CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO *CHATTER* NO FRESAMENTO DE TOPO.

Sandro Pimentel Mirres

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-gradução de Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca-CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientadora:

Profª. Anna Carla Monteiro de Araujo, D. Sc.

Coorientador:

Prof. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, D. Sc.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2013

IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO *CHATTER* NO FRESAMENTO DE TOPO.

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-gradução em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Sandro Pimentel Mirres

Aprovada por:

_____

Presidente, Prof.ª Anna Carla Monteiro de Araujo (orientadora), D.Sc.

_____

Prof. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar (coorientador), D.Sc.

_____

Prof. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, D.Sc.

_____

Prof.ª Maria da Penha Cindra Fonseca, D.Sc.

Rio de Janeiro
Fevereiro – 2013

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M676 Mirres, Sandro Pimentel
Identificação experimental do chatter no fresamento de topo / Sandro Pimentel Mirres.—2013.
xiii, 54f. : il.color. , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2013.
Bibliografia : f.53-54
Orientadora : Anna Carla Monteiro de Araujo
Coorientador : Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

1. Usinagem. 2. Fresas. 3. Vibração. 4. Engenharia mecânica. I. Araujo, Anna Carla Monteiro de (Orient.). II. Aguiar, Ricardo Alexandre Amar de (Coorient.). III. Título.

CDD 671.35

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter estado sempre ao meu lado dando-me força e coragem nos momentos mais difíceis e ajudando-me a realizar este sonho.

À minha orientadora Prof.ª Anna Carla Monteiro de Araujo e meu co-orientador Prof. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar pela valiosa partilha de seus conhecimentos e pelo crescimento profissional que me proporcionaram durante todas as etapas do trabalho.

À minha esposa, familiares e amigos que, direta ou indiretamente, estiveram comigo e contribuíram para o meu bom desempenho durante esta jornada.

A todos, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO *CHATTER* NO FRESAMENTO DE TOPO

Sandro Pimentel Mirres

Orientadora: Anna Carla Monteiro de Araujo, D. Sc.

Coorientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, D.Sc.

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

As vibrações regenerativas ou *chatter* ocorrem durante fresamento, como em outros processos de usinagem, produzindo acabamento superficial de má qualidade, desgaste prematuro da ferramenta e, em determinadas situações, possíveis danos à máquina e à ferramenta. O presente estudo propõe-se a estudar uma situação de ocorrência de *chatter e* identificá-lo através dos sinais aquisitados por dois sensores capacitivos: um paralelo ao eixo do sentido de avanço e o outro, perpendicular ao sentido de avanço. As forças de corte foram medidas por um dinamômetro e relacionadas com o deslocamento medido pelos sensores com o objetivo de caracterizar os sinais na ocorrência de *chatter*. Os resultados confirmaram a ocorrência das vibrações *chatter* em experimentos com profundidades de corte maiores do que 4mm. No entanto, não foi possível, com os dados obtidos, fazer uma relação entre o sinal de identificação do deslocamento e o efeito *chatter*. Outros resultados como a rugosidade, o ruído e a aparência foram mais eficientes para identificar o efeito procurado.

Palavras chave:

Usinagem; Fresamento de topo; Vibrações.

Rio de Janeiro
Fevereiro - 2013

ABSTRACT

EXPERIMENTAL IDENTIFICATION OF CHATTER ON TOP OF MILLING.

Sandro Pimentel Mirres

Adivisors: Anna Carla Monteiro de Araujo, D.Sc.
Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, D.Sc.

Summary Dissertation submitted to the Graduate Program em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, as part of the requirements for obtaining a Master's Degree in Mechanical Engineering and Technology Materials.

Regenerative chatter or vibration can occur during milling and other processes producing poor quality surface finish, premature wear and possible damage to the machine and the tool. The present study aimed to find a situation of occurrence of chatter through two capacitive sensors. Signals one of the sensors was mounted parallel to the axis of forward direction and the other across to the direction of advance. Cutting forces were measured by a dynamometer and related displacement measured by the sensors in order to characterize the occurrence of chatter. The results confirmed the occurrence of chatter in experiments with cutting depths greater than 4mm. However, it was not possible with the data obtained to establish a relationship between the displacement signals and the chatter effect. Other results as roughness, noise and appearance were more efficient to identify the intended effect.

Keywords: machining, end milling, vibrations

Rio de Janeiro
February- 2013

SUMÁRIO

CAPÍTULO I. **Introdução** 1

I.1 Objetivo 2
I.2 Estrutura do Trabalho 3

CAPÍTULO II. **Revisão Bibliográfica** 4

II.1 O Processo de Usinagem de Fresamento de Topo 4
II.2 Parâmetros de Corte no Fresamento de Topo 7
II.3 Forças de Corte no Fresamento de Topo 10
II.3.1 Forças de Corte com Ferramenta Rígida 10
II.3.2 Forças de Corte com Ferramenta Flexível 14

CAPÍTULO III. **Metodologia** 20

III.1 Descrição das Atividades Experimentais 21
III.2 Máquina Ferramenta 23
III.3 Dispositivo Fixador dos Sensores 23
III.4 Grampos de Fixação do Corpo de Prova 24
III.5 Ferramenta Utilizada 25
III.6 Equipamentos de Medição de Força e Deslocamento 26
III.7 Corpos de Prova 27
III.8 Planejamento Experimental 27
III.8.1 Experimentos Iniciais para Definir Parâmetros. 28
III.8.2 Experimentos Principais para Caracterizar Sinais de *Chatter* 28
III.9 Medição da Rugosidade 29

CAPÍTULO IV. **Resultados e Discussões** 31

IV.1 Resultados das Forças de Usinagem 31
IV.2 Resultados de Deslocamento 38
IV.3 Aspecto da Superfície 45
IV.3.1 Experimento Sem a Presença do Efeito Chatter 47
IV.4 Comparação de Resultados e Discussão 50

CAPÍTULO V. **Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros** 52

Referências Bibliográficas 53

Lista de Figuras

Figura II.1: Operação de fresamento (FERRARESI,1970) 5
Figura II.2: Fresamento periférico concordante e dicordante (SANDVIK, 2010) 5
Figura II.3: Fresa de topo cilíndrica (DORMER, 2009) 6
Figura II.4: Vistas frontal e superior do fresamento de topo 8
Figura II.5: Ângulo de posição SANDVIK (2010) 8
Figura II.6: Fresamento de topo 9
Figura II.7: Efeito da força de corte (adaptado de KLINE, 1983) 11
Figura II.8: Direção das forças (adaptado de KLINE, 1983) 12
Figura II.9: Plano de contato e vista superior da fresa (ARAUJO, 1999) 12
Figura II.10: Fases do contato da ferramenta com a peça 13
Figura II.11: Fases do tipo I e do tipo II (ARAUJO, 1999) 13
Figura II.12a: Àrea de corte no fresamento de topo (ALTINTAS e LEE, 1996) 14
Figura II.12b: Decomposição das direções x, y e z (ALTINTAS e LEE, 1996) 14
Figura II.13: Forças no fresamento de topo (ALTINTAS e LEE, (1996) 14
Figura II.14: Modelo dinâmmico da fresa com dois graus de liberdade (ALTINTAS, 2000) 16
Figura III.1: Planejamento das atividades experimentais (adaptado de GUENZA, 2008) 20
Figura III.2: Fresadora ferramenteira e o sistema de aquisição de dados 23
Figura III.3: Montagem dos sensores capacitivos (a) e detalhes do suporte de fixação (b) 24
Figura III.3: Vista superior do suporte (c) e vista lateral do suporte (d) 24
Figura III.4: Grampo de fixação ancorando o corpo de prova 25
Figura III.5: Desenhos esquemáticos da ferramenta (DORMER, 2012) 25
Figura III.6: Fixação do dinamômetro na fresadora 26
Figura III.7: Corpos de prova pré-usinados e registrados 27
Figura III.8: Detalhes da medição da rugosidade dos corpos de provas e rugosímetro portátil. 30
Figura IV.1: Força máxima de usinagem mensurada no teste 11 32
Figura IV.2: Resultados em função da profundidade de corte (a) variação da rugosidade. 33
Figura IV.2: Resultados em função da profundidade de corte (b) variação da força de corte. ... 33
Figura IV.3: Componentes das forças de usinagem no experimento 11. 33

Figura IV.4: Forças experimentais nº1. 34
Figura IV.5: Forças experimentais nº2. 34
Figura IV.6: Forças experimentais nº3. 34
Figura IV.7: Forças experimentais nº4. 35
Figura IV.8: Forças experimentais nº5. 35
Figura IV.9: Forças experimentais nº6. 35
Figura IV.10: Forças experimentais nº7. 35
Figura IV.11: Forças experimentais nº8 36
Figura IV.12: Forças experimentais nº9 36
Figura IV.13: Forças experimentais nº10 36
Figura IV.14: Forças experimentais nº11 36
Figura IV.15: Forças experimentais nº12 37
Figura IV.16: Forças experimentais nº13 37
Figura IV.17: Forças experimentais nº14 37
Figura IV.18: Forças experimentais nº15 37
Figura IV.19: Forças experimentais nº16 38
Figura IV.20: Forças experimentais nº17 38
Figura IV.21: Variação do deslocamento em quatro ciclos 38
Figura IV.22: Deslocamento experimento nº1 39
Figura IV.23: Deslocamento experimento nº2 39
Figura IV.24: Deslocamento experimento nº3 39
Figura IV.25: Deslocamento experimento nº4 40
Figura IV.26: Deslocamento experimento nº5 40
Figura IV.27: Deslocamento experimento nº6 40
Figura IV.28: Deslocamento experimento nº7 40
Figura IV.29: Deslocamento experimento nº8 41
Figura IV.30: Deslocamento experimento nº9 41
Figura IV.31: Deslocamento experimento nº10 41
Figura IV.32: Deslocamento experimento nº11 41

Figura IV.33: Deslocamento experimento nº12 42
Figura IV.34: Deslocamento experimento nº13 42
Figura IV.35: Deslocamento experimento nº14 42
Figura IV.36: Deslocamento experimento nº15 42
Figura IV.37: Deslocamento experimento nº16 43
Figura IV.38: Deslocamento experimento nº17 43
Figura IV.39: Representação do efeito *chatter* em ciclos consecutivos do teste 9 44
Figura IV.40: Relação do Deslocamento com Profundidade 44
Figura IV.41: Textura superficial apresentada no ensaio 1 46
Figura IV.42: Variação do deslocamento nos eixos x e y teste11 46
Figura IV.43: Representação do efeito *chatter* em 4ciclos consecutivos teste11 47
Figura IV.44: Detalhe da superfície produzida no teste 11. 47
Figura IV.45: Variação das forças durante o corte no teste nº 17 48
Figura IV.46: Variação dos deslocamentos durante no teste nº 17 48
Figura IV.47: Ausência do efeito chatter em 4 ciclos consecutivos no teste 17 49
Figura IV.48: Detalhe da superfície produzida no teste nº17 49
Figura IV.49: Variação do diâmetro da trajetória da ferramenta em função da profundidade 50
Figura IV.50: Variação da rugosidade em função da profundidade 50
Figura IV.51: Variação do sinal de deslocamento 51

Lista de Tabelas

Tabela III.1: Parâmetros de corte iniciais adotados na obtenção de efeito chatter..... 28

Tabela III.2: Experimentos realizados no fresamento de topo 29

Tabela IV.1: Fresamento de Topo no Sentido de Corte Concordante..... 32

Tabela IV.2: Deslocamentos máximos da ferramenta na realização dos experimentos..... 43

Lista de Símbolos

a_d: Avanço por dente

a_p : Profundidade de corte

A : Área de corte

d: Diâmetro

e_t: Espessura de penetração

E: Módulo de elasticidade

F: Força de corte

Fc: Força de corte

F_{tj}: Força tangencial

F_{rj}: Força radial

h: Espessura do cavaco

I: Momento de inércia

j: Inteiro

$j\phi_e$: Ângulo de entrada da ferramenta

K : Pressão específica de corte

k_r**:** Pressão específica de corte radial

K_t: Pressão específica de corte tangencial

ky: Coeficiente de rigidez

l: Comprimento

$m\ddot{y}$*:* Massa

n: Rotação por minuto

t: Período de passagem dos dentes

V_c: Velocidade de corte

v_f: Velocidade de avanço

W: Peso de uma massa

X: Amplitude

y: Posição angular

z: Número de dentes

α: Ângulo de folga

γ: Ângulo de saída

δ: Ângulo da ponta da aresta de corte

δ_{st}: Deflexão estática

ϕ_j: Ângulo de fase no i-ésimo modo

ϕ_s: Ângulo da saída da ferramenta

φ: Ângulo de posicionamento da ferramenta

φ_1: Ângulo inicial de contato entre a ferramenta e a peça

φ_2: Ângulo final de contato entre ferramenta e a peça

φ_0: Ângulo de contato entre ferramenta e a peça

λ: Ângulo da hélice da aresta de corte

ψ: Ângulo de rotação da ponta da aresta de corte

CAPÍTULO I. Introdução

O processo de fabricação por usinagem tem um papel importante em toda a produção mundial, onde ele se destaca por ser o processo mais empregado na fabricação de peças. O mercado consumidor tem procurado cada vez mais por um produto melhor elaborado, melhor acabado e com custos mais baixos. Com a globalização, ocorreu um aumento significativo da concorrência comercial entre as empresas que empregam o processo de usinagem para manufaturar seus produtos. Dessa forma, a evolução das máquinas, o uso de tecnologias recentes voltadas para a automação e o aperfeiçoamento de técnicas de usinagem são indispensáveis a um processo de fabricação por usinagem eficiente e competitivo. Dentre os diversos processos de usinagem, o fresamento é considerado um dos mais importantes pela sua produtividade e flexibilidade, como por exemplo, na fabricação de peças automotivas, aeroespaciais, moldes para fundição e fabricação de elementos de máquina de um modo geral.

Ao longo dos anos, busca-se, através de estudos, otimizar os parâmetros de usinagem do fresamento de topo com o objetivo de reduzir a ocorrência de vibrações indesejadas. Um dos maiores problemas encontrados no fresamento de topo são as vibrações regenerativas, conhecidas como *chatter,* que podem ocorrer com o aumento da profundidade de corte e alteram a dinâmica da máquina, ferramenta ou peça de trabalho. As vibrações regenerativas causam acabamento superficial indesejável, maior desgaste e a possibilidade de danos à ferramenta, aos acessórios de fixação e à máquina ferramenta. Em alguns casos a solução empregada é a limitação da taxa de remoção empregando parâmetros de corte conservadores. Várias pesquisas têm sido desenvolvidas para a compreensão dos problemas de vibração regenerativa e para fornecer métodos de estabilização das vibrações no sistema de usinagem. O método mais empregado atualmente é o da otimização das condições de corte pelo diagrama de lóbulos de estabilidade, que relaciona a profundidade de corte com a velocidade do eixo porta ferramentas. Uma abordagem alternativa é aumentar o amortecimento da máquina, ferramenta ou peça de trabalho, para maiores profundidades de corte em condições estáveis de usinagem. Outro método é a utilização de ferramenta com passo e ângulo de hélices variáveis.

Um conjunto de modelos matemáticos foi desenvolvido em pesquisas anteriores KLINE *et al*. (1980) e KLINE *et al*. (1982) para calcular a geometria de contato do raio da ferramenta com a peça, a espessura do cavaco e os ângulos de entrada e saída do fresamento de topo com a ferramenta deslocada. Os modelos de previsão e caracterização das forças de corte com a fresa deslocada ou com desvio foram desenvolvidos em estudos anteriores e mesclados com os presentes modelos matemáticos. Os primeiros modelos apresentam um grupo que assume a existência de uma associação de erros existentes entre a ferramenta, o porta ferramentas e o eixo árvore para a caracterização das forças de corte e um outro grupo que propõe geometrias

e modelos empíricos para as forças de corte, para identificar a excentricidade como um fator importante, mas que geralmente não assumem a existência de excentricidade na formulação do modelo. A espessura do raio do dente é a espessura da área de contato da ferramenta helicoidal com a peça no instante do corte. O deslocamento da ferramenta é o erro dimensional ou desvio da fresa paralelo ao eixo árvore da máquina e excentricidade é qualquer variação de eixo de simetria de uma figura geométrica com relação a um outro eixo tomado como referência AGOSTINHO, RODRIGUES e LIRANI (1977). O *run-out* é um fenômeno que proporciona à ferramenta condições de saltar da superfície de corte gerando variações na espessura do cavaco e das forças de corte. A frequência pode ser alterada pelo surgimento de vibrações regenerativas causadas pela presença do *run-out* na usinagem. Fato esse que pode ser visto na pesquisa de KLINE *et al*.(1983) que previu o *run-out* utilizando um modelo mesclado com outros modelos desenvolvidos anteriormente para a força de corte que previa características, tais como: geometria de corte, espessura do raio do cavaco e os ângulos de entrada e saída da ferramenta para fresamento de topo com a ferramenta deslocada ou excêntrica. Tal estudo mostrou ainda que a excentricidade aumenta a espessura média do cavaco para os dentes que atuam durante o corte e eleva a relação entre a média da força máxima. O *run-out* também muda a frequência do sinal de força de corte da aresta alterando a frequência natural da ferramenta para a frequência de rotação do eixo. A relação da excentricidade com a taxa de alimentação é identificada como um importante parâmetro que determina o efeito da excentricidade sobre o sistema de força de corte.

Segundo HUO e CHENG (2009), o fenômeno *chatter* é um problema de instabilidade no processo de usinagem, caracterizado por excessiva vibração, indesejada, entre a ferramenta e a peça, barulho alto e, consequentemente, uma má qualidade de acabamento superficial.

ALTINTAS *et al*. (2006) apresentou uma teoria para previsão do *chatter* em operação de fresamento de topo em mergulho que pode ser usada para remoção de sobremetal de furos não passantes. Nesse caso, a espessura regenerativa do cavaco é modelada em função dos eixos laterais, vibrações axiais e de torção e da estabilidade do fresamento em mergulho formulando um problema de alto valor de quarta ordem, relacionando à espessura regenerativa do cavaco, as forças de corte e torque, e os modos estruturais da ferramenta.

Neste trabalho procura-se encontrar uma situação em que ocorra o fenômeno *chatter* em operações do fresamento de topo observando suas variáveis de forma que possam ser mensuradas.

I.1 Objetivo

Para caracterizar os sinais de *chatter*, se propõe induzir o surgimento do efeito durante o processo de fresamento de topo observando as variáveis que possam ser mensuradas.

Desta forma foi criado um sistema de medição que proporciona ao experimentalista identificar *chatter* através das características do sinal. Essa condição assume um sistema não-suave, composto por um sistema primário representando a interação da ferramenta (fresa) com o cavaco e outro, secundário, representando a interação do cavaco com a peça usinada, sendo assim necessária a aplicação de tais sensores para determinar os deslocamentos da fresa e de um dinamômetro para determinar as forças de usinagem da peça. Os sinais aquisitados no fresamento de topo são relacionados com o aparecimento de *chatter* procurando reconhecer padrões que identifiquem o surgimento das vibrações autoexcitadas, que poderão ser utilizadas no futuro para controlar o processo e deslocar o processo de corte de uma região instável para uma região de estabilidade.

I.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco partes fundamentais: o capítulo 1 apresenta uma introdução descrevendo o problema e uma breve abordagem sobre o assunto. O capítulo 2 é relacionado às forças de corte no fresamento de topo e as aplicações atuais, que são usadas para embasar os experimentos executados. No capítulo 3 é descrita a metodologia, os materiais e os equipamentos utilizados durante a realização dos experimentos. No capitulo 4 o autor aborda o desenvolvimento das atividades experimentais e os respectivos resultados. As atividades desta parte do trabalho são divididas em duas fases. São utilizados os dados preliminares para a obtenção das condições do surgimento do efeito *chatter* de forma que possam ser aquisitados e desenvolvidos no processo. No capítulo 5 os resultados são avaliados criticamente e comparados com resultados obtidos em outras pesquisas, encerrando com as conclusões e sugestões para continuidade do trabalho.

CAPÍTULO II. Revisão Bibliográfica

Para que se possa entender a dinâmica do corte do fresamento de topo e as vantagens de se controlar o mesmo, é importante definir alguns conceitos teóricos do processo de fabricação por usinagem, especificamente, o fresamento de topo. Entre os exemplos de parâmetros de corte estão: forças de corte, avanço, velocidade de corte e ângulos de entrada e saída da aresta cortante da ferramenta. Os principais temas abordados nesta pesquisa são apresentados a seguir e estão divididos em quatro grupos: O processo de usinagem de fresamento de topo, parâmetros de corte no fresamento de topo, forças de corte com ferramenta rígida e forças de corte com ferramenta flexível.

II.1 O Processo de Usinagem de Fresamento de Topo

O fresamento de topo é um processo de remoção de material utilizado na usinagem de peças constituídas de vários tipos de materiais como, por exemplo: ligas metálicas ferrosas e não ferrosas e polímeros etc, que são utilizadas na indústria de modo geral.

Segundo DINIZ, MARCONDES e COPPINI (2006), o fresamento é um processo no qual obtemos a superfície desejada com o auxílio de ferramentas de múltiplas arestas de corte. O movimento de corte é proporcionado pela rotação da fresa ao redor de seu eixo e o movimento de avanço é realizado pela própria peça. O fresamento é um método de usinagem muito versátil e flexível, podendo usinar quase todos os formatos. O lado negativo desta flexibilidade é que muitas variáveis são incorporadas ao processo, tornando-o um desafio quanto à otimização.

O fresamento é dividido em faceamento, fresamento de cantos a 90 graus, canais e perfis, mas, com o desenvolvimento de máquinas e softwares, o número de métodos cresceu e o tornofresamento, o fresamento de rosca, usinagem em rampa circular e o fresamento trocoidal, entre outros, são muito comuns nas operações atuais. A condição e a estabilidade da máquina afetam a qualidade da superfície e também podem afetar a vida útil da ferramenta. Desgaste excessivo nos rolamentos do fuso ou mecanismo de avanço pode resultar em erros dimensionais e em uma superfície com acabamento insatisfatório.

A ferramenta é fabricada dispondo simetricamente as arestas cortantes em torno do seu eixo. O corte é executado pela rotação da fresa ao redor do seu eixo e o movimento de avanço é feito pela própria peça em usinagem que está fixada na mesa da máquina a qual obriga a peça passar sob a ferramenta em rotação, que lhe confere forma e dimensão desejada, segundo DINIZ, MARCONDES, COPPINI (2006).

No fresamento frontal, os dentes ativos como mostra a Figura II.1 atuam na superfície frontal da ferramenta, cujo eixo é perpendicular à superfície a ser usinada. As ferramentas usadas no fresamento frontal são chamadas de fresas frontal ou de topo.

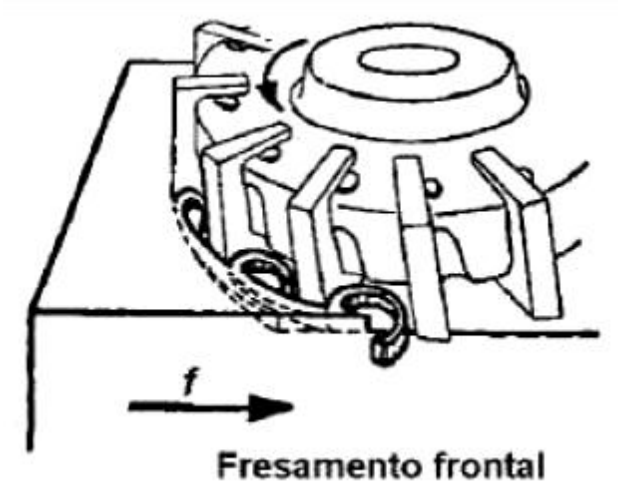


Figura II.1: Operação de fresamento (FERRARESI,1970)

O fresamento pode ser denominado como concordante ou discordante. No fresamento concordante periférico, a espessura dos cavacos diminuirá gradualmente do início do corte, atingindo zero no final do corte. Isto evita o atrito da aresta contra a superfície da peça antes do contato no corte. No fresamento discordante a direção do avanço da ferramenta de corte é oposta à sua rotação. A espessura do cavaco, no início do corte, é mínima, porém aumenta de zero até um valor máximo. O sentido do corte tende a afastar a fresa e a peça para longe uma da outra. A figura II.2 ilustra o corte concordante e discordante.

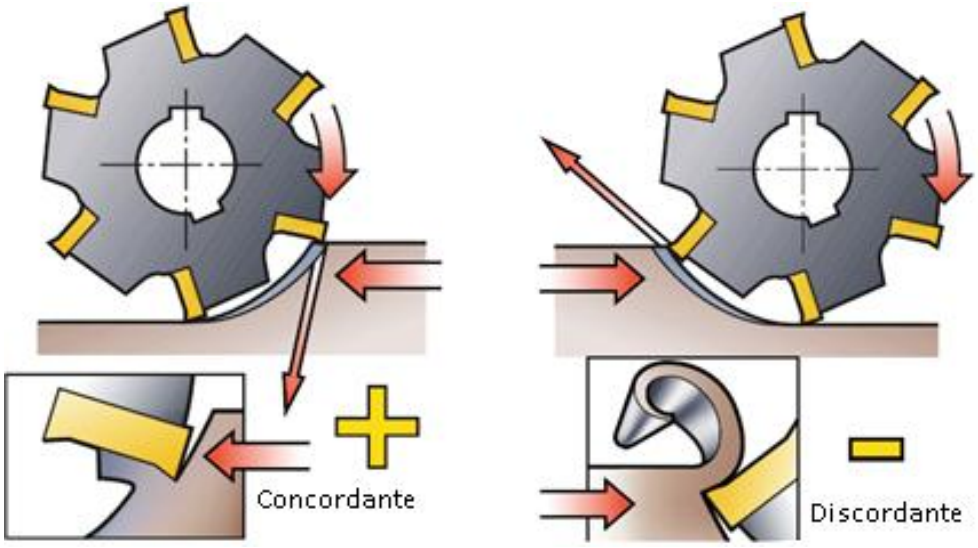


Figura II.2: Fresamento periférico concordante e dicordante (SANDVIK, 2010)

SIMSA, MANNB e HUYANANA, (2008) apresentaram três métodos para prever a estabilidade do *chatter* em fresas de topo com passo de hélice variável sendo: uma formulação de semidiscretização espacial e temporal da ferramenta que considera o caminho circular da ferramenta e o avanço por dente, semidiscretização da força de corte no tempo médio e uma formulação que prevê a estabilidade das ferramentas de passo variável com o ângulo de hélice constante em baixas imersões radiais, aplicando o método de elementos finitos. Dos três métodos apresentados, o último foi o mais eficiente numericamente ao indicar uma região de instabilidade diferente nos lóbulos de estabilidade (gráficos que relacionam profundidade de corte máxima com rpm para um corte estável), mas sua aplicação é limitada a ferramentas de passo variável em baixa imersão radial (variação da largura de corte em relação ao diâmetro da fresa). O método de semidiscretização foi aplicável tanto nas ferramenta com passo variado e ângulo de hélice constante como nas ferramentas de passo constante e ângulo de hélice variado, mas se limita prever a existência de vibrações regenerativas. O método de semidiscretização de tempo médio foi mais rápido para o cálculo, mas as aproximações das forças de corte apresentavam desvios maiores em relação a outros experimentos ou em domínio do tempo.

No fresamento de topo, a fresa gira num eixo vertical com relação à peça de trabalho que pode ser inclinado para usinar superfícies cônicas. As arestas cortantes estão localizadas tanto no topo da fresa quanto na periferia do corpo da fresa, como na Figura II.3.



Figura II.3: Fresa de topo cilíndrica (DORMER, 2009)

A usinagem com uma fresa de topo é uma operação em que, geralmente, a profundidade de corte axial não deve exceder 2/3 do comprimento da aresta de corte para evitar vibrações DINIZ, MARCONDES, COPPINI (2006). Na medida do possível, o fresamento deve ser realizado de maneira que as forças de corte sejam direcionadas aos pontos de apoio do dispositivo de fixação. A resistencia da máquina e o escoamento de cavacos também devem ser considerados quando determinar o melhor método para a operação porque podem afetar a vida útil da ferramenta. A deflexão e as vibrações podem ser fatores de limitação da profundidade de corte, especialmente com altas taxas de remoção e com a ferramenta montada com longo comprimento em balanço. A seleção do passo da fresa depende da estabilidade de todo o sistema, incluindo a máquina-ferramenta, peça e sua fixação, bem como o material da peça. As fresas que possuem passo largo de dentes também são recomendadas

para usinagem de peças montadas na parte superior de dispositivos de fixação tipo cubo, pois o consumo de potencia é geralmente um fator que limita o numero possível de dentes envolvidos no corte. Uma velocidade de corte mais alta geralmente melhora no desempenho e não afeta negativamente a vida útil da ferramenta. A vida útil da ferramenta é sempre mais limitada pela formação de rebarbas ou pelo acabamento superficial na peça, segundo (SANDVIK, 2010).

MADOLIAT *et al*. (2011) propôs um método de controle passivo onde modelou um amortecedor para aumentar o amortecimento que conduz à supressão de vibração de uma fresa de topo delgada. O modelo é composto por um cilindro tubular dividido em partes iguais enquanto um cilindro sólido é montado, e prensado no centro do cilindro tubular. Além disso, a composição do cilindro partido e do núcleo deve ser montada no interior de um furo feito no corpo da ferramenta. Com a interferência de montagem entre as partes principais a força de atrito entre as superfícies aumenta. O efeito da pressão de ajuste deve ser maior que o efeito centrífugo para que a existência do núcleo proporcione atrito superficial adicional, resultando em maior efeito de amortecimento. Foi fabricada uma ferramenta com amortecimento usando materiais viscoelásticos considerando o módulo de elasticidade, a densidade do material e coeficiente de Poisson e empregando o teste de impacto para medição da frequência natural do sistema dos experimentos. Esse ensaio consiste em empregar um acelerômetro instalado radialmente em um dente da fresa e aplicar um impacto no dente oposto por meio de um martelo com transdutor de força. A vibração é transmitida da estrutura para o acelerômetro e os sinais de força e aceleração são transferidos a um analisador digital e posteriormente a um computador que exibi os resultados, após conversão dos sinais (SANTOS, 2011).

II.2 Parâmetros de Corte no Fresamento de Topo

Segundo DINIZ, MARCONDES e COPPINI, (2006), os principais fatores a serem levados em conta na seleção das condições de usinagem no fresamento são:

Profundidade de usinagem a_p (mm)**:** a profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. No tratamento cilíndrico e de faceamento, fresamento frontal, a_p é denominado, profundidade de usinagem. Em relação à geometria da fresa, além do diâmetro, é importante definir os seguintes ângulos:

λ: ângulo da hélice da aresta de corte, γ: ângulo de saída, α: ângulo de folga

A figura II.4 mostra a vista lateral da ferramenta e os parâmetros: profundidade de corte a_p, diâmetro da fresa d e ângulo de hélice, λ.

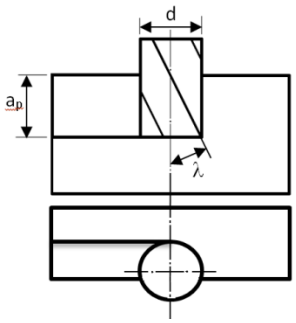


Figura II.4: Vistas frontal e superior do fresamento de topo

Um ângulo de hélice maior garante uma quantidade suficiente de dentes em corte e uma ação de corte suave para usinagem de borda em pequenas profundidades de corte radial. O ângulo de hélice é definido como a inclinação entre a aresta de corte e o plano de referência da ferramenta. O ângulo de inclinação é sempre agudo e seu vértice indica a ponta da ferramenta de corte. O ângulo de saída da ferramenta se localiza entre a superfície de saída e o plano de referência da ferramenta, o ângulo de folga está situado entre a superfície de folga e o plano de corte da ferramenta. Espessura de cavaco, forças de corte e vida útil da ferramenta são todas especialmente afetadas pelo ângulo de posição. O ângulo de posição é definido pelo formato da ferramenta sendo os mais comuns são 90°, 45°, 10°, como pode ser visto na figura II.5 e os eliminados pelas pastilhas redondas, como fresas que usam pastilhas de ponta esférica em profundidades de corte menores. A redução do ângulo de posição, k_r, em arestas retas diminui a espessura dos cavacos, para uma determinada faixa de avanço, a_d. Este efeito de afinamento dos cavacos espalha a quantidade de material sobre uma grande parte da aresta de corte. Ângulos de posição pequenos oferecem uma posição mais gradual no corte, reduzindo a pressão radial e protegendo a aresta de corte. Forças axiais mais altas na diminuição dos ângulos de posição aumentarão a pressão na peça (SANDVIK, 2010). A espessura máxima de cavacos é o parâmetro mais importante para obter um processo de fresamento produtivo e confiável. O corte efetivo somente acontecerá quando ele for mantido a um valor que corresponda corretamente à fresa em uso para a formação da espessura máxima do cavaco. Um cavaco fino com um valor de a_d muito baixo, é a causa mais comum para desempenho insatisfatório, resultando em baixa produtividade. Isto pode afetar negativamente a vida útil da ferramenta e a formação de cavacos. Um valor muito alto sobrecarregará a aresta de corte, o que pode levar a quebra da ferramenta.

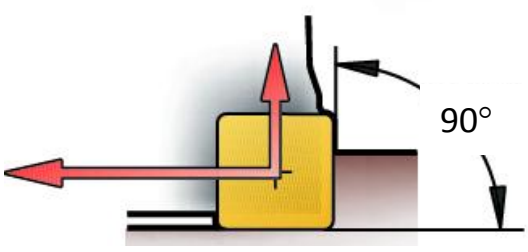


Figura II.5: Ângulo de posição (SANDVIK,2010)

Visando economia, usa-se a maior profundidade possível, pois esta influencia pouco no desgaste da ferramenta e proporciona maior remoção de cavaco. Assim, em fresas frontais, deve-se utilizar ao máximo o comprimento das arestas como já citado anteriormente para aresta de pastilha em fresas de inserto e em fresa inteiriça a 1/3 o comprimento total da ferramenta para evitar vibrações.

Espessura de penetração e_t (mm): é a penetração da ferramenta medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço.

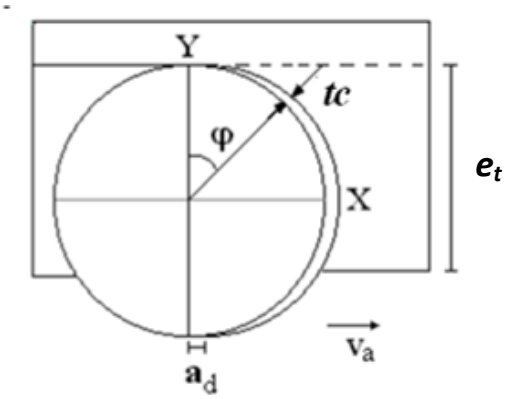


Figura II.6: Fresamento de topo

O avanço por dente, a_d (mm/rot), é o movimento entre a ferramenta e a peça que, juntamente com o movimento de corte, possibilita uma remoção contínua do cavaco, durante várias rotações ou cursos da ferramenta. Para a escolha do avanço em uma operação de fresamento, deve-se levar em consideração: o tipo da fresa, material da ferramenta, acabamento, potência da máquina e etc. O avanço não é diretamente proporcional à potência consumida.

A velocidade de avanço, v_a (mm/min), é a velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço. Na fresadora, uma alteração da velocidade de corte significa uma mudança do avanço por dente, se a velocidade de avanço for constante. Assim, uma alteração de rotação da fresa visando mudar a velocidade de corte vai ocasionar uma alteração do avanço por dente, exceto no caso em que a velocidade de avanço for alterada na mesma proporção, já que v_a pode ser calculada em função do número de dentes da fresa z e da velocidade de rotação da fresa n:

$$v_a = a_d . z . n \qquad \text{(II.1)}$$

A velocidade de corte, V_c (m/min), é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, para as operações de fresamento, onde os movimentos de corte e avanço ocorrem concomitantemente. É calculada por:

$$V_c = \frac{(\pi \,.\, d \,.\, n)}{1000} \qquad \text{(II.2)}$$

Segundo ARAUJO (1999), a análise matemática detalhada da geometria do cavaco no processo de fresamento possibilita os cálculos do carregamento no cavaco.

A expressão para o cálculo da espessura do cavaco indeformado t_c, a cada ponto da aresta de corte em função da posição angular (φ) do ponto e do avanço por dente no modelo rígido para cálculo de forças de usinagem foi apresentada por Martellotti (eq. II.3).

$$t_c = a_d . sen(\varphi) \qquad \text{(II.3)}$$

II.3 Forças de Corte no Fresamento de Topo

Conhecer o comportamento e a ordem de grandeza das forças de corte no processo de fresamento é de fundamental importância, pois essas influenciam na potência necessária para o corte (sendo utilizada para o dimensionamento da máquina-ferramenta). A capacidade de obtenção de tolerância precisa, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta, considerando diferentes cargas e velocidades de trabalho podem em determinadas condições de corte provocar vibrações autoexcitadas. Os dados de forças que atuam durante um processo de usinagem podem ser medidos através do uso de equipamentos específicos de medição, tais como dinamômetros ou torquímetros. As medidas das forças encontradas em um processo de usinagem podem ser divididas em medidas estáticas, que são as médias das forças atuantes em um determinado processo, ou medidas dinâmicas, que são as medidas das variações das forças de corte atuantes durante um processo (FERRARESI, 1970).

II.3.1 Forças de Corte com Ferramenta Rígida

No fresamento de topo, a força de corte apresenta uma oscilação característica devido à variação da espessura do cavaco com a rotação e, dependendo da geometria da ferramenta, ao longo da aresta de corte. Nas operações de usinagem onde há interrupções no corte e variações na espessura de corte, como no fresamento, o comportamento variável dos esforços mecânicos deve ser analisado para prever o comportamento mecânico da ferramenta e, consequentemente, o acabamento da peça, a vida útil e o desgaste das ferramentas (ARAUJO, 2001). ALTINTAS *et al*. (2006) apresentou uma teoria para previsão de vibrações autoexcitadas em operações de fresamento de topo em mergulho (*Plunge Milling*). Que são empregadas na obtenção de cavidades de moldes de fundição e peças para indústria aeroespacial, fabricadas de material de difícil usinabilidade. Também determinou os modos de vibração que contribuem

para o surgimento do *chatter* realizando ensaios de impacto citado anteriormente para aferir o modo de vibração da estrutura. O *chatter* foi identificado durante a usinagem resultando em uma superfície áspera sempre que um ruído intenso se apresentava e a frequência desse não correspondia à frequência de passagem dos dentes da fresa, mas se aproximava a uma das frequências naturais de vibração. Vibrações torcionais, causadas por excesso de cavaco entre os dentes da ferramenta, resultam em desvios laterais que modificam a espessura do cavaco, tornando-se fonte de *chatter*. A figura II.7 ilustra uma representação tridimensional da extremidade da ferramenta em uma operação de fresamento de topo.

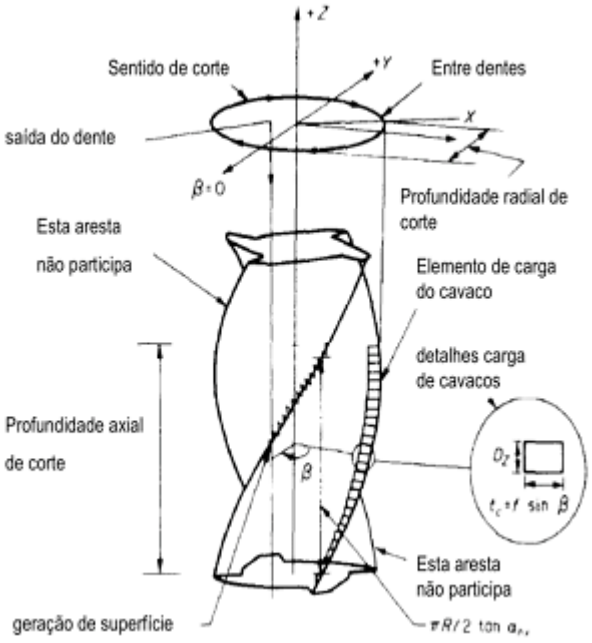


Figura II.7: Efeito da força de corte (adaptado de KLINE, 1983)

Segundo ARAUJO (1999), o fresamento de topo pode ser observado em dois momentos distintos. No primeiro momento, a ferramenta inicia o corte e a espessura de penetração varia com o avanço por dente, logo a força média tende a aumentar a cada avanço. No outro momento apresenta penetração constante e a força é, portanto, periódica.

.A figura II.8 mostra a ferramenta representada pelas arestas de corte em uma projeção dos vetores de força tangencial e radial, representada pela sua circunferência e a vista lateral do contato peça-ferramenta desenvolvida em um plano.

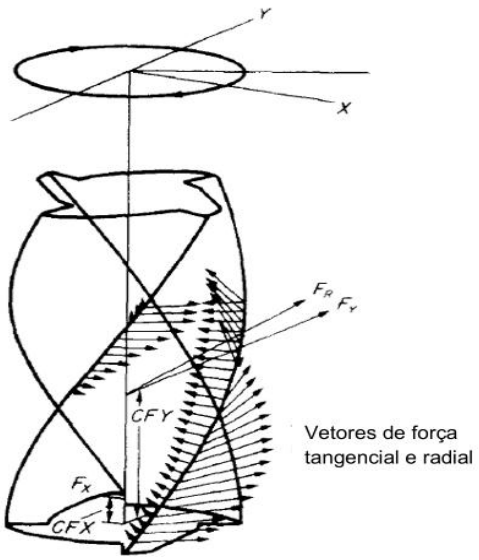


Figura II.8: Direção das forças (adaptado de KLINE, 1983)

Os ângulos que representam as fases do corte em cada instante possibilitando conhecer a periodicidade da variação das forças são relacionados a seguir.

- φ_1: ângulo inicial de contato entre a ferramenta e a peça em relação ao eixo *Y*
- φ_2: ângulo final de contato entre ferramenta e a peça em relação eixo *Y*
- φ_0: ângulo de contato entre ferramenta e a peça em relação eixo *Y*
- ψ: ângulo de rotação da ponta da aresta de corte em relação ao eixo *Y* no plano *XY*
- δ: é a diferença entre o ângulo da ponta da aresta de corte e do ponto mais acima da aresta cortante em contato com a peça

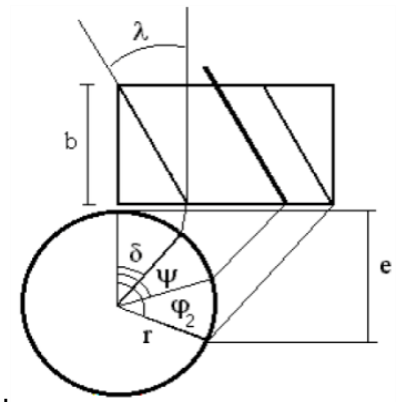


Figura II.9: Plano de contato e vista superior da fresa (ARAUJO, 1999)

Conforme ARAUJO (1999), cada aresta de corte passa no contato com a peça de φ_1 até φ_2, por três fases (Figura II.10):

Fase A: A ferramenta está entrando na peça e a cada rotação $d\varphi$ aumenta o tamanho da lâmina que corta a peça.

Fase B: O tamanho da aresta de corte ativa é constante.

Fase C: A ferramenta está deixando a peça e a aresta ativa diminui.

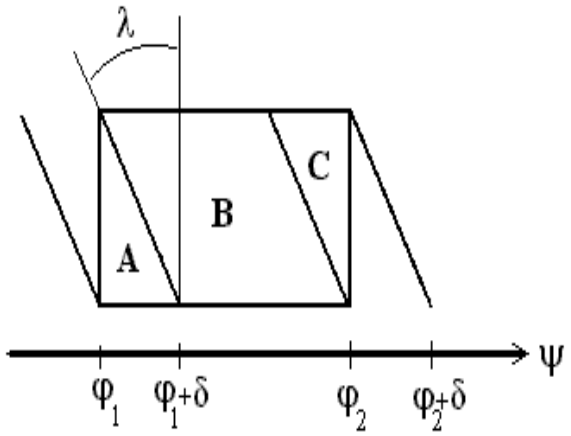


Figura II.10: Fases do contato da ferramenta com a peça (ARAUJO, 1999).

Dependendo da relação entre o ângulo de contato φ_0 e o ângulo δ, a geometria da superfície de corte desenvolvida a um plano pode ser classificado por, Tipo I, se φ_0 é maior que δ e Tipo II, no caso contrário (figura II.11).

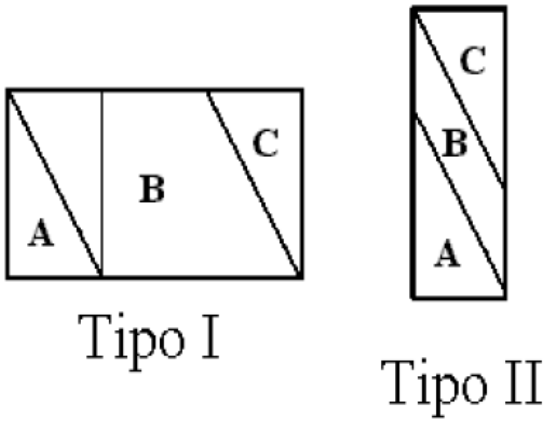


Figura II.11: Fases do tipo I e do tipo II (ARAUJO, 1999)

Assim, para calcular a força total na aresta ativa deve-se conhecer os limites de integração de ψ e φ de cada fase e em cada um dos tipos citados na figura II.11.

As forças de corte no fresamento de topo podem ser descritas em função da espessura do cavaco e da profundidade de corte como:

$$dF = K.dA = K.t_c.da_p \qquad \text{(II.4)}$$

Somando-se todas as áreas (de 1 até N) e integrando em todo o tempo de passada de cada aresta, a força total é descrita na equação II.5:

$$F = \frac{\sum dA}{\int K.t.db} \qquad \text{(II.5)}$$

Segundo ARAUJO e SILVEIRA (2001), pode-se analisar o comportamento das pressões específicas de corte com os dados de força do corte experimental. O procedimento para estimar as forças específicas de corte, a partir de dados, é desenvolvido usando a abordagem da função de aproximação, incluindo a parcela da borda no modelo de força. O método é validado recalculando a força de corte e comparando com o experimento publicado por ALTINTAS e LEE (1996). A contribuição da margem de força é importante para o modelo, mas não há variações visuais no tempo para elas. A diferença de resultados com e sem as margens de forças pode ser observada nas figuras 12a, 12b e 13. Com os sinais aquisitados e devidamente caracterizados pode-se comparar o comportamento das forças de corte em ralação às condições de estabilidade e instabilidade.

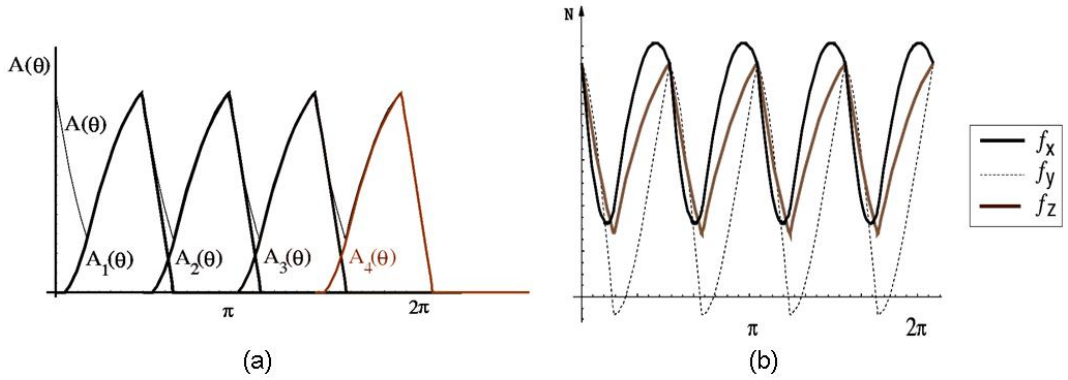


Figura II.12: 12(a) Área de corte no fresamento de topo e 12(b) Decomposição das direções x, y e z (ALTINTAS e LEE, 1996).

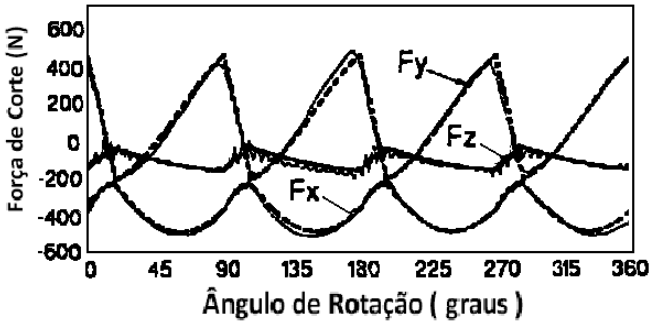


Figura II.13: Forças no fresamento de topo (ALTINTAS e LEE, 1996)

II.3.2 Forças de Corte com Ferramenta Flexível

A ferramenta pode ser considerada flexível e a força varia ao longo do corte alterando o formato do cavaco. Com isso, produzem-se vibrações regenerativas que atuam sobre o

sistema máquina-ferramenta. Para compreender este mecanismo, é necessário admitir que a variação dinâmica das forças de corte depende da espessura do cavaco que, por sua vez, é uma função do deslocamento de fase entre a superfície interior e exterior do cavaco. Essas forças aumentam e alcançam níveis elevados onde o sistema torna-se instável e permite saltos da ferramenta para fora da superfície de corte. Essa vibração pode ser controlada ou ela pode crescer e autorregenerar (ter *chatter*).

Quando uma aresta passa e a ferramenta está vibrando, sua posição é alterada efetuando corte de espessura variada. A próxima aresta é afetada pela posição do tempo de quando a aresta anterior passou isto é *t* - T, onde T é o tempo de passagem entre uma aresta e a próxima.

Segundo BUDAK *et. al*.(2012), uma metodologia pode ser empregada para prever a dinâmica do processo na peça de trabalho em operações de fresamento de topo, a qual é baseada numa modificação estrutural dinâmica usando o modelo de elementos finitos da peça de trabalho para suprimir a dinâmica da peça que afeta a estabilidade na usinagem de peças flexíveis. No entanto, incluí-la na análise da peça de trabalho é complexo, uma vez que a dinâmica muda continuamente devido à remoção de material e a variação do contato de corte.

Conforme QUINTANA *et al* (2011), classifica-se o *chatter* em duas categorias: primária e secundária. *Chatter* primário pode ser causado pelo processo de corte propriamente dito (isto é, pelo atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho, por efeitos termo-mecânicos sobre a formação do cavaco, ou pelo modo de acoplamento). O *chatter* secundário pode ser causado pela regeneração de ondulações da superfície da peça. O efeito regenerativo é a causa mais importante do *chatter*. Por essa razão, tornou-se usual e foi seguido por uma série de publicações sobre o assunto que se refere ao fenômeno apenas como *chatter* regenerativo. No entanto, menciona também ser possível fazer distinção entre *chatter* por atrito, termo-mecânico, vibração de modo de acoplamento e *chatter* regenerativo dependendo da autoexcitação do mecanismo fazendo com que haja vibração. O *chatter* proveniente do atrito surge no corte quando a face da ferramenta excita vibrações na direção da força de corte F_c e nos limites da direção da força axial F_T. O *chatter,* por efeito termo-mecânico, ocorre devido à temperatura e à velocidade de deformação na zona de deformação plástica. *Chatter,* por modo de acoplamento, existe se a vibração na direção da força de impulso gerar vibrações no corte e vice-versa. Isso resulta em vibrações simultâneas do corte e empuxo direcional das forças. Fisicamente é causado por várias fontes, tais como: atrito na superfície de inclinação, variação na espessura do cavaco, oscilação do ângulo de cisalhamento e efeito de regeneração. *Chatter* regenerativo é a forma mais comum de autoexcitação de vibrações. Pode ocorrer muitas vezes porque a maioria das operações de corte dos materiais são cortes sobrepostos, que podem ser uma fonte de ampliação de vibração. As vibrações que surgem na ferramenta deixam ondulações na superfície usinada, quando o dente seguinte da fresa ataca esta superfície

ondulada gerando uma nova superfície ondulada. A espessura do cavaco é alterada e, portanto, a força sobre a ferramenta de corte varia devido à diferença de fases entre a onda deixada pelo dente anterior (a superfície é transformada por irregularidades após a revolução anterior) e a onda deixada pelo dente atual. Esse fenômeno pode amplificar as vibrações, tornando-se dominantes e dão origem ao *chatter*. Se a diferença de fases relativa é zero, a espessura dinâmica do cavaco também é zero. Se a fase relativa for igual a π, a variação da espessura dinâmica do cavaco é máxima (QUINTANA *et al,* 2011).

ALTINTAS (2000) modelou o *chatter* como um sistema dinâmico com dois graus de liberdade e considerou a fresa com z dentes e ângulo de hélice igual a zero onde são medidas as forças na direção de avanço X e na direção normal Y. A Figura II.14 mostra ação de cada aresta cortante em uma operação de fresamento produzindo assim uma espessura de cavaco variada

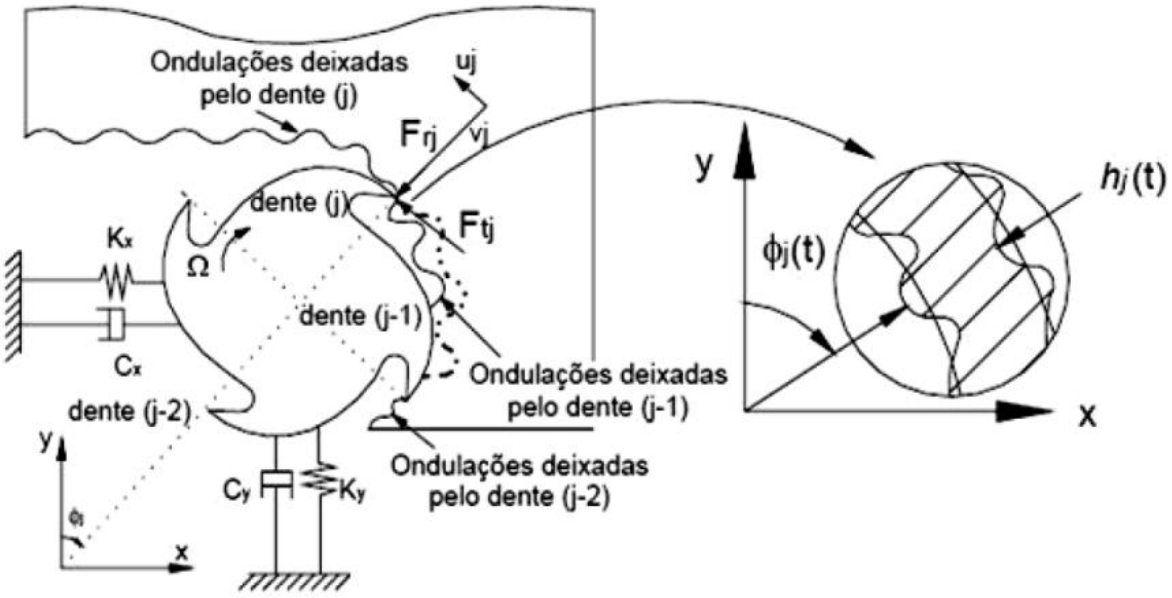


Figura II.14: Modelo dinâmico da fresa com dois graus de liberdade (ALTINTAS, 2000)

As forças de corte excitam a estrutura nas direções de avanço (x) e transversal (y), causando deslocamentos nos eixos x e y respectivamente. A posição do dente j é a função v_j (equação II.6) dependente da posição angular instantânea ϕ_j.

$$v_j = \left(-x\,.\,sin\phi_j - y\,.\,cos\phi_j\right) \tag{II.6}$$

A espessura resultante do cavaco t_c (ϕ_j) consiste em uma parte estática considerando a fresa como corpo rígido ($a_d\,.sin\phi_j$) e uma componente dinâmica oriunda das vibrações da ferramenta (BUDAK, 1995)

$$h(\phi_j) = \left(a_d \,.\, sin\phi_j + (v_{j,0} - v_j)\right) . g(\phi_j) \quad \text{(II.7)}$$

Onde a_d é o avanço por dente e $(v_{j,0} - v_j)$ são os deslocamentos dinâmicos na passagem do dente anterior e o atual, respectivamente, a função pulso $g(\phi_j)$ determina se há ou não contato do dente da ferramenta com a peça, sendo:

$$g(\phi_j) = 1 \leftarrow \phi_e < \phi_j < \phi_s$$
$$g(\phi_j) = 0 \leftarrow \phi_j < \phi_e \, ou \, \phi_j > \phi_s \quad \text{(II.8)}$$

Onde, $\phi_e \, e \, \phi_s$ são os ângulos de entrada e saída da ferramenta, respectivamente, o avanço por dente é excluído das expressões por não contribuir no mecanismo de formação dinâmica do cavaco ALTINTAS (2000). Substituindo v_j em II.7 temos,

$$h(\phi_j) = \left(\Delta_x \,.\, sin\phi_j + \Delta_y \,.\, cos\phi_j\right) . g(\phi_j) \quad \text{(II.9)}$$

onde $\Delta_x = x - x_0$ e $\Delta_y = y - y_0$, representando a diferença de deslocamento dinâmico da aresta da fresa entre dois instantes consecutivos. As forças tangencial (F_{tj}) e radial (F_{rj}) atuantes no dente j são proporcionais à profundidade axial de corte (a_p) e a espessura do cavaco (h) (BUDAK, 1995),

$$F_{tj} = K_t \,.\, a_p \,.\, h(\phi_j) \quad \text{(II.10)}$$

$$F_{rj} = K_r \,.\, F_{tj} \quad \text{(II.11)}$$

onde K_t é a pressão especifica de corte em N/mm^2.

A contribuição das forças nas direções x e y são dadas por:

$$F_x = \sum_{j=0}^{N-1} \left(-F_{tj} cos\phi_j - F_{rj} sen\phi_j\right) \quad \text{(II.12)}$$

$$F_y = \sum_{j=0}^{N-1} \left(-F_{tj} sen\phi_j - F_{rj} cos\phi_j\right) \quad \text{(II.13)}$$

Embora o modelo tenha dois graus de liberdade o sistema mecânico e estrutural pode ser idealizado como sistema com um grau de liberdade para efeito de simples análise.

A equação geral do sistema de massa mola e amortecedor forçado pode ser escrita por (RAO, 2008):

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = Fc \tag{II.14}$$

onde *y* é a posição da fresa, *k* a rigidez da fresa e *c* o amortecimento da fresa. Pode-se supor que a rigidez *k* da fresa é igual a de uma viga em balanço. A deflexão estática da viga na extremidade livre é dada por:

$$\delta_{st} = \frac{W \,.\, l^3}{3 \,.\, E \,.\, I} \tag{II. 15}$$

onde $W = m \,.\, g$ é o peso relacionado à massa *m*. *E* é o módulo de Young do material da fresa e *I* é o de momento de inércia da seção transversal da fresa. Como consequência, a constante k de rigidez da equação (8) é dada por:

$$k = \frac{W}{\delta_{st}} = \frac{3 \,.\, E \,.\, I}{l^3} \tag{II.16}$$

O amortecimento é considerado como o amortecimento do material.

A força F_c neste caso é escrita em função da posição $y(t)$, pois afeta o valor de t_c que neste caso varia com o tempo.

$$F_c(t) = K \,.\, t_c\big(y(t)\big) \,.\, db \tag{II.17}$$

As forças de corte podem ser obtidas tanto pelo sistema que adota um grau de liberdade quanto como o que emprega dois graus de liberdade, pois as forças de avanço são dependentes da constante especifica de corte, da largura de corte e da espessura do cavaco. Como a espessura do cavaco varia em função do tempo, a força irá oscilar. A cada variação do eixo-árvore a variação será maior, ou menor, devido à diferença de fase entre a frequência de rotação e a frequência de ressonância da ferramenta, possibilitando perda de contato entre a ferramenta e a peça, o que produzirá espessura de cavaco nula e forças de avanço igual a zero. Esta é a principal diferença entre o modelo que considera a ferramenta rígida e a flexível. Neste modelo é possível estudar o *chatter* no sistema ortogonal com dois graus de liberdade as

forças de corte excitam a estrutura das direções (X) e normal (Y), causando deslocamentos nos eixos x e y respectivamente. Para se obter maior confiabilidade nos resultados o sistema com dois graus de liberdade é o mais indicado para a fresamento de topo, visto que o mesmo considera a resultante dos deslocamentos em função do tempo em duas direções.

CAPÍTULO III. Metodologia

Para estudo do processo de fresamento de topo utilizando máquinas convencionais, trabalhando em regime de velocidade máxima, foram elaborados experimentos conforme o fluxograma apresentado na Figura III.1.

Todos os materiais, equipamentos e procedimentos experimentais adotados para obtenção dos sinais de deslocamento e das forças de corte são descritos a seguir. Este capítulo encontra-se dividido em materiais e métodos, dispositivo fixador dos sensores, grampo de fixação do corpo de prova, ferramenta utilizada, equipamentos, corpos de prova, planejamento experimental e medição de rugosidade.

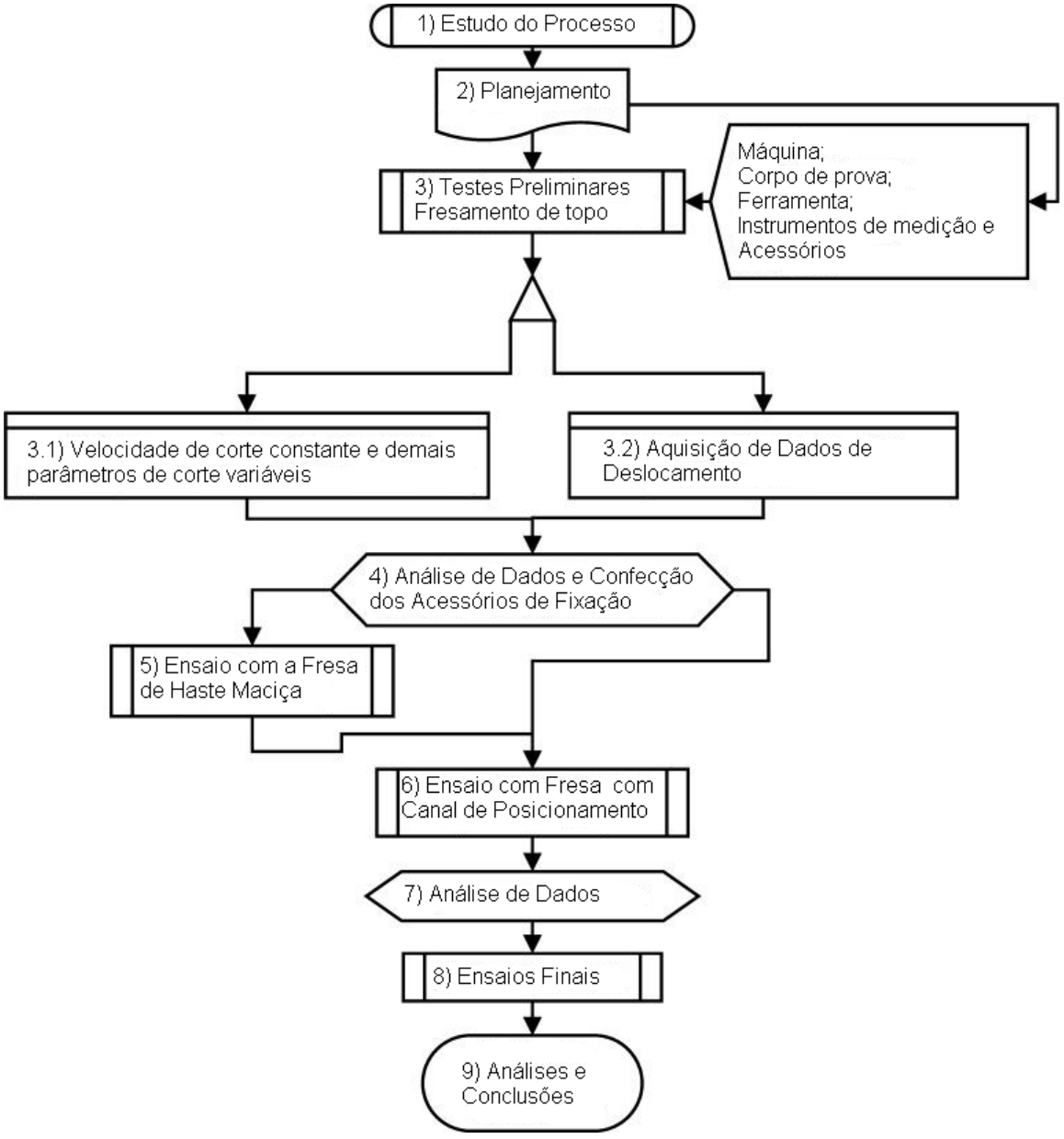


Figura III.1: Planejamento das atividades experimentais (adaptado de GUENZA**, 2008)**

Os experimentos foram desenvolvidos com objetivo de estudar o processo de fresamento convencional em operações de fresamento de topo, conforme descrito no capítulo I. As atividades experimentais foram realizadas conforme apresentado no fluxograma. Para execução dos ensaios principais (6), foi necessário estudo prévio da capacidade do equipamento nos ensaios com faceamento (3) e da resistência do material de corte quando aplicado em fresamento topo (5). A partir dessas observações, foi possível a construção do suporte de fixação dos sensores e do conjunto de fixação do corpo de prova. Os dados obtidos nos experimentos foram, então, analisados (7) para determinar as condições mais favoráveis de usinagem para o surgimento do efeito *chatter*. Após a análise, foram conduzidos ensaios finais (8) para comprovação dos resultados, gerando a base para fundamentar a análise e conclusões finais.

III.1 Descrição das Atividades Experimentais

Como início das atividades foi feito um estudo detalhado das condições necessárias ao emprego da velocidade máxima de corte no fresamento (1), nesta fase foi feito o levantamento do ferramental necessário, das operações de corte a serem ensaiadas, dos materiais e dos equipamentos disponíveis no Laboratório de Pesquisa em Usinagem do CEFET/RJ (LABUS), local onde foram executados os ensaios.

Após a análise preliminar do problema e levantamento dos recursos disponíveis, foi realizado o planejamento para realização dos experimentos (2). Durante a fase de planejamento, foi constatada a necessidade de realização de experimentos iniciais, que não envolvessem grandes investimentos para o reconhecimento das condições de corte, visto que se dispunha apenas de um tipo de ferramenta e devido ao fato do material necessário para o experimento já ter sido adquirido anteriormente. Portanto, optou-se pelo uso dos recursos disponíveis no laboratório. Na execução dos experimentos com fresamento de topo, foram realizados os testes preliminares utilizando operação de faceamento partindo dos estudos de iniciação científica que serviram de base para o atual, além de empregar o dispositivo de fixação dos sensores versão um para aquisição dos dados de deslocamento (3).

Um novo dispositivo de fixação que apresentasse maior rigidez, correto posicionamento dos sensores e praticidade de montagem foi projetado para localizar os sensores capacitivos destinados à medição de deslocamento. Confeccionou-se também outro dispositivo para fixar os corpos de prova ao dinamômetro para impor estabilidade ao material de corte nas condições mais severas, impostas pelo corte tangencial (4). Ao final, foi necessária a execução dos ensaios principais e dos ensaios para avaliação das melhores condições de usinagem no processo em estudo (etapas 6 e 8).

Nos ensaios preliminares (3), foram coletados dados de deslocamento da ferramenta e a rugosidade da superfície usinada com a finalidade de verificar as condições de trabalho e confirmar no processo de corte o surgimento do efeito *chatter*. Os experimentos de corte foram efetuados nos sentidos de corte concordante e discordante sem adição de fluido refrigerante. Nessas condições a usinagem efetuada no sentido discordante apresentou empastamento do material (cavaco) que permanecia na região do corte sobre a superfície fresada mascarando os resultados. Como solução para tal, empregou-se fluido refrigerante com objetivo de remover o excesso dos resíduos obtendo qualidade de superfície sem o efeito de empastamento possibilitando o corte no sentido discordante. As medições de deslocamento foram aquisitadas pelo equipamento de maneira que possibilitasse a descrição dos sinais da ferramenta durante o corte. A rugosidade foi avaliada, visto que na operação de usinagem em estudo o objetivo era obter uma superfície de material o mais áspera possível e não a obtenção de acabamento. Os recursos utilizados são detalhadamente apresentados nas seções que se sucedem.

Para conclusão dos experimentos, empregou-se uma ferramenta nova. Esses experimentos se dividiram em duas fases: a primeira utilizou fluido refrigerante com o objetivo de remover o excesso de cavacos da região do corte que possibilitou uma qualidade superficial isenta de empastamento do material remanescente do corte quando se empregou o sentido de corte discordante, porém, em uma análise minuciosa, constatou-se que o fluido influenciou no sistema de aquisição de dados de deslocamento. A segunda fase foi efetuada com sentido de corte concordante sem adição de fluido refrigerante proporcionando o efeito desejado caracterizado por uma superfície áspera, ruído acentuado indicativo de *chatter* sem influências externas no sistema de aquisição.

Como nos ensaios principais (6 e 8), o tempo de execução já havia sido determinado, como também as condições de usinagem proporcionando o efeito desejado. Empregou-se para obter os dados de aquisição de forças, o dinamômetro que será apresentado na seção seguinte. Na fase dos ensaios com a ferramenta de haste com canal de posicionamento foram efetuados testes de medição com a finalidade de gerar e gravar os dados de aquisição do sistema que está plugado à placa mãe do desktop munido do software.

Durante os experimentos principais (6), foi realizada a medição dos deslocamentos e das forças em condições reais de funcionamento da máquina. Os experimentos foram planejados usando uma forma de execução aleatória, de maneira a evitar o mascaramento dos resultados. Foi aplicada a análise de variância para verificar a coerência dos resultados e, ao final, foram realizados os ensaios para confirmação dos mesmos (8). O objetivo dessas etapas (6 e 8) foi observar, através do acompanhamento, a órbita da ferramenta, das forças de corte, deslocamento da ferramenta nas coordenadas (x e y) e da rugosidade superficial obtida durante os experimentos. Os ensaios foram realizados em fresamento de topo com corte concordante. Essa condição favorece a preservação da ferramenta à medida que a direção e

sentido dos vetores velocidade de corte e de avanço coincidem na tangente à penetração de trabalho, fazendo com que a espessura do cavaco seja máxima na entrada da ferramenta e, mínima, na saída.

III.2 Máquina Ferramenta

Os ensaios para aquisição dos dados de deslocamento e das forças de usinagem, durante o fresamento de topo, foram realizados no LABUS (Laboratório de Pesquisa em Usinagem - PPEMM).

Os ensaios de usinagem foram conduzidos em uma fresadora ferramenteira de usinagem convencional, marca NARDINI Diplomat 3001, modelo FVF-2000, com rotação máxima de 4300 rpm, potência de 3,1 kW, voltagem e frequência de funcionamento 220V 60Hz e avanço rápido máximo de 1,03 m/min.

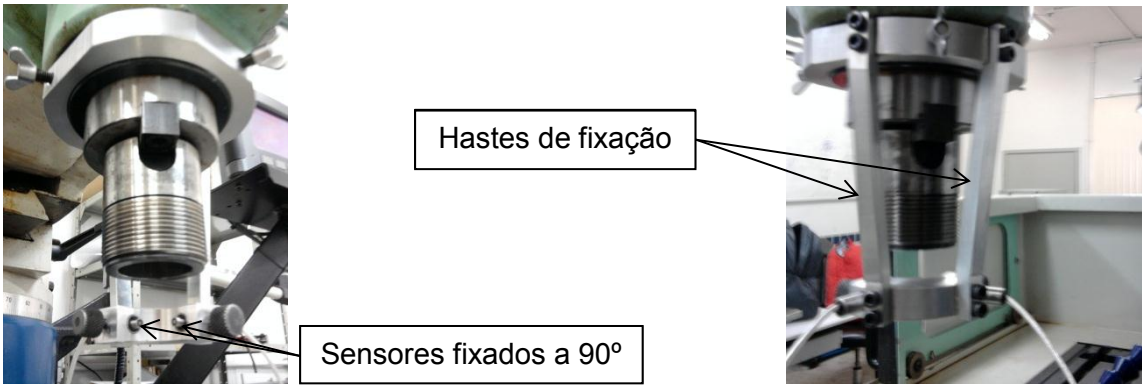


Figura III.2: Fresadora ferramenteira e o sistema de aquisição de dados

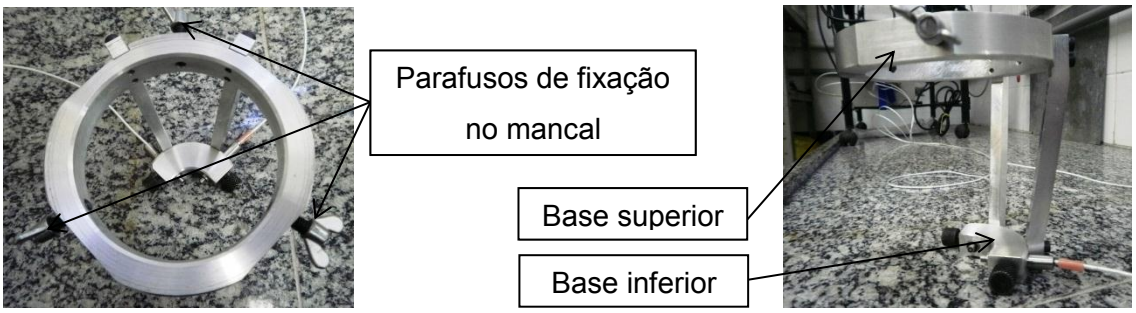
III.3 Dispositivo Fixador dos Sensores

A medição de deslocamento da ferramenta exigia que a mesma fosse efetuada em dois eixos perpendiculares de forma que a interseção dos eixos coincidisse com o centro da

ferramenta e o plano dos sensores estivesse perpendicular ao eixo da ferramenta. Foi projetado um dispositivo que é ilustrado na figura III.3 que não interferisse nos sinais de aquisição e que fosse rígido o suficiente para não induzir vibrações nos sensores. O dispositivo é composto dos seguintes elementos: base superior para fixação na máquina, três parafusos M6 com cabeça borboleta, duas hastes de prolongamento da base inferior a superior, oito parafusos Allen com cabeça M4, base inferior com receptáculos para os sensores e dois parafusos M4 com cabeça recartilhada.



a) Posicionamento dos sensores b) Montagem do suporte no eixo árvore



c) Vista superior do suporte. d) Vista lateral do suporte

Figura III.3: Montagem dos sensores capacitivos (a) e detalhes do suporte de fixação (b)

III.4 Grampos de Fixação do Corpo de Prova

A medição de forças pelo sistema de aquisição exigiu que a fixação do corpo de prova não introduzisse vibrações adicionais, além de permitir uma montagem de comprimento máximo em balanço do corpo de prova. Diante da necessidade, confeccionou-se um conjunto que atendesse às condições de forma que não interferisse nos sinais de aquisição sendo rígido o suficiente além de ser prático na montagem e desmontagem. O dispositivo é composto dos seguintes elementos: base fixa montada com três parafusos Allen M10 com cabeça, base móvel composta por uma parte fixa e outra móvel e cinco parafusos Allen M10 com cabeça. A figura III.4 apresenta o grampo de fixação em detalhes montado no dinamômetro.

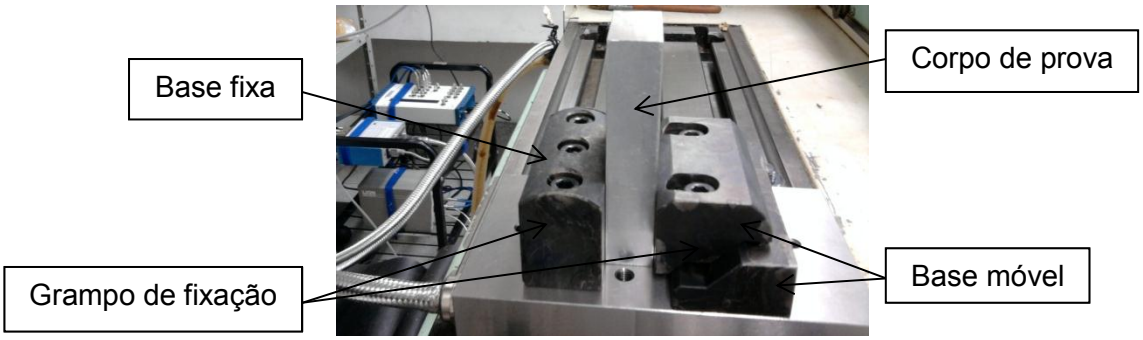


Figura III.4: Grampo de fixação ancorando o corpo de prova

O conjunto de fixação teve sua rigidez comprovada mediante a realização do mesmo procedimento usado anteriormente no dispositivo de fixação dos sensores de deslocamento, obtendo-se um erro ainda menor, visto que o conjunto apesar de robusto ainda foi tratado termicamente para uma dureza de 45 HRC garantindo a rigidez necessária ao mesmo. Sendo assim, o conjunto pode ser utilizado sem prejuízo algum ao sistema de aquisição dos dados de deslocamento e de força.

III.5 Ferramenta Utilizada

Para a usinagem do material dos corpos de prova, utilizou-se uma fresa de topo em aço rápido ao cobalto, XP – referência **C-247** - sem revestimento – ângulo de hélice 30º - com o diâmetro do corte (d_1) de 6 mm, diâmetro de haste (d_2) de 6mm, comprimento total (l_1) de 70mm, comprimento de corte (l_2) de 12,7mm, quatro arestas cortantes e com canal de posicionamento. Esta foi montada com um comprimento em balanço de 42 mm proporcionando mais flexibilidade e uma maior instabilidade do corte em pequenas dimensões para favorecer o surgimento do efeito desejado (*chatter*). A Figura III.5 mostra a forma e a nomenclatura da ferramenta.

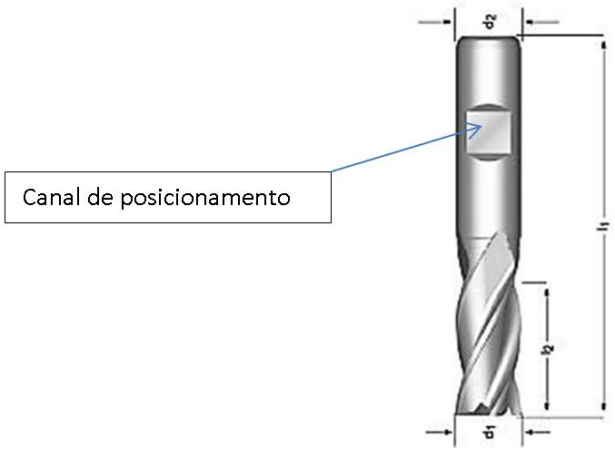


Figura III.5: Desenhos esquemáticos da ferramenta (DORMER, 2012)

III.6 Equipamentos de Medição de Força e Deslocamento

Para aquisição dos dados de força, foi usado um dinamômetro piezelétrico marca Kistler, modelo 9257BA calibrado a temperatura ambiente de 22º c, aquisição em 3 componentes, faixa de trabalho em Fx, Fy de -5 a 5 kN e Fz de -5 a 10 kN, frequência natural de 4 kHz, rigidez de 1000 N/µm e um amplificador de carga de 3 canais, marca Kistler, modelo 5233A, 230/115v~, 48 – 62Hz.

Para conversão e transmissão dos sinais analógicos para digital, foi utilizada uma placa de aquisição de dados com oito canais, 16 bits, 250 Ks/s multi-fusion $^{I}/_{0}$, marca National Instruments, modelo NI USB-6221 e bloco de conectores da mesma marca.

Para aquisição dos dados de deslocamento, foram usados dois sensores capacitivos marca Lion Precision, modelo C23C, especificação 071017-01 e um amplificador de sinal, marca Lion Precision, modelo Elite Series CPL190 com dois canais.

O dinamômetro foi fixado à mesa da máquina-ferramenta por meio de grampos fixadores (garras) dotados de parafusos M12 tratados termicamente e conectado ao amplificador de carga, que por sua vez foi conectado à placa de aquisição e está plugado à placa mãe do desktop munido do software Sinal-Express Labview 7.1. A Figura III.6 apresenta os detalhes do sistema de fixação do dinamômetro.

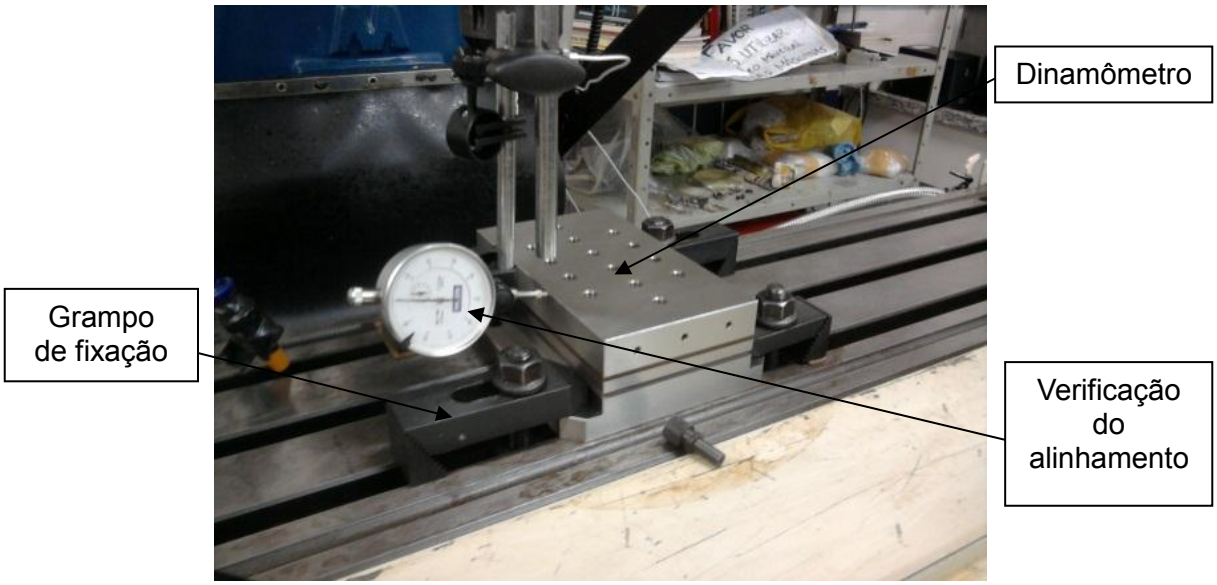


Figura III.6: Fixação do dinamômetro na fresadora

Foram realizados testes de medição de deslocamento com o dispositivo fixador montado e, com auxílio de um relógio comparador, verificou-se a resistência do mesmo durante a aplicação de forças radiais em sua estrutura. Com o objetivo de comprovar a eficiência do conjunto em situação de usinagem, foram feitas medições do sistema de aquisição dos dados de deslocamento (sensores, amplificador de sinal, mesa aquisitora, software Sinal-Express

Labview 7.1 e micro computador) com a ferramenta em rotação. As medidas obtidas com o sistema apresentaram um erro de 0,005 mm de excentricidade, fato confirmado usando um relógio comparador, que mostrou o mesmo erro comprovando assim a eficiência do conjunto em não introduzir erros no sistema de aquisição.

III.7 Corpos de Prova

Os corpos de prova utilizados nesta pesquisa foram fabricados de uma barra alumínio dural 90/110 liga 6351 de seção quadrada com 100 mm de lado e 1000 mm de comprimento. Utilizou-se 1/3 do mesmo para confecção dos corpos de prova e de um dispositivo para fixação dos sensores capacitivos empregados na medição de deslocamento da ferramenta em situação de usinagem. Foram obtidos 6 (seis) corpos de prova com as dimensões 21 x 50 x 100 mm para realização dos experimentos e aquisição dos dados. Cada corpo de prova foi devidamente catalogado para que se pudesse efetuar uma rastreabilidade dos experimentos com maior confiabilidade. A figura III.7 mostra os corpos de prova e sua marcação de identificação.

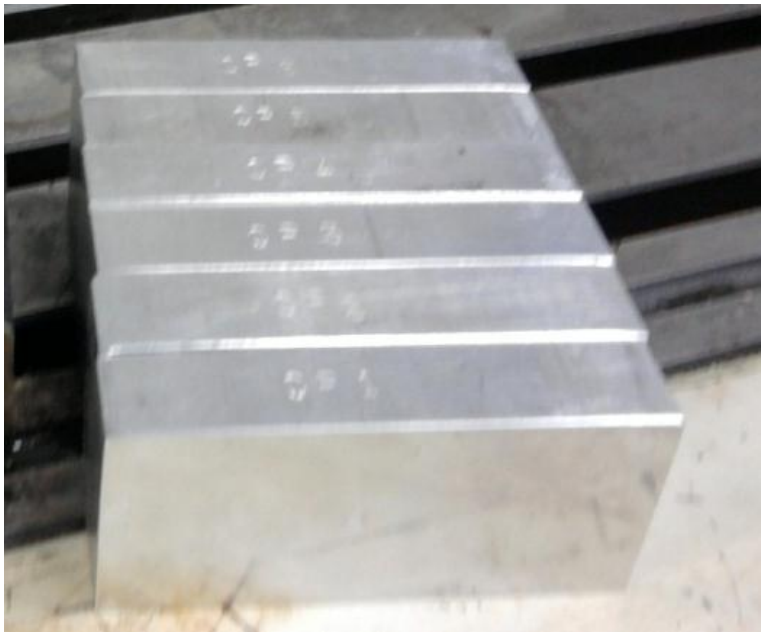


Figura III.7: Corpos de prova pré-usinados e registrados

III.8 Planejamento Experimental.

Para investigar como as condições de corte influenciam no deslocamento da ferramenta e na força de corte, utilizou-se como variáveis de entrada a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte.

III.8.1 Experimentos Iniciais para Definir Parâmetros.

Os parâmetros de corte adotados na realização dos experimentos precisavam ser valores que gerassem possíveis diferenças entre as condições de corte convencional, tais como: o maior comprimento em balanço possível da ferramenta, alta rotação e profundidade de corte máxima. Desse modo, a condição convencional foi excedida na busca dos parâmetros favorecendo assim o surgimento do fenômeno *chatter*. A máquina disponibilizada para os testes apresentava um fator limitante para a velocidade máxima de corte em 81m/min para a ferramenta como 6mm de diâmetro não podendo ser excedida por fatores de construção. Optou-se por realizar os experimentos com a velocidade máxima de 75m/min para não expor a máquina ao limite de rotação máxima e preservar os rolamentos do eixo árvore. Sendo assim, a Tabela III. 1 apresenta os parâmetros de entrada adotados nos ensaios de usinagem iniciais na tentativa de obter sucesso em encontrar o efeito *chatter* .

Tabela III.1: Parâmetros de corte iniciais adotados na obtenção de efeito chatter

Variáveis de Entrada	**Condições de Usinagem**		
	1	**2**	**3**
Avanço por dente [mm/dente]	0,025	0,045	0,0644
Profundidade de corte [mm]	4,0	8,0	12,0
Velocidade de corte [m/min]	65	70	75

III.8.2 Experimentos Principais para Caracterizar Sinais de *Chatter*

Após realizar os experimentos iniciais, foram avaliadas as três condições de usinagem nos sentidos de corte concordante e discordante sem adição de fluido refrigerante. Os efeitos que caracterizam o *chatter* (ruído elevado, vibração no sistema ferramenta-fixação-máquina e acabamento grosseiro etc.) O *chatter* foi observado com maior evidência na condição que empregou o maior avanço, maior profundidade e velocidade de corte máxima com o sentido de corte concordante, sendo a mesma adotada para realização dos experimentos finais. Em todos os testes foram realizadas duas réplicas por teste e todas as réplicas de todos os testes foram realizadas de forma aleatória para que não houvesse influência do sistema nas condições de ensaio.

Com o objetivo de analisar a influência de cada um dos parâmetros nas forças de corte, o procedimento foi elaborado a partir de um planejamento fatorial de 6 níveis e 1 variável, sendo essa a profundidade de corte a_p. A tabela III.2 apresenta os valores da variável utilizada nos testes. Em todos os testes, a velocidade de corte foi igual a 75 m/min e o avanço, igual 0,063mm/dente. Foram realizadas, pelo menos, duas réplicas por teste e todas as réplicas de todos os testes foram realizadas de forma aleatória.

Tabela III.2: Experimentos realizados no fresamento de topo

Planejamento dos parâmetros de corte	
Sequência de Testes	Profundidade de usinagem
1	12 mm
2	10 mm
3	8 mm
4	6 mm
5	4 mm
6	2 mm
7	6 mm
8	12 mm
9	8 mm
10	6 mm
11	10 mm
12	10 mm
13	8 mm
14	12 mm
15	2 mm
16	6 mm
17	2 mm

Os experimentos foram realizados seguindo a sequência acima de forma que os dados de deslocamento e força fossem aquisitados simultaneamente e processados pelo software, para que os sinais pudessem ser caracterizados no surgimento do *chatter.* A maioria dos experimentos apresentaram características do fenômeno *chatter,* principalmente, com as profundidades maiores. No entanto, analisar os resultados é fundamental para a confirmação da ocorrência do fenômeno do *chatter* .

III.9 Medição da Rugosidade

A rugosidade foi inspecionada no laboratório de metrologia do SENAI - Barreto empregando um rugosímetro portátil da marca Mitutoyo modelo SJ 201 M/P. O sistema adotado para medição segue a recomendação da norma ABNT, através da NBR ISO 4287(2002) que se baseia na profundidade da rugosidade considerando desvio médio aritmético Ra. Optou-se por um comprimento de amostragem de 2,5 mm e realizaram-se três (3) medições em pontos diferentes. Em cada corpo de prova obteve-se uma média das três medições efetuadas como resultado final. A rugosidade foi usada para comparação e indicação da ocorrência do fenômeno *chatter* nos experimentos, visto que a mesma é uma das características da existência de *chatter*. Relacionar a profundidade de corte com a rugosidade proporciona uma forma de caracterização do fenômeno possibilitando confirmar o mesmo. A figura III.6 mostra em detalhes o rugosímetro, o corpo de prova e o mecanismo empregado para realização das medições.

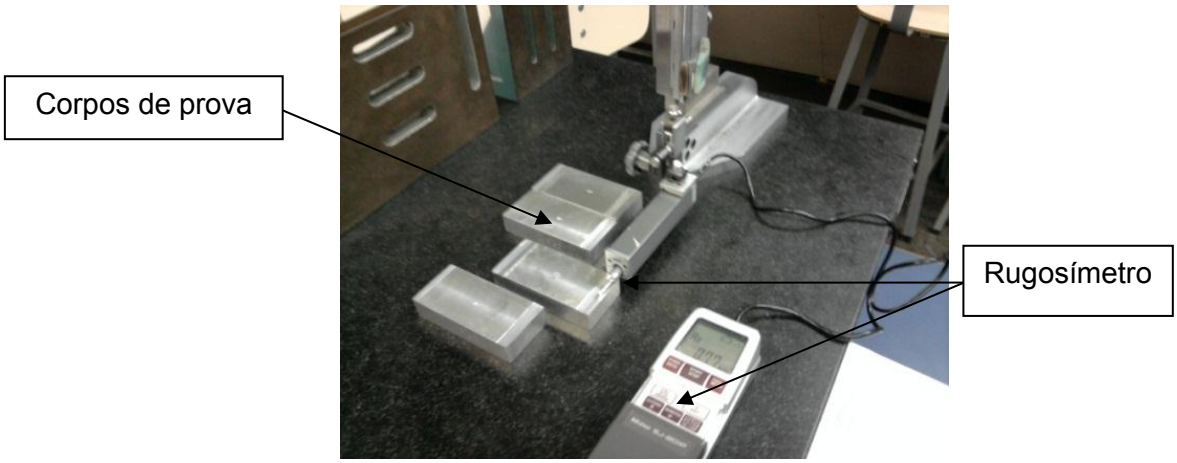


Figura III.8: Detalhes da medição da rugosidade dos corpos de provas e rugosímetro portátil

Os estudos foram direcionados para encontrar o fenômeno *chatter* que são vibrações provenientes de dois mecanismos distintos: “modo de acoplamento”, que é a interação entre diferentes modos de vibração de um sistema e o modo “regenerativo”, que ocorre quando uma aresta da ferramenta usina uma superfície ondula deixada pelo gume anterior. Foi desenvolvido um sistema de identificação e caracterização dos sinais durante a realização dos experimentos que comprovasse a existência do *chatter*. O sistema desenvolvido foi empregado na realização dos experimentos e os resultados foram analisados e discutidos no capítulo seguinte comparando as características dos ensaios com os de outros estudos feitos, como no estudo realizado por KAKINUMA Y. *et al.* (2011).

CAPÍTULO IV. Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e as discussões sobre os sinais experimentais dos testes durante o fresamento de topo nos corpos de prova. Os resultados estão apresentados em duas partes distintas, sendo a primeira referente aos dados das forças de corte e a segunda aos deslocamentos da ferramenta.

IV.1 Resultados das Forças de Usinagem

É importante salientar que, durante a realização da aquisição dos dados nos experimentos, não houve indícios de perturbação durante o corte e nem nos momentos antecedentes, tais como: variações de tensão elétrica, vibrações externas à máquina, rigidez dos equipamentos e acessórios utilizados.

A resistência mecânica dos dispositivos de fixação do sistema de aquisição, o aterramento da máquina e a usinagem com sentido concordante sem adição do fluido de corte possibilitaram a realização dos testes sem interferir nos sinais aquisitados e encontrar a situação da ocorrência do efeito *chatter*, como também, estabelecer as condições para identificar e caracterizar o mesmo.

O objetivo da aquisição de força é criar um sistema de caracterização para reconhecimento dos padrões envolvidos na ocorrência do fenômeno *chatter* durante a realização do experimento. A qualidade superficial dos corpos de prova produzida por cada ensaio de fresamento de topo foi registrada através da medição do grau de rugosidade obtido.

A tabela IV.1 mostra os valores das forças máximas de usinagem (Fu) e forças máximas de avanço (Ft), deslocamento rotacional da ferramenta antes e durante a usinagem e o grau de rugosidade medido em cada corpo de prova após a execução dos experimentos, em função dos parâmetros de corte empregados para realização dos ensaios. Foram realizados os experimentos, cujos dados foram apresentados na tabela III.3, onde a profundidade de corte foi a única variável. Os experimentos foram efetuados de forma aleatória empregando, pelo menos, duas réplicas para cada teste. Os resultados experimentais foram analisados com os seguintes critérios:

- Força máxima de usinagem – Em todo o tempo de corte, foram aquisitadas as forças Fx e Fy. A força Fx foi aquisitada na direção do avanço e Fy, na direção perpendicular à direção de avanço no plano de corte. É importante conhecer o comportamento e o valor da força máxima de usinagem. A força máxima de usinagem é responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte. O gráfico da figura IV.1 mostra as forças máximas de usinagem do teste 11.

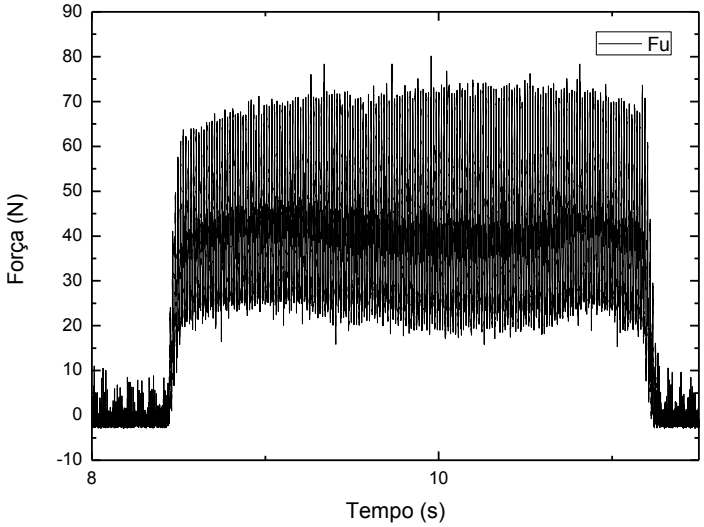


Figura IV.1: Força máxima de usinagem mensurada no teste 11

- Força máxima de avanço F_f: é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço.
- Rugosidade – Foi utilizada como parâmetro para indicação da existência do fenômeno *chatter* observando o valor da rugosidade do acabamento superficial apresentado após a usinagem.

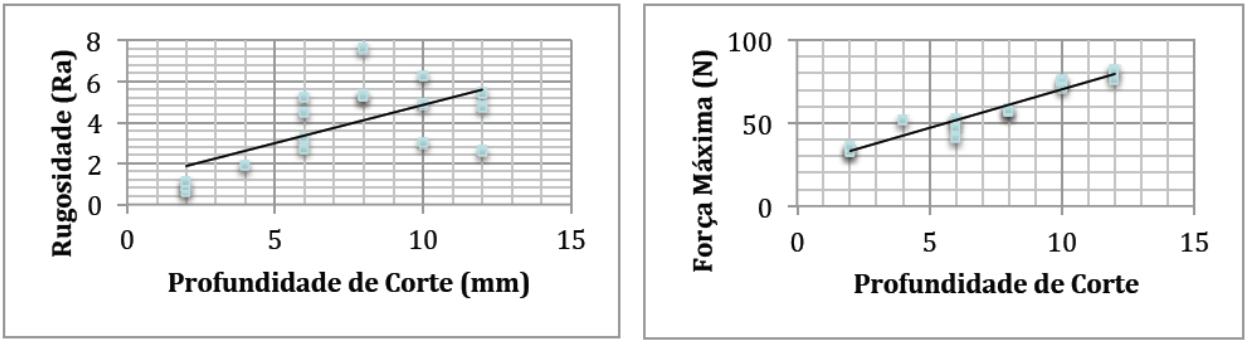
Tabela IV.1: Fresamento de Topo no Sentido de Corte Concordante

Testes	Profundidade de Corte (mm)	Força Máxima de Usinagem (N)	Força Máxima de Avanço (N)	Rugosidade Superficial em Ra (μm)
1	12	76,57	60,14	5,45
2	10	75,26	51,60	6,28
3	8	57,30	43,98	7,60
4	6	41,61	33,37	5,20
5	4	52,03	45,57	1,89
6	2	33,40	27,16	0,65
7	6	51,36	41,13	4,51
8	12	82,67	64,22	4,76
9	8	57,30	46,45	5,32
10	6	47,01	35,89	2,75
11	10	75,62	61,43	2,98
12	10	71,38	55,77	4,89
13	8	58,33	46,21	5,31
14	12	81,36	62,58	2,60
15	2	33,38	25,36	0,83
16	6	52,83	42,28	3,25
17	2	36,22	29,45	1,09

O surgimento do efeito *chatter,* durante os ensaios, ocorreu nos experimentos com profundidade de corte maior que 4 mm, pois nessas condições a usinagem apresentou ruído

acentuado, que caracteriza o fenômeno. Na tabela IV.1 pode-se relacionar profundidade de corte com força máxima de usinagem para caracterizar o efeito *chatter.* Nesses experimentos verificou-se o aumento das forças de usinagem, do curso gerado pela ferramenta durante a usinagem do deslocamento da ferramenta nas coordenas x e y e da rugosidade da superfície produzida pelo fresamento de topo. Tanto para as forças de corte quanto para o deslocamento foram construídos gráficos para caracterização e análise do fenômeno *chatter*. O comportamento das forças de usinagem foi monitorado de uma extremidade a outra da usinagem do corpo de prova.

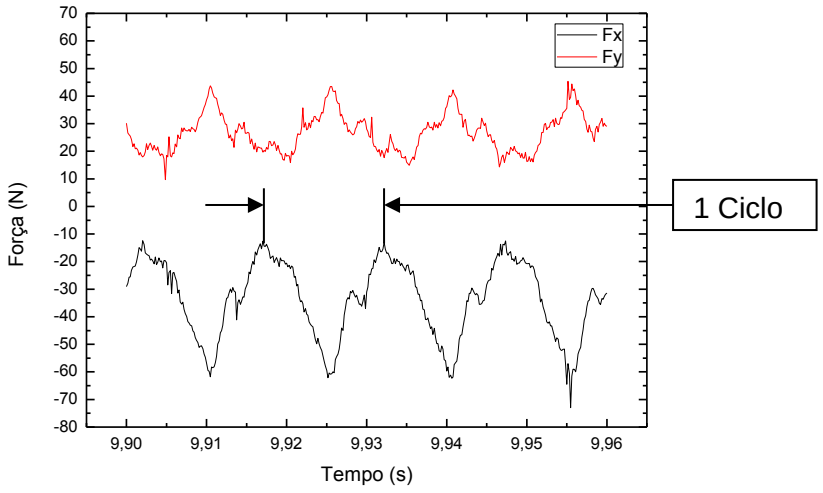
Traçando-se a curva de tendência para a rugosidade e a força máxima em função da profundidade é possível perceber maior aproximação da curva de força máxima em função da profundidade de corte, como é apresentado na Figura VI.2(a).



(a) Variação da rugosidade (b) Variação da força máxima

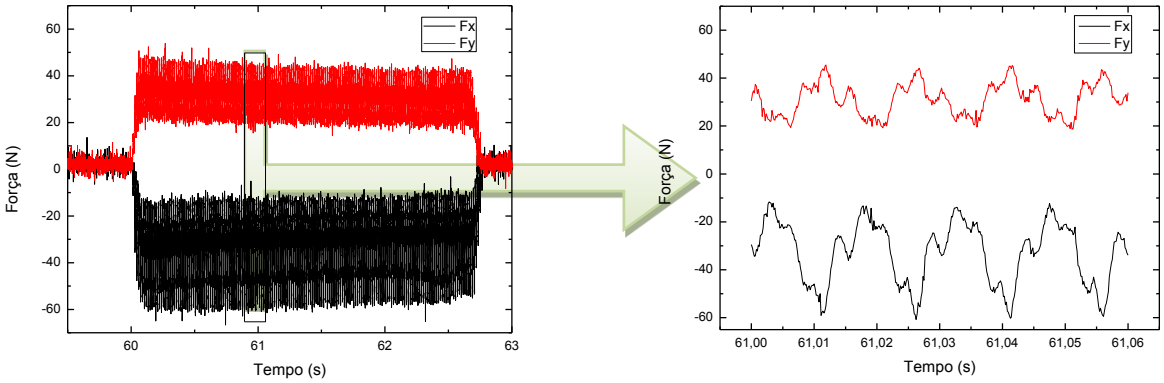
Figura IV.2: Resultados em função da profundidade de corte.

Pode-se observar na figura IV.2 um detalhe da ampliação de quatro ciclos da ferramenta para melhor compreensão e análise do comportamento das forças de corte durante a usinagem do corpo de prova geradas pelo sistema ferramenta-fixação-máquina.



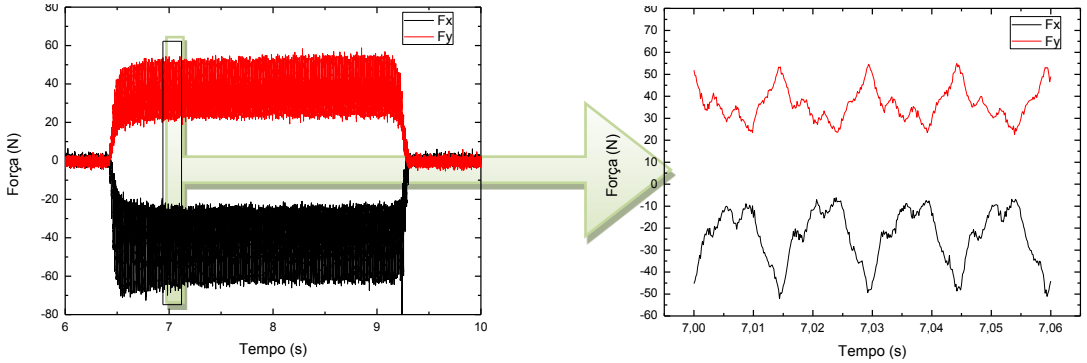
III.8.1 Figura IV.3: Componentes das forças de usinagem no experimento 11

Analisando da figura IV.4 (a) e (b) até a figura IV.20, pode-se observar o comportamento das forças de corte durante a realização de cada experimento em toda a extensão usinada do corpo de prova e os detalhes no ponto selecionado para análise em quatro ciclos.



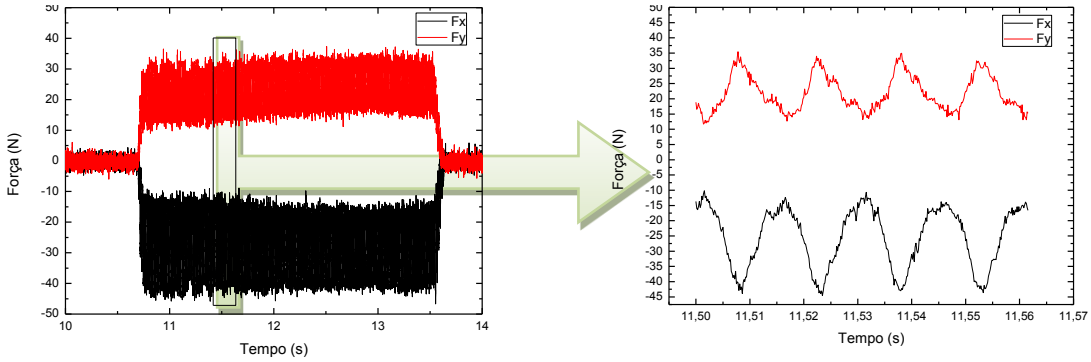
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.4: Forças experimentais nº1



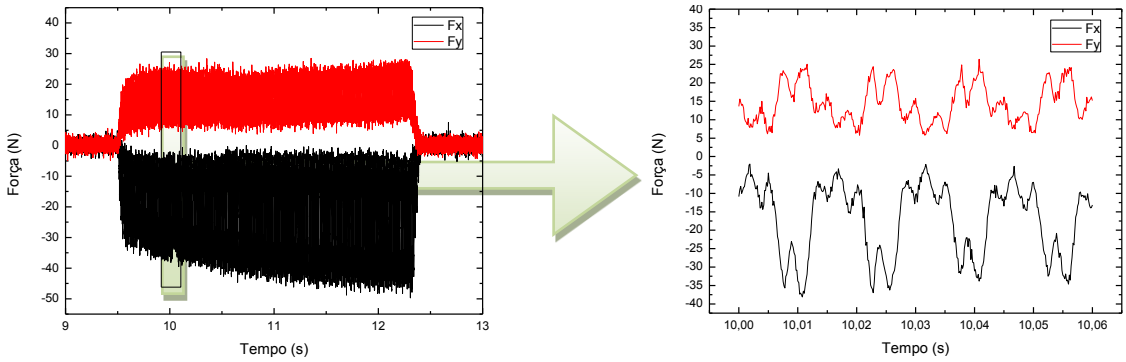
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.5: Forças experimentais nº2



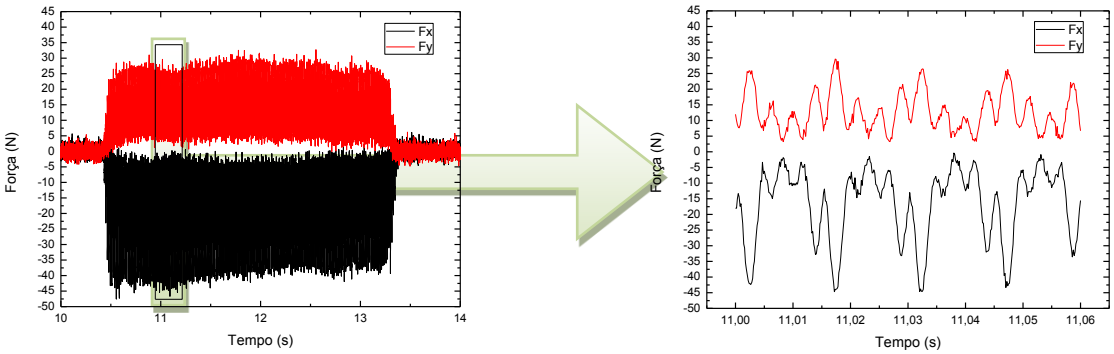
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.6: Forças experimentais nº3



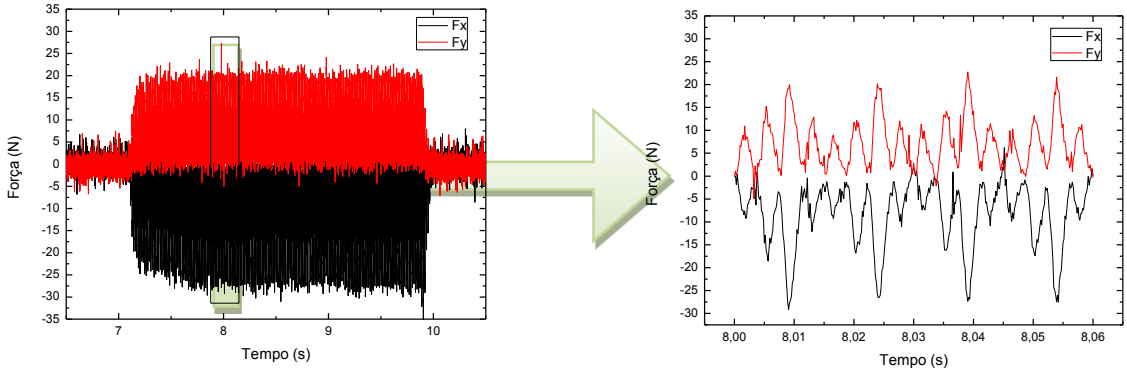
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.7: Forças experimentais nº4



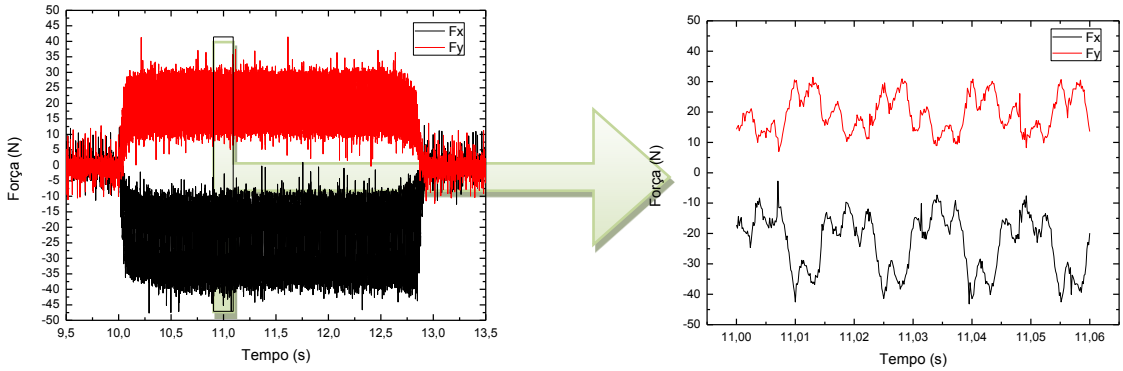
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.8: Forças experimentais nº5



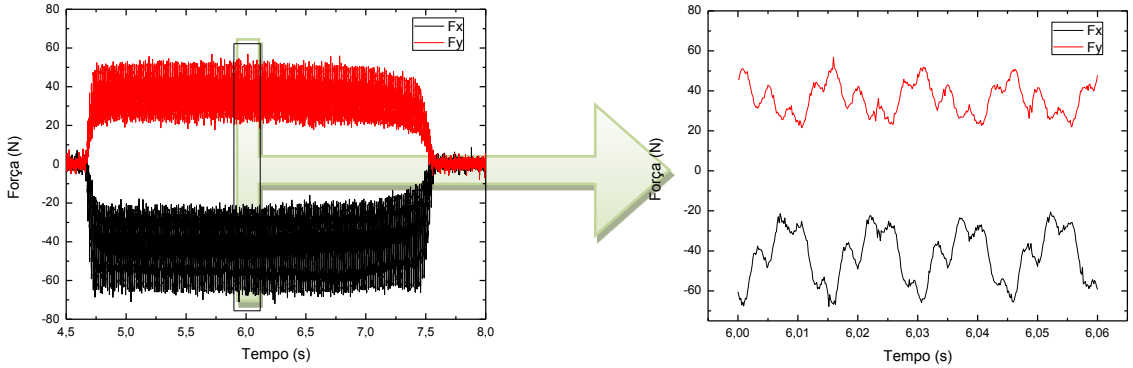
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.9: Forças experimentais nº6



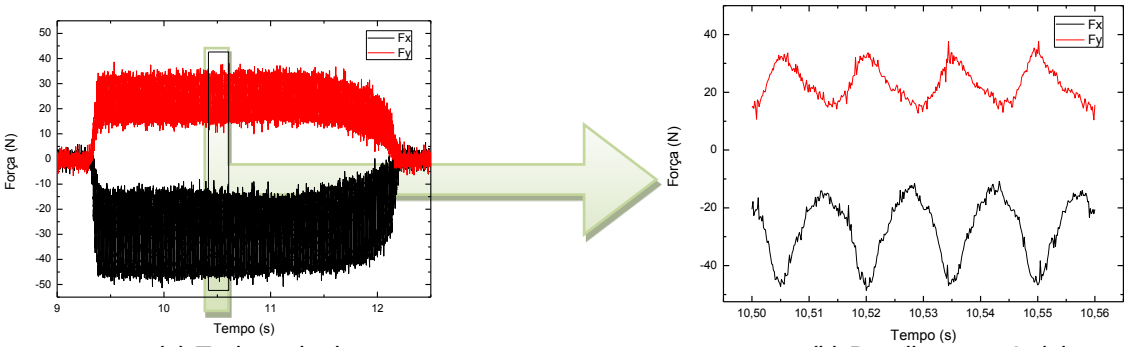
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.10: Forças experimentais nº7



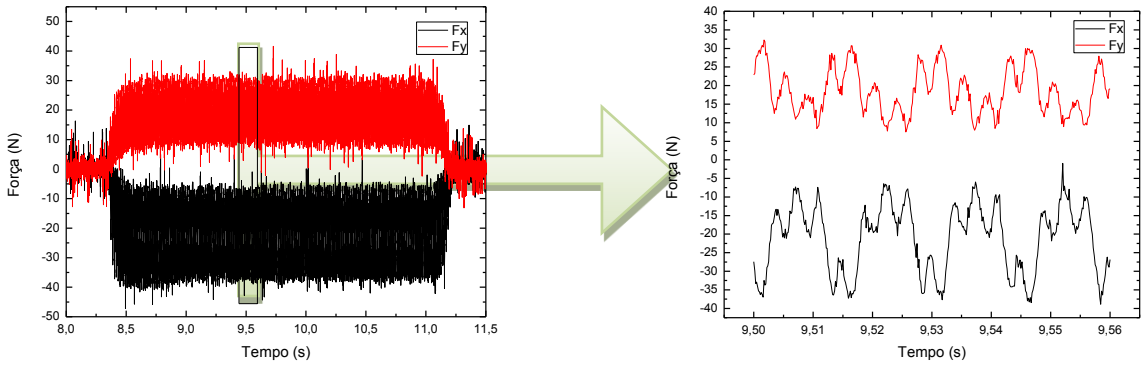
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.11: Forças experimentais nº8



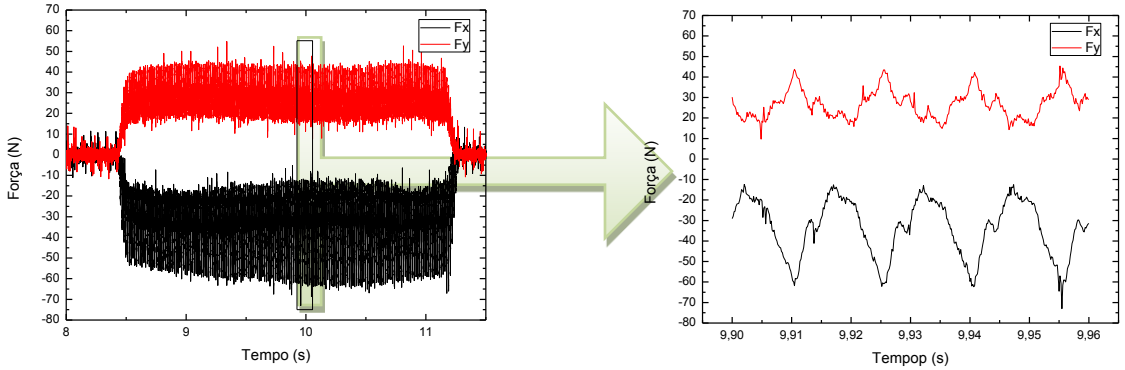
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.12: Forças experimentais nº9



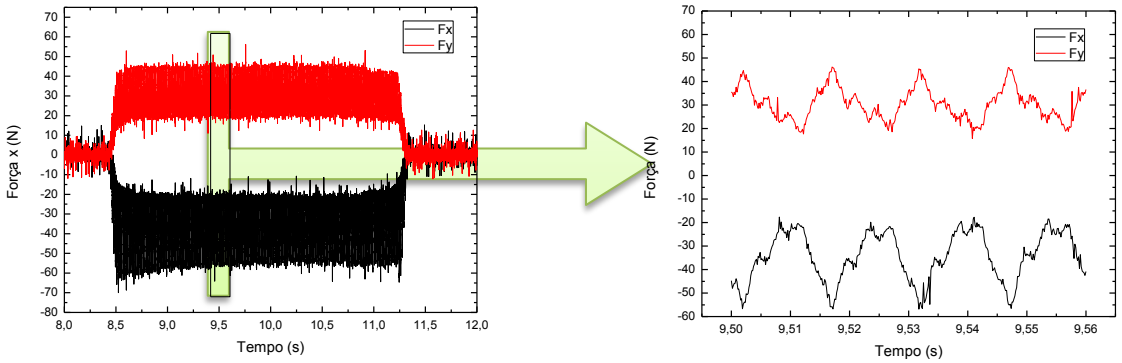
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.13: Forças experimentais nº10



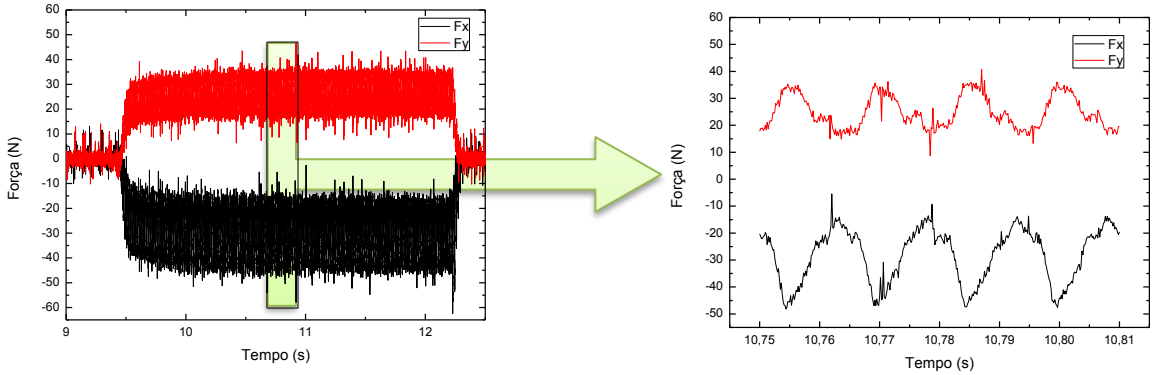
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.14: Forças experimentais nº11



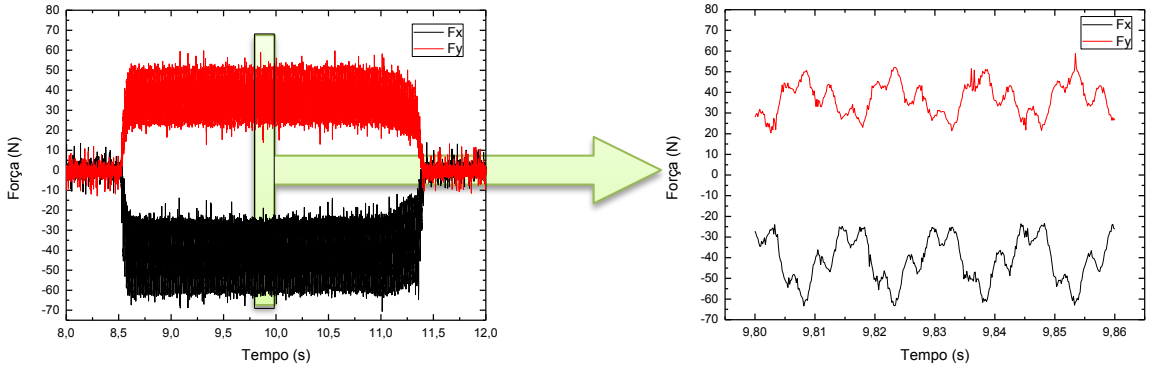
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.15: Forças experimentais nº12



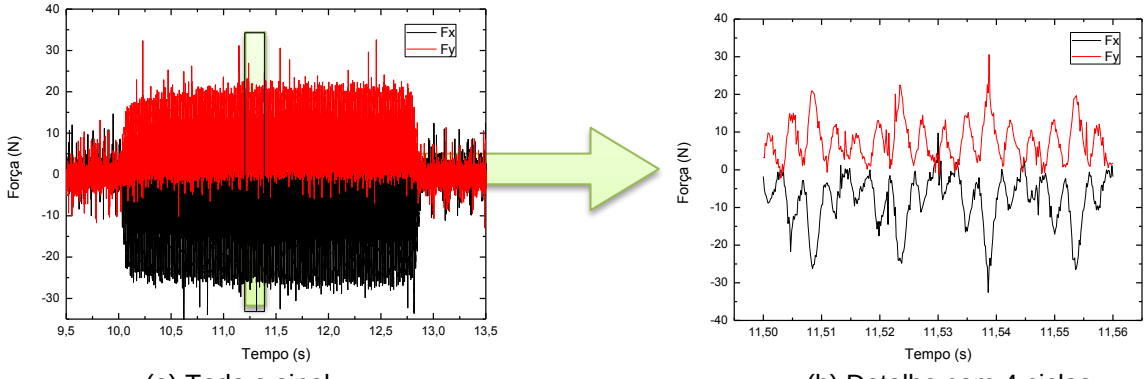
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.16: Forças experimentais nº13



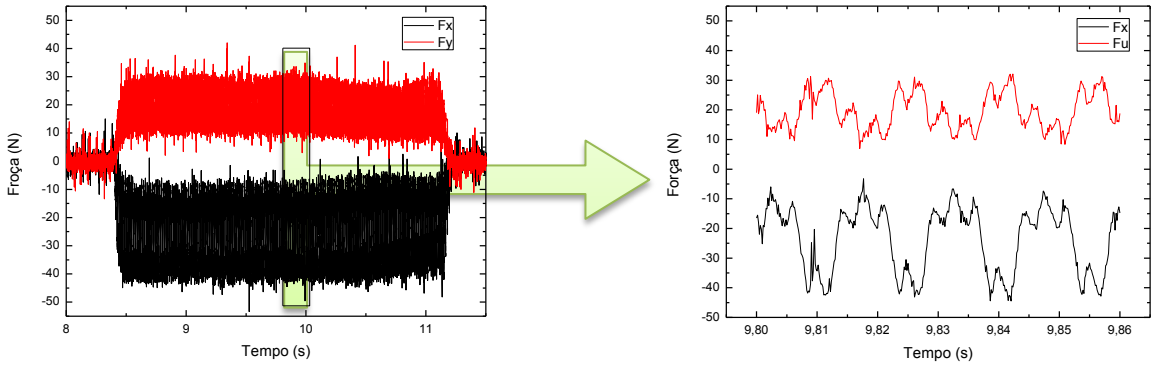
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.17: Forças experimentais nº14



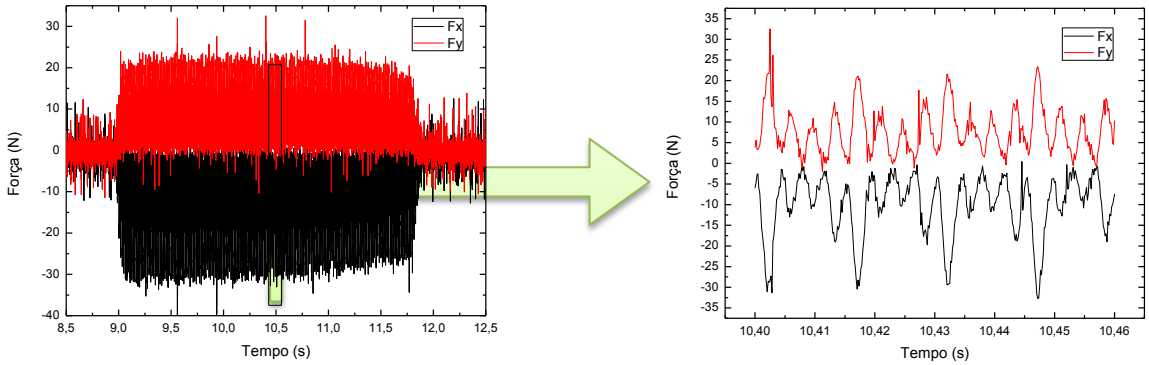
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.18: Forças experimentais nº15



(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.19: Forças experimentais nº16



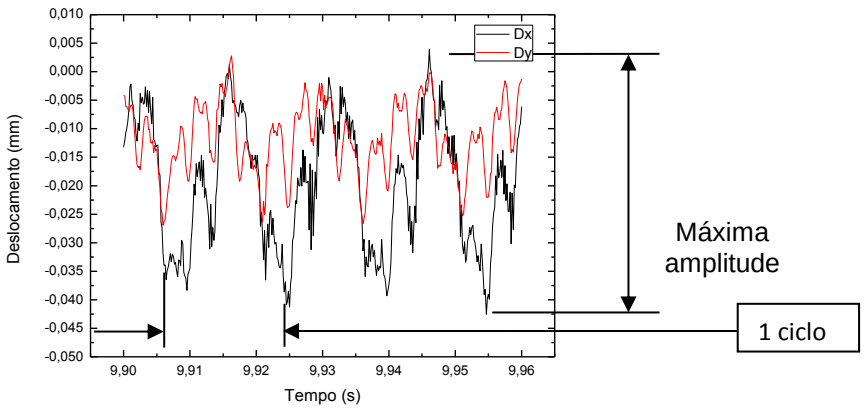
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.20: Forças experimentais nº17

As forças de corte causam deflexões na ferramenta gerando um desvio de excentricidade tornando o corte instável e aumentando a rugosidade da superfície usinada. Como pode ser visto na tabela IV.1, quanto maior a força de usinagem maior o valor da rugosidade superficial.

IV.2 Resultados de Deslocamento.

Os sinais de deslocamento foram aquisitados nas direções x e y. e processados para análise como mostra a figura IV.21. Com os sinais de deslocamentos obtidos no teste 11, foi feita uma ampliação de quatro ciclos do mesmo instante que se analisou as forças de corte nesse experimento com o objetivo de estabelecer uma relação entre as forças e os deslocamentos.

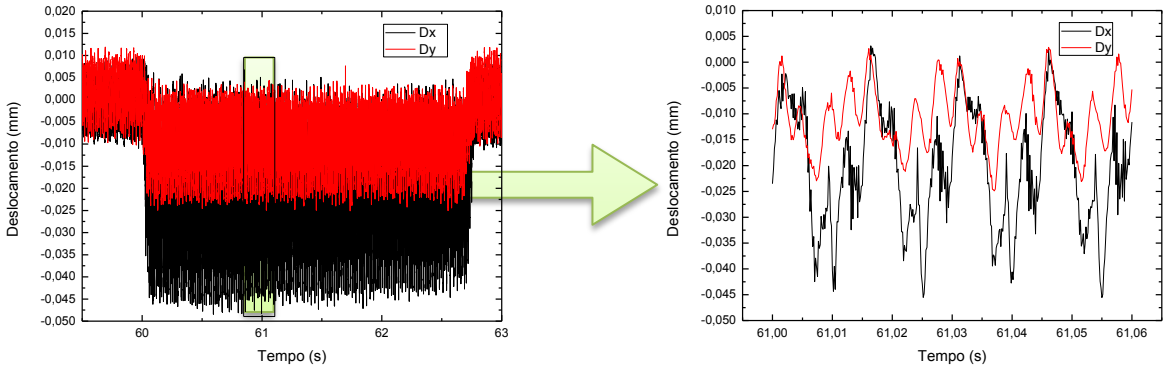


.

Figura IV.21: Variação do deslocamento em quatro ciclos

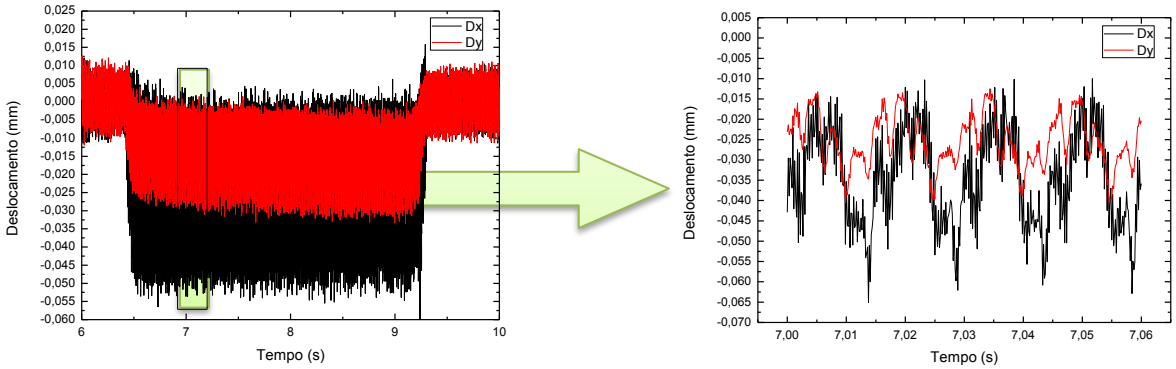
É possível identificar que a máxima amplitude deste caso 0,046mm é atribuída à variação (excentricidade) do deslocamento da ferramenta durante o corte. A figura apresenta diferentes amplitudes em quatro ciclos confirmando a instabilidade do corte que produz variação na espessura de cavaco sobrecarregando uma aresta cortante da ferramenta. A figura IV.20 mostra o mesmo experimento durante o mesmo momento que o da figura IV.2.

Analisando da figura IV.22 (a) e (b) até a figura IV.38, pode-se observar o comportamento dos deslocamentos da ferramenta durante a realização de cada experimento em toda a extensão usinada do corpo de prova e os detalhes no ponto selecionado para análise em quatro ciclos.



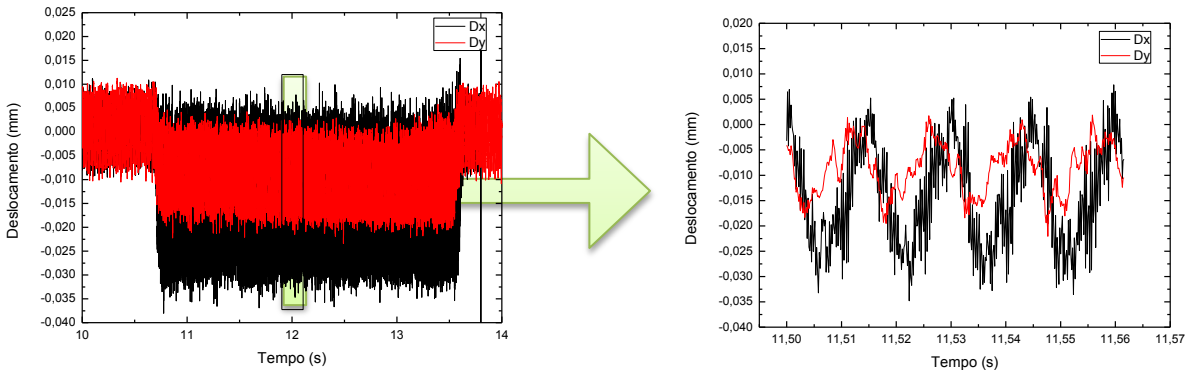
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.22: Deslocamento experimento nº1



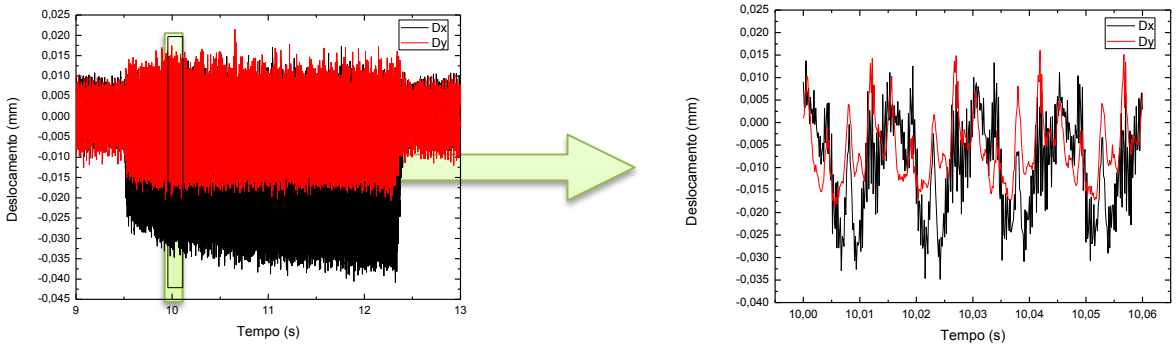
(a)Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.23: Deslocamento experimento nº2



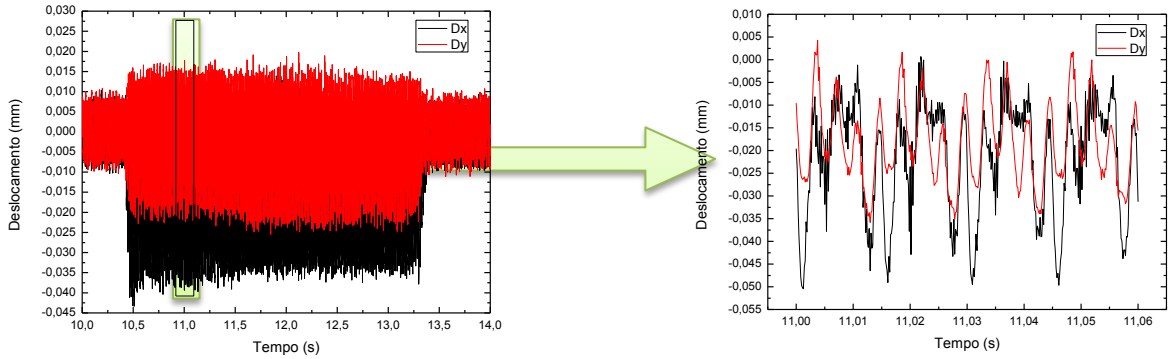
(a)Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.24: Deslocamento experimento nº3



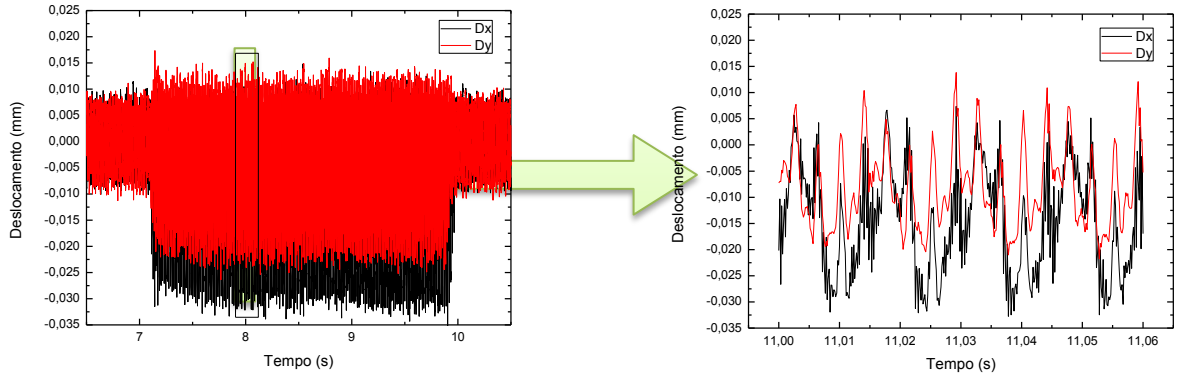
(a)Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.25: Deslocamento experimento nº4



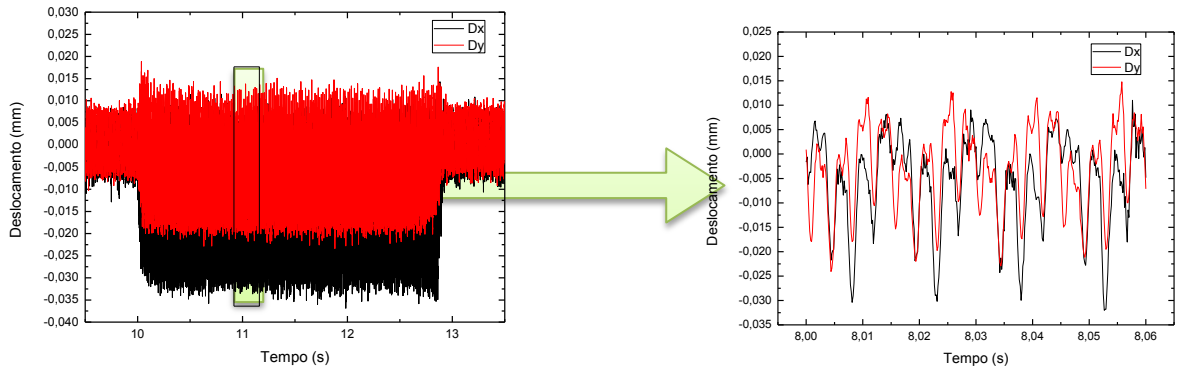
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.26: Deslocamento experimento nº5



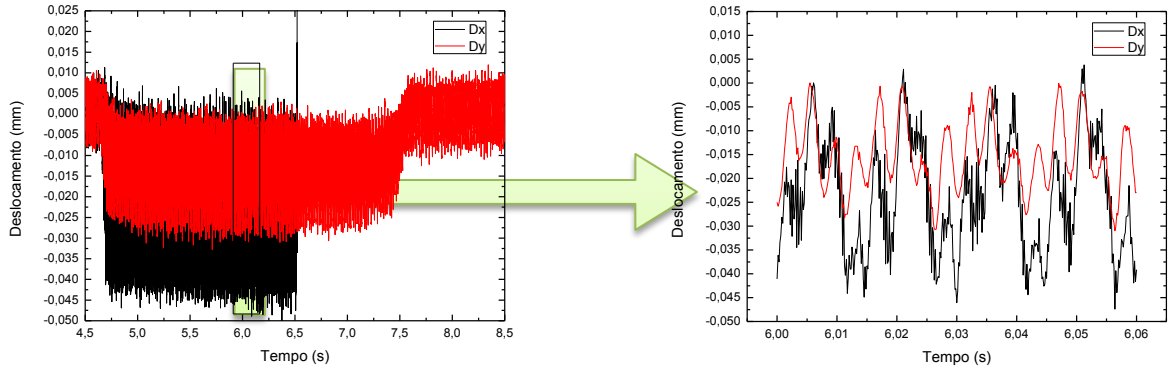
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.27: Deslocamento experimento nº6



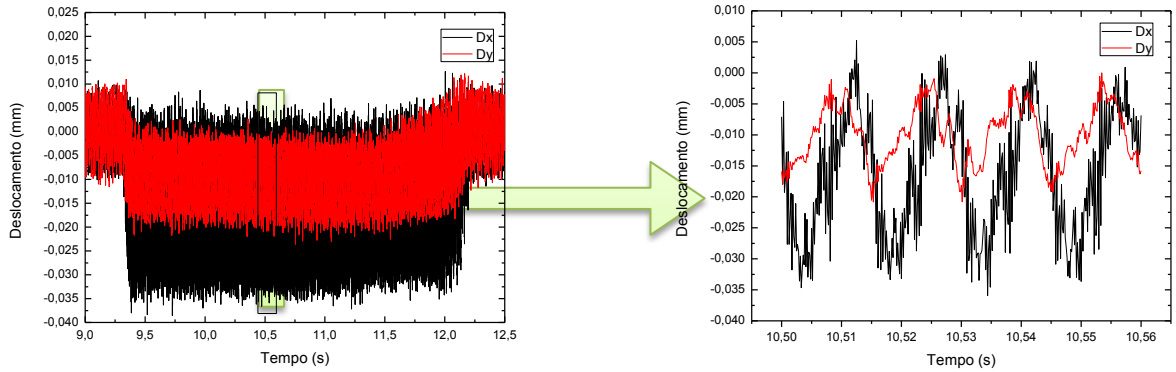
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.28: Deslocamento experimento nº7



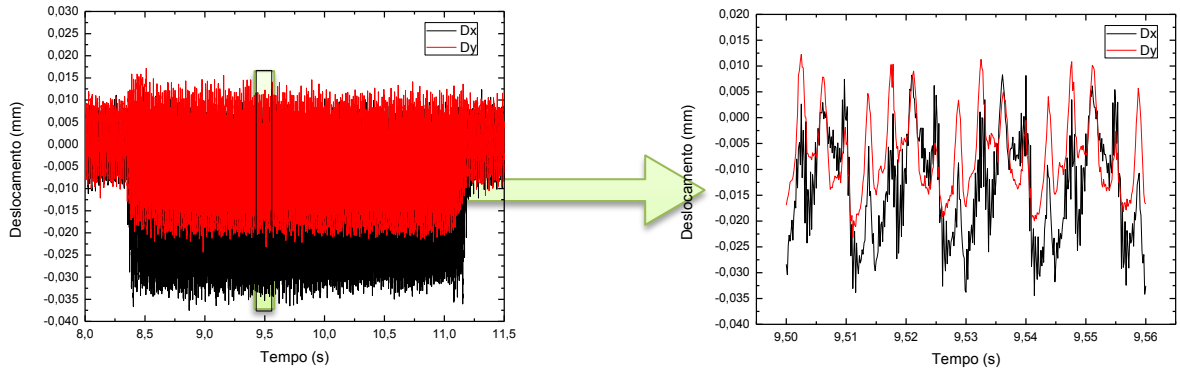
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.29: Deslocamento experimento nº8



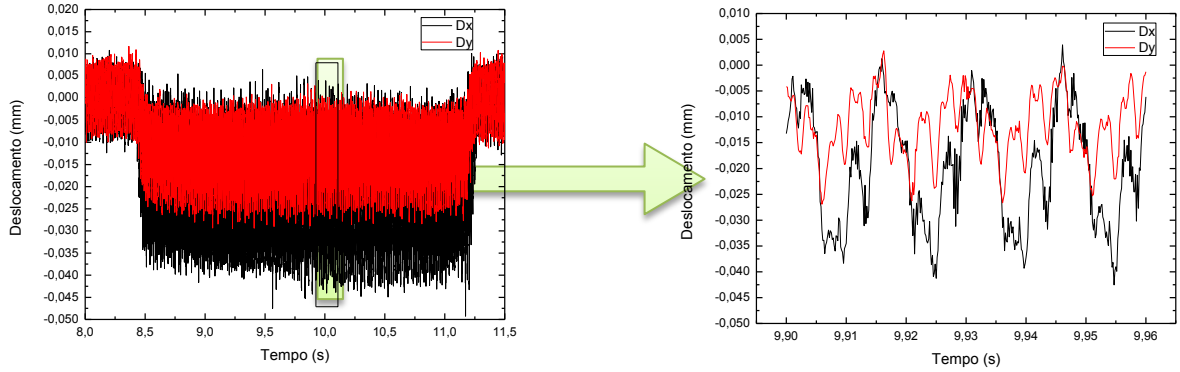
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.30: Deslocamento experimento nº9



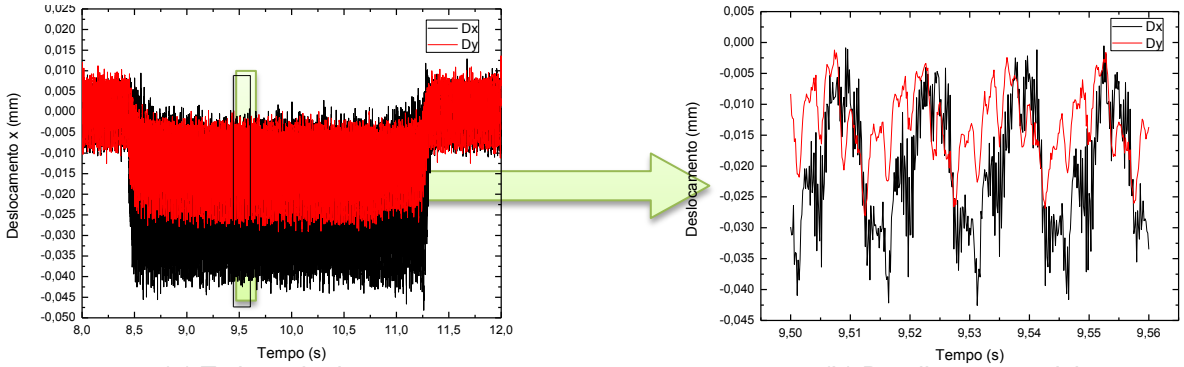
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.31: Deslocamento experimento nº10



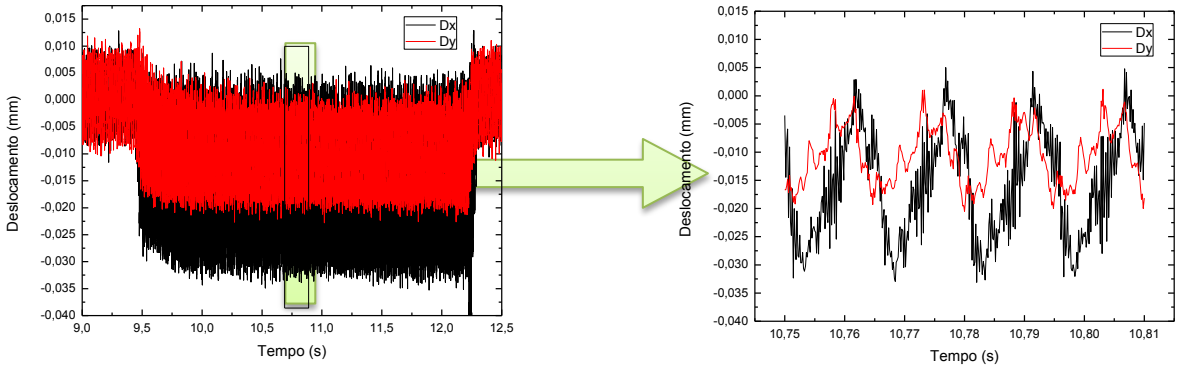
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.32: Deslocamento experimento nº11



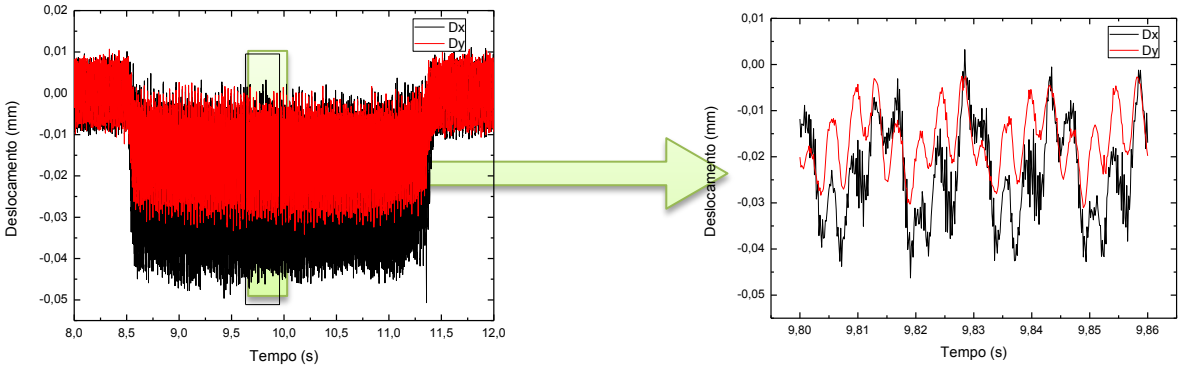
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.33: Deslocamento experimento nº12



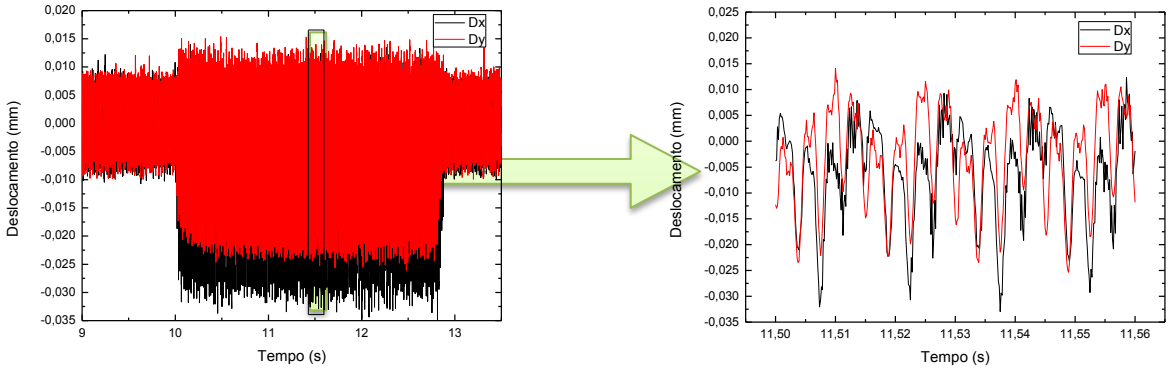
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.34: Deslocamento experimento nº13



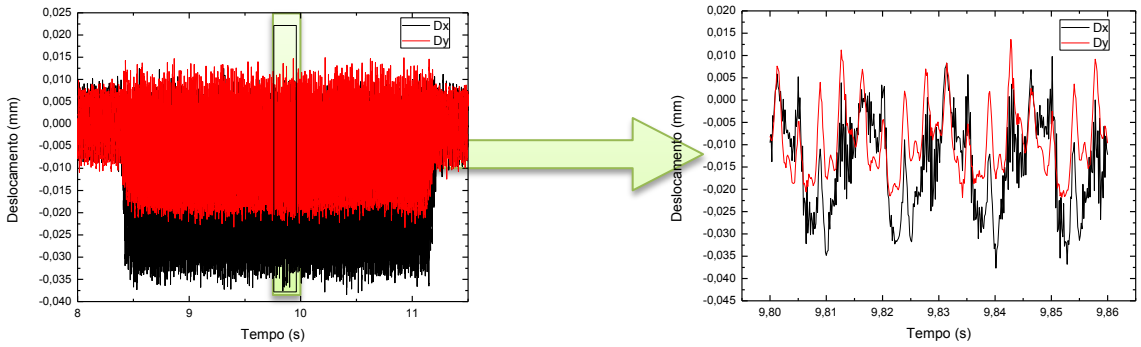
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.35: Deslocamento experimento nº14



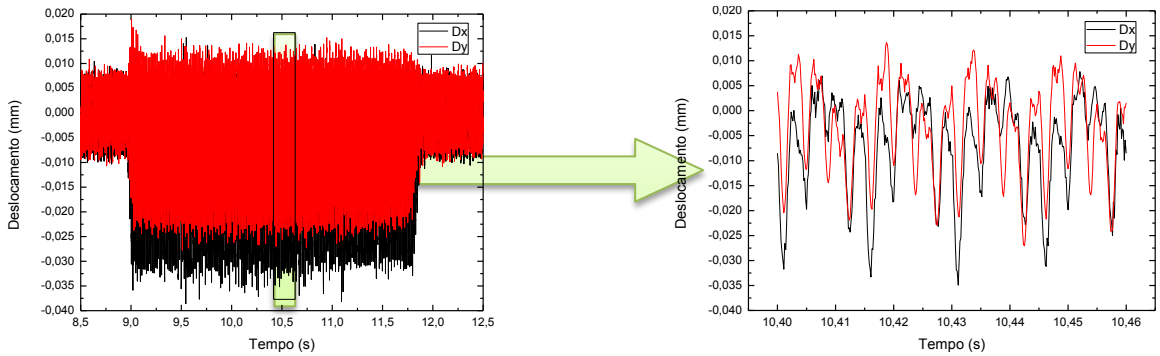
(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.36: Deslocamento experimento nº15



(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.37: Deslocamento experimento nº16



(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.38: Deslocamento experimento nº17

A partir dos resultados da figura IV.5, é possível perceber o comportamento da trajetória da ferramenta na presença do efeito *chatter* que relaciona os deslocamentos x e y em cada caso. Observando-se as figuras que apresentam os detalhes em quatro ciclos pode-se comparar as situações que mostram variações nos deslocamentos da ferramenta oriundos de cortes instáveis na presença do efeito *chatter*.

Tabela IV.2: Deslocamentos máximos da ferramenta na realização dos experimentos

Testes	Deslocamento no eixo "X" (mm)	Deslocamento no eixo "Y" (mm)
1	0,048	0,025
2	0,054	0,032
3	0,036	0,022
4	0,038	0,019
5	0,037	0,022
6	0,034	0,023
7	0,034	0,021
8	0,044	0,030
9	0,033	0,020
10	0,034	0,021
11	0,040	0,026
12	0,042	0,028
13	0,032	0,021
14	0,045	0,030
15	0,030	0,024
16	0,035	0,021
17	0,032	0,024

Pode-se definir os deslocamentos x e y como a posição que a ferramenta ocupa em cada instante nos eixos x e y, durante a realização do experimento, e a excentricidade como o movimento realizado pela ferramenta em torno de seu próprio eixo durante um ciclo e é atribuída à amplitude do deslocamento da ferramenta efetuando o corte. A figura IV.38 apresenta a trajetória da ferramenta no experimento

A caracterização dos dados de deslocamento possibilita identificar variações de amplitudes e dos deslocamentos nos experimentos que comprovam a ocorrência do fenômeno *chatter*. A espessura do cavaco nessas condições varia como descrita em estudos anteriores produzindo ondulações na superfície de contato da ferramenta com a peça como apresentado por (ALTINTAS e BUDAK, 1995).

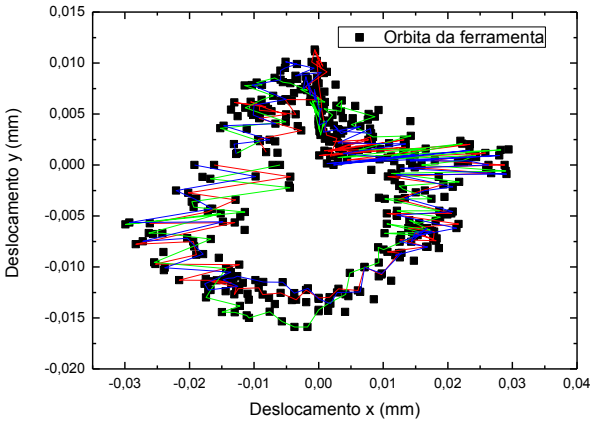


Figura IV.39: Representação do efeito *chatter* em ciclos consecutivos do teste 9

A figura IV.39 destaca o comportamento da ferramenta em cada período de rotação sob a situação de ocorrência de *chatter* e pode ser utilizado para caracterizar o mesmo, pois cada experimento apresenta um comportamento distinto. A excentricidade é um erro de posicionamento da ferramenta em torno de seu próprio eixo atribuído à amplitude do deslocamento da ferramenta efetuando o corte.

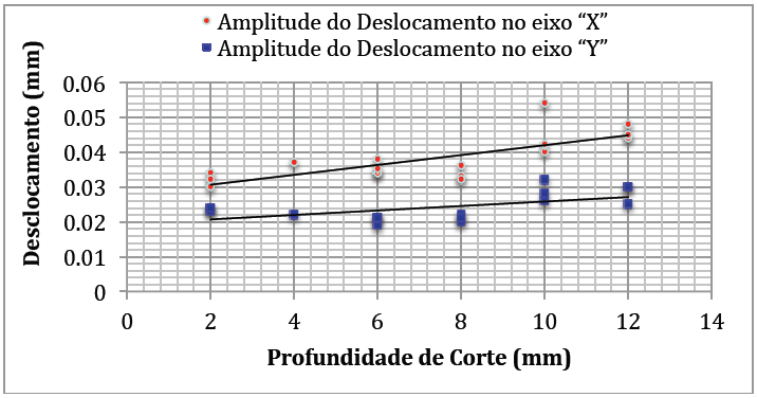


Figura IV.40: Relação do Deslocamento com Profundidade

Como visto nas 17 edições do experimento em busca do efeito *chatter*, pode-se confirmar a presença dos mesmos nas edições de nºs 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 16. O propósito desta discussão é evidenciar a presença do fenômeno nestas edições, bem como comentar sua ausência nas demais.

Tabela IV.3 Variação da excentricidade da ferramenta durante o corte

Excentricidade da Ferramenta em Corte (mm)	Excentricidade da Ferramenta em Vazio (mm)	Diferença Entre as Excentricidades (mm)
0,0356	0,0054	0,0302
0,0356	0,0061	0,0295
0,0300	0,0057	0,0243
0,0193	0,0047	0,0146
0,0223	0,0085	0,0138
0,0293	0,0064	0,0230
0,0209	0,0058	0,0151
0,0282	0,0051	0,0231
0,0202	0,0063	0,0139
0,0185	0,0048	0,0138
0,0235	0,0055	0,0179
0,0229	0,0056	0,0172
0,0200	0,0059	0,0141
0,0281	0,0062	0,0219
0,0188	0,0056	0,0132
0,0230	0,0057	0,0174
0,0174	0,0066	0,0112

Após a montagem da ferramenta, verifica-se o erro de excentricidade e o desvio encontrado é indicado como excentricidade da ferramenta em vazio. O deslocamento da ferramenta, durante o corte causado pela oscilação das forças de corte, aumenta esse desvio originando a excentricidade da ferramenta em corte.

IV.3 Aspecto da Superfície

De acordo com KAKINUMA Y. *et al.* (2011), em operações de fresamento com ferramentas de corte intermitente, as marcas deixadas pela ferramenta podem se apresentar de várias formas. Na ocorrência do *chatter,* as marcas deixadas na superfície são inclinadas em relação ao eixo do sentido de avanço e as marcas que se apresentam de forma perpendicular ao sentido de avanço são vibrações forçadas. A frequência de rotação da ferramenta tende a estabelecer uma sincronização com as frequências autoexcitadas provenientes do *chatter.*

O aspecto da superfície usinada do corpo de prova após realização do teste 1 é apresentado com detalhe na figura IV.41, cujas marcas são profundas e inclinadas em relação ao sentido de avanço, o que indica uma qualidade superficial encontrada durante a inspeção de 5,45μ.

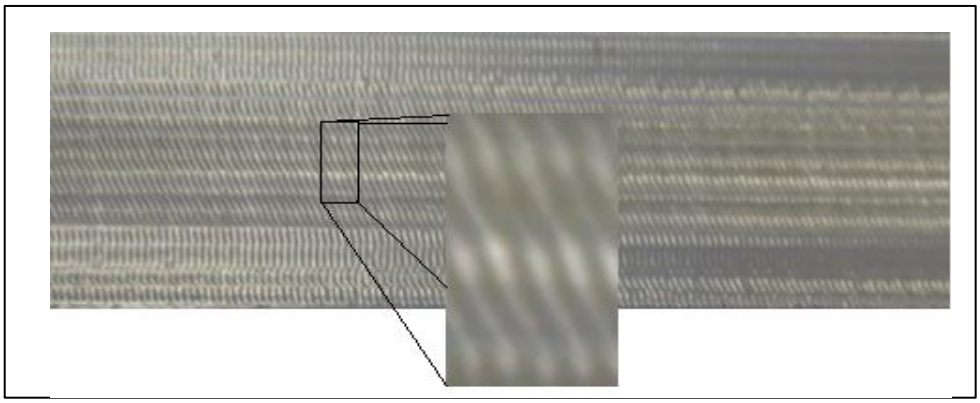
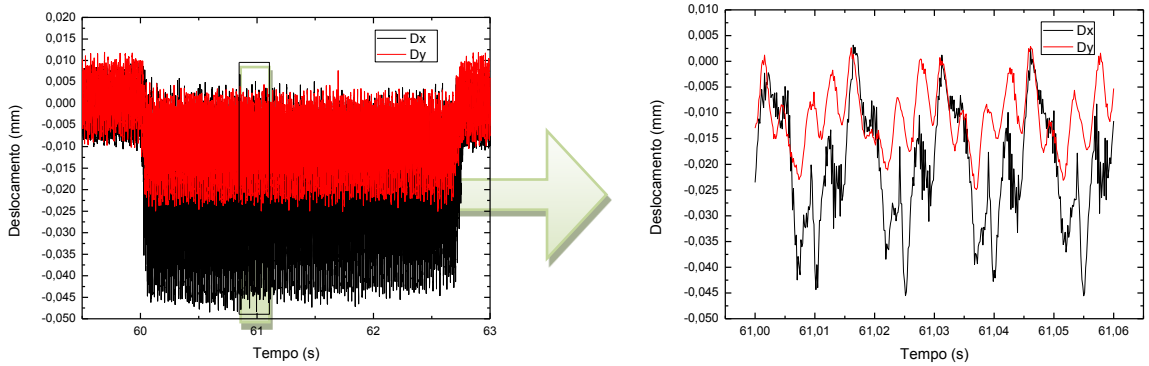


Figura IV.41: Textura superficial apresentada no ensaio 1

O teste 11 empregou a profundidade axial corte de 10 mm. Neste caso, a força máxima de corte foi de 75N no eixo x e a superfície usinada apresentou mesmo aspecto da qualidade superficial de usinagem obtida no teste 1, que empregou profundidade de corte de 12mm que foi acompanhado de ruído elevado confirmando a presença do *chatter*. Sendo assim, acredita-se que realmente ocorreu o fenômeno *chatter* no teste 11.

O mesmo foi observado no gráfico dos deslocamentos ilustrado nas figuras IV. 42 do teste nº11 onde o deslocamento da ferramenta medida foi de aproximadamente 0,045 mm no eixo x paralelo ao sentido de avanço. O desvio de deslocamento apresentou pouca diferença em relação ao teste nº1.



(a) Todo sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV.42: Variação do deslocamento nos eixos x e y teste11

O deslocamento foi observado em quatro rotações no instante de avaliação e apresentou deslocamento de aproximadamente de 0,045 mm oscilações com as mesmas características.

Em relação ao deslocamento rotacional da ferramenta, foi observada uma diferença na sinuosidade da órbita e maior oscilação da ferramenta, embora tenha ocorrido redução do diâmetro rotacional como indicado na figura IV.43.

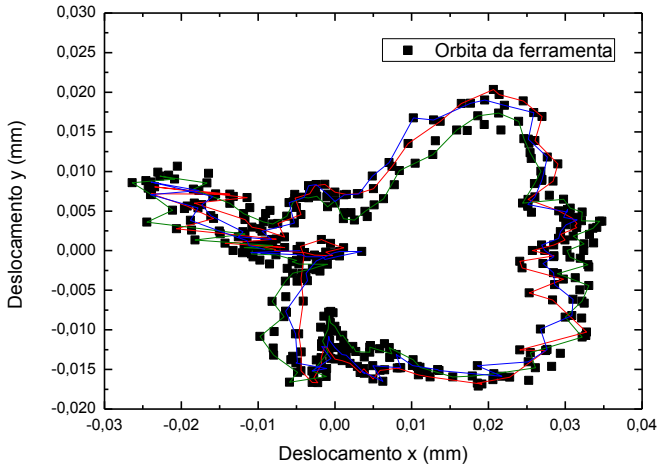


Figura IV.43: Representação do efeito *chatter* em 4ciclos consecutivos teste11

O aspecto da superfície usinada do corpo de prova, após realização do teste11, é apresentado com detalhe e a rugosidade produzida comprova a ocorrência do efeito *chatter*. A qualidade superficial encontrada durante inspeção foi de 2,98μ, como mostra a figura IV. 44.

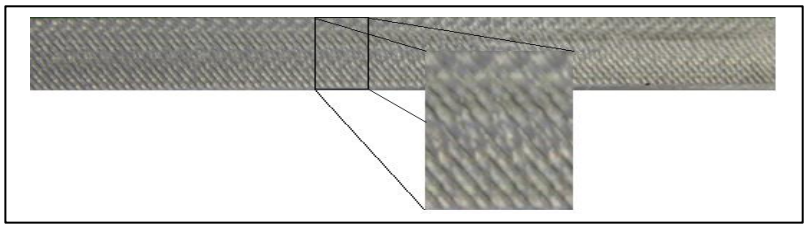


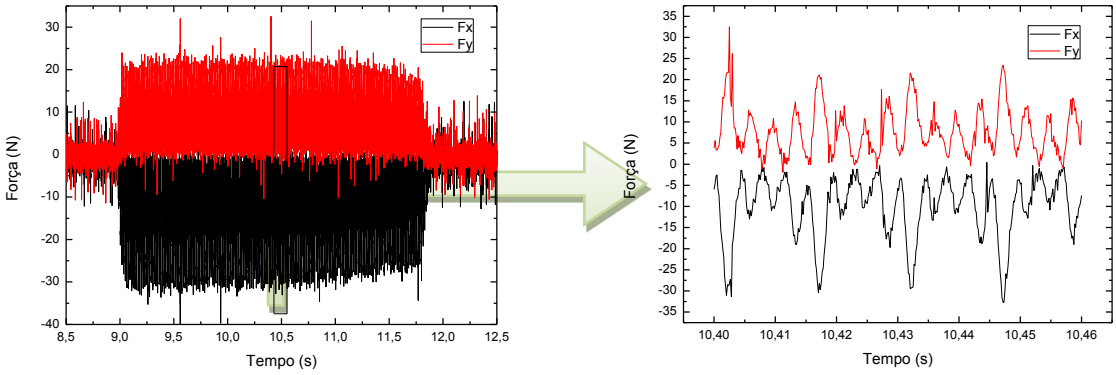
Figura IV. 44: Detalhe da superfície produzida no teste 11.

Na realização dos testes que empregaram profundidade de corte maior que 4mm observou-se as principais características do fenômeno *chatter,* ruído elavado, vibrações no sistema ferramenta-fixação-máquina e acabamento áspero da superfície usinada. Segundo ALTINTAS *et al*.(2006), em fresamento de topo, com ferramenta de ponta esférica com raios ou de ponta plana, é possível observar a ocorrência de *chatter* quando a superfície usinada apresenta rugosidade áspera e um ruído elevado que não corresponde à frequência de passagem dos dentes da fresa, mas se aproximava a uma das frequências naturais de vibração.

IV.3.1 Experimento Sem a Presença do Efeito Chatter

O teste 17 que empregou a profundidade axial corte de 2 mm e com os mesmos parâmetros de corte utilizados em todos os experimentos apresentou forças máximas de até 35 N no eixo x e qualidade superficial de usinagem melhor do que as obtidas nos demais testes. Na execução do experimento não foi observada a presença de ruído e as marcas deixadas

pela ferramenta foram perpendiculares ao sentido de avanço o que não é característico do fenômeno *chatter*. A figura IV. 45 ilustra a variação das forças para o teste 17.

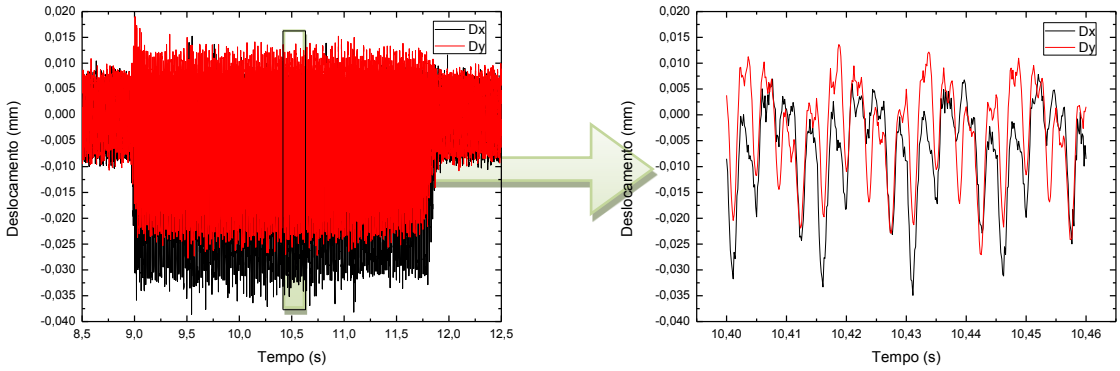


(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV. 45: Variação das forças durante o corte no teste nº 17.

O fenômeno *chatter* no teste 17 não foi comprovado. Os gráficos acima mostram as forças de corte com características distintas as dos experimentos que apresentaram *chatter*. A força máxima encontrada nesse período foi de aproximadamente 35 N a menor encontrada nos experimentos.

Observou-se que o deslocamento da ferramenta foi aproximadamente 35% menor que o teste nº1 que apresentou o maior desvio. O valor do deslocamento encontrado foi de 0,035 mm no eixo x paralelo ao sentido de avanço. Os gráficos dos deslocamentos ilustrados na figura IV. 45 do teste 17 mostram o comportamento da ferramenta durante o experimento.



(a) Todo o sinal (b) Detalhe com 4 ciclos

Figura IV. 46: Variação dos deslocamentos durante no teste nº 17.

O deslocamento observado em quatro ciclos, no instante em que foi avaliado, apresentou deslocamento máximo de aproximadamente de 0,030 mm e oscilação distinta aos demais testes realizados que apresentaram *chatter*, como pode ser visto na figura IV.38b.

Em relação ao deslocamento rotacional da ferramenta, foi observada uma diferença na sinuosidade da órbita, menor oscilação da ferramenta e redução do diâmetro rotacional como indicado na figura IV.46. Contudo, observou-se que o deslocamento rotacional da ferramenta foi maior no eixo x (sentido do avanço) em todos os experimentos realizados no estudo desta pesquisa.

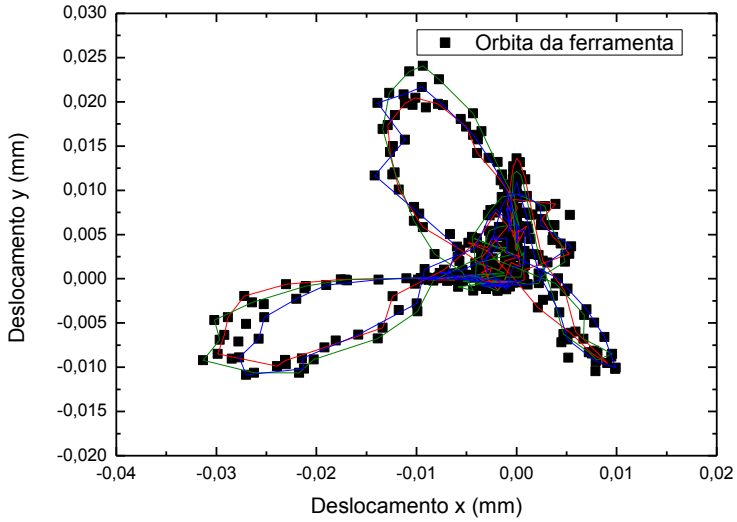


Figura IV.47: Ausência do efeito chatter em 4 ciclos consecutivos no teste 17.

O aspecto da superfície usinada do corpo de prova, após realização do teste 17, é apresentado com detalhe e a rugosidade produzida comprova não se tratar da ocorrência do efeito *chatter*. Observou-se que as marcas deixadas pela ferramenta são diferentes, pois nesse caso elas se apresentaram de forma perpendicular ao eixo de avanço da peça. Quanto às marcas encontradas na ocorrência do fenômeno *chatter*, essas se apresentaram de forma inclinada ao eixo. A qualidade superficial encontrada durante inspeção foi de 1,09μ, como mostra a figura IV.48.

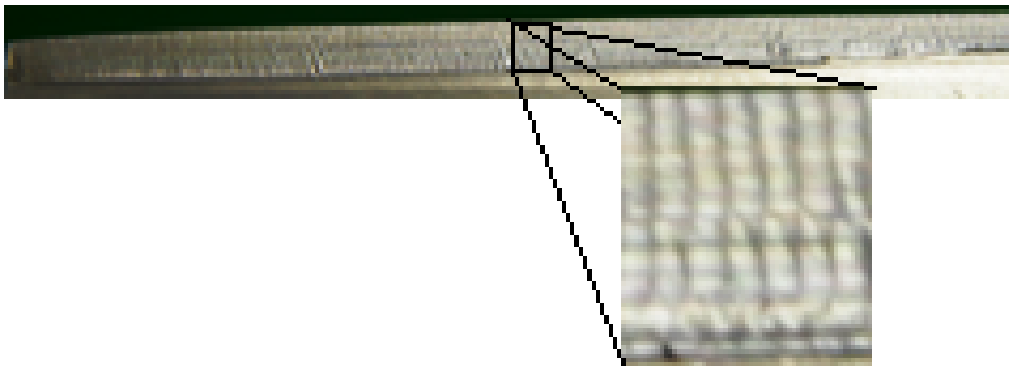


Figura IV.48: Detalhe da superfície produzida no teste nº17.

IV.4 Comparação de Resultados e Discussão

O propósito da comparação é evidenciar a presença do *chatter*, bem como indicar regiões em que não ocorra o fenômeno.

Como forma de comparação entre os resultados, com e sem o fenômeno *chatter*, foram relacionados os diâmetros da trajetória da ferramenta encontrados nos experimentos com as variações de profundidades de corte com o objetivo de identificar a ocorrência do evento, objeto desta pesquisa. A figura abaixo ilustra a região de instabilidade da ferramenta que gera variação no diâmetro.

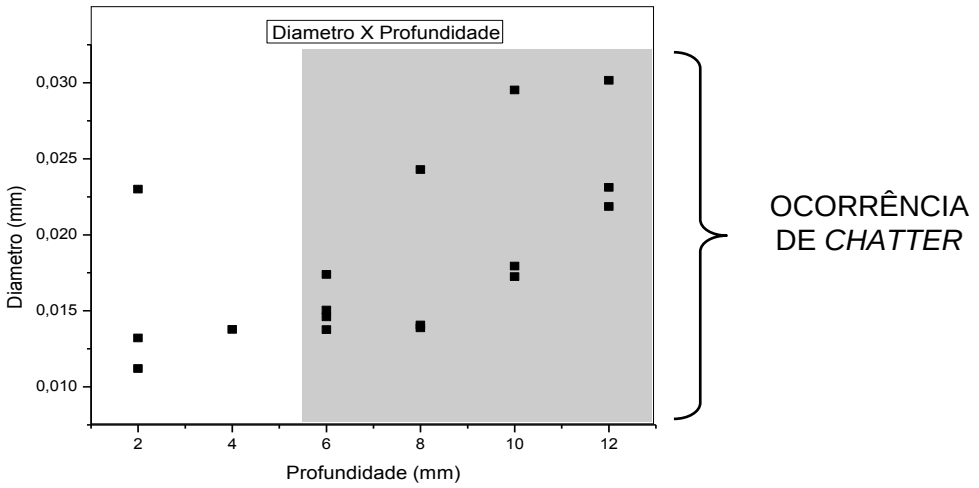


Figura. IV.49: Variação do diâmetro da trajetória da ferramenta em função da profundidade.

A rugosidade superficial dos corpos de prova também foi influenciada pelo aumento da profundidade de corte possibilitando a identificação do fenômeno *chatter*. Para caracterizar essa influência, foi elaborado um gráfico para indicar com clareza esta relação.

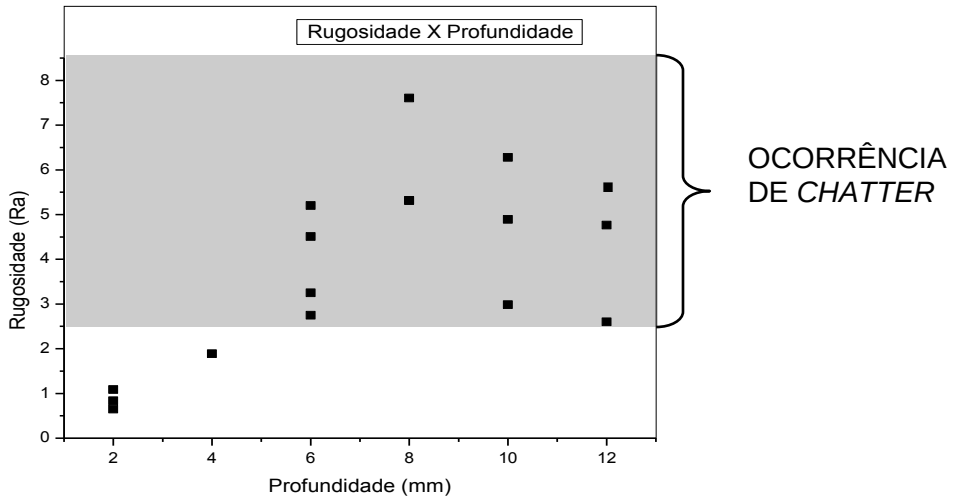


Figura IV.50: Variação da rugosidade em função da profundidade.

Foram realizados testes para comprovação da eficiência da medição dos sensores deslocamento nos eixos x e y. O gráfico da figura 51 foi obtido a partir do deslocamento sucessivo dos sensores com intervalos de 0,07mm nos eixos x e y medidos no display da fresadora em um alvo fixado na mesa da máquina ferramenta. A precisão do display é de 0,001mm em ambos os eixos o que garante a confiabilidade do ensaio.

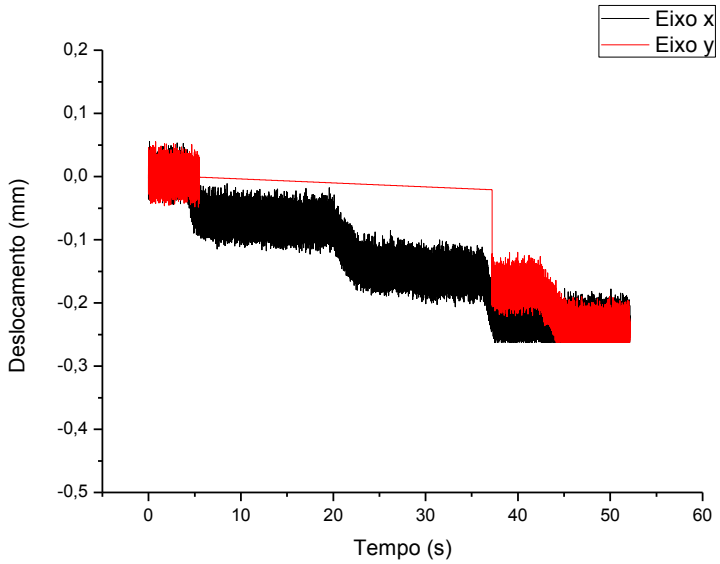


Figura IV.51: Variação do sinal de deslocamento

Na medição dos deslocamentos da ferramenta foram encontradas variações dos sinais que dificultam a obtenção de um sistema de caracterização do *chatter*.

CAPÍTULO V. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir dos resultados apresentados podem-se destacar as seguintes conclusões:

• A manutenção de todos os parâmetros de corte a exceção da profundidade de corte, que foi reduzida, possibilitou a retirada do processo de uma região com fenômeno *chatter* para uma região sem vibrações.

• Os ensaios com maiores forças de corte apresentaram *chatter*, uma vez que tinham maiores profundidades de corte. Não foi possível identificar um padrão de oscilações que caracterizasse o sinal de *chatter*.

• Não foi possível, com os dados obtidos neste estudo, fazer uma relação entre o sinal do deslocamento e o efeito *chatter*

• Os resultados de rugosidade (Ra), de ruído e a aparência da superfície foram mais eficientes para identificar o efeito procurado. A rugosidade superficial poderia ser usada como parâmetro de identificação da ocorrência do fenômeno *chatter*, para este caso, para valores acima de 2,5 μm.

Sugestões para Trabalhos futuros

- Realizar a metodologia aqui apresentada utilizando ferramentas com passo variável, pois esta ferramenta apresentaria menor incidência de *chatter*.
- Como o rolamento e a lubrificações influenciam a dinâmica da máquina, pode ser realizados experimentos avaliando esta influência.
- Foi utilizada neste trabalho uma fresa de acabamento. Como sugestão pode-se realizar o mesmo estudo com fresas específicas para desbaste.

Referências Bibliográficas

ABU-ZAHRA N. H. And LANGE, J. H., “Tool Chatter Monitoring in Turning Operations Using Wavelet Analysis of Ultrasound Waves”: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 20, pp 248-254, 2002

AGOSTINHO, O. L. RODRIGUES, A. C. S. LIRANI, J. *Tolerância, ajuste, desvios e análise de dimensões***.** Editora Blucher, 1977.pp. 113-220.

ALTINTAS, Y., LEE P., “A General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Milling” *Annals of the CIRP* vol. 45, n. 1, pp.59-64, Jan. 1996.

ALTINTAS, Y, J. H. Ko, “Chatter Stability of Plunge Milling”, Britiish Columbia, Vancouver, Canadá, 2006

ALTINTAS, Y. “Manufacturing automation *Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC” Design*. Cambridgen Press, 2000.

ARAUJO, A. C.; SILVEIRA, J. L.; MARTIN, B.G. Jun; SHIV, G. Kapoor; RICHARD DeVor “A model for thread milling cutting forces”- *International Journal of Machine Tools & Manufacture* v.46, pp. 2057–2065, 2006

ARAUJO, A. C. M.; *Estudo das forças de usinagem no fresamento de topo***.** Tese de Mestrado (Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro, RJ – Brasil, 1999

ARAUJO, A. C. M.; *Análise da pressão específica de corte nas operações de usinagem***.** Tese de doutorado (Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro, RJ – Brasil, 2001

BUDAK, E., ALTINTAS, Y.; “Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling*”*. *Annals of the CIRP*, 44(1):357-362, 1995.

BUDAK, E.; et. al., “Prediction of workpiece dynamics and its effects on chatter stability in milling”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* v.61, pp. 339–342, 2012.

CASTILHO, A. V., “Experiment and Numerical Analysis of End Milling Tools Dynamic Parameters”. XXI Congresso de Engenharia Mecânica, Natal, RN, Brasil, 2011.

COELHO, R.T. *et al. Teoria da Usinagem dos Materiais***.** Editora Blucher, 2012, pp.15-301

DINIZ, A E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. (2010) *Tecnologia da Usinagem dos Materiais***,** 7ª edição, São Paulo: Artliber Editora, 2010. 1v. p. 214-246.

DORMER. Manual técnico. Disponível em <http://www.dormertools.com>. Acesso em 19 nov. 2011.

FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos Metais**,** São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda. 1977. 1 v. pp. 30-754.

GUENZA, J. E.; *Análise do desempenho do fresamento em altas velocidades de corte do ferro,* Dissertação de M.Sc., UTFPR/PR/ PPGEM, Curitiba, PR, Brasil,2008.

HUO, D. and CHENG, K. “A dynamics-driven approach to the design of precision machine tools for micro-manufacturing and its implementation perspectives”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*,. v. 222, pp. 1–13. 2008

JEONG H. K. and KAH C. S., “Chatter Prediction based on Frequency Domain Solution in CNC Pocket Milling”: *International Journal of Precision, Engineering And Manufacturing*, v.10, pp.19-25. 2004

KAKINUMA,Y.; SUDO,Y,; AOYAMA,T; “Detection of *chatter* vibration in end milling applying disturbance observer” Annals-Manufacturing Technology, v.60, pp. 109-112, 2011

KIM, S. J., LEE, H. Ul L., CHO, D. W., “Prediction of chatter in NC machining based on a dynamic cutting force model for ball end milling”: *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 47, pp.1827–1838. 2007

KLINE, W. A., DEVOR, R. E., ZDEBLICK W. J. “A mechanistic model for the force system in end milling with application to machining airframe strutures”. *Proc. of the 8th North American Manufacturing Res. Conf.,* 8. 297, 1980.

KLINE, W. A., DEVOR, R. E. and LINDBERG J.R. “The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts, to appear”. *Int. J. Mach Tool* Des. Res. Printed in Great Britain, v. 22, pp 7-22, 1982.

KLINE, W. A. and DEVOR, R. E.. “The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling”. *Int. J. Mach Tool* Des. Res. Printed in Great Britain, v. 23, Nº2/3, pp 123-140, 1983.

MADOLIAT, R., HAYATI, S.; GHALEBAHMAND, G. A., “Investigation of *chatter* suppression in Slend EndMill via a Frictional Damper.” ”: Sharif University of Technology (2011) pp1069–1077.

QUINTANA, G., CIURANA, J., “Chatter in Machinning Processes: A Review**”.** *International Journl of Machine Tools & Manufactore*, v.51, pp 363-376, 2011.

RAO, S. S.; Vibrações mecânicas/ Singiresu S. Rao; revisor técnico José Juliano de Lima Junior; tradução Arlete Simille.- São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008, pp.15-100.

SANDVIK CORMANT. Manual técnico. Web site: *http://www.coromant.sandvik.com.br*, visitado em 30 de março de 2010.

SANTOS, R. G.; *Desenvolvimento de um método para comparar os limites de estabilidade dinâmica em maquinas-ferramentas utilizando o diagrama de lóbulos***.** Tese de Mestrado (Engenharia de Produção). Universidade de São Paulo – São Carlos, SP – Brasil, 2011

SIMSA N. D., MANN B., HUYANAN S., “Analytical Prediction of Chatter Stability for Variable Picth and Variable Helix Milling Tools**”.** *Journal of Sound and Vibration*, v.317 pp. 664 – 686 (2008)