

MAURO PAIPA SUAREZ

**INFLUÊNCIA DA TEXTURIZAÇÃO A LASER EM FERRAMENTAS DE
METAL DURO REVESTIDAS NA USINAGEM DO AÇO ABNT 1050**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2012

MAURO PAIPA SUAREZ

**INFLUÊNCIA DA TEXTURIZAÇÃO A LASER EM FERRAMENTAS DE
METAL DURO REVESTIDAS NA USINAGEM DO AÇO ABNT 1050**

Tese apresentada ao Programa de Pósgraduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado
Co-Orientador: Prof. Dr. Milton Sergio Fernandes.L.



**UBERLÂNDIA MG
2012**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

- P148i
2012 Paipa Suarez, Mauro, 1983-
Influência da texturização a laser em ferramentas de metal duro revestidas na usinagem do aço ABNT 1050 / Mauro Paipa Suarez. - 2012.
159 p. : il.
- Orientador: Álisson Rocha Machado.
Coorientador: Milton Sergio Fernandes L.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.
1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Metais - Corte - Teses. 2. Ferramentas para cortar metais - Teses. 3. Usinagem - Teses. I. Machado, Álisson Rocha, 1956- II. Lima, Milton Sérgio Fernandes de. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

MAURO PAIPA SUAREZ

**INFLUÊNCIA DA TEXTURIZAÇÃO A LASER EM FERRAMENTAS DE
METAL DURO REVESTIDAS NA USINAGEM DO AÇO ABNT 1050**

Tese **APROVADA** pelo Programa de
Pósgraduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos de
Fabricação.

Banca Examinadora:

_____ Prof. Dr. Álisson Rocha Machado (Orientador)	UFU
_____ Prof. Dr. Milton Sérgio Fernandes de Lima (Co-Orientador)	IEAv-CTA
_____ Prof. Dr. Flávio José da Silva	UFES
_____ Prof. Dr. Rhander Viana	UFG
_____ Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva	UFU
_____ Prof. Dr. Washington Martins	UFU

UBERLÂNDIA, MG

2012.

AGRADECIMENTOS

- Às empresas Sandvik do Brasil e Gerdau S.A. pela generosa doação das ferramentas de corte e o material de trabalho respectivamente.
- Ao Prof. Dr. Álisson Rocha Machado, pelo apoio, incentivo e orientação, imprescindíveis à realização deste trabalho.
- Ao Prof. Dr. Milton Sérgio Fernandes de Lima pelo apoio, incentivo e orientação durante a realização do trabalho.
- Aos colegas do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) pela amizade e pelas importantes discussões e sugestões sobre os resultados desta pesquisa.
- Aos técnicos do LEPU-UFU, pelo auxílio durante a execução dos ensaios de usinagem.
- Ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM-UFU), ao Dr. Washington Martins da Silva Júnior e à técnica Ângela M. S. Andrade.
- À Faculdade de Engenharia Mecânica e a Coordenação do Curso de Pós-Graduação da UFU, pela oportunidade de realização deste trabalho.
- À Universidade Federal de Uberlândia, pela infra-estrutura fundamental à realização deste trabalho.
- Aos Professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pelos conhecimentos transmitidos.

- Ao Prof. Dr. Flávio José da Silva e os alunos Bruno Neto e Marcelo Rabelo do Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais da Universidade Federal do Espírito Santo Labtecmecc (LCSM-UFES).
- Ao CNPq CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro.
- A minha família Paipa Suarez pelo grande apoio e especialmente a minha noiva Fernanda Rodrigues companheira incondicional neste percurso.

Suarez, M. P., **Influência da texturização a laser em ferramentas de metal duro revestidas na usinagem do aço ABNT 1050**, 2012, 154 f., Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.

RESUMO

Na usinagem dos metais, um dos maiores focos de interesse dos processos convencionais de usinagem está no conhecimento da formação do cavaco. A análise da formação do cavaco mostra quão importante são os fenômenos envolvidos na criação de superfícies de engenharia. Desde 1930, E. M. Trent, um dos mais importantes pesquisadores da área de usinagem de todos os tempos, incentivou o estudo do comportamento tribológico da interface cavaco-ferramenta, que tem funcionado como mola propulsora para avanços tecnológicos tais como o uso de fluidos de corte adequados e revestimentos cada vez mais resistentes, que visam o prolongamento da vida das ferramentas de corte. Sabe-se da engenharia de superfície que diferentes topografias apresentam diferentes comportamentos tribológicos. O uso da tecnologia a laser possibilita a modificação da topografia da ferramenta de corte de maneira controlada e sem alteração das propriedades mecânicas do substrato. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da texturização a laser de ferramentas de metal duro revestidas na usinabilidade do aço ABNT 1050 no torneamento cilíndrico externo. As texturas foram produzidas em três etapas diferentes, variando a geometria das texturas e a intensidade do laser sobre a superfície de saída de ferramentas de metal duro, revestidas com multi-camada TiCN-Al₂O₃-TiN. As texturas foram caracterizadas por interferometria e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os testes de usinagem foram executados em diferentes níveis de velocidade de corte, de avanço por revolução (v_c e f) e em diferentes ambientes de lubri-refrigeração (seco, MQF e jorro). A usinabilidade do par ferramenta-peça foi avaliada, também, em três diferentes etapas classificatórias. Na primeira etapa (usando a mesma geometria e diferentes parâmetros no laser) foram consideradas as componentes das forças de usinagem e a rugosidade da peça como parâmetros avaliadores. Na segunda etapa (diferentes geometrias da textura) foram consideradas apenas as componentes da força de usinagem. Finalmente, na terceira etapa (melhor textura determinada pelas etapas anteriores) foi avaliada a vida da ferramenta. Os resultados mostraram que dos parâmetros investigados, apenas os ensaios de vida com uso de jorro, evidenciaram uma influência positiva significativa no uso de texturização de ferramentas, nas demais atmosferas os resultados não apresentaram uma variação significativa no comportamento das variáveis analisadas. A variação do avanço ou da velocidade de corte não modificou este comportamento. Este trabalho contribuiu assim, no estudo da interação laser-materia mostrando que esta nova tecnologia de texturização de ferramentas é viável e pode incrementar a vida das ferramentas e consequentemente a produtividade no chão de fábrica.

Palavras Chave: Texturização a Laser, Interface cavaco-ferramenta, Forças de usinagem, vida de ferramenta, Sistema-lubri-refrigerante, ferramentas de metal duro triplo-revestidas.

Suarez, M. P., **Effect of the laser texture on cemented carbide coated tools on the machining of ABNT 1050 steel**, 2012, 154 p., Doctorate Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.

ABSTRACT

In metal machining one of the most important topic is the understanding of the chip formation process. Its analysis leads to the conclusion of how important is the phenomena involved during the generation of a new engineering surface. Since 1930 E. M. Trent, one of the most important researcher in metal cutting of all times, has encouraged the study of the tribological behaviour at the chip-tool interface. This has served as the mainspring towards technological improvements, such as the use of adequate cutting fluids and tool coatings more and more resistant, which aims to prolong tool lives. It is known from the surface engineering that different surface topographies present different tribological behaviour. The use of laser technology allows to alter the topography of the tool surfaces without affecting their mechanical properties. The main objective of the present work is to evaluate the influence of laser textured surfaces of coated cemented carbide cutting tools in the machinability of ABNT 1050 steel in turning operation. The tools were textured in three different stages, varying the texture geometry and the laser power over the rake face of triple coated ($\text{TiCN-Al}_2\text{O}_3\text{-TiN}$) cemented carbide tools. The textures were characterized by electronic interferometry and scanning electron microscopy (SEM). The machining tests were carried out in several cutting conditions (cutting speed and feed rate) and different lubri-cooling atmospheres (dry, MQL and flood cooling). The machinability was evaluated also in three different classificatory stages. In the first stage (using the same texture geometry and different laser parameters) the machining force components and the workpiece surface roughness were considered as the evaluating parameters. In the second stage (different texture geometry) only the machining force components were considered. Finally, in the third stage (using the best texture determined by the previous stages) the tool life was the evaluating parameter. The results showed that from the machinability evaluating parameters, only the tool life with flood cooling presented positive response of the laser texture on the tool rake face. Under the other two lubri-cooling atmospheres (dry and MQL) the results did not show significant differences in the behaviour of the evaluating parameters. Varying the cutting conditions did not modify these results. This work has thus contributed for the study of the laser-materia interaction showing that this new technology of tool texturing is viable and can improve tool lives and hence shop floor productivity.

Keywords: Laser texture, Chip-tool interface, Machining forces, Tool life, Lubri-cooling systems, Triple coated cemented carbide tools.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diferentes superfícies obtidas por torneamento: a) faceamento; b) torneamento interno; c) torneamento externo; d) sangramento; e) corte com bedame; f) rosqueamento externo (CUSTOMPART.NET, 2007).....	7
Figura 2.2 - Exemplos de corte ortogonal (MACHADO et al., 2011).....	8
Figura 2.3 - Diagrama da cunha cortante (TRENT; WRIGHT, 2000).....	9
Figura 2.4 - Esquema mostrando as zonas de cisalhamento primária e secundária (MACHADO et al., 2011).....	10
Figura 2.5 - Formas de cavacos na usinagem dos metais (ISO 3685, 1993).....	13
Figura 2.6 - Zonas de escorregamento e aderência na interface cavaco-ferramenta (TRENT; WRIGHT, 2000).....	16
Figura 2.7 - a) Micrografia da raiz de um cavaco de aço ABTN 1010; b) Ampliação da região indicada em a; c) – Ampliação da região indicada em b. (TRENT; WRIGHT, 2000).....	17
Figura 2.8 - a)- Representação da força de usinagem no corte ortogonal e b)- sua representação no Circulo de Merchant (FERRARESI, 1981).....	20
Figura 2.9 - Componentes da força de usinagem no corte tridimensional: a) no fresamento e b) no torneamento (FERRARESI, 1981).....	21
Figura 2.10 - Direções de aplicação do fluido de corte (adaptado de DA SILVA, 2006).....	29
Figura 2.11 - Aplicação por jorro em 3 bicos do fluido de corte semi-sintético, vazão total de 1230 l/h (SUAREZ, 2008).....	30
Figura 2.12 - Vida da ferramenta no fresamento de aço AISI P21 com MQL e a seco ($a_p = 0,3$ mm e $v_c = 500$ m/min) (LIAO; LIN, 2007).....	31
Figura 2.13 – Atividade científica e técnica envolvida na criação da engenharia da superfície (BURAKOUZKI; WIERZCHON, 1999).....	33
Figura 2.14 – Representação da área de apoio de uma superfície (STOUT; BLUNT, 2000).....	37
Figura 2.15 – Tipos de textura: a) seqüencial, b) ponto, c) forma livre linha, d) forma livre ponto, e) tira, f) ilha. Adaptado de (SZYMAŃSKI, H., et al., 1990 Apud BURAKOUSKI; WIERZCHON, 1999).....	38
Figura 2.16 – Texturas por sobreposição “Overlapping” a) tira, b) ilha. (Adaptado de: BURAKOUSKI; WIERZCHON, 1999).....	38

Figura 2.17 – Textura tipo forma livre a) quadrado ou retângulo em superfícies planas, b) densidade de energia superficial variável em superfícies cilíndricas ou planas, c) espiral em superfícies cilíndricas (Burakouski; Wierzchon, 1999).....	39
Figura 2.18 – Diagrama de emissão espontânea e absorção de energia a) em um átomo b) em uma série de átomos (OCZOOE, 1988).....	40
Figura 2.19 – Representação gráfica de a) absorção, b) Emissão e c) Emissão estimulada. (Adaptado de: Oczoee, K., 1988).....	41
Figura 2.20 – Constituição básica de um laser (ARROYO, 2009).....	43
Figura 2.21 – Modos transversais eletromagnéticos da cavidade estável, a) simetria retangular Hermite Gauss, b) simetria circular Laguerre-Gauss (Adaptado de ARROYO, 2009).....	46
Figura 2.22 – Distribuição de intensidade em feixes gaussianos (LIMA, 2006; RIVA , 2007).....	47
Figura 2.23 - Representação esquemática das características geométricas do feixe laser (Adaptado de ZHANG et al., 2011).....	49
Figura 2.24 - Textura com diferentes velocidades de varredura do feixe.....	51
Figura 2.25 – Momento torçor e força de avanço na furação usando brocas texturizadas a laser (NEVES et al., 2006).....	52
Figura 2.26 - MEV Imagens de uma ferramenta com (a) microtextura (espaçamento = 10µm) e (b) nanotextura (espaçamento = 800 nm) usando um laser de pulsos de femtosegundos. Seção transversal de (c) microtextura e (d) nanotextura medida usando um microscópio de força atômica (KAWASEGUI et al., 2009).....	53
Figura 2.27 - Força de corte em a) ferramentas não texturizadas, Micro e nanotexturizadas e b) ferramentas nanotexturizadas com marcas: paralelas e perpendiculares ao fluxo de saída do cavaco. KAWASEGUI et al., (2009).....	53
Figura 2.28 - Influência da profundidade da nanotextura na força de corte com em usinagem com MQF. (Adaptado de KAWASEGUI et al., 2009).....	54
Figura 2.29 - influência da área texturizada nas forças de usinagem (Adaptado de: KOSHY; TOVEY, 2011).....	55
Figura 2.30 - Posição da textura e configurações. (Adaptado de: KOSHY; TOVEY, 2011).....	55
Figura 2.31 - Influência do Skewness e Kurtosis na redução de forças (KOSHY; TOVEY, 2011).....	56

Figura 2.32 - Gráficos a) comparativos das forças de corte, b) comparação dos coeficientes de atrito e c) fotografia da ferramenta texturizada após usinagem (SHUTING et al., 2009).....	57
Figura 2.33 - Imagem dos cavacos usando a) corte a seco, b) jorro, d) lubrificação com óleo, d) lubrificação sólida. (SHUTING et al., 2009).....	57
Figura 2.34 – Aspecto da superfície de saída tratada a laser (LIMA et al., 2005).....	58
Figura 2.35 - Aspecto da indentação Rocwell C em ferramentas a) sem textura, b) texturizada e revestida. Para diferentes revestimentos (NEVES et al., 2006).....	59
Figura 3.1 – Aço ABTN 1050 (Doação Gerdau S.A.).....	62
Figura 3.2 - Ferramenta Sandvik SPMR120308, da classe 4025 P25/K20.....	62
Figura 3.3 - Torno ROMI Multiplic 35D.....	63
Figura 3.4 - LABTECMEC UFES a) Torno ROMI Centur 35D, b) foto detalhada do torneamento.....	64
Figura 3.5 - Desenho esquemático do sistema de aquisição de força.....	65
Figura 3.6 - Em (a) Perfilômetro 3D utilizado na análise topográfica, e em (b) detalhe da varredura da superfície de saída de uma ferramenta (VIANA, 2009).....	66
Figura 3.7 - Rugosímetro Mitutoyo SJ 201P.....	67
Figura 3.8 - Microscópio eletrônico de varredura Hitachi.....	67
Figura 3.9 - Microscópio eletrônico de varredura com EDX acoplado da UFES.....	68
Figura 3.10 - Lupa ZEISS Stereo Discovery 12.....	68
Figura 3.11 - Princípio de funcionamento do equipamento de microabrasão do tipo esfera livre, <i>Calowear</i>	69
Figura 3.12 - Em (a) equipamento utilizado no ensaio, e em (b) detalhe de montagem do experimento (SANTOS, 2004 Apud VIANA, 2009).....	70
Figura 3.13 - Ilustração mostrando a definição dos diâmetros externo (b) e interno (a) da calota de desgaste formada (VIANA, 2009).....	70
Figura 3.14 - Desenho esquemático de etapas do trabalho.....	71
Figura 3.15 - Estratégia de texturização das ferramentas da etapa 1.....	73
Figura 3.16 - Ferramenta texturizada na terceira etapa, a) Esquema de texturização b) fotografia da superfície texturizada.....	76

Figura 4.1 - Ilustração de pontos de medição de dureza Vickers.....	81
Figura 4.2 - Micrografia do aço ABNT 1050 a) borda e b) centro da barra.....	82
Figura 4.3 - Ferramenta convencional SPMR120308, a) corte transversal, b) superfície de saída.....	83
Figura 4.4 – Força de corte em ferramenta sem quebra cavaco, convencional e texturizada, em atmosfera a seco. $a_p = 2\text{ mm}$, $f = 0,2\text{ mm/rev}$	85
Figura 4.5 – Força de corte em ferramenta sem quebra cavaco, convencional e texturizada, em atmosfera a jorro. $a_p = 2\text{ mm}$, $f = 0,2\text{ mm/rev}$	85
Figura 4.6 – Rugosidade de corte com ferramenta sem quebra cavaco, convencional e texturizada, em atmosfera a seco. $a_p = 2\text{ mm}$, $f = 0,2\text{ mm/rev}$	86
Figura 4.7 – Rugosidade de corte com ferramenta sem quebra cavaco, convencional e texturizada, em atmosfera a jorro. $a_p = 2\text{ mm}$, $f = 0,2\text{ mm/rev}$	86
Figura 4.8 – Influência do revestimento da ferramenta nas forças de usinagem. $a_p = 2\text{ mm}$, $f = 0,2\text{ mm/rev}$	87
Figura 4.9 – Influência do revestimento da ferramenta nas forças de usinagem. $a_p = 2\text{ mm}$, $v_c = 200\text{ m/min}$	88
Figura 4.10 – Desenho esquemático explicativo da usinagem em diferentes diâmetros.....	89
Figura 4.11 – Influência do diâmetro da peça de trabalho na força de: a) corte, b) avanço e c) passiva. $a_p = 2\text{ mm}$, $f = 0,2\text{ mm/rev}$	90
Figura 4.12 - Fotografia das ferramentas texturizadas na etapa 1.....	91
Figura 4.13 – Topografia 3D superfície de saída das ferramentas do primeiro lote.....	93
Figura 4.14 – MEV da superfície de saída de ferramentas.....	94
Figura 4.15 – EDX, composição química da superfície de saída da ferramenta com textura 1 (40 W).....	95
Figura 4.16 - Seção transversal a) ferramenta comercial revestida multicamada, b) ferramenta revestida e texturizada e c) ampliação de detalhe b.....	96
Figura 4.17 - Força de corte Vs vel. de corte a) seco, b) MQF, c) jorro; força de corte Vs avanço d) seco, e) MQF, f) jorro.....	98
Figura 4.18 - Força de avanço Vs vel. de corte a) seco, b) MQF, c) jorro; força de avanço Vs avanço d) seco, e) MQF, f) jorro.....	99
Figura 4.19 - Força passiva Vs vel. de corte a) seco, b) MQF, c) jorro; força passiva Vs avanço d) seco, e) MQF, f) jorro.....	100

Figura 4.20 - Força de corte usando as ferramentas texturizadas na segunda etapa a) seco, b) MQF, c) jorro, $ap = 2\text{mm}$, $f = 0,2\text{ mm/rev}$	104
Figura 4.21 - Força de corte usando as ferramentas texturizadas na segunda etapa a) seco, b) MQF, c) jorro, $ap = 2\text{mm}$, $v_c = 200\text{ m/min}$	106
Figura 4.22 - Desenho esquemático de giro de ferramenta e movimento do cavaco.....	108
Figura 4.23 - Topografia 3D e fotos de texturas a 17, 5 e 11 W respectivamente das ferramentas a) T6, T17, T27 e b) T10, T12, T30.....	109
Figura 4.24 - MEV de ferramentas texturizadas a 17, 11 e 5 W respectivamente para cinco texturas diferentes com ampliação de 100X.....	111
Figura 4.25 - MEV de ferramentas texturizadas a 17, 11 e 5 W respectivamente para cinco texturas diferentes com ampliação de 300X.....	111
Figura 4.26 - MEV de ferramentas texturizadas a 17, 11 e 5 W respectivamente para cinco texturas diferentes com ampliação de 3000X.....	112
Figura 4.27 - MEV da seção transversal de um canal de uma ferramenta do terceiro lote de texturização.....	113
Figura 4.28 - Interferometria a laser de ferramenta texturizada no terceiro lote. a) Topografia 3D, b) perfil 2D.....	114
Figura 4.29 - Mapas de raios-x da superfície da ferramenta texturizada via MEV/EDS.....	115
Figura 4.30 - Desgaste de flanco Vs volume de material removido, $f = 0,25\text{ mm/min}$, $ap = 2\text{ mm}$, atmosfera MQF e jorro, velocidade de corte a) 150 m/min , b) 350 m/min	116
Figura 4.31 - Réplica de teste de vida de ferramenta, desgaste de flanco Vs volume de material removido, $f = 0,25\text{ mm/min}$, $ap = 2\text{ mm}$, atmosfera MQF e jorro, velocidade de corte a) 150 m/min , b) 350 m/min	117
Figura 4.32 - Superfície de saída de ferramentas com, PP = Marcas perpendiculares, PR = Marcas paralelas, ST = Ferramenta Convencional (sem textura), usadas na condição Jorro.....	119
Figura 4.33 - MEV ferramenta no fim de vida, com marcas perpendiculares ao fluxo do cavaco $vc = 350\text{ m/min}$, atmosfera de corte jorro.....	120
Figura 4.34 - MEV ferramenta no fim de vida, com marcas paralelas ao fluxo do cavaco $vc = 350\text{ m/min}$, atmosfera de corte jorro.....	120
Figura 4.35 - MEV/EDS ferramenta convencional no fim de vida, $vc = 350\text{ m/min}$, atmosfera de corte jorro.....	121

Figura 4.36 - MEV/EDS ferramenta convencional no fim de vida (critério volume), vc = 150 m/min, atmosfera de corte jorro.....	121
Figura 4.37 - MEV/EDS ferramenta no fim de vida (critério volume), vc = 150 m/min, marcas perpendiculares e atmosfera de corte jorro.....	122
Figura 4.38 - MEV/EDS ferramenta no fim de vida (critério volume), vc = 150 m/min, marcas paralelas e atmosfera de corte jorro.....	122
Figura 4.39 - fotografia do Incerto a) revestido; b) revestido e texturizado; c) detalhe da textura.....	123
Fig. 4.40 - MEV de um corte transversal da ferramenta convencional.....	124
Figura 4.41 - Interferometria a laser da Superfície texturizada a) vista de topo; b) perfil perpendicular às marcas.....	124
Figura 4.42 - Aresta de corte desgastada (a)Superfície de flanco e de saída de uma ferramenta sem textura no fim de vida, (b) detalhe mostrando marcas do desgaste abrasivo.....	125
Figura 4.43 Desenho esquemático de um corte transversal ilustrando as grandezas medidas no teste abrasivo.....	126
Figura 4.44 - Análise topográfica por interferometria a laser a) calota de desgaste; b) perfil do centro da calota. Amostra sem textura, concentração da lama 50 wt%, 10 minutos de teste.....	127
Figura 4.45 - Estado de equilíbrio em microabrasão da ferramenta sem textura a) variação do volume de material removido com o produto do deslizamento linear pela força normal; b) variação do coeficiente de abrasão com a distância de deslizamento; concentração da lama 0,5 g/cm ³	127
Figura 4.46 - Comportamento linearizado obtido da amostra com marcas perpendiculares ao movimento, concentração da lama 0,5 g/cm ³	128
Figura 4.47 - Coeficientes de desgaste k_C e K_S das ferramentas sem textura e com marcas perpendiculares e paralelas. Concentração da lama abrasiva a) 0.5 g/cm ³ ; (b) 0.05 g/cm ³	129
Figura - 4.48: Mecanismos de desgaste em testes de microabrasão, concentração da lama 0,5 g/cm ³ : calota de desgaste em a) ferramentas sem textura; b) textura perpendicular ao movimento; c) detalhe de (a); d) detalhe de (b) Concentração da lama abrasiva a) 0.5 g/cm ³ ; (b) 0.05 g/cm ³	129
Figura 4.49 - Riscos em testes de microabrasão, concentração da lama abrasiva 0,05 g/cm ³ : a) ferramenta sem textura; b) detalhe na camada TiCN; c) ferramenta com textura perpendicular; d) detalhe de região do substrato.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação das propriedades funcionais das superfícies de engenharia (COSTA, 2005).....	35
Tabela 2.2 - Mudanças de fase no material conforme intensidade do laser (DULEY, 1976 e READY, 1997 apud VIANA, 2010).....	44
Tabela 2.3 - Valores comparativos de desgaste em brocas de aço rápido revestidas (comerciais) e brocas modificadas a laser. (NEVES et al., 2006).....	60
Tabela 3.1 - Composição aço ABNT 1050 (Gerdal S.A.).....	61
Tabela 3.2 - Parâmetros do laser primeira etapa.....	72
Tabela 3.3 - Esquema de estratégia de texturização das ferramentas da etapa 2.....	74
Tabela 3.4 - Parâmetros do laser segunda etapa.	75
Tabela 3.5 - Parâmetros do laser terceira etapa.....	76
Tabela 3.6 - Planejamento dos testes realizados nas três etapas.....	77
Tabela 3.7 – Planejamento das condições de corte aplicadas nas três etapas.....	78
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do aço ABNT 1050 (Gerdal S.A.)	82
Tabela 4.2- Parâmetros de rugosidade da superfície de saída das ferramentas.....	92

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Letras Latinas

ABNT.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APC.....	Aresta Postiça de Corte
CVD.....	Deposição Química de Vapor
EDX.....	Energia Dispersiva de Raio-X
F_u	Força de usinagem
F_c	Força de corte
F_f	Força de avanço
F_p	Força passiva
a_p	Profundidade de Corte
F_N	Força Normal
F_Z	Força de cisalhamento
H.....	Dureza
HSM.....	Usinagem a Altíssimas Velocidades
CBN.....	Nitreto Cúbico de Boro
N_e	Potência Efetiva de Corte
MEV.....	Microscópio Eletrônico de Varredura
MQF.....	Mínima Quantidade de Fluido
PCD.....	Diamante Poli Cristalino
PVD.....	Deposição Física de Vapor
$VB_{Bmáx}$	Desgaste de Flanco Máximo
v_c	Velocidade de Corte
v_f	Velocidade de Avanço
f	Avanço
l_f	Percurso de Avanço
N_c	Potência de Corte
N_f	Potência de Avanço
h	Espessura de corte
h'	Espessura de corte deformada
b	Largura de corte
F_T	Força de Atrito

F_{NZ}	Força de compressão perpendicular a F_z
N_m	Potência do motor da máquina ferramenta
MPa.....	Mega Pascal
Ra.....	Rugosidade média
Rz.....	Rugosidade média de 10 pontos
I_0	Intensidade temporal média do laser
Nd:YAG	Granada ítrio-alumínio, dopada com neodímio; $Nd:Y_3Al_5O_{12}$
t.....	Tempo
R	Rádio da Esfera
TEM.....	Modo Transversal Eletromagnético
a.....	Largura da calota interna
t_h	Espessura da camada de revestimento
K.....	Condutividade térmica
k.....	Difusividade térmica
c.....	Calor específico
L_f	calor latente de fusão do material
L_v	calor latente de vaporização do material
P	Potência média do laser
E	Energia do pulso
r.....	Raio do feixe
A	Coefficiente de absorvidade do material irradiado
M^2	Parâmetro de qualidade do feixe
z.....	Profundidade de transmissão da energia
SP.....	Intensidade espacial da intensidade do laser
(x,y,z).....	Índices do modo Transversal eletromagnético
Kerf.....	Largura de corte a laser
V_C	Volume de desgaste no revestimento
V_S	Volume de desgaste no substrato
V_T	Volume Total de desgaste
K_C	Coefficiente de desgaste do revestimento
K_S	Coefficiente de desgaste do substrato
K_T	Coefficiente de desgaste total
S.....	Deslizamento Linear
N.....	Carregamento Normal

Letras Gregas

θ	.....	Ângulo de divergência do feixe
ν	.....	Frequência de emissão ou absorção
λ	.....	Comprimento de onda da radiação
c	.....	Taxa de propagação de luz em vácuo
α	.....	Coefficiente de Expansão Térmica
τ	.....	Tempo do pulso
ρ	.....	Massa específica
η	.....	Rendimento
$\varnothing$	.....	Ângulo de cisalhamento
γ_o	.....	Ângulo de Saída

SUMARIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 – Torneamento	7
2.2 – Formação do Cavaco.....	8
2.2.1 – <i>Etapas do processo de formação do cavaco</i>	8
2.2.2. <i>Classificação dos cavacos</i>	11
2.3 - Interface cavaco-ferramenta.....	14
2.3.1 - <i>Atrito em usinagem</i>	14
2.3.2 – <i>Condição de aderência</i>	16
2.3.3 – <i>Condições de escorregamento</i>	18
2.3.4 – <i>Condições de APC</i>	18
2.4 – Forças e potência de usinagem.....	19
2.4.1 – <i>Forças no corte ortogonal</i>	19
2.4.2 - <i>Forças no corte tridimensional</i>	21
2.4.3 – <i>Comportamento da força de usinagem</i>	22
2.4.4 - <i>Potência de usinagem</i>	24
2.5 – Fluidos de corte.....	27
2.5.1 - <i>Funções dos fluidos de corte</i>	27
2.5.2 - <i>Classificação dos fluidos de corte</i>	28
2.5.3 - <i>Métodos de aplicação dos fluidos de corte</i>	28
2.5.4 - <i>Implicação da utilização dos fluidos de corte no processo de usinagem</i>	30
2.6 - Superfícies texturizadas.....	32
2.6.1 – <i>Definições</i>	33
2.6.2 – <i>Objetivos da texturização</i>	34
2.6.3 – <i>Tipos de texturas</i>	36
2.6.4 – <i>Fundamentos do LASER</i>	39
2.6.5 – <i>Interação Laser-materia</i>	43
2.6.6 – <i>Variáveis do processo de texturização a laser</i>	45
2.7 - Influências da textura em usinagem	49

2.7.1 – Tipos de texturas aplicadas em ferramentas de corte.....	50
2.7.2 – Influência na força e na potência de usinagem.....	52
2.7.3 – Na temperatura de usinagem.....	56
2.7.4 – No acabamento da peça usinada.....	58
2.7.5 – Na vida da ferramenta de corte.....	59
CAPÍTULO III - METODOLOGIA.....	61
3.1 - Aspectos Gerais.....	61
3.2 - Materiais.....	61
3.3 - Equipamentos.....	63
3.4 - Procedimentos Experimentais.....	71
3.5 - Metodologia de texturização.....	72
3.5.1 - Texturização lote 1.....	72
3.5.2 - Texturização lote 2.....	74
3.5.3 - Texturização lote 3.....	76
3.6 - Pré-testes de Usinagem.....	77
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	81
4.1 - Ensaio de caracterização peça e ferramenta.....	81
4.2. – ETAPA 1 – Primeiro lote de ferramentas texturizadas (7 texturas) - Influência dos parâmetros do LASER na textura produzida na ferramenta.....	91
4.2.1 – Análise visual e topográfica do primeiro lote de ferramentas texturizadas.....	91
4.2.2 – Análise química e MEV do primeiro lote de ferramentas texturizadas.....	94
4.2.3 – Análise comparativa das forças de corte do primeiro lote de ferramentas texturizadas.....	97
4.3 – ETAPA 2 – Segundo lote de ferramentas texturizadas (15 texturas) - Influência da geometria da textura a LASER nas forças de usinagem.	101
4.3.1 - Caracterização das forças de usinagem.....	101
4.3.2 – Análise topográfica do terceiro lote de ferramentas texturizadas.....	108
4.3.3 – Análise química e MEV do terceiro lote de ferramentas texturizadas.....	110
4.4 - ETAPA 3 - Terceiro lote de ferramentas texturizadas (1 textura) – Influência da textura na vida da ferramenta.....	112

4.4.1 – <i>Análise topográfica do terceiro lote de ferramentas texturizadas</i>	113
4.4.2 – <i>Análise química e MEV do terceiro lote de ferramentas texturizadas</i>	114
4.4.3 - <i>Testes de vida do terceiro lote de ferramentas texturizadas</i>	115
4.4.4 – <i>Teste de micro abrasão no terceiro lote de ferramentas texturizadas</i>	123
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	133
CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
CAPITULO VII - ANEXOS	
ANEXO I - FORÇAS DE USINAGEM EM FERRAMENTAS DA SEGUNDA ETAPA.....	144
ANEXO II - EVOLUÇÃO DO DESGASTE NA SUPERFÍCIE DE SAÍDA - EM FERRAMENTAS DA TERCEIRA ETAPA.....	153