

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

ANÁLISE DAS FORÇAS RESULTANTES DA APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE CORTE
ALISADORA (WIPER) E CONVENCIONAL (STANDARD) NO TORNEAMENTO DE
ACABAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 420

por

Felipe de Barros Nassif

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

Porto Alegre, Novembro de 2012.

ANÁLISE DAS FORÇAS RESULTANTES DA APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE CORTE
ALISADORA (WIPER) E CONVENCIONAL (STANDARD) NO TORNEAMENTO DE
ACABAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 420

por

Felipe de Barros Nassif

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

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador 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:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Profa. Dra. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Porto Alegre, 21 de dezembro de 2012.

AGRADECIMENTOS

Aos familiares, principalmente pai, mãe e irmã, que convivendo diariamente sempre demonstraram compreensão e estiveram ao meu lado. Seu jeito sutil de apoiar e incentivar minhas decisões

A todos meus grandes amigos, que de uma forma ou outra são um dos meus principais suportes para seguir em frente.

Aos colegas por todos os anos de convivência e amizade.

Ao professor André João de Souza, pela orientação, pelo acompanhamento e pela disponibilidade para ajudar e discutir o trabalho ao longo do desenvolvimento.

Ao doutorando Guilherme Cortelini da Rosa, pela coorientação e incentivo durante todo este último semestre.

Ao bolsista de Iniciação Científica, Douglas Marcon de Mattos, pelo auxílio na aquisição de dados de força.

Ao técnico do Laboratório de Usinagem, Guilherme Vargas Schirmer, pelo apoio na programação e operação do centro de usinagem e na aquisição de dados de rugosidade.

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 420F.** 2012. 21 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

O trabalho consistiu em realizar uma análise detalhada das parcelas estática e dinâmica das três componentes ortogonais da força de usinagem (avanço F_f , passiva F_p e corte F_c) geradas pelas ferramentas com geometria alisadora e standard (ambas com raio de ponta $r_\epsilon = 0,4$ mm) no torneamento de acabamento a seco do aço inoxidável AISI 420. Este material é um aço martensítico que apresenta alta resistência mecânica (teor de carbono superior a 0,2%) e boa usinabilidade (presença de cromo, fósforo e enxofre). Nos ensaios realizados no torno CNC Mazak QTN 100-II, manteve-se a velocidade de corte constante ($v_c = 290$ m/min), avanços (f) de 0,1 e 0,2 mm/volta e profundidades de corte (a_p) de 0,5 e 1,0 mm. Os sinais de força foram mensurados através de um sistema de aquisição de dados composto por um dinamômetro piezométrico, um amplificador de carga e um computador com placa de aquisição de dados e software para processamento de sinais. Simultaneamente, os parâmetros de rugosidade média (R_a) e total (R_t) foram tomados usando um rugosímetro portátil. Observou-se que, com maior valor de avanço, a ferramenta standard sofreu maior esforço estático que a *wiper* quando submetida a mesmos parâmetros de corte. Em baixos avanços ambas apresentaram o mesmo comportamento quanto ao esforço estático. A parcela dinâmica é especialmente interessante por ser um dos primeiros estudos realizados neste ponto comparando ferramentas *wiper* e standard. O avanço foi o parâmetro de maior influência nas variáveis de saída. A rugosidade também tem relação direta com esforços de corte sobre a ferramenta. Tanto na análise esforços estáticos quanto na medição da rugosidade superficial a ferramenta alisadora apresentou melhor desempenho em comparação à convencional.

PALAVRAS-CHAVE: torneamento, *wiper*, *standard*, esforços de corte.

NASSIF, F. B. **Analysis of the resulting machining forces by using standard and wiper cutting tools in the dry finish turning of AISI 420F**. 2012. 21 p. Monograph (Undergraduate Final Project in Mechanical Engineering) – Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

The purpose of this study was to make a detailed analysis of the static and dynamic parts of the three orthogonal components of machining forces (feed, tangential and radial) generated by tools with wiper and standard geometries (both with nose radius of $r_\epsilon = 0,4$ mm) on dry finish machining of AISI 420 stainless steel. The material is a high mechanical resistance steel (carbon higher than 02%) and good machinability (addition of chrome, phosphorus and sulfur). The test were realized in a CNC Mazak QTN 100-II lathe, with constant cutting speed (290m/s), feed rates of 0,1 and 0,2 mm/rev and cutting depth of 0,5 and 1,0mm. The measurement of forces data was made by a charge amplifier and a computer equipped with data acquisition hardwares and softwares. Simultaneously, average (R_a) and total (R_t) roughness were measured using a portable surface roughness tester. It has been observed that with higher feed rate values the static forces in standard insert were more significant than in wiper insert using the same other cutting parameters. For low feed rates both of them presented the same behavior relating to static cutting forces. The dynamic part of the research is specially interesting because is one of the first times, if not the first, on which standard and wiper tools are compared at this point of study. Feed rate was the most influent parameter. Surface roughness has direct relation with cutting forces in cutting tool. the wiper insert presented better behavior for both forces and roughness comparing to conventional inserts.

KEYWORDS: wiper, standard, turning, cutting forces.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO.....	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1	Forças no Torneamento.....	2
3.2	Ferramentas Convencional (<i>Standard</i>) e Alisadora (<i>Wiper</i>).....	3
3.3	Rugosidade de Acabamento Superficial.....	4
4	METODOLOGIA.....	5
4.1	Características do material.....	6
4.2	Preparação e fixação do corpo de prova.....	6
4.3	Características da ferramenta de corte.....	7
4.4	Definição dos Parâmetros de Corte.....	8
4.5	Sistema para Aquisição dos Dados de Força.....	8
4.6	Sistema para Aquisição de Dados de Rugosidade.....	9
5	RESULTADOS.....	10
5.1	Análise das Componentes Ortogonais da Força de Usinagem.....	10
5.1.1	Parcela Estática das Componentes.....	10
5.1.2	Parcela Dinâmica das Componentes.....	12
5.2	Análise das Rugosidades Média e Total.....	13
6	CONCLUSÕES.....	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14
	APÊNDICES.....	16

1 INTRODUÇÃO

Pela crescente exigência de maior eficiência nos processos de fabricação vêm sendo desenvolvidos estudos cada vez mais específicos a fim de encontrar detalhes do processo que não podem ser facilmente detectados. Com a verificação destes pontos, aumenta a possibilidade de adequar o processo de fabricação para a aplicação desejada.

Neste estudo é abordado o torneamento de um aço inoxidável AISI 420. Este é um dos aços inoxidáveis mais comumente encontrados no mercado, tendo as mais variadas aplicações, tais quais discos de freio, turbinas, cutelaria e equipamentos cirúrgicos.

Atualmente, o aço inoxidável martensítico do tipo AISI-420 é muito utilizado na confecção de ferramentas cirúrgicas. Tais ferramentas vêm apresentando corrosão prematura, identificada após processo de limpeza e esterilização, perda de capacidade de corte e/ou quebra durante os processos cirúrgicos, o que traz uma constante demanda por renovação dos equipamentos.

A boa usinabilidade do AISI-420 facilita a fabricação destas delicadas ferramentas cirúrgicas. Para possibilitar tais aplicações, é importante conferir à peça, através da têmpera, uma estrutura martensítica que, por não permitir maior formação de carboneto de cromo, aumenta sua resistência à corrosão e, conseqüentemente, sua biocompatibilidade. Vale salientar que esta microestrutura confere ao material alta dureza.

Na década de 90, uma nova tecnologia em insertos para torneamento de alto rendimento foi desenvolvida. A geometria denominada *wiper* foi introduzida no mercado com capacidades de corte muito superiores ao que se utilizava até então.

Estudos iniciais envolvendo ferramentas *wiper* partiam do princípio de que o melhor acabamento era obtido da combinação de altas velocidades de corte com baixas taxas de avanço e, com a redução da velocidade, podia-se alcançar maior vida útil para a ferramenta. Baseado no estudo do torneamento de uma liga de aço temperada, Grzesik *et al.*, 2005, verificaram que era possível ter resultados semelhantes à ferramenta alisadora utilizando ferramenta convencional desde que com menores avanços. Gaitonde *et al.*, 2009, realizaram um estudo de forte importância para a presente pesquisa, no qual constataram, no torneamento do aço AISI D2, melhor desempenho do inserto cerâmico *wiper* para acabamento superficial e vida da ferramenta, enquanto que com inserto *standard* as forças de corte foram mais amenas. Em um estudo comparativo sobre estas duas diferentes geometrias de raio de ponta de ferramenta, Atefi *et al.*, 2012, afirmam que além de trazer forte melhora na rugosidade, os insertos alisadores refletem valores de esforços de corte cerca de 4% menores em média. Outros estudos também muito recentes citam a ferramenta *wiper* como mais eficiente em trabalho quanto à vida útil do que a ferramenta convencional [Azambuja, 2012].

Fatos como estes citados fazem pensar em razões para a ferramenta convencional manter seu posicionamento no mercado. O presente estudo visa trazer melhor embasamento prático e teórico para defender a utilização de determinada geometria ferramenta. Até hoje, poucos estudos foram realizados comparando esforços de corte sobre estes dois tipos de inserto, incentivando a pesquisa e o desenvolvimento deste trabalho.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre as forças resultantes sobre as ferramentas convencional (*standard*) e alisadora (*wiper*) e a rugosidade final da superfície usinada no torneamento de acabamento do aço AISI-420 para diferentes condições de corte. Deste modo será possível avaliar mais precisamente o comportamento destas ferramentas quanto aos esforços gerados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Forças no Torneamento

Para o estudo dos esforços cortantes em um processo de usinagem é feita uma simplificação na qual se considera a atuação das forças em um determinado ponto, enquanto que na prática estas forças são atuantes em certa área ou superfície.

A força de usinagem “ F ” é a força total que atua sobre uma aresta cortante durante o processo de usinagem. No torneamento há uma aresta única e as componentes desta força podem ser definidas através de uma decomposição levando em consideração características da formação do cavaco.

Da decomposição supracitada é comum a consideração de três componentes. A parcela tangencial projetada sobre o plano de corte é a força de corte F_c . A parcela normal à direção de corte projetada sobre o plano de avanço é a força de avanço F_f . A componente radial projetada perpendicularmente ao plano de trabalho é a força passiva (ou de profundidade) F_p [Souza, 2011]. A Figura 3.1 ilustra a decomposição ortogonal da força de usinagem F em torneamento.

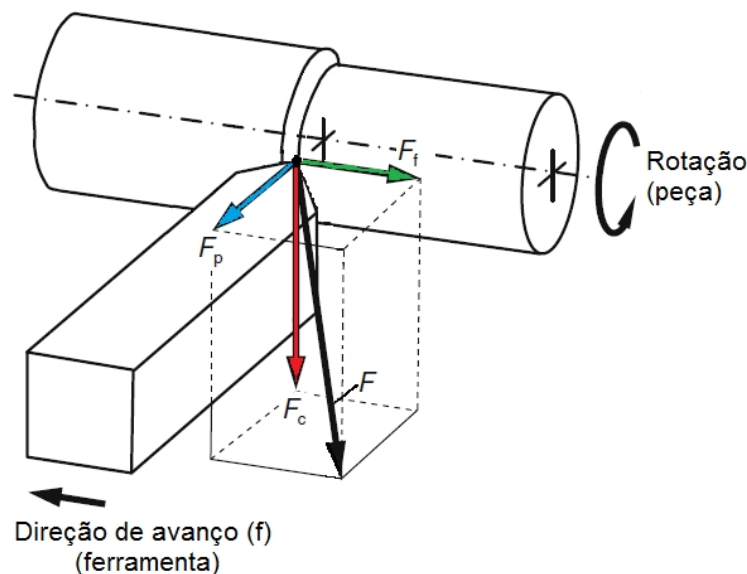


Figura 3.1 – Esforços de corte em torneamento [Machado, 2009]

A força de corte pode ser definida pela Equação 3.1.

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

onde k_s é a pressão específica de corte e A é a área da seção de corte, que pode ser definida como o produto da profundidade de corte (a_p) pelo avanço (f).

Conforme verificado na Equação 3.1, a pressão específica de corte (k_s) é a unidade de força por área da seção de corte (A). Desta relação pode-se fazer uma analogia e estudo de comportamento destes dois parâmetros de corte em relação à pressão específica de corte e à força de corte. Conforme já citado por diversos autores [Gaitonde *et al.*, 2009 e Machado, 2009], a profundidade de corte tem uma relação diretamente linear com a força de corte; dobrando-se a profundidade a força deve também ser dobrada. Já o avanço não responde da mesma maneira. Se o avanço for dobrado em um processo de torneamento, haverá uma diminuição da pressão específica de corte, fazendo com que não haja uma relação de variação diretamente linear entre a força de corte e o avanço. Há diversos outros fatores que influenciam nesta variável. O material da peça afeta através da *tensão de cisalhamento na ruptura* e de seu *grau de recalque* com uma variação não linear. O ângulo de posição (χ_r) também fica

relacionado com a pressão específica, juntamente com as diversas variáveis que giram em torno da geometria do material.

Informações sobre o histórico dos esforços de corte são muito significativas porque demonstram pontos envolvendo o processo de corte, a peça usinada, os elementos de fixação e a ferramenta. Deste modo fornece uma forte base para a compreensão da cinemática e da dinâmica das ferramentas e dos processos de usinagem. Também podem ser utilizadas para otimizar as geometrias de corte e testar probabilidades de distorção dos instrumentos. Estes esforços são basicamente utilizados como correlação ao monitoramento de vida da ferramenta.

A parcela estática da força pode ser especificada como a média de uma amostragem de dados de magnitude de força em um determinado domínio de tempo. Já a parcela dinâmica da força está associada à oscilação sobre um valor base do início do corte, atingindo geralmente um valor máximo no final do processo [Toh, 2004]. Oraby e Hayhurst, 2004, verificaram o comportamento de pastilhas convencionais quanto aos esforços dinâmicos reproduzidos e mediu experimentalmente a maior influência do avanço na amplitude de oscilação desta parcela da força. Esta resposta foi obtida através de um estudo comparativo com a variação de diversos parâmetros de corte.

3.2 Ferramentas Convencional (*Standard*) e Alisadora (*Wiper*)

A evolução dos materiais para ferramentas de corte é um fator a se considerar para qualquer pesquisa relacionada à usinagem. O longo tempo decorrido entre o surgimento do aço-ferramenta e sua evolução ao aço-rápido contrapõe-se ao grande salto de qualidade e produtividade após a descoberta do metal duro e novos lançamentos no mercado.

Atualmente, as ferramentas de corte mais utilizadas no processo de torneamento em geral, em especial de aços, são os suportes com insertos (pastilhas) intercambiáveis de metal duro existentes em uma grande variedade de forma, tamanho e composição para as mais diversas aplicações [Espanhol, 2008].

O aumento do raio de ponta (r_ϵ) da ferramenta a torna mais resistente, porém acarreta aumento da vibração devido ao maior atrito causado pela maior área de contato entre peça e ferramenta. O acabamento da superfície depende muito da relação entre avanço e raio de ponta. Por sua vez, esta relação contribui diretamente para a rugosidade da peça podendo ser descrita pela Equação 3.2, sendo este o menor valor de rugosidade possível no processo de torneamento [Diniz *et al.*, 2010; Machado *et al.*, 2009; Kalpakjian e Schmid, 2010].

$$R_t \text{ [}\mu\text{m]} = \frac{1000 f^2}{8 \cdot r_\epsilon} = 125 \frac{f^2}{r_\epsilon} \quad (3.2)$$

As pastilhas convencionais (Fig. 3.2) têm um raio de ponta (r_ϵ) único que pode variar de 0,1 a 2,4 mm. São as mais comumente utilizadas no mercado, mas vêm sendo perseguidas por uma tecnologia emergente de pastilhas alisadoras chamadas *wiper*.



Figura 3.2 – Ferramenta convencional [Sandvik, 2012]

As pastilhas *wiper* (Fig. 3.3) possuem geralmente três ou mais raios de ponta (podendo chegar a nove), conferindo uma diferente interação com a superfície da peça e conseqüente mudança no acabamento da superfície usinada. Isso aumenta o comprimento de contato das pastilhas e o efeito das faixas de avanço de modo positivo. A redução nos tempos de corte com

estas pastilhas gira em torno de 30% por conseguirem atuar em altas faixas de avanço gerando ainda boa rugosidade e boa quebra de cavaco. É uma geometria especialmente projetada para torneamento e faceamento em linha reta. O raio de ponta *wiper* proporciona uma menor altura do perfil na aresta de corte da superfície gerada, o que tem efeito de alisamento na superfície torneada. [Sandvik, 2012]. Azambuja, 2012, afirma que, além das qualidades citadas, a ferramenta *wiper* tem vida útil mais longa que a standard.

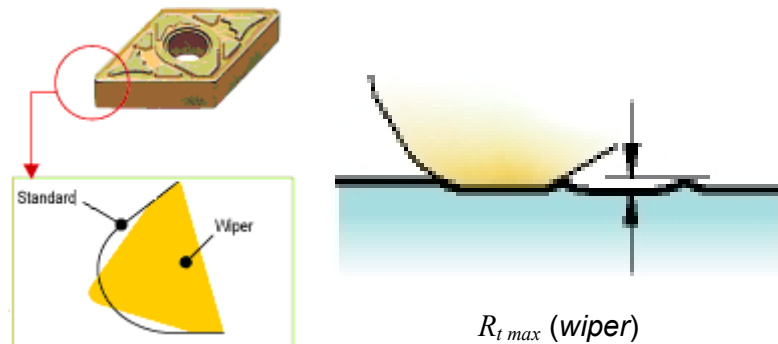


Figura 3.3 – Ferramenta alisadora [Sandvik, 2012]

3.3 Rugosidade de Acabamento Superficial

O estudo do acabamento superficial torna-se importante nos casos em que se exige uma precisão no ajuste entre peças unidas e naqueles em que a precisão dimensional e a de forma não são satisfatórias para garantir a funcionalidade do conjunto.

A rugosidade superficial é um tipo de topografia microscópica deixada pela usinagem e geralmente imperceptível numa inspeção visual. Sua avaliação é possível com a utilização de um aparelho específico chamado rugosímetro. No Brasil, os conceitos de rugosidade superficial são determinados pela norma ABNT NBR ISO 4287, 2002, adotando o sistema da linha média.

A rugosidade gerada na usinagem é mais influenciada pelo processo que pela máquina. Conforme Machado *et al.*, 2009, os fatores que podem contribuir com a rugosidade gerada são: marcas da quina da ferramenta ou de fragmentos da mesma, as quais podem apresentar natureza periódica para alguns processos e aleatória para outros; geração de rebarba do material durante a operação de corte; restos de aresta postiça de corte de uma ferramenta na superfície usinada; forma geométrica do quebra-cavaco na quina da ferramenta.

Os parâmetros utilizados neste trabalho para avaliar a textura da superfície usinada são a rugosidade média e a rugosidade total. Rugosidade Média (R_a) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dentro do percurso de medição L , demonstrada na Figura 3.4 e calculada pela Equação 3.3.

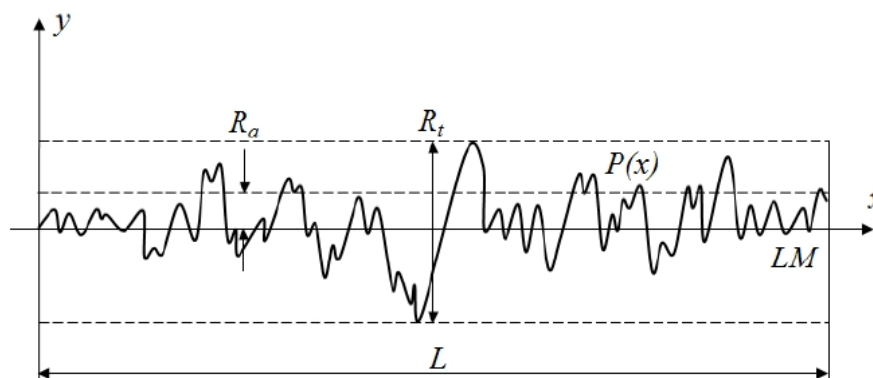


Figura 3.4 – Rugosidades R_a e R_t em um perfil de superfície $P(x)$ de uma amostra de comprimento L [Mello *et al.*, 2012]

$$R_a [\mu\text{m}] = \frac{1000 f^2}{18\sqrt{3} \cdot r_e} = 32,075 \frac{f^2}{r_e} \quad (3.3)$$

Rugosidade total (R_t) é a maior altura de pico e a maior profundidade de vale do perfil dentro do percurso de medição, demonstrada na Figura 3.4 e apresentada anteriormente pela Equação 3.2.

Cada processo garante uma precisão em determinadas condições de usinagem. Na Tabela 3.1, Álvares, 2001, mostra a classe de tolerância (IT) e a rugosidade média (R_a) que podem ser obtidas por torneamento e retificação na usinagem de superfície cilíndrica externa.

Tabela 3.1 – Precisão e acabamento superficial obtidos nos processos de torneamento e retificação de uma superfície cilíndrica externa [Álvares, 2001]

Processo	Operação	Classe de Tolerância (IT)	Rugosidade R_a [μm]
Torneamento	Desbaste	12 – 13	10 – 80
	Semiacabamento	10 – 11	2,5 – 10
	Acabamento	07 – 09	1,25 – 2,5
	Ultraprecisão	05 – 06	0,80 - 1,25
Retificação	Desbaste	07 – 09	0,63 – 0,80
	Semiacabamento	06 – 07	0,16 – 0,63
	Acabamento	05 – 06	0,08 – 0,16

4 METODOLOGIA

O procedimento consistiu basicamente de ensaios de curta duração aplicando ferramentas convencionais e alisadoras no torneamento a seco do aço inoxidável AISI 420. A Figura 4.1 ilustra a estrutura experimental do trabalho.

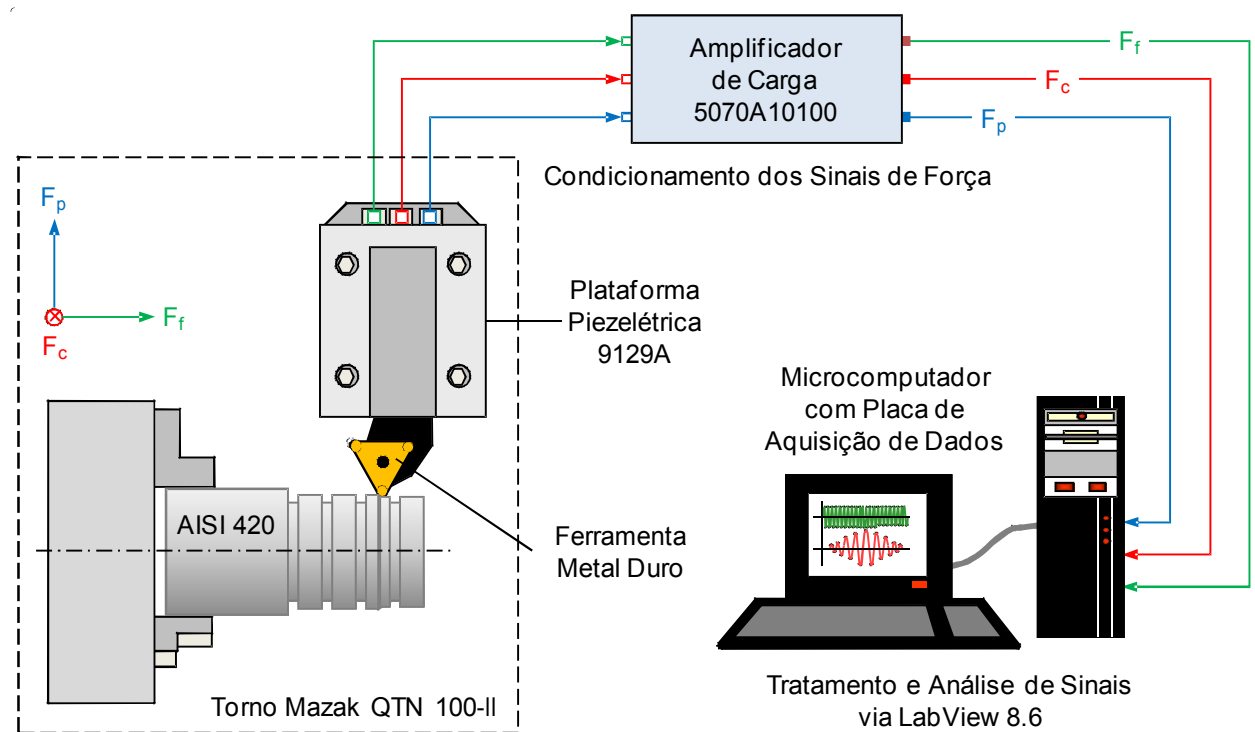


Figura 4.1 – Estrutura experimental

Foram realizados cortes longitudinais externos utilizando o torno CNC Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II (Fig. 4.2). Medições dos esforços cortantes e da rugosidade da superfície usinada foram realizadas e os valores devidamente registrados.



Figura 4.2 – Torno CNC Mazak QTN 100-II

4.1 Características do material

A composição básica do aço AISI 420 é de ferro, carbono, cromo, manganês, níquel silício. A Tabela 4.1 especifica as porcentagens em massa de cada elemento.

Tabela 4.1 – Composição Química Típica do Aço AISI 420 [Favorit, 2012]

Elemento	Cr	C	Mn	P	Si	S
Peso [%]	12,0 ~ 14,0	0,35 max	1,0 max	0,04 max	1,0 max	0,03 max

A Tabela 4.2 especifica a composição química encontrada para o corpo de prova utilizado no ensaio. A verificação da composição química do metal foi feita por métodos instrumentais com a utilização do Spectrolab – Analytical Instruments – LVFA18B, equipamento para análise de metais por meio de um sistema de leitura óptica disponível no LAMEF-UFRGS. Com o apoio do Setor de Qualidade da empresa AGCO do Brasil de Canoas foi feita a medição de dureza do aço, obtendo um valor uniforme de 16HRC.

Tabela 4.2 – Composição Química do Aço AISI 420 Medida [Izquierdo *et al.*, 2012]

Elemento	Fe	Cr	C	Mn	Ni	Si	S	Outros
Peso [%]	85,80	12,95	0,329	0,326	0,234	0,176	0,0098	0,185

O resultado mostra que se trata de um aço AISI 420.

4.2 Preparação e fixação do corpo de prova

O corpo de prova foi especialmente preparado a fim de facilitar e viabilizar uma melhor aquisição de dados, assim como a realização do ensaio com a separação das combinações entre os parâmetros de corte escolhidas. Isto permitiu uma melhor discriminação dos dados obtidos nos testes. A preparação da peça única (Fig. 4.3) constou basicamente da adição de rasgos no corpo, criando quatro intervalos de superfícies intercaladas. Foi também dado um passe de 1,0 mm de profundidade para garantir a cilindridade das superfícies criadas e possibilitar uma posterior usinagem uniforme para coleta dos dados desejados.

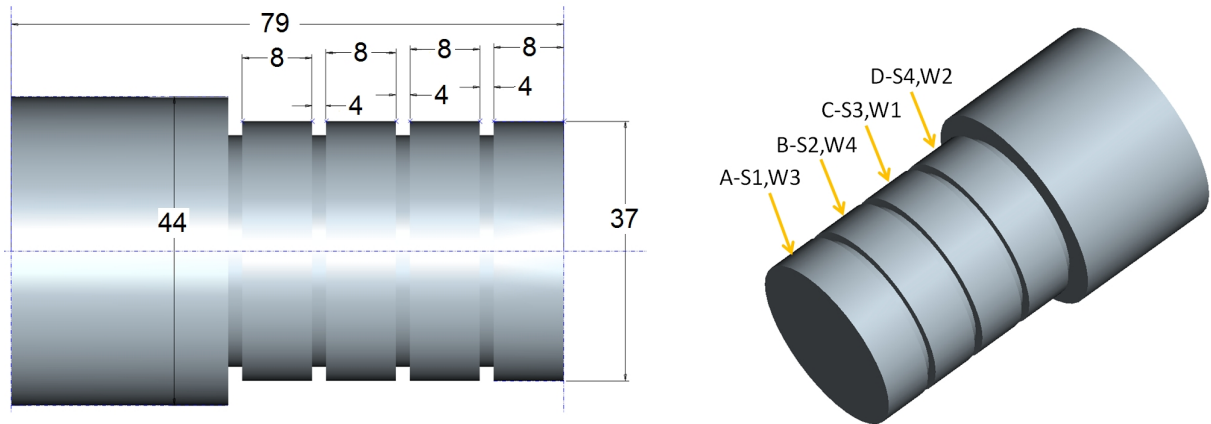


Figura 4.3 - Configuração do corpo de prova preparado para realização dos ensaios

Devido às dificuldades na instrumentação do experimento, não foi possível fixar a peça utilizando o contraponto. Uma incompatibilidade de montagem da plataforma piezométrica no torno obrigou a fazer a fixação da peça em balanço. Para manter o alinhamento sem emprego do contraponto foi necessário novo faceamento da peça no torno mecânico.

4.3 Características da ferramenta de corte

Nos experimentos foram usados insertos Sandvik Coromant (Figura 4.3) com formato triangular básico negativo (T-Max P), raio de ponta $r_\epsilon = 0,4$ mm e quebra-cavacos para torneamento de acabamento (PF e WF), além de cobertura MTCVD (*Medium Temperature Chemical Vapor Deposition*) de $\text{TiCN}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ (GC4215). A Figura 4.4 mostra a imagem dos insertos. O sistema de fixação do inserto no suporte é do tipo cunha-grampo para minimizar as vibrações. O porta-ferramentas MTJNL 2020K utilizado possui ângulo de posição $\chi_r = 93^\circ$.



Figura 4.4. Ferramentas utilizadas: (a) *standard*; (b) *wiper*.

A Tabela 4.3 mostra as especificações recomendadas pelo fabricante para os insertos *standard* e *wiper* para definir os parâmetros de máquina (velocidade de corte v_c , avanço f e profundidade de corte a_p) a serem utilizados nos experimentos.

Tabela 4.3 – Especificações dos insertos [Sandvik, 2012]

Geometria	Especificação do Inserto	Parâmetros de Corte		
		v_c [mm/min]	f [mm/volta]	a_p [mm]
<i>Standard</i>	TNMG 160404-MF	290 (270 – 290)	0,15 (0,05 – 0,30)	0,40 (0,10 – 1,50)
<i>Wiper</i>	TNMX 160404-WF	290 (270 – 290)	0,20 (0,08 – 0,30)	1,00 (0,20 – 3,00)

4.4 Definição dos Parâmetros de Corte

A definição dos parâmetros considerados nos ensaios de corte baseou-se nas especificações do fabricante (Sandvik), tanto para a geometria *standard* quanto para a *wiper*. Para ferramenta alisadora, o fabricante indica a utilização ideal com parâmetros de profundidade e avanço mais elevados em comparação ao inserto convencional. A Tabela 4.3 fornece uma visão detalhada destas indicações para cada ferramenta.

A Tabela 4.4 mostra os valores escolhidos. Para os experimentos, manteve-se a velocidade de corte constante ($v_c = 290$ m/min) e foram adotados dois valores de profundidade de corte ($a_p = 0,5$ e $1,0$ mm) e dois de avanço ($f = 0,1$ e $0,2$ mm/volta).

Tabela 4.4 – Combinações de parâmetros de corte utilizados com $v_c = 290$ m/min

Geometria	Ensaio	a_p [mm]	f [mm/volta]
Standard	S1	1	0,1
	S2	1	0,2
	S3	0,5	0,1
	S4	0,5	0,2
Wiper	W1	1	0,1
	W2	1	0,2
	W3	0,5	0,1
	W4	0,5	0,2

Com isso, foram geradas $2^3 = 8$ combinações de parâmetros de modo a se verificar a influência da variação nos valores de força e rugosidade.

4.5 Sistema para Aquisição dos Dados de Força

Conforme definido da escolha dos parâmetros de corte a serem testados (condições ideais recomendadas), foram realizadas medições de esforços de corte para as 8 diferentes combinações de ferramenta (2), avanço (2) e profundidade de corte (2).

O equipamento utilizado para aquisição destes dados de força foi um dinamômetro piezelétrico Kistler modelo 9129A que permite a aquisição das três componentes ortogonais da força de usinagem (Fig. 4.5). As vantagens deste sistema em forma de plataforma são: a separação das três componentes (eixos X, Y e Z), a altíssima rigidez mecânica e a frequência natural elevada ($\approx 3,75$ kHz).

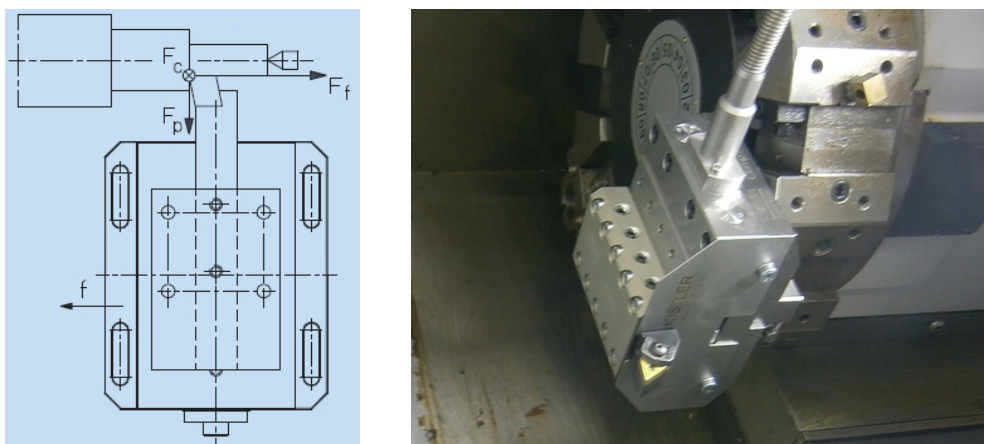


Figura 4.5 – Dinamômetro piezelétrico Kistler 9129A instalado no Torno Mazak QTN 100-II

Os sinais de força obtidos nos canais F_x , F_y e F_z da plataforma correspondem respectivamente às componentes de avanço (F_f), passiva (F_p) e corte (F_c) da força de

usinagem gerada no processo de torneamento. Os valores de sensibilidade de cada eixo, juntamente com os fatores de escala (amplificação), devem ser devidamente ajustados no amplificador de carga Kistler modelo 5070A10100 (Fig. 4.6). Este equipamento possui 4 canais e uma faixa de medição por canal de ± 200 a 200000 pC.



Figura 4.6 – Amplificador de carga Kistler 5070A10100 [Kistler, 2009].

O armazenamento e posterior análise dos resultados obtidos foi realizado através do LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) Versão 8.6. A ferramenta do programa a ser utilizada é o *Graphical System Design*.

O programa implementado para os experimentos é ilustrado pela Figura 4.7. Como se utilizaram dois diferentes valores de avanço, os tempos de aquisição de dados não foram iguais para todas as combinações de parâmetros. A taxa de amostragem foi de 2000 pontos por segundo durante 7 segundos. Considerando que o tempo de corte (t_c [s]) da ferramenta em cada combinação é dado pela Equação 4.1:

$$t_c \text{ [s]} = \frac{60 \cdot L_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot v_c} = \frac{60 \cdot 8 \cdot \pi \cdot 37}{1000 \cdot f \cdot 290} = \frac{1}{5,2 \cdot f} \quad (4.1)$$

tem-se um tempo de usinagem de cerca de 1,0 segundo (2000 pontos) para $f = 0,2$ mm/volta e de 2,0 segundos (4000 pontos) para $f = 0,1$ mm/volta. Desprezando o início e o fim de cada trecho usinado, para a análise das parcelas estáticas e dinâmicas das forças tomou-se 1500 pontos para $f = 0,2$ mm/volta e 3000 pontos para $f = 0,1$ mm/volta.

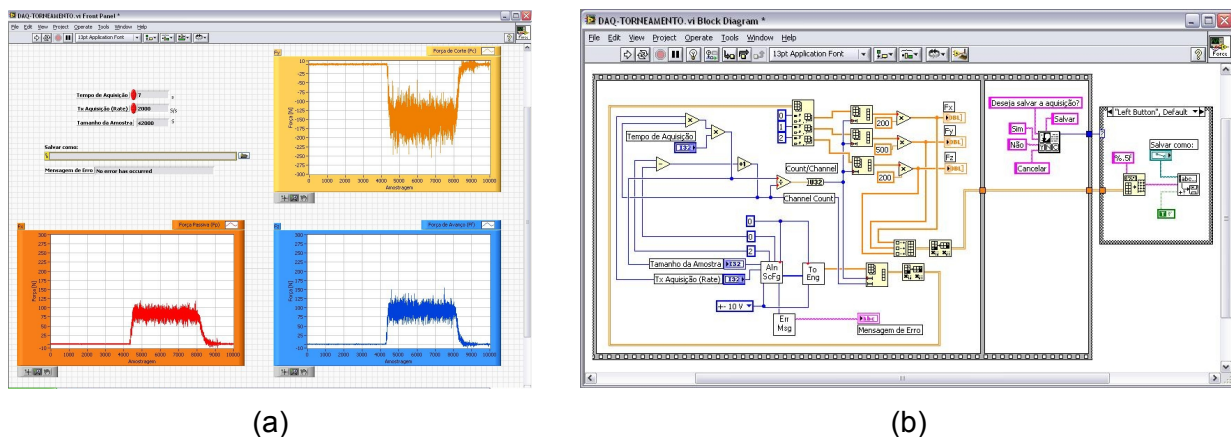


Figura 4.7 – Instrumento virtual implementado em LabVIEW 8.6 para os ensaios: (a) painel frontal; (b) diagrama de blocos

4.6 Sistema para Aquisição de Dados de Rugosidade

A medição de rugosidade da superfície do corpo de prova foi feita através do rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201 com resolução de $0,01 \mu\text{m}$. Para a realização da medição, o corpo de prova foi removido do torno CNC e fixado em uma base magnética para a

realização da leitura dos valores de rugosidade. As leituras foram retiradas em quatro planos defasados entre si de aproximadamente 90° (Fig. 4.8).



Figura 4.8 – Equipamento para medição de rugosidade: Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201.

5 RESULTADOS

Os resultados obtidos no torneamento com as ferramentas convencional (*standard*) e alisadora (*wiper*) foram avaliados de forma comparativa sob dois aspectos: análise das componentes da força de usinagem e análise da rugosidade gerada na peça. O foco maior do estudo foi sobre os esforços cortantes do processo.

5.1 Análise das Componentes Ortogonais da Força de Usinagem

A Tabela 5.1 indica as componentes ortogonais (força de passiva F_p , de corte F_c e de avanço F_f) medidas nas operações de usinagem considerando-se variações de ferramenta, avanço e profundidade de corte. Os resultados correspondem à média final medida para cada caso e os valores de incerteza expandida (considera que 95% dos valores obtidos estão dentro do intervalo de confiança especificado na tabela).

Tabela 5.1 - Esforços cortantes estáticos (F) e dinâmicos ($\pm \Delta F$): incerteza expandida com 95% de confiança

Ensaio	a_p [mm]	f [mm/volta]	v_c [mm/min]	F_p [N]	$\pm \Delta F_p$ [N]	F_c [N]	$\pm \Delta F_c$ [N]	F_f [N]	$\pm \Delta F_f$ [N]
S1	1,0	0,1	290	77,2	25,4	275,3	57,9	194,6	36,6
W1	1,0	0,1	290	92,5	16,3	274,5	57,1	187,2	26,0
S2	1,0	0,2	290	121,5	89,7	503,1	181,1	253,1	118,6
W2	1,0	0,2	290	148,3	93,7	474,7	211,3	244,4	111,4
S3	0,5	0,1	290	80,2	13,9	152,8	42,5	102,1	23,0
W3	0,5	0,1	290	83,1	19,6	149,7	52,8	93,0	25,7
S4	0,5	0,2	290	118,9	93,8	249,7	211,7	112,0	111,0
W4	0,5	0,2	290	120,2	40,1	217,9	110,5	102,7	58,0

5.1.1 Parcela Estática das Componentes

Conforme citado no item 5.1, foi extraída a média dos valores de força dentro de determinado intervalo de tempo (ou 1500 pontos para $f = 0,2$ mm/volta e 3000 pontos para $f = 0,1$ mm/volta) para estimar a parcela estática dos esforços de corte nas ferramentas.

A Figura 5.1 mostra o gráfico das parcelas estáticas das componentes ortogonais da força de usinagem para os dados referentes à Tabela 5.1. Para maiores informações sobre os dados coletados, vide Apêndice.

Parcelas Estáticas das Forças de Usinagem

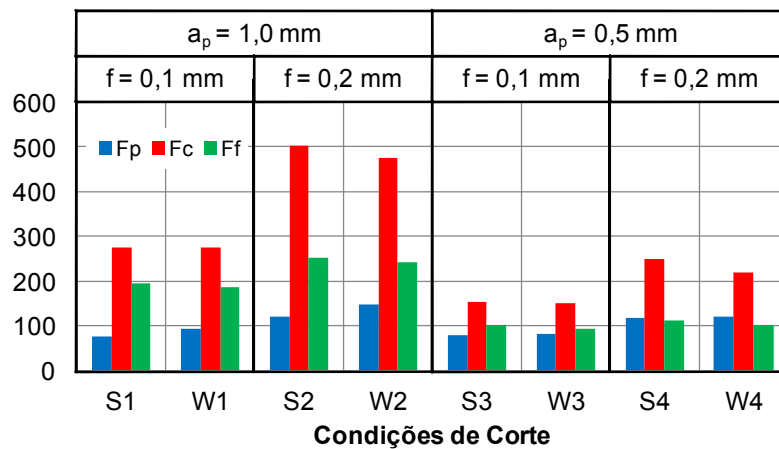


Figura 5.1 – Parcela estática das componentes ortogonais da força de usinagem.

Da análise da Figura 5.1 fica evidente a influência dos parâmetros de corte nas forças geradas no processo de torneamento devido à alteração da área da seção transversal de corte (A). A teoria atualmente aceita afirma que com a diminuição da profundidade de corte (a_p) se obtém uma diminuição da força de corte (F_c) na mesma proporção. Já para o avanço (f), um aumento no seu valor reflete em um aumento de F_c , mas não na mesma proporção, já que ocorre diminuição da pressão específica de corte (k_s). A Tabela 5.2 mostra o percentual de redução ou crescimento de F_c com a variação de a_p e f .

Tabela 5.2 – Variação percentual da força de corte com os parâmetros de usinagem

Situação	Standard		Wiper	
Diminuição de a_p	S1 para S3	44,5%	W1 para W3	45,5%
	S2 para S4	50,4%	W2 para W4	54,1%
Aumento de f	S1 para S2	82,7%	W1 para W2	72,9%
	S3 para S4	63,4%	W3 para W4	45,6%

A grande diferença observada no aumento de f para $a_p = 1,0 \text{ mm}$ (S1/S2) e $a_p = 0,5 \text{ mm}$ (S3/S4) (analogamente para a ferramenta *wiper*) pode ser basicamente explicada por Ferraresi, 1977. Para uma razão $a_p/f < 5$, verifica-se a influência da aresta lateral de corte, a influência do arredondamento da ponta da aresta cortante e a influência do atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta sobre k_s . No caso, tem-se de S1 para S2 uma variação de 10 para 5 nesta razão e de S3 para S4 uma variação de 5 para 2,5, refletindo em uma diminuição acentuada de k_s .

Os raios da ferramenta *wiper* podem possibilitar que a força total fique mais uniformemente distribuída ao longo da superfície, reproduzindo menor k_s sobre a face da ferramenta. A Equação 3.1. demonstra a interação entre as variáveis supracitadas. Mantendo-se constante a_p e f , a variável que pode ser influenciada é k_s que, de acordo com estudos anteriormente desenvolvidos, sofre impacto na alteração da geometria da ferramenta.

As forças de corte (F_c) e de avanço (F_f) causadas pela ferramenta alisadora foram iguais ou menores que as obtidas para ferramenta convencional. Isto se deve a uma redução de k_s pela alteração do formato da aresta, a qual facilita a ação de corte. Já as forças passivas (F_p) foram maiores. Uma possível explicação é que a mesma geometria que facilita o avanço e o corte na direção tangencial dificulta o corte na direção radial (ou de profundidade).

Azambuja, 2012, comprovou experimentalmente uma maior vida útil da ferramenta *wiper*, o que vem de acordo com os dados relativos a esforços de corte encontrados no presente trabalho. Por ser menos ou igualmente solicitado em todas as situações, pode-se

dizer que, tendo em vista a ação das forças estáticas, a ferramenta *wiper* provavelmente responderá com uma mais longa durabilidade.

5.1.2 Parcela Dinâmica das Componentes

As parcelas dinâmicas da força permitem extrair diversas informações quanto à influência dos parâmetros de corte e das ferramentas nesta variável de saída do processo. A Figura 5.2 permite verificar que a vibração na ferramenta sofre mais forte influência do avanço, apresentando em quase todos os casos um aumento de mais de 100% nas componentes dinâmicas das forças de corte quando é dobrado o valor do referido parâmetro. Este comportamento vem de acordo com estudos citados por Oraby e Hayhurst, 2004. Para maiores informações sobre os dados coletados, vide Apêndice.

O estudo comparativo das parcelas dinâmicas da força entre as ferramentas convencional e alisadora é algo que ainda está em desenvolvimento e não oferece um bom banco de dados como base de análise. A ferramenta *wiper* apresentou uma maior amplitude de vibração $\pm \Delta F$ nas situações 1, 2 e 3. Pode-se dizer que, segundo Sandvik, 2012, o raio de ponta *wiper* proporciona uma menor altura de perfil na aresta cortante da superfície gerada, o que tem um efeito de alisamento na superfície torneada (vide Fig. 3.3). Conclui-se que este efeito está associado com a região de contato ferramenta/peça que, por ser maior, gera maior vibração (efeito similar ocorre com o aumento do raio de ponta).

Assim como ocorreu com as parcelas estáticas, as parcelas dinâmicas foram mais fortemente influenciadas pelo avanço da ferramenta. Uma hipótese é de que o avanço exige que a peça vença uma espécie de degrau para progredir no torneamento. Esta consideração pode comprovar as atuais afirmações de que quanto maior o avanço da ferramenta de corte maior será sua vibração. Enquanto que para $f = 0,1$ mm ambas as ferramentas se comportaram de maneira similar, para $f = 0,2$ mm as ferramentas *standard* e *wiper* tiveram um incremento mínimo de 208% e 307% na oscilação da força de corte, respectivamente.

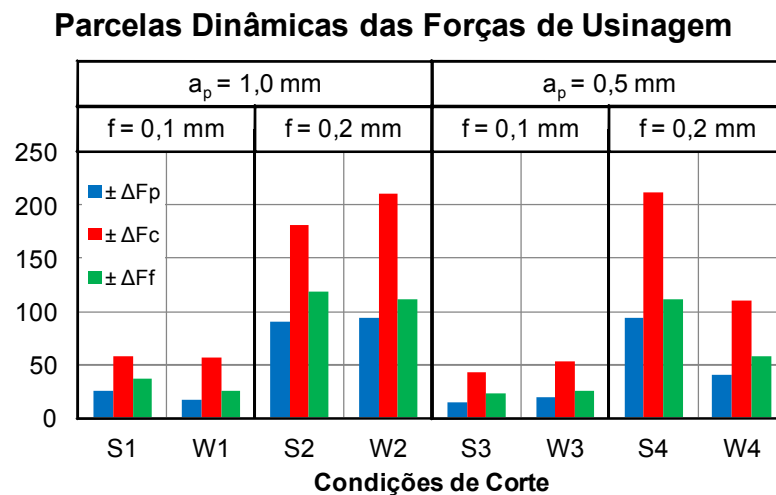


Figura 5.2 – Parcela dinâmica das componentes ortogonais da força de usinagem: 95% dos pontos encontram-se em torno do valor médio com uma variação de $\pm \Delta F$.

Pela Figura 5.2 observa-se que a profundidade de corte realmente não tem forte influência sobre as parcelas dinâmicas. Comparando W2 e W4 o resultado obtido é uma redução de 45 a 50% do valor desta primeira variável citada W2. Comparando S2 com S4 há um aumento na força de corte de 16%. Esta discrepância de resultados nestas circunstâncias acaba por gerar oscilações no acabamento superficial da peça.

Como já mencionado, a razão $a_p/f < 5$ promove uma redução de k_s . Visto que na situação 4 $a_p/f = 2,5$ e existem diferenças significativas nas geometrias *standard* e *wiper* (a geometria *wiper* promove uma redução maior que a *standard*), a parcela dinâmica para W4 diminui substancialmente em relação à W2. O mesmo não se observa para a ferramenta *standard* de S2 para S4.

A situação S4 teve uma variação da força de corte 14,6% maior em comparação com W4, sendo esta a maior diferença entre elas verificada nos esforços dinâmicos. Vale salientar ainda as semelhanças no comportamento dinâmico entre W2 e S4.

Levando em consideração que o ensaio foi realizado com o corpo de prova em balanço (preso somente pela castanha), poderia se pensar que vibração aumentaria sua intensidade de D para A, conforme Figura 4.2. Este comportamento não se reproduziu nem para ferramenta *wiper* nem para *standard*. Os valores obtidos e tratados não são suficientes para ter um posicionamento seguro sobre a influência ou não da peça em balanço na vibração do processo. Como sugestão pode-se tentar uma nova adaptação que permita a instrumentação completa da máquina com contraponto e plataforma piezelétrica Kistler.

5.2 Análise das Rugosidades Média e Total

A Figura 5.3 mostra o resultado de medição obtido a partir da aquisição de rugosidades (com três repetições) resultantes do processo de usinagem para os dados da Tabela 4.4.

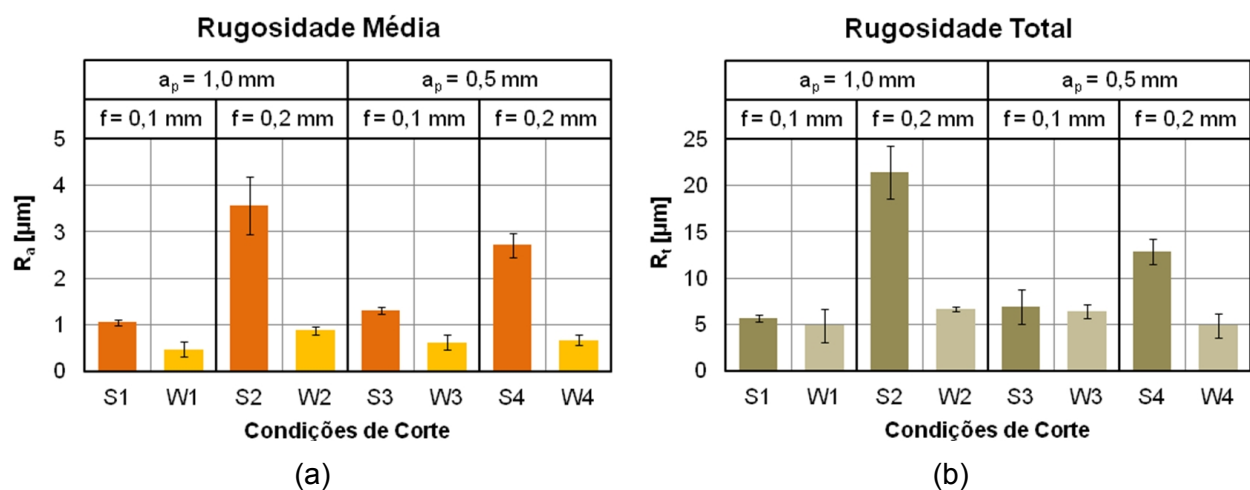


Figura 5.3 – Rugosidades e suas incertezas expandidas com confiança de 95%: (a) rugosidade média (R_a); (b) rugosidade total (R_t)

Os ensaios foram desenvolvidos com parâmetros baseados nas especificações do fabricante para as ferramentas analisadas. Provavelmente esta recomendação da Sandvik deve estar de acordo com um melhor aproveitamento no processo (maior remoção de cavaco com uma vida da ferramenta de 15 minutos garantindo boa qualidade de superfície usinada).

A melhor situação observada (tanto para R_a quanto R_t) para a ferramenta *standard* foi a S1 e para a ferramenta *wiper* a situação W1. Apesar de as parcelas estáticas e dinâmicas da força não serem as menores, as rugosidades encontradas foram as melhores.

A maior rugosidade média (R_a) alcançada (situação W2) com o inserto *wiper*, utilizando avanço $f = 0,2$ mm/volta e profundidade de corte $a_p = 1,0$ mm, foi a pior para este tipo de ferramenta e ainda assim é de alta qualidade e supera a melhor rugosidade R_a encontrada para o inserto *standard*.

Nota-se que o fator de maior influência negativa para ambas as ferramentas é o avanço (f). O melhor comportamento da *wiper* deve-se ao fato de proporcionar uma menor altura de perfil na aresta de corte da superfície gerada. A *standard* não tem a mesma capacidade por ter diferente interação de contato entre peça e ferramenta. Os raios da ferramenta *wiper* e a sua parte alisadora dificultam a formação de abaulamentos e elevações (vales e picos) oriundos do aumento de f .

Vale destacar o efeito da ferramenta *wiper* sobre a rugosidade R_t : as situações W1 e W4 praticamente apresentaram os melhores resultados (lembrando que W1 tem o maior a_p e W4 o maior f dos dois utilizados nos experimentos).

As superfícies apresentadas pelo torneamento com o inserto *wiper* são mais qualificadas do que as do inserto *standard*. Comparando as relações dos esforços de corte

com acabamento superficial reproduzido verifica-se uma interação direta entre ambos. Quanto maior o esforço sobre a ferramenta, menor é a qualidade do acabamento superficial.

Pelas Figuras 5.1 e 5.2 nota-se que não há uma diferença significativa entre os esforços cortantes como há na rugosidade. Deste modo, pode-se dizer que as forças atuantes são influentes individualmente para cada ferramenta, mas a geometria com mais de dois raios de ponta da ferramenta alisadora ainda é dominante na reprodução de um acabamento superficial de qualidade.

6 CONCLUSÕES

Apesar de ser um nicho de pesquisa ainda pouco explorado, a comparação feita entre ferramentas *wiper* e *standard* trouxe resultados condizentes com os estudos já desenvolvidos. A consideração da parcela dinâmica da força trouxe uma boa parcela de inovação ao trabalho. Verifica-se que os esforços estáticos sobre a ferramenta convencional são maiores, assim como concluíram outros autores. Por estudo das componentes dinâmicas do processo permitiu concluir que o inserto *wiper* pode também trabalhar sob regimes mais solicitados dinamicamente do que o inserto *standard* em determinadas situações, principalmente a baixos avanços combinados com baixas profundidades de corte.

Levando em consideração com relação às diferentes capacidades de reprodução de uma superfície melhor acabada com cada um dos insertos, a resposta interativa entre esforço cortante e rugosidade mostrou que, quanto maior a força sobre a ferramenta de corte, menor é a capacidade de a mesma reproduzir baixa rugosidade. Tanto para a geometria convencional quanto para a alisadora, as respostas de rugosidade média e rugosidade total variaram de acordo com as componentes ortogonais estáticas da força de usinagem.

Tendo em vista que os custos das ferramentas alisadoras e convencionais (*standard*) são iguais, conclui-se que a utilização da ferramenta alisadora (*wiper*) é economicamente viável, mesmo quando utilizada em condições fora das recomendadas pelo fabricante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas); “**NBR ISO 4287 – Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade**”, São Paulo, 2002.

Álvares, J. A.; “**Estudo dirigido: métodos para projeto, planejamento do processo e fabricação de peças assistidos por computador**”, 2001, Disponível em: <www.graco.unb.br/alvares/estudo_dirigido/Planejamento_de_Processo>. Acesso em 23 mai. 2012.

Atefi, R.; Razmavar, A.; Teimoori, F.; Teimoori, F.. “**Comparative evaluation of conventional and wiper ceramic inserts in high speed turning of inconel 718 super alloys**”. Journal of Basic and Applied Scientific Research, Vol.2, No.3, pp. 2646-2650, 2012.

Azambuja, A. S. **Análise comparativa da vida das ferramentas de corte alisadora (*wiper*) e convencional (*standard*) no torneamento de acabamento do aço SAE 4140**. 2012. 21 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L. “**Tecnologia da usinagem dos materiais**”, 7.ed., São Paulo: Artiber, 2010, 262p.

Espanhol, V. “**Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra-cavaco**”, Dissertação de Mestrado- Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

Favorit Aços Especiais. **“Catalogo Técnico Favorit”**. 12ª Edição, Brasil. 2012 (catálogo comercial)

Ferraresi, D.; **“Fundamentos da usinagem dos metais”**, São Paulo: Edgar Blücher, 1977, 800p.

Gaitonde, V. N., Karnik, S.R., Davim, J.P., Figueira, L.. **“Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts”**. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, Vol. 27, No.4, pp. 754-763, 2009.

Grzesik, W., Wanat, T., **“Surface finish generated in hard turning of quenched alloy steel parts using conventional and wiper ceramic inserts”**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No. 15, pp. 1988-1995, 2005.

Izquierdo, R. C.; Rosa, G. C.; Colpes, K. M.; Souza, A. J.; Pasa, G. S.. **“Análise comparativa das ferramentas alisadora e convencional no torneamento de acabamento a seco do aço inoxidável martensítico AISI 420”**. VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), 2013, Itatiaia – RS (*Artigo submetido para avaliação*).

Kalpakjian, S., Schmid, S.R. **“Manufacturing engineering and technology”**, 6.ed., Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, 2010, 1176p.

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”**, São Paulo: Edgard Blücher, 2009, 384p.

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

Oraby, S. E.; Hayhurst, D. R. **“ Tool life determination based on the measurement of wear and tool force ratio variation”**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 44, No.12-13, pp. 1261-1269, 2004.

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

Souza, A. J., **“Processos de fabricação por usinagem, parte 1: fundamentos da usinagem dos materiais”**, GPFAI-DEMEC-UFRGS /Apostila/ 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.

APÊNDICES

Gráficos gerados a partir da aquisição de dados de força via plataforma piezelétrica e tratados no MS Excel para uma amostragem comparativa de 1500 pontos (ou 0,75 segundos).

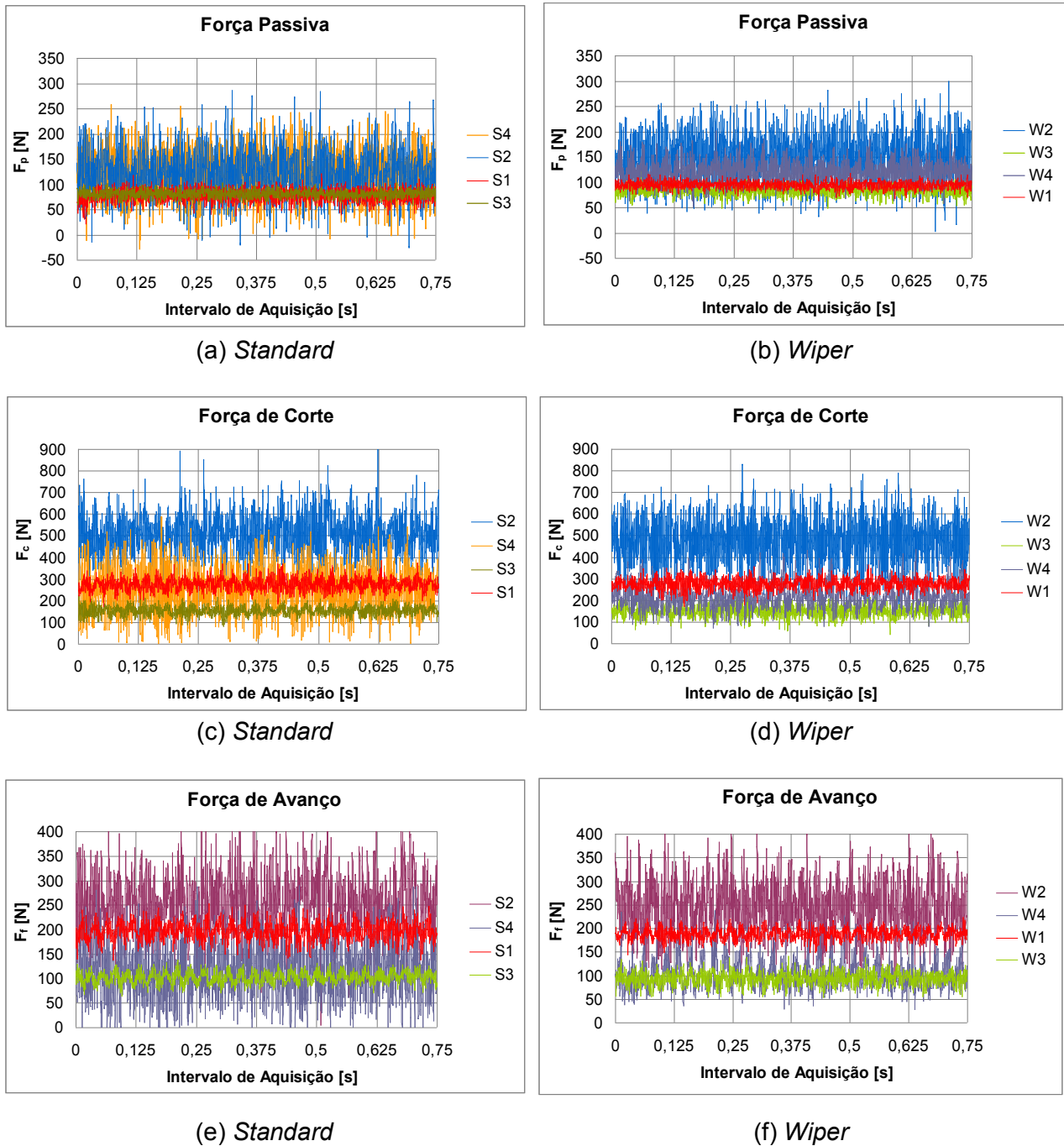


Figura A1 – (a), (c), (e) gráficos comparativos de forças passiva, de corte, e de avanço, respectivamente, para as ferramentas *standard* nas 4 situações propostas; (b), (d), (f) idem para ferramenta *wiper*.