

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DOS PARÂMETROS DE SAÍDA GERADOS NO FRESAMENTO FRONTAL DO
AÇO INOXIDÁVEL AISI 316 PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE USINAGEM

por

Jeison Patrick Sperotto

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2016.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DOS PARÂMETROS DE SAÍDA GERADOS NO FRESAMENTO FRONTAL DO
AÇO INOXIDÁVEL AISI 316 PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE USINAGEM

por

Jeison Patrick Sperotto

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientador: Esp. Bruno Santana Sória

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Flavio José Lorini

Prof. Dr. Gilberto Dias da Cunha

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 24 de junho de 2016.

AGRADECIMENTOS

Ao professor André João de Souza, pela orientação.

Ao mestrando Bruno Santana Sória, pela coorientação e auxílio prestado no desenvolvimento deste trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS) da UFRGS Guilherme Vargas Schirmer e ao colega Felipe Koch, pelo apoio ao longo de todo o trabalho, principalmente durante a execução dos experimentos.

À empresa Walter Tools, pela doação das ferramentas de corte (cabeçote e insertos).

À empresa Quimatic/Tapmatic, pelo Nebulizador V e pelo fluido Quimatic Jet utilizado nos experimentos com MQL.

Ao meu tio, Luiz Antônio Sperotto, pela doação dos corpos de prova (AISI 316) para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS, pela análise química do material e pelo ensaio de dureza.

À minha namorada, Cláudia Alessi, por todo apoio e compreensão.

Aos meus familiares, por tudo.

SPEROTTO, J. P. **Estudo dos parâmetros de saída gerados no fresamento frontal do aço inoxidável AISI 316 para diferentes condições de usinagem.** 2016. 23 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

As vibrações geradas durante o corte do aço inoxidável austenítico são um fator de importante estudo, pois afetam diretamente a vida da ferramenta, as forças de usinagem e a qualidade superficial da peça trabalhada. Assim, pretende-se avaliar os efeitos das variações das condições de usinagem (rotação, profundidade de corte axial e meio lubrificante) sobre as forças de usinagem, a vibração da ferramenta e as rugosidades das superfícies originadas pelo fresamento frontal do aço inoxidável AISI 316. Para isso, empregaram-se três valores de velocidade de corte, quatro valores de profundidade de corte axial e duas condições de lubrificação (a seco e com mínima quantidade de lubrificante, MQL) aplicando uma ferramenta (fresa de topo reto) com dois insertos intercambiáveis de metal duro. A força de usinagem foi determinada através da resultante das componentes ortogonais captadas através de um sistema de aquisição de sinais baseado em um dinamômetro piezoeletrico. A resultante foi analisada através da média quadrática (RMS). As texturas das superfícies fresadas foram avaliadas pelos parâmetros de rugosidade RMS (R_q) e total (R_t) utilizando um rugosímetro portátil. Os sinais de vibração gerados pelas variações das componentes ortogonais da força de usinagem foram processados através da Transformada Discreta de Wavelet utilizando o *software* MATLAB. Com isto, verificou-se uma tendência aos aumentos da força e da vibração com o aumento da profundidade de corte axial. A rotação da fresa afetou a vibração de maneiras diferentes, dependendo do valor da profundidade de corte axial. O uso de MQL não gerou vantagens significativas em relação ao corte a seco. Os parâmetros utilizados neste estudo não conduziram a operação de corte a uma situação de instabilidade. Assim, pode-se afirmar que, dentre os valores utilizados, a melhor combinação de parâmetros representa a situação com a maior taxa de remoção de material (corte a seco com maiores velocidade e profundidade).

PALAVRAS-CHAVE: Aço inoxidável AISI 316, Análise de vibração, Rugosidade, Transformada Discreta de Wavelet.

SPEROTTO, J. P. **Study of the output parameters generated in stainless steel AISI 316 face milling for different machining conditions.** 2016. 23 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

The vibrations generated in austenitic stainless steel cutting directly affect the tool life, cutting forces and machined surface quality. Thus, it is intended to evaluate the variations of cutting condition effects (spindle speed, axial depth of cut and cutting fluid) in cutting forces, tool vibration and roughness surface derived by stainless steel AISI 316 face milling. For this, three cutting speeds, four axial depths of cut, two lubricant conditions (dry and minimum quantity, MQL) and one end mill with two carbide inserts were used. The machined force was determined by the resultant of orthogonal components acquired via data acquisition system based on a piezoelectric dynamometer. This resultant was analyzed by the root mean square (RMS). The milling surface textures were evaluated via RMS (R_q) and total (R_t) roughness parameters. The vibration signals generated by the variations of the orthogonal components were processed via Discrete Wavelet Transform using MATLAB software. Thus, an increase in force and vibration tendencies with increase in axial depth of cut were verified. The spindle speed affected the vibration in different ways depending on the axial depth of cut value. The MQL condition in comparison to dry cut did not generate significant advantage. The change of cutting parameters did not lead to instability in end milling. Therefore, considering the cutting conditions used, the best combination of parameters corresponds to the maximum material removal rate (dry cut with higher cutting speed and higher axial depth of cut).

KEYWORDS: Stainless steel AISI 316, Vibration analysis, Surface roughness, Discrete Wavelet Transform.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1	Força de Usinagem	2
3.2	Vibrações no Fresamento	2
3.3	Rugosidade da Superfície Usinada	4
3.4	Meio Lubrificante	5
3.5	Transformada de Wavelet.....	5
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	7
4.1	Equipamentos e Materiais	7
4.2	Metodologia	9
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	11
5.1	Força de Usinagem RMS	11
5.2	Análise da Vibração da Força de Usinagem	11
5.2.1	Escolha da Família e do Nível da Função Base.....	11
5.2.2	Análise da Vibração via Detalhamento cDi.....	12
5.3	Rugosidades das Superfícies Fresadas	13
6	CONCLUSÕES	14
6.1	Propostas para Trabalhos Futuros	14
	REFERÊNCIAS.....	14
	APÊNDICES.....	16

1 INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem estão em constante evolução, visando sempre o aumento de produtividade e a melhoria da qualidade das peças fabricadas. Com isso, aumentam as exigências de qualidade de máquinas-ferramenta e ferramentas de corte.

Dentre esses processos, o fresamento é amplamente utilizado por possibilitar a geração de superfícies de diversos tipos e formas geométricas através da remoção progressiva de material por meio do avanço de uma ferramenta rotativa. Além disso, garante elevadas taxas de remoção de material, pois a ferramenta (fresa) possui múltiplas arestas de corte. A escolha definitiva dessa geometria vai depender das características da máquina-ferramenta disponível. Assim, o fresamento pode ser frontal ou tangencial/periférico. Quando tangencial, o eixo da fresa permanece paralelo à superfície que está sendo gerada durante a usinagem. Quando frontal, o eixo de rotação permanece perpendicular à superfície da peça. A fabricação de algumas peças é possível apenas por fresamento frontal, como algumas superfícies não planas e de não revolução [Machado *et al.*, 2009, Diniz *et al.*, 2013].

O aperfeiçoamento das condições de corte, o gerenciamento das ferramentas e o monitoramento das operações tornaram-se atividades indispensáveis para a melhoria no desempenho dos processos de usinagem. Estas garantem que seja possível a detecção de falhas no funcionamento da ferramenta utilizada na máquina, além da execução de ações de prevenção (interrupção do avanço e da rotação) para proteger a ferramenta, a máquina e a peça contra colisões e/ou danos no processo, resultantes da falha detectada [Souza, 2015].

Um desafio para o estudo da usinagem está na aplicação de aços inoxidáveis com altos teores de níquel (acima de 10% em massa) e cromo (acima de 20% em massa). Eles são largamente empregados na fabricação de peças e componentes e usados em situações adversas, devido às propriedades mecânicas e à elevada resistência à corrosão. Tais aços são de difícil usinagem quando comparados a aços ao carbono comuns. A baixa usinabilidade se dá devido ao alto grau de encruamento (endurecimento por deformação), devido à composição química, por gerar cavacos longos e dúcteis, por resultar em acabamento superficial pobre e por reduzir o tempo de vida da ferramenta [Sandvik, 2012].

Um tipo particular de aço inoxidável é o AISI 316. Este é um aço austenítico destinado a peças que exijam alta resistência à corrosão, como válvulas, tubulações e peças para indústria química e alimentícia. Esse tipo de aço apresenta maior grau de encruamento e cavacos mais dúcteis que outros aços inoxidáveis (p. ex. martensíticos e ferríticos). Sendo assim, a usinagem desse material é restrita a uma faixa limitada de parâmetros de corte [Sandvik, 2012].

A característica de formação do cavaco em aços inoxidáveis pode gerar grandes vibrações no processo de usinagem, tornando-se assim um fator de importante estudo. Tais vibrações afetam diretamente a vida da ferramenta e a qualidade superficial da peça trabalhada, causando redução da produtividade do processo.

Uma forma de se atingir maior produtividade e/ou aumento da vida da ferramenta é pela utilização de meio lubrificante-refrigerante na operação de corte. No fresamento, recomenda-se o corte a seco ou com fluido de corte em abundância. Isso se deve ao fato de ocasionar uma minimização da variação de temperatura que causa trincas térmicas na ferramenta de corte.

Diversas funções são atreladas ao uso de fluido de corte durante a usinagem. Entre as principais, pode-se citar a lubrificação a baixas velocidades de corte, refrigeração a altas velocidades de corte, remoção dos cavacos da zona de corte e proteção da máquina-ferramenta e da peça contra a oxidação. O sistema de aplicação por mínima quantidade de lubrificante (MQL) é uma solução ecológica e econômica, pois se tem a aplicação precisa de um lubrificante-refrigerante adequado diretamente na aresta ativa da ferramenta. A vazão do MQL é muito baixa quando comparada ao fluido em abundância (cerca de 10000 vezes menor). No caso, o óleo evapora quase que totalmente na região de corte e, assim, o cavaco, a peça e a ferramenta permanecem praticamente secos [Machado *et al.*, 2009].

2 OBJETIVO

Analisar a influência dos parâmetros de entrada (rotação, profundidade de corte axial e condição de lubrificante-refrigeração) sobre os parâmetros de saída (força de usinagem, vibração e

rugosidade) resultantes do processo de fresamento frontal do aço inoxidável austenítico AISI 316, dentro das limitações impostas pelo sistema máquina/ferramenta/peça disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS) da UFRGS.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo serão abordados os fundamentos teóricos relativos a força de usinagem em fresamento, as vibrações (livre, forçada e autoexcitada), a rugosidade da superfície usinada, as vantagens e desvantagens da utilização de fluidos de corte (introduzindo o corte a seco e por MQL) e as características básicas da Transformada de Wavelet (WT) aplicada no processamento de sinais sensórios.

3.1 Força de Usinagem

No fresamento frontal com fresa de topo, a aresta inicia o corte em movimento discordante. A espessura do cavaco (h) cresce até um valor máximo ($h_{max} = f_z$) na linha que passa pelo centro da fresa (direção coincidente ao do movimento de avanço). A partir deste momento, o corte passa a ser concordante e a espessura do cavaco decresce até a aresta sair da peça. Assim, a espessura “ h ” varia com a rotação (n) da ferramenta e pode ser calculada como função do avanço por dente (f_z) e da posição angular da fresa (φ). A Equação 3.1 apresenta o comportamento da espessura do cavaco (h) em função da posição angular da fresa (φ) [Lima *et al.*, 2012].

$$h(\varphi) = f_z \cdot \sin \varphi \quad (3.1)$$

Ainda segundo Lima *et al.*, 2012, a decomposição da força de usinagem se dá em três direções representadas pelas Equações 3.2, 3.3 e 3.4. As componentes são, respectivamente, a força radial (F_r), a força tangencial (F_t) e a força axial (F_a). As três forças são dependentes da espessura do cavaco e estão também relacionadas com a geometria da ferramenta, com o material da ferramenta e com o material da peça. No caso das equações, K_r , K_t e K_a indicam as pressões específicas de corte em cada direção e a_p a profundidade de corte axial.

$$F_r = K_r \cdot a_p \cdot h(\varphi) \quad (3.2)$$

$$F_t = K_t \cdot a_p \cdot h(\varphi) \quad (3.3)$$

$$F_a = K_a \cdot a_p \cdot h(\varphi) \quad (3.4)$$

A força de usinagem é a força resultante nas três direções (F_r , F_t e F_a). Em geral, as componentes da força de usinagem são decompostas segundo os eixos coordenados (x , y e z). Assim, a força de usinagem resultante pode ser calculada pela Equação 3.5.

$$F_R = \sqrt{(F_r)^2 + (F_t)^2 + (F_a)^2} = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2} \quad (3.5)$$

3.2 Vibrações no Fresamento

Em processos convencionais de usinagem, a ocorrência de vibrações é sempre presente. Por isso, é importante que se conheça o grau de sua influência sobre o processo. A dinâmica do processo de penetração da aresta de corte, deformações elástico-plásticas do material, cisalhamento e formação do cavaco ocasionam a variação das forças do processo. As vibrações em fresamento surgem devido ao comportamento dinâmico de um ou vários elementos do sistema. A fonte de vibração pode ser originária do próprio processo ou externa.

As vibrações podem ser classificadas segundo o tipo de ocorrência, podendo ser livres, forçadas e/ou regenerativas. As vibrações livres ocorrem quando o movimento resulta apenas de condições iniciais do sistema e são causadas por um impulso de força simples, sendo livremente amortecidas. Já as vibrações forçadas são originárias de excitações harmônicas externas ao processo. Um exemplo desse tipo de vibração no fresamento é a entrada e saída da aresta de corte periodicamente na peça de trabalho [Cabrera, 2015].

Na vibração regenerativa ou autoexcitada, também conhecida como vibração *chatter*, as forças que excitam o sistema são dependentes da cinemática do movimento (autoexcitação), uma vez que o próprio movimento de rotação da ferramenta é responsável pela excitação. A vibração *chatter* limita bastante os processos de usinagem devido às abruptas variações nas forças de corte e ao péssimo acabamento gerado na superfície usinada da peça. O mecanismo mais comum de ocorrência de *chatter* deve-se à variação da espessura do cavaco, ocasionado por ondulações na superfície deixadas pela passagem do dente ao longo da usinagem e defasadas do próximo dente [Cheng, 2009; Faassen, 2007].

A modelagem do sistema mecânico para o fresamento nas direções x e y é representada pela Figura 3.1a, enquanto que a Figura 3.1b ilustra a defasagem (ε) entre dentes consecutivos.

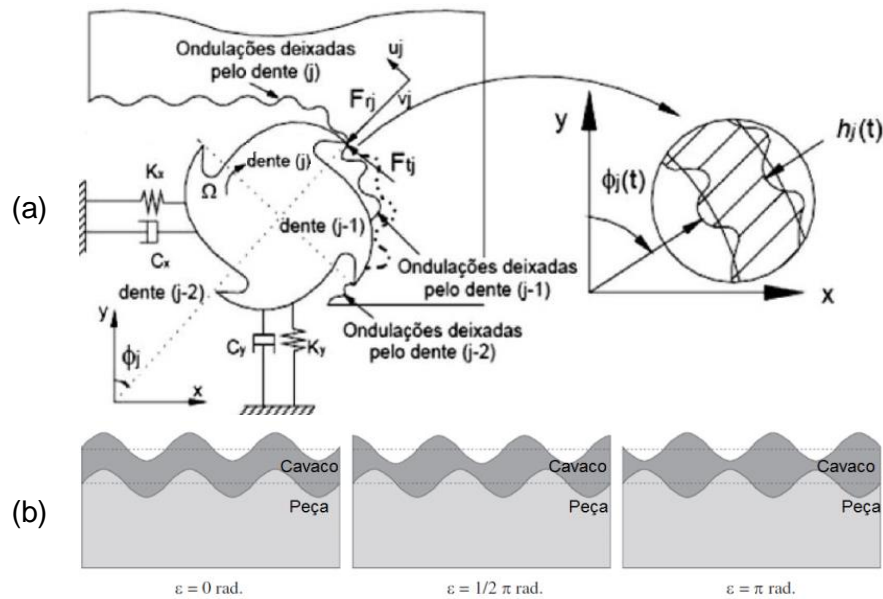


Figura 3.1 – Modelagem do sistema: (a) efeito da vibração [adaptado de Altintas, 2012]; (b) mudança de fase entre dois dentes [adaptado de Faassen, 2007].

Os parâmetros que mais modificam o comportamento dinâmico da usinagem em fresamento são a profundidade de corte axial (a_p) e a velocidade de corte (v_c). Fabricantes recomendam o uso de parâmetros de corte abaixo da capacidade real das ferramentas para evitar vibração *chatter*. Entretanto, isso acarreta maior tempo de usinagem, uma vez que resulta em uma menor taxa de remoção de material. A escolha correta dos parâmetros visa deixar o processo estável [Carvalho, 2014]. Para auxiliar na escolha de parâmetros e verificar a região de não ocorrência desse tipo de vibração utiliza-se o diagrama de lóbulos de estabilidade (Fig. 3.2).

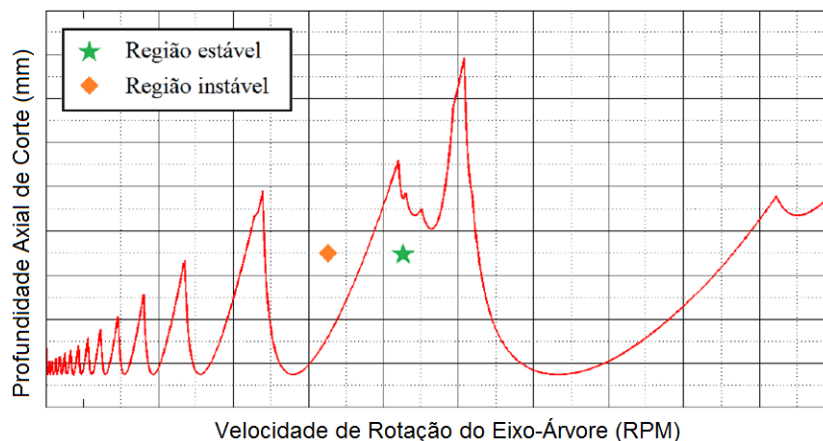


Figura 3.2 – Diagrama genérico de lóbulos de estabilidade [adaptado de Carvalho, 2014].

Este diagrama de estabilidade é uma ferramenta gráfica na qual se pode encontrar a divisão entre um corte estável e um corte instável, sendo elaborado como função da profundidade de corte e rotação da máquina. Analisando com a devida exatidão esse diagrama, é possível obter os parâmetros necessários para realização de um corte estável, com a máxima taxa de remoção de material para uma determinada velocidade de rotação. Acima da linha está a região instável de corte, a qual pode gerar vibração *chatter*. A construção do diagrama é complexa, tendo em vista os vários graus de liberdade do sistema e as variações das intensidades e direções das componentes da força de usinagem que dificultam a análise e o cálculo. Assim, para sua construção, torna-se necessária uma informação prévia como, por exemplo, a função resposta da frequência da ferramenta de corte, da máquina-ferramenta, do dispositivo porta-ferramenta e do material da peça [Cabrera, 2015].

3.3 Rugosidade da Superfície Usinada

A qualidade geral de uma superfície usinada pode ser caracterizada através da medição de quatro parâmetros: rugosidade, ondulações, marcas (denotando as direções das irregularidades) e falhas. Porém, em processos de usinagem é comumente utilizado apenas o parâmetro de rugosidade, o qual se refere a irregularidades microgeométricas existentes nas superfícies das peças [Shaw, 2005].

Para a medição da rugosidade é importante definir o comprimento de amostragem (l_e) ou *cut-off*. Este especifica numericamente o comprimento da frequência de onda acima ou abaixo do qual uma das componentes da superfície (rugosidade ou ondulação) é eliminada. Se o *cut-off* empregado for maior que o necessário, o resultado incluirá valores de ondulações e não somente de rugosidade [Whitehouse, 2004].

Os parâmetros mais utilizados são a rugosidade média (R_a) e a total (R_t). De acordo com Mello *et al.*, 2012, a rugosidade média (R_a) é definida como o valor médio aritmético de todos os desvios do perfil em relação a uma linha média dentro de um dado comprimento de medição ($l_m = n \cdot l_e$) (Fig. 3.3a); já rugosidade total (R_t) é definida como a distância entre duas linhas paralelas à linha média que tangencia o perfil no pico mais elevado e no vale mais profundo, em um dado comprimento " l_m " (Fig. 3.3b).

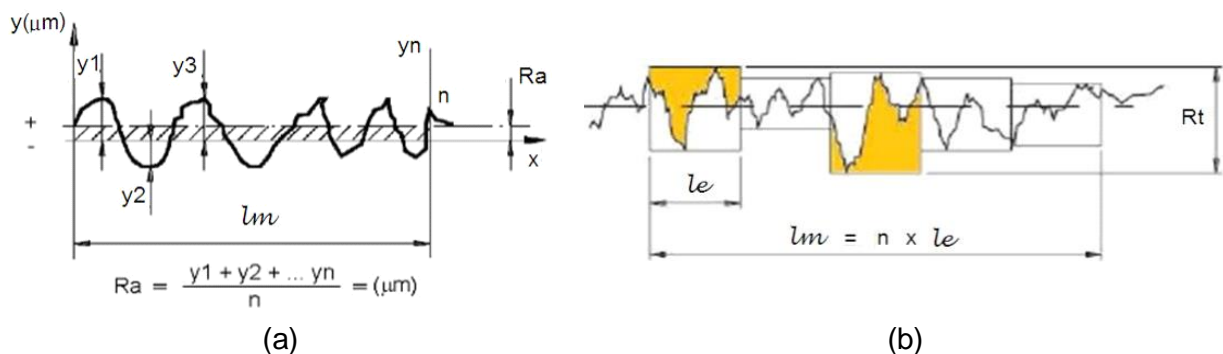


Figura 3.3 – Rugosidade: (a) média (R_a); (b) total (R_t) [adaptado de Piratelli Filho, 2011].

O parâmetro " R_a " é o mais utilizado para caracterizar a rugosidade de uma superfície. Porém, mesmo obtendo valores de " R_a " parecidos ou até mesmo iguais, isso não quer dizer que os perfis de rugosidade das superfícies sejam iguais [Whitehouse, 2004].

Para resolver este problema, às vezes é utilizado o parâmetro rugosidade média quadrática (RMS), " R_q ", definido como a média RMS dos valores das ordenadas no comprimento " l_m ". Sua maior aplicação é quando a superfície apresenta riscos de usinagem bem orientados como processos de torneamento e fresamento [Machado *et al.*, 2009].

Com o aumento do avanço há uma tendência no aumento da rugosidade da superfície, pois a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço são proporcionais ao quadrado desse avanço. A profundidade de corte praticamente não tem influência sobre a qualidade superficial, quando a profundidade for superior a um valor mínimo [Souza, 2011].

3.4 Meio Lubrificador

Como nos processos de usinagem com ferramentas de geometria definida há cisalhamento de material na região de deformação primária e atrito nas interfaces peça/ferramenta/cavaco (regiões de deformação secundária e terciária), muito calor é gerado nestas regiões [Machado *et al.*, 2009]. Assim, uma redução do calor gerado faz-se necessária.

Para menores valores de velocidade de corte ($v_c < 30$ m/min), o fluido de corte pode contribuir para uma diminuição das forças por ter ação especialmente lubrificante. Isto reduz o atrito nas interfaces supracitadas, principalmente em condições severas de usinagem que resultam em forças elevadas (p. ex. operações de desbaste). Na usinagem pesada (p. ex. corte de engrenagens), recomenda-se inclusive óleo integral. Para maiores velocidades de corte ($v_c > 70$ m/min), pode haver aumento das forças pela adição de fluido devido à rápida redução de calor na zona de formação de cavacos. Neste caso, o fluido passa a ter, sobretudo, ação refrigerante e, para tanto, são indicados óleos aquosos [Diniz *et al.*, 2013; Machado *et al.*, 2009].

A utilização de fluido de corte pode reduzir os custos do processo devido a um menor consumo de energia elétrica e um menor desgaste da ferramenta. Outra melhoria pode estar associada ao fato de o fluido auxiliar na quebra do cavaco, facilitar sua expulsão, aumentar a possibilidade de se obter as dimensões desejadas na peça, etc. [Ferraresi, 1977].

Por outro lado, os custos com a aquisição, bombeamento, filtragem, reciclagem e descarte do fluido compreendem a aproximadamente 16% do custo total da usinagem, e esses são muito superiores aos custos com ferramentas de corte. A dificuldade de reciclagem do fluido de corte, a poluição ambiental e as doenças de pele e de pulmão dos operadores estimulam a busca pela redução ou eliminação da sua utilização. Desta forma, o corte a seco ou com mínima quantidade de lubrificante (MQL), mesmo se gerar um maior desgaste na ferramenta, pode ser viável, pois além de reduzir esses custos com fluidos de corte, diminuirá significativamente os danos à saúde dos operadores das máquinas e ao meio ambiente [Diniz e Scandiffio, 2001].

Se o corte a seco for utilizado, o avanço é aumentado e a velocidade de corte diminuída. Com isso, mantém-se constante o volume de cavaco removido por unidade de tempo, gerando aproximadamente a mesma quantidade de calor no mesmo intervalo de tempo. Um maior avanço faz com que se aumente a área de contato entre a ferramenta e o cavaco dissipando mais calor. Assim, a temperatura verificada na ferramenta é menor. Porém, realizando esse procedimento, deve-se esperar um aumento na rugosidade gerada. Em alguns processos de usinagem, a usinagem a seco não é possível ou não é econômica. Então, uma alternativa é o corte com mínima quantidade de lubrificante (MQL) [Diniz *et al.*, 2013].

3.5 Transformada de Wavelet

O monitoramento de processos tem por finalidade garantir condições econômicas de usinagem e maior qualidade final do produto gerado por máquinas-ferramentas. Para tanto, utilizam-se transdutores para a aquisição de sinais de força, temperatura, vibração, etc. Tais sinais são, em geral, captados no domínio do tempo e devidamente condicionados (amplificação, filtragem, etc.). Posteriormente, o sinal é tratado de modo a poder extrair informações (características) desses sinais. Em algumas situações, é interessante que o sinal seja transformado do domínio do tempo para o domínio da frequência para extrair características não observáveis no tempo [Gao e Yan, 2011].

A Transformada de Wavelet (WT) é uma técnica que permite que informações sobre frequência e tempo sejam analisadas simultaneamente. A WT compara o sinal analisado com um conjunto de funções modelos baseado na escala e no deslocamento da função. A função base da WT pode ser definida pela Equação 3.6. O parâmetro de escala (a) determina a resolução de tempo (t) e frequência da “função base”, ou “função mãe”. Esse valor é inversamente proporcional à frequência. O parâmetro de deslocamento (b) determina o instante que inicia a oscilação [Cabrera, 2015].

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.6)$$

A Figura 3.4 ilustra a transformação por WT.

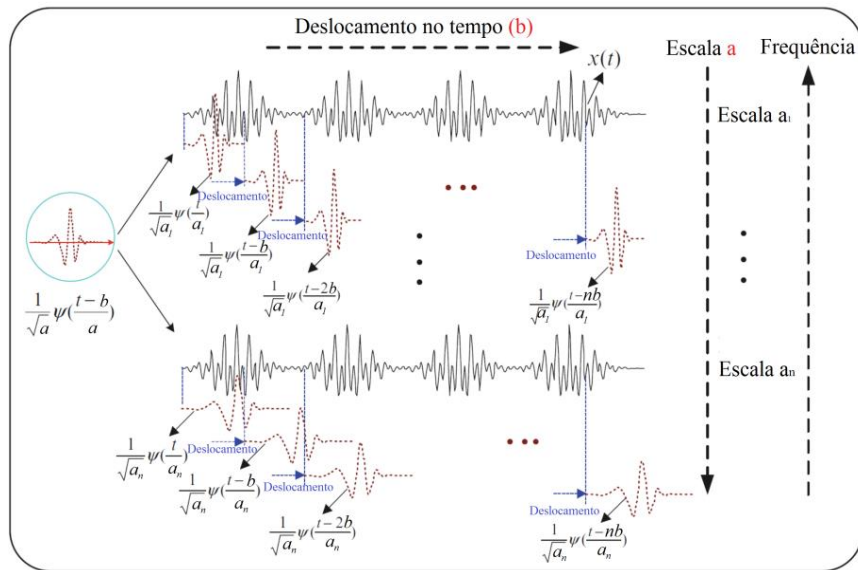


Figura 3.4 – Transformada de Wavelet [adaptado de Gao e Yan, 2011].

A Transformada Discreta de Wavelet (DWT) utiliza um método de análise por multiresolução (MRA) desenvolvido por Stephane Mallat e Yves Meyer [Mallat, 2008]. Basicamente, cada nível do sinal (S) é dividido em aproximações (cA_i) e detalhes (cD_i). As aproximações possuem um alto fator de escala, mas com componentes de baixa frequência. Já os detalhes têm baixo fator de escala e componentes de alta frequência. O processo de filtragem pode ser representado pelas Figuras 3.5a e 3.5b.

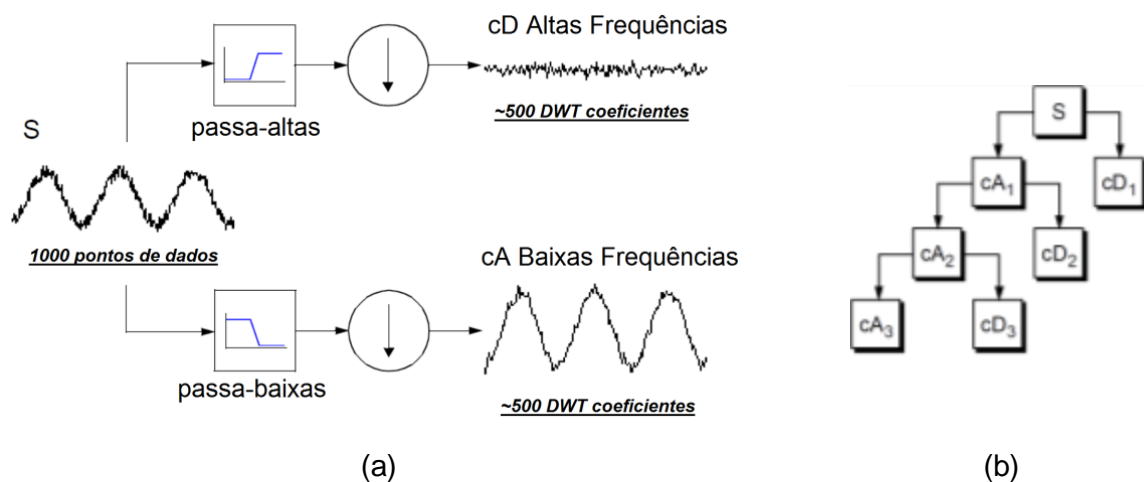


Figura 3.5 – Transformada de Wavelet: (a) processo de filtragem; (b) nivelamento [adaptado de Misiti *et al.*, 2015].

O sinal das aproximações representa a tendência de um sinal de força de usinagem livre de ruído e o sinal dos detalhes possui as altas frequências denotadas por ruído e repentinas mudanças no sinal de força [Cabrera, 2015].

Segundo Misiti *et al.*, 2015, para analisar um sinal usando a DWT deve-se utilizar a função base mais adequada. Sendo assim, algumas funções base são testadas e aquela que melhor se adapta no tempo e na frequência com o sinal é a escolhida. Ainda conforme Misiti *et al.*, 2015 e de acordo com Bolzan, 2006, não há consenso na literatura de qual é a melhor função base a ser utilizada. Frequentemente se aceita que a função base a ser utilizada possua um formato característico próximo da natureza do sinal analisado.

Cada função base (ou função mãe) pode ser melhor adaptável a certo tipo de sinal. Dentre as funções mais utilizáveis em processamento de sinais podem-se citar as famílias Haar, Daubechies (db_i), Coiflet, etc. A diferença entre elas é o tipo de pulso a ser aplicado sobre o sinal analisado. A Figura 3.6 apresenta as funções da família Daubechies e Haar [Misiti *et al.*, 2015].

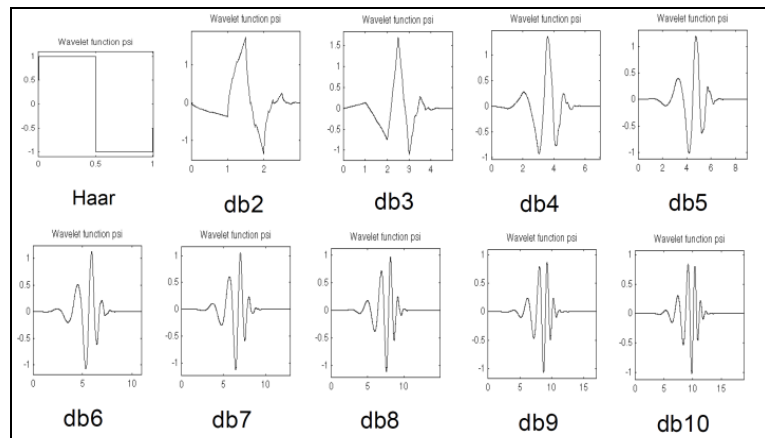


Figura 3.6 – Funções da família Daubechies e Haar [adaptado de Misiti *et al.*, 2015]

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental inclui a descrição dos equipamentos e materiais utilizados e a metodologia aplicada na usinagem e na análise dos dados.

4.1 Equipamentos e Materiais

A experimentação foi realizada em um centro de usinagem modelo ROMI Discovery 308 com comando Mach 8 do Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS). A máquina possui rotação máxima de 4000 rpm e potência máxima de 7,5 cv (5,5 kW). O volume de trabalho tem curso máximo nas direções x, y, z de 450 x 310 x 410 mm, respectivamente. Pode trabalhar com vazão de fluido para lubrificação externa em abundância de até 1320 l/h. O modelo do cone utilizado para fixação da fresa na máquina é o BT-30 (DIN-6499).

Para os ensaios foram utilizados quatro corpos de prova (CP) com 100 x 90 x 5 mm em aço inoxidável austenítico AISI 316. Dimensionaram-se os corpos de prova levando-se em conta as dimensões do dinamômetro piezoeletrico utilizado na aquisição de sinais de força. Assim, de acordo com o diâmetro da fresa, foram definidos seis passes por corpo de prova. As Figuras 4.1a e 4.1b ilustram, respectivamente, o corpo de prova com os furos para fixação no dinamômetro e o croqui com os passes realizados (amostras geradas).

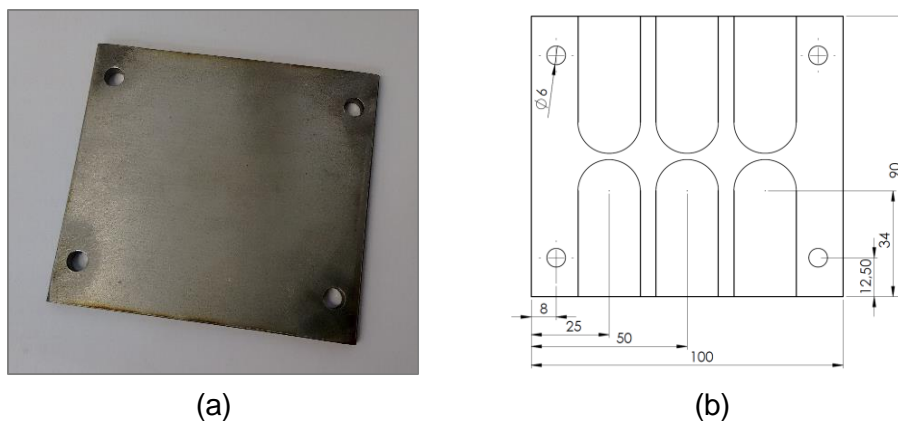


Figura 4.1 – Corpo de prova (CP): (a) imagem do CP preparado para usinagem; (b) croqui do CP pós-usinagem.

A dureza superficial do aço inoxidável austenítico AISI 316 foi verificada em uma máquina semiautomática Emco-Test modelo DuraVision DV30 com um intervalo de carga de 10 a 3000 kgf disponível no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF-UFRGS). Foi utilizada a carga de 187,5 kgf e a esfera de diamante com diâmetro de 2,5 mm. O resultado da medição de cinco amostras tomadas foi de $(199,4 \pm 2,0)$ HB para 95% de confiança.

Também no LAMEF (UFRGS) realizou-se a análise química do material no equipamento Spectrolab modelo LVFA18B, o qual utiliza sistema de leitura óptica para análise de metais. A Tabela 4.1 mostra a composição química do material ensaiado.

Tabela 4.1 – Composição química aço AISI 316 (% em massa).

	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	C	P	S
Mín.	---	16	9	2	0,5	0,5	0,001	0,001	0,001	0,001
Méd.	68,8	16,2	10,7	2,12	1,26	0,5	0,105	0,030	0,032	0,005
Máx.	---	18	12	3	1,5	1,5	0,500	0,080	0,040	0,040
	Co	V	Nb	W	Ti	Pb	Al	B	Sn	
Mín.										
Méd.	0,192	0,038	0,026	0,011	0,004	0,004	0,003	0,001	0,001	
Máx.										

A ferramenta de corte utilizada para o experimento foi uma fresa de topo reto da marca Walter Tools modelo Xtra-tec[®] F4042R.W20.02, com diâmetro de 20 mm e suporte para dois insertos. A profundidade de corte axial recomendada para a fresa é $a_p \leq 7$ mm e o avanço por dente recomendado é $f_z = 0,08$ mm para aço inoxidável (grupo M). As pastilhas utilizadas são também da Walter Tools modelo Tiger-tec Silver[®]. O grupo de insertos utilizado é o ADMT10 com raio de ponta ($r_\epsilon = 0,8$ mm). A pastilha possui cobertura de nitreto de titânio-alumínio e óxido de alumínio ($TiAlN + Al_2O_3$), aplicada por processo de deposição física a vapor (PVD). Possui ângulo de folga $\alpha = 15^\circ$ e ângulo de saída $\gamma = 16^\circ$. A velocidade de corte mínima recomendada pelo fabricante do inserto é de 100 m/min (aproximadamente 1600 rpm para o diâmetro utilizado).

O lubrificante usado nas operações com mínima quantidade de lubrificante (MQL) foi o fluido integral sintético Quimatic Jet. Segundo o fabricante, é um fluido integral sintético a base de água utilizado em torneamento, fresamento e furação de todos os metais. Para a sua aplicação em spray foi utilizado um nebulizador modelo IV Tapmatic.

O esquema do sistema de aquisição de sinais de força em fresamento frontal presente no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS) pode ser visto na Figura 4.2.

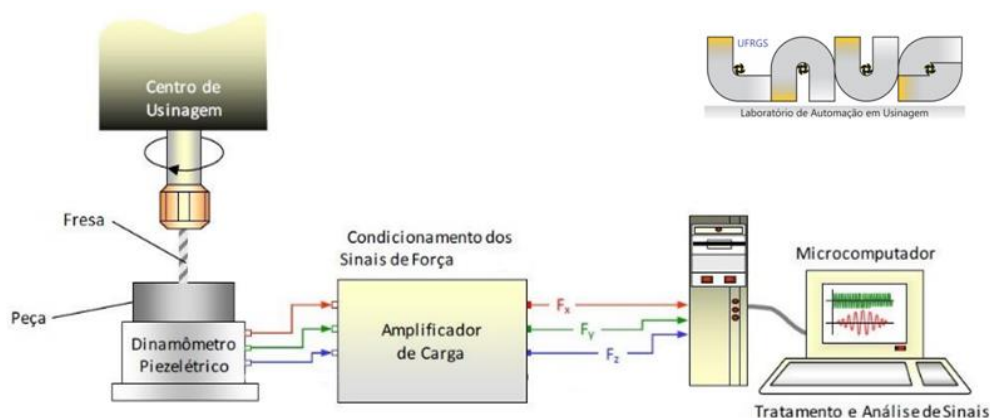


Figura 4.2 – Arquitetura do sistema de aquisição de sinais de força [cortesia do LAUS].

A aquisição dos sinais de força nas direções dos eixos coordenados foi feita através do dinamômetro piezelétrico estacionário Kistler modelo 9129AA. Este possui faixa de medição de -10 kN a 10 kN, sensibilidades de -8,0 pC/N (eixos x e z) e -4,1 pC/N (eixo y), e frequências naturais de 3,5 kHz (eixos x e z) e 4,5 kHz (eixo y). Os sinais adquiridos foram devidamente

condicionados através de um amplificador de carga da Kistler, modelo 5070A, com entrada para quatro canais e faixa de medição de -10 V a 10 V [Kistler, 2009]. Os sinais analógicos (em volts) foram coletados através de uma placa de aquisição de sinais PCIM-DAS 1602/16 da Measurement Computing, instalada em um microcomputador dedicado, que permite a captura de até 100000 pontos por segundo (100 kS/s) em até oito entradas analógicas diferenciais (12,5 kS/s por canal) com 16 bits de resolução.

O rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201P (Fig. 4.3a) foi utilizado para a medição das rugosidades nos passes realizados (Fig. 4.3b). O instrumento de medição possui resolução de 0,01 μm e agulha de diamante com raio de ponta 5 μm .

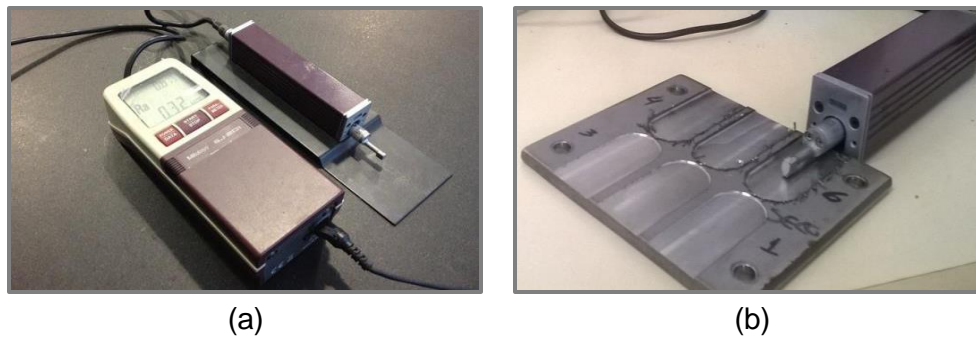


Figura 4.3 – Medição das rugosidades: (a) instrumento utilizado (rugosímetro SJ-201P); (b) detalhamento das medições.

4.2 Metodologia

Para a experimentação, manteve-se constante o avanço por aresta $f_z = 0,08$ mm (valor recomendado pelo fabricante). Assim, variou-se em quatro níveis a profundidade de corte axial (a_p) e em três níveis a rotação da fresa (n). A maior rotação foi definida em 3600 rpm pela restrição de rotação máxima permissível no centro de usinagem (4000 rpm). A fim de comparar a influência do meio lubrificante, foram definidas duas condições. Primeiro, fez-se a experimentação sem presença de lubrificante (corte a seco). Em um segundo momento, aplicou-se MQL a uma vazão de 90 ml/h com uma pressão de ar comprimido ajustada em 3 bar. Dessa forma, foram geradas 24 condições de corte (seis passes ou amostras em quatro corpos de prova). A Tabela 4.2 mostra o planejamento do experimento.

Tabela 4.2 – Parâmetros de usinagem para as 24 amostras.

Usinagem a seco						Usinagem com MQL					
Corpo de Prova CP1			Corpo de Prova CP2			Corpo de Prova CP3			Corpo de Prova CP4		
Passo	a_p [mm]	n [rpm]	Passo	a_p [mm]	n [rpm]	Passo	a_p [mm]	n [rpm]	Passo	a_p [mm]	n [rpm]
1	0,4	1200	7	1,2	1200	13	0,4	1200	19	1,2	1200
2	0,4	2400	8	1,2	2400	14	0,4	2400	20	1,2	2400
3	0,4	3600	9	1,2	3600	15	0,4	3600	21	1,2	3600
4	0,8	1200	10	1,6	1200	16	0,8	1200	22	1,6	1200
5	0,8	2400	11	1,6	2400	17	0,8	2400	23	1,6	2400
6	0,8	3600	12	1,6	3600	18	0,8	3600	24	1,6	3600

Fez-se o processamento dos sinais da força utilizando o software LabVIEW[®] 8.6 com uma VI (*Virtual Instrument*) específica para fresamento. A aquisição foi feita a uma taxa de 180 pontos por revolução da fresa de modo a obter uma boa caracterização do sinal¹. Para o pós-

¹ Na escolha da taxa de aquisição de 180 pontos por revolução, foram consideradas as rotações de 20, 40 e 60 rps da fresa (respectivamente 3,6; 7,2; 10,8 kS/s). De acordo com o Teorema de Nyquist [Souza, 2015], a frequência de

processamento dos dados de força e análise foram utilizados os softwares MS Excel e MATLAB. A montagem do sistema experimental pode ser visualizada na Figura 4.4a e a interface gráfica da VI utilizada pode ser vista na Figura 4.4b.

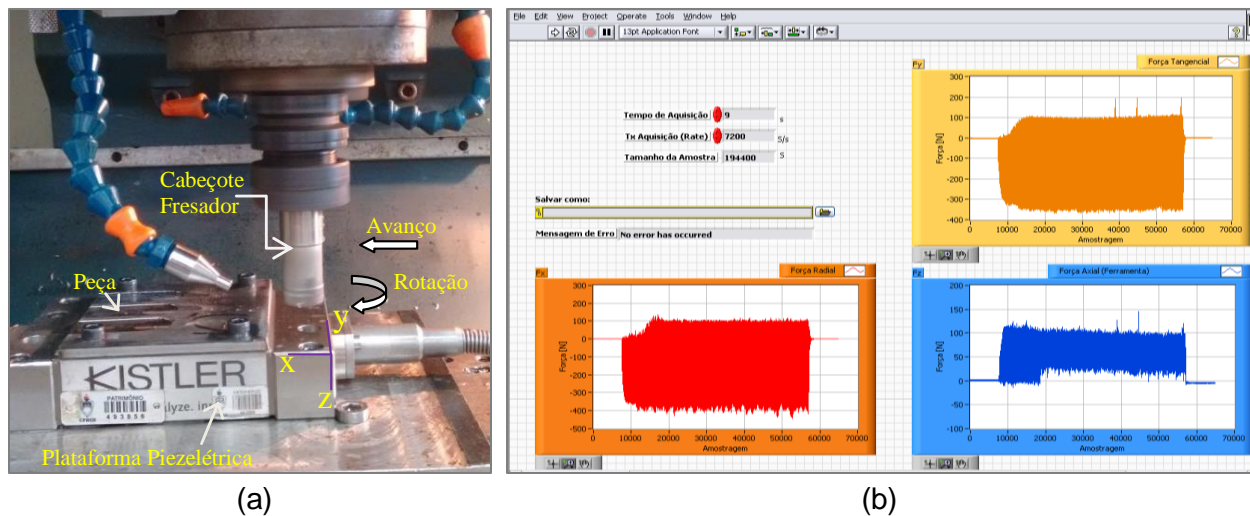


Figura 4.4 – Sistema experimental: (a) imagem do sistema; (b) interface gráfica da VI.

Como os dados da força foram captados nas três direções ortogonais, fez-se a soma vetorial, encontrando-se a intensidade da força resultante. Selecionou-se para a análise um total de 10000 pontos (10 kS) em uma região estável do passe. Com o intuito de verificar a influência da variação das condições de corte na força, calculou-se para cada intervalo de 10 kS o valor RMS da força resultante.

De modo a analisar a parcela dinâmica da força, foi utilizada a Transformada Discreta de Wavelet (DWT) através do software MATLAB. Essa faz uma filtragem das frequências encontradas no sinal analisado. Como citado anteriormente, não há consenso na literatura sobre qual família e nível se adapta melhor à situação, já que a característica original do sinal pode corresponder melhor a uma do que a outra. Assim, fez-se necessário a seleção da família e dos níveis de aproximação (cA_i) da função base de Wavelet, avaliando-se o comportamento das famílias 1 a 6 de Daubechies. Para cada família aplicou-se a DWT em cinco níveis ao sinal da força resultante do Passe 1. Como o sinal para os outros passes apresenta as mesmas características, generalizou-se a análise para as 24 amostras.

Utilizaram-se para comparação os sinais de aproximação para cinco níveis e os sinais de força de um intervalo de 200 pontos, sendo este intervalo maior que uma rotação da fresa, fixado em 180 pontos. O critério de seleção é visual, escolhendo a família que mais se aproxima do sinal original. Após a seleção do nível, partiu-se para a seleção da família mantendo-se o mesmo critério. Após, aplicou-se cada família até o nível selecionado.

Para a análise da vibração da força de usinagem, utilizou-se o detalhamento do primeiro nível da DWT (cD_1). Este apresenta as maiores frequências do sinal captado (vide Fig. 3.5). Para a comparação, calculou-se o valor RMS do cD_1 de cada passe.

Após a usinagem, mediu-se a rugosidade do passe empregando um comprimento de amostragem $l_e = 0,8$ mm. De acordo com Machado *et al.*, 2009, recomenda-se este valor de *cut-off* quando o valor registrado da rugosidade média R_a for menor ou igual a $2 \mu\text{m}$. Na medição, foram desprezadas as regiões da entrada e da saída da fresa na peça (20 mm de cada lado), considerando somente a região central do passe. Assim, para cada passe foram feitas três medições, obtendo valores médios das rugosidades RMS (R_q) e total (R_t) da superfície usinada.

amostragem aplicada a um sinal analógico de banda limitada deve ser maior ou igual a duas vezes a largura desta banda para que possa posteriormente ser reconstituído sem qualquer perda de informação. Assim, ao considerar essa taxa, o sinal captado deve possuir largura de banda menor ou igual a 1,8 kHz (cerca de 50% da frequência de ressonância da plataforma piezoeletrica) [Nota do Orientador].

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados os resultados – acompanhados dos devidos comentários – da força de usinagem (força resultante F_R) calculada a partir da média RMS para cada um dos 24 passes realizados, da vibração (variação da F_R) em alta frequência (detalhamento cD_1) e das rugosidades média quadrática RMS (R_q) e total (R_t).

5.1 Força de Usinagem RMS

A Figura 5.1 apresenta os valores da força de usinagem (força resultante) RMS, considerando as condições de experimentos previstas na Tabela 4.2.

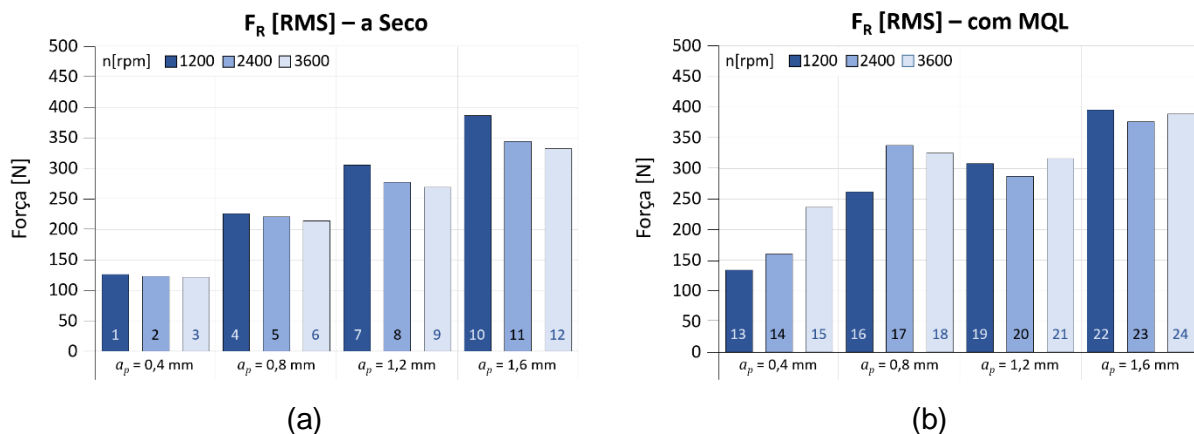


Figura 5.1 – Valores de F_R (RMS) para os passes: (a) corte a seco; (b) corte com MQL.

Pode-se identificar que para o corte a seco tem-se um evidente aumento da intensidade da força “ F_R ” com o aumento de “ a_p ”. Isto se justifica pelo aumento da área da seção transversal de corte. Também é possível observar uma diminuição da intensidade da força “ F_R ” com o aumento de “ n ” (a redução fica mais evidente para maiores valores de “ a_p ”). De acordo com Diniz *et al.*, 2013, isto se deve às diminuições da deformação, da dureza do cavaco e dos coeficientes de atrito que o aumento da temperatura proporciona.

No caso da aplicação de MQL a uma vazão de 90 ml/h no fresamento frontal, observou-se, com relação à força de usinagem (F_R), que o método não apresentou vantagens sobre o corte a seco. Isso pode estar ligado ao tipo de material usinado, o qual sofre grande encruamento localizado durante o corte, aumentando a intensidade das forças (no caso, a ação refrigerante é superior à ação lubrificante em todos os passes, pois se tem $v_c > 70$ m/min). À medida que a profundidade de corte axial (a_p) e a rotação (n) aumentam, tem-se um incremento da temperatura na região de corte. Além disso, a penetração das gotículas de fluido na região do corte fica dificultada e a capacidade refrigerante do ar comprimido diminuída. Assim, os passes, em ambos os casos (a seco, 7-12, e com MQL, 19-24), geraram resultados semelhantes.

5.2 Análise da Vibração da Força de Usinagem

Primeiramente é apresentada a escolha da família pela avaliação do comportamento das famílias Haar (db1) e Daubechies (db2 a db6) e a escolha dos níveis de aproximação (cA_i) da função base de Wavelet. Em seguida, tem-se a análise da vibração das forças de usinagem geradas em cada passe através do detalhamento do primeiro nível da DWT (cD_1).

5.2.1 Escolha da Família e do Nível da Função Base

A Figura A1 (Apêndice) mostra o comportamento das funções db1 a db6. Como pôde ser visto, considerou-se que a função que melhor se aproximou ao sinal foi a função db6.

A Figura 5.2a ilustra o intervalo de 200 pontos do sinal da força de usinagem (força resultante) para o Passe 1 (F_{R1}) e as aproximações cA_1 , cA_2 e cA_3 para a família db6. Observa-se que até o terceiro nível, as aproximações se mantêm próximas ao sinal original e a partir do quarto nível (Fig. 5.2b) elas se afastam².

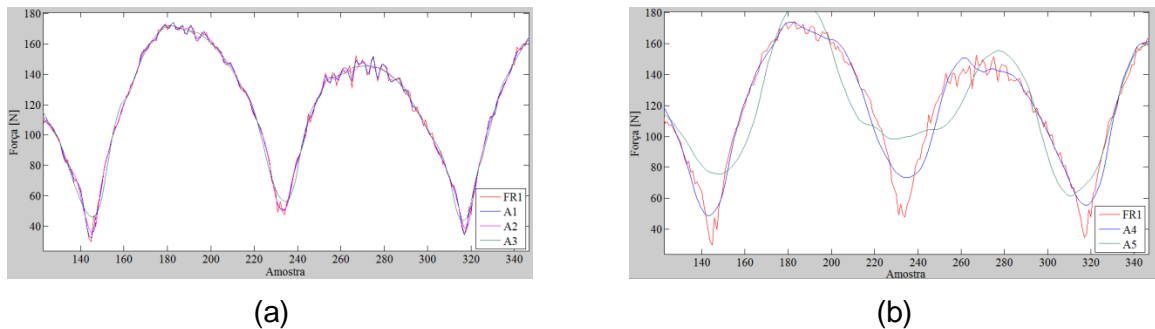


Figura 5.2 – Sinal da força de usinagem referente ao Passe 1 (F_{R1}): (a) aproximações cA_1 , cA_2 e cA_3 ; (b) aproximações cA_4 e cA_5 .

Sendo assim, utilizou-se a Transformada Discreta de Wavelet (DWT) com função db6 em três níveis de aproximação (cA_1 a cA_3).

5.2.2 Análise da Vibração via Detalhamento cD_1

Após a seleção da família (db6) e nível (cA_3), aplicou-se a DWT. A Figura A2 (Apêndice) ilustra a decomposição do sinal da força de usinagem gerada no Passe 1 para uma amostra de 1000 pontos e a Figura 5.3 os resultados dos valores RMS calculados do primeiro nível de detalhamento (cD_1) para cada passe do experimento.

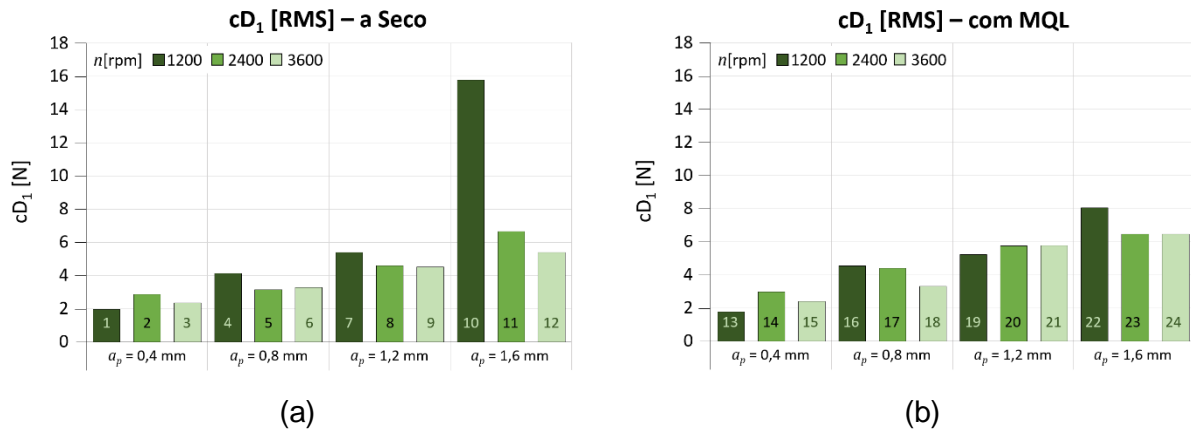


Figura 5.3 – Valor de cD_1 (RMS) para os passes: (a) corte a seco; (b) corte com MQL.

Através dos resultados, pode-se verificar certa instabilidade em altas frequências no Passe 10, (maior a_p e menor n). Como visto através do diagrama lóbulo de estabilidade (Fig. 3.2), o sistema pode ter se aproximado de uma condição de instabilidade, apesar de não ser identificada a presença de vibração *chatter* no passe, modificando a vibração no processo.

Como se pode ver, o uso de MQL manteve o mesmo padrão identificado na Figura 5.1, não apresentando situações de ganho em relação ao corte a seco, com exceção do Passe 22.

² O intervalo de análise é caracterizado por apresentar uma rotação completa da fresa, equivalente a 180 pontos de aquisição. Os dois picos de força observados na Figura 5.2 representam o corte de cada aresta cortante da fresa na peça. Pode-se perceber pequena diferença de intensidade entre cada dente. Isso pode ser explicado por alguma leve diferença de batimento axial por aresta. Essa característica foi observada para todos os passes.

Aparentemente, neste passe (maior a_p e menor n) a presença de fluido pode ter alterado as características de formação do cavaco. Isto pode ter levado a alteração de constantes de rigidez/amortecimento do sistema mecânico, reduzindo a vibração da força, em comparação com o Passe 10 onde ocorreu a situação de maior instabilidade.

Outro fato observado, tanto para o corte a seco quanto para com MQL, foi que utilizando o menor valor de “ a_p ” (0,4 mm ou 50% do raio de ponta r_ϵ), a rotação intermediária ($n = 2400$ rpm) gerou a maior amplitude de vibração em alta frequência (Passes 2 e 14) – fato não observado para as demais profundidades de corte axiais. Nos demais casos (100, 150 e 200% do r_ϵ), pode-se dizer que houve redução da amplitude de vibração com o acréscimo do valor de “ n ”.

De modo a delinear alguns dos resultados obtidos na Figura 5.3, a Figura A3 (Apêndice) apresenta uma comparação entre os Passes 1 e 13 (menor a_p e menor n) e entre os Passes 10 e 22 (maior a_p e menor n) para uma amostra de 500 pontos através do detalhamento cD1.

5.3 Rugosidades das Superfícies Fresadas

Mantendo-se o raio de ponta (r_ϵ) e o avanço por dente (f_z) constantes, não haverá teoricamente uma alteração da rugosidade gerada. Desta forma, a fim de identificar se alguma alteração na rugosidade poderia ser causada pela variação da vibração nos cortes a seco e com MQL, mediram-se as rugosidades média quadrática (R_q) e total (R_t) de cada um dos 24 passes executados, mostradas na Figura 5.4.

Esta análise revelou que não há diferenças significativas nos valores de R_q e R_t com as mudanças dos parâmetros de usinagem. No entanto, foi possível observar uma menor dispersão dos valores para os passes com MQL em comparação com o corte a seco (exceto para os Passes 6 e 18 com $a_p = 0,8$ mm e $n = 3600$ rpm). Assim, apesar da dificuldade de penetração do fluido, o corte fica favorecido, mesmo em reduzida quantidade de lubrificante.

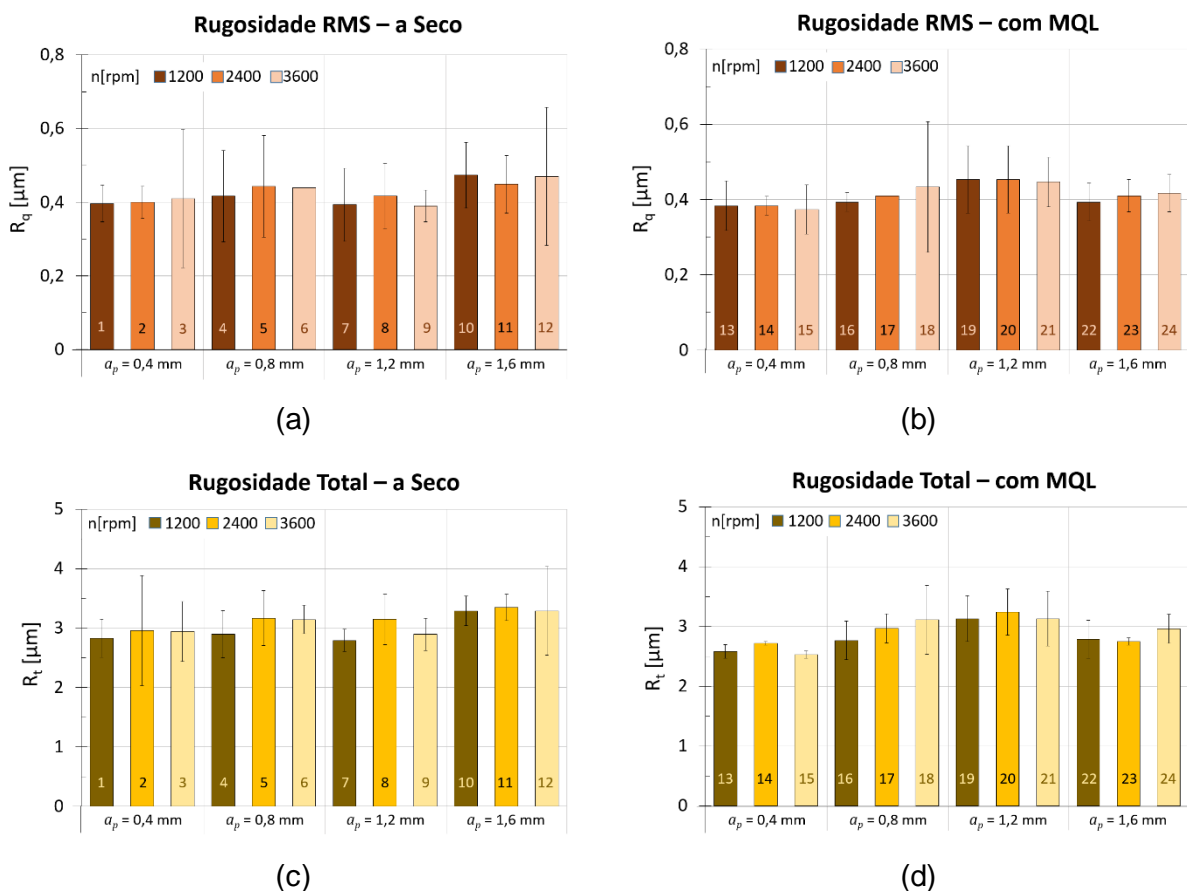


Figura 5.4 – Rugosidades RMS e total dos passes realizados: (a) R_q a seco; (b) R_q com MQL; (c) R_t a seco; (d) R_t com MQL

6 CONCLUSÕES

O trabalho buscou mostrar a análise da influência dos parâmetros de entrada sobre os parâmetros de saída gerados no processo de fresamento frontal com fresa de topo do aço inoxidável AISI 316, considerando as limitações laboratoriais do sistema experimental.

A partir dos resultados encontrados, observou-se uma tendência aos aumentos das amplitudes RMS da força de usinagem (força resultante F_R) e da vibração com o aumento da profundidade de corte axial (a_p) para as condições de lubrificação a seco e com MQL.

Para todas as rotações, os valores de F_R para MQL foram superiores aos obtidos no corte a seco. Neste, observou-se uma ligeira redução das amplitudes da F_R com o aumento da rotação. Com MQL, observaram-se amplitudes similares ao corte a seco com $n = 1200$ rpm (75% do valor mínimo recomendado pelo fabricante da ferramenta de corte). No caso da vibração, os valores de rotação (n) afetam-na de maneiras distintas, dependendo da " a_p " utilizada.

No caso do acabamento usinado, não foram observadas variações significativas nos valores médios calculados de rugosidade RMS e total com a variação dos parâmetros de corte. Porém, a aplicação do MQL propiciou uma redução da dispersão dos valores medidos.

O uso de MQL não trouxe vantagens significativas para o processo, com exceção dos passes 10 (a seco) e 22 (com MQL), em que se observou uma redução da amplitude de vibração na condição de maior instabilidade (maior a_p e menor n).

Assim, considerando que não houve instabilidade no sistema máquina/ferramenta/peça utilizado nos experimentos em nenhuma condição de corte, pode-se afirmar que a combinação "ótima" de parâmetros de usinagem para o fresamento frontal do aço inoxidável austenítico AISI 316, dentre as consideradas no trabalho, envolve o corte a seco gerando a maior taxa de remoção de material, ou seja, maior n (3600 rpm), que resulta em maior velocidade de avanço e menor tempo de usinagem; e maior a_p (1,6 mm), que gera maior área de seção transversal de corte. Isto mostra que a ROMI Discovery 308 do LAUS-UFRGS trabalha de maneira aceitável a uma rotação de 90% do valor máximo permissível no eixo-árvore (4000 rpm).

Apesar de os parâmetros de entrada escolhidos para o experimento não terem gerado grandes variações nos parâmetros de saída, verificou-se que é possível extrair características importantes do sinal através da Transformada Discreta de Wavelet (DWT).

6.1 Propostas para Trabalhos Futuros

No fresamento frontal do aço inoxidável AISI 316, propõe-se analisar o efeito:

- do comprimento da ferramenta de corte sobre as vibrações geradas no processo;
- de raios de ponta diferentes da ferramenta sobre a vibração e sobre a rugosidade da peça;
- da quantidade de fluido (de reduzida a abundante) sobre o corte (vazões superiores a 1 l/h);
- da vibração gerada pelo desgaste da ferramenta em ensaios de fim de vida.

REFERÊNCIAS

Altintas, Y. "**Manufacturing automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design**", 2 ed., Cambridge University Press, 2012, 382p.

Bolzan, M. J. A. "**Transformada em ondeleta: uma necessidade**", Revista Brasileira de Ensino de Física, v.28, n.4, p.563-567, 2006.

Cabrera, C. G. A. "**Identificação de Chatter no Fresamento a Partir da Análise Wavelet da Força de Usinagem**", Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, COPPE, UFRJ, 2015, 84p.

Carvalho, J., M., M., de. "**Modelo de Prevenção de Vibrações Regenerativas em Maquinagem**", Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2014, 108p.

Cheng, K. **“Machining Dynamics: Fundamentals, Applications and Practices”**, Springer Series in Advanced Manufacturing, Springer-Verlag London, 2009, 328p.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L. **“Tecnologia da Usinagem dos Materiais”**, 8 ed., São Paulo, Artliber, 2013, 270p.

Diniz, A. E., Scandiffio, I. **“Uma contribuição ao estudo do corte a seco e do corte com mínima quantidade de lubrificante em torneamento de aço”**, 1º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (Anais do I COBEF), 02 a 04 Abr., Curitiba, PR, 2001, 8p.

Faassen, R.P.H. **“Chatter Prediction and Control for High-Speed Milling: Modelling and Experiments”**, Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, 2007, 145p.

Ferraresi, D. **“Fundamentos da Usinagem dos Metais”**, 1.ed., São Paulo, Blucher, 1977, 751p.

Gao, R.X.; Yan R. Y. **“Wavelets – Theory and Applications for Manufacturing”**, Springer Science + Business Media, LLC, Springer US., 2011, 224p.

Kistler. **“Cutting Force Measurement: Precise Measuring Systems for Metal-Cutting”**, Kistler Group, Winterthur, Switzerland, 2009, 44p.

Lima, D. O., Araujo, A. C., Silveira, J. L. L. **“Influência da profundidade de corte e do avanço na força de corte no fresamento de faceamento”**, 7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Anais do VII CONEM), 31 Jul. - 03 Ago., São Luís, MA, 2012, 10p.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B. **“Teoria da Usinagem dos Materiais”**, 1.ed., São Paulo, Blucher, 2009, 371p.

Mallat, S. **“A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way”**, 3.ed., San Diego, Elsevier Academic Press, 2008, 832p.

Mello, M. S., Souza, A. J., Geier, M. **“Determinação empírica dos parâmetros de rugosidade Ra e Rt aplicando ferramenta alisadora no torneamento a seco de acabamento do aço AISI 4140”**, 7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Anais do VII CONEM), 31 Jul. - 03 Ago., São Luís, MA, 2012, 10p.

Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J. M. **“Wavelet Toolbox User’s Guide”**, Matlab R2015b, The MathWorks, Inc., Natick, MA, 2015, 700p.

Piratelli Filho, A. **“Rugosidade Superficial”**, DEMEC – Universidade de Brasília (UnB), Faculdade de Tecnologia. Disponível em www.posgrad.mecanica.ufu.br/metrologia/arquivos/palestra_ufu_17_05_2011.pdf. Acesso em 28/03/16.

Sandvik. **“Manual Técnico de Usinagem, Parte H: Materiais”**, São Paulo: Sandvik Coromant, p.22-25, 2012.

Shaw, M. C. **“Metal Cutting Principles”**, 2 ed., New York, Oxford Press, 2005, 651p.

Souza, A. J. **“Monitoramento de Processos de Usinagem”**, GPFAI-DEMEC-UFRGS, Apostila, 2015, 54p.

Souza, A. J. **“Processos de Fabricação por Usinagem, Parte 1: Fundamentos da Usinagem dos Materiais”**, GPFAI-DEMEC-UFRGS, Apostila, 2011, 89p.

Whitehouse, D. J. **“Surfaces and their Measurement”**, Kogan Page Science Paper Edition, Butterworth-Heinemann, London, 2004, 432p.

APÊNDICES

A Figura A1 apresenta as seis primeiras funções Daubechies testadas para uma amostra de 200 pontos. Observa-se que a função que melhor se aproxima do sinal da força de usinagem (força resultante F_R) é a função db6. As funções db7 até db10 não apresentaram significativas diferenças em relação à db6.

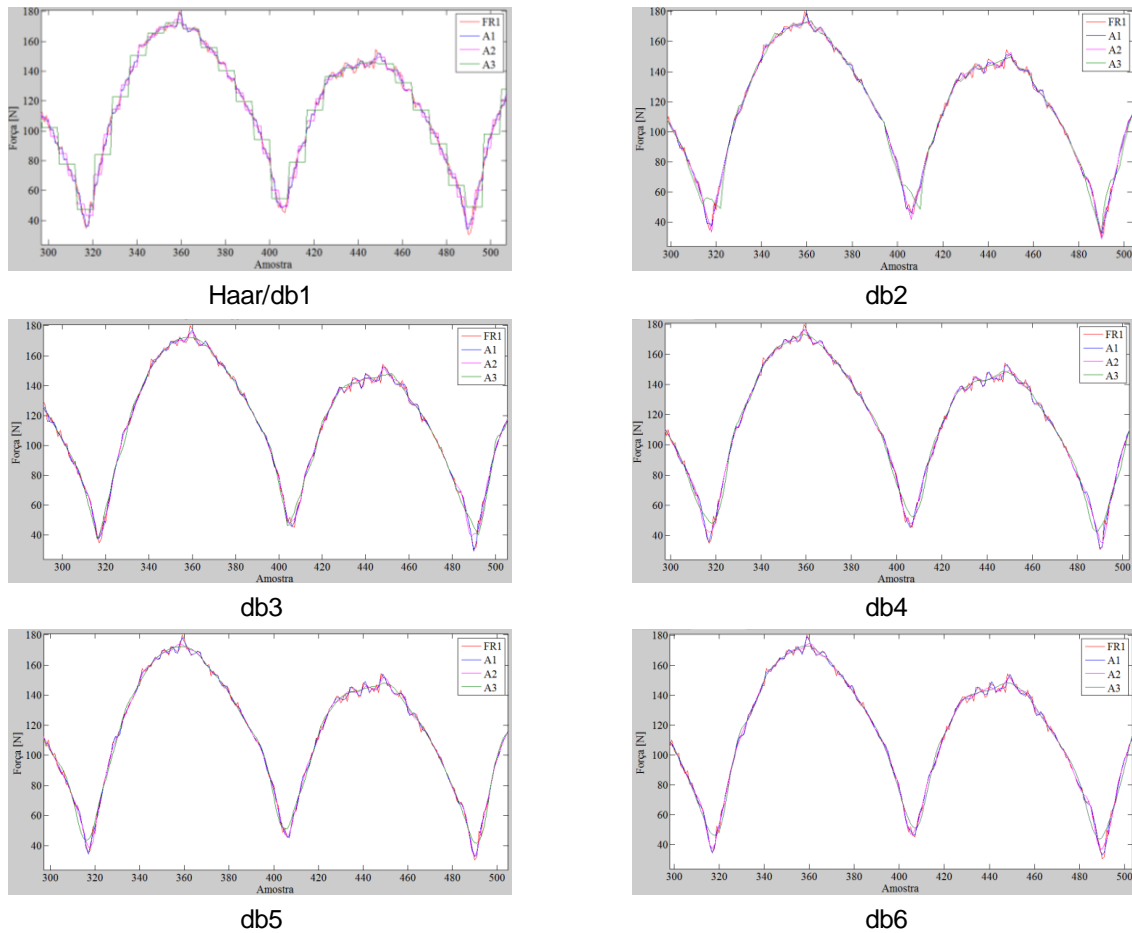


Figura A1 – Escolha da família.

A Figura A2 mostra a decomposição do sinal da força resultante $F_R(S)$ gerado durante o Passe 1 para uma amostra de 1000 pontos via Transformada Discreta de Wavelet (DWT).

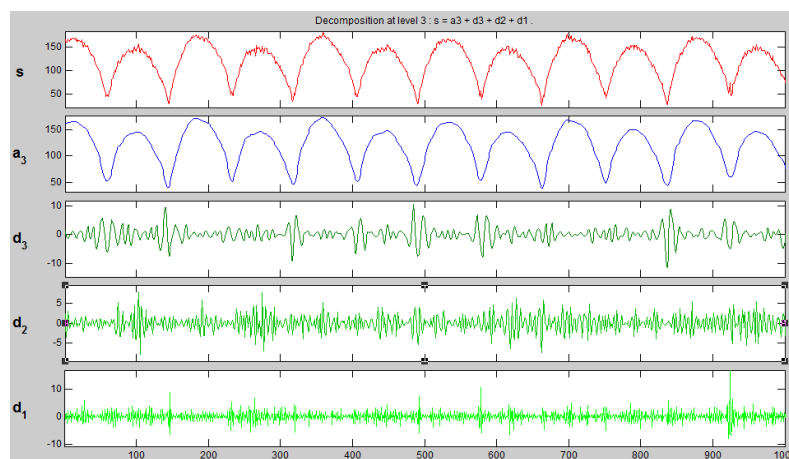


Figura A2 – Decomposição do sinal da força resultante (S) do Passe 1 através da DWT.

A Figura A3 ilustra a comparação entre os Passes 1 e 13 (menor a_p) e entre os Passes 10 e 22 (maior a_p), considerando a menor rotação ($n = 1200$ rpm) para uma amostra de 500 pontos do detalhamento cD_1 (alta frequência) da força resultante.

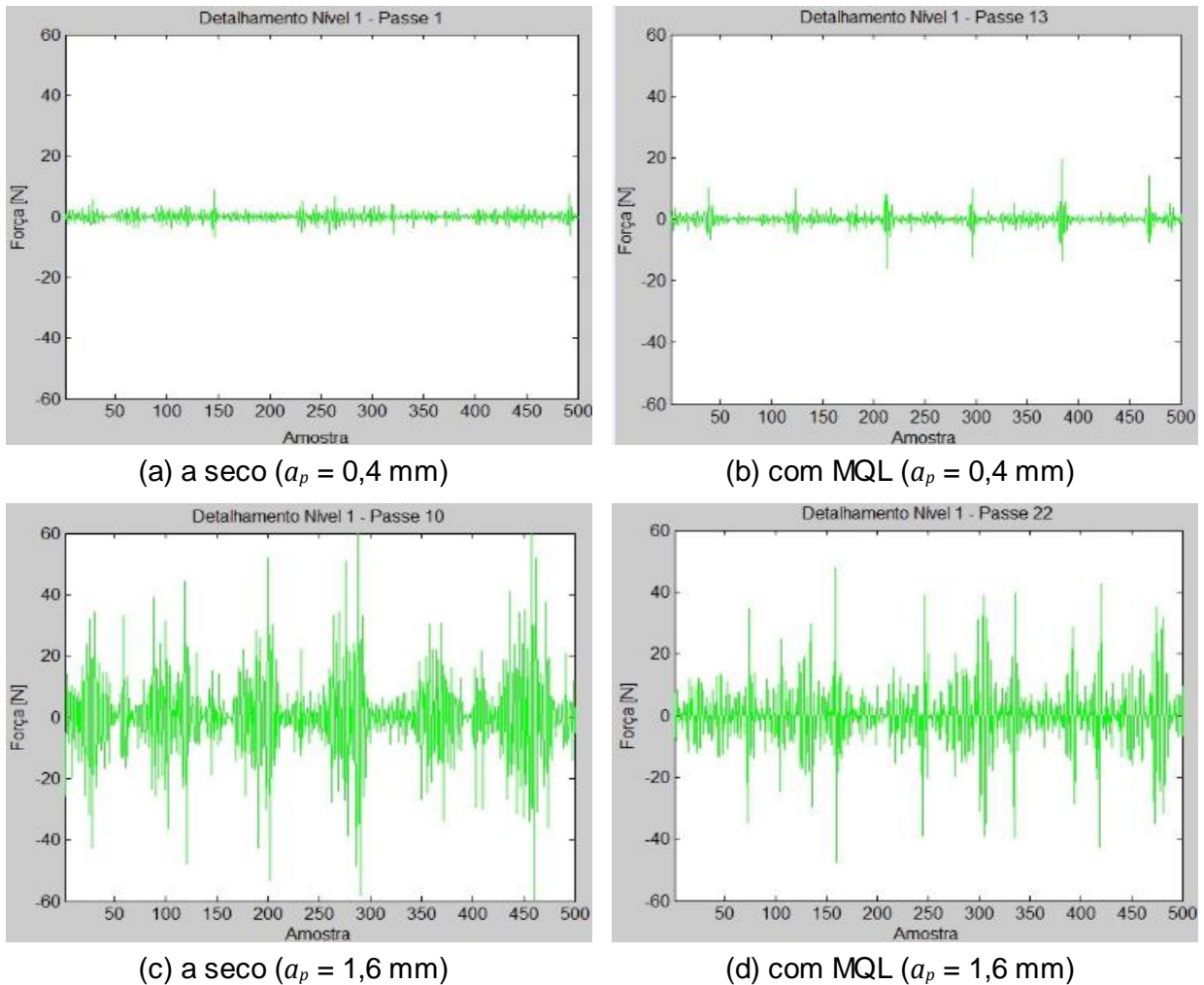


Figura A3 – Detalhamento dos passes: (a) 1; (b) 13; (c) 10; (d) 22.

Assim como mostrado na Figura 5.3, os Passes 1 (Fig. A3a) e 13 (Fig. A3b) foram os que apresentaram menor amplitude de vibração da força resultante no experimento, apresentando resultados semelhantes. O Passe 10 (Fig. A3c) apresentou maior instabilidade, sendo acentuadamente visível. O Passe 22 (Fig. A3d) teve uma redução da amplitude de vibração em comparação com o Passe 10.