

A Deus,  
Aos meus pais Tarciso e Marli,  
A minha esposa Fátima,  
Aos meus pequenos Guilherme e Mariana.

## *Agradecimentos*

Ao professor Reginaldo Teixeira Coelho pela orientação e amizade.

Aos amigos e professores José Antônio da Silva e Alex Sander Chaves da Silva, pelo apoio inicial.

Ao suporte financeiro da CAPES pela concessão da bolsa.

Ao Srs. Francisco Marcondes e Aldeci Vieira Santos da empresa SANDVIK e ao Sr. José Fachin da empresa SANDI FERRAMENTAS pela concessão das Ferramentas de corte, ao Sr. Luis A. Colembergue Klujszo da GERDAU Aços Especiais Piratini pela concessão dos aços para confecção dos corpos-de-prova.

Aos técnicos Adolpho, Ariel e Daniel, do NUMA/OPF e ao acadêmico Ricardo Arai pelo apoio durante todo o trabalho experimental.

Aos técnicos do LAMAFE Adão, Botelho e José Carlos pela troca de conhecimento.

Aos colegas do OPF/NUMA, Adriano Fagali, Alessandro Roger, Américo Guelere, Andréia, Arthur, Carlos Elias, Carlos Magno, Elizabeth, Emanuel, Eraldo Janone, Fabio Ferraz, Hugo, Irene, Jen Po, Mamoro, Marcelo del Guerra, Marcelo Batista, Salete, Thiago, Tobias, Rafael, Renato Capla, pelo companheirismo e ajuda.

A todos os colegas da Pós-Graduação, professores e funcionários do Departamento de Mecânica da EESC/USP.

A Todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## **RESUMO**

BRANDÃO, L. C. (2006). *Estudo experimental da condução de calor no fresamento de materiais endurecidos utilizando altas velocidades de corte*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

*Modernas empresas buscam a melhoria dos seus sistemas de produção a fim de aumentar a produtividade e a qualidade de produtos. A tecnologia de usinagem com alta velocidade de corte (HSC – High Speed Cutting) permite aumentar as taxas de remoção de material, as tolerâncias dimensionais das partes, assim como a melhoria do acabamento superficial. Esta tecnologia tem sido muito utilizada na área de moldes e matrizes, pois minimiza o problema de tempos de usinagem longos na produção e facilita a obtenção de elevada qualidade, normalmente requerida em produtos injetados/estampados. Atualmente diversos estudos em HSC buscam a compreensão de todos os fatores envolvidos nesta nova tecnologia, a qual ainda apresenta diversas lacunas para o seu domínio completo. Este trabalho apresenta um estudo teórico-experimental da condução de calor nos materiais utilizados na fabricação de moldes e matrizes, submetidos à usinagem com altas velocidades de corte. Os materiais utilizados foram os aços AISI D2 e AISI H13, muito utilizados nas indústrias de moldes e matrizes. Os ensaios foram realizados com fresas de ponta esférica (Ball-Nose) com e sem angulação de hélice e com ângulo de saída neutro, com revestimento de (TiAl)N e com uma ferramenta com uma placa de PcBN soldada. A geometria dos corpos-de-prova foi projetada para aproximar-se dos casos reais encontrados na indústria, casos em que superfícies complexas e paredes finas são comumente usinadas em matrizes e moldes. Dois sistemas de resfriamento foram utilizados o ar comprimido e o ar gelado utilizando o princípio de vórtice. Os resultados demonstraram uma pequena variação da temperatura em função dos materiais empregados e das ferramentas utilizadas em todos os testes. Os dois sistemas de resfriamento alternativos à usinagem sem sistema de resfriamento, o ar comprimido e o ar frio, também se mostraram influentes na variação da temperatura, apresentando-se como sistemas capazes de remover o calor no processo durante a usinagem. Os desvios de forma encontrados nos corpos-de-prova devem ser considerados na usinagem de perfis muito precisos. Foram encontrados valores da ordem de 0,05 mm, oriundos da combinação de distorções térmicas e tensões residuais, os quais podem ser significativos, por exemplo, na área de matrizaria.*

**Palavras-chave:** *Medição de Temperatura, Condução de Calor, Altas Velocidades de Corte, Moldes e Matrizes.*

**ABSTRACT**

BRANDÃO L. C. (2006). *Experimental study on heat conduction in milling of hardened materials using high speed cutting*. Ph.D. Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

*Modern industries improve their production systems aiming at increasing productivity and product quality. The high speed cutting (HSC) technology allows increasing material removal rates, workpiece dimensional tolerance and surface finishing as well. Such technology has been extensively used in mold and dies areas, since it minimizes long lead time problems and facilitates high quality machining, normally required in injected/formed products. Nowadays, several studies in HSC search for understanding all aspects involved in that new technology, which still presents many blanks for its complete knowledge. The present work shows a theoretical and experimental study on heat conduction flux in materials applied to mold and die manufacturing, submitted to HSC. It was used AISI D2 and AISI H13, which are very common in mold and die industry. Two types of cylindrical ball nose end milling tool were used in the experiments: coated with (TiAl)N and tipped with PcBN. The workpiece geometry was conceived to simulate real cases found in industry, in which complex surfaces and slim walls are commonly machined in molds and dies. Two cooling systems were used in the tests, compressed air and frozen air using vortex principle. Results indicated a small temperature variation as a function of machined materials and tools throughout the tests. Both alternative cooling systems, besides dry machining, compressed air and cool air, also demonstrated to affect temperature variation. They presented themselves as capable of remove heat from the process during the cutting operation. The form deviation found in the workpiece after machining must be considered when machining very precise profiles. Variation values of around 0.05 mm were found, coming from a combination of thermal distortion and residual stress, which could be significant, for example, in die manufacturing area.*

**Key-words:** *Temperature Measure, Heat Conduction, High Speed Cutting, Molds and Dies.*

## ***Lista de Figuras***

Figura 2-1. Redução do tempo de produção de um molde devido a HSM (FINZER, 1998). .....	6
Figura 2-2. Definição de faixas de valores para HSC (VIGNEAU, 1997). .....	8
Figura 2-3. A influência das características da usinagem a alta velocidade .....	9
Figura 2-4. Seqüência de produção de moldes e matrizes (SANDVIK, 2002). .....	11
Figura 2-5. Fluxo de Informações e etapas do processo de fabricação para moldes e matrizes (adaptado de FALLBÖHMER et al., 1996). .....	12
Figura 2-6. Localização das três zonas de geração de calor (BRAGHINI Jr., 2002). ....	19
Figura 2-7. Modelo simplificado da formação de cavaco em duas dimensões (adaptado de SHAW, 1988 apud BRAGHINI Jr., 2002). .....	19
Figura 2-8. Diferentes mecanismos de desgaste (adaptado de KOPAC et al., 2001). ....	21
Figura 2-9. Esquema de funcionamento de pirômetros (AMPERES AUTOMATION, 2003). .....	24
Figura 2-10. Esquema do experimento realizado para medição da temperatura na usinagem a seco “in loco” (adaptado de DÖRR et al., 2003). .....	25
Figura 2-11. Esquema do experimento realizado para medição da temperatura na usinagem a seco “in loco” (adaptado de Müller-Hummel, 1995). .....	27
Figura 2-12. Experimento para medição da temperatura (Ming et al., 2003). .....	27
Figura 2-13. Determinação da curva de resfriamento para seis condições de resfriamento (Sales et al., 2001). .....	32
Figura 2-14. Possibilidades de mudança de processo para o torneamento a seco (adaptado de MOMPHER, 2000). .....	35
Figura 2-15. Durezas a quente/características de alguns materiais metálicos (adaptado de SREEJITH & NGOI, 2000). .....	45
Figura 3-1. Detalhe da ferramenta R216.42 16030 – AK32G 1610 (Fr1) .....	53
Figura 3-2. Detalhe da Geometria das ferramentas F1827R.Z.16.Z2.08 WXX15 e F1827R.Z.16.Z2.08 WCB 80 .....	54
Figura 3-3. Detalhe do corpo-de-prova. ....	56
Figura 3-4. Dimensões dos corpos-de-prova. ....	56
Figura 3-5. Dispositivo para fixação dos corpos-de-prova .....	56
Figura 3-6 - Vista geral da montagem dos termopares. ....	57
Figura 3-7. Esquema da furação dos corpos de prova. ....	58

Figura 3-8. Esquema da montagem da bancada de ensaios .....	59
Figura 3-9. Esquema da montagem do rotâmetro e do regulador de pressão .....	61
Figura 3-10 - Tubo vórtice montado no cabeçote da máquina. ....	61
Figura 3-11 - Princípio de funcionamento do tubo vortex (Fröhlingsdorf, 1999). ....	62
Figura 3-12 - Modelo do resfriador utilizado nos testes. ....	63
Figura 3-13. Esquema da trajetória de usinagem dos corpos-de-prova. ....	64
Figura 3-14. Detalhe do ponto de contato médio da ferramenta no corpo de prova.....	65
Figura 3-15. Equação e desenho esquemático utilizado para cálculo dos diâmetros máximos e mínimos. ....	65
Figura 3-16. Esquema sistema de medição dos pontos no corpo de prova.....	67
Figura 3-17. Sistema de referência realizando a medição dos perfis.....	67
Figura 3-18. Exemplo da malha utilizada no programa de elementos finitos.....	68
Figura 3-19. Detalhe dos carregamentos aplicados no elemento.....	69
Figura 4-1. Temperatura do corpo de prova de aço AISI H13 representada pelos cinco termopares, usinagem sem sistema de refrigeração (ferramenta R216.42-16030- AK32G).....	73
Figura 4-2. Temperatura do corpo de prova de aço AISI H13 representada pelos cinco termopares, usinagem com ar comprimido (ferramenta F1827R.Z16.Z2.08 WXX15).....	76
Figura 4-3. Temperatura do corpo de prova de aço AISI H13 representada pelos cinco termopares, usinagem com ar gelado (ferramenta F1827R.Z16.Z2.08 WCB80)... ..	78
Figura 4-4. Gráficos das curvas simuladas com filtragem dos pontos, para o erro mínimo de 1,11% ferramenta R216.42-16030-AK32G aço AISI H13.....	84
Figura 4-5. Gráficos das curvas simuladas com filtragem dos pontos, para o erro mínimo de 0,74% ferramenta F1827R.Z16.Z2.08 WCB80 aço AISI D2.....	88
Figura 4-6. Gráfico das curvas simuladas com filtragem dos pontos. para o erro mínimo de 0,36% ferramenta R216.42-16030-AK32G aço AISI D2 .....	91
Figura 4-7. Gráfico do perfil do corpo de prova após ensaio de usinagem do aço AISI H13 sem sistema de resfriamento (ferramenta R216.42-16030-AK32G). ....	95
Figura 4-8. Gráfico do perfil do corpo de prova após ensaio de usinagem do aço AISI H13 com sistema de ar comprimido (ferramenta R216.42-16030-AK32G). ....	96
Figura 4-9. Gráfico do perfil do corpo de prova após ensaio de usinagem do aço AISI H13 com sistema de ar gelado (ferramenta R216.42-16030-AK32G) .....	96

- Figura 4-10. Gráfico do perfil do corpo de prova após ensaio de usinagem do aço AISI D2 sem sistema de resfriamento (ferramenta R216.42-16030-AK32G). ..... 98
- Figura 4-11. Gráfico do perfil do corpo de prova após ensaio de usinagem do aço AISI D2 usinagem com o sistema de ar comprimido (ferramenta R216.42-16030-AK32G)..... 99
- Figura 4-12. Gráfico do perfil do corpo de prova após ensaio de usinagem do aço AISI D2 usinagem com sistema de ar gelado (ferramenta R216.42-16030-AK32G) ..... 99

### ***Lista de Tabelas***

Tabela 2-1 - Classificação AISI dos aços ferramenta (MACIEL, 2003).....	15
Tabela 2-2. Propriedades selecionadas das camadas de TiN, TiCN e(TiAl)N (YUHARA, 2000).....	44
Tabela 3-1. Dimensões da Ferramenta R216.42 16030 – AK32G 1610 .	53
Tabela 3-2. Dimensões das ferramentas F1827R.Z.16.Z2.08 WXX15 (Fr2) e F1827R.Z.16.Z2.08 WCB 80 (Fr3).....	54
Tabela 3-3 – Valores médios da composição química e dureza dos materiais utilizados. .....	55
Tabela 3-4. Propriedades térmicas dos dois aços utilizados nos teste de fresamento.....	55
Tabela 3-5 - Valores de temperatura, pressão e vazão para o sistema de resfriamento segundo o fabricante. ....	63
Tabela 3-6. Variáveis utilizadas nos ensaios de fresamento.....	65
Tabela 3-7 - Valores de temperatura, pressão e vazão utilizados nos ensaios de fresamento com o sistema de ar gelado. ....	66
Tabela 3-8. Valores iniciais propostos para a simulação dos testes experimentais ensaios sem sistema de resfriamento. ....	70
Tabela 4-1. Quadro resumo dos valores máximos de temperatura para os aços AISI H13 e AISI D2, testes a seco. ....	75
Tabela 4-2. Quadro resumo dos valores máximos de temperatura para os aços AISI H13 e AISI D2 com sistema de ar comprimido. ....	77
Tabela 4-3. Quadro resumo dos valores máximos de temperatura para os aços AISI H13 e AISI D2 com sistema de ar gelado.....	79
Tabela 4-4. Quadro dos dados para o experimento fatorial com 2 fatores, temperatura e ferramentas, aço AISI H13 testes a seco.....	81
Tabela 4-5. Quadro anova dos resultados do experimento com o aço AISI H13, teste a seco.....	81
Tabela 4-6. Quadro anova dos resultados do experimento com o aço AISI H13 com sistema de ar frio.....	82
Tabela 4-7. Quadro anova dos resultados do experimento com o aço AISI D2 com sistema de ar frio.....	83
Tabela 4-8. Resumo dos erros percentuais encontrados nos testes de simulação sem sistema de resfriamento para a três ferramentas empregadas, aço AISI H13. ....	85



Tabela 4-9. Resumo dos erros percentuais encontrados nos testes de simulação sem sistema de resfriamento para a três ferramentas empregadas, aço AISI D2.....	87
Tabela 4-10. Resumo dos erros percentuais encontrados nos testes de simulação com sistema de ar comprimido para a três ferramentas empregadas, aço AISI H13.....	89
Tabela 4-11. Resumo dos erros percentuais encontrados nos testes de simulação com sistema de ar comprimido para a três ferramentas empregadas, aço AISI D2.....	90
Tabela 4-12. Resumo dos erros percentuais encontrados nos testes de simulação com sistema de ar gelado para a três ferramentas empregadas, aço AISI H13.....	93
Tabela 4-13. Resumo dos erros percentuais encontrados nos testes de simulação com sistema de ar gelado para a três ferramentas empregadas, aço AISI D2.....	94
Tabela 4-14. Quadro resumo dos desvios dimensionais para o aço AISI H13 com as três ferramentas.....	97
Tabela 4-15. Quadro resumo dos desvios dimensionais para o aço AISI D2 com as três ferramentas.....	101

***Lista de Abreviaturas e Siglas***

A/D = Analógico Digital

AISI = Instituto Americano de Aço e Ferro

ANSYS = Analysis of System

AWG = American Wire Gage

CAD = Computer Aided Desing (Desenho Auxiliado por Computador)

CAM = Computer Aided Manufacturing (Manufatura Auxiliada por Computador)

cBN = Nitreto de Boro Cúbico

CNC = Comando Numérico Computadorizado

Conv = convecção natural na rotina do ANSYS

Convelo = Convecção forçada na rotina do ANSYS

CVD = Chemical Vapour Depostion (Deposição química de vapor)

D2 = Codificação para aços de trabalho a frio

$D_c$  = Diâmetro da ferramenta de corte

$D_{ef}$  = Diâmetro efetico de Corte

GG25 = ferro fundido cinzento

H13 = Codificação para aços para trabalho a quente

Hflux = calor na rotina do ANSYS

HRC = Dureza Rockwell

HSC = High Speed Cutting (Altas Velocidades de Corte)

HSM = High Speed Machning (Altas velocidades de usinagem)

HV = Dureza Vickers

INCONEL<sup>TM</sup> = Superliga a base de Níquel

M2 = Codificação para aços a base de Molibdênio

PcBN = Nitreto de Boro Cúbico Policristalino

PCM = Pés cúbicos por minuto

PVD = Physical Vapour Deposition (Deposição física de vapor)

(TiAl)N = Nitreto de Alumínio Titânio

T2 = Codificação para aços a base de Tungstênio

TICN = Carbonitreto de Titânio

TIN = Nitreto de Titânio

VB = Desgaste de flanco

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

