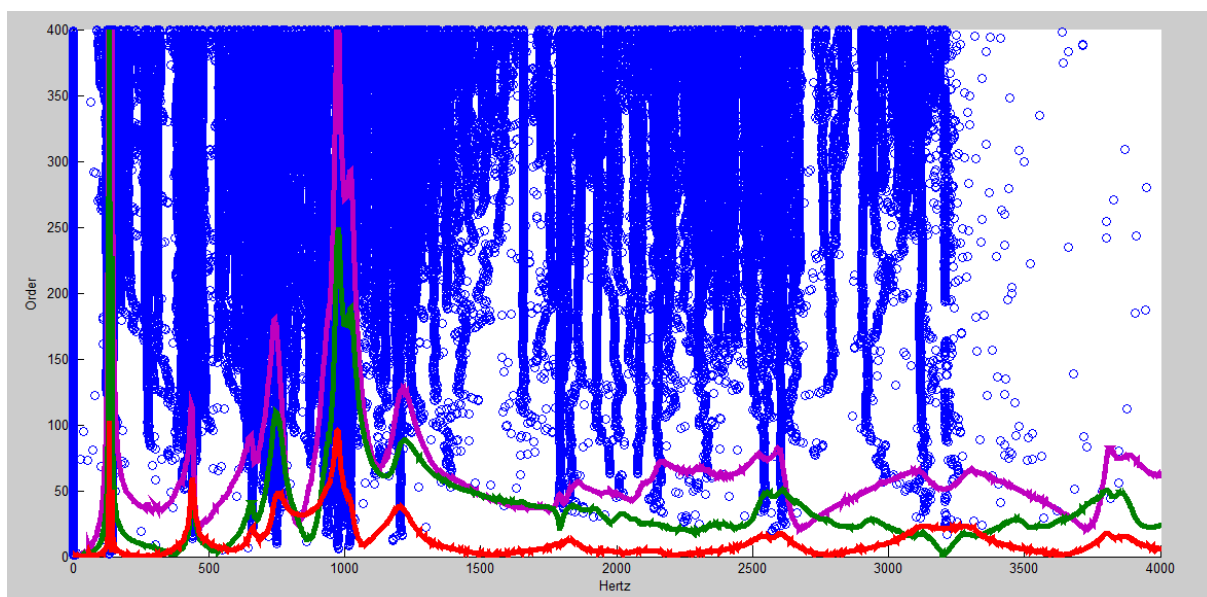
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 60 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 4.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 61 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 4.



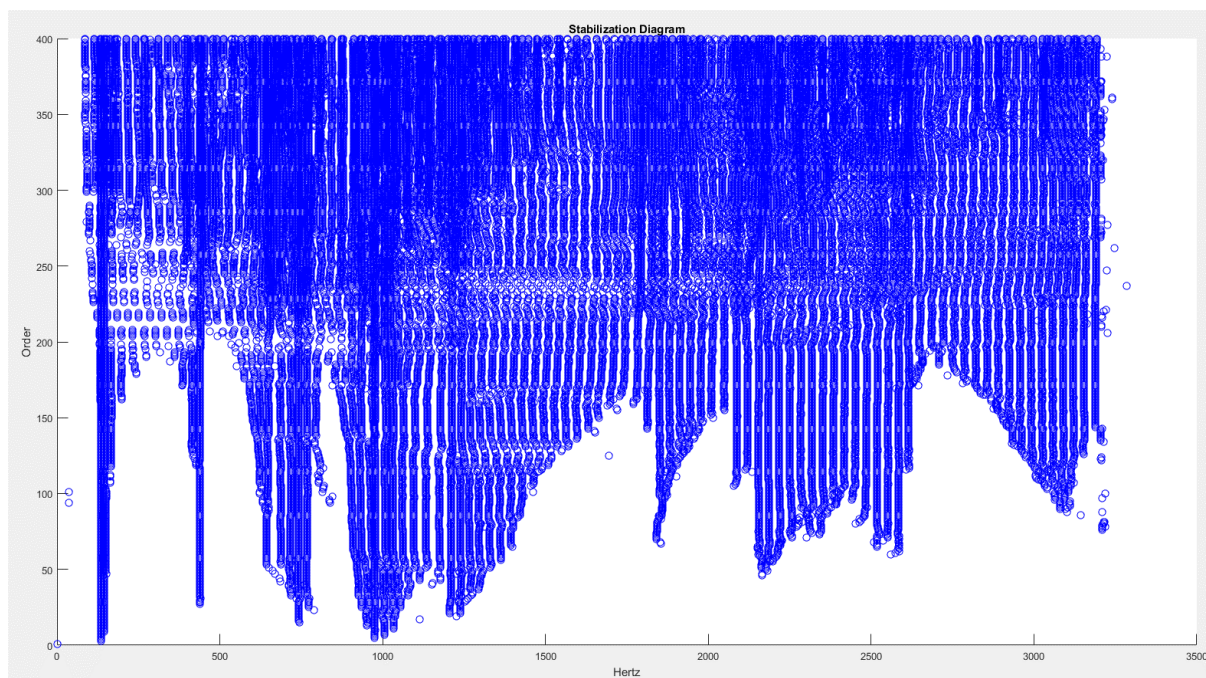
Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 16 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 4.

BARRA VIRABREQUIM NÃO MANCALIZADA			
ENSAIO 4			
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		
Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"	Erro entre os métodos (%)	COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO
136,7	134,2	1,9	0,0168
147,6	144,1	2,4	0,1105
440,5	439,4	0,3	0,0168
664,0	659,1	0,7	0,0059
744,3	737,8	0,9	0,0105
755,2	746,3	1,2	0,0425
939,6	937,5	0,2	0,0033
976,5	974,7	0,2	0,0041
	1023,0		0,0048
1204,0	1205	0,1	0,0382
1827,0	1791,0	2,0	0,0089
2159,0	2152,0	0,3	0,0046
2537,0	2542,0	0,2	0,0008
2613,0	2605,0	0,3	0,0054
3153,0	3131,0	0,7	0,0014
3203,0	3211,0	0,2	0,0454

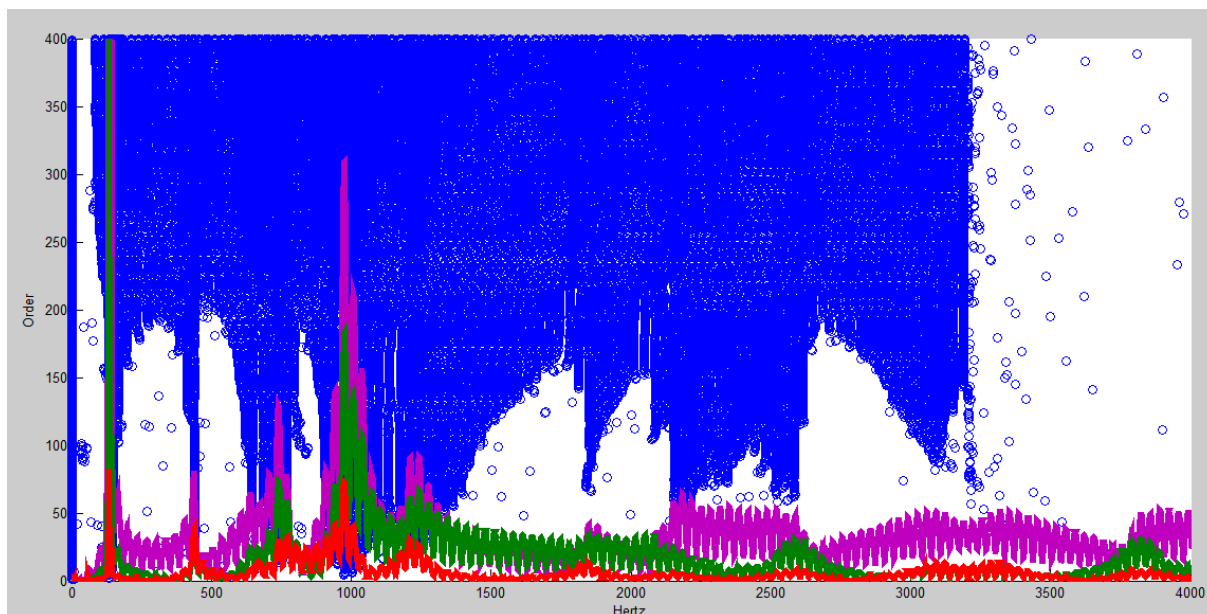
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 62 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 5.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 63 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 5.



Fonte: O Autor, 2019.

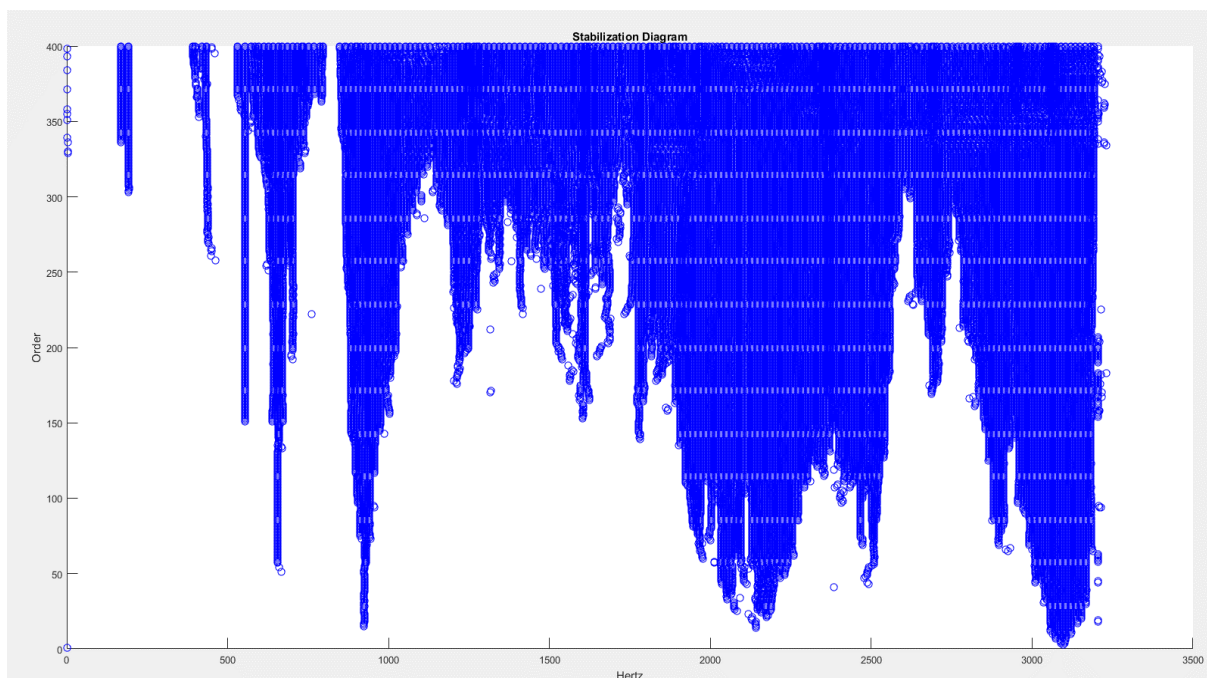
Tabela 17 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar na condição livre Ensaio 5.

ENSAIO 5			
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		
Frequência natural (Hz) "Picos"	Frequência natural (Hz) "Picos"	Erro entre os métodos (%)	COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO
136,9	134,2	2,0	0,0482
144	144,1	0,1	0,0039
442,2	439	0,7	0,0225
762,3	768	0,7	0,0140
977,1	976,5	0,1	0,0172
1228	1226,0	0,2	0,0179
1830	1854,0	1,3	0,0100
2161	2166,0	0,2	0,0047
2605	2561,0	1,7	0,0041
3152	3209,0	1,8	0,0063

Fonte: O Autor, 2019.

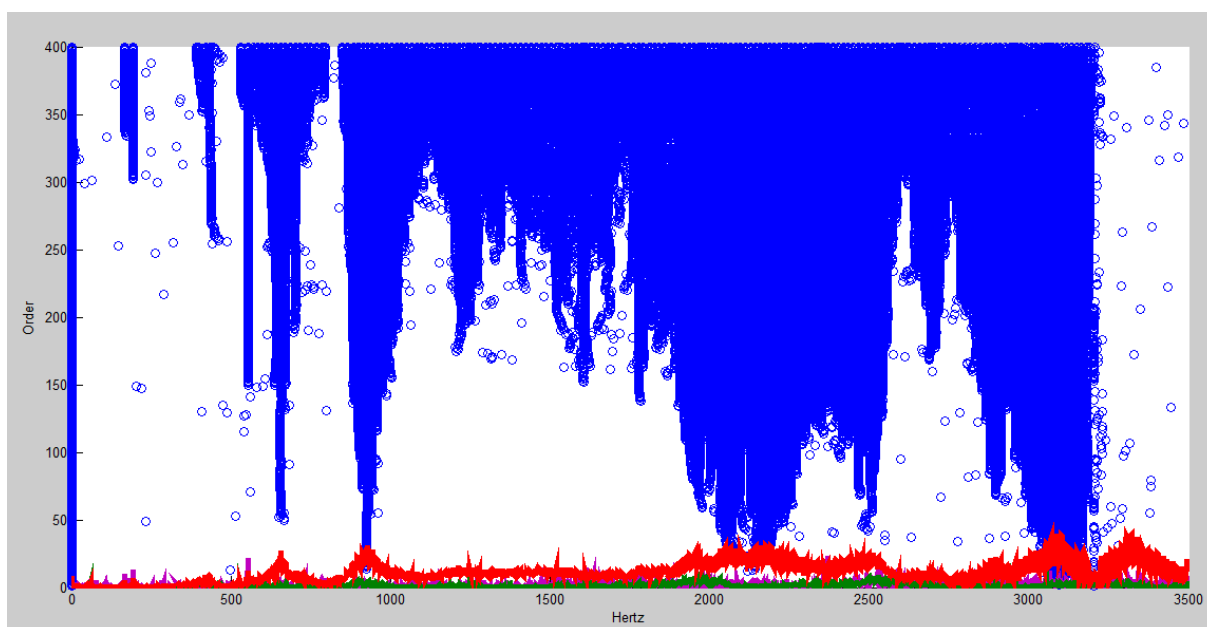
4.1.5 Ferramenta de mandrilamento mancalizada – Método modal SSI-COV

Figura 64 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 1.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 65 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 1.



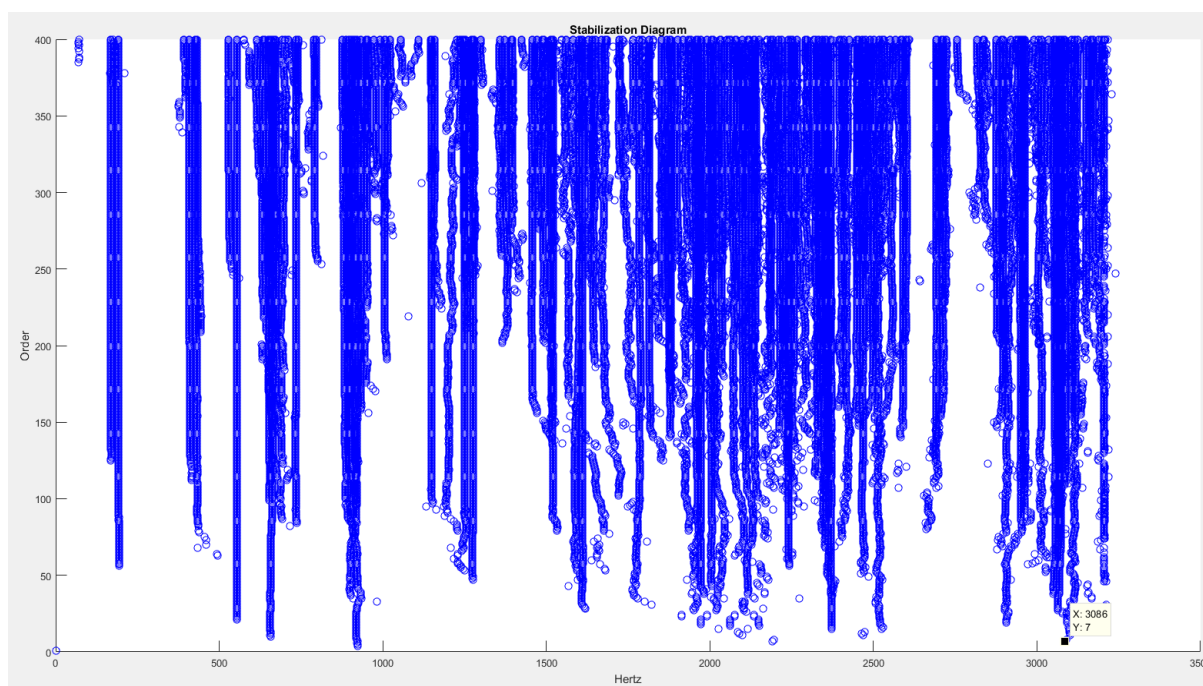
Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 18 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 1.

BARRA VIRABREQUIM MANCALIZADA			
ENSAIO 1			
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		
Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"	Erro entre os métodos (%)	COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO
437,1	436,9	0,0	0,0076
	553,6		0,0000
662,9	654,8	1,2	0,0076
932,4	924,7	0,8	0,0068
1093,0	1003,0	9,0	0,0054
1173,0	1022,0	14,8	0,0048
1238,0	1248,0	0,8	0,0018
1304,0	1272,0	2,5	0,0036
1384,0	1396,0	0,9	0,0041
1450,0	1458,0	0,5	0,0047
1530,0	1517,0	0,9	0,0050
1595,0	1610,0	0,9	0,0016
1981,0	1971,0	0,5	0,0016
2061,0	2034,0	1,3	0,0029
2156,0	2239,0	3,7	0,0015
2506,0	2370,0	5,7	0,0034
2906,0	2944,0	1,3	0,0022
3096,0	3056,0	1,3	0,0001

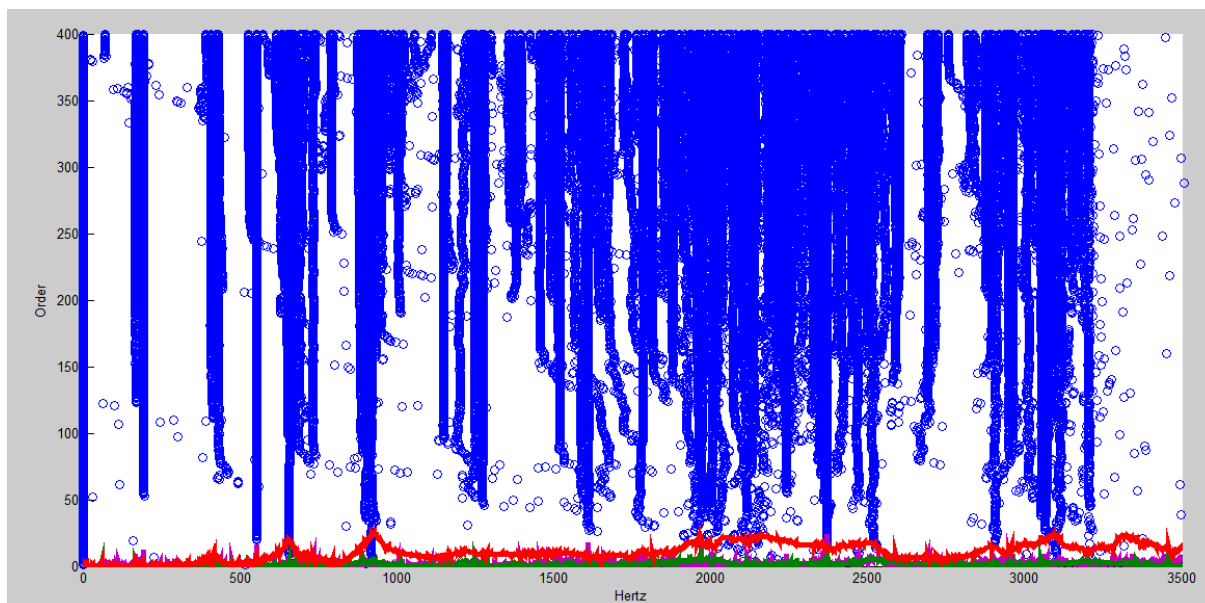
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 66 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 2.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 67 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 2.



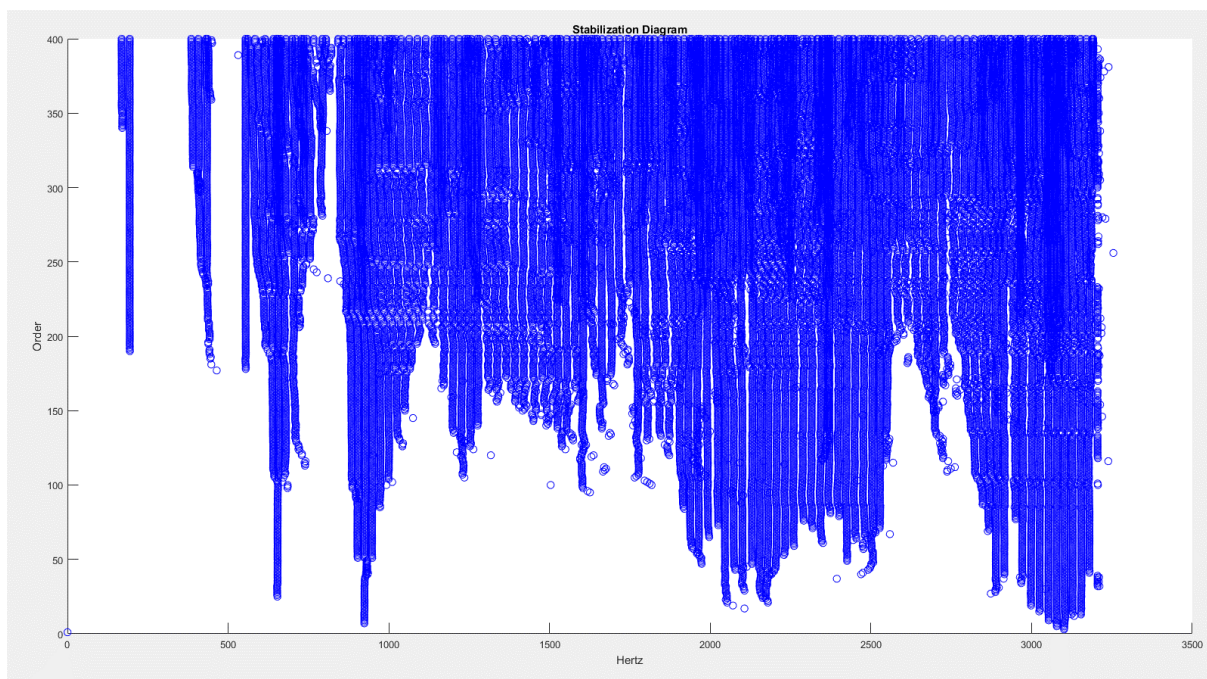
Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 19 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 2.

BARRA VIRABREQUIM MANCALIZADA			
ENSAIO 2			
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		
Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"	Erro entre os métodos (%)	COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO
207,4	192,9	7,5	-0,0006
452,5	432,5	4,6	0,0218
	530,1		0,0010
565,6	553,1	2,3	0,0010
678,7	657,5	3,2	0,0063
754,0	734,5	2,7	0,0106
942,7	920,7	2,4	0,0318
1188,0	1148,0	3,5	-0,0002
1508,0	1520,0	0,8	0,0002
1980,0	1972,0	0,4	0,0018
2206,0	2371,0	7,0	0,0000
2922,0	2950,0	0,9	0,0022
3035,0	3056,0	0,7	0,0001
3130,0	3205,0	2,3	0,0082

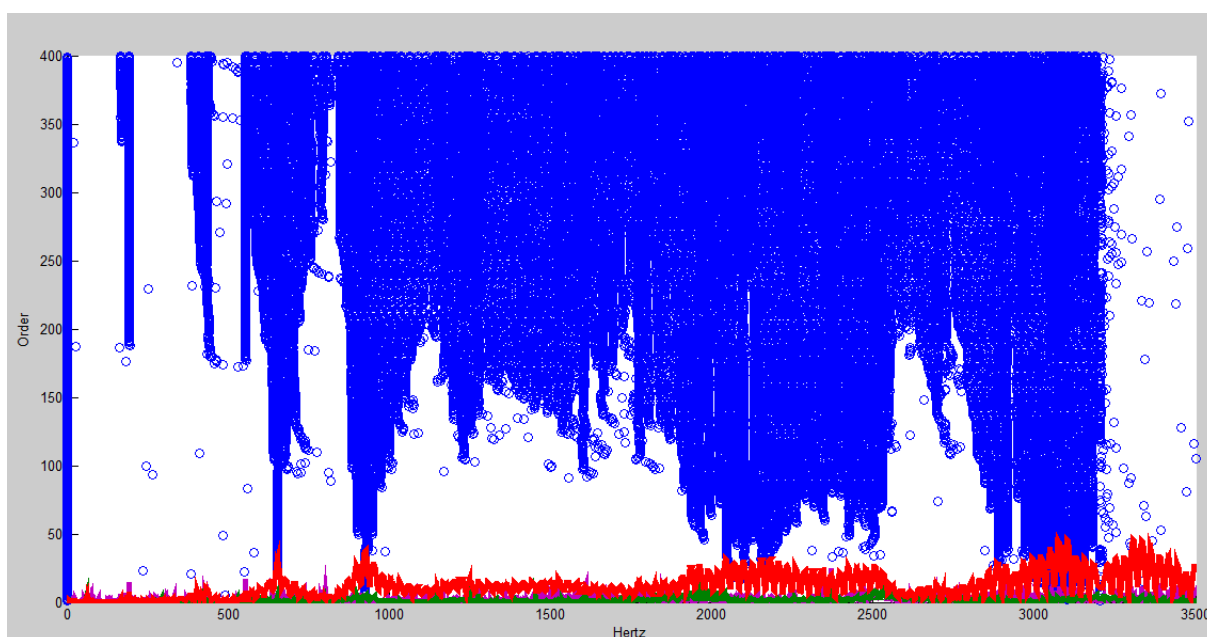
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 68 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 3.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 69 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 3.



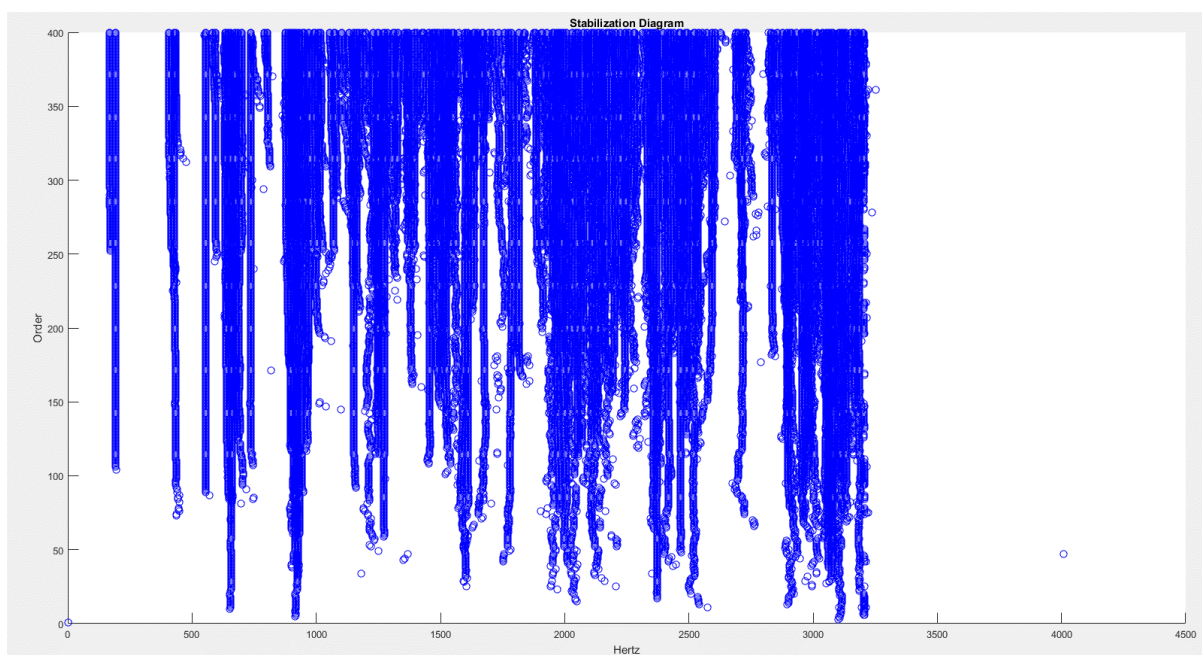
Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 20 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 3.

BARRA VIRABREQUIM MANCALIZADA			
ENSAIO 3			
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		
Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"	Erro entre os métodos (%)	COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO
437,6			
	554,6		0,0000
671,8	654,1	2,7	0,0021
936,9	924,6	1,3	0,0037
1245,0	1249,0	0,3	0,0036
1572,0	1524,0	3,1	0,0000
2170,0	2152,0	0,8	0,0051
2521,0	2503,0	0,7	0,0038
2922,0	2915,0	0,2	0,0033
3107,0	3078,0	0,9	0,0005
3162,0	3103,0	1,9	0,0020

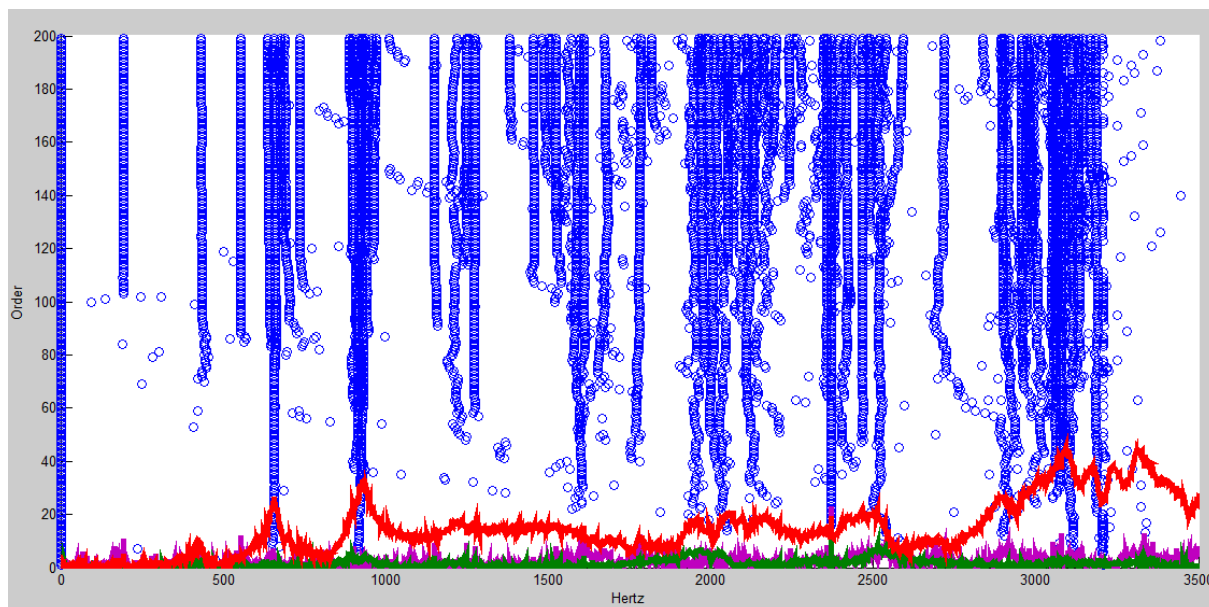
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 70 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 4.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 71 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 4.



Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 21 – Comparação dos resultados da ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio 4.

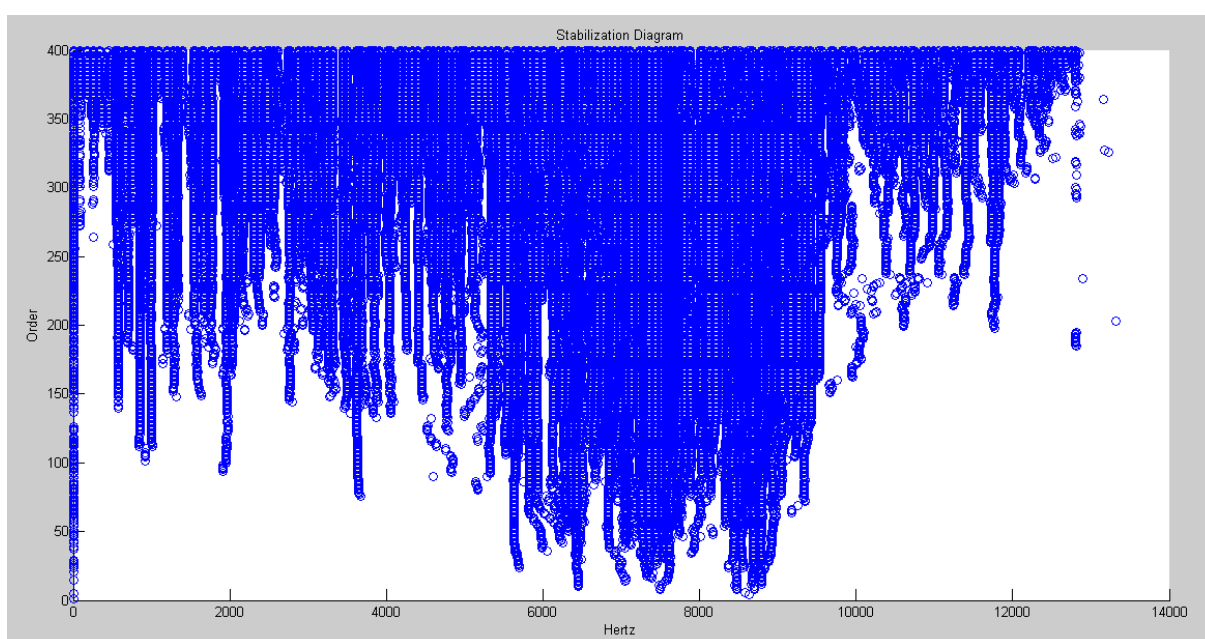
BARRA VIRABREQUIM MANCALIZADA			
ENSAIO 4			
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		
Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"	Erro entre os métodos (%)	COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO
201,8	193,3	4,4	-0,0016
569,8	555,0	2,7	0,0252
641,0	656,7	2,4	0,0026
973,4	924,2	5,3	0,0391
1021,0	1150,0	11,2	-0,0006
1258,0	1249,0	0,7	-0,0001
1318,0	1273,0	3,5	0,0019
1591,0	1527,0	4,2	-0,0009
1626,0	1610,0	1,0	0,0003
1935,0	1974,0	2,0	0,0008
2386,0	2371,0	0,6	0,0000
2991,0	3075,0	2,7	0,0014
3181,0	3205,0	0,7	0,0024

Fonte: O Autor, 2019.

4.1.6 Ferramenta de mandrilamento mancalizada teste Dinâmico – Método modal SSI-COV

Da mesma maneira que foi realizado para a análise do método FFT, foi extraído os dados no formato de texto do software Labview – Signal Express® dos ensaios realizados para a ferramenta na condição Livre. Estes dados foram utilizados como parâmetros de entrada para iniciar a análise pela rotina SSI-COV, o número de iterações escolhido foi $n=400$, com $x=2$ que representa o número de colunas nos dados de entrada e $x=1$ para o número de acelerômetros utilizados.

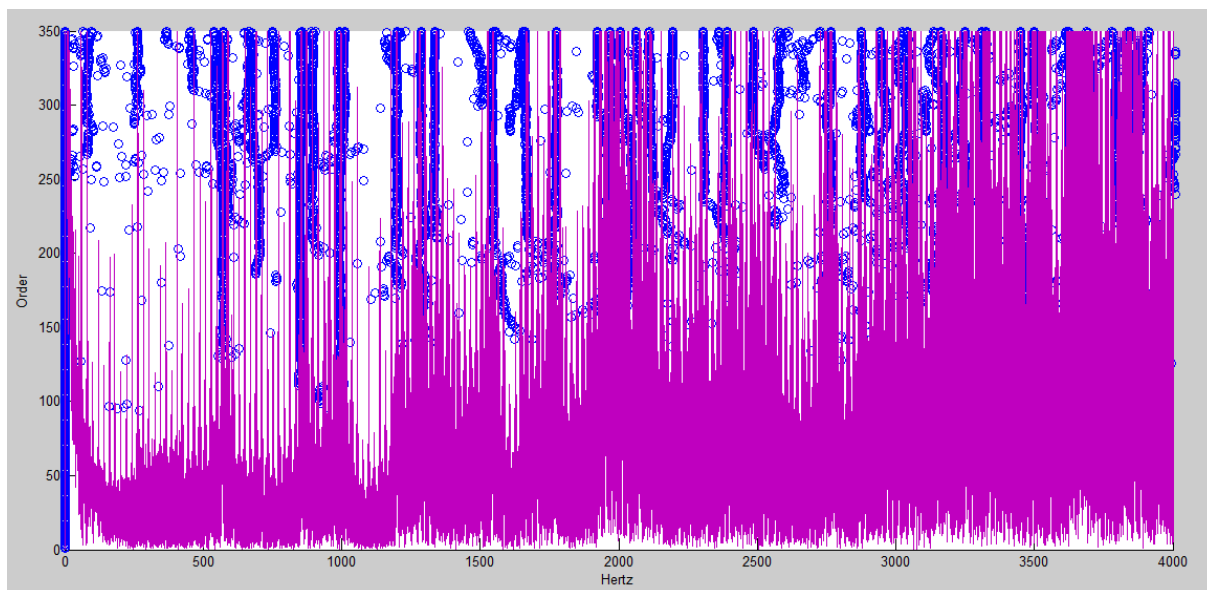
Figura 72 – Diagrama de estabilização para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio Dinâmico.



Fonte: O Autor, 2019.

Para selecionar os picos mais críticos foi inserido o *spectrum* da frequência no gráfico para que fique mais fácil de identificar as frequências naturais do sistema, conforme figura 73.

Figura 73 - Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a ferramenta de mandrilar mancalizada Ensaio Dinâmico.



Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 22 – Picos de frequência natural para o sistema dinâmico.

BARRA VIRABREQUIM MANCALIZADA	
ENSAIO DINÂMICO	
MÉTODO MODAL	
Frequencia natural (Hz) "Picos"	COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO
458,6	-0,041829989
572,5	-0,045107741
690,2	-0,028121288
853,0	-0,046318145
994,0	0,02320602
1200,0	0,004653943
1285,0	0,012599817
1341,0	-0,00090592
1548,0	0,031964057
1665,0	0,019413913
1772,0	-0,003950365
1991,0	0,019194283
2137,0	0,001096765
2317,0	-0,017402675
2381,0	-0,017402675
2482,0	-0,011027957
2563,0	0,029204608
2769,0	0,012547393
2872,0	0,004706801
2966,0	0,00387158
3030,0	0,01983323
3234,0	0,009621746
3313,0	0,008875458
3456,0	0,004645849

Fonte: O Autor, 2019.

Comparando com os resultados dinâmicos x estáticos para a ferramenta na condição mancalizada obtemos:

Tabela 23 – Comparação dos resultados do Ensaio 1 ferramenta de mandrilar mancaizada x Ensaio Dinâmico.

BARRA VIRABREQUIM MANCALIZADA - Ensaio 1					
Estático	Dinâmico	Erro entre os método FFT Estático x Dinâmico (%)	Estático	Dinâmico	Erro entre os método SSI-COV Estático x Dinâmico (%)
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		MÉTODO MODAL	MÉTODO MODAL	
Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"		Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"	
437,1	458,6	4,7	436,9	458,6	4,7
	572,5		553,6	572,5	3,3
662,9	690,2	4,0	654,8	690,2	5,1
932,4	853,0	9,3	924,7	853,0	8,4
1093,0	994,0	10,0	1003,0	994,0	0,9
1173,0	1200,0	2,3	1022,0		
1238,0	1285,0	3,7		1200,0	
1304,0	1341,0	2,8	1248,0	1285,0	2,9
1384,0			1272,0	1341,0	5,1
1450,0			1396,0		
1530,0	1548,0	1,2	1458,0	1548,0	5,8
1595,0	1665,0	4,2	1517,0	1665,0	8,9
	1772,0		1610,0	1772,0	9,1
1981,0	1991,0	0,5	1971,0	1991,0	1,0
2061,0			2034,0	2137,0	4,8
2156,0	2137,0	0,9	2239,0	2317,0	3,4
	2317,0		2370,0	2381,0	0,5
	2381,0			2482,0	
2506,0	2482,0	1,0		2563,0	
	2563,0			2769,0	
	2769,0			2872,0	
2906,0	2872,0	1,2	2944,0	2966,0	0,7
	2966,0		3056,0	3030,0	0,9
3096,0	3030,0	2,2		3234,0	
	3234,0			3313,0	
	3313,0			3456,0	
	3456,0				

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 24 – Comparação dos resultados do Ensaio 2 ferramenta de mandrilar mancaizada x Ensaio Dinâmico.

BARRA VIRABREQUIM MANCALIZADA - Ensaio 2					
Estático	Dinâmico	Erro entre os método FFT Estático x Dinâmico (%)	Estático	Dinâmico	Erro entre os método SSI-COV Estático x Dinâmico (%)
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		MÉTODO MODAL	MÉTODO MODAL	
Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"		Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"	
207,4			192,9		
452,5	458,6	1,3	432,5	458,6	5,7
565,6	572,5	1,2	530,1		
678,7	690,2	1,7	553,1	572,5	3,4
754,0	853,0	11,6	657,5	690,2	4,7
942,7	994,0	5,2	734,5	853,0	13,9
1188,0	1200,0	1,0	920,7	994,0	7,4
	1285,0		1148,0	1200,0	4,3
	1341,0			1285,0	
1508,0	1548,0	2,6		1341,0	
	1665,0		1520,0	1548,0	1,8
	1772,0			1665,0	
1980,0	1991,0	0,6		1772,0	
2206,0	2137,0	3,2	1972,0	1991,0	1,0
	2317,0			2137,0	
	2381,0			2317,0	
	2482,0		2371,0	2381,0	0,4
	2563,0			2482,0	
	2769,0			2563,0	
	2872,0			2769,0	
2922,0	2966,0	1,5		2872,0	
3035,0	3030,0	0,2	2950,0	2966,0	0,5
3130,0	3234,0	3,2	3056,0	3030,0	0,9
	3313,0		3205,0	3234,0	0,9
	3456,0			3313,0	
				3456,0	

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 25 – Comparação dos resultados do Ensaio 3 ferramenta de mandrilar mancaizada x Ensaio Dinâmico.

BARRA VIRABREQUIM MANCALIZADA - Ensaio 3					
Estático	Dinâmico	Erro entre os métodos FFT Estático x Dinâmico (%)	Estático	Dinâmico	Erro entre os métodos SSI-COV Estático x Dinâmico (%)
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		MÉTODO MODAL	MÉTODO MODAL	
Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"		Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"	
437,6	458,6	4,6		458,6	
	572,5		554,6	572,5	3,1
671,8	690,2	2,7	654,1	690,2	5,2
	853,0			853,0	
936,9	994,0	5,7	924,6	994,0	7,0
	1200,0			1200,0	
1245,0	1285,0	3,1	1249,0	1285,0	2,8
	1341,0			1341,0	
1572,0	1548,0	1,6	1524,0	1548,0	1,6
	1665,0			1665,0	
	1772,0			1772,0	
	1991,0			1991,0	
2170,0	2137,0	1,5	2152,0	2137,0	0,7
	2317,0			2317,0	
	2381,0			2381,0	
	2482,0			2482,0	
2521,0	2563,0	1,6	2503,0	2563,0	2,3
	2769,0			2769,0	
	2872,0			2872,0	
2922,0	2966,0	1,5	2915,0	2966,0	1,7
3107,0	3030,0	2,5	3078,0	3030,0	1,6
3162,0	3234,0	2,2	3103,0	3234,0	4,1
	3313,0			3313,0	
	3456,0			3456,0	

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 26 – Comparação dos resultados do Ensaio 4 ferramenta de mandrilar mancaizada x Ensaio Dinâmico.

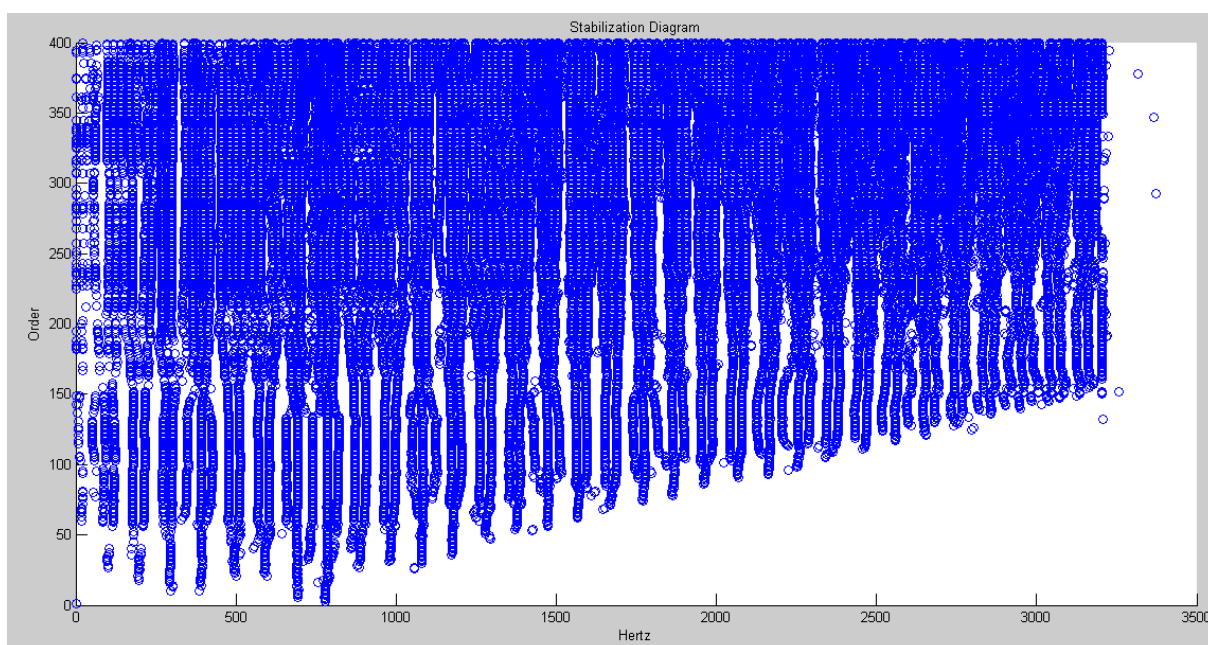
BARRA VIRABREQUIM MANCALIZADA - Ensaio 4					
Estático	Dinâmico	Erro entre os método FFT Estático x Dinâmico (%)	Estático	Dinâmico	Erro entre os método SSI-COV Estático x Dinâmico (%)
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		MÉTODO MODAL	MÉTODO MODAL	
Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"		Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"	
201,8			193,3		
	458,6			458,6	
569,8	572,5	0,5	555,0	572,5	3,1
641,0	690,2	7,1	656,7	690,2	4,9
973,4	853,0	14,1		853,0	
1021,0	994,0	2,7	924,2	994,0	7,0
	1200,0		1150,0	1200,0	4,2
1258,0	1285,0	2,1	1249,0	1285,0	2,8
1318,0	1341,0	1,7		1341,0	
1591,0	1548,0	2,8	1527,0	1548,0	1,4
1626,0	1665,0	2,3	1610,0	1665,0	3,3
	1772,0			1772,0	
1935,0	1991,0	2,8	1974,0	1991,0	0,9
	2137,0			2137,0	
	2317,0			2317,0	
2386,0	2381,0	0,2	2371,0	2381,0	0,4
	2482,0			2482,0	
	2563,0			2563,0	
	2769,0			2769,0	
	2872,0			2872,0	
2991,0	2966,0	0,8		2966,0	
3181,0	3030,0	5,0	3075,0	3030,0	1,5
	3234,0		3205,0	3234,0	0,9
	3313,0			3313,0	
	3456,0			3456,0	

Fonte: O Autor, 2019.

4.1.7 Fresa – Método modal SSI-COV

Da mesma maneira que foi realizado para a análise do método FFT, foi extraído os dados no formato de texto do software Labview – Signal Express® dos ensaios realizados para a ferramenta na condição Livre. Estes dados foram utilizados como parâmetros de entrada para iniciar a análise pela rotina SSI-COV, o número de iterações escolhido foi $n=200$, com $x=3$ que representa o número de colunas nos dados de entrada e $x=2$ para o número de acelerômetros utilizados.

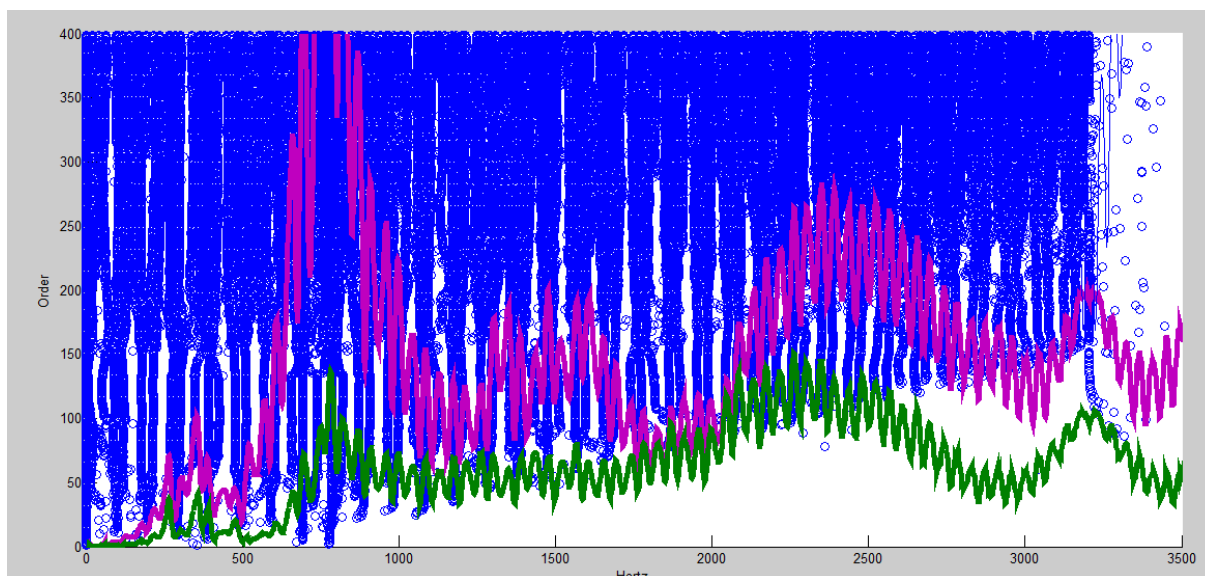
Figura 74 – Diagrama de estabilização para a fresa Ensaio 1.



Fonte: O Autor, 2019.

Para selecionar os picos mais críticos foi inserido o espectro da frequência no gráfico para que fique mais fácil de identificar as frequências naturais do sistema, conforme figura 75.

Figura 75 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a fresa Ensaio 1.



Fonte: O Autor, 2019.

Selecionando as colunas apresentadas na figura acima foi possível extrair os valores críticos de frequência, e realizar a comparação entre o método FFT e SSI-COV, conforme tabela 27:

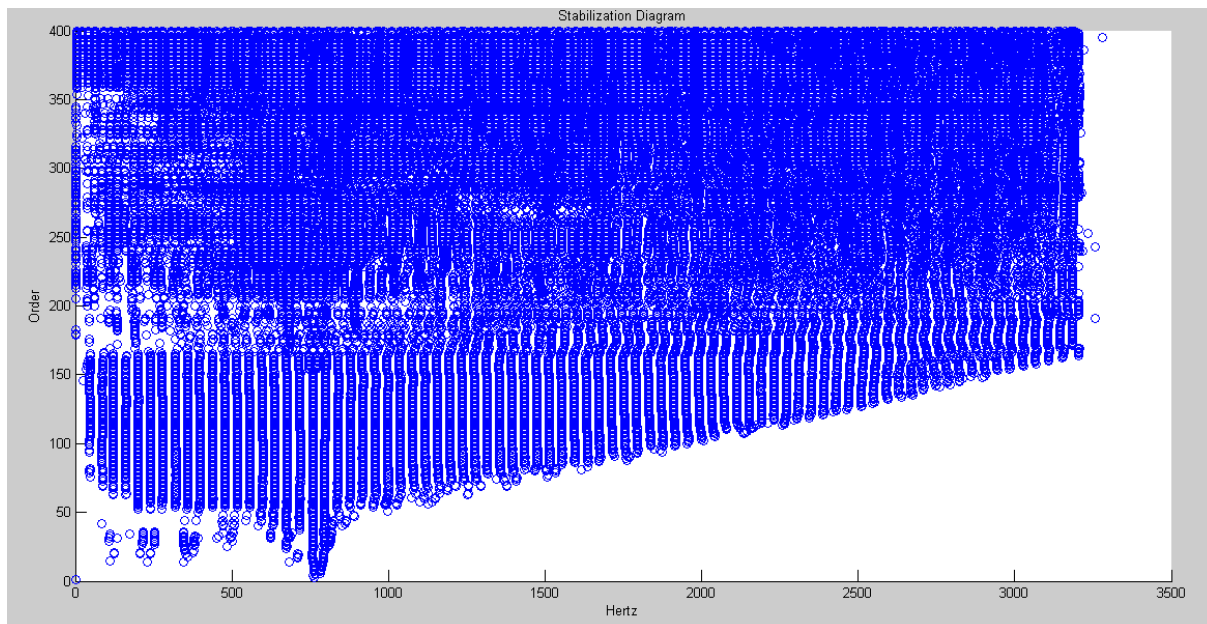
Tabela 27 – Comparação dos resultados da fresa Ensaio 1.

FRESA			
ENSAIO 1			
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		
Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"	Erro entre os métodos (%)	COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO
291,4	298,0	2,2	0,0523
384,5	364,0	5,6	0,0707
717,3	692,4	3,6	0,0226
785,4	784,4	0,1	0,0245
	818,6		0,0202
	871,9		0,0227
	906,9		0,0249
	1173,0		0,0271
	1205,0		0,0194
1362,0	1354,0	0,6	0,0136
	1474,0		0,0140
1510,0	1509,0	0,1	0,0159
1614,0	1563,0	3,3	0,0156
	1652,0		0,0123
	1690,0		0,0127
	1776,0		0,0142
	1864,0		0,0120
	2043,0		0,0106
	2083,0		0,0113
2398,0	2351,0	2,0	0,0072
	2440,0		0,0106
3184,0	3205,0	0,7	0,0088

Fonte: O Autor, 2019.

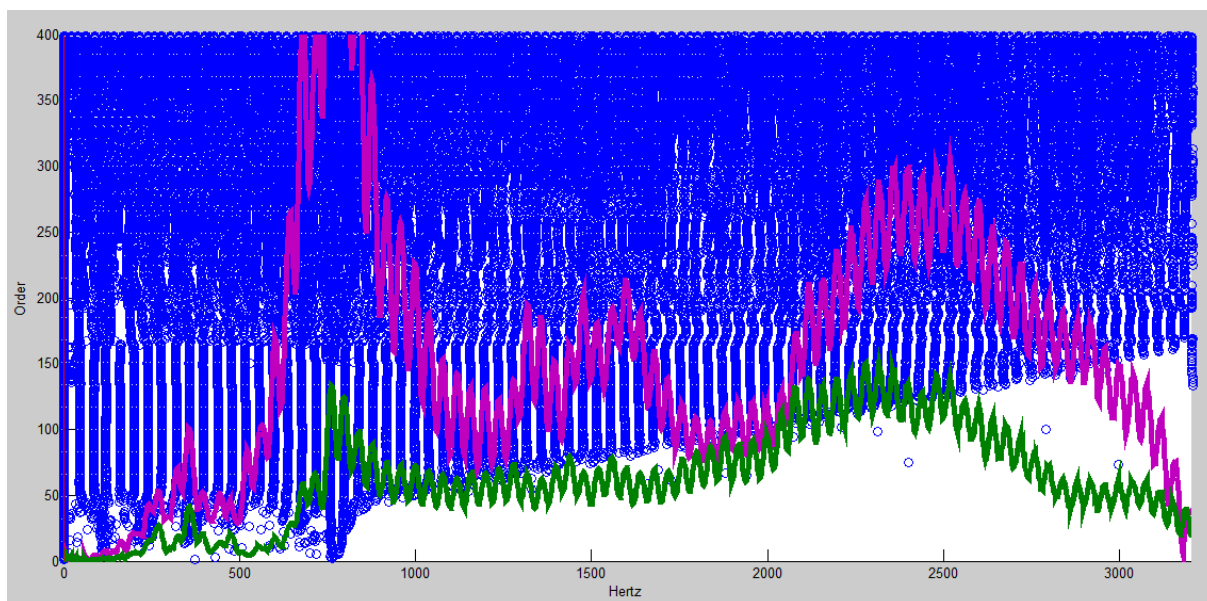
O procedimento citado a cima foi realizado para todos os 3 ensaios da ferramenta de mandrilamento na condição livre, conforme apresentado a seguir:

Figura 76 – Diagrama de estabilização para a fresa Ensaio 2.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 77 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a fresa Ensaio 2.



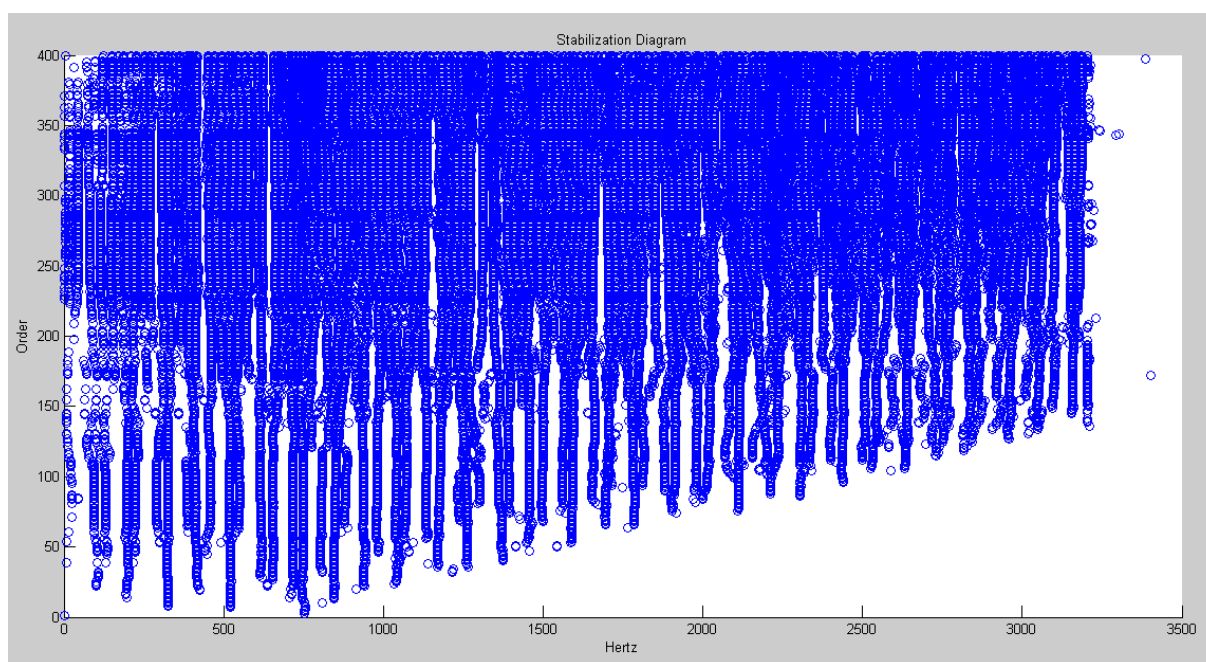
Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 28 – Comparação dos resultados da fresa Ensaio 2.

FRESA			
ENSAIO 2			
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		
Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"	Erro entre os métodos (%)	COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO
278,7	278,5	0,1	0,1243
371,6	359,4	3,4	0,0960
500,0	674,7	25,9	0,0615
720,0	716,5	0,5	0,0539
	757,7		0,0443
789,7	796,0	0,8	0,0430
	838,0		0,0792
1370,0	1313,0	4,3	0,0328
1533,0	1473,0	4,1	0,0266
1649,0	1592,0	3,6	0,0237
2352,0	2355,0	0,1	0,0151
2369,0	2437,0	2,8	0,0144

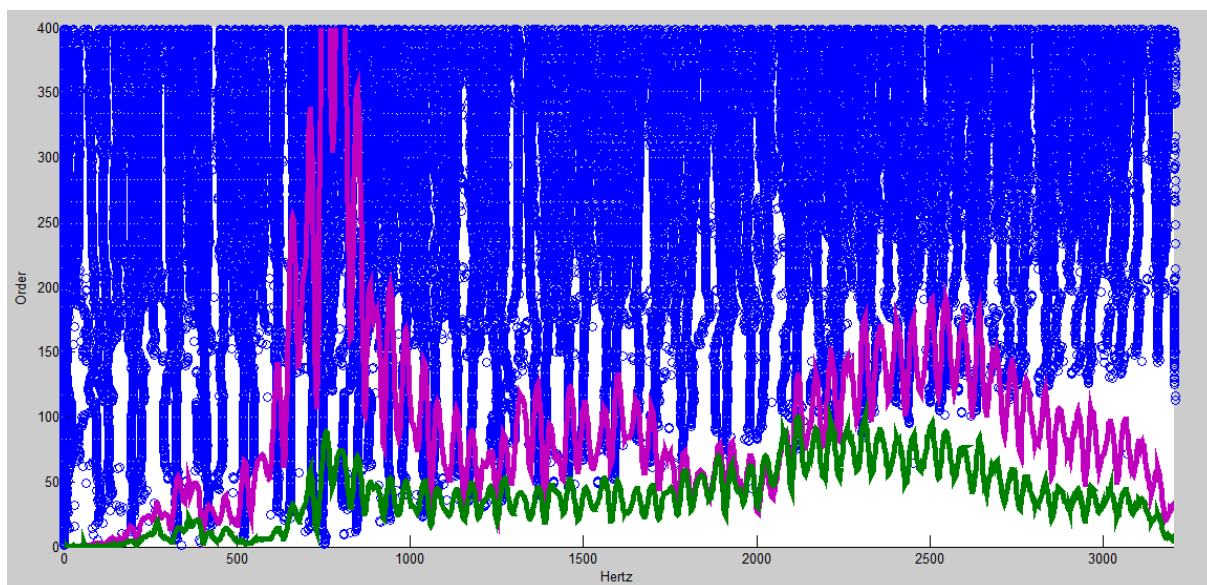
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 78 – Diagrama de estabilização para a fresa Ensaio 3.



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 79 – Diagrama de estabilização com espectro de frequência para a fresa Ensaio 3.



Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 29 – Comparação dos resultados da fresa Ensaio 3.

FRESA			
ENSAIO 3			
MÉTODO FFT	MÉTODO MODAL		
Frequencia natural (Hz) "Picos"	Frequencia natural (Hz) "Picos"	Erro entre os métodos (%)	COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO
	200,2		0,0845
295,9	325,5	9,1	0,0609
369,8	387,2	4,5	0,1207
480,0	416,5	15,2	0,0450
	521,7		0,0333
	662,0		0,0334
728,0	716,6	1,6	0,0183
789,0	846,1	6,7	0,0244
	937,2		0,0184
	980,2		0,0175
	1041,0		0,0110
1311,0	1361,0	3,7	0,0156
1457,0	1458,0	0,1	0,0161
1588,0	1589,0	0,1	0,0139
1909,0	1902,0	0,4	0,0109
2127,0	2116,0	0,5	0,0088
2258,0	2302,0	1,9	0,0061
2367,0	2411,0	1,8	0,0085
2564,0	2506,0	2,3	0,0086
	2735,0		0,0082

Fonte: O Autor, 2019.

4.2 Análise dos resultados e testes práticos

Para o primeiro caso analisado os resultados obtidos na análise estática mostraram que a ferramenta está trabalhando em uma boa condição dinâmica, ou seja, fora da condição crítica, sendo assim não existe vibração em faixa de ressonância para este caso e não há melhoria em dados de corte que possa ser proposta para melhorar a qualidade atual.

Outras hipóteses podem ser analisadas, contudo não é o objetivo deste trabalho.

O segundo caso analisado se trata de um problema de qualidade identificado no cliente final, para esta situação foi realizado uma análise cinco porquês a qual identificou uma falha na usinagem que poderia ser consequência da vibração na ferramenta. Os resultados obtidos comprovaram que a ferramenta está trabalhando em condição crítica (faixa de ressonância), sendo assim foi proposto a aplicação de uma nova rotação para ferramenta (5151 rpm) baseado nos resultados de frequências estáveis (Vales).

O acompanhamento da produção das peças após a modificação comprovou a eficácia da alteração na qualidade das peças usinadas, eliminando 100% das rebarbas e aumentando a vida da ferramenta para 1500 peças.

A Figura 80, apresenta a primeira peça usinada com os parâmetros definidos anteriormente.

Figura 80 – Peça usinada com os novos parâmetros da fresa



Fonte: O Autor, 2019.

A diferença entre o método FFT e SSI-Cov foi pequena se comparado os dados estáticos, contudo o método SSI-Cov apresenta com mais nitidez as frequências críticas quando é aplicado o espectro da frequência o que facilita a análise quando não se tem os dados de entrada, como no ensaio dinâmico do caso 1.

5 CONCLUSÃO

Em linhas de usinagem de produção em massa existem inúmeras oportunidades para melhorias de processo que proporcionem redução de custos. As ferramentas de corte são uma das opções em que se pode atuar e em que os custos geralmente são altos.

Vibrações durante a usinagem são reconhecidamente fenômenos que devem ser evitados por trazerem diversos prejuízos ao processo de usinagem como defeitos de qualidade e baixo desempenho das ferramentas.

A análise dinâmica das ferramentas e o tratamento correto dos dados obtidos permite estabelecer parâmetros de corte com relativa confiabilidade de sucesso no resultado.

Esta análise foi aplicada sobre casos reais na usinagem de blocos e cabeçotes de uma fábrica de motores, em que tentativas anteriores de aplicação de um novo processo de usinagem resultaram em usinagens não conforme devido a marcas de vibração visíveis nas superfícies usinadas.

Foi construída e aplicada uma metodologia de análise para as duas ferramentas de corte do novo processo e, adicionalmente, essa metodologia foi aplicada também à peça a ser manufaturada.

Para o primeiro caso analisado os resultados obtidos na análise estática e dinâmica mostraram que a ferramenta está trabalhando em uma boa condição dinâmica, ou seja, fora da condição crítica, então não existe vibração em faixa de ressonância para este caso e não há melhoria em dados de corte que possa ser proposta para melhorar a qualidade atual. Portanto, não é possível realizar alteração no processo atual de usinagem pois o mandrilamento não atinge as tolerâncias preconizadas no produto.

O segundo caso analisado se trata de um problema de qualidade identificado no cliente final, para esta situação foi realizado uma análise cinco porquês a qual identificou uma falha na usinagem que poderia ser consequência da vibração na ferramenta. Os resultados obtidos comprovaram que a ferramenta está trabalhando em condição crítica (faixa de ressonância), sendo assim foi proposto a aplicação de uma nova rotação para ferramenta (5151 rpm) baseado nos resultados de frequências estáveis (Vales).

O acompanhamento da produção das peças após a modificação comprovou a eficácia da alteração na qualidade das peças usinadas, eliminando 100% das rebarbas e aumentando a vida da ferramenta para 1500 peças.

As dificuldades encontradas no presente trabalho foram definir os parâmetros de aquisição de dados, tempo de máquina para realização dos testes experimentais e tempo de máquina para realização dos testes práticos.

A construção das cartas de estabilidade, descritas no capítulo 2 (item 2.4.6) surge como sugestão para trabalhos futuros, após o amadurecimento da aplicação da metodologia de análise desenvolvida neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BAKIR, P. G. Automation of the stabilization diagrams for subspace based system identification. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 12, p. 14390–14397, 2011.
- BAVASTRI, C. A.; POLLI, Milton Luiz; PRESEZNIAK, F. A.; VENANCIO, Herbert Weigert. **Controle Ótimo de Vibrações Auto-Excitadas em Processos de Usinagem Usando Neutralizadores Dinâmicos Viscoelásticos**. In: USINAGEM 2006, São Paulo, 2006.
- BELLUCO, Willian. Vibrations D'usinage. **Club Outils Coupants**, Cleon, 2003.
- Burke, C. M., et al. "**Machinability of gray cast iron: a drilling study**." American Foundry Society Transactions 107 (1999): 567-75.
- CABRAL, Gustavo Francisco; **Seleção de parâmetros para otimização do processo de usinagem de componentes aeronáuticos em alumínio**. 2006 Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- CAETANO, E. et al. Comparison of stochastic identification methods applied to the natural response of Millau Viaduct. EVACES, **Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures**, n. Figure 1, p. 11, 2007.
- CAMACHO, Cláudio. **Revista O mundo da Usinagem**. São Paulo, v.27, p.3, maio. 2006.
- CHILDS, Thomas; MAEKAWA, Katsuhiko. OBIKAWA; Toshiyuki; YAMANE, Yasuo. **Metal Machining: Theory and Applications**. 1ª Edição. Local: Arnold, 2000.
- DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013. 270 p. ISBN 85-87296-01-9 (broch.).
- ESSEL. **Mandrillamento**. Disponível em: < www.essel.com.br/cursos/material/01/ProcessosFabricacao/66proc.pdf >. Acesso em: 15 mai. 2015.
- FAASSEN, Ronald. Chatter Prediction and Control for High-Speed Milling: Modelling and Experiments. **Library Eindhoven University of Technology**, Holanda, 2007.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, 11ª Ed: São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda v.11,1970.

GONÇALVES, Louis Augusto. **Um estudo sobre a transformada Rápida de Fourier e seu uso em processamento de imagens**. Discertação de mestrado, Discertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004, 1p.

IMANI, B. Moetakef, N.Z.Yussefian. Dynamic simulation of boring process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2009.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de geometria definida – Parte 2** (Traduzido e adaptado por Rolf B. Schroeter e Walter L. Weingaertner), LMP/UFSC, p. 62-125, 2002.

KOPPKA, Frank. **A Contribution to the Maximization of Productivity and Workpiece Quality of the Reaming Process by Analyzing Its Static and Dynamic Behavior**: An Analysis with Focus on Automotive Powertrain Production. Technische Universität Darmstadt, 2009.

KRESS, D. El. **Escariado con altas velocidades**. Stuttgart, 1974. Tese de Doutorado - Universidad de Stuttgart.

LUGSCHEIDER, E.; KNOTEK, O.; BARIMANI, C.; LEVENDECKER, T.; LEMMER, O.; WENKE, R. **Investigations on hard coated reamers in different lubricant free cutting operations**. Surface & Coatings Technology, v 90, n 1-2, p 172-177, Mar. 1997.

MAIA, N. M. M. **Theoretical and Experimental Modal Analysis**. Taunton: Reserch Studies Press, 1997.

PEETERS, B. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering. Tese (Doutorado em Ciências Aplicadas) - **Katholieke Universiteit Leuven. Leuven, Bélgica** 2000.

PEIXOTO, Mariana. **Análise De Estabilidade Dinâmica Do Fresamento De Topo De Placas Considerando O Amortecimento Do Processo**. 2013. p28. Dissertação de mestrado – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville.

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

RODRIGUES, J. Identificação Modal Estocástica Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil. **Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto. Porto, Portugal, p. 1 – 484, 2004.**

Sandvik Coromant, **Technical Editorial dept. Modern Metal Cutting A Practical Handbook**, First edition, 1994, ISBN 91-97 22 99-0-3.

SANTOS, Rodrigo Gonçalves Dos. Avaliação do processo de alargamento de guias de válvulas. **Tese (Dissertação de mestrado) - Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, 2004.**

SCHANKE, S. A. Operational Modal Analysis of Large Bridges. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - **Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Norway, 2015.**

SCHMITZ, T. L.; SMITH, K. S. **Machining Dynamics: Frequency Response to Improved Productivity.** Nova York: Springer, 2008.

SCHROETER, R. B. **Alargamento de precisão em alumínio aeronáutico com ferramentas de gume único regulável.** Discertação de mestrado, Florianópolis, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1989, 113p.

SCHROETER, Rolf Bertrand; WEINGAERTNER, Walter Lindolfo. **Processos de usinagem e ferramentas de corte Nivel I – Parte 2.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte.** 2ª Ed: Santa Catarina. Editora da UFSC, 1989.

TLUSTY, J. **High-Speed Machining**, Annals of the CIRP, v.42, n -2,733-738, 1970.

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

WEINERT, K.; ADAMS F. J.; BIERMANN, D.; THAMKE, D. **Alargadores de corte único: corte mais eficiente, além de vantagens econômicas.** Revista Máquinas e Metais, São Paulo, n 392, p 38-57, jan. 1998.

