HENRIQUE AUGUSTO BELIZÁRIO SANCHES

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM COM CORTE
INTERROMPIDO UTILIZANDO A ANÁLISE DE ESFORÇOS E
FREQUÊNCIAS.**

São Paulo
2011

HENRIQUE AUGUSTO BELIZÁRIO SANCHES

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM COM CORTE
INTERROMPIDO UTILIZANDO A ANÁLISE DE ESFORÇOS E
FREQUÊNCIAS.**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

Área de concentração:
Projeto e Fabricação

Orientador (a):
Profa. Dra. Izabel Fernanda Machado

São Paulo
2011

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de fevereiro de 2011.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Sanches, Henrique Augusto Belizario

Avaliação do processo de usinagem com corte interrompido utilizando a análise de esforços e frequências / H.A.B. Sanches. -- ed.rev. -- São Paulo, 2011.

123 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Torneamento 2. Processos de fabricação (Engenharia mecânica) 3. Vibrações 4. Corte I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.

DEDICATÓRIA

Para meus familiares, amigos e todos os demais que também contribuíram para que este trabalho se tornasse possível.

AGRADECIMENTOS

À Professora Dra. Izabel Fernanda Machado pelo apoio e orientação, não só neste trabalho como em grande parte da graduação;

Ao técnico Francisco Faustino dos Reis do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS), pelo suporte na realização do trabalho experimental;

Ao Dr. Marcelo Acácio Rodrigues pelo suporte na realização do trabalho experimental e troca de conhecimentos teóricos e práticos;

À empresa Aços Villares-GERDAU pela bolsa de mestrado e pela análise de composição dos materiais utilizados. Ao Dr. Mário Vitor Leite pela realização desta análise;

Aos colegas e amigos do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) por toda ajuda e bons momentos proporcionados durante a realização deste mestrado;

E por fim, mas não menos importante, à minha família, amigos e todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para que este trabalho se tornasse realidade.

RESUMO

Processos de torneamento, muitas vezes na condição de corte interrompido, estão presentes em diversas operações na manufatura de componentes mecânicos, seja quando uma geometria específica é necessária como função deste componente ou quando ela é resultante de uma etapa anterior no processo produtivo, como no caso de peças forjadas. Este trabalho apresenta uma metodologia para avaliação da severidade de perfis irregulares durante o processo de torneamento. Esta avaliação é realizada principalmente sob o enfoque de esforços de corte e vibração, utilizando para tanto um dinamômetro e um acelerômetro. São estudados dois casos de torneamento apresentando geometria irregular: barras de seção transversal quadrada e barras cilíndricas contendo rasgos de chaveta. O material utilizado em ambos os casos foi o aço SAE 52100. Os sinais de forças e vibração foram obtidos em diferentes etapas do torneamento, sendo cada etapa representada por uma taxa de contato diferente. As velocidades de corte utilizadas foram de 60 m/min e 120 m/min, com avanço constante e igual a 0,2 mm/volta e profundidade de corte de 1 mm. Para a medição dos esforços foi instrumentado um porta-ferramentas equipado com extensômetros. Neste porta-ferramentas foi fixada a pastilha de metal duro (TPUN 160304) utilizada nos ensaios, buscando-se assim a condição de corte ortogonal. Como análises secundárias foram realizadas medições de rugosidade nas peças e medição dos cavacos obtidos durante o processo, assim como fotografias das ferramentas utilizando microscopia óptica. Os resultados obtidos mostraram relações entre a taxa de contato e as forças médias e máximas, além de diferenças significativas nos valores de rugosidade em função da geometria da peça, permitindo assim validar a metodologia empregada para análise de torneamento em condições de corte interrompido. Portanto, é possível relacionar forças e vibrações à geometria do material por meio do aparato experimental desenvolvido.

Palavras-chave: torneamento, corte interrompido, esforços de corte, vibração.

ABSTRACT

Interrupted cutting conditions often occur in the manufacturing of many mechanical components during turning processes. For instance, if a specific geometry feature is required or even if the geometry of the work piece is a result of a previous process, like in forged parts. This work presents a method to evaluate the severity during the turning process of irregular shape work pieces. This evaluation was carried out mainly analyzing the cutting forces and vibration signals by using a dynamometer and an accelerometer, respectively. Two different irregular geometries were studied during turning: square section bar and cylindrical bar with longitudinal key beds. The samples were made of the SAE 52100 steel for both geometries. Forces and vibration signals were recorded during different turning steps; each turning step was indicated by a different contact ratio. The cutting speeds used in the tests were 60 m/min and 120 m/min, with 0.2 mm/turn of feed rate and 1 mm of cut depth. A strain gage instrumented tool-holder was used to measure the cutting forces. The cemented carbide tool (TPUN 160304) used in the tests was fixed in the tool-holder device and the turning tests were carried out near the orthogonal cutting conditions. Complementary analysis of surface quality, chips size and shape and optical microscopy photos of the tools after the tests were also conducted. The results showed a relationship between the contact ratio and the cutting forces (average and maximum), and significant differences in the surface quality (roughness) as a function of work piece geometry. These results allow validating the proposed methodology to evaluate interrupted cutting conditions in turning operations. Therefore, it is possible to relate the forces and vibrations signals to the geometry of the material by the use of the experimental apparatus developed.

Keywords: turning, interrupted cutting, cutting forces, vibration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Principais direções do processo de torneamento (Ferraresi, 1977).	4
Figura 2.2 Principais áreas de interesse no processo de torneamento (Shaw, 2005)	5
Figura 2.3 Representação de torneamento cilíndrico com ferramenta de raio de ponta r e avanço f	7
Figura 2.4 Representação de torneamento cilíndrico com ferramenta de raio de ponta r e avanço $f' < f$, de modo a se obter uma rugosidade menor.	7
Figura 2.5 Principais parâmetros de corte (Shaw, 2005).	8
Figura 2.6 Geometria da ferramenta (Diniz 2000).	8
Figura 2.7 Exemplo de distribuição de temperatura (Diniz, 2000).....	9
Figura 2.8 Modelo de cartas de Piispanen (Shaw, 2005).....	10
Figura 2.9 Volume de cisalhamento quando é considerado o raio de ponta da ferramenta (Shaw, 2005).	11
Figura 2.10 Surgimento do recalque durante a deformação.	12
Figura 2.11 Modelo de Corte Ortogonal (Altintas, 2000).	13
Figura 2.12 Ângulo de cisalhamento em função do recalque e do ângulo de saída (Shaw, 2005).	15
Figura 2.13 Decomposição das forças na região de corte segundo o círculo de Merchant (Shaw, 2005).	16
Figura 2.14 Formação do plano negativo de cisalhamento, responsável pela configuração diferenciada do cavaco na saída do corte (formato em “L”) (Pekelharing, 1980).	18
Figura 2.15 Entrada da ferramenta na peça durante o corte interrompido (Tönshoff, 1990).	20
Figura 2.16 Corte interrompido com peça cilíndrica contendo rasgos de chaveta.....	21
Figura 2.17 Ilustração de um eixo com seção transversal não regular.	21
Figura 2.18 Ilustração de um eixo que será torneado a partir de uma peça forjada em matriz aberta.....	22

Figura 2.19 Detalhe do início do contato no corte interrompido com peça predominantemente cilíndrica contendo rasgos de chaveta. O primeiro contato se dá na aresta da ferramenta para baixos ângulos de inclinação da ferramenta. (figura esquemática)	22
Figura 2.20 Exemplos de corte interrompido em perfis originais não cilíndricos.	23
Figura 2.21 Detalhe do início do contato no corte interrompido com peça usinada a partir de perfil não cilíndrico simétrico.....	23
Figura 2.22 Cadeia de aquisição de sinais, iniciando com o fenômeno estudado até o processamento (Cabral, 2006).	25
Figura 2.23 Vários possíveis sinais passando pelo mesmo conjunto de pontos (Katsuhiko, 1998).	27
Figura 2.24 Espectro de frequência obtido de forma a respeitar o critério de Nyquist (Katsuhiko,1998).	28
Figura 2.25 Formação de aliasing causado pela sobreposição de frequências (Katsuhiko,1998).	28
Figura 2.26 Esquema mostrando variação de comprimento com uma força P (Haslam,1981).....	29
Figura 2.27 Esquema dos eixos principal do extensômetro (eixo preto) e transversal (eixo vermelho).	30
Figura 2.28 Circuito da Ponte de Wheatstone com resistores (Haslam,1981).	31
Figura 3.1 Fotos dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios, sendo que os rasgos de chaveta da barra de seção transversal cilíndrica ainda não haviam sido realizados.	34
Figura 3.2 Dimensões em mm para o corpo-de-prova do tipo barra de seção transversal quadrada.....	34
Figura 3.3 Dimensões em mm para o corpo-de-prova do tipo barra de seção transversal redonda contendo rasgos de chaveta.....	35
Figura 3.4 Exemplo dos insertos triangulares de metal duro utilizados nos ensaios.....	36
Figura 3.5 Foto do torno CNC TRAUB TND 360.....	37
Figura 3.6 Dinamômetro construído tendo como base um porta-ferramentas para as pastilhas triangulares apresentadas anteriormente.....	38

Figura 3.7 Acelerômetro utilizado nos ensaios e fixado na parte inferior do dinamômetro paralelamente ao eixo de corte.	39
Figura 3.8 Indicação do posicionamento do acelerômetro no porta-ferramentas. O eixo de medição do sensor está no mesmo sentido da seta vermelha, sensível às vibrações paralelas ao sentido da força de corte.....	39
Figura 3.9 Rugosímetro empregado na análise de qualidade de acabamento superficial realizada após o torneamento dos corpos-de-prova.	40
Figura 3.10 Bancada onde foi instalado o sistema de aquisição empregado nos ensaios.	41
Figura 3.11 Detalhe do sistema para adquirir dados dos ensaios mostrando as entradas dos sinais dos sensores utilizados.....	41
Figura 3.12 Evolução da taxa de contato com o decorrer dos passes. No primeiro passe (primeira imagem à esquerda) a taxa de contato é praticamente nula, enquanto no oitavo passe (imagem na extremidade direita) a taxa de contato é igual à unidade.....	43
Figura 3.13 Seção transversal da barra cilíndrica contendo rasgos de chaveta.....	43
Figura 3.14 Arquivo gerado pelo software AqDados contendo os sinais do acelerômetro (azul), força de avanço (vermelho) e força de corte (marrom).....	45
Figura 3.15 Exemplo de gráfico obtido com o uso da função FFT do software MatLAB® ilustrando os picos relacionados às principais frequências contidas no sinal.....	47
Figura 3.16 Exemplo de fotografia da superfície de saída retirada por microscopia ótica.....	48
Figura 3.17 Exemplo de fotografia da superfície de folga retirada por microscopia ótica.....	49
Figura 4.1 Micrografia da seção transversal do corpo-de-prova em aumento de 100x no microscópio óptico.	51
Figura 4.2 Micrografia da seção transversal do corpo-de-prova em aumento de 1000x no microscópio óptico.	51
Figura 4.3 Micrografia da seção longitudinal do corpo-de-prova em aumento de 100x no microscópio óptico.	52
Figura 4.4 Micrografia da seção longitudinal do corpo-de-prova em aumento de 1000x no microscópio óptico.	52

Figura 4.5 Gráfico das forças de avanço médias e máximas para corpo-de-prova com seção transversal quadrada. Vc 60 e Vc 120 são as velocidades de corte em m/min.....	54
Figura 4.6 Gráfico das forças de avanço médias e máximas para ambos os tipos de corpo-de-prova, mostrando apenas os resultados relativos às taxas de contato mais elevadas para efeito de comparação entre as duas geometrias.....	55
Figura 4.7 Gráfico das forças de corte médias e máximas para corpo-de-prova com seção transversal quadrada. Vc 60 e Vc 120 são as velocidades de corte em m/min.....	56
Figura 4.8 Comportamento das forças de corte em função da velocidade de corte para diversos materiais, ilustrando a influência da APC em baixas velocidades para o aço (Trent, 2000).....	57
Figura 4.9 Gráfico das forças de corte médias e máximas para ambos os tipos de corpo-de-prova, mostrando apenas os resultados relativos às taxas de contato mais elevadas para efeito de comparação entre as duas geometrias.....	58
Figura 4.10 Cavacos produzidos nos ensaios, avaliação qualitativa.....	59
Figura 4.11 Ilustração do trajeto percorrido pela ponta de prova do rugosímetro (linha vermelha).....	64
Figura 4.12 Micrografia da amostra de cavaco retirada de ensaio com corpo-de-prova de seção quadrada com velocidade de corte de 60 m/min.	66
Figura 4.13 Micrografia da amostra de cavaco retirada de ensaio com corpo-de-prova de seção quadrada com velocidade de corte de 120 m/min.	67
Figura 4.14 Micrografia da amostra de cavaco retirada de ensaio com corpo-de-prova com rasgos de chaveta e com velocidade de corte de 60 m/min.....	67
Figura 4.15 Micrografia da amostra de cavaco retirada de ensaio com corpo-de-prova com rasgos de chaveta e com velocidade de corte de 120 m/min.	68
Figura 4.16 Inserto utilizado no ensaio com corpo-de-prova com rasgos de chaveta e velocidade de corte de 60 m/min.	69
Figura 4.17 Inserto utilizado em outro ensaio com corpo-de-prova com rasgos de chaveta e velocidade de corte de 60 m/min.	70
Figura 4.18 Inserto utilizado em outro ensaio com corpo-de-prova com rasgos de chaveta e velocidade de corte de 60 m/min.	70

Figura 4.19 Fotografia indicando adesão na superfície de saída de inserto utilizado em ensaio com corpo-de-prova de seção transversal quadrada e velocidade de corte de 60 m/min.....	71
Figura 4.20 Fotografia da superfície de folga indicando ocorrência de adesão em inserto utilizado em ensaio com corpo-de-prova de seção transversal quadrada e velocidade de corte de 60 m/min.....	72
Figura 4.21 Fotografia indicando adesão na superfície de saída de inserto utilizado em ensaio com corpo-de-prova de seção transversal quadrada e velocidade de corte de 120 m/min.....	72
Figura 4.22 Fotografia da superfície de folga indicando ocorrência de adesão em inserto utilizado em ensaio com corpo-de-prova de seção transversal quadrada e velocidade de corte de 120 m/min.....	73
Figura 4.23 Simulação numérica de variação de temperatura durante um ciclo de torneamento com taxa de contato de 0,5 e frequência de oscilação de 40 Hz (Chakraverti, 1984).	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Composição química fornecida pela empresa fabricante do aço ABNT 52100 utilizado nos ensaios.....	33
Tabela 3.2 Propriedades mecânicas fornecidas pela empresa fabricante do aço ABNT 52100 utilizado nos ensaios.....	33
Tabela 3.3 Matriz dos experimentos realizados apresentando os principais dados de cada condição.	44
Tabela 4.1 Resultados obtidos para os esforços de corte em Newtons. Os valores 60 e 120 após o tipo de corpo-de-prova são as velocidades de corte empregadas em m/min e TC é a taxa de contato.....	53
Tabela 4.2 Resultados médios obtidos para as frequências de corte e frequências de formação do cavaco, em Hertz. Os valores 60 e 120 após o tipo de corpo-de-prova são as velocidades de corte empregadas, em m/min.....	60
Tabela 4.3 Resultados obtidos para as frequência de corte obtidas experimentalmente e frequências de corte calculadas, em Hertz. O erro percentual também é exibido para cada condição de ensaio.....	61
Tabela 4.4 Médias aritméticas obtidas nas medições de rugosidade Ra (em μm) para os ensaios realizados nos corpos-de-prova com seção quadrada. v_c representa a velocidade de corte empregada (60 m/min ou 120 m/min).	63
Tabela 4.5 Médias aritméticas obtidas nas medições de rugosidade (em μm) para os ensaios realizados nos corpos-de-prova com rasgos de chaveta. Meio, saída e entrada descrevem a posição da medição na peça.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institution
APC	Aresta Postiça de Corte
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing Materials
DFT	Discrete Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform
SAE	Society of Automotive Engineers
HSS	Aço rápido (High Speed Steel)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Óptica
LFS	Laboratório de Fenômenos de Superfície

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo de folga
a_p	Profundidade de corte
A	Área
A_s	Área do plano de cisalhamento
D	Diâmetro
Φ	Ângulo de cisalhamento
f	Avanço
f_a	Frequência de amostragem
f_q	Frequência de quebra do cavaco
F_a	Força de Avanço
F_c	Força de Corte
F_s	Força cisalhante
F_p	Força passiva
GF	Fator do extensômetro (<i>Gage Factor</i>)
H_1	Espessura do material sendo removido
H_2	Espessura do cavaco
k_s	Pressão Específica de Corte
KT	Desgaste de cratera
n	Rotação
N_s	Força normal
L	Comprimento
L_c	Comprimento de corte
r	Raio de ponta
r	Razão de corte
ρ	Resistividade
R	Resistência
R_a	Média aritmética do perfil
R_h	Recalque
R_p	Altura total dos picos do perfil
R_t	Altura total do perfil
σ	Tensão normal
τ	Tensão de cisalhamento

t	Espessura
T_a	Período de amostragem
TC	Taxa de contato
VB	Desgaste de flanko
v_c	Velocidade de corte
v_f	Velocidade de avanço
V	Diferença de potencial
ν	Coeficiente de Poisson
ω_a	Frequência angular de amostragem
γ	Ângulo de saída

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Usinagem.....	3
2.1.1	Processo de Torneamento	3
2.1.2	Parâmetros	5
2.1.3	Modelo de Formação do Cavaco.....	10
2.1.4	Torneamento com corte interrompido.....	17
2.1.5	Diferentes condições geométricas para o corte interrompido.....	21
2.2	Sensores e Aquisição de Sinais.....	25
2.2.1	Teoria da Amostragem	26
2.2.2	Extensometria.....	28
2.2.3	Ponte de Wheatstone	30
3	MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS	33
3.1	Corpo-de-prova	33
3.2	Ferramenta de Corte.....	36
3.3	Torno.....	37
3.4	Dinamômetro.....	38
3.5	Acelerômetro	39
3.6	Rugosímetro.....	40
3.7	Sistema de Aquisição.....	41
3.8	Metodologia Experimental.....	42
3.8.1	Execução dos ensaios de usinagem (torneamento com corte interrompido).....	42
3.8.2	Tratamento dos dados.....	45
3.8.3	Análises complementares.....	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50

4.1	Caracterização do material	50
4.2	Esforços de Corte.....	53
4.2.1	Forças de Avanço.....	53
4.2.2	Forças de Corte.....	55
4.3	Frequência de Corte.....	59
4.4	Acabamento superficial	63
4.5	Análise dos cavacos.....	66
4.6	Análise das ferramentas.....	69
5	CONCLUSÕES.....	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
	ANEXO 1 – CÓDIGO-FONTE DAS FUNÇÕES DE MATLAB®	81
	ANEXO 2 – FOTOGRAFIAS DAS FERRAMENTAS DE CORTE	87

1 INTRODUÇÃO

Torneamento é um processo de usinagem no qual uma ferramenta remove material não desejável produzindo uma superfície de revolução (Shaw, 2000). Desta forma, o corte pode ser considerado contínuo quando as interrupções são assumidas como de pequena importância (Pekelharing, 1980). Porém, durante a usinagem de materiais forjados o corte interrompido ocorre gerando ciclos termo-mecânicos devido à entrada e saída da ferramenta no material, o que diminui consideravelmente a vida da ferramenta (Pekelharing, 1980). Trabalhos anteriores (Rodrigues et al., 2008) analisaram o comportamento do desgaste da ferramenta quando o torneamento se dava de forma interrompida. Os resultados mostraram que o corte interrompido é sempre mais severo que o contínuo.

A avaliação do processo de torneamento pode ser feita utilizando-se diferentes técnicas, muitas delas complementares. Existem muitos trabalhos relacionando as forças de corte, vibrações e rugosidade durante a usinagem. As medições e dados podem ser obtidos utilizando-se porta-ferramentas equipados com extensômetros ou sensores piezelétricos conectados a sistemas para adquirir e registrar as forças durante a usinagem. Desta forma, estes resultados podem ser usados para determinar relações entre os parâmetros de corte, rugosidade, danos na superfície usinada, desgaste de ferramenta e forças de corte (Lin et al., 2001; Strafford, 1997; Dimla et al., 2000a; Dimla et al., 2000b). Porém, o modelo matemático do comportamento mecânico do material é difícil de ser obtido uma vez que durante o processo de usinagem a deformação, a taxa de deformação, as temperaturas e a microestrutura não são homogêneas (Shaw, 2005; Dimla et al., 2000a; Dimla et al., 2000b). Além disso, é necessário considerar os detalhes geométricos do material, conforme exemplificado acima para peças forjadas. Materiais apresentando arestas e superfícies descontínuas são usualmente usinados na indústria, de modo que estas variáveis devem ser consideradas para modelar o processo.

A avaliação do corte interrompido pode ser realizada pela análise dos ciclos mecânicos durante o processo de corte, e pode ser conduzida baseada na taxa de contato, que é definida como sendo a relação entre o comprimento real usinado e o comprimento total percorrido em uma revolução da peça (Tönshoff, 1990). Diferentes

geometrias levam a diferentes taxas de contato: barras cilíndricas apresentam taxa de contato constante e igual a 1 durante o torneamento cilíndrico; barras com seção transversal poligonal apresentam taxa de contato constante e inferior a 1; barras com furos transversais apresentam taxa de contato variável. Este mesmo tipo de análise pode ser estendido para as forças de corte, as quais aumentam após a entrada da ferramenta no material da peça e diminuem com a saída da ferramenta (Tönshoff, 1990).

Este trabalho está relacionado ao monitoramento dos sinais das forças de corte e dos sinais de vibração durante o torneamento cilíndrico de materiais que apresentam corte interrompido: barras de seção transversal quadrada e barras cilíndricas contendo rasgos longitudinais (rasgos de chaveta). O objetivo principal é desenvolver uma metodologia mostrando que é possível relacionar forças e vibrações à geometria do material por meio do aparato experimental desenvolvido. Essa metodologia pode ser utilizada em operações industriais que estejam sujeitas à condição de corte interrompido como no caso de usinagem pesada de peças forjadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Usinagem

O termo usinagem corresponde a uma gama de processos que visam dar formas finais aos produtos (peças) através da remoção de material destas. Estes processos podem ser classificados como processos de corte (torneamento, fresamento, furação), processos abrasivos (retificação) e processos não-tradicionais (elétricos, ópticos e químicos) (Kalpakjian, 2000). O processo de torneamento, especificamente, é caracterizado pela deformação e consequente remoção do material da peça, sendo que esta rotaciona sobre seu próprio eixo enquanto está em contato com uma ferramenta (Ferraresi, 1977).

2.1.1 Processo de Torneamento

O processo de torneamento consiste na utilização de ferramentas com corte em uma única região, a qual é fixa. A ferramenta remove material de uma peça girante, através do mecanismo de cisalhamento. O processo é caracterizado pela presença de grandes deformações, altas taxas de deformação e elevados valores de temperatura e gradientes de temperatura (Shaw, 2005). No processo de torneamento se verifica a presença de três direções principais, expostas na Figura 2.1:

Figura 2.1 Principais direções do processo de torneamento (Ferraresi, 1977).

A direção de corte é dada pelo vetor tangente à velocidade de corte em um ponto escolhido dentro da área contato da ferramenta com a peça. Esta direção é perpendicular tanto ao eixo de rotação da peça quanto à linha radial que parte do centro da peça e acaba no ponto de corte escolhido. Na figura acima, tanto v_c (velocidade de corte) quanto F_c (força de corte) estão na direção de corte. A direção de avanço é dada pelo movimento de avanço da ferramenta em relação à peça, sendo esta paralela ao eixo de rotação da peça quando ocorre o torneamento cilíndrico. v_f (velocidade de avanço) e F_f (força de avanço) estão na direção de avanço na figura apresentada. A última direção é a de penetração, perpendicular às duas anteriores e no sentido radial da peça (Ferraresi, 1977). Conforme a Figura 2.1, F_p (força passiva) está na direção de penetração (Machado et al., 2009).

No processo de corte, segundo Shaw (Shaw, 2005), existem três áreas de interesse na região ferramenta-material usinado. A Figura 2.2 mostra essas áreas.

Figura 2.2 Principais áreas de interesse no processo de torneamento (Shaw, 2005)

A primeira área se estende ao longo do plano de cisalhamento (abordado no item 3 – Modelo de Formação do Cavaco) e forma a fronteira entre a região deformada e não deformada do material metálico. A segunda região está entre o cavaco e a face da ferramenta e a terceira está entre a superfície usinada e a ferramenta.

Na primeira área, o interesse está focado nas características, ou mecanismos, de deformação plástica do material. Esses mecanismos são diferentes, dependendo do material analisado. Já na segunda área, tem-se o atrito e o desgaste da ferramenta ou da combinação ferramenta-material da peça. O desgaste da ferramenta pode ocorrer de várias formas (desgaste adesivo, abrasivo, por difusão ou fadiga), ocorrendo interação com o meio.

Na terceira região, o interesse está na qualidade da superfície produzida e, portanto, na rugosidade. A rugosidade é uma das formas de se avaliar a integridade da superfície, sendo mais importante em processos de acabamento, onde muitas vezes faz parte das especificações do produto. A rugosidade é caracterizada pela presença de sulcos formados pela ferramenta durante o corte. A rugosidade pode ser analisada em termos de parâmetros como rugosidade média (R_a), rugosidade máxima (R_y) e rugosidade total (R_t), dentre outros (Diniz, 2000).

2.1.2 Parâmetros

Alguns dos principais parâmetros do processo de torneamento serão listados a seguir. Estes parâmetros caracterizam o processo, sendo possível optar por diferentes arranjos dependendo do tipo de operação. Em operações de desbaste, por exemplo, busca-se retirar o maior volume de material possível em detrimento da

qualidade superficial. Em operações de acabamento a rugosidade é importante, de forma que o volume máximo de material a ser removido fica limitado pelo acabamento resultante na peça.

Também se utilizam conjuntos de parâmetros diferentes em função da produtividade, onde por um lado pode-se buscar uma maior produtividade com maior custo ou operar na região de custo mínimo com uma produtividade menor.

Velocidade de Corte (v_c): velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça. Para o processo de torneamento, onde se tem peça rotativa, é calculada em módulo por:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$$

Eq. 1

Onde D é o diâmetro usinado (em mm), n a rotação da peça (rotação do eixo-árvore da máquina, em rpm) e v_c em m/min.

A velocidade de corte está intimamente relacionada com a taxa de deformação do material sendo usinado. Aumentos na velocidade de corte geralmente elevam a temperatura na região de corte, influenciando o comportamento mecânico do material (Johnson, 1983).

Avanço (f): representa o percurso de avanço em cada volta e é dado em mm/volta. Influencia a magnitude da força de avanço resultante do processo assim como a espessura do cavaco formado. Também guarda relação com o acabamento superficial, onde maiores taxas de avanço tendem a aumentar a rugosidade do material usinado para um mesmo raio de ponta. Isto ocorre principalmente devido ao fator geométrico, conforme representado na Figura 2.3 e na Figura 2.4.

Figura 2.3 Representação de torneamento cilíndrico com ferramenta de raio de ponta r e avanço f .

Figura 2.4 Representação de torneamento cilíndrico com ferramenta de raio de ponta r e avanço $f' < f$, de modo a se obter uma rugosidade menor.

Velocidade de Avanço (v_f): produto do avanço pela rotação da ferramenta e tem unidade de mm/min. Parâmetro muitas vezes relacionado à produtividade da operação, juntamente com a profundidade de corte.

Profundidade de Corte (a_p): profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho e é dada em mm.

A Figura 2.5 apresenta os principais parâmetros de corte em uma vista de topo do processo de torneamento cilíndrico.

Figura 2.5 Principais parâmetros de corte (Shaw, 2005).

A ferramenta de corte também apresenta algumas regiões de interesse, em especial a superfície de saída e a superfície principal de folga, conforme mostra a Figura 2.6.

Figura 2.6 Geometria da ferramenta (Diniz 2000).

A superfície de saída é por onde passa o material já deformado (cavaco), sendo que sobre ela, próximo à aresta de corte, ocorre um aumento pronunciado de temperatura (da ordem de 900°C , dependendo de diversos fatores como severidade dos parâmetros de corte impostos, materiais da ferramenta e da peça e fluido de corte utilizado). Uma distribuição espacial de temperaturas típica é apresentação na

Figura 2.7, relativa ao plano de trabalho. O ângulo que a superfície de saída faz com a direção de avanço é denominado ângulo de saída (γ).

Figura 2.7 Exemplo de distribuição de temperatura (Diniz, 2000)

A superfície secundária de folga é a que está em contato com a superfície recém-usinada da peça, sendo, portanto, importante no acabamento superficial. Superfícies secundárias de folga com maior ângulo de inclinação em relação à direção de corte geram peças com menor rugosidade, porém levam a uma fragilização na ponta da ferramenta, tornando-a mais suscetível a fraturas (impacto devido ao corte interrompido, por exemplo).

Uma indicação do desgaste resultante na ferramenta pode ser obtida medindo as alterações na superfície de folga (VB) e na superfície de saída (KT) (Doyle, 1962). A dureza, tanto do material da peça quanto do material da ferramenta, influencia diretamente no processo de usinagem. Verifica-se que quanto maior a diferença entre estas grandezas (dureza do material da peça e dureza do material da ferramenta), maior será o desgaste observado no material menos duro e menor o desgaste do material que apresenta maior dureza (Hutchings, 1992). No entanto, a dureza não é determinística neste sentido. A microestrutura, propriedades físicas e o comportamento do material durante a formação do cavaco devem ser levados em conta em uma análise do desgaste da ferramenta ou em uma análise mais geral da usinabilidade do material (Saldarriaga et al., 2007).

Alguns parâmetros são de especial relevância quando se estuda o desgaste de ferramentas: a geometria desta, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, entre outros (Diniz, 2000). A influência de alguns destes fatores já foi estudada para diversos tipos de material, como é o caso da velocidade de corte. Sabe-se que

esta tende a aumentar o desgaste de uma forma mais severa do que proporcionais aumentos de avanço e da profundidade de corte (Kalpakjian, 2000).

O desgaste medido na superfície de folga está relacionado principalmente com o mecanismo de abrasão, onde partículas de cavaco podem atritar-se contra a superfície de folga da ferramenta. O desgaste observado na superfície de saída é causado em grande parte pelo deslizamento do cavaco sobre esta superfície, onde a ocorrência de altas temperaturas tende a intensificar o fenômeno. Outros mecanismos de desgaste podem estar presentes, em maior ou menor escala, como a adesão, quando ocorre a presença de aresta postiça de corte (APC) (Diniz, 2000).

2.1.3 Modelo de Formação do Cavaco

O modelo de formação do cavaco desenvolvido por Piispanen (Piispanen, 1976) por volta de 1937, faz uma analogia do material sendo cortado com um baralho de cartas que escorregam conforme atingem um plano específico, conforme ilustra a Figura 2.8. As cartas – parcelas de material – de 1 a 6 já passaram pelo plano onde ocorre o cisalhamento e escoam sobre a superfície de saída da ferramenta, enquanto as parcelas de 7 a 10 ainda se encontram no material da peça e serão cortadas na sequência do processo de corte.

Figura 2.8 Modelo de cartas de Piispanen (Shaw, 2005).

É visível que este modelo superestima a não-homogeneidade da deformação, o que se pode verificar através da análise de cavacos reais. Verifica-se, no processo real, que o dorso do cavaco (superfície oposta àquela que escoar sobre a superfície de saída) é realmente irregular em função de uma deformação não homogênea, porém de uma forma muito menos intensa do que a proposta pelo modelo.

Outra hipótese assumida é o fato do cisalhamento ocorrer em uma superfície completamente plana (interface entre as parcelas de material 6 e 7, na figura apresentada), orientada com um ângulo fixo em relação à direção de corte. Sabe-se que devido à presença do raio de ponta na ferramenta, o lugar geométrico onde ocorre o cisalhamento passa a ser um volume na ponta da ferramenta, e não um plano. A Figura 2.9 apresenta um exemplo deste volume:

Figura 2.9 Volume de cisalhamento quando é considerado o raio de ponta da ferramenta (Shaw, 2005).

O modelo também ignora o cisalhamento secundário que ocorre na interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta. Observando-se a Figura 2.10 pode-se notar que as linhas que caracterizam a deformação do material são mais curvas na porção inferior do cavaco, explicando assim sua curvatura no processo real.

Figura 2.10 Surgimento do recalque durante a deformação.

Outro modelo de formação do cavaco é o Modelo de Corte Ortogonal, ilustrado pela Figura 2.11. Neste modelo também é assumido que o cisalhamento ocorre em um plano inclinado com um ângulo fixo em relação à direção de corte. Também se assume que a ferramenta é perfeitamente pontiaguda (não há raio de ponta) e que a largura da ferramenta é superior à largura do material sendo cortado (ambas na direção normal à figura), sendo a última constante (profundidade de corte fixa) (Altintas, 2000).

Além das limitações impostas anteriormente, também se supõe um estado plano de deformação, no qual a largura do cavaco cortado é igual à profundidade de corte, ou seja, não há deformação na direção de penetração. Verifica-se que esta hipótese é válida somente se a relação entre avanço e profundidade for menor do que 0,2 (Shaw, 2005), ou seja:

$$\frac{a_p}{f} > 5$$

Eq. 2

Obedecendo todas estas limitações, o Modelo de Corte Ortogonal indica que as tensões normais e de cisalhamento serão constantes no plano onde ocorre o cisalhamento do material (Shaw, 2005). Uma forma prática de se obter esta

condição é realizando o torneamento cilíndrico de tubos, com a aresta de corte da ferramenta paralela à seção transversal do tubo.

Figura 2.11 Modelo de Corte Ortogonal (Altintas, 2000).

Ambos os modelos utilizam o conceito de plano de cisalhamento, sendo este o plano no qual se dá a deformação do material usinado. Observando a Figura 2.10 verifica-se que este plano se estende na direção normal à figura, e está inclinado de um ângulo Φ em relação à direção de corte, sendo que esta na figura mostrada é horizontal. Este ângulo recebe a denominação de ângulo de cisalhamento (Φ) e é de grande importância na formulação matemática dos modelos de corte.

Sabe-se que quanto menor este ângulo de cisalhamento, maior é a deformação imposta ao material usinado, maiores são os esforços atuando na ferramenta e, conseqüentemente, maior a demanda de energia por parte do sistema.

Para o cálculo do ângulo de cisalhamento é necessária a introdução de um segundo conceito, denominado recalque (Rh). Observa-se, durante o torneamento cilíndrico, que a espessura do cavaco formado é superior ao avanço utilizado no processo. Esta situação é apresentada na Figura 2.10.

O recalque representa a razão entre a espessura do cavaco formado ($H2$, na figura) e a parcela de material da peça sendo removida ($H1$, numericamente igual ao avanço). Desta forma:

$$Rh = \frac{H2}{H1}$$

O valor de recalque encontrado também pode ser relacionado à quantidade de deformação à qual o material foi sujeito no plano de cisalhamento. Verifica-se assim que maiores valores de recalque indicam deformações maiores durante o torneamento.

Alguns autores, entre eles Shaw, preferem utilizar o conceito de razão de corte (cutting ratio), representado por r , sendo este o inverso do recalque, ou seja:

$$r = \frac{1}{Rh} = \frac{H1}{H2}$$

Eq. 4

Pode-se notar que tanto o recalque quanto a razão de corte podem ser obtidos utilizando-se os valores de comprimento do cavaco e o deslocamento da peça relativo à ferramenta na direção de corte em um intervalo de tempo. Assim, denominando L_c ao comprimento do cavaco usinado e L ao deslocamento da ferramenta em relação à peça, tem-se:

$$H2 \cdot L_c = H1 \cdot L \cong f \cdot (V_c \cdot \Delta t)$$

Eq. 5

Uma vez que não ocorre variação da massa específica, obrigatoriamente o volume antes de passar pelo plano de cisalhamento deve ser o mesmo após passar por este plano, permitindo assim a utilização da Equação 5.

Observando-se agora a Figura 2.12, temos que:

$$r = \frac{H1}{H2} = \frac{A \cdot B \cdot \sin \phi}{A \cdot B \cdot \cos(\phi - \gamma)}$$

Eq. 6

Portanto:

$$\tan \phi = \frac{r \cdot \cos \gamma}{1 - r \cdot \sin \gamma}$$

Eq. 7

Obtém-se assim o ângulo de cisalhamento em função do recalque e do ângulo de saída da ferramenta (γ). Porém, ressalta-se aqui que na prática a obtenção destas medidas é complicada.

Figura 2.12 Ângulo de cisalhamento em função do recalque e do ângulo de saída (Shaw, 2005).

De posse do ângulo de cisalhamento, é possível encontrar os valores das tensões normais e de cisalhamento atuando no plano de cisalhamento. Para tanto, utilizam-se equipamentos capazes de medir as forças de corte (F_c , obtida na direção de corte) e de avanço (F_a , obtida na direção de avanço) durante o processo de torneamento. Porta-ferramentas equipados com extensômetros são exemplos de dispositivos capazes de medir os esforços de corte, assim como plataformas piezelétricas.

Desta forma, com base na Figura 2.13, a tensão cisalhante no plano de cisalhamento é dada por:

$$\tau = \frac{F_s}{A_s}$$

Eq. 8

Onde A_s é a área do plano de cisalhamento, que pode ser obtida por:

$$A_s = \frac{a_p \cdot f}{\sin \phi}$$

Eq. 9

Figura 2.13 Decomposição das forças na região de corte segundo o círculo de Merchant (Shaw, 2005).

A força de cisalhamento F_s é obtida pela decomposição da força de corte (F_c) e da força de avanço (F_a). Desta forma:

$$\tau = \frac{(F_c \cdot \cos \phi - F_a \cdot \sin \phi) \cdot \sin \phi}{a_p \cdot f}$$

Eq. 10

A tensão normal no plano de cisalhamento é dada por:

$$\sigma = \frac{N_s}{A_s}$$

Eq. 11

A força normal ao plano de cisalhamento, N_s , pode ser obtida pela decomposição das forças de corte e avanço, de modo análogo ao efetuado no cálculo de F_s . A tensão normal no plano de cisalhamento será dada então pela expressão:

$$\sigma = \frac{(F_c \cdot \sin \phi + F_a \cdot \cos \phi) \cdot \sin \phi}{a_p \cdot f}$$

Eq. 12

Estas expressões permitem o cálculo das tensões normais e cisalhantes no plano de cisalhamento partindo apenas do ângulo Φ (função do recalque e do ângulo de saída da ferramenta), da profundidade de corte e avanço (parâmetros de corte escolhidos e impostos ao processo) e das forças de corte e de avanço obtidas por meio de um dispositivo de medição. Tais fórmulas são importantes uma vez que, dentro das hipóteses simplificadoras, permitem relacionar os valores de tensão de escoamento obtidos pelas equações constitutivas aos parâmetros de corte e de geometria escolhidos para o processo (f , a_p , α) por meio de medições do recalque (R_h) e das forças de corte e avanço (F_c e F_a) (Shaw, 2005).

2.1.4 Torneamento com corte interrompido

O torneamento com corte interrompido surge quando são processadas peças cuja geometria inicial é diferente da cilíndrica, como barras de seção quadrada, por exemplo, ou quando existem descontinuidades em materiais cilíndricos, como furos transversais. Três fatores relevantes surgem quando o processo de corte se dá de forma interrompida: a entrada da ferramenta na peça, a saída da ferramenta quando se inicia a interrupção no corte e os ciclos térmicos e mecânicos (Pekelharing, 1980).

Estes três fatores são em geral desconsiderados na análise do torneamento realizado de forma contínua, porém apresentam grande importância quando do estudo do corte interrompido, pois contribuem para uma maior probabilidade de avariar a ferramenta.

Na saída da ferramenta é notado o aparecimento de uma segunda zona de cisalhamento (negativa) e uma formação diferenciada do cavaco, que passa a apresentar uma inflexão na sua porção final. Este comportamento é ilustrado na Figura 2.14:

Figura 2.14 Formação do plano negativo de cisalhamento, responsável pela configuração diferenciada do cavaco na saída do corte (formato em "L") (Pekelharing, 1980).

Existe diferenciação entre o corte interrompido ocasionado em função de assimetria axial na peça e o imposto através de recuo da ferramenta cortante, também chamado ciclo de interrupção (Chandrasekaram, 1994). No caso do primeiro, quando o corte é retomado existe uma variação negativa da espessura do cavaco formado correspondente ao movimento de avanço que ocorreu em vazio, ou seja, quando a peça não estava em contato com a ferramenta. Já no segundo, quando se tem o ciclo de interrupção, esta variação ocorre de forma positiva, com a espessura do cavaco aumentando conforme o regime de corte é retomado.

Em função destes períodos em que não está ocorrendo efetivamente remoção de material é possível definir a taxa de contato, razão entre o tempo de contato entre a peça e a ferramenta e o tempo de corte total (Tönshoff, 1990). Esta taxa é calculada tendo como base uma revolução da peça. Diferentes geometrias podem proporcionar taxas de contato distintas: uma peça cilíndrica apresentaria taxa

de contato constante e igual à unidade, barras de seção transversal poligonal (quadradas, oitavadas, etc.) teriam taxas de contato constantes, porém inferiores à unidade e cilindros contendo furos transversais, por sua vez, apresentariam taxas de contato não constantes no tempo. A taxa de contato fornece também um indicativo do ciclo térmico que está ocorrendo na ferramenta, composto pelo período de aquecimento, quando ocorre o corte e pelo período de resfriamento, quando a ferramenta não está em contato com a peça. Esta mesma análise pode também ser estendida para os esforços de corte, os quais crescem em magnitude durante o período de contato e diminuem de intensidade quando não há remoção de material da peça pela ferramenta. No que concerne à geometria da ferramenta, sabe-se que quanto mais positivo o ângulo de saída, menor é a deformação imposta ao material, diminuindo desta forma os esforços de corte. Porém, nesta situação, existe uma fragilização da ferramenta, possibilitando a ocorrência de sua fratura durante o torneamento realizado de forma interrompida (Ferraresi,1977).

Foi verificada a interdependência entre a taxa de contato e a vida da ferramenta (Tönshoff,1988), assim como a relação entre a fratura frágil da mesma e o ponto da superfície de saída onde se dá o contato inicial no corte interrompido (Tönshoff,1990). Observando-se a Figura 2.15, é colocado que quando o contato inicial se dá no ponto S é menor a resistência a uma possível fratura do que quando este contato se dá no ponto U.

Figura 2.15 Entrada da ferramenta na peça durante o corte interrompido (Tönshoff,1990).

Com base nestas considerações foi definido o percentual do plano de entrada, $\overline{A_c}$, que é a razão entre a área que entra em contato com a peça no processo de corte antes de ser atingido o ponto S e a área total do paralelogramo STUV. Caso o contato se dê justamente no ponto S, $\overline{A_c}$ será nulo, sendo apresentada esta como a condição de contato inicial mais severa (Tönshoff,1990).

Em trabalhos anteriores em corte interrompido foi observada uma diminuição na vida da ferramenta com o aumento da velocidade de corte e com o aumento do avanço (Lo Casto,1988), (Tönshoff,1990). Ensaios realizados em um aço ABNT 1040 revelaram que a velocidades de corte mais altas, o efeito de variações do avanço é mais pronunciado, além de haver uma faixa ótima de operação onde a vida da ferramenta é máxima. É sugerida a relação deste comportamento com o fenômeno da difusão do cobalto presente nas ferramentas utilizadas, nas condições testadas (Lo Casto,1988).

2.1.5 Diferentes condições geométricas para o corte interrompido

O processo de torneamento com corte interrompido pode acontecer em diferentes condições. Pode-se ter um perfil originariamente cilíndrico contendo interrupções (como furos transversais ou rasgos longitudinais, exemplificado na Figura 2.16) ou um perfil não regular, como é muitas vezes o caso de peças obtidas por forjamento em matriz aberta, como ilustram as Figuras 2.17 e 2.18.

Figura 2.16 Corte interrompido com peça cilíndrica contendo rasgos de chaveta.

Figura 2.17 Ilustração de um eixo com seção transversal não regular.

Figura 2.18 Ilustração de um eixo que será torneado a partir de uma peça forjada em matriz aberta.

É possível perceber que no primeiro caso (cilindro contendo rasgos longitudinais) a interrupção do corte se dá de forma abrupta, uma vez que quando o rasgo longitudinal passa pela ferramenta a profundidade de corte se torna nula. Desta configuração geométrica resulta que quando o corte é retomado, o contato peça-ferramenta se dá geralmente na região interior da superfície de saída (grandes ângulos de inclinação da ferramenta são a exceção), como ilustra a Figura 2.19. Após isto o contato se estende do meio da ferramenta até a ponta, voltando à situação de corte contínuo até nova passagem do rasgo longitudinal.

Figura 2.19 Detalhe do início do contato no corte interrompido com peça predominantemente cilíndrica contendo rasgos de chaveta. O primeiro contato se dá na aresta da ferramenta para baixos ângulos de inclinação da ferramenta. (figura esquemática)

No caso do corte interrompido de peças de seção transversal não regular, uma parcela da aresta da ferramenta fica imersa, de modo a promover o corte durante toda a revolução da peça. Já a parcela posicionada em diâmetros maiores está sujeita a um regime contínuo de variação da profundidade de corte. Este

comportamento foi ilustrado na Figura 2.17, que mostra a seção transversal de um cilindro irregular durante o processo de torneamento. O círculo azul, de raio R_u , representa o eixo já usinado e R_o é o raio externo da peça. A diferença $R_o - R_u$ mostra a profundidade de corte a cada posição angular da peça, sendo que para toda uma revolução existe um diâmetro abaixo do qual sempre ocorrerá o corte, representado por D_c .

Outra configuração para o corte interrompido é aquela onde a peça possui um perfil extrudado ou laminado não cilíndrico. Um exemplo para este caso é a fabricação em alta escala de conexões que partem da barra no perfil não cilíndrico. A Figura 2.20 apresenta este tipo de peça e a figura 2.21 ilustra a condição inicial de contato para uma dada configuração do sistema.

Figura 2.20 Exemplos de corte interrompido em perfis originais não cilíndricos.

Figura 2.21 Detalhe do início do contato no corte interrompido com peça usinada a partir de perfil não cilíndrico simétrico.

Uma característica importante vista no corte de peças conforme a Figura 2.21 é que existe um diâmetro no qual o corte predominantemente interrompido passa a ser predominante contínuo, isto é, quando a taxa de contato se torna 0,5 tem-se a ferramenta passando o mesmo tempo tanto em contato com a peça quanto em vazio.

O contato inicial da ferramenta com a peça ilustrada na Figura 2.21 será na extremidade da pastilha e na aresta da peça, condição diferente àquela apresentada na Figura 2.19.

2.2 Sensores e Aquisição de Sinais

O propósito de uma medição é estabelecer um valor a uma variável ou a um conjunto de variáveis. Um sistema de aquisição deve conter elementos capazes de amplificar o sinal medido, quando necessário, filtrar ruídos eventualmente presentes, converter um sinal analógico para o formato digital e permitir a visualização e manipulação dos dados adquiridos (Katsuhiko,1998). A Figura 2.22 apresenta uma cadeia de aquisição, mostrando os principais componentes presentes e que serão descritos em detalhes a seguir.

Figura 2.22 Cadeia de aquisição de sinais, iniciando com o fenômeno estudado até o processamento (Cabral, 2006).

Fenômeno: atividade da qual se deseja extrair a medição de uma ou mais grandezas especificadas, como velocidade, força, composição química e outras. Cabe aqui ressaltar o fato de que algumas grandezas só podem ser medidas indiretamente, dependendo de uma correlação com outras variáveis, estas sim, mensuráveis.

Sensor ou transdutor: dispositivo capaz de converter a grandeza medida presente no fenômeno em uma variável de fácil manipulação. É bastante comum a transformação de grandezas em variáveis como tensão e deslocamento, uma vez

que as últimas apresentam muita flexibilidade quanto à leitura e tratamento (Katsuhiko,1998).

Condicionador de Sinal: Vários instrumentos que modificam o sinal adquirido incluem-se nesta categoria. Filtros são capazes de tratar o sinal de forma a reduzir ou extinguir ruídos, excluindo frequências não relevantes para o estudo do fenômeno. Amplificadores transformam sinais de baixa magnitude em sinais de alta magnitude.

Conversores transformam um sinal analógico em digital, facilitando o tratamento matemático posterior, realizado através de computadores, por exemplo (Katsuhiko,1998).

A calibração é um processo importante na aquisição de sinais, uma vez que sensores e transdutores só irão fornecer variáveis de saída confiáveis quando devidamente calibrados. A calibração consiste na excitação do sistema por um valor conhecido e posterior comparação da variável de saída a um padrão. Ressalta-se que a precisão depende tanto das características do dispositivo a ser calibrado quanto da precisão de leitura das variáveis de entrada e de saída do sistema.

Deve-se efetuar novas calibrações sempre que o sistema sofrer alguma modificação, seja esta mecânica, química ou ambiental. A importância desta última não deve ser desprezada, pois muitos sensores são afetados pela temperatura, pressão ou mesmo umidade. Certos aspectos construtivos podem tornar o sistema insensível a estas mudanças, garantindo sua precisão mesmo quando utilizado em uma ampla faixa de condições externas.

2.2.1 Teoria da Amostragem

A amostragem de um sinal contínuo consiste em trocar os valores do sinal por um conjunto discreto de pontos, cujos valores são iguais ao valor do sinal nos chamados instantes de amostragem. Como resultado, a amostragem é uma sequência de números obtidos em intervalos fixos de tempo (amostragem uniforme) (Katsuhiko,1998).

O período de amostragem, que é o tempo decorrido entre duas amostragens consecutivas, será denominado T_a . A frequência de amostragem é o inverso do período de amostragem (Katsuhiko, 1998), ou seja:

$$f_a = \frac{1}{T_a} \text{ para a frequência em Hz, ou}$$

$$w_a = \frac{2 \cdot \pi}{T_a} \text{ para a frequência em rad/s.}$$

Dado um conjunto de pontos, conforme exibido na Figura 2.23, existem infinitas funções às quais os pontos podem pertencer.

Figura 2.23 Vários possíveis sinais passando pelo mesmo conjunto de pontos (Katsuhiko, 1998).

Desta forma, verifica-se que:

- Algumas frequências de amostragem distorcem o sinal, isto é, o sinal original é perdido.

- A frequência de amostragem a ser utilizada para que não ocorra distorção do sinal depende da frequência do sinal.

- A frequência de amostragem para que não ocorra distorção do sinal deve ser no mínimo maior do que duas vezes a frequência do sinal.

A frequência $\frac{f_a}{2}$ é denominada frequência de Nyquist, e comprova-se que qualquer sinal cuja maior frequência seja inferior à frequência de Nyquist pode ser adquirido sem perdas nem distorções por uma frequência f_a . Caso esta constatação seja desrespeitada, poderá ocorrer o fenômeno de *aliasing*, que consiste no aparecimento de frequências não realmente presentes no sinal original (Katsuhiko, 1998).

A Figura 2.24 apresenta o espectro de frequências obtido com frequência superior a duas vezes a frequência de Nyquist. Verifica-se que não há sobreposição, de forma a manter apenas as frequências originais do sinal.

Figura 2.24 Espectro de frequência obtido de forma a respeitar o critério de Nyquist (Katsuhiko,1998).

Já a Figura 2.25 demonstra o efeito nocivo do *aliasing*, não permitindo a posterior restauração do sinal original.

Figura 2.25 Formação de aliasing causado pela sobreposição de frequências (Katsuhiko,1998).

Verifica-se, portanto, a grande necessidade de se conhecer a ordem de grandeza da maior frequência de interesse presente no fenômeno a ser estudado, para que seja possível tomar o devido cuidado ao escolher a frequência de amostragem correta.

2.2.2 Extensometria

Extensômetros (*strain gages*) são sensores utilizados para a medição de deformação em superfícies. São resistências elétricas cuja deformação da estrutura onde estão fixados acarreta uma variação proporcional no valor dessa resistência. Esses sensores têm utilidade tanto para a análise da tensão em máquinas e

estruturas, quanto para transdutores para medição de força, pressão, torque, deslocamento, entre outras aplicações (Haslam, 1981).

O extensômetro tem como princípio de funcionamento a variação do seu valor de resistência elétrica conforme a sua malha resistiva é alongada ou comprimida. Quando a superfície na qual está fixado se sujeita a tração, ocorre o alongamento com consequente aumento de resistência e quando a superfície sofre compressão, a resistência diminui. Este comportamento é explicado pela equação 13, tendo como base a Figura 2.26:

$$R = \rho \cdot L / A$$

Eq. 13

Onde:

R: resistência, em Ohms

L: comprimento do fio condutor, em m

A: área da seção transversal do condutor, em m²

ρ : resistividade do material condutor, em Ohms* m² / m

Figura 2.26 Esquema mostrando variação de comprimento com uma força P (Haslam,1981).

Mostra-se por diferenciação da equação anterior e rearranjo matemático (Haslam, 1981) que:

$$dR/R = d\rho/\rho + (dL/L) \cdot (1 + 2 \cdot \nu)$$

Eq. 14

onde ν é o coeficiente de Poisson do metal usado como condutor.

Determina-se que a variação da resistência é diretamente proporcional à variação do comprimento, já que o coeficiente de Poisson e a resistividade do material são constantes (Haslam, 1981).

A sensibilidade (*gage factor*) à deformação é o termo usado para caracterizar a variação da resistência de um condutor em relação à variação do seu comprimento, sendo definida por “S”, conforme a Equação 3 (Haslam, 1981):

$$S = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = (1 + 2 \cdot \nu) + \frac{d\rho/\rho}{dL/L}$$

Eq. 15

Portanto, a sensibilidade é definida por dois fatores: a variação das dimensões do condutor (L), da área (A) e da variação da resistência específica ($d\rho/\rho$).

O eixo principal de um extensômetro é a direção na qual o medidor é mais sensível à deformação, isto é, a direção na qual a variação de resistência para uma determinada deformação é maior. Recomenda-se utilizar o extensômetro de modo que o seu eixo principal esteja alinhado com o campo de tensões, de modo a conseguir melhor uso do sensor como é apresentado na Figura 2.27.

Figura 2.27 Esquema dos eixos principal do extensômetro (eixo preto) e transversal (eixo vermelho).

2.2.3 Ponte de Wheatstone

Extensômetros arranjados em Ponte de Wheatstone têm seu esquema apresentado na Figura 2.28. Esse arranjo mede com grande precisão as pequenas

variações no valor das resistências que causam uma diferença de potencial na saída da ponte, desequilibrada pela atuação dos extensômetros (Haslam,1981).

O circuito apresentado na Figura 2.28 é utilizado para medir as variações de resistência através da variação da tensão.

Figura 2.28 Circuito da Ponte de Wheatstone com resistores (Haslam,1981).

Inicialmente, se a ponte está balanceada, ao aplicar-se uma tensão elétrica entre os pontos A e C (entrada), não será registrada diferença de potencial entre os pontos B e D (saída). Entretanto, mudanças no valor das resistências irão afetar a saída da ponte, e a tensão de saída será proporcional a essa alteração.

Para exemplificar o fenômeno, pode-se trocar a resistência fixa R_1 da Figura 2.28 por uma resistência variável (Haslam,1981). A tensão V_{AB} relativa à resistência R_1 é dada por:

$$V_{ab} = R_1 / (R_1 + R_2) \cdot V_e$$

Eq. 16

De maneira similar, tem-se que a queda de voltagem em R_4 é dada por

$$V_{ad} = R_4 / (R_3 + R_4) \cdot V_e$$

Eq. 17

A tensão de saída, então, pode ser determinada pela diferença de potencial entre os pontos B e D, V_{bd} , que é dada por:

$$V_{saida} = V_{bd} = V_{ab} - V_{ad}$$

Eq. 18

Substituindo V_{ab} e V_{ad} na equação anterior e ordenando os termos obtém-se:

$$V_{saida} = R_1 / (R_1 + R_2) \cdot V_e - R_4 / (R_3 + R_4) \cdot V_e$$

Eq. 19

$$V_{saida} = (R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4) / (R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)$$

Eq. 20

Qualquer mudança no valor da resistência R_1 altera o equilíbrio da ponte, conforme mostra a equação a seguir.

$$V_{saida} = V_e \cdot ((R_1 + \Delta R_1) \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4) / ((R_1 + \Delta R_1) + R_2) \cdot (R_3 + R_4)$$

Eq. 21

3 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

3.1 Corpo-de-prova

O material utilizado neste estudo foi o aço ABNT 52100, cuja composição química e propriedades mecânicas são apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

Tabela 3.1 Composição química fornecida pela empresa fabricante do aço ABNT 52100 utilizado nos ensaios.

Elemento	% em massa
Carbono (C)	1,000
Manganês (Mn)	0,310
Silício (Si)	0,260
Fósforo (P)	0,012
Enxofre (S)	0,007
Cromo (Cr)	1,380
Níquel (Ni)	0,080
Molibdênio (Mo)	0,020
Alumínio (Al)	0,005
Cobre (Cu)	0,110
Titânio (Ti)	0,003

Tabela 3.2 Propriedades mecânicas fornecidas pela empresa fabricante do aço ABNT 52100 utilizado nos ensaios.

Propriedade	Valor	Unidade
Dureza Brinell	182	HB
Coeficiente de expansão térmica	11,9	$\mu\text{m.K/m}$
Tensão de escoamento	205	MPa
Limite de resistência à tração	415	MPa
Elongamento	15	%
Módulo de elasticidade	210	GPa

O aço anteriormente descrito foi recebido em forma de barras cilíndricas de 2", sendo necessária a usinagem destas barras para a obtenção das 2 diferentes geometrias dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios: barras cilíndricas com diâmetro de 50 mm contendo rasgos longitudinais (rasgos de chaveta) de 10 mm e barras de seção quadrada com aresta de 35 mm (diagonal da seção transversal

quadrada de 50 mm, portanto). As imagens contidas na Figura 3.1 ilustram as configurações de corpos-de-prova da barra de seção quadrada e da barra cilíndrica antes de efetuado o rasgo de chaveta:

Figura 3.1 Fotos dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios, sendo que os rasgos de chaveta da barra de seção transversal cilíndrica ainda não haviam sido realizados.

Figura 3.2 Dimensões em mm para o corpo-de-prova do tipo barra de seção transversal quadrada.

Figura 3.3 Dimensões em mm para o corpo-de-prova do tipo barra de seção transversal redonda contendo rasgos de chaveta.

3.2 Ferramenta de Corte

Os insertos utilizados para o torneamento de todos os corpos-de-prova foram de metal duro, modelo TPGN 160304, com ângulo de posição de 91° , ângulo de folga de 11° e ângulo de saída de 0° . O porta-ferramentas utilizado foi o CTGPR 2525M 16, ao qual foi adaptado um prolongador de modo a permitir sua correta configuração no torno. Os insertos não apresentam quebra-cavaco, recobrimento ou preparação de aresta cortante de qualquer tipo, conforme ilustra a Figura 3.4:

Figura 3.4 Exemplo dos insertos triangulares de metal duro utilizados nos ensaios.

3.3 Torno

Para os ensaios de torneamento foi empregado um torno CNS modelo Traub TND 360, contendo contra-ponto e placa hidráulicos, torre elétrica para 8 ferramentas, comando TX7 e potência do motor principal de 38 kW.

Figura 3.5 Foto do torno CNC TRAUB TND 360.

O porta-ferramentas foi utilizado sempre na mesma posição da torre de modo a não ser necessário nenhum ajuste (*setup*) no comando numérico. O contra-ponto hidráulico foi empregado em todos os ensaios, visando minimizar vibrações em função do comprimento em balanço dos corpos-de-prova.

Foram utilizadas braçadeiras para fixar os cabos do dinamômetro à máquina, de forma a se evitar acidentes como um possível enrolamento em torno da peça. A saída dos cabos foi realizada de modo a permitir o fechamento da porta corrediça, garantido assim a operação segura em todos os ensaios.

3.4 Dinamômetro

Para a realização dos ensaios foi fabricado um dinamômetro constituído de um porta-ferramentas e extensômetros. A configuração utilizada para o arranjo dos extensômetros foram duas pontes completas de Wheatstone, uma para a aquisição da força de corte e a outra para aquisição da força de avanço. Cada um destas pontes foi criada com 4 extensômetros, conforme a Figura 2.28. Não houve modificação na geometria do porta-ferramentas, a não ser a adição de três furos passantes de forma a permitir a fixação do prolongador ao corpo do porta-ferramentas.

Figura 3.6 Dinamômetro construído tendo como base um porta-ferramentas para as pastilhas triangulares apresentadas anteriormente.

Os extensômetros (*strain gages*) fixados ao sistema foram produzidos pela empresa KYOWA, do tipo KFG-5-120-C1-11, lote Y31655. Apresentam resistência nominal de 250 Ohms, possuindo um *gage factor* (GF) de 2,11. Seu comprimento no sentido mais sensível à deformação é de 10 mm, e transversalmente mede aproximadamente 3 mm.

No dinamômetro também foi adaptado um prolongador que possibilitasse a montagem do dispositivo no torno CNC onde os ensaios foram realizados. Uma capa plástica foi instalada para proteger as conexões elétricas de eventuais fragmentos e/ou cavacos provenientes do processo de corte.

Para as conexões elétricas foi utilizado o cabo PEKON MANGA 26 AWG, com 5 pares de fios trançados. Este cabo apresenta proteção contra interferências externas (blindagem) e internas (tranças). Também foi providenciado aterramento para o dispositivo, de modo a manter todos os equipamentos envolvidos nos ensaios de torneamento no mesmo potencial.

3.5 Acelerômetro

Foi utilizado o acelerômetro Kistler modelo 8702B (Figura 3.7), o qual possui limites de operação de ± 25 g e faixa de frequência entre 10 Hz e 7000 Hz. O corpo deste sensor é feito em titânio e fechado hermeticamente, impedindo a entrada de impurezas. O sensor foi fixado na parte inferior do porta-ferramentas utilizando um parafuso 10-32 UNF, conforme ilustra a Figura 3.8. Este posicionamento foi adotado de forma a permitir a medição da frequência de impacto.

Figura 3.7 Acelerômetro utilizado nos ensaios e fixado na parte inferior do dinamômetro paralelamente ao eixo de corte.

Figura 3.8 Indicação do posicionamento do acelerômetro no porta-ferramentas. O eixo de medição do sensor está no mesmo sentido da seta vermelha, sensível às vibrações paralelas ao sentido da força de corte.

3.6 Rugosímetro

Foi utilizado um rugosímetro portátil da marca Mitutoyo modelo SurfTest SJ-201 (Figura 3.9) para a obtenção tanto do perfil de rugosidade quanto do valor de rugosidade média, utilizando *cut-off* de 2,5 mm. Este aparelho permite exportar os dados em forma de planilhas para consultas futuras.

Figura 3.9 Rugosímetro empregado na análise de qualidade de acabamento superficial realizada após o torneamento dos corpos-de-prova.

3.7 Sistema de Aquisição

O Sistema de Aquisição utilizado nos ensaios é produzido pela Lynx Eletrônica Ltda, e constitui-se de placa de aquisição de dados e módulos com filtros e amplificadores. Foi empregado o modelo ADS-2000, juntamente com os softwares AqDados e AqAnalysis, também fornecidos pela Lynx. Não foi utilizado nenhum tipo de filtro no sinal, e a amplificação foi feita com base nos circuitos internos do sistema de aquisição e seu ganho ($\times 5000$) fixado via software. Um computador pessoal é utilizado para obter e arquivar os dados relativos aos ensaios, sendo conectado ao sistema de aquisição por um cabo de rede. Este arranjo é mostrado na Figura 3.10:

Figura 3.10 Bancada onde foi instalado o sistema de aquisição empregado nos ensaios.

Figura 3.11 Detalhe do sistema para adquirir dados dos ensaios mostrando as entradas dos sinais dos sensores utilizados.

3.8 Metodologia Experimental

3.8.1 Execução dos ensaios de usinagem (torneamento com corte interrompido)

Os ensaios de usinagem consistiram no torneamento cilíndrico ortogonal de dois tipos de corpo-de-prova, cada um com sua geometria: barras cilíndricas com diâmetro de 50 mm contendo rasgos longitudinais (rasgos de chaveta) e barras de seção quadrada com aresta de 35 mm.

Anteriormente à realização dos ensaios de usinagem foi feita a caracterização do material conforme recebido pela empresa fornecedora do aço ABNT 52100. Esta caracterização consistiu de medições de microdureza e macrodureza Vickers e de metalografias das seções transversal e longitudinal das barras para caracterização microestrutural.

Para todos os ensaios de usinagem (torneamento com corte interrompido) foi utilizado avanço de 0,2 mm/volta e profundidade de corte de 1 mm. Sabe-se que o uso desta configuração resulta em um estado plano de deformação na região de corte, podendo a deformação do cavaco no eixo X (largura do cavaco) ser considerada nula (Shaw, 2005). O comprimento de corte empregado em todos os ensaios foi de aproximadamente 100 mm, distância suficiente para tornar os efeitos da entrada da ferramenta na peça desprezíveis. Em todos os ensaios foi utilizado contra-ponto de acionamento hidráulico de forma a minimizar vibrações causadas pelo comprimento em balanço da peça. As velocidades de corte utilizadas foram de 60 e 120 m/min, pois apesar de insertos de metal duro oferecerem a possibilidade de utilização de velocidades mais elevadas, a pastilha empregada não contava com nenhuma preparação de aresta para utilização em condições de impacto. As velocidades foram selecionadas com base em resultados preliminares. Maiores velocidades de corte levavam a falha prematura da ferramenta (Rodrigues et al, 2008).

Para os ensaios realizados nas barras de seção transversal quadrada foram executados vários passes, de forma que a cada passe a taxa de contato apresentasse aumento, conforme a sequência da Figura 3.12 ilustra:

Figura 3.12 Evolução da taxa de contato com o decorrer dos passes. No primeiro passe (primeira imagem à esquerda) a taxa de contato é praticamente nula, enquanto no oitavo passe (imagem na extremidade direita) a taxa de contato é igual à unidade.

A Figura 3.13 ilustra a seção transversal da barra cilíndrica contendo rasgos longitudinais (rasgos de chaveta):

Figura 3.13 Seção transversal da barra cilíndrica contendo rasgos de chaveta.

As repetições realizadas no corpo-de-prova com chavetas foram feitas em passes consecutivos, de modo que os diâmetros inicial e final em cada passe fossem diferentes, implicando assim em taxas de contato diferentes. Esta variação, porém, foi de pequena magnitude (2,3%), sendo que no primeiro passe a taxa de contato foi de 0,866 e no quarto passe foi de 0,847. Foi utilizada então uma média aritmética para o cálculo dos valores de taxa de contato, chegando-se a 0,857 para ambas as velocidades de corte. Procedimento análogo foi realizado para a estimativa das rotações, chegando a 429 rpm para a velocidade de corte de 60 m/min e de 859 rpm para a velocidade de 120 m/min. A matriz dos ensaios realizados é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Matriz dos experimentos realizados apresentando os principais dados de cada condição.

Geometria	Número do passe	D Inicial [mm]	D Final [mm]	Velocidade de corte [m/min]	Rotação [rpm]	Taxa de contato	Repetições
Quadrado	1	50	48	60	401	0,054	3
	2	48	46		419	0,116	
	3	46	44		438	0,188	
	4	44	42		459	0,274	
	5	42	40		482	0,380	
	6	40	38		508	0,522	
	7	38	36		536	0,759	
	8	36	34		568	1,000	
Quadrado	1	50	48	120	802	0,054	3
	2	48	46		838	0,116	
	3	46	44		876	0,188	
	4	44	42		918	0,274	
	5	42	40		965	0,380	
	6	40	38		1016	0,522	
	7	38	36		1073	0,759	
	8	36	34		1137	1,000	
Chaveta	1	48	46	60	429	0,857	4
Chaveta	1	50	48	120	859	0,857	4

Em cada passe foi realizada a aquisição dos sinais relativos aos esforços de corte, sendo estes a força de corte e a força de avanço e também foi adquirido o sinal de vibração, medido utilizando o acelerômetro posicionado no eixo Y da máquina (mesma direção da força de corte). Para cada ensaio foi utilizada uma aresta nova da ferramenta, no intuito de excluir efeitos relacionados ao desgaste do inserto. Posteriormente, cada uma das arestas de corte utilizadas foi fotografada com emprego de microscopia óptica.

O dinamômetro e o acelerômetro foram instalados no sistema para adquirir os dados, o qual utilizou a frequência de amostragem de 15 kHz. Este valor é excessivo para adquirir os sinais dos esforços de corte, mas mostra-se adequado quando da aquisição de sinais de vibração. Uma vez que o sistema disponível não permite configurar cada canal (dinamômetro e acelerômetro) independentemente, a maior frequência de aquisição necessária foi utilizada.

O dinamômetro foi aterrado em conjunto com o torno CNC, de modo a evitar ruídos provenientes de diferença de potencial entre o sistema de aquisição e o torno. Este fio de aterramento foi conectado à entrada neutra do sistema de aquisição.

Não foi utilizado nenhum tipo de filtro no sinal, e a amplificação foi feita com base nos circuitos internos do sistema de aquisição e seu ganho (x5000) fixado via software.

3.8.2 Tratamento dos dados

Para cada ensaio realizado foi obtido um arquivo de dados contendo os sinais do acelerômetro e das forças de avanço e de corte. Um exemplo encontra-se na Figura 3.14. Pode-se notar que, devido à inércia do porta-ferramentas, existem valores negativos para os sinais de força de corte e força de avanço, relacionados à vibração do sistema.

Figura 3.14 Arquivo gerado pelo software AqDados contendo os sinais do acelerômetro (azul), força de avanço (vermelho) e força de corte (marrom).

Verificou-se que houve saturação no sinal do acelerômetro para todos os ensaios com corte interrompido. Esta saturação não prejudicou a análise, uma vez que as frequências do sinal se mantêm as mesmas independentemente da ocorrência da saturação.

Os dados da Figura 3.14 foram obtidos no domínio do tempo (série temporal) e depois foram truncados de modo a se realizar a análise apenas no período onde houve corte, desprezando a entrada e saída da ferramenta na peça. Para transportar estes dados para o domínio da frequência foi utilizado o software MatLAB[®] 6.5, versão R13. Para tanto foram empregadas funções nativas do programa assim como funções fornecidas pela empresa fabricante do sistema de aquisição de sinais, sendo que estas tiveram que sofrer modificações. O código-fonte destas funções que foram modificadas encontra-se no Anexo 1.

A função do MatLAB[®] empregada foi a FFT, que transporta dados no domínio do tempo para o domínio da frequência utilizando as transformadas rápidas de Fourier (*Fast Fourier Transform*). Este algoritmo é largamente empregado devido à rapidez e precisão computacional (Cabral, 2006), sendo indicado no caso de longas séries de dados onde a utilização da Transformada Direta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*) levaria a um grande tempo de processamento. Desta transformação resulta um gráfico com o conteúdo em frequência proporcional ao quadrado da unidade do sinal (neste caso, proporcional a Newton^2). Um exemplo deste tipo de gráfico encontra-se na Figura 3.15, onde é possível visualizar os diferentes picos de frequência. Por exemplo, observa-se a frequência da rede de 60 e a frequência de impactos de aproximadamente 27 Hz, para o ensaio ilustrado. Gráficos semelhantes foram obtidos para cada um dos sinais de força e vibração de cada um dos ensaios. (A compilação dos resultados provenientes desses gráficos são apresentados posteriormente na Tabela 4.2.)

Figura 3.15 Exemplo de gráfico obtido com o uso da função FFT do software MatLAB[®] ilustrando os picos relacionados às principais frequências contidas no sinal.

3.8.3 Análises complementares

As análises complementares foram compostas de medições de rugosidade e medição dos cavacos provenientes dos ensaios. Embora não tenha sido avaliada a vida da ferramenta, as pastilhas foram fotografadas como forma de documentação dos ensaios realizados.

A rugosidade foi medida com auxílio de rugosímetro configurado para realizar cinco medições de 2,5 mm cada uma, gerando um perfil de rugosidade com comprimento total de 12,5 mm. Estes perfis foram arquivados em planilhas eletrônicas, assim como os valores de Ra (altura média), Rz (altura máxima do perfil), Rq (desvio médio quadrático do perfil), Rt (altura total do perfil) e Rp (altura máxima do pico do perfil).

Para os corpos-de-prova com seção transversal quadrada foram realizadas medições em cada uma das quatro arestas onde efetivamente estava ocorrendo o corte, paralelamente ao eixo longitudinal Z (eixo de avanço da ferramenta). Estas medições foram realizadas em um passe intermediário e foi calculada a média para as quatro arestas, resultando em um conjunto de valores (R_a , R_p , R_t , R_z , R_q) para cada ensaio.

Cada uma das arestas de corte utilizadas foi fotografada com emprego de microscopia óptica. Foram realizadas fotografias tanto da superfície de saída quanto da superfície de folga de cada uma das arestas, conforme exemplos mostrados na Figura 3.16 e na Figura 3.17, respectivamente.

Figura 3.16 Exemplo de fotografia da superfície de saída retirada por microscopia ótica.

Figura 3.17 Exemplo de fotografia da superfície de folga retirada por microscopia óptica.

Anteriormente à realização dos ensaios de usinagem foi feita a caracterização microestrutural do material conforme recebido pela empresa fornecedora do aço ABNT 52100. Esta caracterização consistiu de medições de microdureza e macrodureza Vickers e de metalografias das seções transversal e longitudinal das barras. A metalografia foi feita após lixamento e polimento com diamante e ataque com reagente Nital (2%).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do material

Foram realizados testes de microdureza e macrodureza Vickers, obtendo-se os valores médios de 198 HV e 195 HV, respectivamente. A variação de dureza em função do diâmetro na seção transversal dos corpos-de-prova apresentou-se baixa, com desvio padrão de 8,5 HV para os testes de microdureza e de 1,9 HV para os testes de macrodureza. Os testes de dureza foram realizados em apenas uma seção transversal do corpo-de-prova, sendo desconsiderada, portanto, qualquer variação em função da posição longitudinal. Foram empregadas as cargas de 100 gf para os testes de microdureza e de 30 kgf para os testes de macrodureza.

A observação das microestruturas foi realizada para verificar a disposição das fases e composição destas nos corpos-de-prova, tanto na seção transversal quanto na longitudinal das barras conforme estas foram recebidas. Não foi medido o tamanho de grão, mas estima-se valores entre 10 e 20 μ m. As micrografias obtidas com ampliação de 100x e 1000x utilizando um microscópio óptico, são apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2, para a seção transversal do corpo-de-prova e nas Figuras 4.3 e 4.4 para a seção longitudinal do corpo-de-prova. Observa-se uma microestrutura homogênea com presença de carbonetos bem distribuídos pela matriz (partículas arredondadas e claras (Figuras 4.2 e 4.4)).

O material, portanto, foi considerado homogêneo tanto sob o aspecto de dureza quanto de microestrutura.

Figura 4.1 Micrografia da seção transversal do corpo-de-prova em aumento de 100x no microscópio óptico.

Figura 4.2 Micrografia da seção transversal do corpo-de-prova em aumento de 1000x no microscópio óptico.

Figura 4.3 Micrografia da seção longitudinal do corpo-de-prova em aumento de 100x no microscópio óptico.

Figura 4.4 Micrografia da seção longitudinal do corpo-de-prova em aumento de 1000x no microscópio óptico.

4.2 Esforços de Corte

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados dos esforços de corte (N) para os ensaios realizados. Estes valores são a média aritmética dos resultados obtidos para todas as repetições de ensaios, utilizando recursos do próprio software AqAnalysis para a execução dos cálculos tanto dos valores médios como máximos.

Tabela 4.1 Resultados obtidos para os esforços de corte em Newtons. Os valores 60 e 120 após o tipo de corpo-de-prova são as velocidades de corte empregadas em m/min e TC é a taxa de contato.

Tipo de corpo-de-prova	F _a média	F _a máxima	F _c média	F _c máxima	TC
Quadrado 60					
Passe 1	5,10	267,10	13,80	626,35	0,054
Passe 2	15,68	288,75	42,37	655,60	0,116
Passe 3	32,44	290,92	80,22	725,00	0,188
Passe 4	42,88	245,25	120,90	692,60	0,274
Passe 5	67,56	294,60	193,00	984,70	0,380
Passe 6	91,82	269,95	241,02	929,15	0,522
Passe 7	183,20	332,45	457,88	1070,10	0,759
Passe 8	317,19	428,15	568,25	1212,95	1,000
Quadrado 120					
Passe 1	0,92	259,97	11,04	760,60	0,054
Passe 2	7,03	258,91	26,92	733,03	0,116
Passe 3	16,74	251,57	58,33	740,93	0,188
Passe 4	31,09	232,57	101,07	666,83	0,274
Passe 5	74,10	281,27	175,11	667,77	0,380
Passe 6	93,35	229,33	248,19	644,19	0,522
Passe 7	170,22	262,28	407,81	738,10	0,759
Passe 8	293,77	347,15	539,35	793,60	1,000
Chaveta 60	187,78	348,5	477,18	1227,20	0,857
Chaveta 120	132,08	306,625	410,78	1222,20	0,857

4.2.1 Forças de Avanço

A partir dos resultados obtidos nos ensaios foi verificado o comportamento crescente da força de avanço média com o aumento da taxa de contato para ambas as velocidades de corte. Este resultado já era esperado, uma vez que com o aumento da taxa de contato a ferramenta fica submetida por mais tempo à força de

avanço em cada revolução. Notou-se, porém, que este comportamento não se repete para a força de avanço máxima, como pode ser visto na Figura 4.5. Esse resultado parece coerente, já que os esforços máximos não devem mudar independentemente da taxa de contato. Eles devem ser mais influenciados pela quantidade máxima de material removido.

Figura 4.5 Gráfico das forças de avanço médias e máximas para corpo-de-prova com seção transversal quadrada. Vc 60 e Vc 120 são as velocidades de corte em m/min.

Também observa-se uma tendência das forças de avanço serem maiores para a velocidade de corte menor, de 60 m/min. Este comportamento já foi apresentado na literatura (Figura 4.8; Diniz, 2000; Shaw, 2005) e está relacionado com a diminuição da deformação plástica para velocidades de corte maiores, as quais impõem maiores taxas de deformação. O atrito entre a cavaco e a superfície de saída da ferramenta também é diminuído com o aumento da velocidade de corte, gerando assim pressões específicas de corte menores.

No quinto passe (taxa de contato de 0,38) foi observado um acréscimo nas forças de avanço máximas para ambas as velocidades de corte e verificou-se que conforme a taxa de contato se aproxima da unidade a diferença entre a força de avanço média e a força de avanço máxima diminui, para ambas as velocidades de corte.

Para o ensaio com corpo-de-prova contendo rasgos de chaveta, as forças de avanço média e máxima também diminuíram com o aumento da velocidade corte, conforme apresentado na Figura 4.6. Também observa-se que os valores foram menores quando comparados ao dos ensaios realizados no corpo-de-prova com seção transversal quadrada, com exceção da força máxima de avanço para velocidade de corte de 120 m/min, a qual ficou praticamente igual.

Figura 4.6 Gráfico das forças de avanço médias e máximas para ambos os tipos de corpo-de-prova, mostrando apenas os resultados relativos às taxas de contato mais elevadas para efeito de comparação entre as duas geometrias.

4.2.2 Forças de Corte

Os resultados encontrados mostram que o comportamento para a força de corte média e força de corte máxima foram semelhantes aos obtidos para as forças de avanço, aumentando de intensidade na medida em que a taxa de contato crescia. Novamente se verificou a tendência das forças diminuírem com o aumento da velocidade de corte, com exceção da força máxima dos passes 1 e 2 realizados com velocidade de corte de 120 m/min, conforme ilustrado na Figura 4.7.

Este comportamento de diminuição das forças com o aumento da velocidade de corte para os aços já foi estudado anteriormente (Trent, 2000). Deve-se observar, porém, que quando surge o fenômeno de APC (aresta postiça de corte) este

comportamento se altera, conforme exemplifica a Figura 4.8, onde vários materiais foram usinados com avanço de 0,25 mm/volta e profundidade de corte de 1,25 mm.

Figura 4.7 Gráfico das forças de corte médias e máximas para corpo-de-prova com seção transversal quadrada. Vc 60 e Vc 120 são as velocidades de corte em m/min.

O comportamento observado para a força de corte máxima na velocidade de 60 m/min mostrou-se diferente em relação ao obtido com velocidade de corte de 120 m/min: para a força de corte máxima com velocidade de corte de 60 m/min não ocorreu a diminuição da diferença entre força de corte máxima e força de corte média. No entanto, observando-se a dispersão de resultados pode ser observada uma variação grande no valor das forças máximas (dispersão nos resultados apresentada na figura 4.7). A partir dessa observação é feita a hipótese que o comportamento é o mesmo nas diferentes velocidades de corte.

Figura 4.8 Comportamento das forças de corte em função da velocidade de corte para diversos materiais, ilustrando a influência da APC em baixas velocidades para o aço (Trent, 2000).

Para o corpo-de-prova contendo rasgos de chaveta houve aumento nas forças máximas para ambas as velocidades de corte, quando comparadas às forças máximas obtidas para o corpo-de-prova com seção transversal quadrada. Já as forças médias foram menores, conforme ilustra a Figura 4.9.

Figura 4.9 Gráfico das forças de corte médias e máximas para ambos os tipos de corpo-de-prova, mostrando apenas os resultados relativos às taxas de contato mais elevadas para efeito de comparação entre as duas geometrias.

Esses resultados mostram que na configuração de corpo de prova com chaveta, as solicitações são maiores, mas a diminuição na frequência de impacto gera menores tensões médias.

4.3 Frequência de Corte

Após o tratamento dos dados obtidos nos ensaios, passando o conteúdo no domínio do tempo para o domínio da frequência, foi possível verificar o surgimento de dois picos distintos. O primeiro deles, em uma frequência mais baixa, foi relacionado com a frequência dos impactos da ferramenta na peça durante o corte. Para verificar esta hipótese foram calculados os valores teóricos de frequência de impacto a partir da rotação da peça e da geometria da peça.

Para o segundo pico foi assumida a hipótese deste estar relacionado à frequência de quebra do cavaco. A explicação é dada a seguir. Os cavacos produzidos nos ensaios de usinagem tem entre 2 a 4 mm de comprimento. A Figura 4.10 mostra esses cavacos, cuja avaliação dimensional foi feita de forma qualitativa, mas que confirma a observação feita anteriormente. Esse comprimento é resultante de um processo de deformação, logo o cavaco “sem deformação” teria um valor inferior.

Figura 4.10 Cavacos produzidos nos ensaios, avaliação qualitativa.

Fazendo o cálculo com base no perímetro usinado e a relação entre a frequência máxima obtida para a velocidade de corte de 60 e 120 m/min, chega-se respectivamente a cavacos entre 1,4 e 3,5 mm. Esses resultados indicam que essa frequência pode estar associada à formação de cavacos. Os valores de frequência obtidos estão apresentados na Tabela 4.2 e a expressão utilizada para o cálculo descrito anteriormente se encontra a seguir, onde v_c representa a velocidade de corte e f_q representa a frequência de quebra de acordo com a Tabela 4.2.

$$\text{Comprimento teórico} = \frac{v_c \cdot 1000}{60 \cdot f_q}$$

Eq. 22

Tabela 4.2 Resultados médios obtidos para as frequências de corte e frequências de formação do cavaco, em Hertz. Os valores 60 e 120 após o tipo de corpo-de-prova são as velocidades de corte empregadas, em m/min.

Tipo de corpo-de-prova Quadrado 60	Frequência de Corte	Frequência de Quebra	TC
Passe 1	27,25	526,8	0,054
Passe 2	28,45	531,0	0,116
Passe 3	29,80	516,4	0,188
Passe 4	31,25	540,0	0,274
Passe 5	32,85	545,1	0,380
Passe 6	34,45	615,9	0,522
Passe 7	36,80	596,8	0,759
Passe 8	-	611,5	1,000
Quadrado 120			
Passe 1	54,80	728,83	0,054
Passe 2	57,30	715,17	0,116
Passe 3	59,87	708,63	0,188
Passe 4	62,73	690,37	0,274
Passe 5	65,83	745,50	0,380
Passe 6	69,27	743,27	0,522
Passe 7	73,00	754,03	0,759
Passe 8	-	754,15	1,000
Chaveta 60	14,65	742,60	0,857
Chaveta 120	29,23	747,23	0,857

Os valores calculados da frequência de corte relacionada aos impactos da ferramenta são apresentados na Tabela 4.3 juntamente com os valores obtidos experimentalmente.

Tabela 4.3 Resultados obtidos para as frequência de corte obtidas experimentalmente e frequências de corte calculadas, em Hertz. O erro percentual também é exibido para cada condição de ensaio.

Tipo de corpo-de-prova Quadrado 60	Frequência de Corte	Fr. de Corte Calculada	Erro %
Passe 1	27,25	26,75	1,87
Passe 2	28,45	27,92	1,89
Passe 3	29,80	29,20	2,05
Passe 4	31,25	30,61	2,10
Passe 5	32,85	32,15	2,17
Passe 6	34,45	33,86	1,73
Passe 7	36,80	35,77	2,89
Passe 8	-	-	-
Quadrado 120			
Passe 1	54,80	53,50	2,43
Passe 2	57,30	55,84	2,61
Passe 3	59,87	58,41	2,50
Passe 4	62,73	61,21	2,48
Passe 5	65,83	64,31	2,38
Passe 6	69,27	67,73	2,28
Passe 7	73,00	71,53	2,05
Passe 8	-	-	-
Chaveta 60	14,65	14,30	2,45
Chaveta 120	29,23	28,63	2,07

No oitavo passe não é associada nenhuma frequência pois o corte deixa de estar interrompido, apresentando apenas uma variação na profundidade de corte, a qual em momento algum se torna nula.

Para a obtenção das frequências calculadas foram utilizadas as seguintes expressões:

$$Freq = \frac{n \cdot 4}{60}$$

$$Freq = \frac{n \cdot 2}{60}$$

Eq. 24

A primeira equação é aplicada para ensaios com corpo-de-prova de seção transversal quadrada, uma vez que este material apresenta 4 interrupções de corte a cada revolução completa da peça. A segunda equação é utilizada para o cálculo da frequência de corte dos corpos-de-prova cilíndricos com rasgos de chaveta, os quais apresentam apenas 2 interrupções por revolução. Os valores de rotação devem ser utilizados em rpm (rotações por minuto), conforme apresentado na Tabela 3.3. Como a cada passe o diâmetro usinado é menor, temos que para manter a velocidade de corte constante a rotação da peça deve ser maior e, consequentemente, a frequência de corte relacionada ao impacto também aumenta.

Pode-se notar que o erro percentual entre as frequências de corte obtidas experimentalmente e as frequências de corte calculadas é pequeno, sendo sempre inferior a 3%.

4.4 Acabamento superficial

Para os ensaios realizados nos corpos-de-prova com seção transversal quadrada foram efetuadas 4 medições de rugosidade média (R_a), uma em cada aresta do corpo-de-prova. As medições foram feitas longitudinalmente no corpo de prova, ou seja, na direção Z. Estas medições foram realizadas nos últimos passes de cada um dos ensaios, com a taxa de contato já próxima da unidade. A Tabela 4.4 apresenta a média dos resultados obtidos para cada ensaio.

Tabela 4.4 Médias aritméticas obtidas nas medições de rugosidade R_a (em μm) para os ensaios realizados nos corpos-de-prova com seção quadrada. v_c representa a velocidade de corte empregada (60 m/min ou 120 m/min).

Quadrado v_c 60		Quadrado v_c 120	
Ensaio 1	9,68	Ensaio 1	4,67
Ensaio 2	10,78	Ensaio 2	4,27
Ensaio 3	10,71	Ensaio 3	5,05

Foram realizadas medições de rugosidade experimentais em passes intermediários, porém os valores encontrados foram semelhantes aos obtidos nos passes finais, ou seja, não se verificou influência da taxa de contato na rugosidade para os ensaios realizados com o corpo-de-prova de seção transversal quadrada.

É possível observar que os valores de rugosidade média (R_a) encontrados para a velocidade de corte de 120 m/min são inferiores aos obtidos com a velocidade de corte de 60 m/min.

Para os ensaios com o corpo-de-prova apresentando rasgos de chaveta foram feitas 8 medições de rugosidade para cada ensaio, uma em cada superfície onde houve a entrada da ferramenta (totalizando duas medições), uma em cada superfície onde houve saída da ferramenta (totalizando duas medições) e 4 medições em posições angulares intermediárias. Estas medições também foram realizadas longitudinalmente. Para as medições efetuadas onde houve entrada e saída da ferramenta buscou-se posicionar o eixo de medição do rugosímetro paralelamente à aresta da chaveta, com a menor distância possível, conforme ilustra a Figura 4.11.

Figura 4.11 Ilustração do trajeto percorrido pela ponta de prova do rugosímetro (linha vermelha).

Foi calculada a média das medições para cada posição do corpo-de-prova e o resultado é apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Médias aritméticas obtidas nas medições de rugosidade (em μm) para os ensaios realizados nos corpos-de-prova com rasgos de chaveta. Meio, saída e entrada descrevem a posição da medição na peça.

Chaveta v_c 60			Chaveta v_c 120		
meio	saída	entrada	meio	saída	entrada
9,17	10,01	4,96	10,75	15,01	6,46

Pode-se observar que para as duas velocidades de corte a rugosidade média foi menor na região de entrada da ferramenta a maior na região de saída da ferramenta. Uma hipótese para explicar este comportamento é de que na entrada da ferramenta ocorrem tensões de compressão no material do corpo-de-prova que está sendo deformado, enquanto na saída da ferramenta ocorrem tensões trativas, gerando um arrancamento do material e conseqüentemente elevando a rugosidade nesta região.

Também foi observado que os valores de rugosidade média encontrados ficaram acima do calculado teoricamente, que foi de $3,13 \mu\text{m}$. Para este cálculo foram utilizadas a equação da rugosidade máxima em função do avanço e do raio de ponta (Diniz, 2000) e a relação entre rugosidade média e rugosidade máxima (Boothroyd et al, 2005), respectivamente apresentadas a seguir:

$$Ra = \frac{R_{\max}}{4}$$

Eq. 25

e

$$R_{\max} = \frac{f^2}{8 \cdot r}$$

Eq. 26

Esta diferença entre os valores de rugosidade média obtidos com o rugosímetro e os valores calculados é atribuída principalmente ao efeito da vibração do porta-ferramentas, uma vez que o corpo-de-prova foi fixado com auxílio do contra-ponto, tendo desta forma seu movimento restringido.

4.5 Análise dos cavacos

Para cada uma das condições ensaiadas foi coletada uma amostra do cavaco resultante do processo para a realização de microscopia óptica. No intervalo de tempo compreendido entre o torneamento e a realização das fotografias a amostra foi conservada em óleo para evitar oxidação.

De forma geral, verificou-se que não houve variação significativa na aparência dos cavacos para as condições empregadas. Mesmo os cavacos provenientes dos ensaios realizados no corpo-de-prova contendo rasgos de chaveta apresentaram pequeno comprimento, sugerindo que a quebra do cavaco não estava ocorrendo apenas nos pontos onde cessava o contato da ferramenta com a peça, e sim de forma homogênea durante toda a revolução. As figuras a seguir apresentam as micrografias realizadas:

Figura 4.12 Micrografia da amostra de cavaco retirada de ensaio com corpo-de-prova de seção quadrada com velocidade de corte de 60 m/min.

Figura 4.13 Micrografia da amostra de cavaco retirada de ensaio com corpo-de-prova de seção quadrada com velocidade de corte de 120 m/min.

Figura 4.14 Micrografia da amostra de cavaco retirada de ensaio com corpo-de-prova com rasgos de chaveta e com velocidade de corte de 60 m/min.

Figura 4.15 Micrografia da amostra de cavaco retirada de ensaio com corpo-de-prova com rasgos de chaveira e com velocidade de corte de 120 m/min.

Observa-se que as linhas de deformação visualizadas nas imagens são bastante semelhantes entre si, não sofrendo alterações significativas em função das diferentes geometrias e velocidades de corte empregadas. Isso também explica o valor das forças máximas não terem sido, aparentemente, influenciados pelas condições de corte.

4.6 Análise das ferramentas

Para a análise das ferramentas utilizadas nos ensaios foram consideradas as fotografias da superfície de folga e da superfície de saída dos insertos. O Anexo 2 apresenta todas as imagens obtidas neste procedimento.

Verificou-se que para o corpo-de-prova contendo rasgos de chaveta ocorreram proporcionalmente mais fraturas. Para os oito ensaios realizados, quatro com velocidade de corte de 60 m/min e quatro com velocidade de corte de 120 m/min, houve três quebras, duas para a velocidade maior e uma para a velocidade menor. As figuras 4.16, 4.17 e 4.18 ilustram estas ocorrências:

Figura 4.16 Inserto utilizado no ensaio com corpo-de-prova com rasgos de chaveta e velocidade de corte de 60 m/min.

Figura 4.17 Inserto utilizado em outro ensaio com corpo-de-prova com rasgos de chaveta e velocidade de corte de 60 m/min.

Figura 4.18 Inserto utilizado em outro ensaio com corpo-de-prova com rasgos de chaveta e velocidade de corte de 60 m/min.

Um dos possíveis motivos para este comportamento é o fato do contato entre peça e ferramenta se dar inicialmente na região interna da superfície de saída, se estendendo então até a aresta de corte, conforme a Figura 2.19 ilustra.

Para o corpo-de-prova com seção transversal quadrada a quantidade de quebras foi proporcionalmente menor, apenas três para todos os ensaios. Foi notada nestes ensaios a adesão de material às ferramentas de corte, conforme pode ser observado nas figuras 4.19 a 4.22, a seguir:

Figura 4.19 Fotografia indicando adesão na superfície de saída de inserto utilizado em ensaio com corpo-de-prova de seção transversal quadrada e velocidade de corte de 60 m/min.

Figura 4.20 Fotografia da superfície de folga indicando ocorrência de adesão em inserto utilizado em ensaio com corpo-de-prova de seção transversal quadrada e velocidade de corte de 60 m/min.

Figura 4.21 Fotografia indicando adesão na superfície de saída de inserto utilizado em ensaio com corpo-de-prova de seção transversal quadrada e velocidade de corte de 120 m/min.

Figura 4.22 Fotografia da superfície de folga indicando ocorrência de adesão em inserto utilizado em ensaio com corpo-de-prova de seção transversal quadrada e velocidade de corte de 120 m/min.

Estas adesões ocorreram para ambas as velocidades de corte, e sempre no oitavo passe, quando o regime de corte se aproximava do contínuo. Porém, a adesão observada nas Figuras 4.21 e 4.22 se apresenta menos severa que a verificada para a velocidade de corte menor. Este comportamento pode estar relacionado com aparecimento de aresta postiça de corte (APC), uma vez que o efeito foi mais pronunciado em velocidade de corte mais baixa (Trent, 2000). Como nos passes anteriores ao oitavo o regime de corte foi interrompido não foi possível o desenvolvimento da APC devido tanto aos ciclos térmicos quanto mecânicos. No entanto, isso não se pode afirmar isso, pois a superfície da peça não foi observada. Em relação aos ciclos térmicos, a Figura 4.23 apresenta um gráfico de simulação numérica de variação de temperatura na ferramenta para uma taxa de contato de 0,5 e frequência de oscilação de 40 Hz, no qual pode ser observada uma relação de até 5:1 entre as temperaturas de pico e de corte em vazio:

Figura 4.23 Simulação numérica de variação de temperatura durante um ciclo de torneamento com taxa de contato de 0,5 e frequência de oscilação de 40 Hz (Chakraverti, 1984).

Nos ensaios onde houve quebra de ferramenta foi tomado como base para as análises apenas o trecho anterior à quebra. Este procedimento foi realizado identificando-se o ponto onde ocorre o crescimento abrupto dos esforços de corte e descartando os dados posteriores nos cálculos de forças médias e máximas e análises de frequência.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia para avaliação da severidade de perfis irregulares durante o processo de torneamento. Esta avaliação foi realizada principalmente sob o enfoque de esforços de corte e vibração, utilizando para tanto um dinamômetro e um acelerômetro. Análises complementares foram realizadas de forma a complementar a metodologia.

Os resultados obtidos mostraram relações entre a taxa de contato e as forças médias e máximas, além de diferenças significativas nos valores de rugosidade em função da geometria da peça, permitindo assim validar a metodologia empregada para análise de torneamento em condições de corte interrompido.

A seguir são apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

Caracterização do material

- A variação de dureza em função do diâmetro na seção transversal dos corpos-de-prova apresentou-se baixa. Em razão da semelhança entre os resultados das medições de cada barra foi desconsiderada qualquer variação em função da posição longitudinal.
- As micrografias mostraram que o material apresenta composição homogênea, com pequeno tamanho do grão. Não foram notadas orientações nos grãos causadas por deformação.

Forças de corte

- Para ambos os corpos-de-prova os resultados encontrados mostraram que o comportamento para a força de corte média foi semelhante ao obtido para a força de avanço média, aumentando de intensidade na medida em que a taxa de contato crescia, conforme esperado.
- Observando-se a dispersão de resultados pode ser observada uma variação grande no valor das forças máximas. A partir dessa observação é feita a hipótese que o comportamento é o mesmo nas diferentes velocidades de corte.

- Os resultados mostram que na configuração de corpo de prova com chaveta, as solicitações são maiores, mas a diminuição na frequência de impacto gera menores tensões médias.
- Para ambos os corpos-de-prova foi observada a tendência das forças de avanço média e máxima diminuírem com o aumento da velocidade corte. Este comportamento era esperado e já foi estudado por outros pesquisadores.
- Verificou-se que conforme a taxa de contato se aproxima da unidade a diferença entre a força de avanço média e a força de avanço máxima diminui, para ambas as velocidades de corte.
- As condições de torneamento com corte interrompido empregadas nos ensaios se apresentaram bastante severas, levando a fraturas de ferramentas e saturação do sinal do acelerômetro.

Frequência de corte

- Foi possível notar que o erro percentual entre as frequências de corte relacionadas ao impacto obtidas experimentalmente e as frequências de corte calculadas foi pequeno, sendo sempre inferior a 3%.
- Mesmo com a saturação do sinal do acelerômetro foi possível realizar a análise das frequências envolvidas nos ensaios de torneamento. Não foi possível, porém, obter os valores absolutos de aceleração a que foi submetido o dinamômetro.
- Os resultados indicaram que a presença de oscilação de alta frequência nos ensaios de usinagem pode estar associada à formação de cavacos. As medições realizadas no material corroboram esta hipótese, apesar de ser necessária uma avaliação mais aprofundada da influência do recalque nesta análise.

Acabamento superficial

- Foi possível observar que para o corpo-de-prova de seção transversal quadrada os valores de rugosidade média (R_a) encontrados para a velocidade de corte de 120 m/min são inferiores aos obtidos com a velocidade de corte de 60 m/min. Esta tendência, porém, se inverteu para o corpo-de-prova contendo rasgos de chaveta.
- Também foi notado que para as duas velocidades de corte nos ensaios com corpo-de-prova contendo rasgos de chaveta a rugosidade média foi menor na região de entrada da ferramenta a maior na região de saída da ferramenta.

Análise das ferramentas

- Foi notada adesão de material à ferramenta de corte (APC) durante o último passe dos ensaios com barra de seção transversal quadrada. Este efeito foi mais pronunciado com velocidade de corte mais baixa.
- Verificou-se que para o corpo-de-prova contendo rasgos de chaveta ocorreram proporcionalmente mais fraturas. Para o corpo-de-prova com seção transversal quadrada a quantidade de quebras foi proporcionalmente menor, apenas três para todos os ensaios. Este comportamento pode estar relacionado com a posição na superfície de saída onde se dá o contato inicial da ferramenta com a peça.

Análise dos cavacos

- De forma geral, verificou-se que não houve variação significativa na aparência dos cavacos para as condições empregadas.
- Mesmo os cavacos provenientes dos ensaios realizados no corpo-de-prova contendo rasgos de chaveta apresentaram pequeno comprimento, sugerindo que a quebra do cavaco não estava ocorrendo apenas nos pontos onde cessava o contato da ferramenta com a peça, e sim de forma homogênea durante toda a revolução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altintas, Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Editora: CAMBRIDGE - USA, 2000.

Boothroyd, G. ; Knight, W. A. Fundamentals of Machining and Machine Tools, CRC Press, 2005.

Cabral, E. L. Apostila PMR2400, Sistemas de Aquisição de Dados, 2006

Chakraverti, G. ;Pandey, P.C. ;Mehta, N.K. Analysis of tool temperature fluctuation in interrupted cutting. Precision Engineering, vol. 6, issue 2, 1984.

Chandrasekaram, H. ; Thoors, H. Tribology in interrupted machining: role of interruption and work material. Wear 179, 1994.

Dimla, E. ; Dinla, Sr. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods. International Journal of Machine Tools & Manufacturing. Vol. 40, pp. 1073-1098, 2000a.

Dimla, E. ; Dinla, Sr. ; Lister, P.M. On-line metal cutting tool condition monitoring. I: Force and vibration análisis. International Journal of Machine Tools & Manufacturing. Vol. 40, pp. 739-768, 2000b.

Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. São Paulo. Editora Artliber. 2ª edição. 2000.

Doyle, L. E. Processos de fabricação e materiais para engenheiros. São Paulo. Edgard Blücher Ltda.1962.

Ferraresi, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais.São Paulo. Edgard Blücher Ltda.1977.

Haslam, J. A.; Summers, G. R.; Williams, D. Engineering instrumentation and control, Edward Arnold Publishers, 1981, Inglaterra.

Hutchings I. M. Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials. Elsevier Limited, 1992.

Johnson, G. R. ; Cook, W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strains rates and high temperatures, Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, 1983.

Kalpakjian, S. Schmid, S. R. Manufacturing Engineering and Technology.USA. Prentice Hall. 4ª edição. 2000.

Katsuhiko, O. Engenharia de Controle Moderno. Brasil. Prentice Hall. 3ª edição, 1998.

Lin, W. S. ; Lee, B. Y. ; Wu, C. L. Modeling the surface roughness and cutting force for turning. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 108, pp. 286-293, 2001.

Lo Casto, S. ; Lombardo, A. ; Passanantti, G. Relation between tool life in milling and in interrupted turning, Wear 131, 1988.

Machado, A. R. ; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Silva, M. B. Teoria da Usinagem dos Materiais. Editora Edgard Blucher, 2009

Pekelharing, A. J. Cutting tool damage in interrupted cutting. Wear 62,1980.

Pisspanen, V. Plastic deformation of metal: theory of simulated sliding, Wear, Volume 38, pgs 43-72, 1976.

Rodrigues, M. A., Machado, I. F., Sanches, H. A. B., Figueiredo, L. “A Influência do ângulo de posição durante o torneamento de perfis severamente interrompidos”, Usinagem 2008-Feira e Congresso, 2008.

Saladarriaga, P. A. C.; Santos, D. F. G.; Souza, R. M.; Machado, I. F. Stress evaluation of the machining process through the finite element method (FEM): The effect of a single MnS inclusion. International Congress of Mechanical Engineering, 2007, Brasília. Proceedings of COBEM 2007. Rio de Janeiro. ABCM, 2007. v. 070995

Shaw , M. C. Metal Cutting Principles. Great Britan.Clarendon Press. 2005.

Strafford, K. N. Indirect monitoring of machinability in carbon steels by measurement of cutting forces. *Journal of Materials Processing Technology*. V. 67. pp. 150-156, 1997.

Tönshoff, H. K. ; Kaestner, W. ; Schandt, R. Machinability of forged steels in interrupted cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 21, 1990.

Tönshoff, H. K. ; Kaestner, W. ; Patzke, M. Machinability of steel in discontinuous turning processes, 1st Int. Conf. on the Behaviour of Materials in Machining, Stratford-upon-Avon, 8-10 November 1988.

Trent, E. M. ; Wright, P. K. *Metal Cutting*. Editora Butterworth Heinemann. 4ª Edição, 2000.

ANEXO 1 – CÓDIGO-FONTE DAS FUNÇÕES DE MATLAB®

Função “extrair.m”

```
% here you can get a LTD file (AqDAdos 7 format)
% it is necessary the creation of a .MAT file using HdrLTD2Mat4.exe utility
% this file contains information from LTD header (scale limits, channel
% name and unit, sample frequency, sample count, comments, date)

%[x, pos, nr, hdst, time] = lynxgeng('demodado2.ltd', 1);

% here you can get a TEM file (AqDAdos DOS format)
clear all;

[x, pos, nr, hdst, time] = lynxgeng('test.tem', 1);
%[x, pos, nr, hdst, time] = lynxturbinado('1000rpm.tem', 1);

faq=15000;

% ----- Grafico tempo -----

% plot (time, x);
% title (hdst.comment);
% xlabel ('time (s)');
% ylabel (strcat (hdst.name(3), ' (', hdst.unit(3), ')'));
% zoom;
% grid;
% whos
% disp ('Veja o gráfico do sinal na Windows Figure No. ');

% ----- Analise FFT -----
ltime = length(time);
lx = length(x);
```

```

Y = fft(x);
%Y = fft(x,length(time));
Pyy = Y.* conj(Y)/ltime;

%time2 = time';
f = faq*(0:(ltime/2))/ltime;
plot(f,Pyy(1:(ltime/2+1)));
title('Frequency content of y');
xlabel('frequency (Hz)');
zoom;
grid;
whos
disp ('Veja o gráfico Pyy na Windows Figure No. ');

```

Função “lynxeng.m”

```

function [x, pos, nr, hdst, time, ok] = lynxgeng(filename, channel, pos, n)
%LYNXGENG Read samples from Lynx AqDados .TEM / LTD file.
%
% [X, POS, NR, HDST, TIME, OK] = LYNXGENG(FILENAME) reads all samples
% of all channels of the Lynx AqDados .TEM file specified in FILENAME.
% OK return -1 in the case of error or 0 in the case of success. X is matriz
% with NR rows by number of channels cols. NR is the number of samples per
% channels. Data from AqDados .tem file header is returned in HDST. In POS
% is returned the new sample index position in the file. TIME is an array
% with time of each sample.
%
% [X, POS, NR, HDST, TIME, OK] = LYNXGENG(FILENAME, CHANNEL) reads all
% samples of the channel specified in the CHANNEL parameter. You must
% specified 1 in CHANNEL to read the first active channel of the file, 2
% to read the second active channel, and so on. When 0 or -1 is passed to
% this function, all active channel will be read.
%

```

```
% [X, POS, NR, HDST, TIME, OK] = LYNXGENG(FILENAME, CHANNEL, POS, N)
% reads N samples of the channel specified in the CHANNEL parameter started
% by POS-th sample of the file. If 0 or -1 value is passed to N parameter,
% the remainder samples in the file will be read. For example, to read 256
% samples of the second channel beginning from 1024th sample use the
% command:
%
% [x, pos, nr] = lynxgeng ('demodado.tem', 2, 1024, 256);
% [x, pos, nr] = lynxgeng ('demodado.ltd', 2, 1024, 256);
%
% See LYNXINFO to get HDST struct format.
%
% See also LYNXINFO.
```

```
if (nargin == 1)
    channel = 0;
    pos = 0;
    n = 0;
elseif (nargin == 2)
    pos = 0;
    n = 0;
elseif (nargin == 3)
    n = 0;
elseif (nargin == 4)
else
    error('Incorrect number of input arguments.');
```

```
    return;
end;
```

```
if (channel < 0) channel = 0; end;
```

```
if (pos < 0) pos = 0; end;
```

```
if (n < 0) n = 0; end;
```

```
if ~isstr(filename)
```

```

    error('Filename must be a string argument!');
    return
end

x= upper(filename)

tpfile= strfind (x, '.TEM')

if size (tpfile) >0
    % --- Read header data from AqDados .TEM file ---
    [hdst, ok] = lynxinfo_tem (filename);
    if ok == -1
        error('Cannot open AqDados file!');
        return
    end
else
    % --- Read header data from AqDados .TEM file ---
    [hdst, ok] = lynxinfo_ltd (filename);
    if ok == -1
        error('Cannot open AqDados file!');
        return
    end
end;

% --- check channel number ---
if (channel > hdst.nc)
    error('Invalid channel!');
    return
end;

% --- check pos ---
if (pos >= hdst.ns)
    error('lynxgeng: no more samples!');
    return
end;

```

```

% --- Open AqDados .TEM file ---
hd = fopen (filename, 'r');
if hd == -1
    error('Cannot open AqDados file!');
    return
end

% === Read all channels ===
%
nc = hdst.nc;

if size (tpfile) >0
    p = pos * nc * 2 + 1747
else
    p = pos * nc * 2 + hdst.FileOfs
end

fseek (hd, p, -1);
if (n == 0)
    nr = hdst.ns - pos
else
    nr = hdst.ns - pos;
    if (n < nr)
        nr = n
    end;
end;
pos = pos + nr;
x = fread (hd, [nc, nr], 'int16');
x = x.';

% === engineering unit conversion factors ===
for j=1:hdst.nc,
    m (j) = (hdst.lsup (j) - hdst.linf (j)) / 65536.0;

```

```

    b(j) = m(j) * 32768.0 + hdst.linf(j);
end;

if (channel == 0)
    % --- convert all channels ---
    for j=1:hdst.nc,
        for i=1:nr,
            x(i,j) = x(i,j) * m(j) + b(j);
        end;
    end;
else
    % --- convert select channel ---
    for i=1:nr,
        x(i,channel) = x(i,channel) * m(channel) + b(channel);
    end;
    x=x(1:nr,channel);
end;

% --- process time array ---
if (nargout >= 5)
    dt = 1 / hdst.fs;
    for i=1:nr,
        time(i) = dt * (pos-nr+i);
    end;
    time = time.';
end;

ok = fclose (hd);

```


ANEXO 2 – FOTOGRAFIAS DAS FERRAMENTAS DE CORTE

Ensaio de torneamento realizados com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em primeiro passe e velocidade de corte de 60 m/min:

Ensaio de torneamento realizados com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em segundo passe e velocidade de corte de 60 m/min:

Ensaio de torneamento realizados com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em terceiro passe e velocidade de corte de 60 m/min:

Ensaio de torneamento realizados com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em quarto passe e velocidade de corte de 60 m/min:

Ensaio de torneamento realizados com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em quinto passe e velocidade de corte de 60 m/min:

Ensaio de torneamento realizados com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em sexto passe e velocidade de corte de 60 m/min:

Ensaio de torneamento realizados com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em sétimo passe e velocidade de corte de 60 m/min:

Ensaio de torneamento realizados com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em oitavo passe e velocidade de corte de 60 m/min:

Ensaio de torneamento realizado com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em primeiro passe e velocidade de corte de 120 m/min:

Ensaio de torneamento realizados com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em segundo passe e velocidade de corte de 120 m/min:

Ensaio de torneamento realizado com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em terceiro passe e velocidade de corte de 120 m/min:

Ensaio de torneamento realizados com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em quarto passe e velocidade de corte de 120 m/min:

Ensaio de torneamento realizados com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em quinto passe e velocidade de corte de 120 m/min:

Ensaio de torneamento realizado com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em sexto passe e velocidade de corte de 120 m/min:

Ensaio de torneamento realizado com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em sétimo passe e velocidade de corte de 120 m/min:

Ensaio de torneamento realizado com corpo-de-prova de seção transversal quadrada em oitavo passe e velocidade de corte de 120 m/min:

Ensaio de torneamento realizados com corpo-de-prova cilíndrico contendo rasgos de chaveta e velocidade de corte de 60 m/min:

Ensaio de torneamento realizados com corpo-de-prova cilíndrico contendo rasgos de chaveta e velocidade de corte de 120 m/min: