

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a),
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir de
25/10/2020.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Faculdade de Engenharia de Bauru

SAIMON VENDRAME

**INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO AÇO-RÁPIDO AISI M3:2 APÓS O
PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**

BAURU-SP

2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Faculdade de Engenharia de Bauru

SAIMON VENDRAME

INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO AÇO-RÁPIDO AISI M3:2 APÓS O
PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
como requisito à obtenção do título de Doutor em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi (UNESP-Bauru)

Co-orientador: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva (UFU)

BAURU-SP

2019

V453i Vendrame, Saimon
INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO AÇO-RÁPIDO
AISI M3:2 APÓS O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO /
Saimon Vendrame. -- Bauru, 2019
116 f. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Eduardo Carlos Bianchi
Coorientador: Rosemar Batista da Silva

1. Retificação. 2. aço-rápido. 3. AISI M3:2. 4. pino-lixo.
5. desgaste abrasivo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE SAIMON VENDRAME, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 25 dias do mês de outubro do ano de 2019, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. LUIZ DARE NETO do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Dr. HAMILTON JOSÉ DE MELLO do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ANSELMO EDUARDO DINIZ do(a) Departamento de Engenharia de Manufatura e de Materiais / Universidade Estadual de Campinas, Prof. Dr. AMAURI HASSUI do(a) Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais / Universidade Estadual de Campinas, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de SAIMON VENDRAME, intitulada **INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO AÇO RÁPIDO AISI M3:2 APÓS O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO _____. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI

Prof. Dr. LUIZ DARE NETO

Dr. HAMILTON JOSÉ DE MELLO

Prof. Dr. ANSELMO EDUARDO DINIZ

Prof. Dr. AMAURI HASSUI

AGRADECIMENTOS

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB), pela oportunidade de realizar o curso e pelos recursos utilizados.

Ao professor Dr. Eduardo Carlos Bianchi, pelo trabalho de orientação e atenção prestada.

Ao Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva pelo trabalho de co-orientação.

Ao Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA), em especial ao Dr. Hamilton José de Mello.

A Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar parte do curso, e pelos recursos utilizados.

Ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da UFU, ao professor Dr. Álisson Rocha Machado e aos envolvidos neste trabalho Rodrigo Ruzzi, Otávio Ruzzi, Antônio Vitor de Melo, Raphael Paiva Lima, Alcione Reis, Matheus Borges, e demais colegas com quem convivi durante este período.

Ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da UFU, em especial ao professor Dr. Washington Martins, José Lúcio, Ricardo Spini, Vinicius Teles e demais membros do laboratório pela utilização dos equipamentos e auxílio na realização dos ensaios.

À empresa *OSG Sulamericana* pela doação das amostras.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) pela concessão da licença para a conclusão deste trabalho.

As agências de fomento CAPES, CNPq, FAPESP e FAPEMIG.

A minha família, meu Pai Cláudio Vendrame, minha Mãe Marilisa Ameko Vendrame, minha irmã Egídia Vendrame, e minha esposa Tais Proto, pelo apoio e por estarem sempre ao meu lado.

RESUMO

Aços-rápidos são materiais que exibem elevada resistência ao desgaste abrasivo, aliada a uma tenacidade relativamente alta, propriedades estas que os tornam adequados para se fabricar ferramentas de corte. Grande parte de suas propriedades se deve a presença de carbonetos na microestrutura. Ao mesmo tempo que estas propriedades mecânicas são favoráveis para a utilização como ferramentas, tornam-se desafios na sua fabricação. O processo de retificação é empregado nas últimas etapas de fabricação de ferramentas de corte como machos e brocas e a presença dos carbonetos afetam a eficiência dos rebolos. Neste contexto, este trabalho visa investigar o quanto a diferença de microestrutura de aços-rápidos classe AISI M3:2, obtidos de diferentes fornecedores, influencia na retificação, levando em consideração a integridade superficial. Os materiais, aqui nomeados como M-A, M-B e M-C, foram avaliados sob três aspectos: características da microestrutura, resistência à abrasão e integridade da superfície após a retificação. Da microestrutura os carbonetos tipo MC e M_6C , foram descritos quanto à forma e a distribuição, utilizando para isso MEV e EDS. A resistência à abrasão dos materiais foi medida recorrendo ao método de ensaio tribológico pino-lixia. Após esta caracterização, foram realizados ensaios de retificação tangencial plana com rebolo de Carboneto de Silício (SiC) em várias penetrações de trabalho (entre 10 μm e 30 μm). As superfícies das amostras foram avaliadas mensurando a rugosidade, avaliadas com MEV, e descrito o perfil de microdureza próximo a superfície. Como resultados, na microestrutura os materiais apresentaram diferentes morfologias e distribuição de carbonetos, sendo que para o material M-A apresentou os maiores carbonetos de vanádio tipo MC. O coeficiente de desgaste abrasivo (k) para os três materiais avaliados apresentaram valores próximos (entre 9,18 e 13,45 $mm^3.N^{-1}.m^{-1}$), mas o material M-A, apresentou instabilidade no desgaste abrasivo (até 28% de variação entre os resultados). Após a retificação a superfície do material M-C apresentou riscos irregulares com características de remoção de material de forma frágil. Foram medidas microdureza acima da média (40% maiores) em uma camada de até 100 μm a partir da superfície nos três materiais. Atribui-se a esses resultados o efeito da fragilização da matriz e dos carbonetos tipo M_6C , que por se fraturarem resultam em remoção de material de modo frágil.

Palavras Chave: Retificação, aço-rápido, AISI M3:2, pino-lixia, desgaste abrasivo, carbonetos primários.

ABSTRACT

High-Speed Steels are materials that exhibit high abrasive wear resistance coupled with relatively high toughness, properties that make them suitable for making cutting tools. Much of its properties are due to the presence of carbides in the microstructure. While these mechanical properties are favorable for use as tools, they impose challenges in their manufacture. The grinding process is employed in the final stages of the cutting tools manufacturing, such as taps and drills and the presence of carbides affects the efficiency of the grinding wheels. In this context, this work aims to investigate how the microstructure difference of class AISI M3: 2 steel, obtained from different suppliers, influences the grinding, taking into consideration the surface integrity. The materials, here named M-A, M-B, and M-C, were evaluated under three aspects: microstructure characteristics, abrasion resistance, and surface integrity after grinding. From the microstructure, carbides type MC and M₆C were described regarding the shape and distribution, using for this purpose SEM and EDS. The abrasive wear resistance of the materials was measured using the pin-abrasive tribological test. After this characterization, flat tangential grinding tests were performed, using silicon carbide grinding wheel (SiC), in various work depths (between 10 μm and 30 μm). The ground samples surfaces were evaluated by measuring the roughness parameters, evaluated by SEM, and the microhardness profile near the surface was described. As a result, in the microstructure, the materials presented different morphologies and carbide distribution, and for the material, M-A presented the largest MC type vanadium carbides. The abrasive wear coefficient (k) for the three evaluated materials showed similar values (between 9.18 and 13.45 $\text{mm}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$), but the MA material presented abrasive wear instability (up to 28% variation between results). After grinding the surface of material M-C showed irregular scratches with material removal characteristics of fragile form. Was measured above-average microhardness (40% higher) in a layer up to 100 μm from the surface in the three materials sample in almost all conditions. These results are attributed to the effect of matrix brittleness and M₆C carbides, which by fracturing result in fragile material removal.

Keywords: Grinding, High-Speed Steels, AISI M3:2, pin-abrasive test, abrasive wear, primary carbides.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Microestrutura dos carbonetos do aço-rápido AISI M3:2 via MEV, mostrando (a) microestrutura como fundida com carbonetos eutéticos tipo M_2C e MC (b) Carbonetos do tipo M_6C em branco e do tipo MC em cinza.	23
Figura 2.2 -	Ilustração esquemática das sequências de tratamento térmico de ferramentas de aço-rápido	25
Figura 2.3 -	Imagens obtidas através de MEV (Elétrons Retro espalhados), com 1500 vezes de ampliação, da microestrutura de aços-rápidos AISI M3:2 obtidos por meio de diferentes processos de fabricação, (a) deposição por spray (b) metalurgia do pó.	27
Figura 2.4 -	Representação dos parâmetros durante a retificação tangencial plana.	38
Figura 2.5 -	Trajetória de corte de um dressador de ponta única através dos grãos abrasivos.	39
Figura 3.1 -	Fluxograma dos ensaios realizados e das variáveis de saída obtidas através de cada um dos ensaios.	51
Figura 3.2 -	Amostras dos materiais embutidas em resina acrílica.	53
Figura 3.3 -	Tribômetro padronizado de acordo com a norma ASTM G132-96.	55
Figura 3.4 -	Arranjo experimental do teste Pino-Lixa em (a) diagrama esquemático do ensaio e (b) detalhe da fixação das amostras no mandril mantendo uma altura padronizada.	55
Figura 3.5 -	Amostras utilizadas no ensaio pino-lixo (a) representação das partes das amostras (b) amostras dos três materiais seccionadas.	57
Figura 3.6 -	Arranjo experimental dos ensaios de retificação tangencial plana (a) visão geral do arranjo experimental, (b) vista superior da amostra e morsa de fixação.	59
Figura 3.7 -	Posicionamento do dressador durante o procedimento de dressagem realizado antes de cada ensaio (b) Detalhe do processo de medição da largura de atuação do dressador através de estereomicroscópio com aumento de 45 vezes.	60
Figura 3.8 -	Posicionamento do bocal de aplicação de fluido de corte distância (em milímetros) em relação ao eixo de rotação.	61
Figura 3.9 -	Arranjo experimental para a medição de rugosidade nas amostras durante os ensaios de retificação.	63
Figura 3.10 -	Representação da medição de microdureza nas amostras próximo a superfície retificada	64
Figura 4.1 -	Microestrutura via MEV do material M-A atacado com <i>Nital</i> a 3% de concentração revelando detalhes dos carbonetos, (a) Microestrutura com 2000 vezes de ampliação (b) ampliação de 5000 vezes da região A com detalhes dos carbonetos de (a), (c) Microestrutura com ampliação de 2000 vezes (d) ampliação de 5000 vezes da região B.	66

- Figura 4.2** – (a) Microestrutura via MEV do material M-B atacado com Nital a 3% de concentração revelando detalhes dos carbonetos, com ampliação de 2000 vezes, (b) ampliação de 5000 vezes do detalhe A, (c) ampliação de 5000 vezes do detalhe B. 67
- Figura 4.3** – (a) Microestrutura via MEV do material M-C atacado com Nital a 3% de concentração revelando detalhes dos carbonetos, com ampliação de 2000 vezes, (b) região A com 5000 vezes de ampliação e (c) região B com 5000 vezes de ampliação. 68
- Figura 4.4** – EDS para os precipitados em segunda fase de aço-rápido: (a), (c) e (d) são os resultados para a fase branca enquanto e em (b), (d) e (f) resultados para as fases cinzas. 71
- Figura 4.5** – EDS para avaliação da matriz dos três materiais de aço-rápido: (a) M-A, (b) M-B e (c) M-C, mostrando predominância de ferro, carbono e elementos formadores de carbonetos em menores quantidades. 72
- Figura 4.6** – Histograma de distribuição dos raios dos carbonetos do tipo M_6C com raio até $0,5\ \mu m$ para os três materiais de aço-rápido avaliados. 73
- Figura 4.7** – Histograma de distribuição dos raios dos carbonetos do tipo M_6C com raio maior que $0,5\ \mu m$ para os três materiais avaliados. 74
- Figura 4.8** – Histograma de distribuição dos raios dos carbonetos do tipo MC com raio até $0,5\ \mu m$ para os três materiais de aço-rápido avaliados. 75
- Figura 4.9** – Histograma de distribuição dos raios dos carbonetos do tipo MC com raio maior que $0,5\ \mu m$ para os três materiais avaliados. 76
- Figura 4.10** – Coeficiente de desgaste abrasivo dos três materiais de aço-rápido avaliados através do ensaio pino-lixo. 79
- Figura 4.11** – Representação gráfica dos intervalos de confiança do teste de igualdade de variâncias através do método de comparações múltiplas. 80
- Figura 4.12** – Imagens das superfícies das amostras do material de aço-rápido M-A obtidas nos ensaios preliminares com abrasivos de SiC de granas (a) mesh 220 (b) mesh 320 e em (c) superfície da amostra polida, obtidas através de MEV com 1800 vezes de ampliação. 82
- Figura 4.13** – Imagens da superfície das amostras após os ensaios pino-lixo obtidas via MEV com ampliação de 1800 vezes para os três materiais avaliados (a) M-A, (b) M-B e (c) M-C. 83
- Figura 4.14** – Topografia da superfície dos pinos após os ensaios tribológicos pino-lixo obtidas através de perfilometria laser nas amostras dos materiais (a) M-A, (b) M-B e (c) M-C. 84
- Figura 4.15** – Rugosidade das amostras dos três materiais após o ensaio pino-lixo mensuradas a partir da topografia da superfície em (a) Rugosidade Aritmética-Ra e em (b) Rugosidade Máxima-Rt. 85
- Figura 4.16** – Resultados de Rugosidade Aritmética (Ra) para amostras dos três materiais nas quatro condições de ensaio. 87

- Figura 4.17** - Resultados para rugosidade R_q para amostras dos três materiais nas quatro condições de ensaio de retificação. 88
- Figura 4.18** - Resultados para rugosidade R_t para amostras dos três materiais nas quatro condições de ensaio. 89
- Figura 4.19** - Imagens das superfícies obtidas através de MEV com ampliação de 1800 vezes da superfície das amostras do material M-A após os ensaios de retificação sob as condições de ensaio (a) C1, (b) C2, (d) C3 e (e) C4. 91
- Figura 4.20** - Imagens das superfícies obtidas através de MEV com ampliação de 1800 vezes da superfície das amostras do material M-B após os ensaios de retificação sob as condições de ensaio (a) C1, (b) C2, (d) C3 e (e) C4. 92
- Figura 4.21** - Imagens das superfícies obtidas através de MEV com ampliação de 1800 vezes da superfície das amostras do material M-C após os ensaios de retificação sob as condições de ensaio (a) C1, (b) C2, (d) C3 e (e) C4. 93
- Figura 4.22** - Média dos resultados de medição de microdureza próximo a superfície nas amostras dos materiais M-A, M-B e M-C após os ensaios de retificação sob as condições de ensaio (a) C1, (b) C2, (c) C3 e (d) C4. 95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Composição química de algumas classificações de aços-rápidos	19
Tabela 2.2 -	Valores de dureza para materiais abrasivos e fases constituintes dos aços rápidos	30
Tabela 3.1 -	Composição química nominal dos aços-rápidos avaliados	53
Tabela 3.2 -	Parâmetros de entrada do ensaio tribológico Pino-Lixa	56
Tabela 3.3 -	Parâmetros de entrada para os ensaios de retificação plana tangencial	59
Tabela 3.4 -	Condições de ensaio de retificação, parâmetros de entrada dos ensaios e identificação das amostras.	62
Tabela 4.1 -	Quadro resumo da análise da morfologia dos carbonetos.	70
Tabela 4.2 -	Quadro resumo dos resultados da análise estatística Anova de um fator em relação aos três parâmetros de rugosidade avaliados.	90
Tabela 9.1 -	Resultados obtidos por meio de ensaio tribológico tipo pino-lixo	111
Tabela 9.2 -	Análise estatística dos resultados do ensaio pino-lixo pelo método de Levene.	111
Tabela 10.1 -	Resultado das medições de rugosidade na superfície das amostras após os ensaios de retificação.	112
Tabela 10.2 -	Análise estatística Anova com um fator entre a média dos valores de Ra e os materiais.	112
Tabela 10.3 -	Análise estatística Anova com um fator entre a média dos valores de Ra e as condições de ensaio	113
Tabela 10.4 -	Análise estatística Anova com um fator entre a média dos valores de Rq e os materiais das amostras.	113
Tabela 10.5 -	Análise estatística Anova com um fator entre a média dos valores de Rq e as condições de ensaio.	114
Tabela 10.6 -	Análise estatística Anova com um fator entre a média dos valores de Rt e as condições de ensaio	114
Tabela 10.7 -	Análise estatística Anova com um fator entre a média dos valores de Rt e os materiais das amostras.	115

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

a_d	Penetração de dressagem (μm)
a_e	Penetração de trabalho (μm)
b_d	Largura de atuação do dressador (mm)
F_N	Força Normal (N)
F_T	Força Tangencial (N)
G	Relação de retificação
Ha	Dureza do abrasivo (HV)
h_{eq}	Espessura de cavaco equivalente (μm)
Hm	Dureza do material (HV)
HR_C	Dureza Rockel C
HV	Dureza Vickers
k	Coefficiente de desgaste abrasivo ($\text{mm}^3.\text{N}^{-1}.\text{m}^{-1}$)
K	Estabilidade do desgaste abrasivo
l	Comprimento da trilha percorrida no ensaio pino-lixo (m)
l_c	Comprimento de contato de retificação (mm)
P	Potência de retificação (N.m/s)
Q'_w	Taxa de remoção de material por unidade de largura do rebolo ($\text{mm}^3.\text{min}^{-1}$)
Q_w	Taxa de remoção de material ($\text{mm}^3.\text{min}^{-1}$)
Ra	Rugosidade Aritmética (μm)
r_d	Raio de ponta do dressador (mm)
Rq	Desvio médio quadrático do perfil de rugosidade (μm)
Rt	Altura total do perfil de rugosidade (μm)
sd	Passo de dressagem (mm/volta)
u	energia específica de retificação (J)
Ud	Grau de recobrimento
v_d	velocidade de dressagem
v_s	Velocidade de corte (m/s)
v_w	Velocidade da peça (m/min)

W	Massa perdida no ensaio pino-lixo (mg)
W_{min}	Valor mínimo de massa perdida no ensaio pino-lixo (mg)
W_{max}	Valor máximo de massa perdida no ensaio pino-lixo (mg)
Z_s	Volume de material removido no rebolo (mm ³)
Z_w	Volume de material removido da peça (mm ³)
ρ	Massa específica (Kg.m ⁻³)
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFC	Cúbica de Face Centrada
CV	Coeficiente de variação (%)
EDS	Espectroscopia de descarga elétrica
HSS	High-Speed Steel
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
LTM	Laboratório de Tribologia e Materiais
MEV	Microscopia Eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira
TCE	Teor de Carboneto Equivalente (%)
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
SEM	Scannig Electron Microscopy
XDS	Difração de Raio-X

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	Justificativa	15
1.2.	Ineditismo	16
1.3.	Objetivos	17
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1.	Composição e classificação dos aços-rápidos	18
2.2.	Características da microestrutura dos aços-rápidos	21
2.3.	Mecanismos de abrasão nos aços-rápidos	28
2.4.	Ensaio Tribológicos de Desgaste Abrasivo	33
2.5.	Retificação em aços-rápidos	37
2.6.	Integridade superficial de peças retificadas	42
2.6.1.	Rugosidade	43
2.6.2.	Camada afetada termicamente	45
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1.	Caracterização dos materiais	52
3.2.	Ensaio Tribológico Pino-lixa	54
3.3.	Ensaio de Retificação	58
3.4.	Medição de Rugosidade	62
3.5.	Avaliação da superfície por meio de MEV	63
3.6.	Estimativa da camada afetada	63
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1.	Caracterização da microestrutura dos materiais de aço-rápido	65
4.1.1.	Análise da morfologia dos carbonetos	65
4.1.2.	Resultados da avaliação da composição química dos carbonetos via EDS	70
4.1.3.	Resultados da análise da distribuição dos carbonetos na estrutura	73
4.2.	Resultados do ensaio tribológico Pino –Lixa	78
4.2.1.	Topografia dos pinos de aço-rápido após ensaio tribológico	81

4.3.	Resultados dos Ensaios de Retificação	86
4.3.1.	Avaliação dos parâmetros de rugosidade	86
4.3.2.	Avaliação da Superfície através de MEV	90
4.3.3.	Estimativa da camada afetada termicamente	94
4.4.	Discussão da correlação entre os resultados	97
5.	CONCLUSÕES	100
5.1.	Sugestões para trabalhos futuros	102
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
7.	Apêndice I - Cálculo da velocidade tangencial da amostra durante o ensaio pino lixa	109
8.	Apêndice II - Determinação do grau de recobrimento	110
9.	Apêndice III – Resultados do ensaio tribológico Pino-Lixa	111
10.	Apêndice IV - Resultado das medições de rugosidade na superfície das amostras após os ensaios de retificação	112

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Os materiais utilizados para a fabricação de ferramentas muitas vezes são desenvolvidos para apresentarem alta resistência ao desgaste abrasivo, por este ser o mecanismo de desgaste mais frequentemente observado nas arestas de corte (TRENT; WRIGHT, 2000). Quanto maior a resistência ao desgaste abrasivo do material da ferramenta, maior será sua durabilidade. Contudo, a elevada resistência ao desgaste, desejável nas ferramentas durante a sua utilização, é uma dificuldade para sua fabricação. Isto ocorre porque nas etapas finais de fabricação, para conferir tolerâncias dimensionais e afiação, as ferramentas são retificadas.

Apesar de serem os mesmos mecanismos existe uma grande diferença entre o desgaste abrasivo que ocorre durante o uso da ferramenta e o processo abrasivo de retificação, principalmente em relação à escala e dinâmica em que ocorrem. Isto porque durante a vida da ferramenta o que causa a abrasão são pequenas partículas de fases endurecidas presentes na microestrutura dos materiais usinados, ou óxidos presentes na superfície, que são arrancados e acabam passando pela região de corte, sendo pressionadas contra a superfície de saída e promovendo a remoção de material (TRENT; WRIGHT, 2000). Já no processo de retificação grãos abrasivos de dureza elevada e geometria propícia para remover o material são utilizados como ferramenta para promover o corte de forma efetiva (MARINESCU et al., 2013).

O aço-rápido já possui mais de cem anos desde sua invenção e ainda hoje continua sendo utilizado na fabricação de ferramentas de corte, como bits, bedames, brocas, machos, fresas, dentre outras (MESQUITA, 2016). Ele é bastante utilizado para a fabricação de brocas e machos de corte devido a faixa de velocidade de corte atingida por estas ferramentas ser, na maioria das vezes, abaixo da velocidade de corte máxima para aço-rápido, devido ao fato de que elas são, em geral, de pequeno diâmetro. Outros fatores como a potência das máquinas-ferramenta e sistemas com menor vibração, ainda precisam ser aprimorados antes dos processos de fabricação alcançarem velocidades de corte que justifique a substituição deste material.

Do ponto de vista da metalurgia é conhecido o efeito de cada elemento químico na composição e a influência da rota de produção do aço-rápido na sua microestrutura, em especial no tamanho e distribuição de carbonetos. Além disso, na área da tribologia, já é bastante relatado o aumento da resistência ao desgaste abrasivo proporcionado por estes carbonetos

(HUTCHINGS, 1992). O presente trabalho aborda os mecanismos de abrasão sob o ponto de vista da retificação, levando-se em conta conhecimentos já desenvolvidos por diferentes áreas e em que eles implicam neste processo.

Como mencionado, os fatores que mais influenciam os mecanismos de abrasão neste material são a composição, o tamanho e a forma dos carbonetos primários. Até certo tamanho a presença dos carbonetos é benéfica por criar uma barreira que dificulta o processo de desgaste, contudo se os carbonetos forem muito grandes podem acelerá-lo, pois o mecanismo de remoção de material se torna frágil (HUTCHINGS, 1992). O mesmo ocorre no processo de retificação. A presença de carbonetos primários muito grandes pode resultar no desgaste excessivo do rebolo, prejudicando o acabamento da superfície e a tolerância dimensional, ou ainda dificultar o controle do processo.

Nos trabalhos em que o foco é o processo de fabricação comumente associam-se efeitos observados nas peças, aos parâmetros que podem ser controlados pelo operador, mas a microestrutura do material pode alterar esta relação. Por este motivo, é necessário escolher cuidadosamente onde serão observados os resultados dos mecanismos de remoção de material. No torneamento, por exemplo, recorre-se ao estudo do cavaco. Como na retificação o cavaco ocorre em uma escala muito menor, torna-se difícil seu estudo, desta forma, são necessárias metodologias, em áreas complementares, que auxiliem na compreensão do fenômeno observado durante o processo. Assim os ensaios tribológicos podem ser úteis ao se avaliar estes materiais.

A integridade superficial é parte indissociável do estudo dos mecanismos de abrasão, porque ela expressa o resultado final do processo. A superfície terá características como rugosidade, presença de trincas ou até dano térmico que dependem do mecanismo que ocorre durante o processo de fabricação (DAVIM, 2010). Ainda é pouco explorado os efeitos que a microestrutura provoca nos mecanismos de abrasão e o efeito destes mecanismos na integridade superficial.

1.1. Justificativa

A abordagem deste tema é relevante para o desenvolvimento de novas técnicas de avaliação de aços-rápidos que podem apresentar variação em sua microestrutura, quanto ao seu

comportamento durante a retificação, com o objetivo de alcançar processos mais previsíveis e com menores perdas na produção.

Em uma aplicação industrial é usual comparar materiais de diferentes fornecedores através de micrografias, mas não é fácil estabelecer uma conexão direta entre a microestrutura e o processo de fabricação. Ainda que se estabeleçam padrões de microestruturas aceitáveis, é complexo prever o grau de estabilidade que o material com tais requisitos, irá apresentar no momento da fabricação. Este estudo procura explorar como os carbonetos presentes na microestrutura do aço-rápido AISI M3:2 influenciam na integridade superficial do mesmo após o processo de retificação, utilizando como apoio ensaio tribológico.

Esta classe de material é relatada como um material de difícil retificação, sendo ainda um desafio estabelecer condições de retificação que, utilizando rebolos convencionais, garantam um processo estável e sem danos de origem térmica. Embora já existam outros trabalhos na literatura que discutem a influência dos carbonetos primários presentes nos aços rápidos no processo de retificação, são focados em eficiência em termos de desgaste do rebolo (BADGER, 2007); ou nos efeitos dos parâmetros de corte na integridade superficial (JAWORSKI; TRZEPICINSKI; STACHOWICZ, 2016).

A pesquisa se afasta das condições de fabricação de ferramentas para condições mais controladas em laboratório, com o intuito de verificar o efeito da microestrutura dos aços rápidos. Para isso buscou-se um processo com geometria mais simples (retificação plana) e ensaios tribológicos com configuração específica buscando auxiliar o entendimento sobre os mecanismos de remoção de material por abrasão envolvidos.

1.2. Ineditismo

Propõe-se um estudo comparativo entre três materiais comerciais, mas com foco na microestrutura, buscando para isso integrar conhecimento das áreas de materiais, tribologia e fabricação.

O presente trabalho propõe uma abordagem de ensaio tribológico em um nível de desgaste (quantidade de material removido) pouco discutido, uma vez que a maioria das pesquisas da área de tribologia se concentra em pequenas quantidades de desgaste do material e altas pressões de contato. Neste trabalho é realizado um ensaio com maior nível de desgaste em baixa pressão de contato, porém com textura superficial similar à retificação. Desta forma,

neste trabalho é proposto um método prático de avaliação da estabilidade do desgaste abrasivo, uma vez que não existem métodos padronizados para tais aplicações. Embora sejam apresentados a apenas um material com estrutura bifásica, pode-se abrir precedentes para investigação de outros materiais que apresentem em sua microestrutura uma fase endurecida.

Na área de fabricação, este trabalho é inédito ao avaliar a integridade superficial de aços rápidos comerciais, com diferenças na microestrutura. Com isto, busca-se relacionar a microestrutura de aços rápidos, em especial a forma e a distribuição dos carbonetos primários com os mecanismos de remoção de material, bem como o resultado observado na superfície após a retificação. Desta forma, pretende-se ampliar o conhecimento no campo de estudos, desenvolvendo elementos teóricos que podem ser aplicados industrialmente na fabricação de ferramentas de corte.

1.3. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo avaliar o processo de retificação para três aços rápidos de mesma classe, com variações na forma e tamanho de carbonetos presentes em sua microestrutura, avaliados em termos de mecanismos de abrasão e integridade superficial da peça. Desta forma, os objetivos principais são:

- Caracterizar a microestrutura de aços-rápidos de mesma especificação obtidos de três fornecedores diferentes, quanto à forma, composição e distribuição dos carbonetos;
- Avaliar os materiais através do ensaio tribológico pino-lixo e verificar a influência da microestrutura desses materiais avaliados nos mecanismos de abrasão;
- Realizar ensaios de retificação desses materiais e verificar a integridade superficial das amostras;
- Relacionar os efeitos observados na superfície desses materiais após ensaios de retificação com os resultados obtidos em ensaios tribológicos procurando estabelecer formas comparativas entre esses dois procedimentos (retificação e ensaios tribológicos);

Capítulo 5

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões deste trabalho em cada uma das etapas experimentais. Em seguida são apresentadas sugestões de trabalho futuros para a continuidade do desenvolvimento do tema.

5. CONCLUSÕES

A partir do trabalho dos resultados obtidos durante as etapas experimentais e as discussões sobre tema, pode-se concluir que:

- Os três materiais avaliados, M-A, M-B e M-C, apesar de possuírem composições químicas próximas que os classificam como AISI M3:2 apresentam diferenças na microestrutura quanto à forma, o tamanho e a distribuição dos carbonetos primários;
- A distribuição dos carbonetos observados nas microestruturas dos três materiais apresentou dois pontos de maior frequência, sendo um para raios menores e outro para raios maiores. Os carbonetos menores, do tipo M_6C , apresentaram maior frequência para raios na faixa entre 0,185 μm e 0,275 μm , enquanto para o tipo MC no intervalo entre 0,5 μm e 1,0 μm . Os carbonetos maiores do tipo MC e M_6C apresentaram maior frequência no intervalo entre 1,0 μm e 1,5 μm . O material M-A apresentou carbonetos maiores que 3 μm de ambos os tipos, M_6C e MC;
- Através do ensaio tribológico pino-lixa pode ser afirmado que os coeficientes de desgaste abrasivo (k) para os três materiais apresentaram a mesma faixa de valores, variando entre o menor valor na amostra M-A(2) (9,18 $mm^3.N^{-1}.m^{-1}$), para o maior na amostra M-C (1) (13,45 $mm^3.N^{-1}.m^{-1}$);
- A variação entre os resultados do coeficiente de desgaste abrasivo do ensaio pino-lixa foi maior para o material M-A do que para os demais. A variância dos resultados é estatisticamente maior dentro do grupo de amostras M-A. O material M-A apresentou o menor coeficiente de estabilidade (K) (0,44) e o maior coeficiente de variação

(28,8%)(CV). Este resultado é atribuído a presença de carbonetos grosseiros do tipo MC que alteram a razão entre a área dos carbonetos e da matriz entre ensaios sucessivos;

- A superfície da amostra do ensaio pino-lixa para o material M-C apresentou maiores valores rugosidade Ra e Rt em relação ao material M-A (em torno de 30% maior) e em relação ao material M-B (cerca de 75%). Esta diferença está relacionada a área de carbonetos do tipo MC com raios entre 1,5 μm e 2,5 μm , que é praticamente desprezível para o material M-C, o que confere a este material uma maior penetração dos grãos abrasivos resultando em um maior número abrasivos atuando na superfície;
- As superfícies das amostras após os ensaios de retificação apresentaram rugosidades Ra e Rq com tendência igual para os materiais M-A e M-B. A rugosidade aumentou com a penetração de trabalho de 10 μm para 15 μm para os três materiais, onde apresentaram maiores valores mensurados, o que é atribuído a uma presença maior do mecanismo de sulcamento. Aumentando-se ainda mais a penetração de 15 μm para 20 μm foi observada a diminuição da rugosidade para os materiais M-A e M-B enquanto o M-C apresentou os mesmos valores, acredita-se que estes resultados estão relacionados a presença de riscos irregulares observados neste material sob esta condição;
- Nas imagens da superfície obtidas por meio de MEV foi possível observar grandes carbonetos na superfície do material M-A, que não foram removidos pelo processo de retificação. Também foram observados riscos irregulares nos materiais M-B e M-C, sendo neste último em maior quantidade, em especial sob a condição C3. Estas irregularidades são resultado do efeito de alterações na microestrutura tornando o processo de remoção de material com características mais frágeis;
- Foi verificado aumento da microdureza próximo a superfície. Em baixas penetrações de trabalho ($a_e = 10 \mu\text{m}$) o material M-A apresentou uma dureza mais elevada em uma camada de até 50 μm , sendo possivelmente resultado da ação dos cegamentos dos grãos abrasivos do rebolo pelos carbonetos do tipo MC observados na sua superfície. Nas demais condições foi observada microdureza elevada em uma camada de até 100 μm , devido a alterações na microestrutura sob as altas temperaturas de retificação;

Por meio dos resultados alcançados foi possível estabelecer uma correlação entre os ensaios tribológico e de retificação. Desta forma, pretende-se contribuir para a compreensão dos mecanismos de remoção de material nestes materiais, classificados como difíceis de

retificar. Estudos complementares podem contribuir principalmente para verificar o efeito dos carbonetos no desgaste do rebolo.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar a metodologia de comparação entre o ensaio tribológicos pino-lixo e ensaios de retificação para outros materiais com segunda fase endurecida, como ferro fundido branco com alto teor de cromo ou compósitos de matriz metálica;
- Realizar ensaios de simulações computacionais variando a distribuição dos carbonetos e verificar a influência relativa entre o tamanho de grão abrasivo, o tamanho dos carbonetos e a distribuição das tensões no material;
- Verificar experimentalmente se a diminuição do tamanho de grão do rebolo abrasivo da grana mesh 46 para a mesh 220 exerce efeito na estabilidade do processo de retificação nos aços rápidos;
- Realizar o estudo do cavaco produzido para estes materiais para verificar a evidência de mecanismo frágil nos materiais;
- Realizar ensaios em condições de usinagem contínua, ou com um maior número de passes, monitorando o desgaste do rebolo. Sugere-se a opção por um rebolo mais friável e um processo de menor pressão de contato, como por exemplo a retificação cilíndrica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 4287. NBR ISO 4287:2002 Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. ABNT NBR. (2002). ISO 4287:2002 Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termo. [s. l.], p. 18, 2002. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=2665>>

ANTRETTTER, T.; FISCHER, F. D. Critical shapes and arrangements of carbides in high-speed tool steel. **Materials Science and Engineering: A**, [s. l.], v. 237, n. 1, p. 6–11, 1997. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509397001032>>

ARAUJO FILHO, O. O. De. “**Estudo comparativo de aços rápidos AISI M3:2 produzidos por diferentes processos de fabricação**”. 2006. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-04062007-143010/>>

ASM METALS HANDBOOK. **ASM Handbook, Volume 16: Machining**. 9th. ed. [s.l.] : ASM International, 1989.

ASTM A600-92A. **Standard Specification for Tool Steel High Speed**, ASTM International, 2016.

ASTM G132 - 96. Standard Test Method for Pin Abrasion Testing **ASTM International**, 2013. p. 1–8.

BADGER, J. Grindability of conventionally produced and powder-metallurgy high-speed steel. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], 2007.

BADISCH, E.; MITTERER, C. Abrasive wear of high speed steels: Influence of abrasive particles and primary carbides on wear resistance. **Tribology International**, [s. l.], v. 36, n. 10, p. 765–770, 2003.

BATISTA DA SILVA, R. et al. Electromechanical impedance (EMI) technique as alternative to monitor workpiece surface damages after the grinding operation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 98, n. 9–12, p. 2429–2438, 2018.

BERGMAN, F.; HEDENQVIST, P.; HOGMARK, S. The influence of primary carbides

and test parameters on abrasive and erosive wear of selected PM high speed steels. **Tribology International**, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 183–191, 1997.

BLICKENSDECKER, R.; LAIRD, G. A Pin-on-Drum Abrasive Wear Test and Comparison with Other Pin Tests BT - A Pin-on-Drum Abrasive Wear Test and Comparison with Other Pin Tests. [s. l.], 1988.

DA SILVA, R. B. et al. A surface and sub-surface quality evaluation of three cast iron grades after grinding under various cutting conditions. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 99, n. 5–8, p. 1839–1852, 2018.

DAVIM, J. P. **Surface Integrity in Machining**. London: Springer London, 2010. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-1-84882-874-2>>

DAVIS, J. R. **ASM Specialty Handbook: Tool Materials**. [s.l.] : ASM International, 1995. v. 33 Disponível em: <<http://choicereviews.org/review/10.5860/CHOICE.33-0946>>

DING, W. et al. Review on grinding-induced residual stresses in metallic materials. [s. l.], p. 2939–2968, 2017.

GAHR, K. H. Z. Wear by hard particles. **Tribology International**, [s. l.], v. 31, n. 10, p. 587–596, 1998.

GARCÍA, C. et al. Effect of adding carbides on dry sliding wear behaviour of steel matrix composites processed by metal injection moulding. **Wear**, [s. l.], v. 414–415, n. December 2017, p. 182–193, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.08.010>>

GARCÍA, E. et al. Complementary tribometers for the analysis of contact phenomena in grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 214, n. 9, p. 1787–1797, 2014.

GHOMASHCHI, M. R. Quantitative microstructural analysis of M2 grade high speed steel during high temperature treatment. **Acta Materialia**, [s. l.], v. 46, n. 14, p. 5207–5220, 1998. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645498001104>>

GIANG, N. A. et al. A model for predicting crack initiation in forged M3:2 tool steel under high cycle fatigue. **International Journal of Fracture**, [s. l.], v. 187, n. 1, p. 145–158, 2014.

GODEC, M. et al. Characterization of the carbides and the martensite phase in powder-metallurgy high-speed steel. **Materials Characterization**, [s. l.], v. 61, n. 4, p. 452–458, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580310000343>>. Acesso em: 5 maio. 2017.

GORDO, E. et al. Wear mechanisms in high speed steel reinforced with (NbC)p and (TaC)p MMCs. **Wear**, [s. l.], v. 239, p. 251–259, 2000.

GUIMARÃES, C. **Retificação plana de aços para moldes e matrizes em várias condições de corte e diferentes técnicas de aplicação de fluido de corte**. 2016. Universidade Federal de Uberlândia, [s. l.], 2016.

HE, B. et al. A survey of methods for detecting metallic grinding burn. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, [s. l.], v. 134, p. 426–439, 2019.

HUTCHINGS, L. M. Tribology: Friction and wear of engineering materials. **CRC Press, London**, [s. l.], p. 273, 1992.

JAWORSKI, J.; TRZEPIECINSKI, T.; STACHOWICZ, F. Effect of Grinding Parameters on the Surface Quality of Cutting Tools Made of High-Speed Low-Alloy Steels. **Strength of Materials**, [s. l.], v. 48, n. 4, p. 566–572, 2016.

JI, K. et al. Surface integrity of quenched steel 1045 machined by CBN grinding wheel and SiC grinding wheel. **International Journal of Structural Integrity**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 179–187, 2017.

KHRAISAT, W.; NYBORG, L.; SOTKOVSKI, P. Effect of silicon, vanadium and nickel on microstructure of liquid phase sintered M3/2 grade high speed steel. **Powder Metallurgy**, [s. l.], v. 48, n. 1, p. 33–38, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1179/003258905X37602>>

KÖNIG, W.; MESSER, J. Influence of the Composition and Structure of Steels on Grinding Process. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 547–552, 1981.

KREMNEV, L. S.; ONEGINA, A. K.; VINOGRADOVA, L. A. Special features of transformations, structure and properties of molybdenum high-speed steels. **Metal Science and Heat Treatment**, [s. l.], v. 51, n. 11–12, p. 579–584, 2009. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11041-010-9214-9>>

LIMA, M. L. S. **Retificação plana tangencial dos ferros fundidos nodular, vermicular e cinzento em várias condições de corte**. 2016. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2016.

LU, L. et al. Improved the microstructures and properties of M3:2 high-speed steel by spray forming and niobium alloying. **Materials Characterization**, [s. l.], v. 117, p. 1–8, 2016.

MADOPOTHULA, U.; NIMMAGADDA, R. B.; LAKSHMANAN, V. Assessment of white layer in hardened AISI 52100 steel and its prediction using grinding power. **Machining Science and Technology**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 299–319, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/10910344.2017.1365891>>

MALKIN, S.; GUO, C. Thermal Analysis of Grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 56, n. 2, p. 760–782, 2007.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**. 2nd. ed. [s.l.] : Industrial Press Inc., 2008.

MARINESCU, I. D. et al. **Tribology of Abrasive Machining Processes**. [s.l.] : Elsevier, 2013. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781437734676170016>>. Acesso em: 16 maio. 2017.

MESQUITA, R. A. **Tool steels: Properties and performance**. Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press, 2016. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/9781439881729>>

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. High-Speed Steels Produced by Conventional Casting, Spray Forming and Powder Metallurgy. **Materials Science Forum**, [s. l.], v. 498–499, p. 244–250, 2009.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A.; MACHADO, A. R. Heat Treatment of Tool Steels. In: **Comprehensive Materials Finishing**. [s.l.] : Elsevier, 2017. v. 2–3p. 214–245.

NOGUEIRA, R. A. et al. Grain Size of Commercial High Speed Steel. **Materials Science Forum**, [s. l.], v. 530–531, p. 16–21, 2009.

PEIDAO, D.; GONGQI, S.; SHOUZE, Z. A scanning electron microscopy study of carbides in high-speed steels. **Materials Characterization**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 15–24, 1992. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/104458039290091U>>. Acesso em:

5 maio. 2017.

PUERTO, P. et al. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 63, n. 1996, p. 174–182, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.181>>

RICHTER, J. Tribological evaluation of high-speed steels with a regulated carbide phase. **Materials Characterization**, [s. l.], v. 50, n. 4–5, p. 339–347, 2003.

RODENBURG, C.; RAINFORTH, W. M. A quantitative analysis of the influence of carbides size distributions on wear behaviour of high-speed steel in dry rolling/sliding contact. **Acta Materialia**, [s. l.], v. 55, n. 7, p. 2443–2454, 2007.

ROWE, W. B. **Principles of Modern Grinding Technology**. [s.l.] : Elsevier, 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20130069526>>

SACKL, S. et al. On the evolution of secondary hardening carbides during continuous versus isothermal heat treatment of high speed steel HS 6-5-2. **Materials Characterization**, [s. l.], v. 120, p. 323–330, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2016.09.021>>

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature methods**, [s. l.], v. 9, n. 7, p. 671, 2012.

SERNA, M. M.; ROSSI, J. L. MC complex carbide in AISI M2 high-speed steel. **Materials Letters**, [s. l.], v. 63, n. 8, p. 691–693, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X08009725>>. Acesso em: 5 maio. 2017.

SINHA, M. K. et al. An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 21, p. 124–133, 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612515001589>>. Acesso em: 31 jul. 2017.

TIAN, Y. B. et al. Development of portable power monitoring system and grinding analytical tool. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 27, p. 188–197, 2017.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. Londres: Elsevier, 2000. Disponível em: <<https://www.elsevier.com/books/metal-cutting/wright/978-0-7506-7069-2>>

VENDRAME, S. **Estudo da integridade da aresta de machos de corte de HSS**

durante a retificação em várias condições de corte. 2015. Universidade Federal de Uberlândia, [s. l.], 2015.

VENDRAME, S. et al. Surface integrity assessment of M3 HSS cutting taps after grinding at various machining conditions. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 98, n. 1–4, p. 617–627, 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-018-2245-x>>

WEI, S.; ZHU, J.; XU, L. Effects of vanadium and carbon on microstructures and abrasive wear resistance of high speed steel. **Tribology International**, [s. l.], v. 39, n. 7, p. 641–648, 2006.

XU, L. et al. Study on relative wear resistance and wear stability of high-speed steel with high vanadium content. **Wear**, [s. l.], v. 262, n. 3–4, p. 253–261, 2007.

XU, L. et al. Effects of carbon content and sliding ratio on wear behavior of high-vanadium high-speed steel (HVHSS) under high-stress rolling-sliding contact. **Tribology International**, [s. l.], v. 70, p. 34–41, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2013.09.021>>