

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**FELIPE KLEIN FIORENTIN**

**INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA NA RUGOSIDADE DE UMA PEÇA  
FRESADA**

**JOINVILLE – SC**

**2014**

**FELIPE KLEIN FIORENTIN**

**INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA NA RUGOSIDADE DE UMA PEÇA  
FRESADA**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Joel Martins Crichigno Filho

**JOINVILLE – SC**

**2014**

**FELIPE KLEIN FIORENTIN**

**INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA NA RUGOSIDADE DE UMA PEÇA  
FRESADA**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Banca Examinadora**

Orientador:\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Joel Martins Crichigno Filho  
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro:\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Eduardo Lenz Cardoso  
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro:\_\_\_\_\_

Mestrando Bruno Guilherme Christoff  
Universidade do Estado de Santa Catarina

**Joinville, 02/12/2014**

Dedico este trabalho primeiramente à minha família por todo o apoio dado durante minha jornada até este instante e aos meus amigos que têm me acompanhado durante diversos momentos de minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe, Maria Assunta Klein Fiorentin, pelo apoio incondicional e suporte à minha qualificação profissional.

Ao Prof. Dr. Joel Martins Crichigno Filho por ter me dado a primeira oportunidade voltada à pesquisa e pelo suporte valioso aos projetos conjuntos, bem como à liberdade e incentivo à sugestões e novas ideias. Além da disposição de toda a infraestrutura do Laboratório de Dinâmica da Usinagem para tornar possível a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Thiago Antônio Fiorentin da Universidade Federal de Santa Catarina, o qual acompanhou o procedimento experimental e acresceu o trabalho com sugestões para tal procedimento.

Ao colega e bolsista de iniciação científica Thiago Ponciano, o qual foi vital para a realização dos experimentos no laboratório.

À Júlia Beatriz Scarduelli Maccarini, por todo incentivo e apoio.

Por fim, à Universidade do Estado de Santa Catarina e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento, pelas oportunidades de aplicação dos conhecimentos obtidos na universidade através da iniciação científica.

## RESUMO

FIORENTIN, Felipe K. **Estudo da Influência da Frequência de Ressonância na Rugosidade de uma Peça Fresada**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica – Área: Usinagem e Vibrações) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2014.

Em aplicações práticas relacionadas à usinagem de uma peça, a frequência de ressonância é sempre um parâmetro importante e deve ser considerado. É inerente à todo o processo de usinagem a remoção de material, portanto variações na massa da peça existem. Além disso como altera-se a geometria das peças, variações na rigidez em determinada direção também estão presentes. Estes dois parâmetros determinam a frequência natural de um objeto e aliados ao fator de amortecimento, determinam também a frequência de ressonância. Num processo de fresamento com rotação da ferramenta com velocidade constante, pode-se atingir em distintos momentos valores de excitação próximos a frequência de ressonância da peça (a qual está sempre mudando com a remoção de material), esta condição deve ser evitada, uma vez que uma peça excitada em sua frequência de ressonância tende a atingir grandes amplitudes de vibração, as quais podem ser catastróficas para o processo, resultando em um péssimo acabamento superficial e em situações mais críticas, em falhas catastróficas da máquina e ferramentas. Para evitar excitações nestas condições, a simulação numérica se mostra um processo válido a fim de prever as frequências de ressonâncias e o comportamento de determinada peça sob certas condições de excitação e de apoio. Busca-se também estimativas confiáveis da rugosidade da peça em diferentes locais.

**Palavras-chave:** Frequência Natural. Rugosidade. Ressonância. Vibração Forçada. Fresamento. Ansys.

## ABSTRACT

FIORENTIN, Felipe K. **Study of the Resonance Frequency Influence on Roughness of a Milled Work-Piece.** 2014. Course completion assignment (Mechanical Engineering – Area: Milling and Vibrations) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2014.

During the machining of a component, it is an always important parameter, and it should be considered. In every machining process there is always material removal, consequently, the mass of the component will change along the process; also, as the geometry is changing too, the stiffness of the workpiece will not be constant as well. The natural frequency of a component is a function of both mass and stiffness, so this frequency will change too, the resonance frequency will also switch, once it is a function of those both parameters and the damping ratio. In a milling process, with a constant rotation frequency, there is a possibility of the excitation frequency match with the resonance frequency of a component in several times during the process (this frequency is always changing once there is material being removed). The condition where both frequencies are close to each other must be avoided, because of the workpiece will oscillate with high vibration amplitudes, those may be catastrophic, they can cause a bad surface finish, or they can even cause failures in both machine and tool. As the frequency of excitation must be different from the natural frequencies, the numerical solution can help, it can predict the resonance frequency of the component in each step of the milling, and it can predict how the component under machining process will behave during some excitation and fixture conditions. The roughness of the workpiece can be predict in some places, once it is expected that when the excitation frequency is close enough to the resonance frequency, the superficial finish will be very poor.

**Key-words:** Natural Frequency. Roughness. Resonance. Forced Vibration. Milling. Ansys

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Zonas de cisalhamento .....	20
Figura 2.2 - Transferência de calor <i>versus</i> velocidade de corte .....	21
Figura 2.3 - Classificação de materiais para ferramentas com geometria definida ...	23
Figura 2.4 - Tenacidade <i>versus</i> dureza.....	24
Figura 2.5 - Dureza a quente para materiais de ferramentas de corte .....	25
Figura 2.6 - Fresamento concordante .....	27
Figura 2.7 - Fresamento Discordante .....	28
Figura 2.8 - Tipos de Fresas Frontais .....	29
Figura 2.9 - Fresamento Concordante/ Discordante .....	30
Figura 2.10 - Componentes das forças de usinagem nos processos de fresamento	32
Figura 2.11 – Decomposição das forças de fresamento em dinamômetro Kistler.....	33
Figura 2.12 – Peças diferentes, porém com mesma rugosidade média.....	36
Figura 2.13 – Valores de Ra atingíveis para diferentes processos de fabricação.....	37
Figura 3.1 – Apoios da viga.....	41
Figura 3.2 – Linha elástica .....	42
Figura 3.3 – Apoios da viga.....	43
Figura 3.4 – Diagrama de um sistema amortecido com força externa .....	45
Figura 3.5 – Diagrama vetorial para a vibração forçada com amortecimento .....	46
Figura 4.1 - Elemento de viga .....	47
Figura 4.2 - Malha da peça com 0,012m de distancia usinada .....	48
Figura 5.1 - Fixação da viga no centro de usinagem.....	50
Figura 5.2 - Exemplo de amostra após o processo de fresamento .....	51
Figura 5.3 - Rugosidades média de uma amostra.....	53
Figura 6.1 – Distancia usinada e deflexão .....	54
Figura 6.2 – Frequências naturais versus distância usinada.....	55
Figura 6.3 – Resposta em frequência para as diferentes estruturas .....	57
Figura 6.4 – Deslocamentos versus frequência de excitação .....	59
Figura 6.5 – Local de aplicação das forças e captura dos deslocamentos .....	59
Figura 6.6 – Comparação resultado analítico versus da primeira geometria .....	60
Figura 6.7 – Comparação resultado analítico versus da segunda geometria.....	61

Figura 6.8 – Comparação resultado analítico versus da terceira geometria .....	62
Figura 6.9 – Amostra 1, usinada a 5410 rpm .....	63
Figura 6.10 – Amostra 2, usinada a 6840 rpm .....	64
Figura 6.11 – Amostra 3, usinada 8910 rpm .....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Faixa de variação de alguns parâmetros.....	39
Tabela 4.1 - Número de elementos para cada geometria .....	48
Tabela 5.1 - Número de elementos para cada geometria .....	51
Tabela 6.1 - Propriedades físicas da viga .....	56
Tabela 6.2 - Rigidez e massa para as diferentes geometrias.....	56
Tabela 6.3 - – Geometrias com a maior amplitude para determinada rotação da fresa .....	58
Tabela 6.4 - Rugosidades da amostra 1 .....	62
Tabela 6.5 – Rugosidades da amostra 2.....	63
Tabela 6.6 - Rugosidades da amostra 3 .....	64

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f_z$	Avanço por dente
$V_c$	Velocidade de corte
$d$	Diâmetro da ferramenta
$n$	Rotação da ferramenta
$V_f$	Velocidade de avanço
$f$	Avanço por rotação
$z$	Número de dentes
$f_c$	Avanço de corte
$\varphi$	Direção de corte no fresamento
$a_p$	Profundidade ou largura de usinagem
$a_e$	Penetração de trabalho
$F_u$	Força de usinagem
$F_t$	Força ativa
$F_p$	Força passiva
$F_c$	Força de corte
$F_{ap}$	Força de apoio
$V_e$	Velocidade efetiva
$P$	Ângulo de direção de avanço
$F_u$	Força de usinagem
$F_x$	Força na direção x
$F_y$	Força na direção y
$R_a$	Rugosidade média
$l_m$	Comprimento da superfície medida
$y(x)$	Amplitude da superfície
$K$	Rigidez da peça
$F$	Força Externa
$v$	Deflexão
$E$	Módulo de elasticidade
$I$	Momento de inércia
$M$	Momento fletor
$L$	Comprimento da viga
$\omega_n$	Frequência Natural

$m$	Massa
$\omega_d$	Frequência natural amortecida
$c$	Coefficiente de Amortecimento
$\omega$	Frequência de excitação
$\phi$	Ângulo de fase

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIORÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	FRESAMENTO.....	18
2.1.1	<i>Mecanismo de formação de cavaco.....</i>	<i>19</i>
2.1.2	<i>Grandezas no processo de usinagem.....</i>	<i>21</i>
2.1.3	<i>Ferramentas de corte .....</i>	<i>22</i>
2.1.4	<i>Fluido de corte para fresamento.....</i>	<i>25</i>
2.1.5	<i>Fresamento concordante e discordante .....</i>	<i>27</i>
2.1.6	<i>Fresamento frontal .....</i>	<i>29</i>
2.2	FORÇAS DE CORTE.....	30
2.3	FATORES DE INFLUÊNCIA NO ACABAMENTO SUPERFICIAL.....	34
2.3.1	<i>Rugosidade .....</i>	<i>35</i>
2.3.2	<i>Parâmetros influentes na rugosidade .....</i>	<i>37</i>
<b>3</b>	<b>ABORDAGEM ANALÍTICA .....</b>	<b>41</b>
3.1	APOIOS.....	41
3.2	RIGIDEZ DA PEÇA.....	42
3.3	FREQUÊNCIAS NATURAL E NATURAL AMORTECIDA .....	44
3.4	VIBRAÇÃO HARMÔNICA FORÇADA .....	44
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÃO .....</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>49</b>
5.1	MEDIÇÃO DE FREQUÊNCIA NATURAL AMORTECIDA.....	50
5.2	FRESAMENTO DAS AMOSTRAS.....	50
5.3	MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE .....	52
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>54</b>
6.1	DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DA PEÇA E PROFUNDIDADE DE CORTE .....	54
6.2	RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA SOLUÇÃO ANALÍTICA .....	55

6.3	SIMULAÇÃO .....	58
6.4	ACABAMENTO SUPERFICIAL DO PROCESSO EXPERIMENTAL E COMPARAÇÕES .....	62
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>66</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os processos de manufatura são a base econômica de uma nação industrializada, de maneira geral o grau de desenvolvimento econômico de um país pode ser determinado pelo seu nível de industrialização e inovação. Nos últimos anos, novas tecnologias foram desenvolvidas e agregadas aos processos de fabricação, principalmente sistemas ligados ao controle do processo e sua automação. A crescente demanda de produtos industrializados torna obrigatório a qualquer indústria melhorar continuamente seus processos, diminuindo os tempos de fabricação e o número de peças defeituosas.

De acordo com Wi Grzesik (2008), o processo de usinagem vem recebendo uma grande atenção nos últimos anos, apesar de ser um procedimento conhecido por ser de elevado custo, ele muitas vezes se faz necessário. Peças fundidas, conformadas ou obtidas por outros processos recorrem à usinagem a fim de obter-se um acabamento superficial mais refinado. Logo, o processo de usinagem torna-se presente num gigantesco número de produtos, mesmo que utilizado apenas como processo de acabamento.

A demanda por componentes com elevadas exigências de tolerâncias geométricas, dimensionais e de qualidade superficial, as quais pareceriam inalcançáveis poucos anos atrás. O atendimento desta demanda faz-se possível pela evolução nos processos de fabricação. Segundo Stoeterau et al. (1999), componentes cujos custos de fabricação, até algum tempo eram proibitivos, hoje são produzidos em série, a custos relativamente baixos, isto se deve em grande parte aos avanços nos métodos de controle de fabricação. Neste contexto de tolerâncias mais estreitas, a usinagem é o processo dominante para obterem-se peças com elevado acabamento superficial.

É cada vez mais comum a tentativa de prever o resultado de determinado processo, eliminando a necessidade de realizar fisicamente tal procedimento para descobrir se o resultado será satisfatório ou não. O maior incentivo para estes esforços é sem dúvida o aspecto financeiro, é extremamente inviável economicamente realizar determinado procedimento e por fim observar que a peça fruto deste, está com algum parâmetro fora da especificação. Para casos mais simples, cálculos analíticos são capazes de prever alguns comportamentos. Entretanto, geralmente a indústria apresenta problemas de geometria e natureza

relativamente complexos, inviabilizando procedimentos analíticos, como solução emprega-se a simulação numérica.

A simulação e o modelamento apresentam-se como fortes tendências nas áreas de pesquisa científica, tecnológica e industrial, devido às vantagens que podem oferecer em termos de redução de custos e tempo para conclusão de um projeto, características já citadas anteriormente.

Domingos et al. (2002) define, simular um processo de usinagem consiste em representá-lo e analisá-lo numericamente com o auxílio de um modelo matemático, este deve ser idealmente o mais próximo possível do real. Obviamente que tornar uma simulação cada vez mais assertiva envolve muitas vezes aumento dos tempos de simulação, já que o número de equações e fenômenos envolvidos são maiores (PIMENTEL, 2011). Cabe ao engenheiro definir as simplificações necessárias, quantificando quais fenômenos são realmente significantes em uma simulação.

Entretanto, a simulação numérica, assim como qualquer outro método científico, necessita ter seus resultados validados. No caso da usinagem, o procedimento experimental é a forma para tal validação. Este experimento deve conter os mesmos parâmetros que a simulação, a fim de tornar ambas equivalentes e conseqüentemente com resultados semelhantes. Os parâmetros mais comuns a serem levados em conta na usinagem são a rotação da peça ou ferramenta, profundidade de corte, direção da usinagem e avanço.

Sendo necessário um procedimento experimental para validar os resultados analíticos e provenientes da simulação numérica, cogitou-se o processo de torneamento ou fresamento. Optou-se pela operação de usinagem de fresamento, uma vez que esta seria possível ser realizada com os recursos disponíveis da universidade.

## 1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho consiste na estimativa do acabamento superficial de uma peça, por meio das deflexões de uma viga engastada, submetida a um carregamento cíclico. Por se tratar de um processo de remoção de material e alteração da geometria, a cada instante que a fresa avança pela peça, tem-se novos parâmetros que descrevem o sistema, por exemplo, a rigidez da peça é alterada,

bem como sua massa, conseqüentemente a frequência natural e de ressonância também são alteradas a cada instante de tempo.

O processo de usinagem, por envolver efeitos da temperatura, transferência de calor, excitação dinâmica, contato e plasticidade, é extremamente difícil de ser simulado. Tópicos como acoplamento termomecânico, presente na plasticidade, assim como o contato são abordados de maneira superficial na graduação de Engenharia Mecânica.

Este trabalho tem como objetivo principal estimar em que ponto da peça ocorrerá o pior acabamento superficial para determinada frequência de excitação, almeja-se prever tal comportamento na rugosidade utilizando conceitos básicos de usinagem, vibração e mecânica dos sólidos.

Deseja-se, através de uma discretização, tomando-se geometrias diferentes em instantes de tempo variados, simular o processo de fresamento de topo em uma viga. Caso tal discretização não fosse efetuada, uma simulação no domínio do tempo, envolvendo todo o processo de fresamento, bem como os efeitos da plasticidade, geração e transferência de calor e contato seria necessária para estimar a rugosidade.

## 2 REVISÃO BIBLIORÁFICA

Este capítulo apresenta publicações (trabalhos da literatura técnica) que abordam os tópicos de interesse deste trabalho. Com essa breve revisão bibliográfica tentou-se estabelecer um panorama histórico da evolução do conhecimento científico no que diz respeito ao assunto em estudo.

### 2.1 FRESAMENTO

O processo de fresamento consiste em operação intermitente de usinagem que utiliza uma ferramenta de corte com um ou mais dentes, denominada fresa. A fresa é fixada no eixo árvore da fresadora, enquanto a peça que é fixada na mesa, a mesa move-se linearmente, com a ferramenta de corte atuando sobre a peça (ALTINTAS, 2000, apud BANIN, 2009). O fresamento também pode ser definido como uma operação cuja ferramenta, possui arestas cortantes dispostas em torno de um eixo, e que executa a retirada do material através do movimento de corte provido pela rotação da mesma sobre seu eixo. O movimento de avanço é feito geralmente pela mesa da máquina.

O processo de fresamento tem algumas características bem definidas, como por exemplo, utilizar ferramenta multi-cortante provida de arestas cortantes dispostas ao redor de um eixo. Também tem um movimento característico de rotação da ferramenta ao redor de seu eixo, permitindo, assim que cada uma das arestas cortantes (dentes da fresa) retire parte de material separadamente. Normalmente, o movimento de avanço, que permite o prosseguimento da operação é feito pela mesa da máquina, onde a peça está fixada, este movimento obriga a peça passar sob a ferramenta que lhe dá a forma e dimensão desejada. Destacam-se também o grande número de ferramentas distintas multi-cortantes, tal variedade confere a esta operação um caráter de versatilidade das várias superfícies necessárias numa peça.

Comparando com as outras operações de usinagem, pode-se dizer que o fresamento é o mais versátil na geração de superfícies planas não de revolução. Isso se deve principalmente à grande variedade de geometrias que suas ferramentas podem apresentar, tornando possível, por consequência, a geração de um número muito vasto de superfícies (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001 apud BANIN, 2009).

Referente ao aspecto industrial, o fresamento apresenta outra vantagem em relação aos demais processos de usinagem, este apresenta alta produtividade aliada a um bom acabamento. Tal combinação de fatores deve-se principalmente ao fato de utilizar ferramentas que podem apresentar um número elevado de arestas de corte, as mesmas proporcionam um avanço de mesa alto, e conseqüentemente, uma alta produtividade. Como o número de arestas é alto, pode-se utilizar um avanço por dente ( $f_z$ ) pequeno, que a produtividade ainda será alta e manterá um acabamento superficial satisfatório.

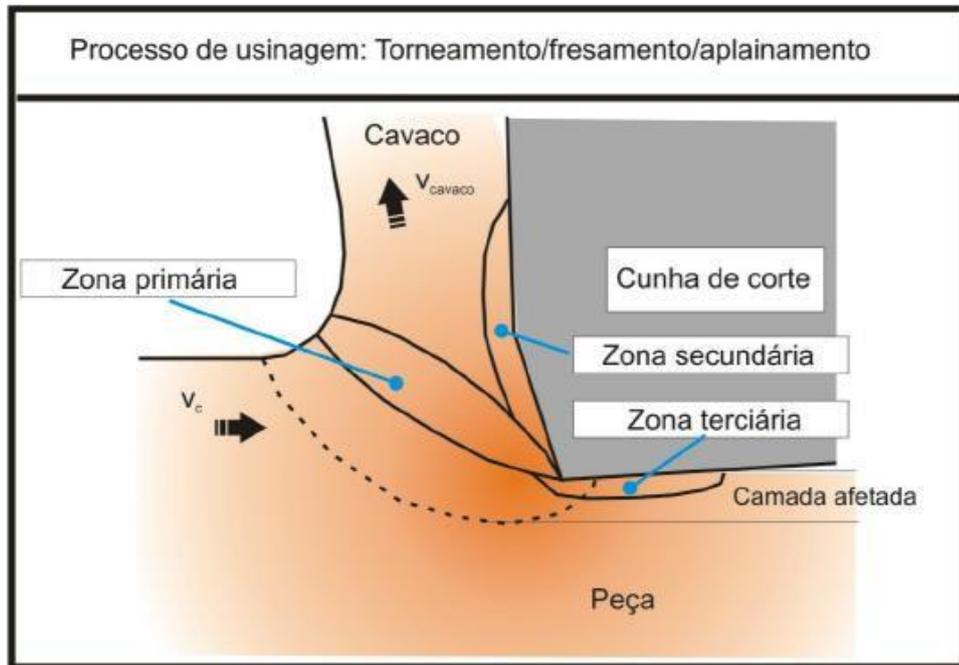
### **2.1.1 Mecanismo de formação de cavaco**

Observar a forma do cavaco pode trazer informações muito úteis sobre o processo de usinagem que não são tão facilmente medidas, como a força de corte e os efeitos da plasticidade, por exemplo. Dentro destes parâmetros de usinagem, destaca-se a profundidade de usinagem, esta tem um efeito dominante na estabilidade do processo, na energia utilizada no processo e na determinação da formação de cavaco (NING; RAHMAN; WONG, 2001 apud BANIN, 2009). Este também tem influência em diversos outros fatores ligados ao processo de usinagem, tais como o desgaste da ferramenta e a alteração da integridade superficial do material trabalhado (ZEILMANN et al, 2004 apud BANIN, 2009).

Um processo estável de usinagem tem uma relação direta com uma boa geração de cavaco (descontínuo e com forma mais uniforme). Para que isto ocorra, faz-se necessário utilizar a melhor combinação de variáveis, dentre elas o material e forma da ferramenta, a rotação da árvore da máquina juntamente com modificações no avanço, proporcionando uma profundidade de usinagem máxima.

Sabe-se que quase a totalidade do trabalho mecânico na usinagem é convertido em calor, sendo três as regiões geradoras de calor conhecidas, denominadas como zona primária, secundária e terciária, que podem ser vistas na Figura 2.1. Na zona primária ocorre a deformação e separação de cavaco devido ao atrito do mesmo com a superfície de saída; esta zona é considerada a principal geradora de calor, seguida pela zona secundária. Por fim tem-se a zona terciária, que gera calor devido às deformações da peça e seu atrito contra a superfície de folga da ferramenta.

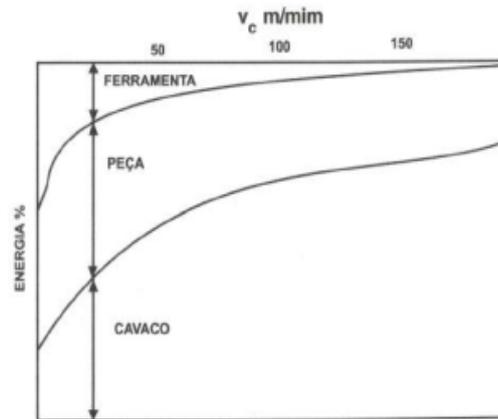
Figura 2.1 - Zonas de cisalhamento



Fonte: (BANIN, 2009)

A Figura 2.2 mostra um comparativo das parcelas de calor dissipadas para o cavaco, peça e ferramenta que variam conforme a velocidade de corte (KÖENIG, 1981, apud BANIN, 2009). Observa-se que com um aumento da velocidade de corte, a quantidade de calor transmitida para a peça e para a ferramenta diminui, o que é muito benéfico, uma vez que a ferramenta terá uma vida maior e a peça terá menores distorções devido à temperatura bem como menores possibilidades de alteração da sua microestrutura. Sendo assim, é possível afirmar que as alterações nas características das superfícies usinadas, como a rugosidade, por exemplo, são uma somatória dos efeitos térmicos e mecânicos provenientes da usinagem.

Figura 2.2 - Transferência de calor versus velocidade de corte



Fonte: (BANIN, 2009)

Dentre os vários fatores influentes na temperatura da interface cavaco/ferramenta, a velocidade de corte é o parâmetro que apresenta o maior efeito sobre a temperatura (ABRAO; ASPINWALL; NG, 1996 apud BANIN, 2009). A velocidade de corte tende a provocar mecanismos diferentes de geração e transmissão de calor, dependendo se esta é alta ou baixa. Com baixas velocidades, o desgaste da ferramenta é dominado por deformações plásticas e pela abrasão. A partir do momento em que a velocidade aumenta, a porcentagem de energia que tende a ir para a ferramenta diminui (como mostra a Figura 2.2). Entretanto, a alta velocidade de corte tem efeitos adversos, pois a quantidade de energia total é cada vez maior, aumentando a temperatura, o que acaba por intensificar os mecanismos de desgaste por difusão e oxidação da ferramenta (dependentes da temperatura).

### 2.1.2 Grandezas no processo de usinagem

A fim de quantificar valores e buscar relações entre variáveis, devem-se definir algumas grandezas, estas também serão úteis para descrever um determinado processo. Estas grandezas e suas relações geométricas apresentam uma terminologia baseada na ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). As grandezas mais comuns são:

- Velocidade de corte ( $V_c$ ): é a velocidade tangencial da parte mais exterior da ferramenta, resultante da rotação da fresa em torno da peça, onde os movimentos de corte e de avanço ocorrem concomitantemente.

$$V_c = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad (2.1)$$

- Velocidade de avanço ( $V_f$ ): é a quantidade de movimento em um determinado tempo.

$$V_f = f * n \quad (2.2)$$

- Avanço por dente ( $f_z$ ): é o percurso de avanço por dente e por volta ou curso da ferramenta, medido na direção do avanço.

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (2.3)$$

- Avanço de corte ( $f_c$ ): é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de corte. No fresamento essa variável muda constantemente durante o processo.

$$f_c = f_z * \text{sen}\varphi \quad (2.4)$$

- Profundidade ou largura de usinagem ( $a_p$ ): é profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. No fresamento frontal,  $a_p$  é denominada profundidade de usinagem, porém no fresamento tangencial,  $a_p$  é denominada largura de usinagem.
- Penetração de trabalho ( $a_e$ ): é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e perpendicularmente à direção de avanço.

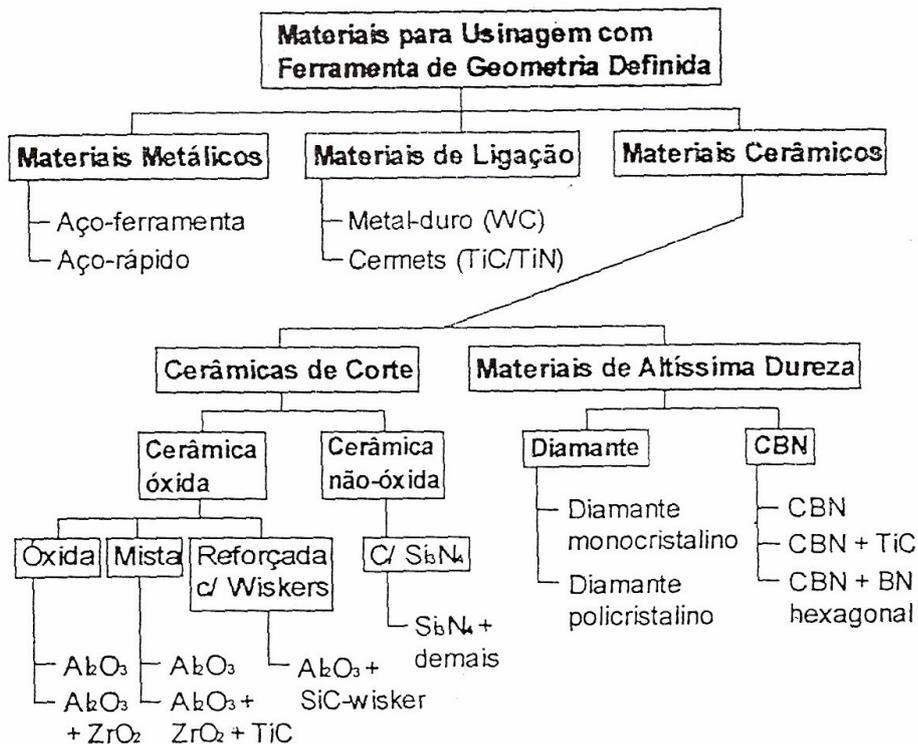
### 2.1.3 Ferramentas de corte

A escolha tanto da geometria como do material da ferramenta de corte é de extrema importância no acabamento superficial de um processo de fresamento. O desenvolvimento de aços mais duros começou no século XIX, e abaixo está um histórico do desenvolvimento de materiais para ferramentas (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002 apud BANIN, 2009):

- a) Aço ferramenta (1868);
- b) Aço rápido (1900);
- c) Stellite (1910);
- d) Metal duro (1926);
- e) Cerâmicas (1938);
- f) Nitreto de boro cúbico (Década de 50);
- g) Diamante mono e policristalino (Últimas décadas).

Esta divisão temporal pode ser complementada por um rearranjo dos materiais quanto à sua composição química e elementos envolvidos, a Figura 2.3 mostra esta reorganização.

Figura 2.3 - Classificação de materiais para ferramentas com geometria definida



Fonte: (BANIN, 2009)

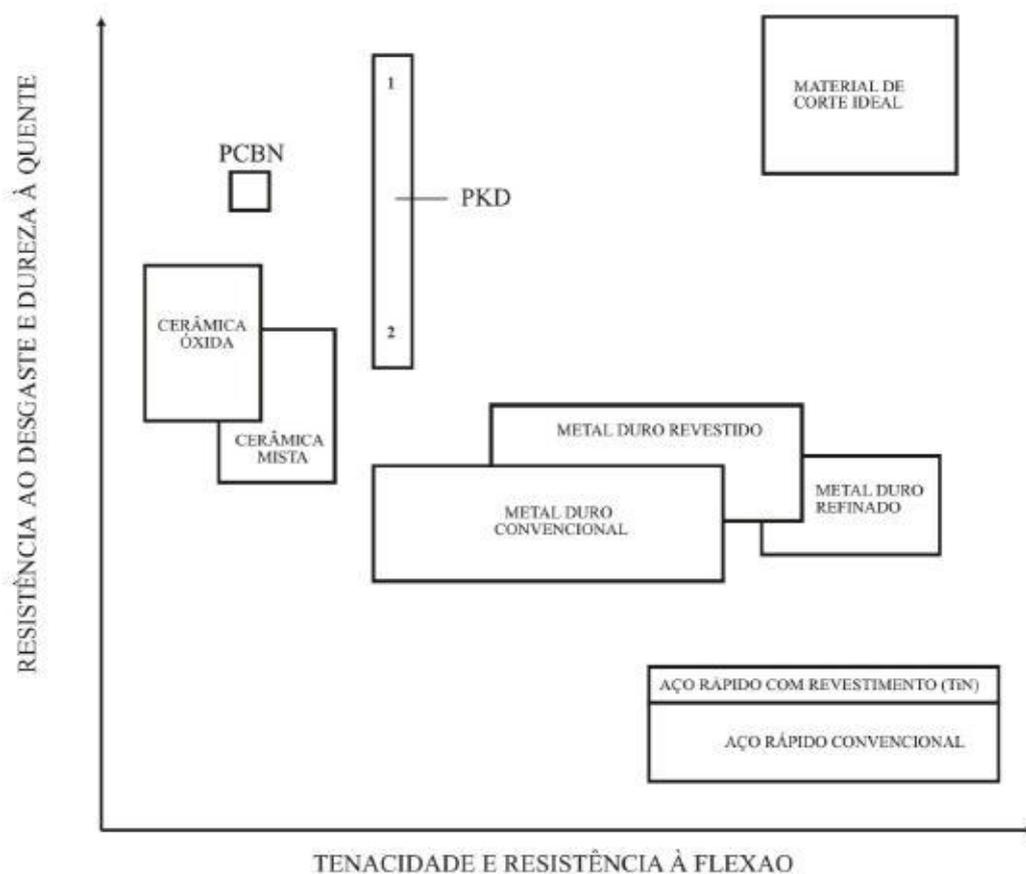
Alguns fatores devem ser levados em consideração antes de certa ferramenta ser escolhida, como por exemplo:

- a) Resistência ao desgaste;
- b) Estabilidade química e afinidade com o material da peça usinada;
- c) Dureza a quente;

- d) Tenacidade;
- e) Resistência à compressão.

Se a ferramenta escolhida apresentar características de tenacidade e dureza a quente, o desgaste ocorrerá de forma lenta e gradativa, sendo então o desgaste dominado pela estabilidade química do material da ferramenta. Na Figura 2.4 é possível verificar estas características em ordem crescente. Geralmente, quando se aumenta a dureza a quente e a resistência ao desgaste por abrasão, diminui-se a tenacidade do material.

Figura 2.4 - Tenacidade *versus* dureza



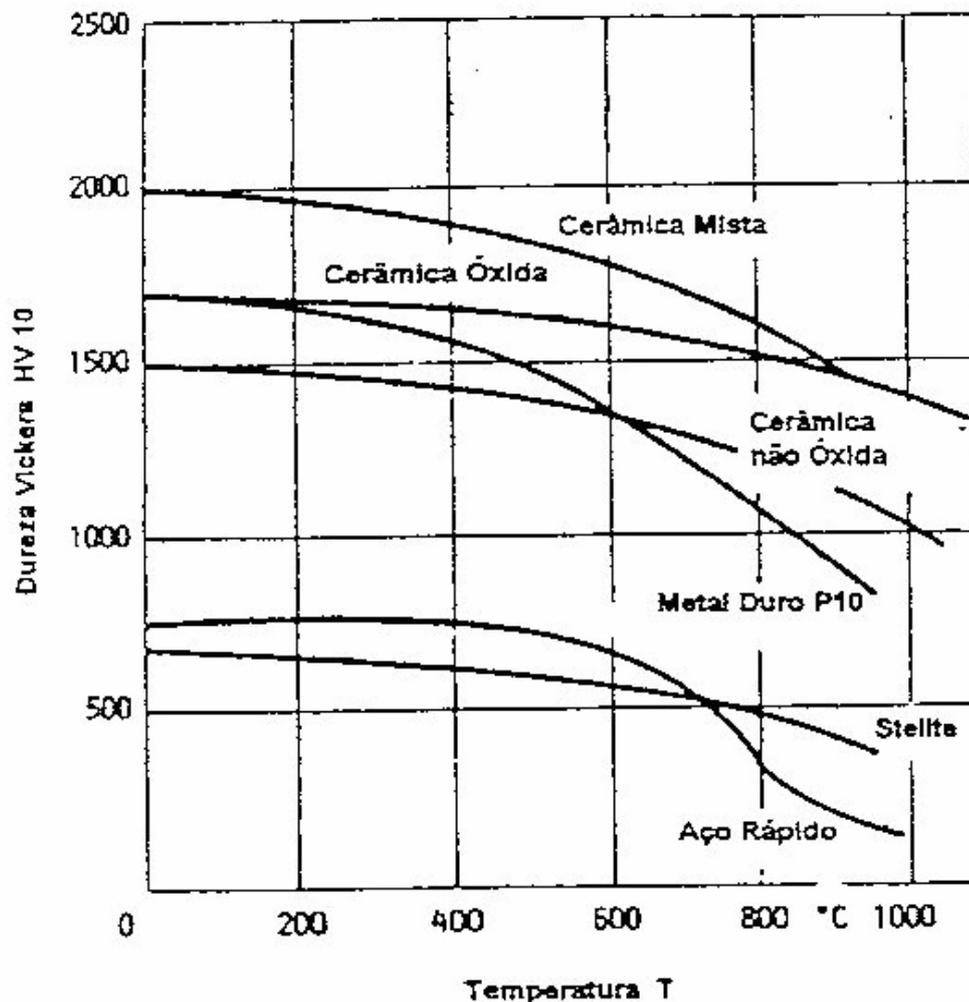
Fonte: (MACHADO; DA SILVA, 2004)

Na imagem acima observamos o “Material de Corte Ideal”, ou seja, há uma ótima relação entre as características verticais do gráfico (resistência ao desgaste e dureza a quente) e as características do eixo na horizontal (tenacidade e resistência à flexão). Esta é uma condição ainda não possível com os materiais atuais, uma vez

que o aumento da resistência quase sempre está relacionado à perda de tenacidade em algum nível.

A dureza a quente é uma característica muito importante para ferramentas quando se pensa em processos seriados, bem como a usinagem de materiais pouco condutores, como o titânio. Na Figura 2.5, tem-se a relação entre a dureza de diferentes materiais de ferramentas em comparação com a temperatura.

Figura 2.5 - Dureza a quente para materiais de ferramentas de corte



Fonte: (BANIN, 2009)

#### 2.1.4 Fluido de corte para fresamento

Apesar de no procedimento experimental deste trabalho nenhum fluido de corte tenha sido utilizado, este tem sim influência no acabamento superficial de uma peça, mas esta não é sua única utilidade, outras funções do fluido de corte são:

- a) Retirada do cavaco;
- b) Proteção contra corrosão;
- c) Lubrificação;
- d) Refrigeração.

Destas quatro funções citadas, as duas primeiras têm menos importância de uma maneira geral. Referente à refrigeração, esta se torna mais importante quando se aumenta a velocidade de corte, a qual está ligada a uma maior geração de calor. Já a função de lubrificação é importante para reduzir o atrito e evitar a formação de aresta postiça de corte (APC).

Quanto maiores as velocidades de corte, maiores serão os percentuais de calor que irão para o cavaco e para o meio ambiente e menores são os percentuais que irão para a peça e para a ferramenta. Isso ocorre porque, com aceleração do processo, maior é a convecção com o meio ambiente e o tempo para a transferência do calor gerado no cisalhamento do material nos planos primário e secundário é reduzido. Com isso o cavaco carrega a maior porcentagem do calor gerado. No entanto, o calor absoluto que chega à ferramenta é aumentado. Isso explica porque o calor gerado na ferramenta aumenta proporcionalmente com o aumento da velocidade de corte, razão pela qual sempre existirá uma velocidade de corte limite, para evitar o colapso da ferramenta por aquecimento.

Novamente, assim como a escolha do tipo de ferramenta e do material desta, a seleção do fluido de corte ideal para cada tipo de usinagem é influenciada por vários fatores, entre eles:

- a) Material da peça;
- b) Condições de usinagem;
- c) Operação de usinagem;
- d) Material da ferramenta.

Considerando todos esses fatores somados às características de cada tipo de fluido, permite-se a escolha correta do fluido. Os fluidos de cortes podem ser divididos em três grandes grupos:

- a) Ar;
- b) Aquosos: água, emulsões (óleos solúveis) e soluções químicas;
- c) Óleos: minerais, graxos, compostos, extrema pressão e de usos múltiplos.

A escolha do fluido de corte adequado pode trazer muitos benefícios, tanto para a ferramenta quanto para o resultado da usinagem, os principais efeitos positivos que o fluido de corte pode gerar são:

- a) Aumento da vida útil da ferramenta;
- b) Redução das forças de corte e portanto, redução de potência;
- c) Melhora no acabamento superficial da peça;
- d) Fácil remoção do cavaco da zona de corte;
- e) Menor distorção devido à temperatura da peça pela ação refrigerante.

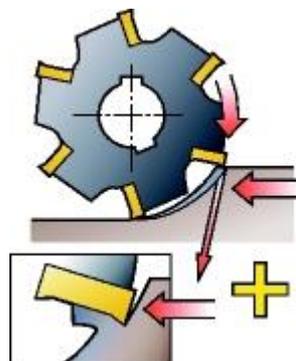
Nesta pesquisa não foi utilizado fluido de corte, isto se justifica pelo curto tempo de usinagem, o qual não requer uma refrigeração forçada. Além disto, a manutenção e limpeza de uma máquina que utiliza fluido de corte é mais complexa.

### 2.1.5 Fresamento concordante e discordante

No processo de fresamento concordante, a ferramenta de corte é avançada com a direção da rotação. Fresamento concordante é preferível quando a máquina-ferramenta, o dispositivo de fixação e a peças permitem. No fresamento concordante periférico, a espessura dos cavacos diminuirá no início do corte, gradualmente atingindo zero no final do corte. Isto traz uma grande vantagem prática, evita que a aresta se esfregue ou queime contra a superfície antes do contato no corte (SANDVIK COROMANT, 2012).

Tende-se a preferir espessura grande de cavacos. Outra vantagem está nas forças de corte, as quais tendem a puxar a peça para dentro da fresa, fixando a aresta no corte.

Figura 2.6 - Fresamento concordante

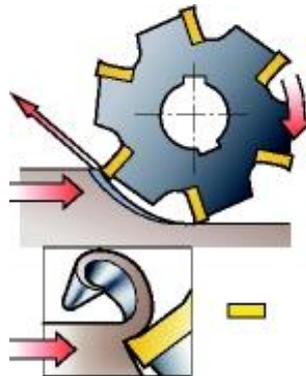


Fonte: (SANDVIK COROMANT, 2012)

Já no fresamento discordante (fresamento convencional), a direção do avanço da ferramenta de corte é oposta à sua rotação. A espessura de cavacos começa no zero e aumenta no final do corte. As forças de corte tendem a empurrar a fresa e a peça para longe uma da outra. A alta tensão de tração, causada quando a aresta deixa a peça, geralmente resultará em rápida falha da aresta. A aresta de corte precisa ser forçada dentro do corte, criando um efeito de contato ou de queima devido ao atrito, altas temperaturas e, geralmente, contato com a superfície endurecida pelo trabalho causado pela aresta anterior.

Tudo isto reduz a vida útil da ferramenta. As forças, principalmente as radiais, tendem a levantar a peça da mesa. Cavacos espessos na saída do corte reduzirão a vida útil da ferramenta. A grande espessura e a alta temperatura na saída fazem, algumas vezes, com que os cavacos grudem ou soldem na aresta de corte, o que os carregará no início do próximo corte ou causará um microlascamento da aresta momentâneo.

Figura 2.7 - Fresamento Discordante



Fonte: (SANDIVIK COROMANT, 2012)

Apesar do fresamento concordante ser preferível, na maioria dos casos, existem situações específicas onde se deseja o efeito do fresamento concordante. Como a ferramenta é puxada para dentro da peça no fresamento concordante, o avanço é involuntariamente aumentado, o que pode levar à espessura de cavacos excessiva e quebra da aresta, nestes casos, o fresamento discordante aparece como solução.

Ao usar pastilhas de cerâmica em ligas resistentes ao calor, o fresamento discordante é também recomendado, uma vez que as cerâmicas são sensíveis ao impacto na entrada da peça.

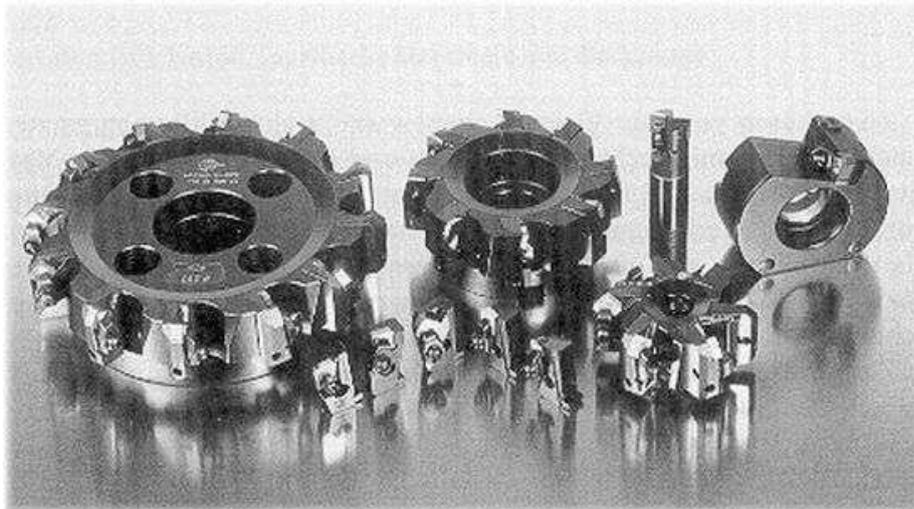
Além dos já citados efeitos do fresamento discordante e concordante na ferramenta, a escolha da fixação da peça também é dependente destes processos. Durante o fresamento discordante, ele deve resistir às forças de elevação, e no fresamento concordante, ele deve resistir às forças de compressão.

### 2.1.6 Fresamento frontal

O fresamento frontal é o processo onde a superfície usinada é gerada pelo gume secundário e encontra-se perpendicular ou com uma pequena inclinação ao eixo da fresa. Normalmente inclina-se o eixo da fresa de 0,5 a 1 grau, para evitar o contato da parte não ativa do cabeçote com a peça. Esta também é plana, sem relação com o contorno dos dentes da fresa.

Este processo de usinagem vem ganhando espaço na indústria, uma vez que ele permite realizar um trabalho completo sobre uma peça em apenas uma máquina diversas vezes. Normalmente é empregado na usinagem de superfícies grandes e planas, alguns exemplos de fresas são mostrados na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Tipos de Fresas Frontais

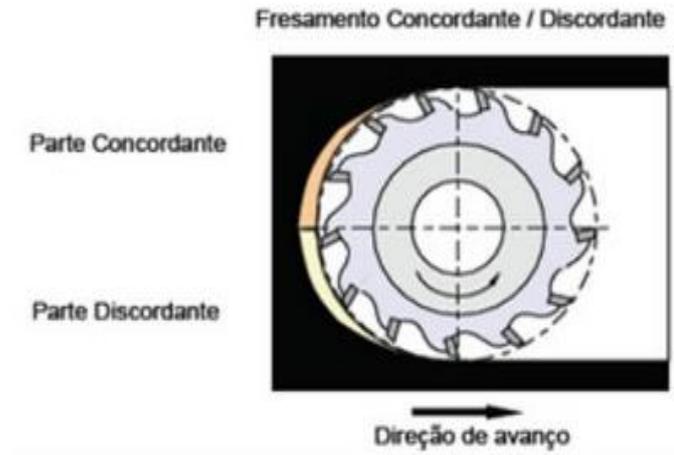


Fonte: (STOETERAU et al.,1999)

No fresamento frontal, ocorrem simultaneamente os já citados fresamentos concordante e discordante. Pode-se ver este processo na Figura 2.9. Tomando um dente em particular, primeiro ele se engaja em fresamento discordante. A espessura do cavaco que está se formando cresce até um valor máximo na linha que passa

pelo centro da fresa e com direção igual à do avanço. A partir deste ponto o corte passa a ser concordante. A espessura do cavaco decresce até o gume sair da peça.

Figura 2.9 - Fresamento Concordante/ Discordante



Fonte: (STOETERAU et al.,1999)

Este processo de fresamento foi o escolhido para o procedimento experimental do presente trabalho.

## 2.2 FORÇAS DE CORTE

O estudo das forças de usinagem permite orientar e otimizar a escolha dos parâmetros de corte e assim assegurar menor gasto de energia, melhor acabamento e maior vida da ferramenta. Aliado a isto, as forças de usinagem são essenciais para a qualidade geométrica e dimensional da superfície usinada, uma vez que seus componentes podem induzir deflexões em ferramentas delgadas.

Sabe-se que no fresamento a área da seção transversal do cavaco varia periodicamente (devido ao corte intermitente), as forças resultantes observadas na movimentação que ocorre entre peça e ferramenta também variam, gerando vibrações excessivas.

São fatores que afetam significativamente os componentes das forças de corte na operação de fresamento: o material a ser usinado e seu estado de dureza, a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte, o material da ferramenta, o material de recobrimento, a geometria da ferramenta escolhida, o uso ou não de fluido de corte, o desgaste da ferramenta, os efeitos térmicos, o atrito e as tensões

geradas na remoção do cavaco. Pode-se dizer que conhecendo estas forças por medições ou estimativas, torna-se possível conhecer desempenho do processo em termos de vida de ferramenta, acabamento superficial, entre outros (RIBEIRO, 2006).

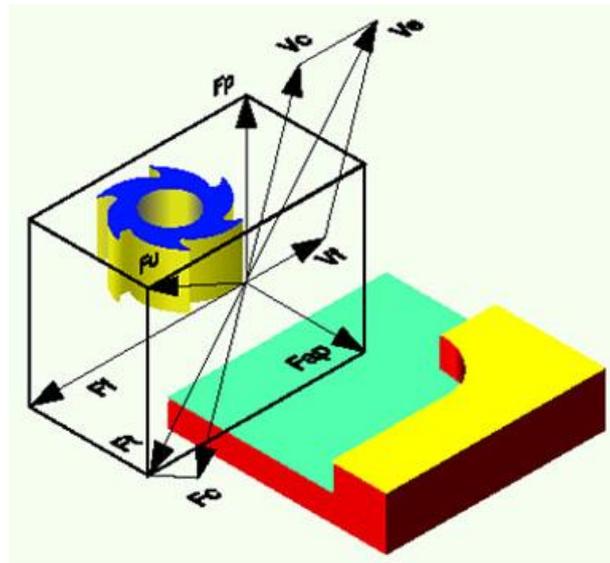
A força total resultante é chamada de força de usinagem ( $F_u$ ). Para determinar adequadamente a direção desta força, são primeiramente avaliadas as suas componentes e as direções conhecidas e, assim, calculados os esforços resultantes. Estas forças são dependentes de fatores como geometria e material da ferramenta, material da peça usinada e condições de operação (RIBEIRO, 2006).

A decomposição das forças de usinagem, bem como nomenclaturas são descritas na norma DIN 6584 (Deutsches Institut für Normung, 1982), como também termos de usinagem, força, energia, trabalho e potência. Além de apresentada a decomposição da força de usinagem ( $F_u$ ), é descrita a decomposição no plano de trabalho, que é denominada força ativa ( $F_t$ ) e em uma componente perpendicular a este plano, denominada força passiva ( $F_p$ ).

A força ativa tem parcela significativa no cálculo da potência de usinagem pelo fato de se posicionar no plano onde os movimentos de usinagem são realizados. Ela se decompõe, por sua vez, em força de corte ( $F_c$ ), que é a projeção da força de usinagem sobre a direção de corte, e em força de avanço ( $F_f$ ), que é a projeção da força de usinagem sobre a direção de avanço.

Tem-se ainda a força de apoio ( $F_{ap}$ ), que é a projeção da força de usinagem sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho. Na Figura 2.10 são apresentadas as disposições destas componentes da força de usinagem para a operação de fresamento frontal, juntamente com as seguintes velocidades: velocidade de corte ( $v_c$ ), velocidade de avanço ( $v_f$ ) e velocidade efetiva ( $v_e$ ), que representa a soma vetorial de  $v_c$  e  $v_f$ : unidade de medida para a grandeza força (RIBEIRO, 2006).

Figura 2.10 - Componentes das forças de usinagem nos processos de fresamento



Fonte: (RIBEIRO, 2006)

Nos processos de fresamento o ângulo de direção de avanço  $p$  se encontra em constante variação (diferentemente dos processos de torneamento, onde este valor é sempre uma constante  $p = 90^\circ$ , fazendo com que a força de apoio  $F_{ap}$  se confunda com a força de corte  $F_c$ ), a força ativa resultante será expressa como a resultante das componentes  $F_{ap}$ ,  $F_c$  e  $F_t$ , por meio da equação 2.5:

$$F_t = \overline{F_{ap}} + \overline{F_f} + \overline{F_c} \quad (2.5)$$

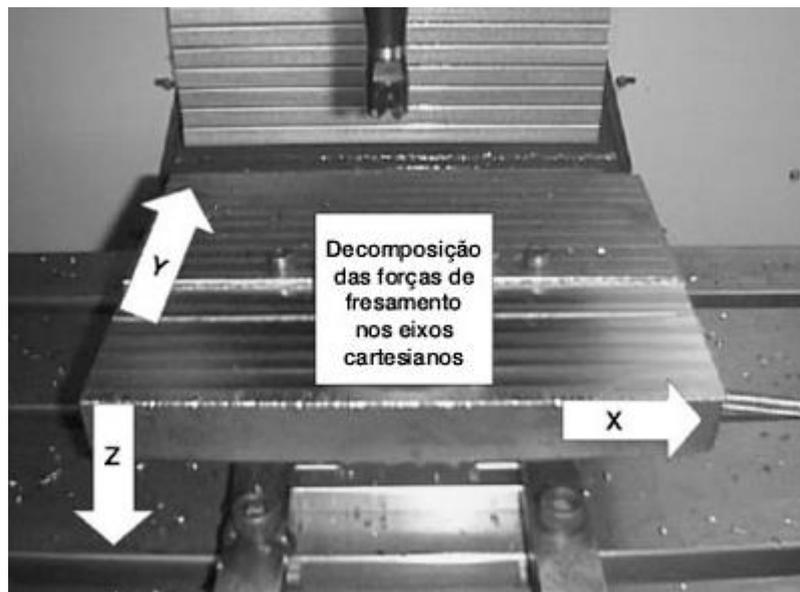
Onde a força passiva ou de profundidade ( $F_p$ ) é a projeção da força de usinagem em um plano ortogonal ao plano de trabalho e conseqüentemente contribui para a potência de usinagem, uma vez que é perpendicular aos movimentos exercidos neste plano, onde ocorrem os movimentos de corte e de avanço. Entretanto, deve ser estudada, pois é responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte, dessa forma, responsável pelas variações de tolerâncias de forma e tolerâncias dimensionais quando estas são muito rígidas.

Em resumo, a força de usinagem será a resultante da força ativa ( $F_t$ , equação 2.5) e da força passiva ( $F_p$ ) e expressa pela equação 2.6.

$$F_u = \sqrt{F_p^2 + F_t^2} \quad (2.6)$$

Com exceção da força passiva ou de profundidade ( $F_p$ ), que coincide com a força exercida no eixo Z, as forças  $F_{ap}$ ,  $F_t$  e  $F_c$  são difíceis de serem mensuradas. Entretanto a sua resultante  $F_t$  também pode ser obtida pela análise vetorial das forças  $F_x$  e  $F_y$ . Estas componentes da força ativa podem ser determinadas com facilidade pela utilização de um dinamômetro capaz de medir os esforços distribuídos nos planos cartesianos X, Y e Z (Figura 2.11).

Figura 2.11 – Decomposição das forças de fresamento em dinamômetro Kistler



Fonte: (RIBEIRO, 2006)

As forças de corte variam periodicamente de acordo com a rotação do eixo, cada aresta da fresa exerce uma força para cisalhar o material, que se repete periodicamente a cada rotação. Em um processo ideal de fresamento, o gráfico esperado de força em função da posição angular seria uma senóide. Entretanto, resultados experimentais apresentam variações substanciais entre as forças  $F_x$  e  $F_y$  não somente referentes à sua intensidade, mas também em sua forma em relação ao ângulo de rotação da fresa, devido à complexidade da dinâmica de corte.

Segundo Ribeiro (2006), a explicação para tal divergência das forças  $F_x$  e  $F_y$  é a de uma relação com o avanço, um crescimento praticamente linear das forças  $F_x$  e  $F_y$  com o aumento do avanço. Comportamento semelhante ocorre com a força em relação à penetração de trabalho.

A distribuição ideal de forças de corte permite evitar ou minimizar o número de processos de usinagem, principalmente as operações de acabamento, uma vez

que em muitos casos basta uma usinagem de semi-acabamento para se obter a exatidão exigida nas peças fresadas.

Dentre os erros que podem ser causados pela variação das forças de usinagem, o que possui maior influência no acabamento e na tolerância dimensional é a deflexão da ferramenta. No fresamento de topo a deflexão varia durante todo o processo, tanto na usinagem de segmentos retos quanto na de cantos. Além da variação das forças de corte, a precisão do acabamento e da tolerância dimensional sofre efeitos do diâmetro e do comprimento da fresa. Como fatores para minimizar tais deflexões, deve-se buscar a melhor relação entre o comprimento e o diâmetro da fresa, a diminuição da penetração de trabalho ( $ae$ ), resultando numa diminuição das forças de corte e, desta forma, os erros devidos à deflexão da ferramenta.

Ribeiro (2006), também afirma que sob circunstâncias estáveis do corte, a deflexão estática da ferramenta é mais significativa do que a dinâmica. Os efeitos da deflexão dinâmica aparecerão somados à vibração da máquina e podem ser medidos com o auxílio de um acelerômetro.

A análise das forças de corte também pode oferecer informações sobre vibrações excessivas ou inadequadas em processos de usinagem. Se as forças de corte apresentarem flutuações dinâmicas, estas podem estar ligadas a instabilidade no processo. Vibrações em máquinas-ferramenta tem efeitos diretos no acabamento superficial da peça, causando principalmente uma heterogeneidade na superfície usinada.

### 2.3 FATORES DE INFLUÊNCIA NO ACABAMENTO SUPERFICIAL

Por envolver diversos fatores de natureza distinta, o processo de usinagem necessita de uma grande quantidade de parâmetros fornecidos, para descrever determinado processo de uma maneira satisfatória.

Quando se analisa o processo com um foco no acabamento e qualidade superficial, fatores como avanço, profundidade, rotação e tipo de ferramenta, presença ou não de fluido de corte, o tipo deste fluido e como ele é entregue ao sistema são fatores que tem influência direta no acabamento superficial. Definir se determinada peça está com acabamento superficial satisfatório pode ser uma tarefa árdua, uma vez que alguns métodos utilizados são apenas qualitativos, por exemplo, a inspeção visual (CORRÊA, 2012).

### 2.3.1 Rugosidade

Um método que se apresenta muito útil para saber se determinada peça esta ou não com um acabamento satisfatório é a rugosidade, esta tem como principal vantagem o poder de quantificar a qualidade superficial, isto ocorre por meio da medição das variações do relevo em uma peça.

Para tornar possível quantificar os parâmetros de irregularidades de uma superfície, a rugosidade é um valor numérico resultante de integrações e outras operações matemáticas de amostras de um determinado comprimento de uma superfície.

Normalmente, para obter-se o perfil e a rugosidade de uma determinada superfície, métodos de contato direto são empregados, como o rugosímetro ou o apalpador de um perfilometro. Sabe-se que todo instrumento de contato direto tem certas características prejudiciais inerentes à sua construção, como a possibilidade de alterar a superfície medida dependendo da carga aplicada. Também deve-se ter uma atenção especial ao raio da ponta do apalpador do rugosímetro ou do perfilometro, este deve ser pequeno suficiente para captar as variações da superfície, em síntese este apalpador não é capaz de reconhecer perfis de rugosidade cuja dimensão seja muito menor que a do seu raio.

Deve-se também diferenciar conceitualmente a rugosidade em relação aos erros de forma, um conceito bem explicativo é definido por Hutchings (1992), que classifica rugosidade como “irregularidades de pequena escala de uma superfície”, enquanto que os erros de forma seriam “uma medida do desvio de forma de uma superfície de sua forma ideal (por exemplo, plana, cilíndrica ou esférica)”.

A medição da rugosidade e os diferentes parâmetros utilizados para quantificá-la estão relacionados à uma vasta gama de aplicação de projeto, como por exemplo atrito, desgaste, aderência de película e filmes e lubrificação. Estes parâmetros são altamente dependentes da rugosidade.

Não existe uma maneira ideal ou mais adequada para todas as necessidades de medição de rugosidade, justamente por isso existem maneiras diferentes de se medir a rugosidade, uma das mais difundidas é a Rugosidade Média, ou  $R_a$ .

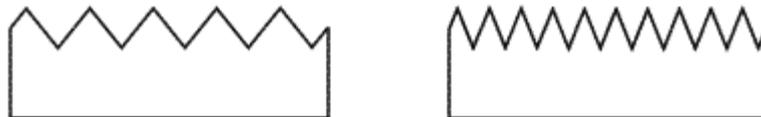
Este método é largamente utilizado por ser de fácil uso, e necessita de circuitos eletrônicos relativamente simples para seu cálculo. A rugosidade média é

definida como o desvio médio de um perfil de sua linha média. A expressão que representa esta rugosidade é:

$$R^a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (2.7)$$

Onde  $l_m$  é o comprimento da superfície medida, e  $y(x)$  a amplitude. Entretanto, este método tem certas limitações, por exemplo, por se tratar de uma integral ele calcula e soma as áreas acima e abaixo da linha média e não distingue superfícies muito irregulares de outras mais constantes, a Figura 2.12 exemplifica esta limitação.

Figura 2.12 – Peças diferentes, porém com mesma rugosidade média

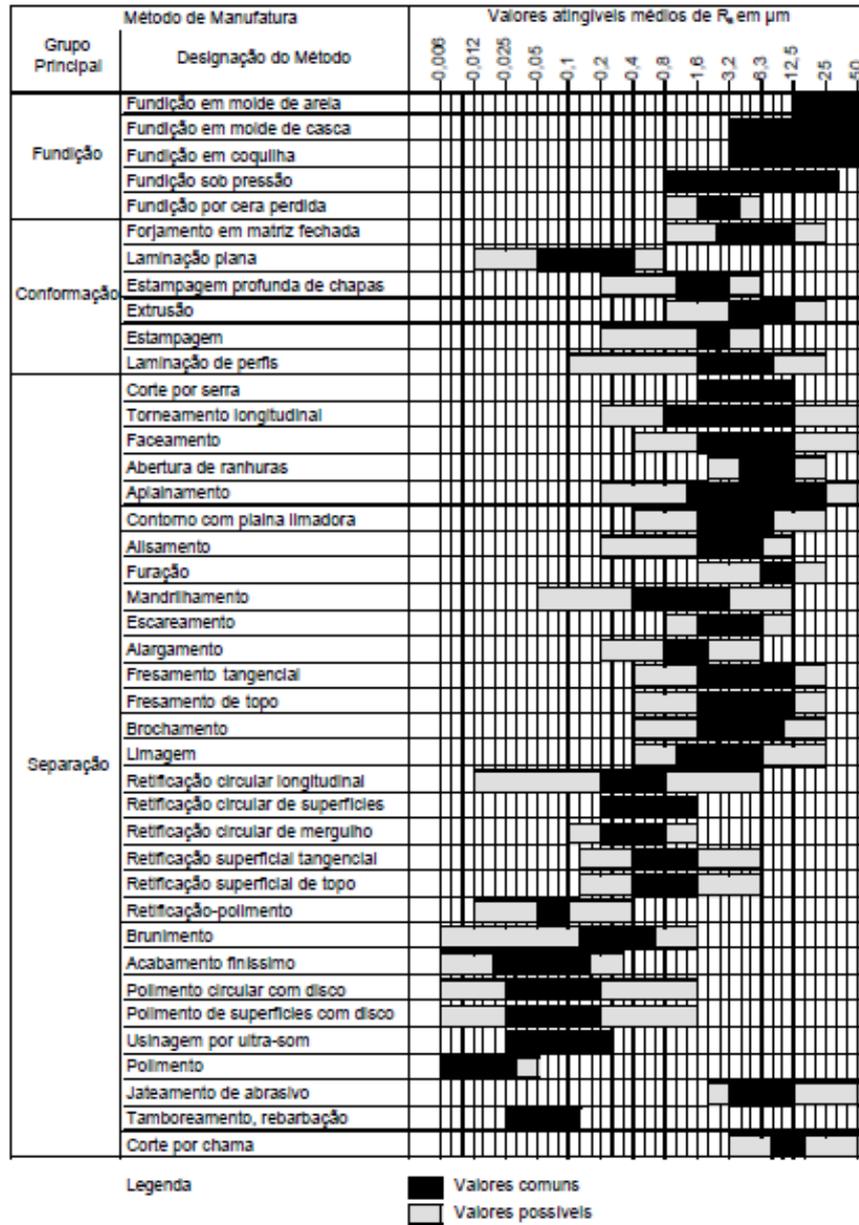


Fonte: (Próprio autor)

Observa-se que tratam de superfícies bem diferentes, mas para o método de rugosidade média, ambas têm o mesmo valor de rugosidade. Existem vários outros métodos de medir-se rugosidade, uma boa maneira de escolher o mais adequado é tendo uma ideia do perfil da superfície a ser medido.

Para dar uma noção básica de que valores de rugosidade devem ser esperados para determinado processo, a norma DIN 4766 traz uma tabela com valores esperados para determinado processo, mostrada na Figura 2.13. Se encontrados valores fora dessa faixa não significa que a medição ou o processo estão inadequados, mas cabe uma atenção especial para avaliar se realmente os processos de medição e fabricação estão sob controle. Para o processo de estudo, fresamento de topo, a norma indica que são esperados normalmente valores de  $R_a$  variando entre 1,6  $\mu\text{m}$  e 12,5  $\mu\text{m}$ . Entretanto é possível, mas menos comum, encontrar valores próximos a 0,4  $\mu\text{m}$  indo até quase 25  $\mu\text{m}$ .

Figura 2.13 – Valores de Ra atingíveis para diferentes processos de fabricação



Fonte: (Adaptado DIN 4766)

### 2.3.2 Parâmetros influentes na rugosidade

É cada vez mais frequente o estudo quantitativo dos fatores da usinagem no acabamento superficial, principalmente nos processos de torneamento e fresamento. Normalmente, testes experimentais são utilizados para obter o grau de influência na rugosidade, e a correlação entre diversos parâmetros.

Corrêa (2012) faz um estudo da influência de 5 fatores, profundidade de corte, avanço, rotação, presença ou não de fluido de corte e raio de ferramenta, no acabamento superficial de uma peça torneada, tendo como parâmetro a rugosidade média (Ra). Realizou experimentos de dois níveis, ou seja, todos os parâmetros foram testados em dois valores diferentes (no caso do fluido de corte foram considerados presença ou ausência deste apenas), totalizando um total de dezesseis experimentos. Observou ainda que todos os cinco parâmetros interferiam significativamente na rugosidade média.

Nery (2012) ainda apresenta correlações observadas os pares de parâmetros, e observa que praticamente todos os parâmetros têm correlações positivas entre si para a rugosidade média.

Um estudo semelhante é realizado por Rossi (2002), que também estuda a influência dos parâmetros de corte na rugosidade, entretanto o processo de fabricação agora é o fresamento de topo, o qual coincide com o método de usinagem do presente trabalho. O material da peça de estudo é um aço ABNT 1020, sendo este o mesmo aqui estudado.

Rossi (2002) varia três parâmetros de corte, avanço, rotação do fuso e profundidade de corte. Novamente o método para medir-se rugosidade é a rugosidade média. Utilizando um modelo de regressão múltipla, o autor consegue encontrar uma equação matemática que relaciona os três parâmetros conhecidos com a variável a qual deseja-se descobrir seu valor, neste caso a rugosidade média.

Vale ressaltar que os coeficientes da equação encontrada aplicam-se apenas as condições de cortes semelhantes a do teste, ou seja, tanto o tipo de ferramenta utilizado, como o material da peça e o tipo de fixação devem ser os mesmos. Caso fossem alterados estes parâmetros o modelo utilizado de regressão ainda seria válido, apenas novos coeficientes para a equação seriam encontrados. A equação encontrada por Rossi (2002) foi a seguinte:

$$R^a = 1,86 - 0,33 * n + 0,6525 * f + 0,0175 * ap \quad (2.8)$$

Conclusões realmente interessantes podem ser obtidas através desta equação, observa-se que o aumento da rotação tem um comportamento benéfico no acabamento superficial, ou seja diminui a rugosidade média. Este é um efeito inverso dos dois outros parâmetros analisados, avanço e profundidade de corte,

ainda que a profundidade de corte, por ter um coeficiente praticamente cinquenta vezes menor que o avanço, não interfira tanto na rugosidade média.

Rossi (2002) conseguiu com sucesso construir uma equação para prever a rugosidade, entretanto deve-se tomar certo cuidado na utilização desta equação, já que ela aplica-se apenas a faixa na qual os parâmetros foram variados. A faixa de variação está descrita na Tabela 2.1 a seguir:

Tabela 2.1 – Faixa de variação de alguns parâmetros

	Máximo	Mínimo
Avanço (f)	78 mm/min	25 mm/min
Rotação do fuso (RPM)	710 rpm	224 rpm
Profundidade de corte (ap)	6 mm	1 mm

Dentre os parâmetros influentes no acabamento superficial tem-se ainda o tipo de fixação da peça a ser usinada, o material desta peça e da ferramenta. Referindo-se a este último, Rosa (1999) faz um estudo sobre a influência do material da ferramenta na rugosidade.

No estudo em questão foram utilizados dois materiais de ferramentas distintos, metal duro e coronite. Para observar o efeito do tipo de ferramenta na rugosidade, dois parâmetros foram variados, a velocidade de avanço e velocidade de corte.

Rosa (1999) observou que para ambos os materiais de ferramenta, o aumento das velocidades de avanço e cortes causam aumento na rugosidade média. Entretanto quanto a influência do tipo de material, o estudo em questão é pouco conclusivo. Para o parâmetro de velocidade de corte, a ferramenta de metal duro se mostra mais eficaz quanto ao acabamento superficial, já para a velocidade de avanço o contrário acontece. Observa-se claramente que a o material da ferramenta tem influência na rugosidade média, mas dentre essas duas não pode-se dizer que uma é melhor que a outra. A fim de obterem-se resultados mais assertivos, parâmetros adicionais como profundidade de corte poderiam ser testados, bem uma gama mais vasta de materiais para ferramenta.

Como já citado anteriormente, alguns estudos foram realizados no que se refere à presença ou não do fluido de corte e sua influência no acabamento superficial, Ávila (2004) faz um estudo utilizando a condição já citada, e testa 3 tipos

diferentes de fluídos de corte, fluido sintético com aditivo cloro (F1), fluido sintético com aditivo enxofre (F2) e fluido sintético com aditivo cloro e base lubrificante de cadeia longa (F3). Observou-se então a rugosidade para diferentes condições de corte, e os fluídos de corte F1 e F3 mostraram-se mais eficientes, demonstrando um melhor acabamento superficial que o F2 ou com usinagem à seco.

### 3 ABORDAGEM ANALÍTICA

#### 3.1 APOIOS

Figura 3.1 – Apoios da viga



Fonte: (Próprio autor)

A Figura 3.1 acima mostra uma representação dos apoios, em verde tem-se o engaste da viga e em roxo a componente da fresa. Esta componente torna o problema bem complexo, uma vez que a fresa está transladando e rotacionando, algumas vezes esta não está nem em contato com a superfície normal à  $y$  da peça. Sendo assim esta componente não pode ser caracterizada como simplesmente apoiada, a fim de descrevê-la uma situação de contato poderia ser utilizada para a simulação.

Este procedimento poderia ser utilizado, mas torna a simulação muito mais complexa. Utilizando um software comercial, esta condição de contato poderia ser aplicada de maneira relativamente fácil, porém a interpretação dos resultados e o entendimento do procedimento numérico por trás da interface gráfica seria extremamente prejudicado, fugindo do objetivo do projeto de ser capaz de entender as etapas e a solução da simulação.

O contato da fresa com a superfície normal  $y$  ocorre num ponto, no canto vivo. Esta componente de apoio em  $y$  é muito menor que a do engaste e pode-se considerar que a viga está livre na extremidade da direita. Esta simplificação apesar de parecer razoável deve ser validada para saber se tal componente é realmente desprezível. Obviamente todo o processo analítico e de simulação dependem da validade desta simplificação.

Se, por exemplo, o apoio de estudo fosse a componente da fresa no eixo  $x$ , esta certamente não poderia ser ignorada, uma vez que a magnitude da força em  $x$  (avanço) é muito superior ao apoio em  $y$ .

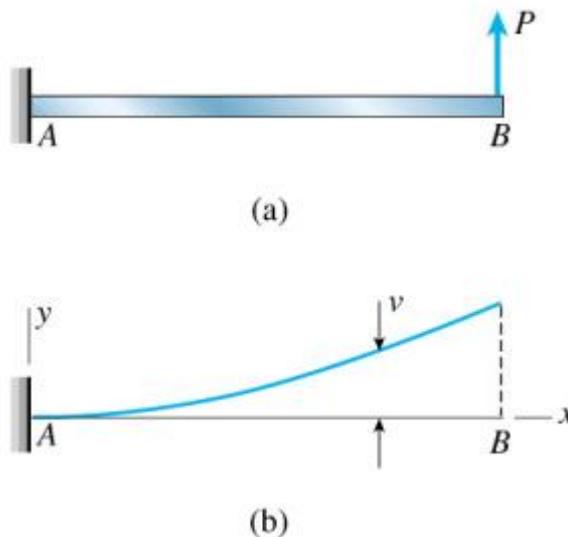
### 3.2 RIGIDEZ DA PEÇA

Por rigidez entende-se a resistência à deformação de um corpo por uma força aplicada, ou seja, um componente mais rígido, irá deformar-se menos que um menos rígido quando sujeitos à uma mesma força. A rigidez depende também da direção, logo em determinada direção um corpo pode ser mais ou menos rígido.

A rigidez de uma viga engastada pode ser facilmente calculada através da linha elástica, que determina o deslocamento de certo ponto da viga. Aplica-se uma força unitária sob o ponto onde se deseja saber a rigidez, sendo esta:

$$K = \frac{F}{v} \quad (3.1)$$

Figura 3.2 – Linha elástica



Fonte: (Hibbler, 2007)

Onde  $F$  é a força aplicada  $v$  é o deslocamento. Sendo a força unitária, a única incógnita é o deslocamento. Para vigas longas, prismáticas e com pequenos deslocamentos, tem-se que:

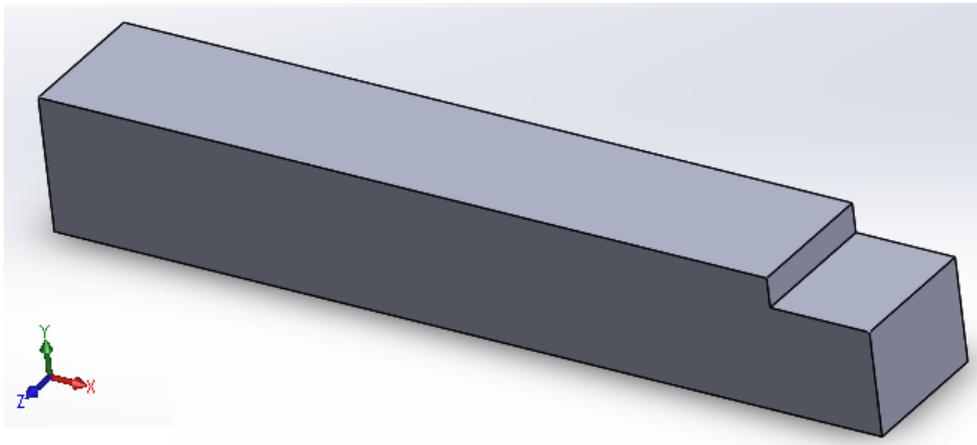
$$(3.2)$$

$$E.I. \frac{d^2v}{dx^2} = M$$

Onde  $I$  é o momento de inércia,  $M$  é o momento fletor e  $E$  é o módulo de elasticidade, dependente do material. Sendo  $L$  o comprimento da viga, para uma viga engastada com uma força concentrada na extremidade:

$$v = \frac{3.E.I}{L^3} \quad (3.3)$$

Figura 3.3 – Geometria da viga



Fonte: (Próprio autor)

Agora conhecendo o deslocamento, a rigidez da peça pode ser facilmente calculada. Para o presente trabalho, buscam-se o deslocamento em  $y$ , os quais resultarão em imperfeições no acabamento da superfície. Por se tratar de um problema tridimensional, os deslocamentos em  $y$  podem ser originários de três forças, uma força em  $z$ , a qual provoca uma rotação da peça em torno do eixo  $x$  (esta componente provoca uma assimetria na profundidade de corte); uma força em  $x$  (deslocada da linha elástica), a qual provoca um momento fletor e também provoca um deslocamento em  $y$ ; por fim temos a própria força no eixo  $y$ , a força de apoio.

Como citado anteriormente, Ribeiro (2006), afirma que esta última é a componente dominante para a deflexão em  $y$  na maioria dos casos. Logo para o equacionamento das amplitudes de oscilações no eixo  $y$ , uma simplificação será feita, utilizando apenas a força no eixo  $y$  nos cálculos.

### 3.3 FREQUÊNCIAS NATURAL E NATURAL AMORTECIDA

O cálculo da frequência natural torna-se trivial depois de conhecer-se a rigidez da peça em determinada direção, por definição a frequência natural é dada por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.4)$$

Onde  $m$  é a massa. Sendo o sistema amortecido, a frequência de excitação que resulta nas maiores amplitudes não é a frequência natural, mas sim a frequência natural amortecida, esta é dada pela equação:

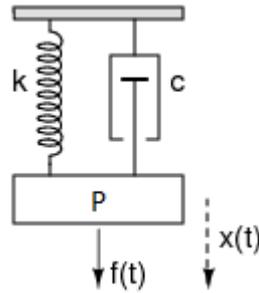
$$\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3.5)$$

A razão de amortecimento é definida por  $\zeta$ . É comum muitas vezes ambas as frequências serem confundidas, segundo Polli (2005) para estruturas metálicas a razão de amortecimento  $\zeta$  é geralmente menor que 0,05. Como este termo ainda é elevado ao quadrado na equação acima, sua parcela torna-se praticamente nula, logo as frequências natural e natural amortecida tornam-se praticamente iguais. Para o presente trabalho, o razão de amortecimento utilizada será de 0,05, caso com maior amortecimento segundo Polli (2005).

### 3.4 VIBRAÇÃO HARMÔNICA FORÇADA

Em sistemas mecânicos normalmente a excitação harmônica está presente, produzida pelo desequilíbrio de máquinas rotativas. Ser capaz de prever como determinado sistema irá se comportar diante de um carregamento é essencial para o projeto e operação deste. A excitação harmônica pode se apresentar tanto na forma de uma força como um deslocamento de determinado ponto do sistema.

Figura 3.4 – Diagrama de um sistema amortecido com força externa



Fonte: (Próprio autor)

O movimento do sistema acima pode ser descrito por uma equação diferencial, pelo diagrama de corpo livre temos:

$$m.\ddot{x} + c.\dot{x} + k.x = f_0.\text{sen}(\omega.t) \quad (3.6)$$

A magnitude e a frequência de excitação são representadas por  $f_0$  e  $\omega$  respectivamente. O coeficiente de amortecimento é dado por  $c$ , e o tempo é representado por  $t$ . Esta equação diferencial tem sua solução dividida em duas partes, a solução da equação homogênea e a parte particular. A parte homogênea consiste em uma vibração livre amortecida. Já a solução da parte particular desta equação é uma oscilação de estado permanente, tendo a mesma frequência da força (ou deslocamento) de excitação. Pode-se dizer que a solução é de forma genérica:

$$x = X.\text{sen}(\omega.t - \phi) \quad (3.7)$$

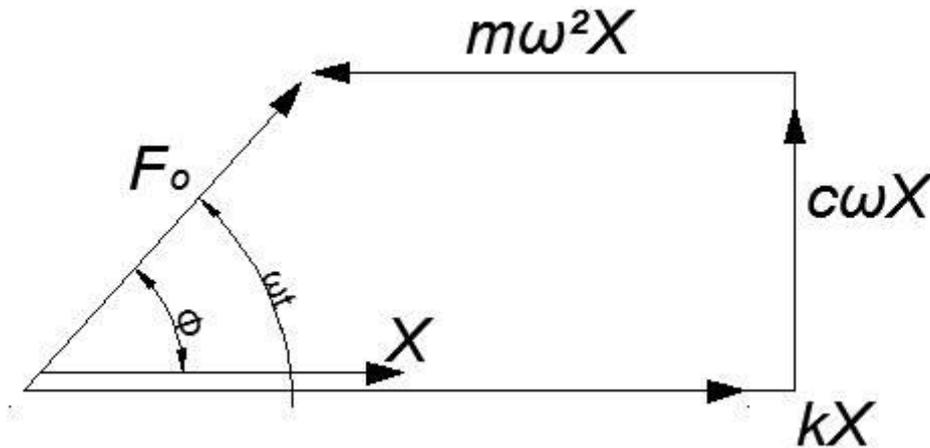
Nesta equação,  $X$  é a amplitude de oscilação e  $\phi$  é ângulo de fase do deslocamento com relação à força de excitação.

Agora faz-se necessário obter-se os valores desta amplitude e do ângulo de fase, estes valores devem ser descritos em função dos parâmetros do sistema, como massa, rigidez, amortecimento e a frequência de excitação e a intensidade da força.

De acordo com Thomsom (1973), para encontrar os valores da amplitude e da fase, substitui-se  $x$  na equação 3.5, pelo seu valor da equação 3.6. No movimento harmônico as fases da velocidade e da aceleração estão respectivamente  $90^\circ$  e  $180^\circ$

graus além do deslocamento. Estes termos da equação diferencial podem ser mais facilmente compreendidos se representados graficamente pela figura 3.5.

Figura 3.5 – Diagrama vetorial para a vibração forçada com amortecimento



Fonte: (Thomsom, 1973)

Este diagrama permite concluir que a amplitude e a fase podem ser escritas como:

$$X = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m \cdot \omega^2)^2 + (c \cdot \omega)^2}} \quad (3.8)$$

$$\phi = \text{tg}^{-1} \frac{c \cdot \omega}{k - m \cdot \omega^2} \quad (3.9)$$

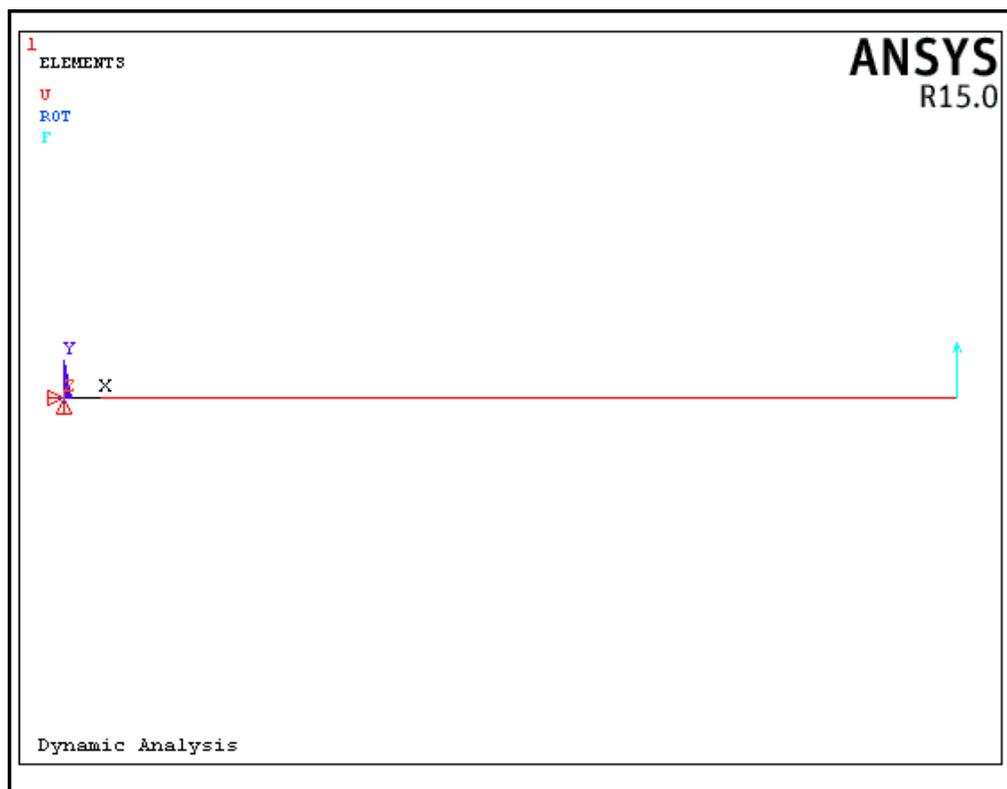
A equação 3.8 permite determinar a máxima amplitude de um ponto quando excitado por determinada força. Entretanto necessita-se saber além das características da excitação, a rigidez, massa e amortecimento deste sistema.

## 4 SIMULAÇÃO

O procedimento de simulação numérica deste trabalho é dividido em duas etapas. Ambas as etapas utilizaram o método dos elementos finitos. Como software, optou-se por um software comercial, o Ansys. Em ambas as simulações utilizaram-se de elementos lineares. A escolha de elementos lineares dá-se principalmente à simplicidade do problema. Como tipo de análise escolheu-se a análise harmônica, e deseja-se descobrir as amplitudes máximas que a viga apresenta quando excitada em determinada frequência.

A primeira etapa consiste em uma simulação utilizando elementos de viga, esta primeira simulação envolveu apenas uma geometria, sendo esta à viga engastada e sem entalhe (distancia usinada 0m). Esta viga pode ser vista na Figura 4.1:

Figura 4.1 - Elemento de viga



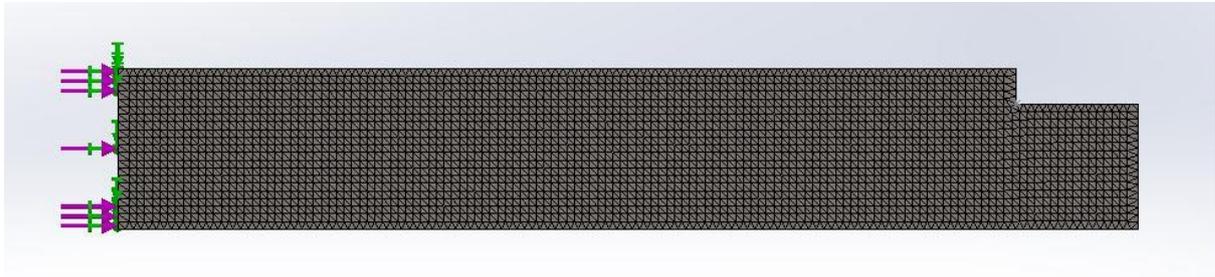
Fonte: (Próprio autor)

Nesta simulação não será considerado nenhum tipo de amortecimento, conseqüentemente a amplitude quando a frequência de excitação for igual a frequência natural irá para infinito. Esta simulação, apesar de bem simples, tem uma

função importante, ela deverá ter o resultado suficientemente próximo do analítico para então avançar-se para a segunda etapa de simulações, aonde as geometrias com entalhes serão simuladas.

A segunda simulação não utiliza mais elementos de viga, agora elementos triangulares (2D) lineares são empregados. Nesta simulação 3 geometrias diferentes foram estudadas, elas são respectivamente peças com 0,012m, 0,024m e 0,036 de distancia usinada. Nesta simulação bidimensional foi utilizado o estado plano de tensões. A malha da peça com 0,012m de distancia usinada poder ser vista na Figura 4.2 .

Figura 4.2 - Malha da peça com 0,012m de distancia usinada



Fonte: (Próprio autor)

As malhas foram também geradas no Ansys e o número de elementos está listado na Tabela 4.1 .

Tabela 4.1 - Número de elementos para cada geometria

Distância Usinada (m)	Número de elementos
0,012	13267
0,024	12773
0,036	12322

A escolha do número de elementos foi feita através de um estudo de convergência de malha. A malha escolhida foi a com o menor número de elementos que conseguiu representar a resposta com uma diferença menor que 0,5% com relação à malha posterior (com mais elementos). Neste trabalho, a simulação aparece apenas como uma ferramenta para validação do equacionamento analítico proposto e recebeu um enfoque menor que as demais atividades.

## 5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental é dividido em três etapas principais, a medição da frequência de ressonância da peça fixada no centro de usinagem, o processo de fresamento das amostras e por fim a medição da rugosidade e dos perfis das amostras após o processo.

Assim como na simulação numérica, as amostras são vigas de seção transversal quadrada, com 15,87 mm de largura, e tem um comprimento de 100 mm, medidos a partir do engaste. A escolha das dimensões da seção transversal da viga tiveram que atender alguns critérios, como a disponibilidade no mercado de tal viga, e também a largura da viga deveria ser suficientemente menor que o diâmetro da fresa, este requisito tem como intuito permitir que a fresa usine o corpo de prova com apenas um passe. Os demais critérios para a escolha do material serão descritos no capítulo de análise e discussões dos resultados, mas tem como ideia básica manter as frequências naturais da viga dentro de uma determinada faixa.

O material das vigas é um aço SAE 1020. A escolha de tal material deve-se a uma combinação de fatores, primeiramente a ampla disponibilidade deste no mercado. Outro fator é o econômico, sendo este um dos aços mais acessíveis financeiramente, desejou-se também escolher um aço que é utilizado em larga escala em processos de usinagem, como é o caso deste aço carbono. Por fim, um dos fatores mais importantes está ligado a suas características mecânicas, uma vez que o procedimento experimental de fresamento não utiliza fluido de corte, materiais de elevada resistência mecânica tornariam o desgaste da ferramenta muito severo. Por outro lado, um material muito dúctil também não seria apropriado, uma vez que o cavaco seria pouco quebradiço, e uma tendência de arrancamento de partes da peça junto com ao cavaco gerariam um acabamento superficial irregular.

Todo o processo de fresamento foi realizado num centro de usinagem ROMI D600, e a ferramenta utilizada foi um fresa de 80mm de diâmetro e 6 dentes. O número de dentes da fresa tem grande importância neste experimento, uma vez que esta diretamente ligado ao número de excitações que a fresa exercerá sobre a ferramenta em uma rotação completa.

## 5.1 MEDIÇÃO DE FREQUÊNCIA NATURAL AMORTECIDA

Esta primeira etapa tem por finalidade medir a frequência de ressonância da viga quando presa ao sistema de fixação. O procedimento consiste em fixar a viga, como mostrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 - Fixação da viga no centro de usinagem



Fonte: (Próprio autor)

Depois de devidamente fixada, um acelerômetro é colocado junto à extremidade livre da barra, na parte inferior desta. Com o acelerômetro devidamente posicionado, inicia-se um teste de impactação, golpeia-se com um martelo de impacto e através de um software observa-se a resposta em frequência desta viga. Tal procedimento torna possível identificar a frequência natural do conjunto, bem como da uma ideia da taxa amortecimento a que este está submetido. O principal objetivo desta etapa é verificar se o sistema de fixação realmente se aproxima de um engaste ideal, em caso positivo, a frequência de ressonância coincidiria ou ficaria próxima suficiente do resultado analítico.

## 5.2 FRESAMENTO DAS AMOSTRAS

Esta etapa consiste em um fresamento de topo da viga citada anteriormente. Para estes procedimentos, mantiveram-se todos os parâmetros de corte constante, com exceção da rotação da ferramenta, desta ultima, três rotações diferentes foram testadas. Os parâmetros de corte estão na Tabela 5.1. A escolha destas três

velocidades de corte não foi aleatória, no capítulo seguinte serão justificados os motivos e os efeitos esperados para cada rotação.

Tabela 5.1 - Número de elementos para cada geometria

Número do Teste	Velocidade de Rotação (rpm)	Profundidade de Corte (mm)	Distância Usinada (mm)	Fluído de Corte	Material da Peça	Avanço (mm/min)
1	5410	3,5	60	Sem Fluído	Aço SAE 1020	310
2	6840	3,5	60	Sem Fluído	Aço SAE 1020	310
3	8910	3,5	60	Sem Fluído	Aço SAE 1020	310

Este processo de fresamento consistiu em avançar a extremidade livre da peça com direção a fresa, tendo uma distancia usinada total de 60 mm com apenas um passe. Uma das peças que foi submetida a este procedimento pode ser vista na Figura 5.2. A peça avança até a fresa, a qual tem sua velocidade de rotação teoricamente inalterada até o fim do processo. Depois de usinado os 60 mm, a fresa se afasta da peça verticalmente, este detalhe é importante uma vez que se a fresa saísse por um dos lados ou voltasse, usinaria novamente a superfície, mudando totalmente a rugosidade e o perfil da superfície.

Figura 5.2 - Exemplo de amostra após o processo de fresamento



Fonte: (Próprio autor)

Segundo Soares (2008), as vibrações que decorrem da ação de forças geradas pelo próprio corte do material pela ferramenta podem ser basicamente divididas em dois tipos: as forçadas pela passagem de dentes, que possuem

amplitude proporcional à espessura do cavaco, e as vibrações regenerativas, que resultam de um mecanismo de auto-excitação na geração da espessura do cavaco. Para o surgimento desta última, um dos modos estruturais do sistema máquina-ferramenta-peça é inicialmente excitado por forças de corte (ALTINTAS, 1995, apud SOARES, 2008). Assim, uma superfície ondulada resultante da passagem de um gume é removida pelo subsequente, que também deixa uma superfície ondulada devido a vibrações estruturais. Dependendo da diferença de fase entre duas ondulações sucessivas, as vibrações podem ser atenuadas ou ampliadas. No caso da instabilidade, a espessura máxima do cavaco pode crescer exponencialmente oscilando em uma frequência próxima do modo estrutural dominante do sistema.

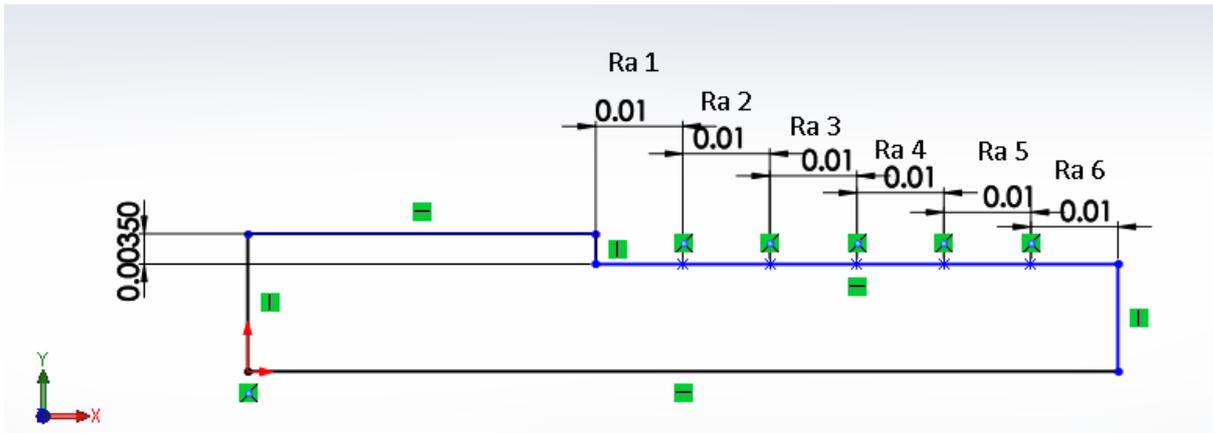
Para o estudo tanto analítico quanto numérico, deseja-se trabalhar com a vibração forçada. Operar no regime de vibração regenerativa é indesejável, uma vez que as equações utilizadas não se aplicam, seria necessário um novo equacionamento e uma abordagem completamente diferente. A maneira mais simples para evitar esta vibração regenerativa experimentalmente é escolher uma velocidade de avanço bem pequena.

Assim como a primeira etapa do procedimento experimental, um acelerômetro estava presente durante toda a usinagem, sendo este fixado na etapa de impactação e removido apenas após o procedimento de fresamento. Ao contrário da função do acelerômetro na primeira etapa, o qual era vital para obterem-se determinadas características do sistema, aqui ele tem apenas um caráter informativo. Se a simulação do processo de usinagem fosse no domínio do tempo, poder-se-ia comparar as medições do acelerômetro com os deslocamentos de um ponto na simulação.

### 5.3 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

A última etapa do procedimento experimental é a medição da rugosidade das peças fresadas. Utilizou-se um rugosímetro Mitutoyo SJ – 210, em síntese, para cada uma das amostras fresadas, mediu-se a rugosidade média ( $R_a$ ). O comprimento de medição foi de 10 mm, como a distancia usinada citada anteriormente foi de 60mm, 6 valores de rugosidade foram obtidos, estes mostrados na Figura 5.3.

Figura 5.3 - Rugosidades média de uma amostra



Fonte: (Próprio autor)

No capítulo de discussões de resultados estes valores de rugosidade serão estudados para as diferenças velocidades de corte e também para as várias geometrias.

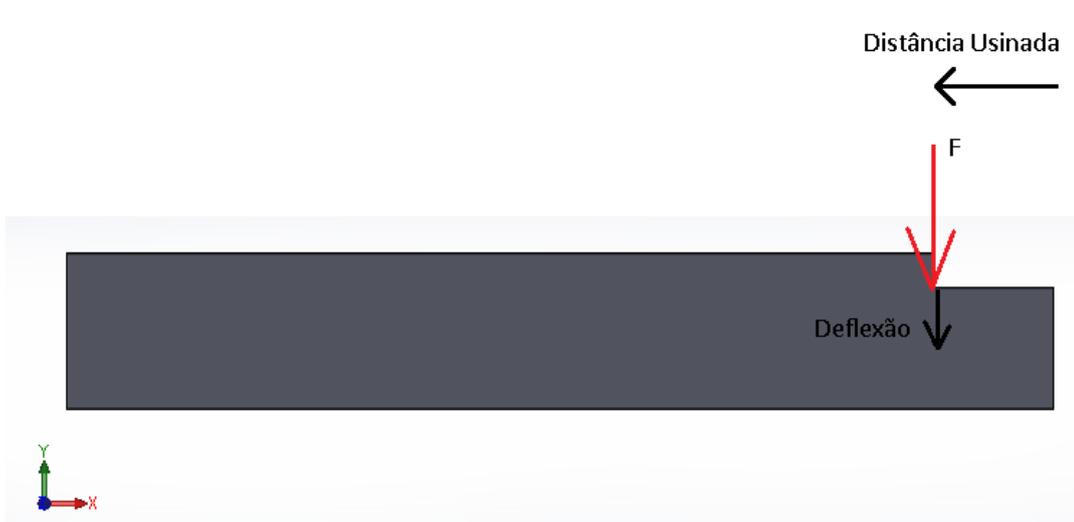
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DA PEÇA E PROFUNDIDADE DE CORTE

Como citado anteriormente, a escolha das dimensões da peça não ocorreu de maneira randômica, além da disponibilidade de determinada seção transversal, objetivou-se escolher uma dimensão que possibilitasse a fresa excitar a viga próxima da seção natural desta. Se fosse escolhida uma viga cuja relação entre rigidez e massa fosse muito alta, as frequências naturais desta seriam muito superiores às quais a máquina conseguiria excitar. Partindo do princípio que a velocidade de rotação nominal máxima do centro de usinagem é de 10000 rpm, e que a ferramenta utilizada tinha 6 dentes, logo a frequência da força de excitação máxima seria de 60000rpm.

Uma planilha genérica foi criada, onde valores de várias seções transversais disponível no mercado foram inseridas, bem como diversos comprimentos variando de 50 a 200 mm foram testados, e uma curva da frequência natural para cada distancia usinada foi plotada. A distância usinada é medida a partir da extremidade livre da viga engastada. Para os cálculos, a força e o deslocamento foram aplicados e medidos no ponto correspondente ao contato do dente da fresa com a peça, conforme mostrado na Figura 6.1.

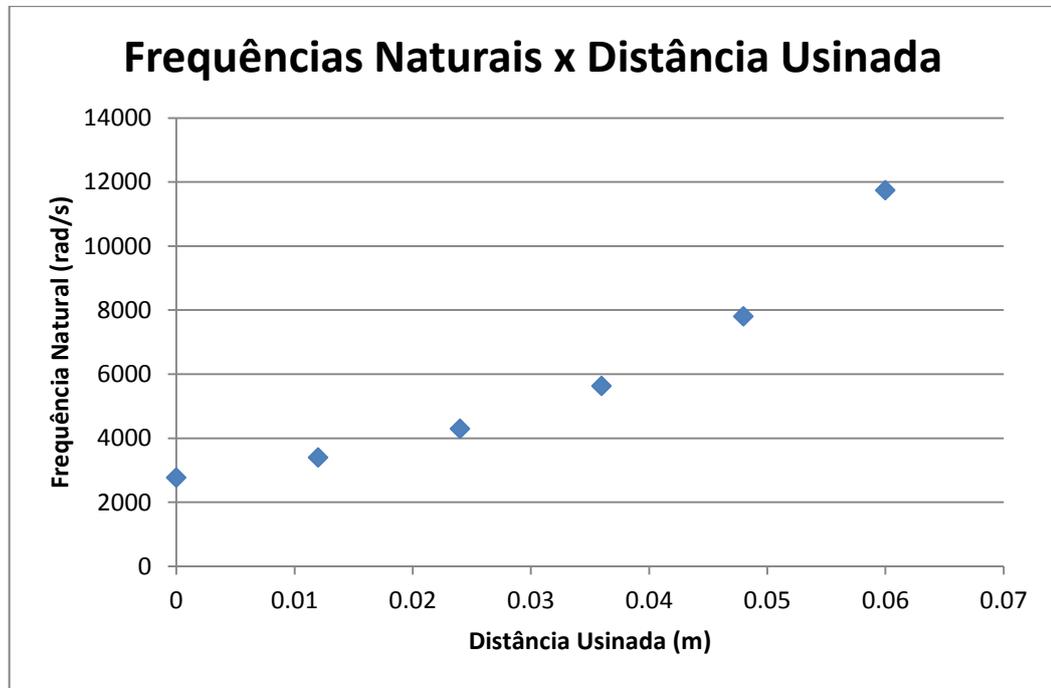
Figura 6.1 – Distancia usinada e deflexão



Fonte: (Próprio autor)

Dentre as seções disponíveis, escolheu-se uma quadrada de lado 15,87 mm. As frequências naturais das várias geometrias estão mostradas na Figura 6.2.

Figura 6.2 – Frequências naturais versus distância usinada



Fonte: (Próprio autor)

Observa-se que para uma distância usinada de 0,012m, a frequência natural é de aproximadamente 3400 rad/s, valor próximo de 32000rpm, isto significa que a fresa consegue excitar a estrutura nesta frequência. Para uma distancia usinada de 0,036m, a frequência natural é de 5600 rad/s, ou próximo de 54000 rpm, este seria próximo do valor máximo que a fresa conseguiria excitar a estrutura.

## 6.2 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA SOLUÇÃO ANALÍTICA

Depois de definido material e as dimensões da viga, pode-se partir para a análise da resposta em frequência da viga. As propriedades físicas da viga estão mostradas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Propriedades físicas da viga

Propriedade	Valor
Comprimento (m)	0,1
Largura e altura (m)	0,01587
Modulo de Elasticidade (GPa)	200
Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	7800
Poisson	0,3
Momento de Inércia Y (m <sup>4</sup> )	2,50325*10 <sup>-09</sup>

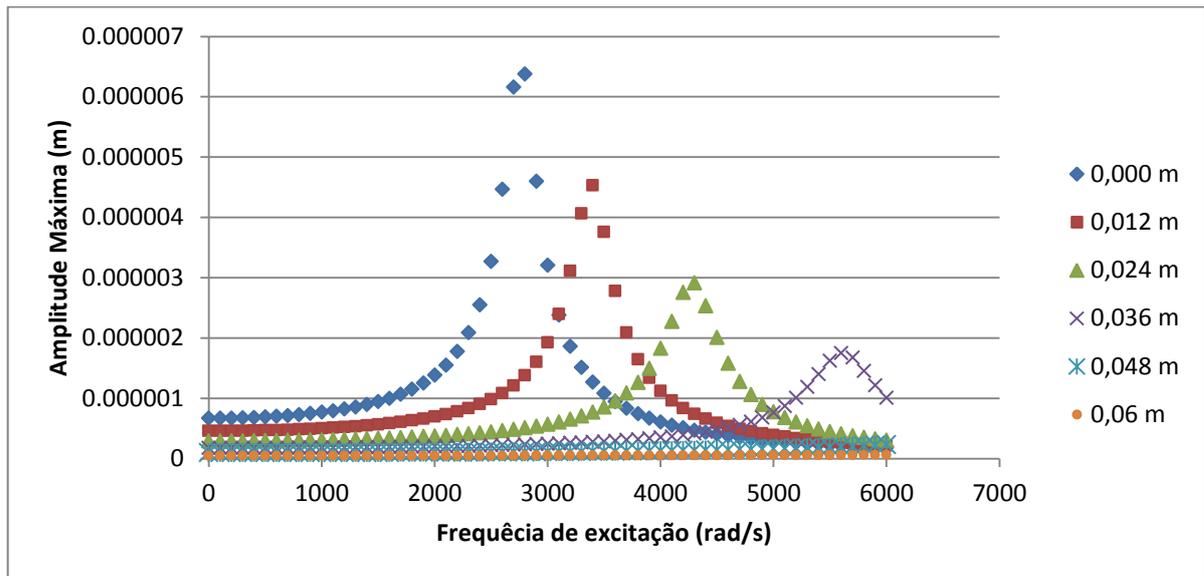
A princípio, 6 geometrias diferentes foram utilizadas, os valores de rigidez e massa das respectivas geometrias estão listados na Tabela 6.2. Os valores de rigidez são calculados utilizando-se os deslocamentos dos mesmos pontos onde aplica-se a força, por exemplo, na geometria com distância usinada de 0,012m, o ponto de aplicação da força e de medição do deslocamento está a 0,012m da extremidade livre.

Tabela 6.2 - Rigidez e massa para as diferentes geometrias

Distância Usinada	Rigidez (N/m)	Massa (kg)
0	1,50*10 <sup>6</sup>	0,196448
0,012	2,20*10 <sup>6</sup>	0,191249
0,024	3,42*10 <sup>6</sup>	0,18605
0,036	5,73*10 <sup>6</sup>	0,180851
0,048	1,07*10 <sup>6</sup>	0,175652
0,060	2,35*10 <sup>6</sup>	0,170453

Utilizando a equação 3.8, e variando-se a frequência de excitação  $\omega$  de 0 a 6000 Hz (valor próximo do qual a fresa consegue excitar a estrutura), pode-se obter a resposta em frequência das 6 diferentes geometrias. O gráfico de amplitudes máximas x frequências de excitação é mostrado na figura 6.3.

Figura 6.3 – Resposta em frequência para as diferentes estruturas



Fonte: (Próprio autor)

Este gráfico possibilita algumas análises interessantes, sabe-se que os picos de amplitude de cada geometria correspondem aos valores onde a frequência de excitação corresponde com a frequência natural amortecida da estrutura. Observa-se que antes do processo de usinagem, a frequência natural amortecida da estrutura é de aproximadamente 2800 rad/s, e a medida que a superfície vai sendo usinada, esta frequência vai crescendo, com 0,036m de distancia usinada, a frequência natural de ressonância é próxima de 5600 rad/s.

Se for observado este gráfico analisando agora a frequência de excitação, podemos saber em qual geometria determinada frequências trará uma amplitude máxima. Por exemplo, se a frequência de excitação no processo for de 3400 Hz, a amplitude máxima ocorrerá na geometria com 0,012m de superfície usinada. Vale ressaltar que essas 6 geometrias são apenas uma discretização para descrever o problema, que na verdade é contínuo, durante o processo de usinagem a peça passará por todas as geometrias entre 0,00 m e 0,06 m de distancia usinada.

A figura 6.3 é um gráfico de resposta em frequência, e este é fundamental para o procedimento experimental subsequente, como citado anteriormente foram escolhidas 3 velocidade de corte, as quais correspondem à maior amplitude de 3 geometrias diferentes, conforme mostrada na Tabela 6.3 a seguir:

Tabela 6.3 - – Geometrias com a maior amplitude para determinada rotação da fresa

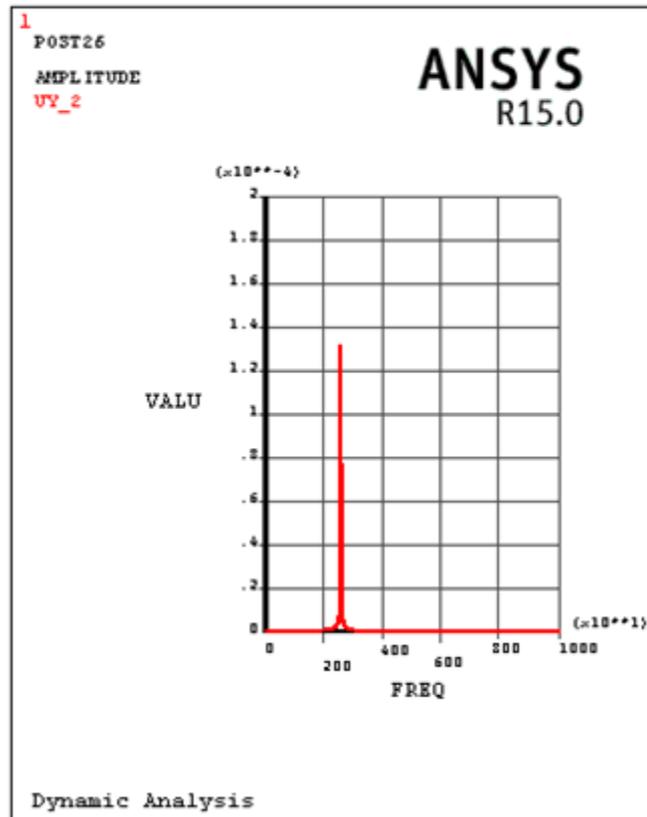
Excitação (rad/s)	Excitação (rpm)	Rotação da fresa (rpm)	Geometria de maior Amplitude (m)
3400	32467.61	5411.268	0,012
4300	41061.98	6843.663	0,024
5600	53476.06	8912.677	0,036

Em suma, realizando-se três procedimentos experimentais, cada um deles com uma das três rotações da fresa citada na Tabela 6.3 acima, obter-se-ia amplitudes máximas em locais diferentes da peça para cada frequência de excitação. Portanto, para validar tal procedimento analítico e as simplificações feitas, pode-se medir a rugosidade das peças depois do processo. Por exemplo, a primeira amostra seria fresada a 5411 rpm, logo seria esperado obter-se o pior acabamento superficial numa distancia 0,012m da extremidade livre da peça, e para a rotação de 8912, o pior acabamento superficial esperado seria a 0,036m da superfície usinada.

### 6.3 SIMULAÇÃO

Como citado anteriormente, a simulação foi dividida em duas partes, sendo a primeira utilizando elemento de viga e a peça simulada era uma viga engastada. Como esperado, este procedimento teve como resultado valores muito próximos do teórico, a frequência natural encontrada na simulação foi de 2765, arredondando-se o valor analítico, os resultados são idênticos. Sendo a concordância dos resultados da primeira simulação com os cálculos analíticos um pré-requisito, pode-se prosseguir para segunda etapa da simulação

Figura 6.4 – Deslocamentos versus frequência de excitação



Fonte: (Próprio autor)

Pode-se prosseguir à exposição e discussão dos resultados da segunda etapa. A primeira geometria estudada foi a de distancia usinada de 0,012m. A força aplicada para este e para as próximas duas simulações esta mostrada na Figura 6.5, bem como o ponto onde registrou-se os deslocamentos:

Figura 6.5 – Local de aplicação das forças e captura dos deslocamentos

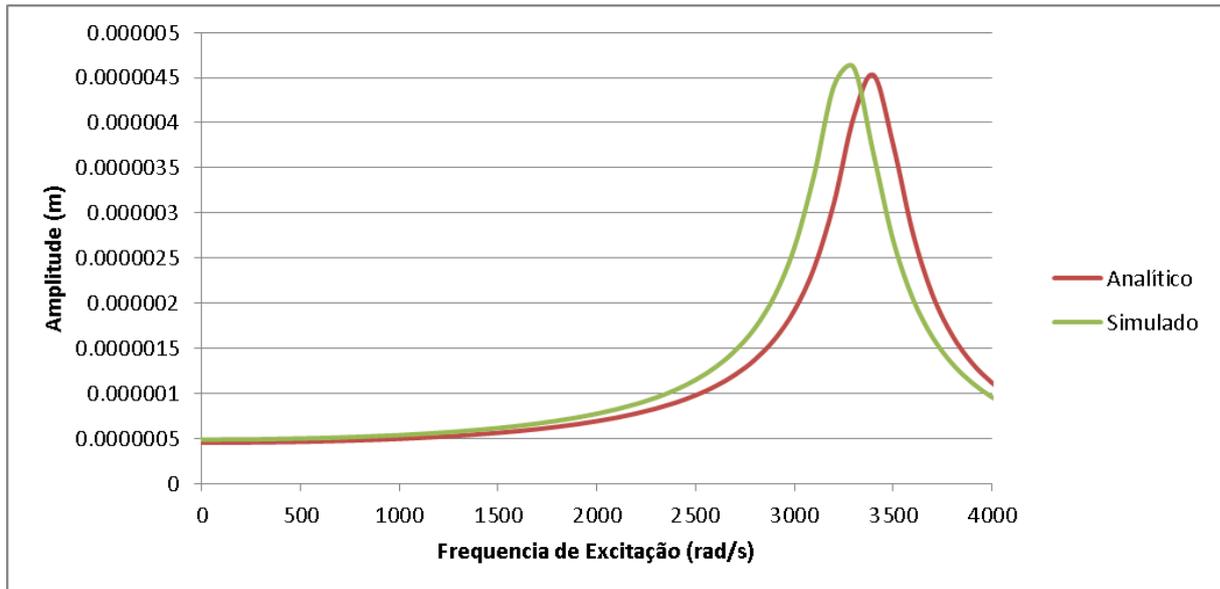


Fonte: (Próprio autor)

O ponto onde se medem os deslocamentos deve ser suficientemente longe do ponto de aplicação das forças, para evitar captar as deformações na malha próximas da força concentrada.

O resultado da primeira desta primeira simulação com entalhe pode ser visto na Figura 6.6 a seguir:

Figura 6.6 – Comparação resultado analítico versus primeira geometria



Fonte: (Próprio autor)

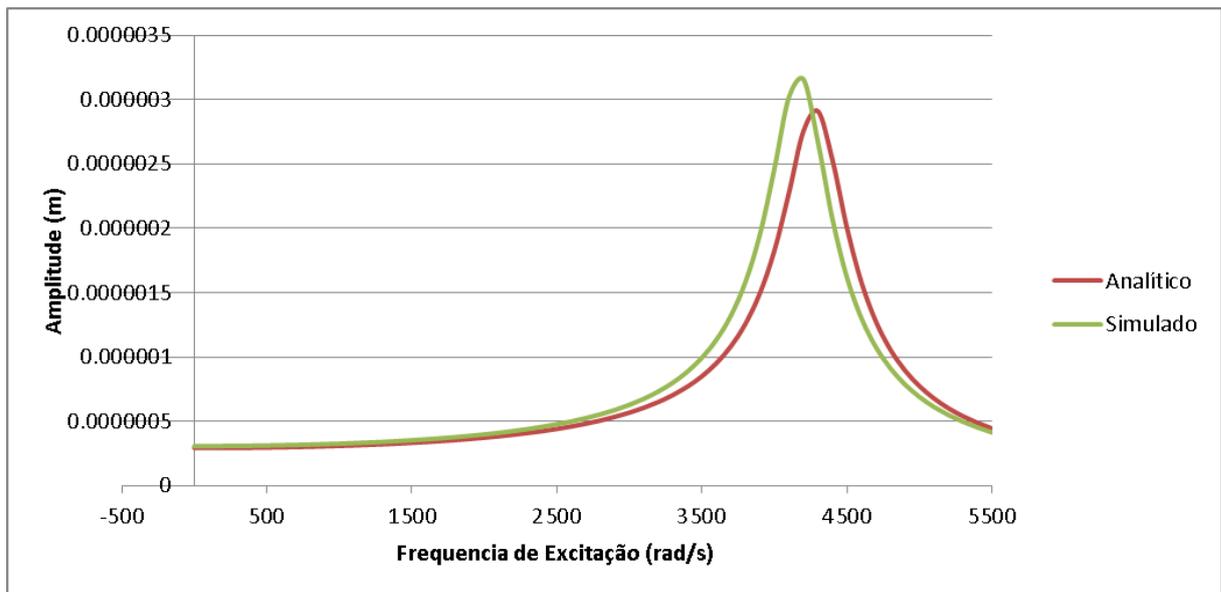
Comparando-se os resultados, ambos estão próximos, mas mesmo assim existem algumas diferenças significativas, houve uma diferença na frequência de ressonância de aproximadamente 60 rad/s. Destaca-se também a amplitude da simulação, a qual é na maioria das vezes superior ao analítico. Ambos os fenômenos podem ser facilmente explicados. Considerando o fator de amortecimento e a massa iguais para tanto a simulação quanto para a abordagem analítica, a divergência de resultados pode ser explicada pelas diferentes rigidez. Na simulação, sendo a força aplicada sobre um canto vivo, tensões de grande magnitude aparecem nesta região, resultando em deformações também grandes, logo a rigidez da simulação numérica tende a ser um pouco menor que a do modelo analítico. Este padrão se repete para as outras duas simulações.

Outro fator de erro na simulação está relacionado ao tipo de elemento, elementos triangulares lineares tem dificuldade em representar corretamente efeitos de flexão.

O resultado da simulação acima é satisfatório, mas não pode-se dizer por enquanto que ambos estão certos. Somente o procedimento experimental pode assegurar que tanto a simulação quanto o resultado analítico são capazes de descrever este fenômeno de fresamento.

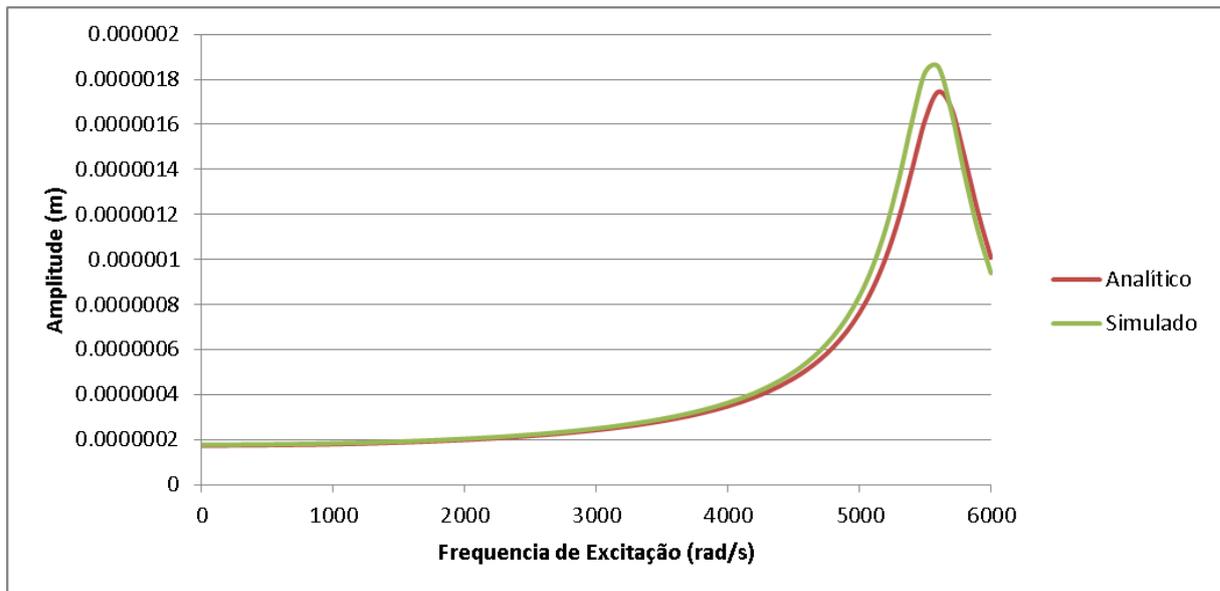
Para a segunda e terceira geometria simulada, os resultados seguiram a tendência da primeira e são mostrados nas Figuras 6.7 e 6.8.

Figura 6.7 – Comparação resultado analítico versus segunda geometria



Fonte: (Próprio autor)

Figura 6.8 – Comparação resultado analítico versus terceira geometria



Fonte: (Próprio autor)

Observa-se que de maneiras mais ou menos atenuadas, as três simulações apresentaram comportamento similares quando comparadas com o resultado analítico, como regra apresentaram frequências de ressonância menores, e deslocamentos maiores. .

#### 6.4 ACABAMENTO SUPERFICIAL DO PROCESSO EXPERIMENTAL E COMPARAÇÕES

Depois de efetuados os 3 fresamentos (cada um deles com as rotações citadas anteriormente), inicia-se a medição das rugosidades médias (Ra). Os locais de cada uma das medições das rugosidades estão listados no procedimento experimental. Para a amostra 1 os valores de Ra estão listados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Rugosidades da amostra 1

Amostra 1	Rotação da Ferramenta: 5410 rpm
Ra1 (µm)	0,395
Ra2 (µm)	4,954
Ra3 (µm)	3,277
Ra4 (µm)	2,217
<b>Ra5 (µm)</b>	<b>12,520</b>
Ra6 (µm)	2,056

Uma fotografia deste corpo de prova após o processo de fresamento esta mostrado na Figura 6.9.

Figura 6.9 – Amostra 1, usinada a 5410 rpm



Fonte: (Próprio autor)

Observa-se na Tabela 6.4 os valores de rugosidade para as seis seções medidas, em negrito está a seção que corresponde a distância de 0,010m à 0,020m da extremidade livre da viga, neste intervalo esta o lugar onde se esperava a máxima amplitude (0,012m). Logo, conclui-se que para o primeiro experimento houve uma concordância entre os resultados analíticos e de simulação com os experimentais.

O próximo experimento, com todos os parâmetros de usinagem inalterados, com exceção da rotação da ferramenta, seguiu o mesmo procedimento e as rugosidades médias estão mostradas na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Rugosidades da amostra 2

Amostra 2	Rotação da Ferramenta: 6840 rpm
Ra1 ( $\mu\text{m}$ )	0,514
Ra2 ( $\mu\text{m}$ )	0,312
Ra3 ( $\mu\text{m}$ )	1,271
<b>Ra4 (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>2,230</b>
Ra5 ( $\mu\text{m}$ )	1,134
Ra6 ( $\mu\text{m}$ )	1,939

Novamente em negrito está o intervalo onde era esperado o pior acabamento superficial. Assim como a amostra 1, o resultado experimental condiz com o esperado pela solução analítica e pela simulação. Uma foto da amostra 2 após o procedimento experimental é mostrada na Figura 6.10.

Figura 6.10 – Amostra 2, usinada a 6840 rpm



Fonte: (Próprio autor)

Comparando-se os dois primeiros procedimentos experimentais, tem-se uma grande diferença entre as rugosidades médias mais altas (quase 5 vezes), aqui fica evidente uma limitação da metodologia utilizada, consegue-se prever o ponto de pior acabamento superficial, mas não consegue-se quantificar tais rugosidades.

A terceira e última amostra foi fresada com uma rotação de 8910 rpm, e os valores de rugosidade medidos são apresentados na tabela 6.6.

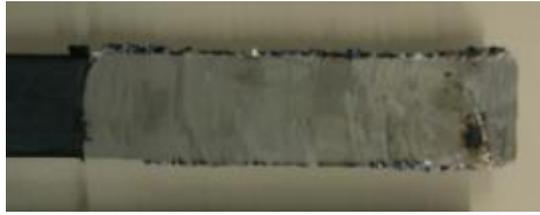
Tabela 6.6 - Rugosidades da amostra 3

Amostra 3	Rotação da Ferramenta: 8910 rpm
Ra1 ( $\mu\text{m}$ )	1,864
Ra2 ( $\mu\text{m}$ )	1,820
<b>Ra3 (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>3,316</b>
Ra4 ( $\mu\text{m}$ )	2,867
Ra5 ( $\mu\text{m}$ )	1,193
Ra6 ( $\mu\text{m}$ )	13,785

Observa-se em negrito que para esta amostra, o pior acabamento superficial era esperado em torno de 0,036m da extremidade livre, na zona correspondente à medição de Ra3. Entretanto a rugosidade máxima foi encontrada próxima à extremidade livre. Logo, os resultados analíticos e de simulação estão em desacordo com os obtidos no processo experimental.

A amostra depois de usinada apresentou algumas características inesperadas, a Figura 6.11 mostra a peça depois do fresamento. Nas bordas observa-se um amassamento do cavaco ao invés de este ser removido. Próximo à extremidade livre da peça, onde foi observada a pior rugosidade, pode ser constatada uma grande irregularidade na superfície da peça.

Figura 6.11 – Amostra 3, usinada 8910 rpm



Fonte: (Próprio autor)

Como citado anteriormente, o procedimento experimental foi realizado com uma velocidade de avanço constante (310 mm/min), a escolha deste parâmetro como fixo traz alguns problemas, à medida que aumenta-se a velocidade de rotação, o avanço por dente se torna menor. Neste último experimento, como a velocidade de rotação foi a maior das três, o avanço por dente foi o menor, com um avanço por dente muito pequeno, o cavaco não é facilmente arrancado, e um amassamento ocorre. Tal fator resultou na divergência dos resultados e na geometria irregular fruto do último fresamento. Ao invés de manter-se fixa a velocidade de avanço, o ideal seria ter-se mantido fixa o parâmetro de avanço por dente.

## 7 CONCLUSÕES

Apesar das abordagens utilizadas nos procedimentos analíticos e de simulação serem extremamente simples, envolvendo apenas conceitos básicos de mecânica dos sólidos e vibrações, foi possível estimar o local que iria apresentar o pior acabamento superficial de cada peça. Logo, algumas simplificações feitas, como por exemplo, a consideração de que o efeito de contato entre a fresa e a peça poderia ser desprezado para este caso, apresentaram resultados satisfatórios.

O trabalho apresenta certas limitações referentes à previsão do acabamento superficial, pelos métodos empregados é possível estimar o lugar que apresenta a pior rugosidade, mas não é possível estimar os valores desta, nem a rugosidade em outros pontos. A abrangência do estudo deste caso também se apresenta limitada, se, por exemplo, um avanço significativamente maior fosse utilizado, condições de excitação diferentes ocorreriam como a vibração auto-regenerativa, resultando em um acabamento superficial completamente diferente.

Pode-se dizer que mesmo o processo de usinagem envolvendo fenômenos de natureza mecânica e térmica complexos, é possível com algumas ferramentas simular os efeitos deste. A discretização do processo de usinagem, separando esta em várias simulações diferentes, com diferentes geometrias, tornou possível obter resultados próximos dos reais para este processo de fresamento em dois dos três procedimentos. Para resultados mais assertivos, um número bem maior de experimentos seria necessário, bem como uma gama maior de rotações deveriam ser testadas.

Por fim, a alteração do parâmetro fixo de velocidade de avanço pelo avanço por dente também poderia trazer resultados mais satisfatórios, garantindo a remoção de material e evitando que ocorra um amassamento devido a um avanço por dente muito baixo à altas rotações da fresa.

## REFERÊNCIAS

GRZESIK, W. Advanced Machining Processes of Metallic Materials, 1-3 p., 2008.

STOETERAU, L.M., ARSEGO, C., FANCELLO, E. A., WEINGAERTNER, W.L., Simulação Estática e Dinâmica de um Torno CNC para Usinagem de Ultraprecisão. XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, p. 2-3, 1999.

DOMINGOS, D.C., SENA, L., SHROETER, R.B., BOEIRA, A.M.G., Simulação Numérica dos Esforços no Processo de Fresamento Externo de Munhões e Virabrequim, p.1-2, 2002.

PIMENTEL, R., Modelagem e Simulação de Processos de Usinagem, Seminário de Tecnologia de Usinagem, p. 6-9, 2011.

BANIN, R.B. Jr., Análise de Tensões Residuais, Integridade Superficial e Forças de Usinagem no Fresamento de Topo de Aço 4340 Endurecido, Dissertação de Mestrado, FEI, 2009.

SANDVIK, C., Fresamento - Guia de Orientações Gerais, Sandvik-Coromant, 2012.  
RIBEIRO, J.S. Forças de Usinagem no Fresamento de Aços para Matrizes, p. 3-14, 2006.

HUTCHINGS, I.M, Tribology — Friction and Wear of Engineering Materials, 1992.

ROSA, A.B., DINIZ, A.E., Influência das Condições de Usinagem na Rugosidade de Peças de Aço Fresadas com Fresas de Topo de Metal Duro e Coronite, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, p. 2-8, 1999.

ÁVILA, R.F., BAPTISTA, B.S., BARBOSA, C.A., ABRÃO, A.M., Influência do Fluido de Corte Sobre as Forças de Usinagem e o Acabamento do Aço Inoxidável Austenítico ABNT 304, p. 4-10, 2004

THOMSON, W., Teoria da Vibração com Aplicações, p. 48-63, 1973.

POLLI, M.L., Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Fresamento a Altas Velocidades de Corte, Dissertação de Doutorado, UFSC, 2005.

SOARES, L.O., Desenvolvimento de Rotina Computacional para Controle de Vibrações em Usinagem, XIV Encontro de Iniciação Científica e Pós Graduação, ITA, 2008;