

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

AVALIAÇÃO DAS FORÇAS DE USINAGEM E DA RUGOSIDADE GERADAS NO
FRESAMENTO FRONTAL ASSIMÉTRICO DO FERRO FUNDIDO DIN GGG50

por

Henrique Butzlaff Hübner

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, Novembro de 2013



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

AVALIAÇÃO DAS FORÇAS DE USINAGEM E DA RUGOSIDADE GERADAS NO
FRESAMENTO FRONTAL ASSIMÉTRICO DO FERRO FUNDIDO DIN GGG50

por

Henrique Butzlaff Hübner

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

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Profa. Dra. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Porto Alegre, 14 de novembro de 2013.

AGRADECIMENTOS

Ao professor André João de Souza, pela orientação.

Ao doutorando Guilherme Cortelini da Rosa e ao técnico do Laboratório de Usinagem (LAUS) Guilherme Vargas Schirmer, pelo apoio nos procedimentos experimentais.

Ao Grupo de Análise de Falhas (GAF) do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF-UFRGS) pela análise do material.

Aos meus familiares, por tudo.

HÜBNER, H. B. **Avaliação das forças de usinagem e da rugosidade gerados no fresamento frontal assimétrico do ferro fundido DIN GGG50**. 2013. 25 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

Devido a uma grande demanda sobre a precisão da fabricação, bem como a redução de custos, torna-se necessário cada vez mais um maior conhecimento dos fatores que influenciam a qualidade do produto final, especialmente para os processos de usinagem. Neste trabalho avaliaram-se os efeitos do avanço, da profundidade de corte e da penetração de trabalho nos cortes assimétricos (*concordante* e *discordante*) em relação à peça sobre as componentes ortogonais (axial, radial e tangencial) da força de usinagem e a rugosidade da superfície usinada no fresamento frontal do ferro fundido DIN GGG50 com pastilhas de metal duro. A rotação da fresa permaneceu constante. As forças foram adquiridas através de um sistema sensório composto por dinamômetro piezelétrico, placa de aquisição de sinais e computador com software adequado. A rugosidade gerada por fresamento foi quantificada por meio de um rugosímetro portátil. Através de análise de variância encontrou-se evidências significativas de que a diminuição da profundidade de corte, o aumento do avanço e a mudança do corte de *concordante* para *discordante* causam um aumento na rugosidade. O aumento nas forças estáticas e dinâmicas de usinagem nem sempre indicam um aumento na rugosidade, pois se constata que quando há um aumento da profundidade de corte, as forças estáticas e dinâmicas aumentam, porém a rugosidade diminui devido a um menor encruamento do material. Já quando se aumenta o avanço, as forças estáticas e dinâmicas aumentam e a rugosidade também aumenta.

PALAVRAS-CHAVE: fresamento frontal, ferro fundido, forças de usinagem, rugosidade.

HÜBNER, H. B. **Evaluation of machining forces and roughness generated in asymmetrical face milling of cast iron GGG50**. 2013. 25p. Monograph (Undergraduate Final Project in Mechanical Engineering) – Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

Due to a great demand on the manufacturing accuracy and cost reduction, becomes increasingly necessary a better understanding of the factors that influencing the quality of the final product, especially for machining processes. This study evaluated the effects of the feed rate and the axial and radial depth of cut in the up and down asymmetrical cutting in relation to workpiece about the orthogonal components (axial, radial and tangential) of the cutting force and the machined surface roughness parameters in the face milling of cast iron DIN GGG50 with carbide inserts. The cutter rotation remained constant. The forces were acquired through a sensory system composed of piezoelectric dynamometer, signal acquisition board and computer with appropriate software. The roughness generated by face milling was quantified through a portable profilometer. Through an analysis of variance was found significant evidence of that the reduction of axial depth of cut, the increase of feed rate and the conversion from down to up milling causes an increase of roughness values. The increase in the static and dynamic machining forces have not always indicate a rise in surface roughness, since it when there is an increase of axial depth of cut upsurges the static and dynamic forces, but the roughness decreases due to a hardening of the material. But when it increases the feed rate, also increase the static and dynamic forces and the roughness.

KEYWORDS: face milling, cast iron, machining forces, surface roughness.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3.1	Forças de Usinagem.....	1
3.1.1	Medições de Força de Usinagem	3
3.1.2	Decomposição das Forças nos Eixos Principais.....	3
3.2	Acabamento Superficial	3
3.3	Ferro Fundido	4
3.4	Fluidos de Corte.....	5
4	MATERIAIS E MÉTODOS	6
4.1	Sistema Experimental	6
4.1.1	Caracterização do Material do Corpo de Prova	8
4.1.2	Caracterização da Ferramenta de Corte.....	8
4.1.3	Caracterização do Meio Lubrificador.....	9
4.2	Planejamento Experimental	9
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	10
5.1	Análise das Componentes da Força de Corte.....	10
5.1.1	Parcelas Estáticas das Componentes	11
5.1.2	Parcelas Dinâmicas das Componentes	12
5.2	Análise das Rugosidades Média e Total	13
6	CONCLUSÕES.....	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
	APÊNDICE.....	16

1 INTRODUÇÃO

A operação de fresamento é uma das mais utilizadas dentre os processos de fabricação por usinagem. O fato de a ferramenta de corte (fresa) poder se apresentar sob as mais diversas formas confere a esta operação um caráter de versatilidade em termos de geometrias possíveis de serem geradas. Boa parte das superfícies não planas e de não revolução de peças e/ou componentes somente pode ser gerada por fresamento [Diniz *et al.*, 2010].

O faceamento é a operação mais comum no fresamento e pode ser realizado usando uma ampla gama de diferentes ferramentas. As fresas com um ângulo de posição (χ_r) de 45° são usadas com mais frequência para aplicações que envolvem valores intermediários de profundidade de corte (a_p) e avanço por dente (f_z) por reduzirem vibrações em balanços longos e permitirem aumento da produtividade (afinam os cavacos) [Sandvik, 2012].

Sabe-se que o processo de usinagem baseia-se na remoção de material, utilizando na ferramenta um material mais duro e mecanicamente mais resistente que a peça. Assim, o surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribuíram para o aparecimento de novos materiais para a concepção de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem. Os dois tipos de materiais mais comuns usados em ferramentas de corte destinadas às operações tradicionais de usinagem são o aço rápido e o metal duro, que juntos somam 90% das aplicações na indústria moderna [Souza, 2011].

Tendo em vista uma grande demanda sobre a precisão da fabricação, bem como a eficiência e a redução dos custos, o fresamento está em constante evolução. Ao desenvolver um processo de fresamento mais exato é possível eliminar etapas de fabricação seguintes como a retificação, por exemplo, e aumentar a sustentabilidade do sistema de produção. O sucesso no desenvolvimento de um processo mais exato vai depender de quão profundo é o conhecimento das variáveis que afetam as tolerâncias do produto final. Dessa forma, torna-se interessante o estudo das forças e dos parâmetros de corte no processo de fresamento, uma vez que se aumenta a possibilidade de adequar o processo para a aplicação desejada.

Sabe-se que o material da peça influencia na qualidade da superfície acabada e nas forças de corte envolvidas durante a remoção de material. Neste estudo é abordado o fresamento do ferro fundido utilizando um cabeçote fresador ($\chi_r = 45^\circ$) com insertos de metal duro, visto que não há muitas informações disponíveis na literatura.

2 OBJETIVOS

Pretende-se avaliar os efeitos do avanço, da profundidade de corte e da penetração de trabalho sobre as forças radial, tangencial e axial e sobre a rugosidade da superfície usinada no fresamento frontal assimétrico *concordante* e *discordante* do ferro fundido DIN GGG50 com um cabeçote fresador 45° e pastilhas de metal duro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Forças de Usinagem

No processo de fresamento, a espessura do cavaco (h) varia com a rotação da ferramenta n e pode ser calculada como função do avanço por dente (f_z) e da posição angular (φ), Equação 3.1 [Lima *et al.*, 2012].

$$h(\varphi) = f_z \cdot \text{sen } \varphi \quad (3.1)$$

Diferentes pesquisadores [Baohai *et al.*, 2013; Lima *et al.*, 2012; Sun e Guo, 2011] mostram a decomposição da força de usinagem em três componentes ortogonais (radial F_r , tangencial F_t e axial F_a), as quais são dependentes da espessura do cavaco como mostra a Figura 3.1. Estas forças (ou componentes) estão diretamente relacionadas à geometria da ferramenta e aos materiais da ferramenta e da peça (Eq. 3.2 a 3.4).

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

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

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

onde K_r , K_t e K_a são as pressões específicas de corte em cada direção.

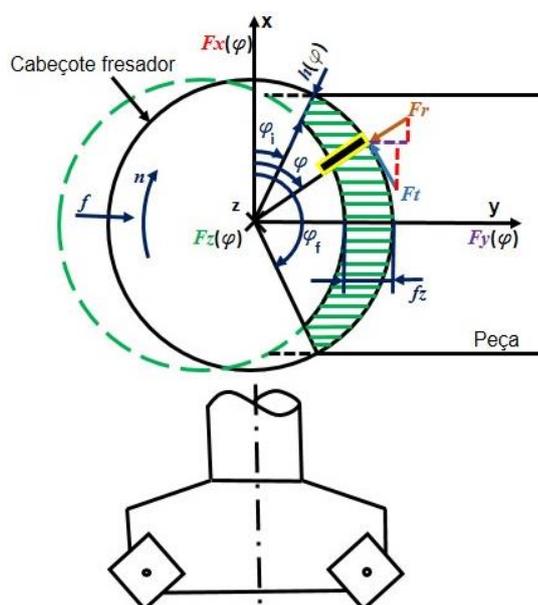


Figura 3.1 – Geometria do corte e componentes da força de corte no fresamento de faceamento [adaptado de Lima *et al.*, 2012].

Segundo Shaw, 2005, durante o processo de formação do cavaco, parte do volume de material deformado da peça não se transforma em cavaco, mas sim escorrega entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, gerando o *fluxo lateral de cavaco*. A força consumida por este fenômeno é relativamente grande quando se tem avanço pequeno, pois o volume de material que se transforma em cavaco não é muito maior que o volume de material que flui lateralmente. À medida que o avanço (f) cresce, o fluxo lateral de cavaco é relativamente menor, pois o corte se torna mais dinâmico, e quase todo o volume de material deformado se transforma em cavaco, fazendo com que a pressão específica de corte também diminua.

Segundo Diniz *et al.*, 2010, o aumento da profundidade de corte (a_p) não diminui o valor da pressão específica de corte, a não ser para pequenos valores de a_p .

Informações sobre o histórico das forças de usinagem são significativas, pois demonstram pontos envolvendo o processo, a peça, os elementos de fixação e a ferramenta. Por isso, fornecem uma base forte para a compreensão da cinemática e da dinâmica da ferramenta e da operação de corte. Também podem ser aplicadas para otimizar geometrias de corte e testar probabilidades de distorção de instrumentos. Estas forças são basicamente utilizadas como correlação ao monitoramento de vida da ferramenta [Nassif, 2012].

A parcela estática de uma força pode ser especificada como a média de uma amostragem de dados de magnitude de força em um determinado intervalo de tempo. Já a parcela dinâmica está associada à oscilação em torno do valor médio [Toh, 2004].

3.1.1 Medições de Força de Usinagem

A determinação das componentes da força de usinagem (F_x , F_y e F_z) é normalmente feita com o emprego de dinamômetros especificamente projetados para esta finalidade. Segundo Castillo, 2005, atualmente os sistemas mais conhecidos são os que utilizam transdutores piezelétricos, que constituem as chamadas plataformas piezelétricas. Estes sistemas utilizam as propriedades de certos materiais, como quartzo e turmalina, de emitirem um sinal elétrico proporcional à deformação sofrida devido a um determinado carregamento. A utilização prática deste efeito se dá através da amplificação e digitalização deste sinal elétrico, permitindo assim uma análise quantitativa e qualitativa das forças surgidas durante o processo, bem como o tratamento matemático através de um software apropriado.

3.1.2 Decomposição das Forças nos Eixos Principais

As três componentes da força de corte no referencial do inserto (F_r , F_t e F_a) estão em direções em que não coincidem com as direções dos eixos do dinamômetro fixo na mesa da máquina. A decomposição das três forças nos eixos x, y e z do dinamômetro (F_x , F_y e F_z) em função da posição angular, pode ser calculada pelas Equações 3.6 a 3.8. Comumente alinham-se os eixos do dinamômetro aos eixos da máquina [Lima *et al.*, 2012].

$$F_x = -F_t \cdot \text{sen } \varphi + F_r \cdot \text{cos } \varphi \quad (3.6)$$

$$F_y = +F_t \cdot \text{cos } \varphi + F_r \cdot \text{sen } \varphi \quad (3.7)$$

$$F_z = F_a \quad (3.8)$$

3.2 Acabamento Superficial

A qualidade geral de uma superfície usinada pode ser classificada como função da medição de quatro parâmetros: rugosidade, ondulações, marcas denotando as direções das irregularidades (marcas de avanço) e falhas [Juneja e Sekhon, 2003; Shaw, 2005].

No entanto, nos processos de usinagem em geral, é comum a qualidade de uma superfície ser classificada apenas em termos do parâmetro rugosidade, ou seja, erros micro geométricos existentes nas superfícies das peças, cujos valores medidos são normalmente expressos pela rugosidade média ou pela rugosidade total. Sua avaliação é possível com a utilização de um aparelho específico chamado rugosímetro.

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 . Já a 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 de medição L [Mello *et al.*, 2012]. A Figura 3.2 mostra a representação esquemática de R_a e R_t .

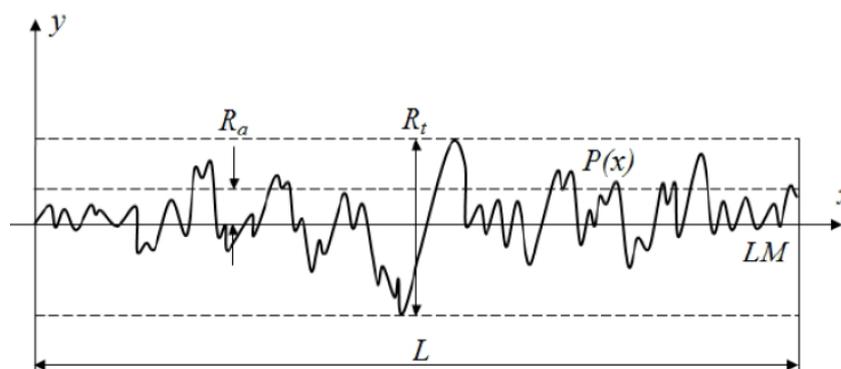


Figura 3.2 – Rugosidade R_a e R_t em um perfil de superfície $P(x)$ de uma amostra de comprimento L [Mello *et al.*, 2012].

A rugosidade média teórica ($R_{a(teor)}$) pode ser calculada no fresamento frontal utilizando uma ferramenta com raio de ponta r_ϵ e avanço por dente f_z pela Equação 3.9 [Santos, 2001].

$$R_{a(teor)} = 0,5 \cdot \left(r_\epsilon - \sqrt{r_\epsilon^2 - 0,25 \cdot f_z^2} \right) \quad (3.9)$$

Em casos reais, a rugosidade real costuma ser maior do que a teórica, devido a:

- posicionamento irregular das pastilhas no sentido axial;
- desgaste irregular das arestas;
- fluxo irregular de cavaco;
- fixação e/ou rigidez da peça deficientes;
- condições da máquina deficientes (p.ex. se a fresa não está bem balanceada, o dente mais externo faz o corte; assim, o avanço real por dente é igual ao avanço por rotação, o que prejudica o acabamento).

Cada processo de usinagem garante uma precisão em determinadas condições de usinagem. A Tabela 3.2 mostra a Classe de Tolerância (IT) e a Rugosidade Média (R_a) que podem ser obtidas por diferentes processos de usinagem.

Tabela 3.2 – Precisoões de usinagem e rugosidades obtidas economicamente através de diversos processos de usinagem para superfícies planas [Ferreira, 2013].

<i>Processo</i>		<i>Classe de Tolerância IT</i>	<i>Rugosidade R_a (μm)</i>
Fresamento	Desbaste	11-13	5-20
	Semi-acabamento	8-11	1,25-10
	Acabamento	6-8	0,32-1,25
Faceamento	Desbaste	12-13	10-80
	Semi-acabamento	10-11	2,5-10
	Acabamento	7-9	1,25-2,5
Aplainamento	Desbaste	11-13	5-20
	Semi-acabamento	8-11	2,5-10
	Acabamento	6-8	0,63-5
Brochamento	Semi-acabamento	10-11	0,63-2,5
	Acabamento	6-9	0,16-0,63
Retificação	Desbaste	7-9	0,63-2,5
	Semi-acabamento	6-7	0,16-0,63
	Acabamento	5-6	0,08-0,16
Lapidação	Semi-acabamento	5-6	0,04-0,63
	Acabamento	3-5	0,008-0,08
Super-acabamento		3-5	0,008-0,16

3.3 Ferro Fundido

Ferros fundidos são ligas à base de ferro e carbono com teores elevados de silício. A definição clássica separa aços e ferros fundidos empregando o limite de aproximadamente 2% de carbono, a solubilidade máxima deste elemento na austenita.

Com o advento da microscopia, passou a ser possível classificar os ferros fundidos através de sua microestrutura. Os ferros que contêm grafita são classificados primeiramente, pela forma da grafita. Assim, existem ferros fundidos com grafita lamelar, nodular e vermicular. Dentro de cada forma da grafita, a maneira como a grafita se distribui e suas dimensões são, também, medidas e caracterizadas metalograficamente. Além disso, os ferros fundidos podem ser classificados pela microestrutura da matriz, que apresenta os mesmos constituintes que os aços [Colpaert, 2008]. A Figura 3.3 ilustra diferentes formas das partículas de grafita encontradas em ferros fundidos, enquanto a Tabela 3.1 apresenta algumas informações sobre os ferros fundidos.

O GGG 50 (DIN 1693) ou FE 50007 (ABNT NBR 6916) é um ferro fundido constituído de grafita em forma de nódulos (esferas). A matriz é perlítica (40 a 70%) / ferrítica (30 a 60%), podendo ter no máximo 10% de carbonetos dispersos. Esta estrutura confere ao material uma boa usinabilidade aliada a elevadas propriedades mecânicas.

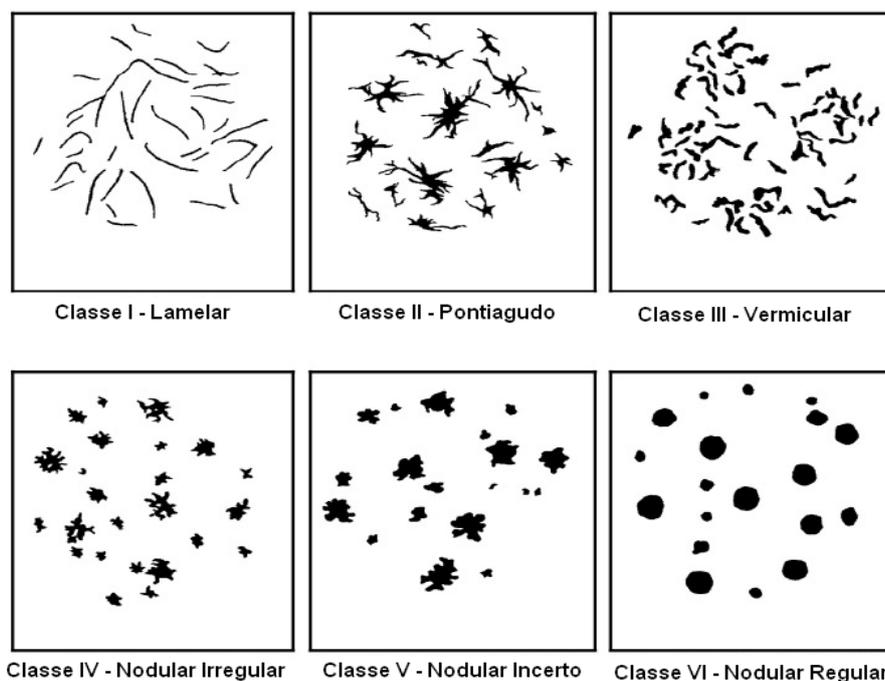


Figura 3.3 – Esquemas de referência para as seis classes de partículas de grafita de acordo com a Norma ISO-945.

Tabela 3.1 – Propriedades dos ferros fundidos [adaptado de Diniz *et al.*, 2010].

Propriedades do Ferro Fundido	Cinzento (GCI)	Vermicular (CGI)	Nodular (NCI)	DIN GGG 50
Resistência à Tração [MPa]	250	450	750	550
Módulo de Elasticidade [GPa]	105	145	160	170
Resistência à Fadiga [MPa]	110	200	250	220
Dureza [HB]	170	230	190	170 a 240

O ferro fundido GGG 50 pode ser aplicado em cubos, tubulações, rolos, coletores de escapamento, virabrequins, carcaças de diferencial, capas de mancal, *bad plates*, carcaças de turbo-compressores, discos de embreagem e volantes. Carcaças de turbo-compressores e coletores de escapamento são geralmente feitos de ferro fundido com liga Si-Mo, que é mais resistente ao calor [Sandvik, 2012].

3.4 Fluidos de Corte

Segundo Diniz *et al.*, 2010, durante o corte se desenvolve grande quantidade de calor devido à energia necessária para a deformação do cavaco e à energia decorrente do atrito nas interfaces ferramenta/peça e cavaco/ferramenta. Este calor precisa ser reduzido por lubrificação e/ou extraído por refrigeração da ferramenta e da peça, principalmente para minimizar o desgaste da ferramenta, a dilatação térmica da peça e o dano térmico à estrutura superficial da peça. Se isso acontecer, não somente a geração de calor é diminuída, mas também a força e a potência de corte. Para tanto, se tem desenvolvido novos materiais para ferramentas (ou de revestimento de ferramentas), materiais com usinabilidade melhorada, e utilização de fluidos de corte com capacidade lubrificante. Além disso, os autores ainda relatam que em fresamento, a lubrificação fica facilitada, pois o óleo com características lubrificantes toca a ferramenta enquanto esta se encontra fora da peça (a aresta de corte de uma fresa passa mais que a metade da volta fora da peça) e é levado para as interfaces ferramenta/peça e cavaco/ferramenta pela própria ferramenta.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho envolve a descrição do sistema experimental utilizado (incluindo a caracterização do ferro fundido GGG50, do cabeçote fresador e do meio lubrificador), do planejamento experimental e do procedimento de medição das rugosidades média e total.

4.1 Sistema Experimental

Para analisar as forças de corte no processo de fresamento frontal utilizou-se um bloco de ferro fundido com as dimensões $100 \times 100 \times 50$ mm devidamente fixado sobre uma plataforma piezométrica Kistler modelo 9272, que pode adquirir as três componentes da força de usinagem (F_x , F_y e F_z) e o momento torçor (M_z). Para o processo de fresamento em análise foram adquiridas somente as três componentes ortogonais da força de usinagem. A Figura 4.1 apresenta o sistema experimental utilizado nos ensaios de faceamento e a Figura 4.2 o esquema do sistema de monitoramento aplicado nos experimentos.

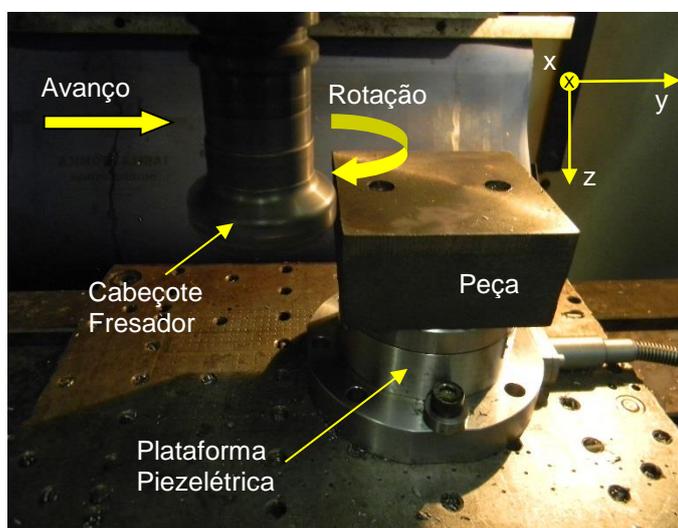


Figura 4.1 – Sistema experimental utilizado.

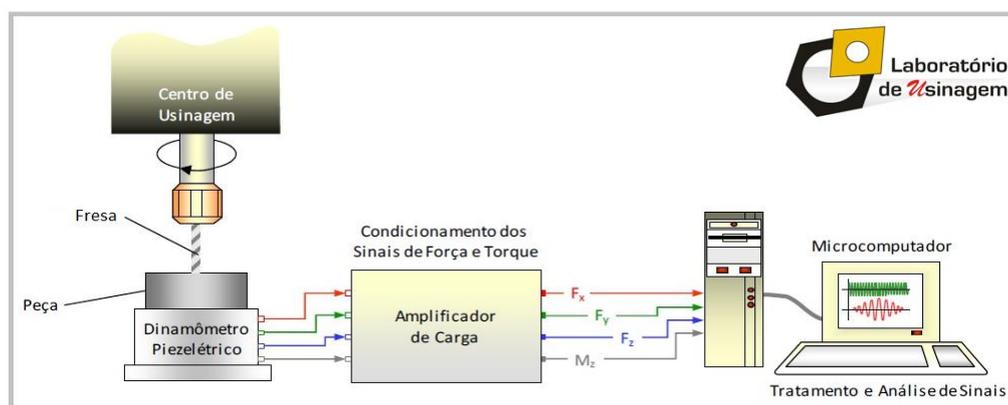


Figura 4.2 – Arquitetura do sistema de monitoramento de fresamento (cortesia do Laboratório de Usinagem da UFRGS).

O experimento foi realizado em um centro de usinagem Romi modelo Discovery 308. O condicionamento de sinais foi feito utilizando um amplificador de carga Kistler modelo 5070A10100, onde se aplicou um filtro passa-baixa de 100 Hz a fim de atenuar sinais de alta frequência (Kistler, 2010, recomenda filtro passa-baixa de segunda ordem de 0,1 a 2,0 kHz), ou

seja, minimizar o ruído proveniente da vibração do cabeçote fresador. A placa de aquisição de sinais PCIM-DAS 1602/16 da Measurement Computing instalada em um microcomputador dedicado permite a captura de até 100 mil pontos por segundo (100 kS/s) em até oito entradas analógicas diferenciais (12,5 kS/s por canal) com 16 bits de resolução.

A aquisição e o processamento dos sinais de F_x , F_y e F_z foi feito utilizando o software LabVIEW 8.6. Utilizou-se uma VI (*Virtual Instrument*) específica para o processamento de dados de fresamento (Figura 4.3). Para todos os sinais de força (F_x , F_y , F_z) fez-se a aquisição a uma taxa de 5 kS/s. A análise e o pós-processamento dos dados de força foram feitos utilizando o software MS Excel.

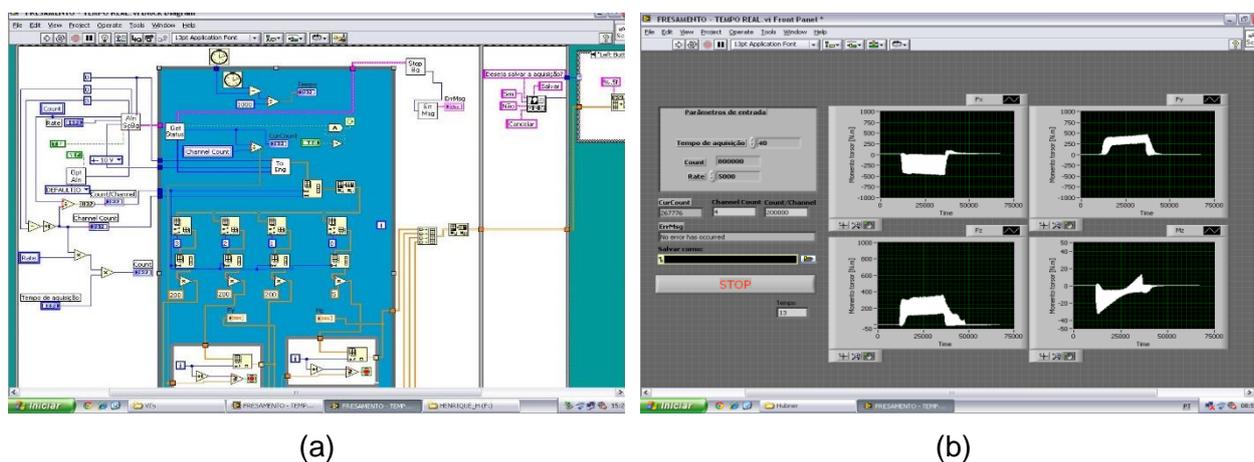


Figura 4.3 – Software LabVIEW: (a) ambiente de programação; (b) interface gráfica.

Para a medição de rugosidades utilizou-se um rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201 (Fig. 4.4 a). O aparelho possui resolução de $0,01 \mu\text{m}$ e agulha de diamante com raio de ponta $5 \mu\text{m}$. As medições das rugosidades R_a e R_t foram feitas após cada passe nas regiões de entrada e saída da ferramenta na direção perpendicular à do avanço da fresa (Fig. 4.4b). Nas medições usou-se um comprimento de amostragem (*cut-off*) $\lambda = 0,8 \text{ mm}$ (recomendado para $R_a \leq 2 \mu\text{m}$) e um comprimento de medição $L = 0,8 \times 5 = 4 \text{ mm}$.

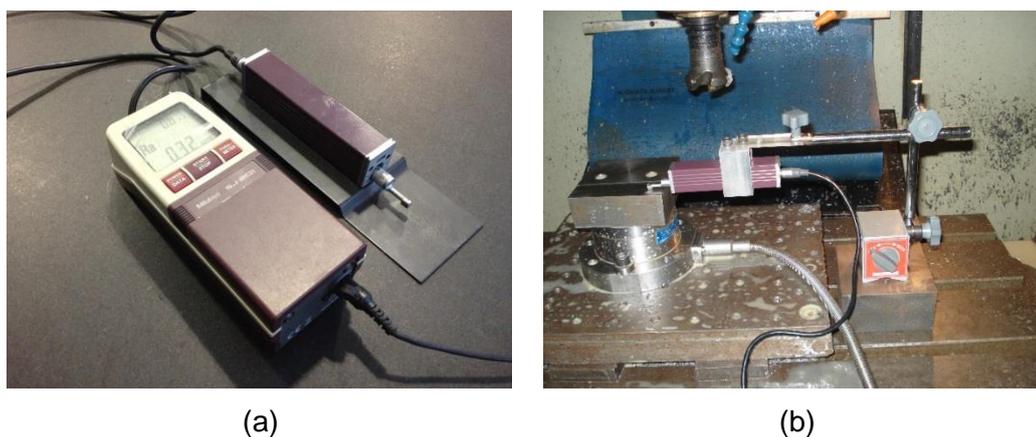


Figura 4.4 – (a) Rugosímetro Portátil Mitutoyo SJ-201; (b) Procedimento de medição de rugosidade.

Para verificar a influência das variáveis independentes de entrada nos valores da rugosidade média, realizou-se a Análise de Variância (ANOVA) através do MS Excel levando-se em conta o tipo de corte (*concordante* ou *discordante*), a profundidade de corte (a_p), a penetração de trabalho (a_e) e o avanço por volta (f).

4.1.1 Caracterização do Material do Corpo de Prova

A Figura 4.5 apresenta as imagens da microestrutura da amostra do ferro fundido DIN GGG50 utilizado nos ensaios práticos.

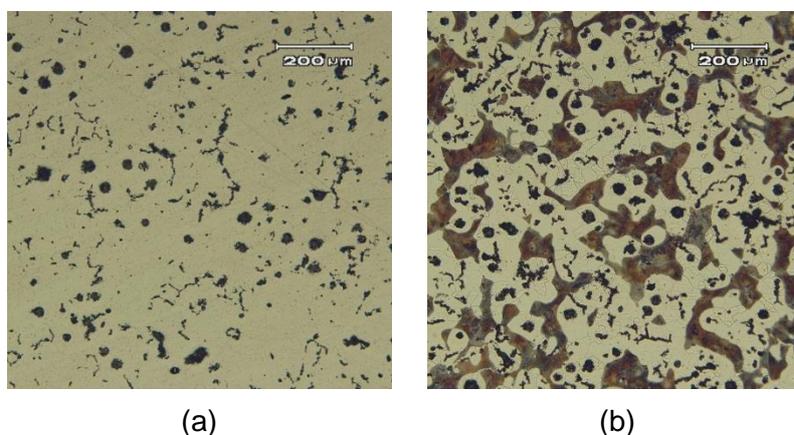


Figura 4.5 – GGG50: (a) sem ataque; (b) atacado com Nital (composto de 2% de ácido nítrico e 98% de álcool). Ampliação 100x.

Observando a Figura 4.5(a) percebem-se partículas de grafite das Classes III e VI da norma ISO-945 praticamente em mesma proporção (vide Figura 3.3). Na Figura 4.5(b), observam-se os nódulos de grafita envolvida por ferrita em uma matriz perlítica.

Ensaio de dureza obtidos em cinco pontos distintos sobre a superfície da peça revelaram um valor médio de dureza igual a 230 HB.

4.1.2 Caracterização da Ferramenta de Corte

Nos ensaios foi utilizado um cabeçote fresador Sandvik modelo R245-050Q22-12M (Fig. 4.6a) com 50 mm de diâmetro e alojamento para quatro pastilhas intercambiáveis. Os insertos da Classe K são da Sandvik modelo R245-12 T3 M-KM GC3220 (Fig. 4.6b) com raio de quina $r_s = 1,5$ mm, comprimento da aresta alisadora $b_s = 2$ mm, ângulo de posição $\chi_r = 45^\circ$, além de cobertura MTCVD (*Medium Temperature Chemical Vapor Deposition*) de TiCN / Al₂O₃ / TiN, utilizados em operações de faceamento leve.

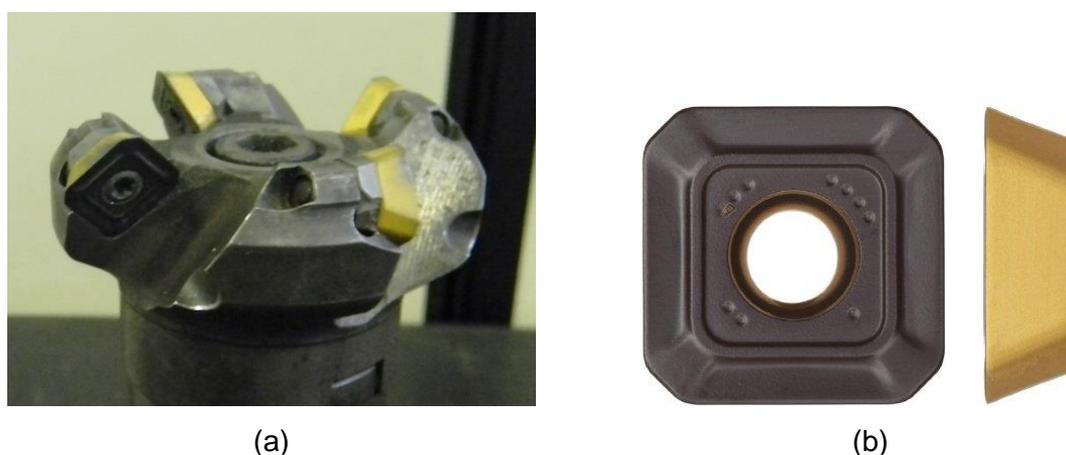


Figura 4.6 – Ferramenta de corte utilizada nos experimentos: (a) cabeçote fresador; (b) pastilha intercambiável (inserto).

4.1.3 Caracterização do Meio Lubrificador

Nas operações de corte foram usados dois pontos de refrigeração/lubrificação no Centro de Usinagem com vazão total na bomba de 5500 litros por hora.

O lubrificante utilizado foi o óleo solúvel semissintético Quimatic ME-I na diluição de 1 parte de óleo para 19 partes de água. De acordo com Quimatic, 2013, as principais características deste meio lubrificante são: grande lubricidade (comparável aos óleos minerais); atração molecular (tecnologia que garante excelente refrigeração com ótima lubrificação); econômico (permite maior diluição sem afetar o desempenho); ecológico (isento de nitritos, compostos aromáticos, cloro, enxofre e metais pesados); excelente proteção anticorrosiva; não agride a pele do operador ou produz névoa irritante no ambiente de trabalho.

4.2 Planejamento Experimental

Ao todo foram realizados 16 passes – todos com rotação $n = 1050$ rpm. A Tabela 4.1 apresenta o plano experimental. Vale salientar que o avanço por volta f é definido pelo produto entre o avanço por dente (f_z) e o número de dentes da fresa ($z = 4$).

Tabela 4.1 – Combinação de parâmetros por passe ($n = 1050$ rpm).

Passe	Tipo de Corte	f (mm/volta)	a_p (mm)	a_e (mm)
1	Discordante	1,2	1	30
2	Discordante	1,2	2	30
3	Discordante	1,2	1	20
4	Discordante	1,2	2	20
5	Concordante	1,2	1	30
6	Concordante	1,2	2	30
7	Concordante	1,2	1	20
8	Concordante	1,2	2	20
9	Discordante	0,6	1	30
10	Discordante	0,6	2	30
11	Discordante	0,6	1	20
12	Discordante	0,6	2	20
13	Concordante	0,6	1	30
14	Concordante	0,6	2	30
15	Concordante	0,6	1	20
16	Concordante	0,6	2	20

A Figura 4.7 esquematiza por diferentes cores e tons os 8 passes para cada um dos dois avanços executados no corpo de prova. Depois dos passes 1, 3, 5, 7 foi necessário efetuar um **desbaste** para evitar que a aresta de corte ficasse em contato com a superfície deixada pelo passe anterior e afetasse o valor das forças nos passes seguintes. Após efetuar os oito primeiros passes no corpo de prova com $f = 1,2$ mm/volta, fez-se um faceamento na peça a fim de repetir os oito passes seguintes com $f = 0,6$ mm/volta.

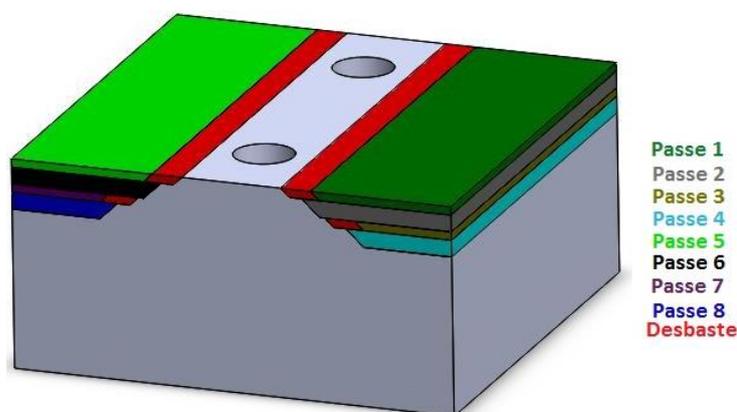


Figura 4.7 – Passes efetuados no corpo de prova.

Os sinais de força (F_x , F_y , F_z) foram adquiridos simultaneamente durante cada um dos 16 passes realizados. Os gráficos destes sinais podem ser visualizados no Apêndice.

Os valores rugosidades média (R_a) e total (R_t) foram mensurados com o rugosímetro junto ao Centro de Usinagem sempre após cada passe realizado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos no fresamento do ferro fundido com insertos de metal duro foram avaliados de forma comparativa sob dois aspectos: análise das componentes da força de corte (F_r , F_t e F_a) decompostas nos eixos do dinamômetro e análise da rugosidade gerada na peça.

5.1 Análise das Componentes da Força de Corte

A Figura 5.1 apresenta esquematicamente um diagrama das componentes (F_r e F_t) da força de corte decompostas nos eixos x e y do dinamômetro (F_x , F_y) para três posições angulares da pastilha. No Apêndice são apresentados os gráficos das variações de F_x , F_y e F_z em função do ângulo de rotação do cabeçote fresador.

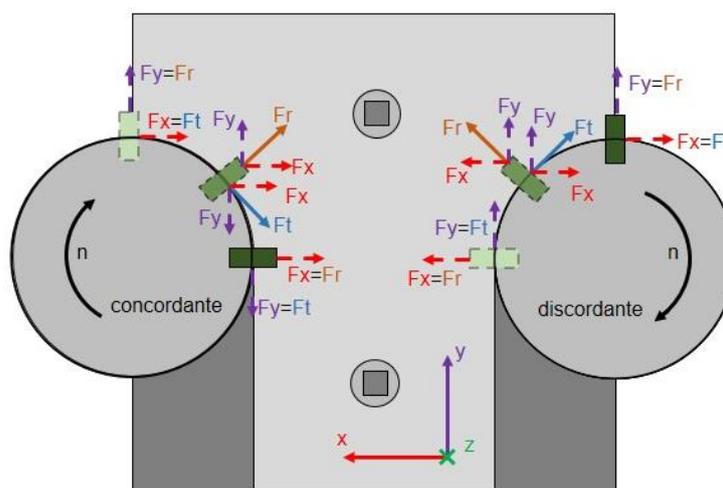


Figura 5.1 – Decomposição das forças F_r e F_t nos eixos x e y do dinamômetro.

Analisando a Figura 5.1, percebe-se que, quando o corte é *discordante* e utiliza-se uma penetração de trabalho $a_e = 20$ mm (menor que o raio do cabeçote $D/2 = 25$ mm), devido à soma vetorial das projeções de F_r e F_t no eixo x, F_x pode ser positiva ou negativa. Positiva quando tem a mesma direção e sentido do eixo do dinamômetro; negativa quando assume orientação contrária à do eixo do dinamômetro. O mesmo não acontece com F_y , que é sempre positivo, pois tem sempre a mesma orientação (direção e sentido) do eixo do dinamômetro. Este comportamento pode ser demonstrado pelas Figuras A1d) e A3d) do Apêndice.

As Figuras A1b) e A3b) do Apêndice mostram, por exemplo, que para uma penetração de trabalho $a_e = 30$ mm (maior que o raio do cabeçote fresador), há uma redução na amplitude de F_y devido a haver sempre pelo menos um dente em contato com a peça. Já F_x não chega a ter valores positivos, isso porque quando um dente começa o processo de corte e gera sinais positivos no eixo x, há outro terminando o processo de corte gerando um sinal em sentido contrário e com maior magnitude. F_x também passa a ter uma amplitude maior, pois há uma maior variação do ângulo de contato do dente com a peça ($\Delta\phi$), conforme Equação 3.6.

Ainda pela análise da Figura 5.1, percebe-se que quando o corte troca de *discordante* para *concordante*, F_x torna-se sempre negativo, pois tem sempre sentido contrário ao sentido do eixo do dinamômetro. Já F_y , que no corte *discordante* permanecia sempre positivo, passa a oscilar entre valores positivos e negativos (vide Fig. A2d) e Fig. A4d) do Apêndice), devido à soma vetorial das projeções de F_r e F_t no eixo y do dinamômetro. Quando a_e é aumentada de 20 para 30 mm (p. ex. da Fig. A2d) para Fig. A2b) e da Fig. A4d) para Fig. A4b) do Apêndice), F_x passa a oscilar com uma amplitude menor, pois há sempre pelo menos um dente em contato

com a peça gerando sinal no mesmo sentido. Por outro lado, F_y oscila com uma amplitude maior devido a ter uma maior variação do ângulo de contato do dente ($\Delta\phi$) com a peça.

Nos gráficos das Figuras A1 a A4 do Apêndice (p.ex. Passe 4, Figura 5.2a) é possível observar que nem todas as arestas da fresa de facear estão em um mesmo plano paralelo à superfície usinada, visto que F_z vai tendo um aumento gradual de acordo com a rotação do cabeçote. Além disso, este processo torna-se periódico conforme pode ser visto na Figura 5.2b), onde é possível ver o comportamento de F_z para duas rotações do cabeçote. Segundo Diniz *et al.*, 2010, isso ocorre devido à tolerância das pastilhas, à folga nos mancais do eixo árvore e às rebarbas ou defeitos da fixação das pastilhas na fresa.

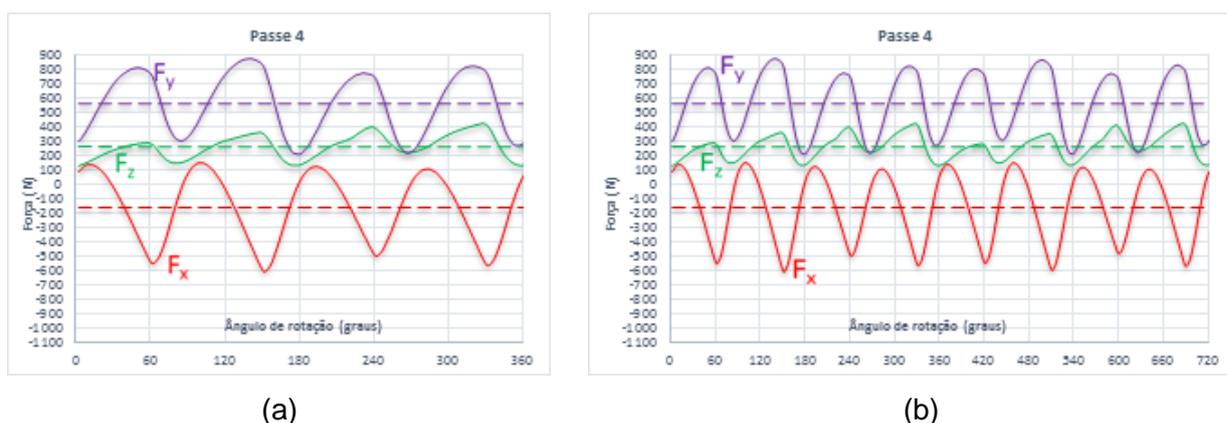


Figura 5.2 – Variação de F_x , F_y e F_z em função do ângulo de rotação do cabeçote fresador para o Passe 4: (a) 360°; (b) 720°.

5.1.1 Parcelas Estáticas das Componentes

Para determinar a parcela estática das forças fez-se a média de 10 mil pontos coletados (equivalente a 35 voltas completas do cabeçote) em um domínio de tempo onde a parcela dinâmica já se encontrava estabilizada. A Figura 5.3 apresenta os gráficos de F_x , F_y e F_z medidas nas operações de usinagem considerando variações na profundidade de corte, penetração de trabalho e variação no avanço para os tipos de corte *discordante* e *concordante* enquanto que a Tabela 5.1 mostra o percentual de variação da intensidade destas forças com o incremento dos parâmetros de corte.

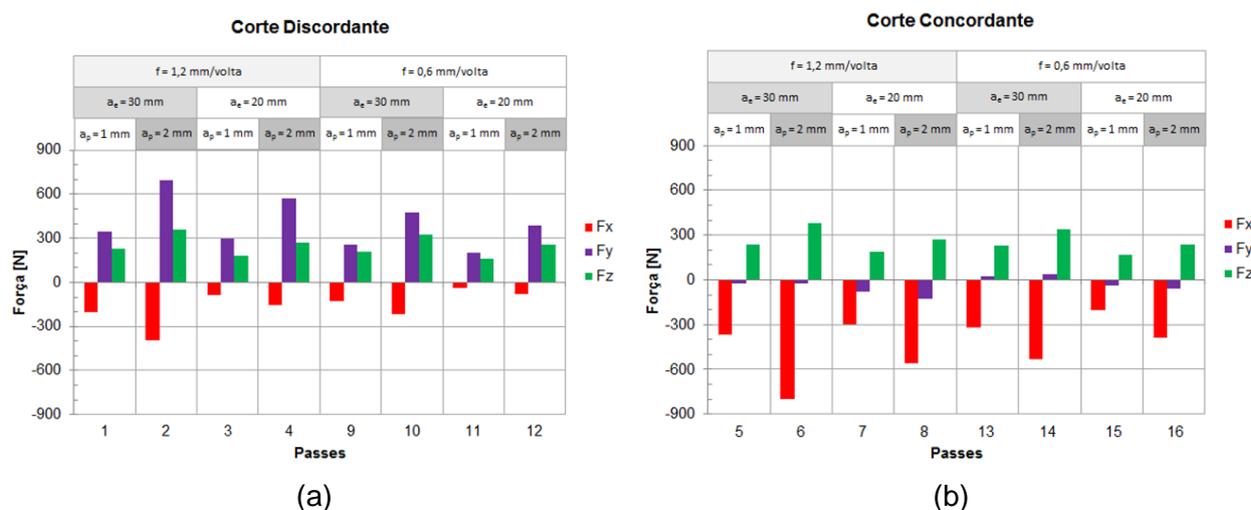


Figura 5.3 – Parcela estática das componentes ortogonais F_x , F_y e F_z para o corte: (a) *discordante*; (b) *concordante*.

Tabela 5.1 – Percentual de variação da intensidade das parcelas estáticas das componentes ortogonais com o incremento dos parâmetros de corte.

	Corte Discordante			Corte Concordante		
	F_x	F_y	F_z	F_x	F_y	F_z
Incremento de a_p	+82%	+45%	+9%	+40%	+702%	+11%
Incremento de a_e	+160%	+21%	+28%	+39%	+105%	+37%
Incremento de f	+85%	+93%	+55%	+93%	+45%	+49%
Mudança do Corte <i>Discordante</i> para <i>Concordante</i>				+166%	-109%	+3%

Varição Positiva (+): **aumento**.

Varição Negativa (-): **diminuição**.

Através de uma análise da Figura 5.3 e da Tabela 5.1 fica evidente o aumento das forças F_x , F_y e F_z com o incremento dos parâmetros de entrada (a_p e f), porém não de maneira proporcional. Este fato se deve possivelmente à diminuição das pressões específicas de corte (K_s) com o aumento de a_p e f , conforme discutido na Seção 3.1.

Aumentando a penetração de trabalho, houve um aumento das parcelas estáticas de F_x , F_y e F_z . Este acréscimo nos sinais das forças é explicado pelo fato de que, quando $a_e = 20$ mm, não há mais que um dente efetuando o corte; já quando $a_e = 30$ mm, os sinais representam cerca de $z = 1,12$ dentes em contato ao longo da aquisição, ou seja, há pelo menos uma aresta que sempre está em contato com a peça e outra que fica em contato 12% do tempo equivalente a uma volta.

Quando o corte altera de *discordante* para *concordante*, não se observa uma variação considerável em F_z devido à força axial ser passiva, ou seja, ser perpendicular ao plano de trabalho onde ocorrem os movimentos de corte e avanço. Já F_x aumenta sua intensidade (negativa) em 166% e F_y diminui sua intensidade em 109%, passando assim a ter valores próximos a zero devido à decomposição vetorial de F_r e F_t , conforme comentado anteriormente.

5.1.2 Parcelas Dinâmicas das Componentes

A Figura 5.4 mostra a parcela dinâmica das componentes ortogonais F_x , F_y e F_z em função de f , a_e e a_p para os cortes *discordante* e *concordante*, e a Tabela 5.2 o percentual de variação da intensidade destas forças com o incremento desses parâmetros de corte.

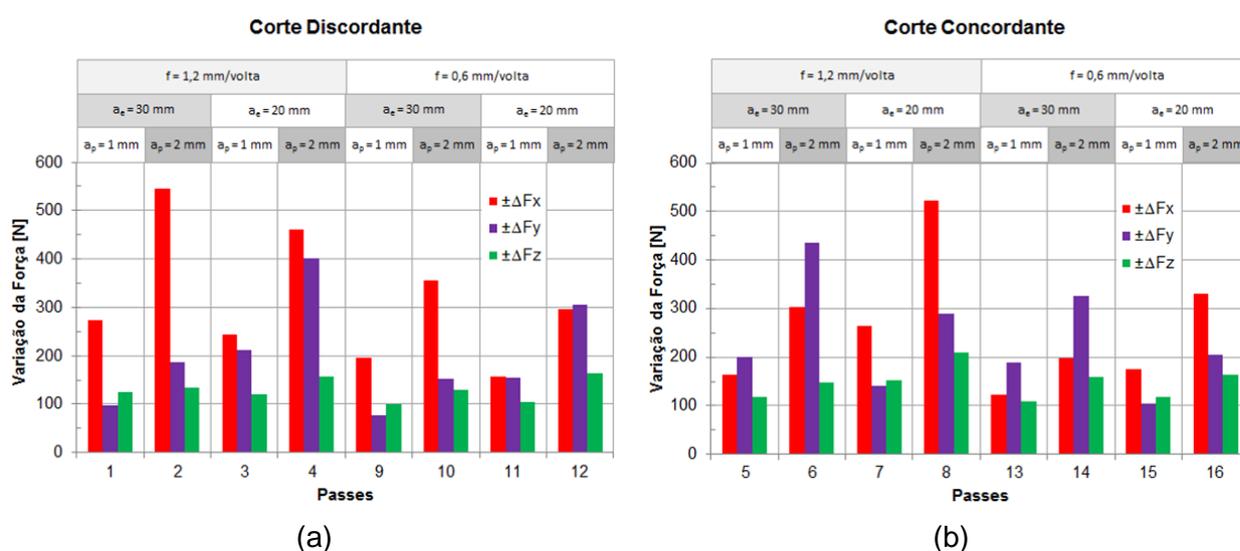


Figura 5.4 – Parcela dinâmica de F_x , F_y e F_z para o corte: (a) *discordante*; (b) *concordante* (95% dos pontos encontram-se em torno do valor médio com uma variação de $\pm \Delta F$).

Tabela 5.2 – Percentual de variação da intensidade das parcelas dinâmicas das componentes ortogonais com o incremento dos parâmetros de corte.

	Corte Discordante			Corte Concordante		
	$\pm\Delta F_x$	$\pm\Delta F_y$	$\pm\Delta F_z$	$\pm\Delta F_x$	$\pm\Delta F_y$	$\pm\Delta F_z$
Incremento de a_p	+52%	+30%	+8%	+52%	+29%	+14%
Incremento de a_e	+18%	-52%	-10%	-39%	+56%	-17%
Incremento de f	+91%	+93%	+30%	+87%	+98%	+36%
Mudança do Corte <i>Discordante</i> para <i>Concordante</i>	-18%	+19%	+14%			

Varição Positiva (+): **aumento**.

Varição Negativa (-): **diminuição**.

Através da análise da Figura 5.4 e da Tabela 5.2 pode-se observar que um aumento na profundidade de corte (a_p) e no avanço (f) causa uma maior oscilação das forças F_x e F_y , devido a estas componentes estarem diretamente ligadas a estes parâmetros. Quando o tipo de corte é *discordante*, o incremento na penetração de trabalho (a_e) acarreta uma diminuição de ΔF_y e um aumento de ΔF_x . No corte *concordante* ocorre o inverso, ou seja, há um aumento de ΔF_y e uma diminuição de ΔF_x conforme discutido antes.

É possível analisar também que ΔF_z tem maior variação com o aumento de f e não sofre uma influência marcante (abaixo de 20%) dos demais parâmetros (a_e , a_p , tipo de corte).

5.2 Análise das Rugosidades Média e Total

A Figura 5.5 mostra o resultado de medição obtido a partir da aquisição de valores de rugosidades R_a e R_t na entrada e na saída de cada passe, resultantes do processo de usinagem e apresentados no planejamento experimental da Tabela 4.1. A Tabela A1 no Apêndice mostra os valores mensurados.

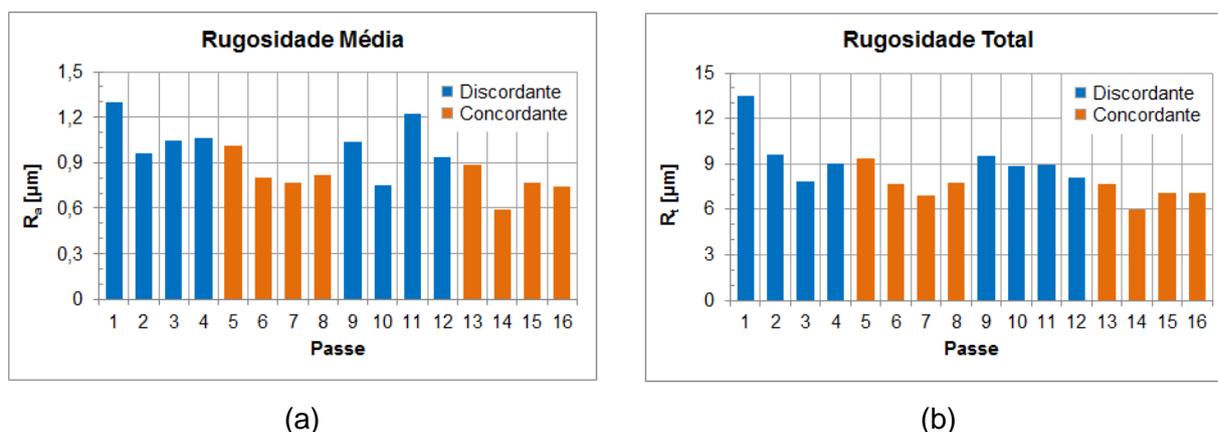


Figura 5.5 – Rugosidades: (a) Média R_a ; (b) Total R_t .

Analisando a Figura 5.5, pode ver-se que se conseguiu uma rugosidade média da superfície expressivamente boa, correspondendo a uma operação de acabamento de acordo com a Tabela 3.2 ($R_a \leq 1,25 \mu\text{m}$). Tanto para R_a quanto para R_t , a menor rugosidade que se obteve foi no passe 14.

A partir da Análise de Variância realizada para a rugosidade média (R_a) (vide Tabela A2 do Apêndice) observa-se que existem evidências significativas com nível de confiança de 99% de que a mudança do corte *discordante* para o corte *concordante*, o aumento da profundidade de corte (a_p) e a diminuição do avanço (f) causam uma redução nos valores da rugosidade média.

Para os valores de R_a medidos, a probabilidade de encontrar um valor menor na mudança do tipo de corte de *discordante* para *concordante* é de 95,8%, para um aumento de a_p a

probabilidade é de 86,0% e para a diminuição de f a probabilidade é de 63,7%. A penetração de trabalho (a_e) não influenciou significativamente R_a .

O corte *discordante* geralmente tem uma rugosidade maior devido o contato inicial da pastilha com a peça acontecer em condições desfavoráveis e com uma elevada pressão específica de corte. Isso acaba gerando um encruamento localizado do material no início do corte (penetração no material) e a rugosidade torna-se mais elevada pela formação de rebarbas na superfície usinada.

A redução da rugosidade R_a com o aumento de a_p se deve ao fato de que a ferramenta apresenta um raio de ponta $r_\epsilon = 1,5$ mm e quando a profundidade de corte $a_p = 1$ mm, apenas uma pequena parcela da aresta de corte é utilizada durante o corte. Como consequência, parte do corte é feito pela região de curvatura da aresta. Isso faz com que o material seja deformado e esmagado contra a superfície e a rugosidade gerada acaba sendo prejudicada.

Apesar de as pastilhas terem um comprimento da aresta alisadora ($b_s = 2$ mm) maior que os dois avanços utilizados ($f = 1,2$ mm e $f = 0,6$ mm) constatou-se que, através dos sinais da força axial (F_z) que há pastilhas projetadas em planos mais salientes que as outras. Isto se dá possivelmente devido às tolerâncias das pastilhas, às folgas nos mancais do eixo-árvore e às rebarbas ou defeitos da fixação das pastilhas no cabeçote fresador. Logo, a redução na rugosidade R_a devido à diminuição de f se deve à natureza geométrica do corte no fresamento, e esta relação pode ser constatada pela Equação 3.9.

Como efetuou-se a medição da rugosidade no meio da largura usinada, teoricamente, com aumento de a_e , deveria haver aumento de R_a , pois se observa um maior espaçamento entre o percurso sucessivo dos dentes, conforme mostra a Figura 5.6. Portanto, não se sabe porque não houve influência de a_e sobre R_a .

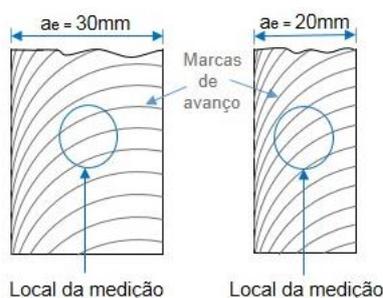


Figura 5.6 – Local da medição da rugosidade (R_a).

6 CONCLUSÕES

A diminuição nas parcelas estática e dinâmica das componentes ortogonais da força de usinagem nem sempre indicam uma redução nos valores de rugosidade média (R_a) e total (R_t). Observado os passes 11 (discordante) e 15 (concordante) com $f = 0,6$ mm/volta; $a_e = 20$ mm e $a_p = 1$ mm, tem-se as menores intensidades das forças de usinagem (F_U):

$$F_U = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} = 265 \text{ N.}$$

Já os valores de R_a gerados nos mesmos passes (respectivamente 1,23 μm e 0,76 μm) não indicam a menor rugosidade média encontrada (0,60 μm no passe 14 com $F_U = 632$ N). Isto se dá, pois quando há um aumento de a_p , as forças aumentam, porém a rugosidade diminui devido a um menor encruamento do material. Já quando se aumenta f , as forças estáticas e dinâmicas aumentam e a rugosidade média também aumenta.

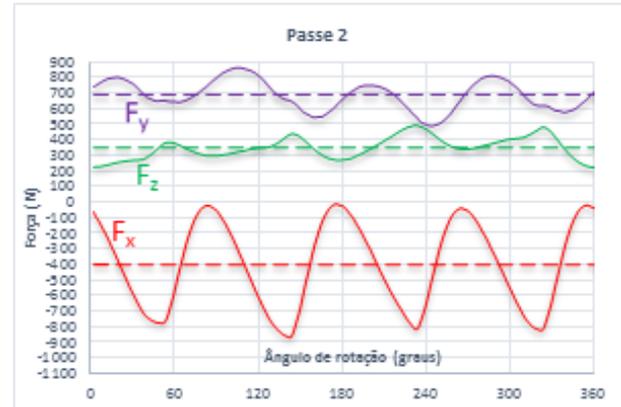
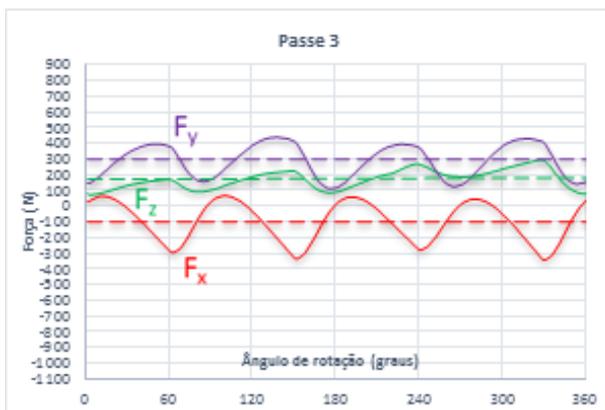
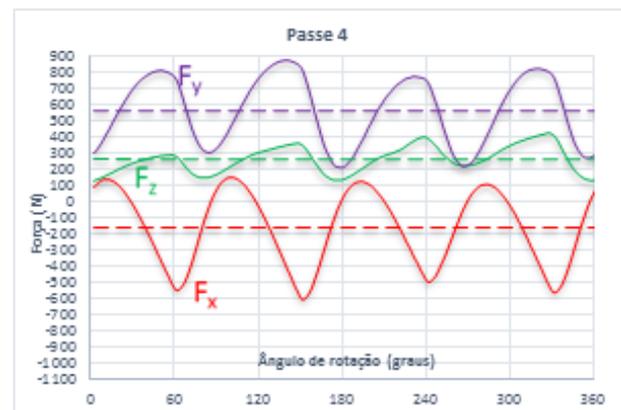
Através da Análise de Variância (ANOVA) constata-se que existem evidências significativas nas variações de R_a devido a alteração dos parâmetros a_p , f e o tipo de corte *concordante* ou *discordante*. Assim, os resultados possibilitam que se escolham melhor tais parâmetros de usinagem a fim de que se alcance a rugosidade desejada e que se contribua para um aumento na viabilidade do processo de fabricação.

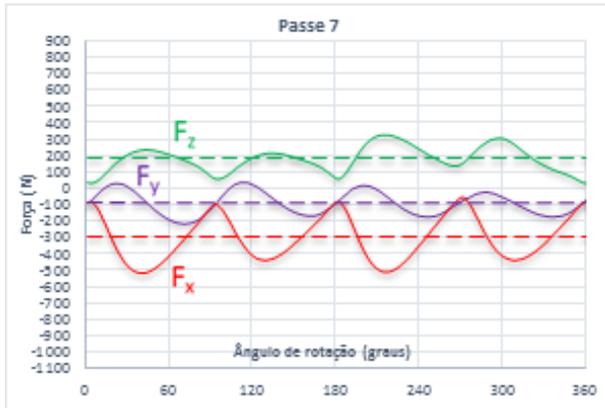
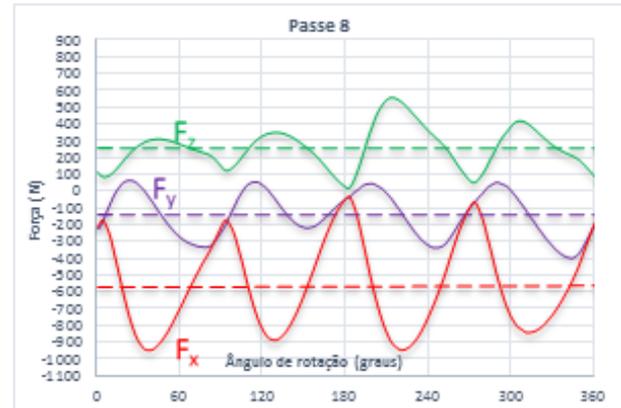
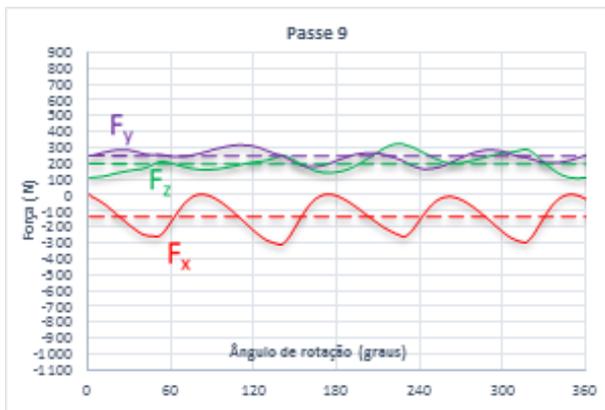
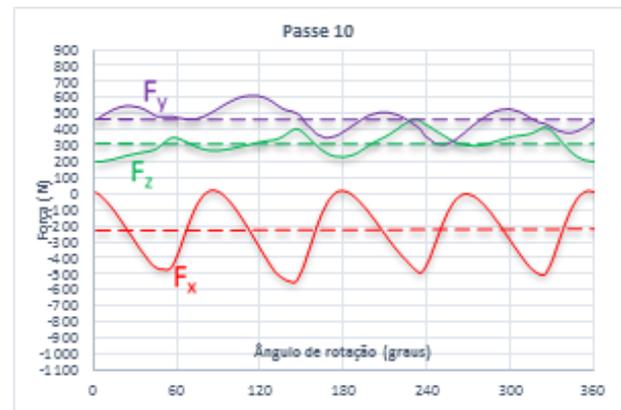
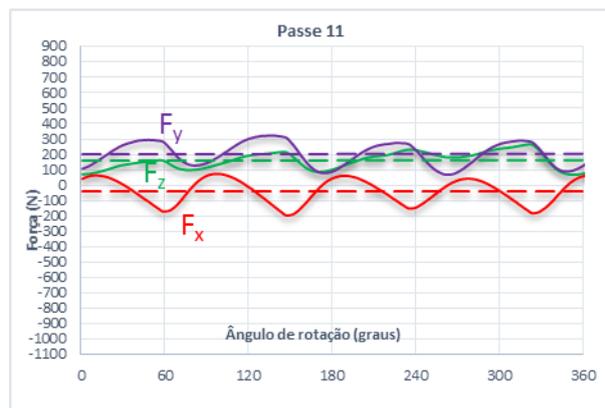
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

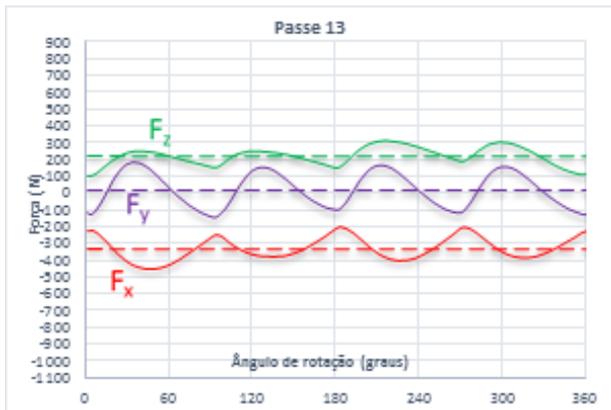
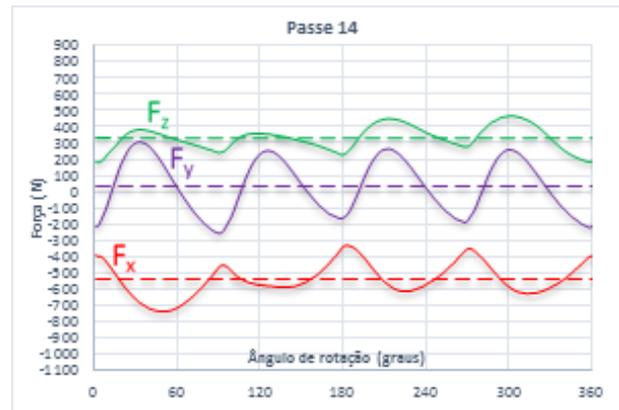
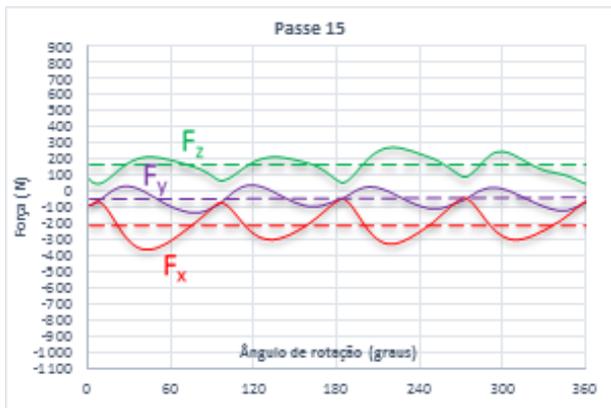
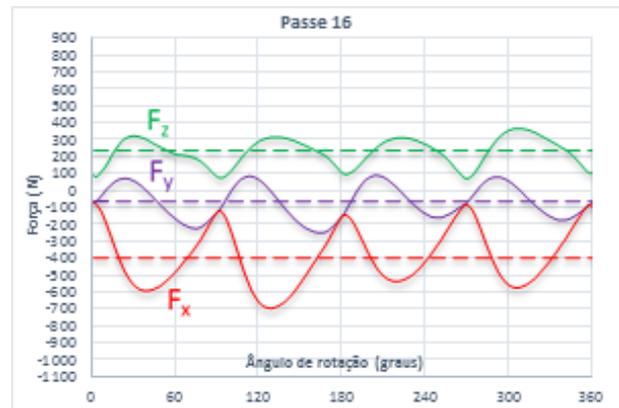
- Baohai, W., Xue, Y., Ming, L., Ge, G. **“Cutting force prediction for circular end milling process”**. Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 26, No. 4, pp. 1057-1063, 2013.
- Castillo, W. J. G. **“Furação profunda de ferro fundido GG25 com brocas de metal duro com canais retos”**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. 134p.
- Colpaert, H. **“Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns”**, 4. ed., São Paulo, Edgard Blücher, 2008, 652p.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L. **“Tecnologia da Usinagem dos Materiais”**, 7. Ed., São Paulo, Artliber, 2010, 268p.
- Ferreira, J. C. E. **“Planejamento do Processo”**, DEMEC-UFSC / Apostila, 2012. Disponível em: http://www.grima.ufsc.br/capp/apostila/Cap4ApostCAPP_v1.pdf, Acesso em 05/11/13.
- Juneja, B. L., Sekhon, N. S. **“Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools”** 2.ed., New Delhi, New Age International Ltd., 2003, 605p.
- Kistler, **“Instruction Manual – Multichannel Charge Amplifier for Multi-Component Force Measurement Type 5070A...”** Kistler Handbook, 2010, 77p.
- 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.
- Mello, M. S., Souza, A. J., Geier, M. **“Determinação empírica dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t 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.
- Nassif, F. B. **“Análise das forças resultantes da aplicação de ferramentas de corte alisadora (wiper) e convencional (standard) no torneamento de acabamento do aço inoxidável AISI 420”**, TCC em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012, 21p.
- Quimatic. **“ME-1 Óleo Solúvel Semi-Sintético – Óleo solúvel para todos os tipos de usinagem”**, Tapmatic, Disponível em: www.quimatic.com.br/produto/me-1/. Acesso em: 08/11/13.
- Sandvik. **“Manual Técnico de Usinagem”**, Sandvik Coromant, São Paulo, 2012.
- Santos, A. L. B. **“Metodologia via redes neurais para a estimativa da rugosidade e do desgaste de ferramentas de corte no processo de fresamento frontal”**, Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001, 187p.
- Shaw, M. C. **“Metal Cutting Principles”**, 2. ed., New York, Oxford Press, 2005, 651p.
- Souza, A. J., **“Processos de Fabricação por Usinagem, Parte 1: Fundamentos da Usinagem dos Materiais”**, GPFAI-DEMEC-UFRGS, Apostila, 2011.
- Sun, Y., Guo Q. **“Numerical simulation and prediction of cutting forces in five-axis milling processes with cutter run-out”**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 51, No. 10-11, pp. 806-815, 2011.
- Toh, C. K. **“Static and dynamic cutting force analysis when high speed rough milling hardened steel”**, Materials and Design, Vol. 25, pp. 41-50, 2004.

APÊNDICE

As Figuras A1 a A4 ilustram os gráficos das forças obtidos durante os ensaios de fresamento em função do ângulo de rotação da fresa.

(a) $a_e = 30$ mm; $a_p = 1$ mm.(b) $a_e = 30$ mm; $a_p = 2$ mm.(c) $a_e = 20$ mm; $a_p = 1$ mm.(d) $a_e = 20$ mm; $a_p = 2$ mm.Figura A1 – Corte discordante com $f = 1,2$ mm/volta.(a) $a_e = 30$ mm; $a_p = 1$ mm.(b) $a_e = 30$ mm; $a_p = 2$ mm.

(c) $a_e = 20$ mm; $a_p = 1$ mm.(d) $a_e = 20$ mm; $a_p = 2$ mm.Figura A2 – Corte concordante com $f = 1,2$ mm/volta.(a) $a_e = 30$ mm; $a_p = 1$ mm.(b) $a_e = 30$ mm; $a_p = 2$ mm.(c) $a_e = 20$ mm; $a_p = 1$ mm.(d) $a_e = 20$ mm; $a_p = 2$ mm.Figura A3 – Corte discordante com $f = 0,6$ mm/volta.

(a) $a_e = 30 \text{ mm}$; $a_p = 1 \text{ mm}$.(b) $a_e = 30 \text{ mm}$; $a_p = 2 \text{ mm}$.(c) $a_e = 20 \text{ mm}$; $a_p = 1 \text{ mm}$.(d) $a_e = 20 \text{ mm}$; $a_p = 2 \text{ mm}$.Figura A4 – Corte concordante com $f = 0,6 \text{ mm/volta}$.

A Tabela A1 mostra os valores de rugosidade obtidos na entrada e na saída dos passes efetuados.

Tabela A1 – Rugosidades obtidas durante os ensaios.

Passe	R_a [μm]		R_t [μm]	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
1	1,36	1,24	13,38	13,67
2	1,15	0,77	8,00	11,31
3	1,24	0,85	9,39	6,27
4	0,88	1,25	7,73	10,29
5	0,99	1,03	9,51	9,24
6	0,79	0,81	6,92	8,44
7	0,82	0,72	7,76	6,11
8	0,74	0,90	7,59	7,89
9	1,34	0,73	10,91	8,17
10	1,08	0,43	13,04	4,69
11	1,49	0,96	9,71	8,15
12	1,42	0,46	10,73	5,52
13	1,19	0,59	9,98	5,38
14	0,68	0,51	7,30	4,63
15	0,69	0,84	6,60	7,61
16	0,54	0,95	6,15	7,97

A Tabela A2 mostra a Análise de Variância (ANOVA) realizada para a rugosidade média (R_a). Na tabela, SQ é a soma dos quadrados, gdl é o número de graus de liberdade, MS é média dos quadrados, Fo é o valor observado da estatística de teste F, $f_{0,01}$ representa a probabilidade de se aceitar a hipótese nula em uma Distribuição F e Pr representa a probabilidade de se aceitar a hipótese alternativa.

Tabela A2 – Análise de Variância para R_a .

Causa de Variação	SQ	gdl	MS	Fo	$f_{0,01}$	Pr
Tipo de Corte (A)	0,4656	1	0,4656	4,8660	0,0424	95,76%
a_p (B)	0,2312	1	0,2312	2,4162	0,1396	86,04%
a_e (C)	0,0001	1	0,0001	0,0012	0,9731	2,69%
f (D)	0,0841	1	0,0841	0,8784	0,3626	63,74%
AB	0,0210	1	0,0210	0,2196	0,6457	35,43%
AC	0,0220	1	0,0220	0,2304	0,6377	36,23%
AD	0,0000	1	0,0000	0,0001	0,9910	0,90%
BC	0,0990	1	0,0990	1,0347	0,3242	67,58%
BD	0,0200	1	0,0200	0,2090	0,6537	34,63%
CD	0,0741	1	0,0741	0,7745	0,3918	60,82%
ABC	0,0040	1	0,0040	0,0423	0,8396	16,04%
ABD	0,0010	1	0,0010	0,0106	0,9193	8,07%
ACD	0,0098	1	0,0098	0,1024	0,7531	24,69%
BCD	0,0153	1	0,0153	0,1600	0,6944	30,56%
ABCD	0,0181	1	0,0181	0,1886	0,6699	33,01%
Resíduo (Erro)	1,5310	16	0,0957	---	---	---
Total	2,5964	31	---	---	---	---