

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

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NAS TENSÕES RESIDUAIS
GERADAS NA PEÇA TORNEADA DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 420C

por

Gustavo Correa Silva

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.

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NAS TENSÕES RESIDUAIS
GERADAS NA PEÇA TORNEADA DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 420C

por

Gustavo Correa Silva

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

Coorientador: M. Eng. Guilherme Cortelini da Rosa

Comissão de Avaliação:

Profa. Dra. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Prof. Dr. Rodrigo Rossi

Porto Alegre, 14 de novembro de 2013.

AGRADECIMENTOS

Em especial aos meus pais, Bernadete e João, por todo amor que tiveram e esforço que fizeram possibilitando uma excelente criação.

Ao meu irmão, André, por sempre acreditar no meu potencial e me incentivar a seguir em frente.

À minha namorada, Marcela, por todo apoio e carinho dado durante este período.

Aos amigos que contribuíram para chegar até este momento.

Ao professor André João de Souza pela sua orientação e disposição em ajudar compartilhando seu vasto conhecimento.

Ao doutorando e coorientador, Guilherme Cortelini da Rosa, por todo seu apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Usinagem (LAUS), Guilherme Vargas Schirmer, por sua participação principalmente durante o desenvolvimento experimental.

À empresa Aços Favorit, por ceder o material necessário para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), representado pelo professor Telmo Roberto Strohaecker, e pelo doutorando Rafael Menezes Nunes, pela execução das medições de tensões residuais.

SILVA, G. C **Estudo da influência dos parâmetros de usinagem nas tensões residuais geradas na peça torneada de aço inoxidável AISI 420C**. 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

Atualmente há uma busca por produção sem desperdícios e, além disso, com custo reduzido. Em algumas situações, as tensões residuais geradas em processos de usinagem por fatores térmicos e/ou mecânicos podem comprometer o desempenho do produto final. Dessa forma, o conhecimento das tensões residuais geradas em função dos parâmetros envolvidos no processo torna-se importante, motivando assim o presente trabalho. Foi feito um estudo do torneamento em aço inoxidável martensítico AISI 420C considerando como variáveis independentes de entrada duas profundidades de corte, dois avanços, duas durezas do material e a presença ou não de meio lubrificante. Em adição, foram medidas, como variáveis dependentes de saída, as componentes ortogonais da força de usinagem (passiva, corte e avanço) via sistema de aquisição de sinais, as rugosidades média e total via rugosímetro portátil e as tensões residuais em certas situações via difratômetro de raios-X. Com isso foi feito um estudo de modo a se analisar a presença ou não de correlação das variáveis independentes e/ou dependentes com as tensões residuais geradas na peça. Foi possível verificar que, mantendo os mesmos parâmetros de usinagem, a tensão residual aumentou para as amostras endurecidas. O mesmo não se pôde afirmar para as forças de usinagem que tem influência principalmente pelo aumento do avanço. Além disso, verificou-se que com o aumento do avanço, aumentaram tanto a rugosidade média como a total.

PALAVRAS-CHAVE: tensões residuais, rugosidade, forças de usinagem, torneamento.

SILVA, G. C. **Study of the influence of machining parameters on the residual stresses generated in the turned part stainless steel AISI 420C.** 2013. 25p. Monograph (Undergraduate Final Project in Mechanical Engineering) – Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

Currently there is a search for producing with no waste and, in addition, with reduced cost. In some situations, residual stresses generated in machining process by thermal and/or mechanical factors performance can compromise the final product. Thus, the knowledge of the residual stresses generated in function of the parameters involved in the process becomes important, thus motivating the present work. So was done a study of machining process with martensitic stainless steel AISI 420C considering like input independent variables: two depths of cut, two feed rates, two material hardnesses, and the presence or absence of cutting fluid. In addition, the output dependent variables were measured: the orthogonal components of the machining force (passive force, cutting force and feed force) via signal acquisition system, the average and total roughness via portable rugosimeter, and the residual stresses in certain situations via X-ray diffractometer. So was made a study in order to analyze the presence or absence of correlation of the independent and/or dependent variables with the residual stresses generated in the workpiece. It was possible to verify that, keeping the same parameters of machining, the residual stress in the hardened samples increased. Could not be seen the same for the machining forces that are influenced mainly by the increase of the feed rate. Furthermore, it was found that with the rise of the feed rate, increased the average and the total roughness.

KEYWORDS: residual stresses, roughness, machining forces, turning.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS	1
2.1	Geral.....	1
2.2	Específico	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3.1	Aço Inoxidável AISI 420C	1
3.2	Torneamento	2
3.3	Forças de Usinagem.....	2
3.4	Rugosidade Superficial	4
3.5	Tensões Residuais	4
4	METODOLOGIA.....	4
4.1	Corpo de Prova.....	5
4.2	Ferramenta de Corte.....	5
4.3	Parâmetros de Corte.....	6
4.4	Aquisição de Dados	6
4.4.1	Forças.....	6
4.4.2	Rugosidades	7
4.4.3	Tensões Residuais.....	8
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	8
5.1	Forças de Usinagem.....	8
5.1.1	Componentes Ortogonais Estáticas	9
5.1.2	Componentes Ortogonais Dinâmicas	10
5.2	Rugosidades Superficiais.....	11
5.3	Tensões Residuais	12
6	CONCLUSÕES.....	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
	APÊNDICE.....	16

1 INTRODUÇÃO

O processo de usinagem é o processo de fabricação mais utilizado no mundo. Conforme Souza, 2011, processos de usinagem envolvem operações de corte que permitem remover excessos de um material bruto com auxílio de uma ferramenta até que este resulte em uma peça pronta que, por sua vez, fará parte de bens duráveis. Desta remoção do material excedente surge o chamado cavaco. O processo de usinagem conta com diversos parâmetros de entrada e saída, entre os principais parâmetros de entrada consideram-se a profundidade de corte (a_p), avanço (f) e velocidade de corte (v_c). Já entre os principais parâmetros de saída vale citar força de usinagem, rugosidade superficial e tensões residuais.

Com uma busca constante por melhor de qualidade dos produtos e redução de custos, o conhecimento da melhor utilização destes parâmetros tem se tornado fundamental. A correta combinação dos parâmetros de usinagem pode trazer benefícios tanto para o produto final, melhorando a parte dimensional, rugosidade superficial e condições de tensões residuais, como para a máquina-ferramenta, pois reduzindo as forças de usinagem, por exemplo, os esforços durante a usinagem reduzir-se-ão.

Operações de usinagem tais como torneamento, fresamento, furacão e retificação podem introduzir tensões residuais trativas ou compressivas, dependendo do material e das condições de corte tais como velocidade de corte, meio lubrificante e ferramenta utilizados. Estas tensões residuais têm sua origem na pressão exercida pela ferramenta e no aquecimento localizado, que gera tensões residuais [Soares, 1998].

O presente trabalho analisa combinações destes parâmetros para o aço inoxidável martensítico AISI 420C que, devido a suas características, é um dos aços inoxidáveis mais encontrados no mercado. Este aço é geralmente utilizado na fabricação de peças onde há necessidade de alta resistência mecânica aliada à ductilidade e resistência à corrosão e ao desgaste, tais como, moldes de injeção de plásticos, instrumentos cirúrgicos e dentários, lâminas de corte, válvulas para água e vapor, turbinas a gás, engrenagens, eixos etc.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Estudar a influência dos parâmetros de usinagem nas tensões residuais geradas na peça torneada de aço inoxidável AISI 420C.

2.2 Específico

Correlacionar as forças de usinagem geradas no processo de torneamento longitudinal externo do aço inoxidável martensítico AISI 420C com o acabamento (textura e integridade) da superfície usinada gerado em quatro corpos de prova com duas durezas distintas no corte a seco e com fluido lubrificante.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aço Inoxidável AISI 420C

O AISI 420C é um aço ligado ao cromo, inoxidável, martensítico, temperável, magnético, com alta resistência mecânica até a temperatura de 400°C e boa resistência à oxidação até a temperatura de 610°C. No estado temperado e revenido, apresenta maior resistência à corrosão, podendo alcançar dureza de até 55 HRc. Não apresenta boa conformabilidade a frio, sendo necessário um preaquecimento entre 200 e 400°C. A resistência à oxidação pode ser melhorada mediante a utilização de superfícies limpas e polidas, sendo necessário, portanto, a remoção de carepas formadas nas operações de soldagens,

tratamentos térmicos, ou conformações a quente. Deve-se evitar revenimento na faixa de temperatura entre 425 e 525°C, onde ocorre a fragilização do material [Favorit, 2012]. A Tabela 3.1 mostra sua composição química dada em percentual de massa presente no aço.

Tabela 3.1 – Composição Química do aço AISI 420 C [Favorit, 2012].

Elemento	C	Cr	Mn (Máx)	P (Máx)	S (Máx)	Si (Máx)
Massa [%]	0,30 ~ 0,42	12,0 ~ 14,5	1,00	0,04	0,03	1,00

3.2 Torneamento

O torneamento é um processo industrial muito utilizado pela indústria mecânica por causa do grande número de formas geométricas que pode gerar em suas diferentes operações, além de sua alta taxa de remoção de material [Souza, 2011].

Segundo Ferraresi, 1970, o torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo.

Além disso, conforme Machado *et al.*, 2011, o torneamento, assim como todas as outras operações de usinagem, podem ser subdivididas em desbaste e acabamento. No desbaste, a principal preocupação é garantir elevada taxa de remoção de material, sendo, portanto, limitado pela potência da máquina-ferramenta. No acabamento, quando o sobremetal deixado pela operação de desbaste é removido, a qualidade final do componente é prioritária.

O processo de torneamento pode ter várias operações de corte. Para o trabalho utilizou-se o torneamento longitudinal externo no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea e paralela ao eixo principal de rotação da máquina [Ferraresi, 1970]. Uma representação desta operação é ilustrada na Figura 3.1.

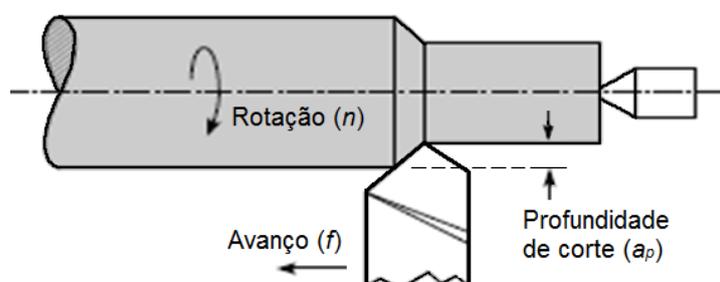


Figura 3.1 – Torneamento Longitudinal Externo.

3.3 Forças de Usinagem

É importante o conhecimento da força que age sobre a ferramenta de corte em um processo de torneamento, uma vez que este possibilita, dentre outros aspectos: estimar a potência necessária para o corte, avaliar as forças atuantes nos componentes mecânicos da máquina-ferramenta, estabelecer uma correlação com o desgaste das ferramentas. Todas essas variáveis podem impactar no custo de produção [Machado, *et al.*, 2011].

A força de usinagem é a força total que atua sobre uma cunha cortante durante a usinagem sendo que, para um melhor entendimento, ela deve ter suas componentes dispostas em eixos ortogonais. A Figura 3.2 mostra a decomposição das forças nos eixos principais.

As componentes ortogonais da força de usinagem (F) mostradas na Figura 3.2 correspondem a: força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p). F_c é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de

corte. F_f é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção do avanço, dada pela velocidade de avanço. Já F_p é a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho [Machado *et al.*, 2011].

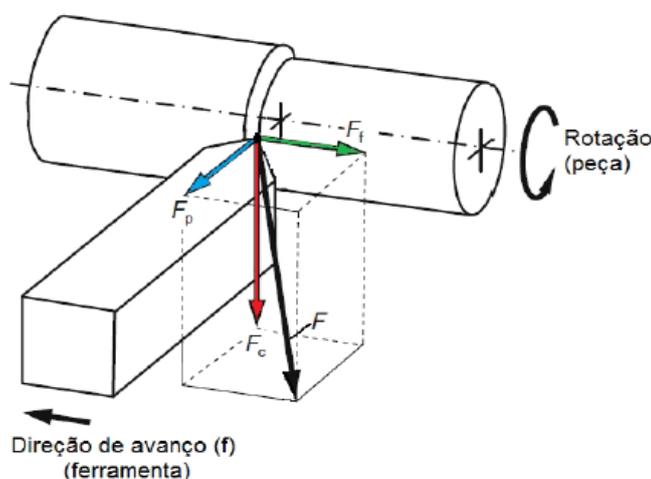


Figura 3.2 – Componentes da força de usinagem [adaptado de Machado *et al.*, 2011].

A força de corte (F_c) pode ainda ser definida pela Equação 3.1 [Ferraresi, 1970]:

$$F_c = K_s \cdot A = K_s \cdot a_p \cdot f \quad (3.1)$$

K_s é a pressão específica de corte e A é a área da seção transversal de corte (esta definida pelo produto entre a profundidade de corte, a_p [mm] e o avanço por volta, f [mm/volta]).

Da Equação 3.1 pode-se fazer uma analogia entre a_p , f e F_c . Segundo Diniz *et al.*, 2010, o aumento de f gera uma diminuição de K_s . Isto ocorre, pois com o crescimento de f , a velocidade de avanço ($v_f = f \cdot n$) aumenta e, conseqüentemente, o coeficiente de atrito diminui, pois o corte se torna mais dinâmico. Já o aumento de a_p praticamente não altera o valor de K_s , a não ser para pequenos valores, pois o crescimento de a_p só faz aumentar o comprimento de contato ferramenta-peça, sem que haja um aumento nas velocidades envolvidas. Com isso, pode-se dizer que o crescimento de F_c é diretamente proporcional ao de a_p ; quando f cresce, F_c não cresce na mesma proporção, já que ocorre uma diminuição do valor de K_s .

De acordo com Ferraresi, 1970, o fenômeno da formação do cavaco, nas condições normais de trabalho com ferramenta de metal duro é um fenômeno periódico – inclusive a formação do cavaco contínuo. Tem-se alternadamente uma fase de recalque e uma fase de escorregamento, para cada pequena porção de material removido. Na medida dinâmica das componentes da força de usinagem aparece na sua reprodução este fenômeno transitório, que se repete constantemente em cada ciclo da força de corte pulsante. Quanto maior o grau de recalque (razão entre a espessura do cavaco e a espessura de corte) maior será a deformação permanente do material (ε). A dependência do valor de K_s com a resistência mecânica do material pode ser explicada pela relação aproximada com a tensão de cisalhamento na ruptura do material (τ_r) e o grau de recalque (R_c), Equação 3.2 [Ferraresi, 1970]:

$$K_s \approx \tau_r \cdot R_c \quad (3.2)$$

No corte tridimensional, que constitui a maioria dos casos na prática, deve ser levada em conta a influência da aresta lateral de corte sobre a aresta principal, a influência do arredondamento da ponta da aresta cortante e a influência do atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta. Geralmente tomam-se na prática relações $a_p / f > 5$, de maneira que a influência da aresta lateral de corte sobre a aresta principal seja pequena [Ferraresi, 1970].

3.4 Rugosidade Superficial

Com o avanço da tecnologia dos processos de usinagem e com produtos que requerem cada vez mais precisão dimensional, a necessidade de se conhecer a rugosidade superficial tem se tornado cada vez mais alta. Isto se aplica principalmente para casos nos quais a precisão dimensional não consegue ser atendida. Normalmente não é possível fazer uma avaliação visual, sendo que a mesma deve ser feita com um rugosímetro.

Segundo Machado *et al.*, 2011, em muitos casos a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controlar determinado processo de usinagem. A rugosidade é um parâmetro especificado de acordo com a aplicação da superfície usinada. Uma rugosidade “baixa” é requerida, por exemplo, por superfícies de mancais ou superfícies que servirão de escoamento para fluidos ou gases. Já superfícies que trabalham sob lubrificação requerem uma rugosidade “alta”. Ademais, a rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte. Sendo assim, qualquer interferência, por menor que seja, poderia interferir nos resultados.

Os parâmetros utilizados para estudo da rugosidade superficial são a rugosidade média (R_a) e a rugosidade total (R_t). O primeiro representa a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de medição. O segundo indica a soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de medição.

3.5 Tensões Residuais

Tensões residuais são as tensões existentes em um corpo sólido sem a aplicação de forças externas ou gradientes térmicos. O valor máximo em módulo que as tensões residuais poderão chegar é o próprio limite de escoamento. Estas tensões são originadas sempre que o componente sofre deformação plástica localizada ou deformação elástica não homogênea [Fry, 2000, *apud* Martins *et al.*, 2004].

As tensões residuais representam um dos principais potenciais para empenamentos e mudanças dimensionais em componentes mecânicos durante a fabricação [Rocha *et al.*, 2009].

Conforme Thoben *et al.*, 2002, *apud* Martins *et al.*, 2004, as tensões residuais podem melhorar o desempenho dos materiais frente as agressividades do meio externo e reduzir as falhas por fadiga. Porém, em fabricação, as tensões residuais podem gerar distorções no componente, tornando necessária a introdução de uma etapa posterior de processamento da peça, elevando o custo do processo. A distribuição de tensões residuais presentes em determinado componente é devido à superposição das tensões residuais desenvolvidas durante o processo de usinagem por influência de:

- fatores térmicos: aquecimento superficial devido ao atrito com a ferramenta de corte durante o processo de usinagem;
- fatores mecânicos: relaxação de tensão causada pela remoção de material e introdução de tensões originadas pela ocorrência de deformação plástica localizada na superfície durante o processo de usinagem;
- tensões residuais pré-existentes no componente, decorrentes da etapa anterior do processo.

Matsumoto, *et al.*, 1986, afirmam que dependendo da dureza do componente, a usinagem pode gerar tensões residuais de compressão ou de tração. Para aços de baixa dureza a tensão residual na superfície é de tração enquanto que, para aços de alta dureza, a tensão residual é de compressão.

4 METODOLOGIA

A operação de usinagem caracteriza-se pelo torneamento longitudinal externo de 16 amostras de aço inoxidável martensítico AISI 420C com ferramenta de metal duro utilizando um torno CNC (*Computer Numeric Control*) Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II conforme mostra a Figura 4.1.



Figura 4.1 – Torno CNC Mazak QTN 100-II.

4.1 Corpo de Prova

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram usados quatro corpos de prova de aço inoxidável martensítico AISI 420C, dois com dureza 218,0 HB e dois com dureza 273,5 HB. A Figura 4.2 mostra o desenho esquemático e as dimensões do corpo de prova.

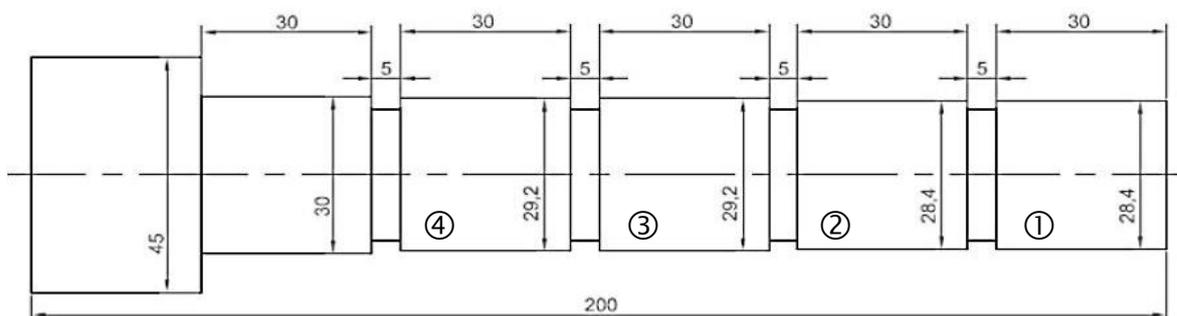


Figura 4.2 – Dimensões do corpo de prova [mm].

Esta configuração tem por objetivo facilitar a combinação de diferentes parâmetros de usinagem em quatro amostras de 30 mm de comprimento em um mesmo corpo de prova (①, ②, ③, ④). Inicialmente os corpos de prova foram usinados até um diâmetro de 30 mm para que fosse possível garantir a cilindricidade homogênea ao longo de toda superfície. Além disso, foram feitos quatro sulcos de 5 mm de largura com o intuito de separar cada um dos parâmetros utilizados.

4.2 Ferramenta de Corte

Para a realização da usinagem das amostras foram utilizados insertos de metal duro Sandvik Coromant com formato triangular básico negativo (T-Max P), raio de ponta $r_f = 0,4$ mm e quebra-cavacos para torneamento de acabamento (PF), além de cobertura MTCVD (*Medium Temperature Chemical Vapor Deposition*) de TiCN / Al₂O₃ / TiN (GC4215). A Figura 4.3 ilustra a forma geométrica do inserto utilizado.

O sistema de fixação do inserto no suporte é do tipo cunha-grampo para minimizar as vibrações. O suporte MTJNL 2020K utilizado possui ângulo de posição $\chi_r = 93^\circ$.

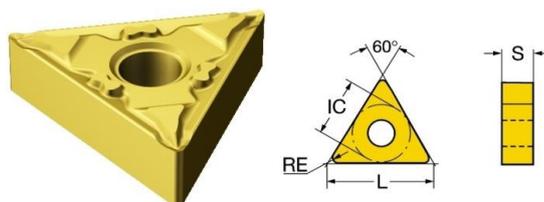


Figura 4.3 – Inseto Sandvik Coromant TNMG 160404-PF [Sandvik, 2012].

4.3 Parâmetros de Corte

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi estudado o comportamento das amostras ao se realizar o torneamento longitudinal externo com as combinações mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Combinações de parâmetros e amostras correspondentes (vide Fig. 4.2).

Amostra	a_p [mm]	f [mm/volta]
①	0,8	0,1
②	0,8	0,2
③	0,4	0,1
④	0,4	0,2

A velocidade de corte foi mantida constante em $v_c = 180$ m/min. Os parâmetros da Tabela 4.2 foram estabelecidos com base nos dados recomendados pelo fabricante. Além destes parâmetros de corte serão considerados como parâmetros de usinagem: sem e com fluido lubrificante (SF e CF); sem e com tratamento térmico nas amostras (ST e CT). Com isso, foi gerado um total de $2^4 = 16$ amostras.

4.4 Aquisição de Dados

4.4.1 Forças

A aquisição de sinais de força para as dezesseis amostras torneadas foi feita utilizando um dinamômetro piezométrico Kistler modelo 9129A (Fig. 4.4). Observa-se na figura 4.4(a) que as componentes ortogonais da força de usinagem – força passiva F_p , força de corte F_c e força de avanço F_f – são representadas, respectivamente, pelos eixos X, Y e Z da plataforma. Na figura 4.4 (b) é possível visualizar que foi necessário fazer uma adaptação (tubo azul) para a utilização do fluido lubrificante após a instalação da plataforma piezométrica.

Além do dinamômetro, o sistema de monitoramento e aquisição de sinais de força é composto por um condicionador de sinais, uma placa de aquisição de dados e um software específico. O condicionamento de sinais (amplificação e filtragem) foi feito utilizando um condicionador Kistler modelo 5070A10100. Este equipamento possui quatro canais e uma faixa de medição por canal de ± 200 a 200000 pC (Fig. 4.5).

Já o processamento dos sinais de força foi feito utilizando o software LabView 8.6. Utilizou-se uma VI (*Virtual Instrument*) específica para tal desenvolvida no Laboratório de Usinagem da UFRGS. Para todos os sinais de força (F_x , F_y , F_z) fez-se a aquisição a uma taxa de 1 kS/s, ou seja, 1000 pontos por segundo. O número de pontos para cada amostra varia de acordo com seu tempo de corte t_c [s] e este é dado pela Equação 4.1 [Ferraresi, 1970].

$$t_c = \frac{60 \cdot L_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot v_c} \text{ [min]} \quad (4.1)$$

onde L_f [mm] é o percurso de avanço e d [mm] é o diâmetro usinado do corpo de prova.

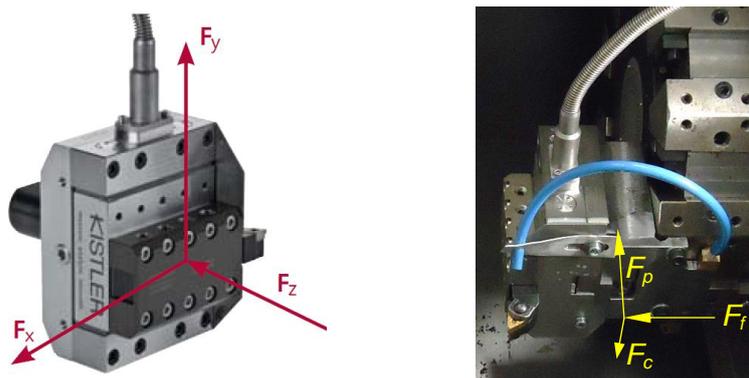


Figura 4.4 – Dinamômetro piezelétrico Kistler modelo 9129A: (a) esquema das forças [Kistler, 2009]; (b) sistema instalado no torno CNC Mazak.



Figura 4.5 – Elementos constituintes do sistema de monitoramento de sinais de força.

Sendo assim, como as quatro amostras apresentam diferentes combinações de profundidade de corte (a_p) e avanço (f), existem tempos de corte distintos para cada amostra. Isso fez com que houvesse um número de pontos igualmente diferente para cada amostra.

A análise (pós-processamento) dos dados foi feita utilizando o software Excel.

4.4.2 Rugosidades

As rugosidades média (R_a) e total (R_t) foram medidas com um rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201. Este equipamento possui resolução de $0,01 \mu\text{m}$.

Para que fosse possível realizar as medições de rugosidades, as peças foram retiradas do torno e fixadas em uma base magnética de modo a diminuir qualquer possível interferência durante as medições (Fig. 4.6). Para melhor avaliação dos resultados, as rugosidades foram medidas em três pontos aproximadamente equidistantes de 120° ao longo da circunferência.



Figura 4.6 – Medição de rugosidade utilizando o rugosímetro SJ-201.

4.4.3 Tensões Residuais

Inicialmente, tinha-se a proposta de medir as tensões residuais nas 16 amostras usinadas. Entretanto, por questões de disponibilidade de utilização do difratômetro, foi possível medir apenas oito. Escolheram-se para medir as tensões residuais as amostras que possuíam os parâmetros extremos, isto é, a combinação do máximo avanço com máxima profundidade de corte (Amostra ②) e a combinação do mínimo avanço com mínima profundidade de corte (Amostra ③) – vide Tabela 4.2. Estas foram escolhidas, pois se espera que, com esses parâmetros, sejam obtidos os resultados mais extremos.

O equipamento utilizado para medir as tensões residuais é o difratômetro Seifert Charon XRD M (Fig. 4.7) presente no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS.



Figura 4.7 – Difratômetro Seifert Charon XRD M – Research Edition [GE Measurement & Control, 2012].

O difratômetro é equipado com tubos de Raios-X de Cr-K α com abertura primária de 1 mm de diâmetro. Para cada amostra foram medidos três pontos com distância de 3 mm entre cada ponto. As linhas de difração do Fe- α foram registradas para 19 ângulos de inclinação na faixa de $+45^\circ < \theta < -45^\circ$. As tensões residuais foram calculadas usando o método de $\sin^2 \psi$ com módulo de elasticidade $E = 210$ GPa e coeficiente de Poisson $\nu = 0,28$.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados foram analisados avaliando a influência dos parâmetros de usinagem nas tensões residuais geradas no torneamento das amostras. Os primeiros dados analisados foram as componentes ortogonais da força de usinagem e as rugosidades (média, R_a e total, R_t) superficiais. Posteriormente, foi feita uma análise dos resultados de tensões avaliando sua alteração tanto para os parâmetros de entrada, como para os parâmetros de saída medidos.

5.1 Forças de Usinagem

A Tabela 5.1 mostra os resultados obtidos para as componentes ortogonais (força passiva F_p , de corte F_c e de avanço F_f) da força de usinagem. São apresentados os resultados das forças estáticas, isto é, a média de todos os pontos no seu determinado intervalo de tempo, e as forças dinâmicas, $\pm \Delta F$, com confiança de 95%, ou seja, 95% dos pontos medidos estão dentro do intervalo de $F - \Delta F$ a $F + \Delta F$. Na tabela é possível visualizar a variação da força de usinagem conforme se alteram os parâmetros de entrada do processo.

Tabela 5.1 – Componentes ortogonais da força de usinagem estáticas (F) e dinâmicas ($\pm \Delta F$): incerteza expandida com 95% de confiança.

Fluido	Tratamento	Amostras	F_p [N]	$\pm \Delta F_p$ [N]	F_c [N]	$\pm \Delta F_c$ [N]	F_f [N]	$\pm \Delta F_f$ [N]
SF	ST	1	70,2	35,2	232,6	27,9	156,4	34,2
		2	137,2	145,6	397,7	74,5	197,9	112,8
		3	80,8	78,1	121,4	27,0	70,6	46,2
		4	131,5	138,7	208,0	35,1	103,5	103,9
CF		1	70,3	35,5	242,9	23,1	159,3	28,7
		2	132,1	137,3	428,5	81,3	215,2	117,8
		3	75,3	56,7	142,7	24,8	84,3	38,0
		4	175,8	279,5	235,9	70,1	124,2	117,9
SF	CT	1	68,5	11,7	248,0	23,1	174,4	18,1
		2	114,6	78,2	439,5	132,2	228,1	77,0
		3	72,7	10,7	149,4	31,8	93,9	11,9
		4	100,5	22,6	245,5	81,3	106,8	32,9
CF		1	69,2	12,9	248,5	34,1	164,3	20,2
		2	108,3	68,6	431,0	115,8	209,9	64,0
		3	70,8	9,8	149,3	32,0	89,0	21,3
		4	100,6	21,9	244,5	75,0	103,2	35,3

5.1.1 Componentes Ortogonais Estáticas

Para a análise das parcelas estáticas, foi calculada a média quadrática ou RMS (*Root Mean Square*) dos pontos coletados durante o seu tempo de corte, variável para cada amostra. Assim, pode-se dizer que para amostras com $f = 0,1$ mm/volta foram coletados cerca de 8000 pontos, isto é, seu tempo de corte foi em torno de 8 s; já para as amostras com $f = 0,2$ mm/volta foram obtidos, em média, 4000 pontos, com aproximadamente 4 s de usinagem.

A Figura 5.1 mostra o comportamento das componentes estáticas da força de usinagem para as 16 amostras analisadas. Para visualizar os gráficos com todos os dados e com o tempo de corte correspondente, vide apêndice. Da análise da figura é possível visualizar a influência dos parâmetros de entrada nas componentes ortogonais da força de usinagem.

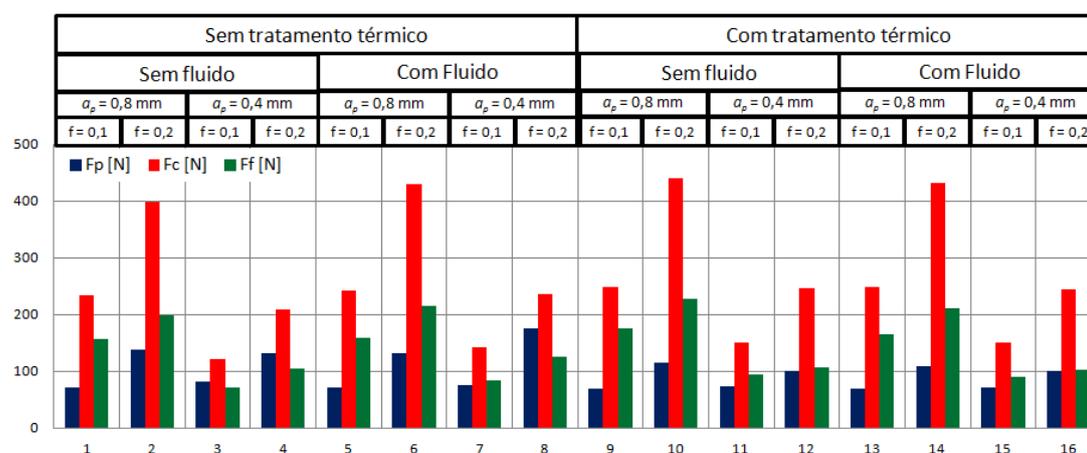


Figura 5.1 – Parcelas estáticas das componentes ortogonais da força de usinagem calculadas a partir da média RMS (onde f [mm/volta]).

Nota-se na figura que, para o aumento da profundidade de corte (a_p) e do avanço (f) ocorre um aumento significativo (até 72% entre amostras 3 e 4) principalmente na força de

cutagem (F_c). Conforme citado no item 3.2 F_c se altera proporcionalmente à mudança da profundidade de corte (a_p), por outro lado, o mesmo não ocorre modificando o avanço já que este causa também uma modificação na pressão específica de corte, K_s . Além disso, é possível verificar que, em geral, o tratamento térmico do material acarreta pequeno aumento (em média 7%) nas componentes ortogonais estáticas da força de usinagem. Já a adição do fluido lubrificante faz com que haja um aumento da força para as amostras com material mais dúctil. Isto pode ser explicado pelo fato de que o aço inoxidável martensítico tem a capacidade de endurecer ao ser resfriado rapidamente a partir de temperaturas elevadas (transformações martensíticas obtidas por têmpera). Esse fenômeno faz com que ocorra uma têmpera localizada dificultando o corte e aumentando os esforços envolvidos. Isto vai ao encontro dos dados obtidos, já que, para as amostras com material temperado não é possível observar diferença significativa entre as amostras com e sem utilização do meio lubrificante.

5.1.2 Componentes Ortogonais Dinâmicas

A principal informação que pode ser retirada das parcelas dinâmicas das forças é a vibração da ferramenta de corte durante o processo de torneamento. A Figura 5.2 mostra o comportamento das componentes ortogonais dinâmicas perante as modificações dos parâmetros de entrada do processo.

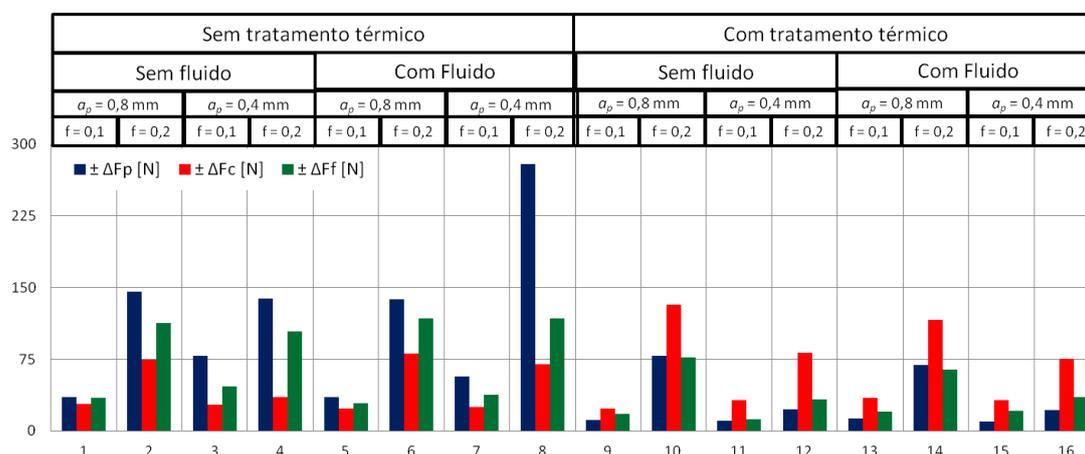


Figura 5.2 – Parcelas dinâmicas das componentes ortogonais da força de usinagem calculadas com 95% de confiança (onde f [mm/volta]).

De acordo com a figura, é possível visualizar que a vibração aumenta quando temos um avanço maior. Outro dado constatado foi que com o tratamento térmico (aumento da dureza do corpo de prova) houve uma diminuição na força passiva (F_p) e na força de avanço (F_f). Entretanto, a força de corte (F_c) aumentou com o aumento da dureza do material. Durante o processo de usinagem longitudinal ocorre uma tendência do material a flexionar devido às forças envolvidas no processo. Isso explica o fato de se obter maiores vibrações em F_p e F_f para o material sem tratamento térmico. O mesmo não ocorre para a F_c , pois segundo Machado, *et al*, 2011, quando a dureza da peça cresce, K_s também cresce. Sendo assim, o tratamento térmico faz com que ocorra um aumento da F_c .

Também é possível notar que a amostra 8 [$a_p = 0,4$ mm, $f = 0,2$ mm/volta, sem tratamento térmico (ST) e com fluido lubrificante (CF)] possui uma F_p muito maior que as demais. Isto ocorre devido a uma combinação de fatores. A hipótese para isso envolve a dificuldade de quebra do cavaco para uma razão $a_p / f = 2 < 5$ (influência da aresta lateral de corte e do arredondamento da ponta da aresta cortante) somada ao uso de fluido lubrificante que afeta o fenômeno alternado de formação do cavaco – recalque (alteração de tensões e deformações com variação da temperatura) e escorregamento (modificação do coeficiente de atrito entre a peça e a o flanco da ferramenta). Isto promove uma reação pulsante de alta amplitude na parcela de penetração (ou passiva) da força de usinagem.

5.2 Rugosidades Superficiais

As rugosidades média (R_a) e total (R_t) foram medidas com três repetições em cada amostra. A Figura 5.3 mostra os resultados obtidos.

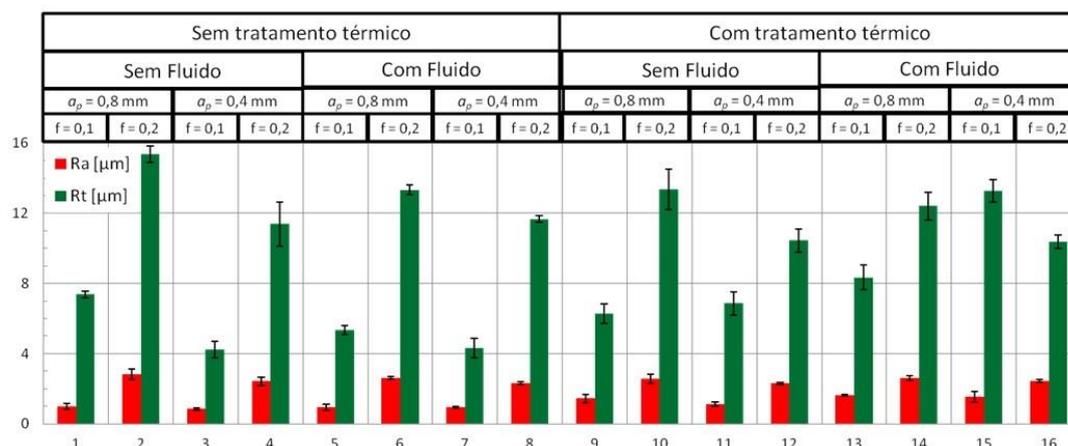


Figura 5.3 – Média das medidas das rugosidades superficiais: média (R_a) e total (R_t).

Na comparação das amostras sem e com tratamento térmico (ST e CT), observa-se que as amostras que apresentaram melhores resultados tanto para R_a como para R_t foram as ST, com avanço $f = 0,1$ mm/volta e profundidade de corte $a_p = 0,4$ mm. A média de R_a e R_t para essas condições foram, respectivamente, $0,93 \mu\text{m}$ e $5,31 \mu\text{m}$. Já para as amostras CT e com os mesmos parâmetros, os melhores resultados foram $1,10 \mu\text{m}$ e $6,28 \mu\text{m}$ respectivamente.

Na comparação das amostras sem e com fluido lubrificante (SF e CF), observa-se que a adição do fluido lubrificante gerou pequena alteração para as amostras sem tratamento térmico. Isto é, com a adição do meio lubrificante houve uma redução de 4% nos valores de R_a e 10% para os valores de R_t (SF, média de $R_a = 1,77 \mu\text{m}$ e $R_t = 9,59 \mu\text{m}$, já para amostras CF, média de $R_a = 1,70 \mu\text{m}$ e $R_t = 8,67 \mu\text{m}$). Já para as amostras endurecidas, a adição do fluido fez com que houvesse um incremento das rugosidades R_a e R_t para $f = 0,1$ mm/volta, ou seja, em média tinham-se $1,27 \mu\text{m}$ e $6,57 \mu\text{m}$, com a adição do fluido as médias passaram a ser $1,58 \mu\text{m}$ e $10,81 \mu\text{m}$ respectivamente. Entretanto, adicionar meio lubrificante praticamente não gerou alterações para as amostras com $f = 0,2$ mm/volta. Os valores de R_a e R_t mudaram de $2,42 \mu\text{m}$ e $11,90 \mu\text{m}$ para $2,52 \mu\text{m}$ e $11,39 \mu\text{m}$ respectivamente.

O avanço (f) é o parâmetro de maior influência principalmente para as amostras sem tratamento térmico. Conforme Machado, *et al*, 2011, as condições de usinagem tem grande efeito sobre a rugosidade, sendo o avanço o parâmetro mais influente, seguido pelo raio de ponta da ferramenta (r_e). Isto pode ser visto pelo fato que nas amostras com $f = 0,1$ mm/volta têm-se, em média, $R_a = 1,18 \mu\text{m}$ e $R_t = 7,00 \mu\text{m}$, já para as amostras com $f = 0,2$ mm/volta as médias obtidas foram $R_a = 2,51 \mu\text{m}$ e $R_t = 12,29 \mu\text{m}$.

O aumento de a_p também gera, em geral, um aumento de R_a e R_t ; isto ocorre porque a_p aumenta as componentes da força de usinagem e, portanto, as possibilidades de flexões e, por conseguinte, o aumento da textura. Com $a_p = 0,4$ mm obteve-se $R_a = 1,74 \mu\text{m}$ e $R_t = 9,07 \mu\text{m}$; já com $a_p = 0,8$ mm os valores médios cresceram para $R_a = 1,95 \mu\text{m}$ e $R_t = 10,23 \mu\text{m}$.

A Figura 5.4 mostra as componentes ortogonais estáticas da força de usinagem em função das rugosidades R_a e R_t . Nota-se, nas amostras com avanço (f) igual à $0,2$ mm/volta (n^{os} pares) que, para um maior avanço, ocorre um aumento da componente estática passiva (F_p) e nas rugosidades R_a e R_t . Com isso, é possível verificar uma possível correlação entre F_p e as rugosidades R_a e R_t . Isto vai ao encontro da afirmação feita anteriormente de que o parâmetro de maior influência para as rugosidades é o f . No entanto, isso não se confirma para todas as situações de força e rugosidade e as suas correlações com os parâmetros de entrada.

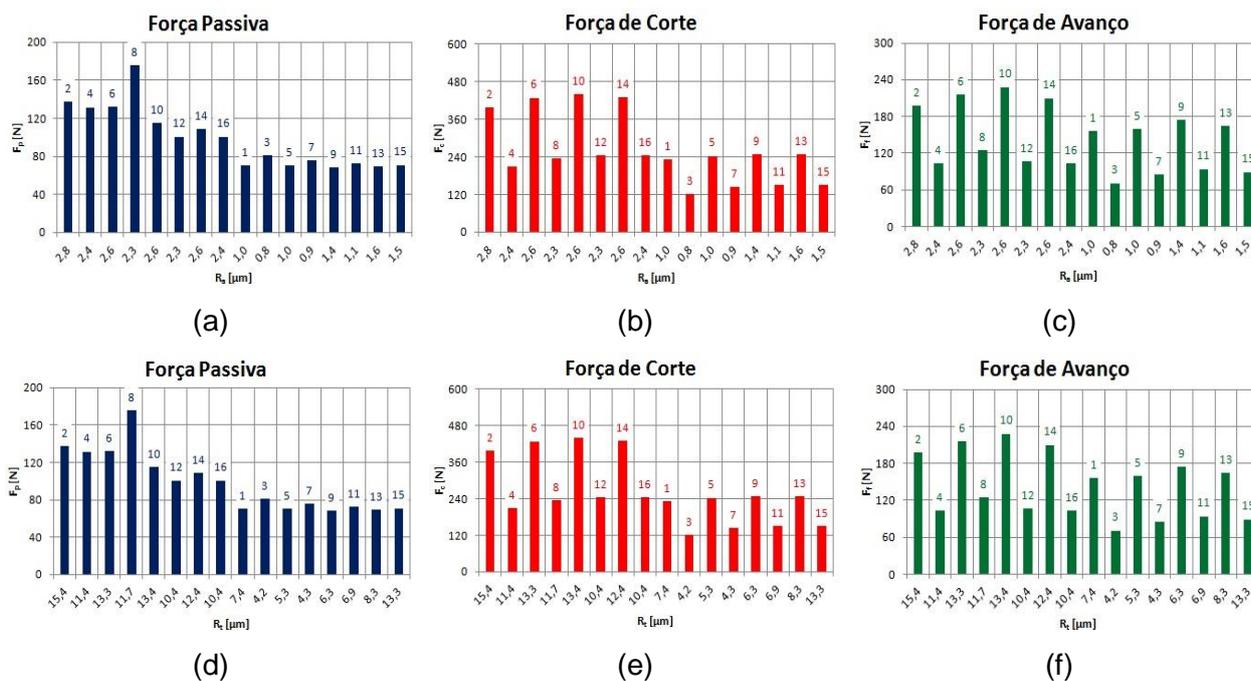


Figura 5.4 – Parcelas estáticas (RMS) das componentes ortogonais da força de usinagem em função das rugosidades R_a e R_t para as 16 situações descritas.

R_a : (a) F_p , (b) F_c , (c) F_f ; e R_t : (d) F_p , (e) F_c , (f) F_f .

A Figura 5.5 evidencia o que foi citado anteriormente mostrando o avanço como principal modificador das rugosidades média (R_a) e total (R_t). Por outro lado, a utilização do fluido lubrificante-refrigerante foi o parâmetro com menor influência nos resultados das rugosidades.

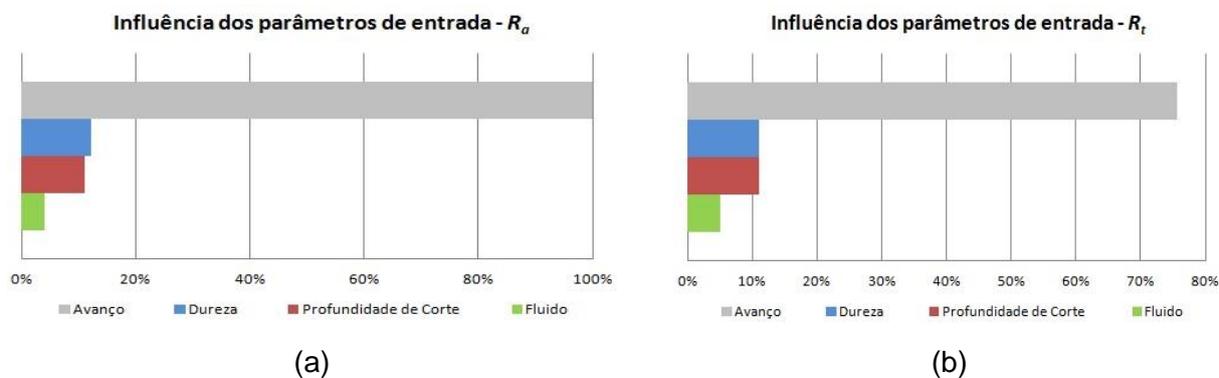


Figura 5.5 – Percentual de influência das variáveis de entrada nas rugosidades (a) R_a e (b) R_t .

5.3 Tensões Residuais

Conforme citado no item 4.4.3 a ideia inicial do trabalho era medir as tensões residuais para todas as amostras, como fora feito para as componentes da força de usinagem e das rugosidades superficial. Como isso não foi possível escolheu-se uma combinação de parâmetros capaz de abordar os extremos (amostras ② e ③ de cada corpo de prova).

A Figura 5.6 mostra os resultados obtidos para os parâmetros selecionados. Observa-se que as tensões residuais são superficiais e todas trativas. Novamente os parâmetros de usinagem profundidade de corte (a_p) e avanço (f) foram determinantes para alterações do parâmetro de saída. Para maiores valores de a_p e f foram obtidas maiores tensões residuais.

É possível notar na Figura 5.6 que, quando se tem a utilização do fluido lubrificante-refrigerante, a diferença entre as tensões residuais é menor quando são comparados *desbaste* e *acabamento*. Isto ocorre porque a presença do lubrificante-refrigerante fez com que

diminuísem as tensões residuais para as amostras com parâmetros de *desbaste* (2, 6, 10, 14). Entretanto, para parâmetros de *acabamento* (3, 7, 11, 15), o fluido lubrificante acabou aumentando as tensões residuais. Sem a presença de fluido a diferença entre as tensões residuais com parâmetros de desbaste e acabamento chega até 49%. Já para as amostras com fluido, a diferença cai para apenas 17%.

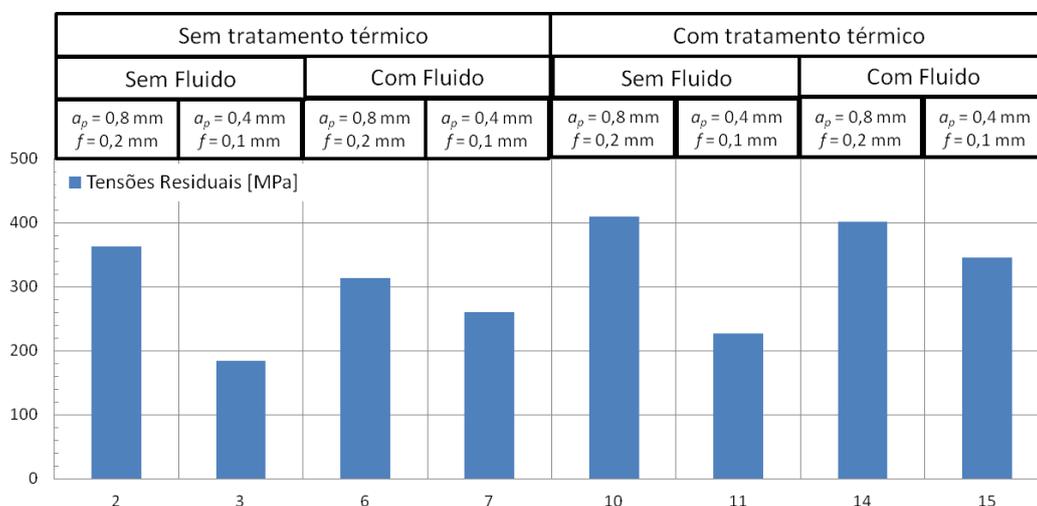


Figura 5.6 – Resultados de tensões residuais.

O aumento das tensões residuais com a presença do meio lubrificante para as condições de *acabamento* pode ser explicado pela capacidade de endurecimento do aço inoxidável martensítico AISI 420C quando este é resfriado rapidamente a partir de temperaturas elevadas em uma pequena área de seção de corte. O mesmo não se observa para condições de desbaste já que nestas condições as temperaturas envolvidas são mais altas, a área da seção de corte é maior e o resfriamento não é tão rápido, o que resulta em não haver transformações martensíticas obtidas por têmpera. Observa-se que esse fenômeno ocorre mesmo para o corpo de prova com tratamento térmico. A hipótese para isso é que as temperaturas envolvidas durante o processo sejam tão elevadas que fazem com que haja uma recristalização e logo após uma nova têmpera. Para verificar isso, seria necessário medir a temperatura durante o torneamento.

O aumento da dureza do material fez com que se gerasse um aumento das tensões residuais para todas as combinações de parâmetros.

Em geral, um aumento nas componentes ortogonais da força de usinagem faz com que tenhamos um aumento nas tensões residuais. Entretanto, observou-se que isso não vale para todas as situações, como mostra a Figura 5.7.

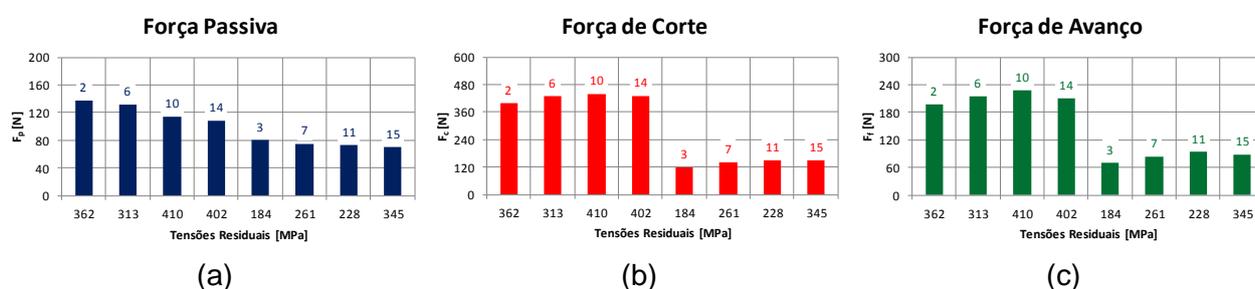


Figura 5.7 – Parcelas estáticas (RMS) das componentes ortogonais da força de usinagem em função das tensões residuais para as oito situações descritas: (a) F_p ; (b) F_c ; (c) F_f

A Figura 5.8 ilustra a influência dos parâmetros de entrada nas tensões residuais. Os parâmetros de maior influência nas tensões residuais geradas no torneamento do aço inoxidável AISI 420C observadas são:

- parâmetros de usinagem sem adição de fluido lubrificante, isto é, quando não se tem a presença do fluido lubrificante o aumento ou diminuição dos parâmetros de usinagem interfere potencialmente as tensões residuais;
- presença de fluido lubrificante para condições de acabamento, ou seja, sua adição faz com que haja considerável aumento nas tensões residuais.

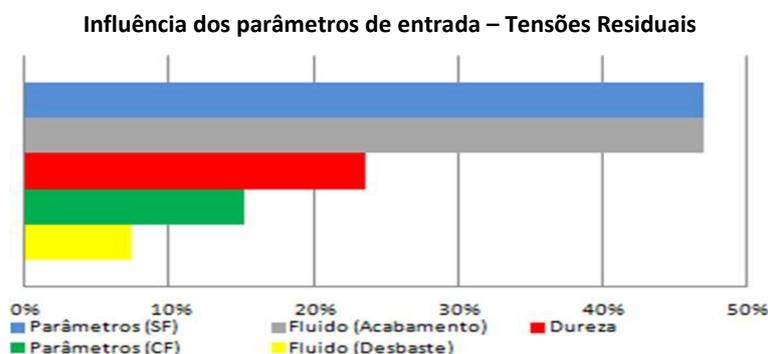


Figura 5.8 – Influência dos parâmetros de entrada nas tensões residuais.

Em seguida tem-se como influências a dureza do material e logo mais a alteração dos parâmetros em amostras com utilização do fluido lubrificante. Por fim, o dado de entrada que apresentou menor influência foi a adição do fluido para condições de desbaste. Sua utilização alterou em média 8% os valores de tensões residuais.

6 CONCLUSÕES

Existem diversos trabalhos realizados comparando parâmetros de entrada do processo com as forças de usinagem. Entretanto, a tentativa de correlacionar estes parâmetros com as tensões residuais é relativamente pouco desenvolvido. Isto faz com que o trabalho tenha uma parte inovadora.

Foi possível concluir que a profundidade de corte (a_p) e o avanço (f) interferem diretamente em todos parâmetros de saída estudados. Com os dados obtidos de tensões residuais não foi possível estabelecer uma correlação com as forças de usinagem; porém, elas podem servir de indicativo para alteração das mesmas. Para estudos posteriores fica como sugestão a análise da temperatura juntamente com os demais parâmetros analisados neste trabalho. Já para os dados de entrada, foi possível verificar que tem influência direta com as tensões residuais, porém, assim como nas forças de usinagem, notou-se que é difícil realizar uma análise para cada dado separadamente já que são muitas as variáveis envolvidas no processo de usinagem.

Conclui-se que o estudo foi de grande valia e é possível deixar como sugestão para trabalhos futuros o estudo dos parâmetros profundidade de corte (a_p) e avanço (f) separadamente para ver a influência de cada um destes parâmetros nas tensões residuais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Davim, J. P.; “**Surface Integrity in Machining**”, University of Aveiro, 2009.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L. “**Tecnologia da usinagem dos materiais**”, 7.ed., São Paulo: Artiber, 2010, 268p.

Favorit, “**Aços inoxidáveis: aço AISI 420C (características e aplicações)**”. Disponível em: www.favorit.com.br/produtos/categoria/acos-inoxidaveis/aco-aisi-420-c. Acesso em 16.set./2013.

Ferraresi, D.; **“Fundamentos da usinagem dos metais”**, São Paulo: Edgar Blücher, 1970, 751p.

Fry, T., **“Measurement Good Practice Guide No. 52”** National Physical Laboratory, UK, 2000.

GE Measurement & Control, **“Seifert Charon XRD M, SEIFERT Analytical X-ray”**. Disponível em: http://www.ge-mcs.com/download/it-common/GEIT-30218EN_Charon_XRD_M-print.pdf. acesso em 17.set/2013.

Kistler, **“Cutting force measurement: precise measuring systems for metal-cutting”**, Kistler Group, Winterthur, Switzerland, 2009, 44p.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B. **“Teoria da usinagem dos materiais”**, 2.ed. revista, São Paulo: Blücher, 2011, 397p.

Martins, C. O. D.; Strohaecker, T. R.; Rocha, A. S., Hirsch, T. K., **“Comparação entre técnicas de análise de tensões residuais em anéis de rolamento do aço ABNT 52100”**, Revista Matéria, v. 9, n. 1, pp. 20 – 28, 2004.

Matsumoto, Y.; Barash, M. M.; Liu, C. R. **“Effect of hardness on the surface integrity of AISI 4340 steel”**, Transactions of the ASME - Journal of Engineering for Industry, v.108, p.169-175, 1986.

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.

Rocha, A. S.; Nunes, R. M.; Hirsch, T. K.; **“Comparação entre difração de raios X e “método do furo cego” para medição de tensões residuais em barras cilíndricas”**, Revista matéria, v. 14, n. 3, pp. 965 – 976, 2009.

Sandvik, **“Manual técnico de usinagem”**, Sandvik Coromant, São Paulo, 2012.

Soares, M.C.B.V. **“Influência das tensões residuais no comportamento em fadiga e fratura de ligas metálicas”**. São Paulo: Tese (Doutorado) em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear, IPEN-USP, 1998.

Souza, A. J., **“Processos de fabricação por usinagem, parte 2: processos de usinagem com ferramentas de geometria definida.”**, GPFAI-DEMEC-UFRGS/Apostila/2011.

Thoben, K. D., et al., **“Distortion Engineering–Eine Systemorientierte Betrachtung des Bauteilverzugs”** HTM 57 v.4, p. 276–282, 2002.

APÊNDICE

Gráficos gerados com os dados das componentes ortogonais da força de usinagem. Os gráficos foram gerados através do software MS Excel.

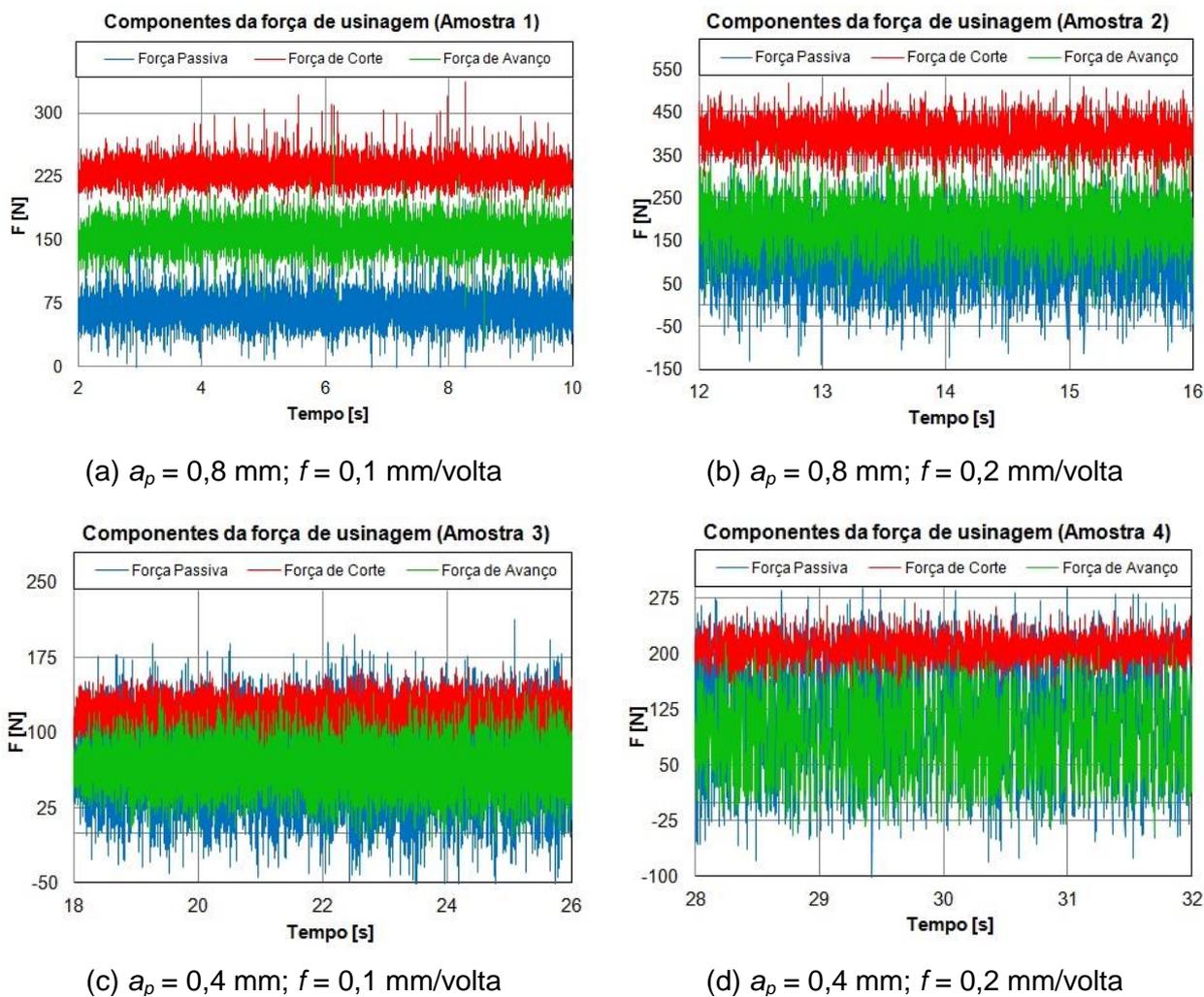


Figura A1 – Componentes ortogonais estáticas da força de usinagem. Corpo de prova sem fluido lubrificante e sem tratamento térmico.

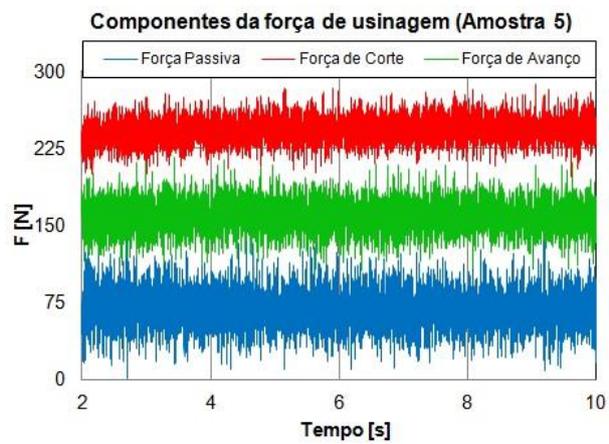
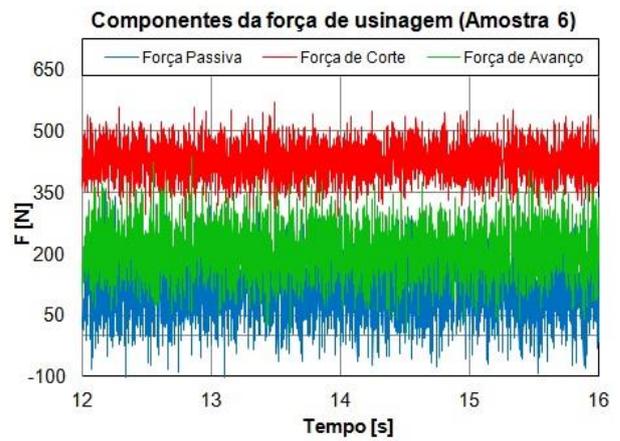
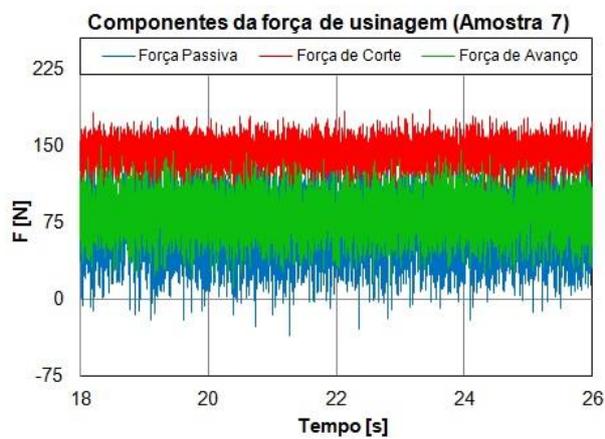
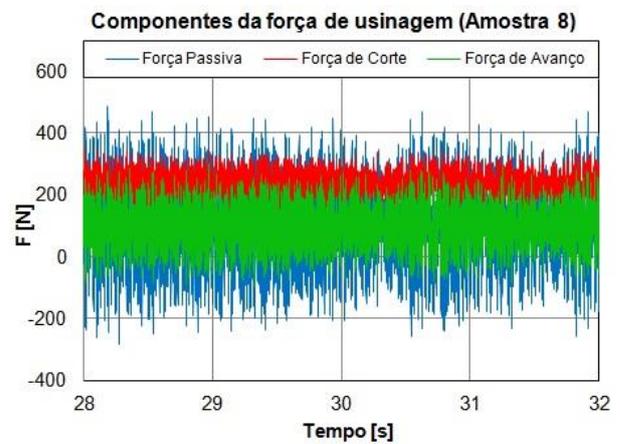
(a) $a_p = 0,8$ mm; $f = 0,1$ mm/volta(b) $a_p = 0,8$ mm; $f = 0,2$ mm/volta(c) $a_p = 0,4$ mm; $f = 0,1$ mm/volta(d) $a_p = 0,4$ mm; $f = 0,2$ mm/volta

Figura A2 - Componentes ortogonais estáticas da força de usinagem. Corpo de prova com fluido lubrificante e sem tratamento térmico.

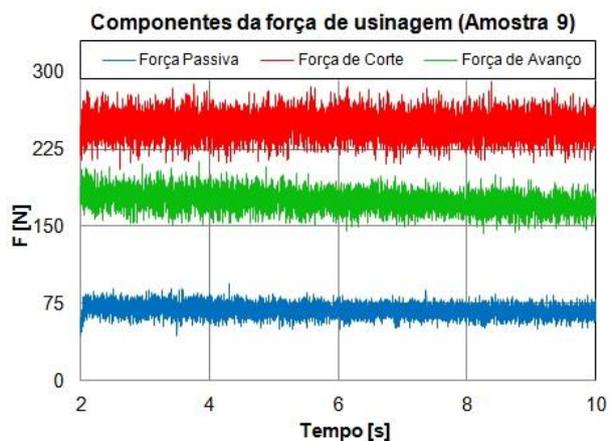
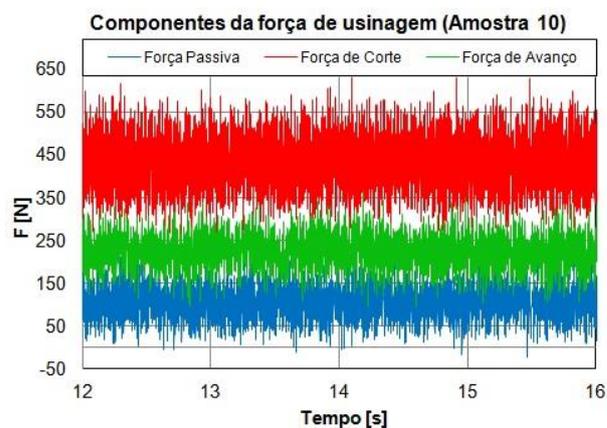
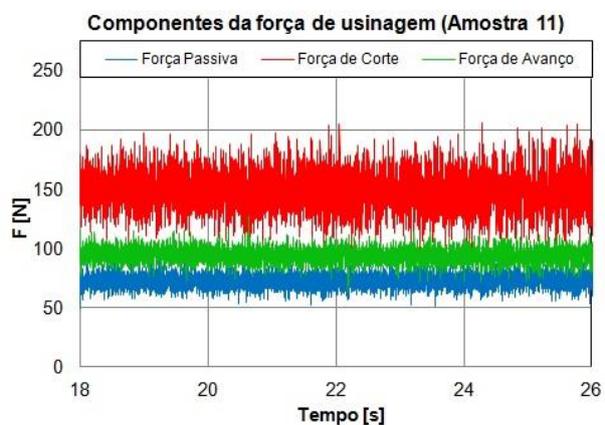
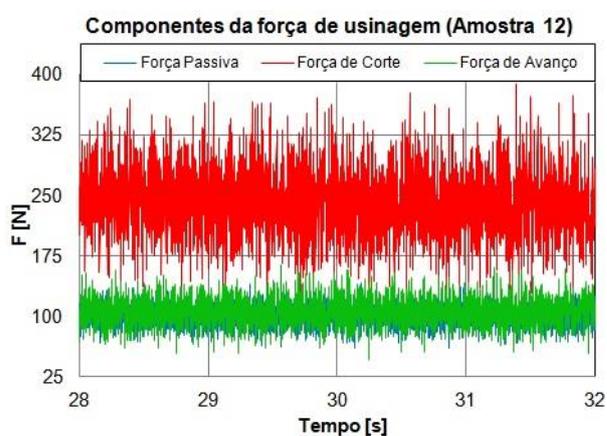
(a) $a_p = 0,8$ mm; $f = 0,1$ mm/volta(b) $a_p = 0,8$ mm; $f = 0,2$ mm/volta(c) $a_p = 0,4$ mm; $f = 0,1$ mm/volta(d) $a_p = 0,4$ mm; $f = 0,2$ mm/volta

Figura A3 - Componentes ortogonais estáticas da força de usinagem. Corpo de prova sem fluido lubrificante e com tratamento térmico.

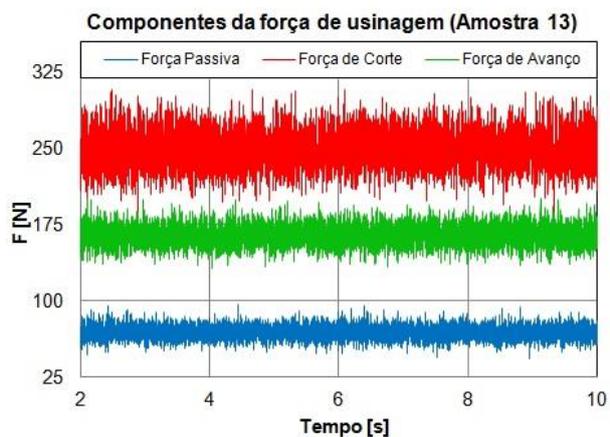
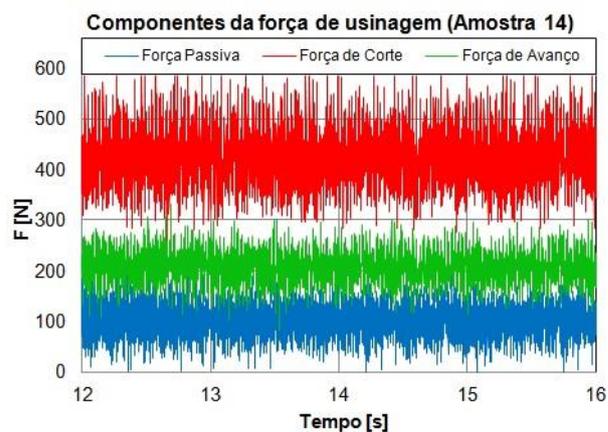
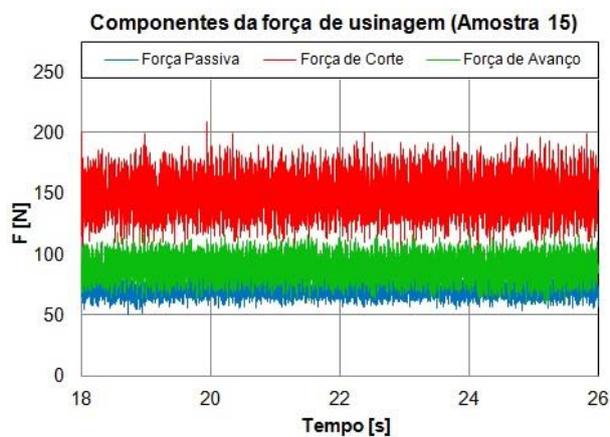
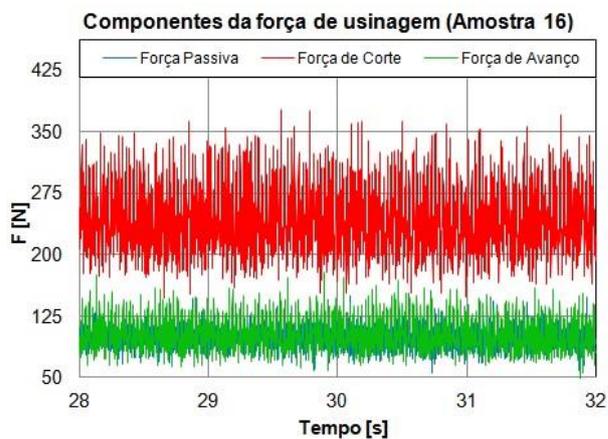
(a) $a_p = 0,8$ mm; $f = 0,1$ mm/volta(b) $a_p = 0,8$ mm; $f = 0,2$ mm/volta(c) $a_p = 0,4$ mm; $f = 0,1$ mm/volta(d) $a_p = 0,4$ mm; $f = 0,2$ mm/volta

Figura A4 - Componentes ortogonais estáticas da força de usinagem. Corpo de prova com fluido lubrificante e com tratamento térmico.