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

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 Bousseljot e ao Instituto Tecnológico Brasil-Alemanha pelo equipamento e instalações utilizados.
A todos que direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.
SUMÁRIO

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
LISTA DE FIGURAS

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 1º corpo de prova ...... 103
Figura 37 - Exemplo da estrutura metalográfica do 2º corpo de prova ...... 104
Figura 38 - Exemplo da estrutura metalográfica do 3º corpo de prova ...... 105
LISTA DE TABELAS

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, mm.min\(^{-1}\)
C - calor específico, J.kg\(^{-1}\).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, kg.m.s\(^{-3}\).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, m.min\(^{-1}\)
V\(_{CIS}\) - velocidade no plano de cisalhamento, m.min\(^{-1}\)
V\(_c\) - velocidade de corte, m.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 - freqüência de excitação, s^{-1}
ω - freqüência natural, s^{-1}
RESUMO


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.

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 metallographical analysis 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