

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

**INVESTIGAÇÕES SOBRE O ACABAMENTO SUPERFICIAL DE
USINAGENS COM ALTÍSSIMA VELOCIDADE DE CORTE**

Autor: **Ian Faccio**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para concorrer ao Título de Mestre, pelo curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Área de concentração: Projeto e Fabricação.

Orientador: **Prof. Dr. Marco Stipkovic F^º**

São Paulo
2002

Data da Defesa: ___/___/___

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

À minha família, fonte inesgotável de motivação e perseverança.

AGRADECIMENTOS

Aos amigos e orientadores Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha e Prof. Dr. Marco Stipkovic Filho, pelo constante apoio e diretrizes essenciais.

Ao Prof. Dieter Boussejot e ao Instituto Tecnológico Brasil-Alemanha pelo equipamento e instalações utilizados.

A todos que direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

SUMÁRIO

		p.
	RESUMO	
	SUMMARY / ABSTRACT	
1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Apresentação.....	1
1.2	Objetivos gerais.....	3
1.3	Objetivos específicos.....	3
2	REVISÃO DA LITERATURA USINAGEM COM ALTÍSSIMA VELOCIDADE DE CORTE.....	5
2.1	Aspecto Histórico.....	5
2.2	Definição de Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte.....	10
2.3	Processos de Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte.....	14
2.4	Materiais e Métodos de Ensaio com Altíssima Velocidade de Corte.....	25
2.5	Máquinas para Altíssima Velocidade de Corte.....	38
2.6	Processos de Formação de Cavaco com Altíssima Velocidade de Corte.....	49
2.7	Ferramentas para Altíssima Velocidade de Corte.....	59
3	REVISÃO DA LITERATURA RUGOSIDADE.....	72
3.1	Conceito de Rugosidade.....	72

3.2	Aplicações de Parâmetros de Rugosidade.....	76
3.3	Definições de Alguns Parâmetros de Rugosidade.....	79
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	86
4.1	Apresentação.....	86
4.2	Corpos de Prova.....	88
4.3	Valores Analisados e Equipamento Utilizado.....	90
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	94
6	CONCLUSÕES	115
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119

LISTA DE FIGURAS

	p.
Figura 1 - Princípio de Salomon.....	6
Figura 2 - Tempos de operações de usinagem.....	8
Figura 3 - Campo de aplicação da velocidade de corte	10
Figura 4 - Classificação das máquinas fresadoras.....	12
Figura 5 - Classificação do tipo de rebarbas.....	16
Figura 6 - Comparação das velocidades de avanço.....	20
Figura 7 - Contraste da distribuição de esforços.....	22
Figura 8 - Mecanismo do processo de amortecimento.....	28
Figura 9 - Diagrama de estabilidade.....	29
Figura 10 - Diagrama esquemático de medição de temperaturas locais.....	35
Figura 11 - Seqüência de usinagem.....	36
Figura 12 - Conjunto de aplicações otimizadas.....	39
Figura 13 - Diagrama de tipos de peças diferentes.....	40
Figura 14 - Diagrama de alguns materiais de engenharia.....	44
Figura 15 - Utilização de um eixo para evitar interferências.....	48
Figura 16 - Metodologia para determinação.....	51
Figura 17 - Primeira fase da formação de um cavaco.....	53
Figura 18 - Segunda fase da formação de um cavaco.....	53
Figura 19 - Terceira fase da formação de um cavaco.....	54

Figura 20 - Quarta fase da formação de um cavaco.....	54
Figura 21 - Analogia entre espessura da transferência seletiva.....	57
Figura 22 - Deformações no acoplamento.....	63
Figura 23 - Corte esquemático do sistema de acionamento.....	64
Figura 24 - Exemplo de desempenho em relação ao desgaste.....	68
Figura 25 - Exemplo de representação de um perfil de rugosidade.....	73
Figura 26 - Ilustração do parâmetro de rugosidade R_a	79
Figura 27 - Ilustração do parâmetro de rugosidade R_y	80
Figura 28 - Ilustração do parâmetro de rugosidade R_z	81
Figura 29 - Comparação de duas distribuições de alturas de perfis.....	84
Figura 30 - Arranjo da fixação dos corpos de prova.....	89
Figura 31 - Resultados de Rugosidade média (R_a).....	95
Figura 32 - Resultados de R_z	98
Figura 33 - Resultados de R_y	99
Figura 34 - Resultados de S_m	100
Figura 35 - Resultados de m_4	101
Figura 36 - Exemplo da estrutura metalográfica do 1 ^o corpo de prova.....	103
Figura 37 - Exemplo da estrutura metalográfica do 2 ^o corpo de prova.....	104
Figura 38 - Exemplo da estrutura metalográfica do 3 ^o corpo de prova.....	105

LISTA DE TABELAS

	p.
TABELA 1 - Comparação entre os processo de usinagem.....	18
TABELA 2 - Características construtivas dependentes do material.....	44
TABELA 3 - Exemplo comparativo dos aspectos construtivos.....	45
TABELA 4 - Modelos de excitação para vibrações	67
TABELA 5 - Valores de R_a atingíveis.....	76
TABELA 6 - Configuração da profundidade de corte conforme o ensaio...	87
TABELA 7 - Configuração da distribuição dos ensaios	88
TABELA 8 - Desempenho de processos de retificação e torneamento....	108
TABELA 9 - Desempenho de processos de torneamento e fresamento...	109
TABELA 10 - Comparação entre os processo de usinagem.....	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD - Projeto auxiliado por computador

CAM - Manufatura auxiliada por computador

CAPP - Planejamento de processos auxiliado por computador

Cermet - material composto de mistura de cerâmicas com metais

CBN - Nitreto Cúbico de Boro

CNC - Comando numérico computadorizado

CVD - Deposição química de vapor

DIN - Norma técnica alemã

HB - Dureza Brinell

HSCO - Aço rápido com Cobalto

HSK - Mandril normalizado alemão de fuso oco

HSM - Usinagem com altíssima velocidade de corte

HVM - Usinagem de alta velocidade

ISO - Norma técnica internacional (Organização para normalização internacional)

LSM - Usinagem de baixa velocidade

MD - Metal duro

MQL - Quantidade mínima de lubrificação

NURBS - Splines tipo B Racionais Não-Uniformes

PFC - Polímero Reforçado com Fibras de Carbono

PVD - Deposição física de vapor

UHSM - Usinagem de velocidade ultra alta

VB - Maior dimensão do desgaste na aresta da pastilha de corte

VDI - Norma da indústria automobilística alemã

VHSM - Usinagem de velocidade muito alta

LISTA DE SÍMBOLOS

a - avanço, $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$

C - calor específico, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

D - quantidade de picos em um perfil de rugosidade

e - excentricidade residual permissível, μm

F - força, N

f - frequência de rotação operacional, Hz

h - espaçamento da malha de elementos finitos

J - equivalente mecânico do calor, J

K_1 - fator de adaptação

k - condutibilidade térmica, $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$

l_m - comprimento medido da rugosidade, mm

m - massa, kg

m^* - massa combinada da ferramenta e do eixo do fuso, kg

q - geração de calor, J

V - velocidade de corte

V_{CAV} - velocidade do cavaco, $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$

V_{CIS} - velocidade no plano de cisalhamento, $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$

V_c - velocidade de corte, $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$

V_{MAX} - velocidade vibracional máxima

T - temperatura, °C, K

T_{CIS} - temperatura no plano de cisalhamento, K

T_{INT} - temperatura na interface cavaco-ferramenta, K

t - tempo, s

γ - ângulo de folga da ferramenta, °

ε - deformação

ε_{R} - deformação referencial

κ - difusividade do calor

μ - coeficiente de atrito

ρ - densidade, kg.m^{-3}

σ - tensão de escoamento, MPa

θ - espessura do filme fluido, μm

τ_{PLA} - tensão de cisalhamento no plano primário de cisalhamento, MPa

τ_{FER} - tensão de cisalhamento na face da ferramenta, MPa

ϕ - diâmetro, mm

Ω - frequência de excitação, s^{-1}

ω - frequência natural, s^{-1}

RESUMO

FACCIO, I. **Investigações sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte.** 2002, 126p. Dissertação Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Corpos de prova de ferro fundido foram usinados com altíssima velocidade de corte. Tiveram diversos parâmetros de sua rugosidade medida e os valores foram descritos em gráficos de rugosidade versus profundidade de corte. Pode-se verificar uma dependência entre estes valores, mas não o clássico aumento da rugosidade conforme o aumento da profundidade de corte. Realizou-se ainda a inspeção metalográfica dos corpos de prova na busca de mudanças de fase na estrutura ferro carbono que indiquem temperaturas elevadas no local, causadas pela alta velocidade de corte.

Palavra-chave: Usinagem, Altíssima Velocidade de Corte, Rugosidade, Processos de Fabricação.

SUMMARY / ABSTRACT

FACCIO, I. **Investigations on the quality of high-speed machined surfaces**. 2002, 126p. Dissertação Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Cast iron test parts were high-speed machined. They had several roughness parameters measured and these values were plotted on roughness versus depth of cut charts. It could be noticed a relation between these values, but not the classical roughness increase due to the increase of depth of cut. Moreover, the metalographical analisys was performed for these test parts, in a search for phase changes on the carbon-iron structure which indicate high temperatures at the region, caused by the high cutting speed.

Keywords: Machining, HSM, Roughness, Manufacturing Processes.

AUTORIZAÇÃO

Autorizo a reprodução e/ou divulgação total ou parcial da presente obra, por qualquer meio convencional ou eletrônico, desde que citada a fonte.

Ian Faccio

Assinatura do autor: _____

Instituição: Escola Politécnica da USP

Local: São Paulo

Endereço: Av. Escola Politécnica

E-mail: ian.faccio@poli.usp.br