



Marta Regina Delle Donne Carvalho

Análise comparativa de meios de preparação do substrato para ferramentas de torneamento revestidas pelo processo PVD

52/2013

**CAMPINAS
2013**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

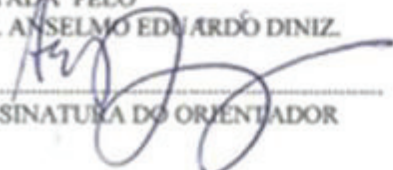
Marta Regina Delle Donne Carvalho

Análise comparativa de meios de preparação do substrato para ferramentas de torneamento revestidas pelo processo PVD

Orientador: Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Materiais e Processos de Fabricação.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA
ALUNA MARTA REGINA DELLE DONNE CARVALHO,
E ORIENTADA PELO
PROF. DR. ANSELMO EDUARDO DINIZ.


ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS
2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

C253a Carvalho, Marta Regina Delle Donne, 1962-
Análise comparativa de meios de preparação do substrato para ferramentas de torneamento revestidas pelo processo PVD / Marta Regina Delle Donne Carvalho. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Torneamento. 2. Usinagem. 3. Revestimento. 4. Adesão. 5. Laser. I. Diniz, Anselmo Eduardo, 1959-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Comparative analysis of methods of preparing the substrate for turning tools coated by PVD

Palavras-chave em inglês:

Turning

Machining

Coating

Adhesion

Laser

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestra em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Anselmo Eduardo Diniz [Orientador]

João Batista Fogagnolo

Marcos Valério Ribeiro

Data de defesa: 12-07-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE FABRICAÇÃO

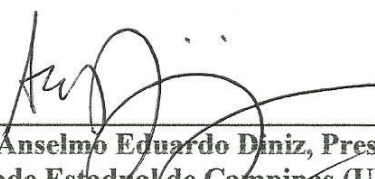
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Análise comparativa de meios de preparação
do substrato para ferramentas de torneamento
revestidas pelo processo PVD**

Autora: Marta Regina Delle Donne Carvalho

Orientador: Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, Presidente
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)



Prof. Dr. João Batista Fogagnolo
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)



Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Campus de Guaratinguetá
(UNESP)

Campinas, 12 de Julho de 2013.

Dedicatória

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Francisco e Neyde (sempre presente), ao meu irmão, Francisco Celso e toda minha família, pelo amor, apoio e dedicação em todos os momentos de minha vida.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, pela realização e conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, pelo ensino,apoio e orientação dos caminhos a serem seguidos.

Ao Prof. Dr. Amauri Hassui e Profa. Dr. Maria Helena Robert pela aceitação em participar da avaliação de meu exame de qualificação.

Ao Prof. Dr. Milton Lima, Prof. Dr. David Neves e José Guilherme Simões, do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), pela colaboração, apoio e conhecimentos transmitidos.

Ao Prof. Dr. Renato Goulart Jasinevicius e Cleiton Lázaro Fazolo de Assis, da USP de São Carlos, pelo auxílio e apoio em ensaios desta pesquisa.

Ao José R. Gamarra, Carlos Ancelmo, Rudolf Malaquias e Ricardo Cereto da SANDVIK, pelas orientações técnicas e companheirismo.

Ao Celso Antônio Barbosa, da VILLARES Metals, pelas informações concedidas.

Ao João Corosella e Marcelo Kuroda, da BLASER Swissslube, pela ajuda e assistência.

A Claudenete Vieira Leal e Eduardo José Bernardes, do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA), da UNICAMP, pela colaboração no desenvolvimento de atividades desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Rubens Caran, do DEMA da UNICAMP, pela disponibilização de recursos técnicos.

ASílvia do Nascimento Rosa, Daniel Suyama, Henrique Kull Neto e Mário Magri, do Departamento de Engenharia de Fabricação (DEF) da UNICAMP, pelas sugestões, estímulos e apoio durante este período de convívio.

Ao Aristides Magri, do Laboratório de Usinagem, do DEF da UNICAMP, pela ajuda e apoio nos ensaios de torneamento.

Ao amigo Ricardo Manhi e Patrícia Sandoval, pela contribuição na realização desta pesquisa.

A todos os professores, funcionários e colegas da FEM / UNICAMP, pela colaboração comigo.

A empresa SANDVIK do Brasil, VILLARES Metals, BLASER Swissslube, pelo fornecimento de insumos.

Ao Instituto de Estudos Avançados (IEAv) pela permissão na utilização de recursos técnicos.

A Universidade Estadual de São Paulo (USP) campus de São Carlos (SP), pela infraestrutura cedida.

A Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) pela oportunidade de realização destes experimentos.

A CAPES, pela concessão de bolsa de estudos.

E a todos aqueles que me ajudaram na concretização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

*Os sonhos não determinam o lugar em que você vai estar,
mas produzem a força necessária para tirá-lo do lugar em que está.*
Augusto Cury

Resumo

O presente trabalho compara dois métodos para mudar a micro-topografia do substrato e com isso, aumentar a aderência na interface recobrimento-substrato e prolongar a vida das ferramentas de metal duro. Um dos processos é o de jateamento com micro-partículas de óxido de alumínio (convencional), mais utilizado atualmente. O outro processo escolhido é o de texturização a laser pulsado, por sua praticidade e menor risco para os operadores. As ferramentas de (classe ISO M25) foram ensaiadas em condições de desbaste e as de (classe ISO M15) em condições de acabamento. Ambos substratos foram recobertos pelo processo (PVD) de tripla camada. Foram realizados ensaios de vida com torneamento de corpos de prova de aço inoxidável austenítico, V316L e testes de indentação Rockwell C e rugosidade tridimensional para comparar o desempenho e a adesividade das ferramentas. Pelos resultados dos ensaios de desbaste, as ferramentas texturizadas convencional e a laser apresentam desempenho similar, quanto a vida e potência consumida. A análise das ferramentas desgastadas apontou em todas as arestas evidências de adesão, abrasão e *attrition*. Os resultados mostraram que os inserts texturizados convencionalmente apresentaram menor rugosidade média 3D S_a , os inserts texturizados a laser apresentaram Curtose S_{ku} mais próxima de três e ambos inserts apresentaram similar Assimetria S_{sk} . Os inserts texturizados a laser apresentaram mais defeitos no revestimento, porém esses fatores não foram suficientes para diferenciá-los. Pelos resultados dos ensaios de acabamento, as ferramentas texturizadas convencional e a laser também apresentaram desempenho similar, quanto à vida e potência consumida. Os principais mecanismos de desgaste foram de novo, a adesão, abrasão e *attrition*. Os resultados mostram que os inserts texturizados convencionais apresentaram menor rugosidade média 3D S_a , os inserts texturizados a laser apresentaram Assimetria S_{sk} mais negativa e ambos inserts apresentaram similar Curtose S_{ku} . Os inserts texturizados a laser apresentaram mais defeitos no revestimento, porém também não foram suficientes para diferenciá-los.

Palavras chaves: Torneamento, Usinagem, Revestimento, Adesão, Laser.

Abstract

This work compares two methods to change the micro-topography of the substrate and thus increase the adherence on the coating-substrate interface, aiming to extend the tool lives. One method is aluminum oxide micro-particles blasting (conventional) currently most used. The other process is the pulsed laser texturing for its practicality and lower risk to the health of operators. The tools (ISO class M25) were tested in roughing conditions and (ISO class M15) in finishing conditions. Both substrates were then coated by (PVD) with triple layers. Tool life experiments were performed with turning samples of austenitic stainless steel, V316L and Rockwell C indentation tests and tridimensional roughness to compare the performance and adhesiveness of tools. For roughing tests results, that conventional and laser textured tools show similar performance in terms of tool life and cutting power consumption. Analysis of worn tools evidences edges of adhesion, abrasion and attrition in all tools tested. The results have shown that conventionally textured inserts had lower mean 3D roughness S_a , laser textured inserts showed Kurtosis S_{ku} close to three near and two types of inserts showed a similar Skewness S_{sk} . The laser textured inserts showed more defects on the coating, but these factors were not sufficient to differentiate them. For finishing tests results, that conventional and laser textured tools also showed similar performance in terms of tool life and cutting power consumption. The main mechanisms of tool wear in turning were again adhesion, abrasion and attrition. The results showed that conventionally textured inserts had lower mean 3D roughness S_a and laser textured inserts showed more negative Skewness S_{sk} and both inserts had similar kurtosis S_{ku} . Laser textured inserts showed more defects in the coating, but these factors were not sufficient to differentiate them.

Keywords: Turning, Machining, Coating, Adhesion, Laser.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Indicações gerais sobre condições de usinagem para o torneamento de aços inoxidáveis austeníticos. (<i>Modern Metal Cutting</i>)	10
Figura 2.2: Inserto com revestimento de tripla-camadas pelo processo CVD – TiN, Al ₂ O ₃ e TiCN (adaptado de SANDVIK Coromant, 2012).....	13
Figura 2.3: Inserto com revestimento de tripla-camadas pelo processo PVD - TiAlN, (Al,Cr) ₂ O ₃ e TiAlN (adaptado de SANDVIK Coromant, 2012).....	19
Figura 2.4: Esquema de um equipamento de geração do feixe de laser (ARROYO, 2009).....	25
Figura 2.5: Ciclo térmico básico gerado por um pulso laser. O seguinte pulso interagirá com parte ou com todo o material ressolidificado (FOLTYN, 1994).....	28
Figura 2.6:Parâmetro S _{sk} ou Assimetria e curva de distribuição de frequência (GADELMAWLA et al., 2002).....	37
Figura 2.7:Parâmetro S _{ku} ou curtose e curva de distribuição de frequência (GADELMAWLA et al., 2002).....	38
Figura 2.8: Representação esquemática do parâmetro Rugosidade média 2D R _a (MITUTOYO, 2012).....	39
Figura 2.9: Representação esquemática do parâmetro Rugosidade média 2D R _z (MITUTOYO, 2012).....	39
Figura 2.10: Representação esquemática do parâmetro Rugosidade 2D R _q (MITUTOYO, 2012) ..	40
Figura 3.1:(a) e (b) Fluxograma das atividades desenvolvidas para realização dos ensaios.....	41/42
Figura 3.2: Máquina ferramenta utilizada nos testes práticos	43
Figura 3.3: Microscópio e câmera ópticos usados para medição do desgaste de flanco das ferramentas.....	44
Figura 3.4: Suporte porta-ferramenta utilizado no processo de torneamento de face.....	46
Figura 3.5: Croqui do suporte porta-ferramentas utilizado no processo de torneamento de face.....	46

Figura 3.6: Croqui do inserto de metal duro para Desbaste utilizado no processo de torneamento de face.....	47
Figura 3.7: (a) Substrato bruto de metal duro de Desbaste (ISO M15) como recebido do fabricante; (b) Substrato texturizado a laser; (c) Inserto texturizado a laser pré-revestimento com cobertura TiAlN, para uso nos testes práticos.....	48
Figura 3.8: (a) Inserto de metal duro texturizado a laser com cobertura; (b) Corpos de prova embutidos e polidos da parte interna de insertos de metal duro revestidos para análise da microestrutura do substrato e espessura do revestimento.....	49
Figura 3.9: Micrografia do substrato do inserto utilizado no ensaio de Desbaste (classe ISO M25) no corpo de prova embutido e polido.....	49
Figura 3.10: Análise da espessura média do revestimento de TiAlN / (Al,Cr) ₂ O ₃ / TiAlN do inserto utilizado no ensaio de Desbaste (classe ISO M25), no corpo de prova embutido e polido.....	50
Figura 3.11: (a) Substrato bruto de metal duro de Desbaste (ISO M15) como recebido do fabricante; (b) Substrato texturizado a laser; (c) Inserto texturizado a laser pré-revestimento com cobertura TiAlN, para uso nos testes práticos.....	51
Figura 3.12: Micrografia do substrato do inserto utilizado no ensaio de Acabamento (classe ISO M15) no corpo de prova embutido e polido.....	52
Figura 3.13: Análise da espessura média do revestimento de TiAlN / (Al,Cr) ₂ O ₃ / TiAlN do inserto utilizado no ensaio de Acabamento (classe ISO M15) no corpo de prova embutido e polido.....	52
Figura 3.14: Croqui dos corpos de prova utilizados nos testes práticos de torneamento de face.....	54
Figura 3.15: (a) Barra cortada; (b) Vista lateral e (c) Vista frontal dos corpos de prova pré-torneados e pré-furados.....	54
Figura 3.16: Principais parâmetros espaciais do feixe laser focalizado [adaptado de ZHANG , YAO e CHENG, 2006].....	56
Figura 3.17: Dispositivo de fixação dos substratos de metal duro para processo de texturização a laser.....	57
Figura 3.18: (a) Vista posterior do substrato no dispositivo de fixação construído para posicionar os substratos de metal duro no equipamento de texturização a laser; (b) Vista de topo; (c) Vista frontal do substrato na posição de texturização da superfície de folga.....	57
Figura 3.19: Esquema do Sistema de Galvanométrico de Texturização.....	58

Figura 3.20: Esquema de distribuição dos pulsos de laser na superfície do substrato (NEVES, 2010).....	59
Figura 3.21: Aspectos geométricos da texturização. (a) Superposição de pulsos de texturização; (b) Sequenciamento de pulsos; (c) Áreas superexpostas; (d) Formação de padrão de texturização.	59
Figura 3.22: Esquema de aplicação do padrão de texturização a laser: (a) Padrão original; (b) Aplicação do padrão a 0° do eixo horizontal; (c) Aplicação do padrão a 60° do eixo horizontal; (d) Aplicação do padrão a 120° do eixo horizontal.....	60
Figura 3.23: Resultado da aplicação do padrão original da texturização a laser em sobreposição a: 0° do eixo horizontal (foco do laser em azul), 60° do eixo horizontal (foco do laser em vermelho) e 120° do eixo horizontal (foco do laser em verde).....	61
Figura 3.24: Morfologia das superfícies de folga dos substratos sem cobertura: (a) Bruto e (b) Texturizado a laser.....	62
Figura 3.25: Morfologia das superfícies de saída dos substratos texturizados a laser, utilizados nos ensaios de: (a) e (c) Desbaste e (b) e (d) Acabamento.....	62
Figura 3.26: Locais das indentações Rockwell C (círculos em vermelho), em um exemplo de inserto de metal duro revestido, utilizado nos ensaios de Desbaste.....	64
Figura 3.27: (a), (b) e (c) Indentações Rockwell C; (d) e (e): Trincas do revestimento após indentações Rockwell C, nos lados A e B de um exemplo de inserto de metal duro revestido, utilizado para ensaios de Acabamento.....	65
Figura 3.28: Princípio do Teste de Aderência por Indentação VDI 3198 (Rockwell C).(VIDAKIS, ANTONIADIS e BILALIS, 2003)	66
Figura 3.29: Croqui da trajetória da ferramenta de corte.....	67
Figura 4.1: Indentações Rockwell C de ferramentas revestidas de desbaste (classe ISO M25), lados A e B: (a) Texturizadas pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convencional) e (b) Texturizadas pré-recobrimento a laser. As micrografias foram feitas em MEV.....	71
Figura 4.2: (a) e (b) Micrografia de indentação Rockwell C em exemplo de ferramenta de desbaste (classe ISO M25), com texturização pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convencional) e (c) Micrografia obtida pelo feixe de elétrons retroespalhados (BSE) do MEV.....	73

Figura 4.3: (a) Comprimento e (b) Número de trincas de indentações Rockwell C para as ferramentas de desbaste (classe ISO M25) com texturização pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convencional) e com texturização a laser, obtida pelo feixe de elétrons retroespalhados (BSE) do MEV.....	74
Figura 4.4: Comparação entre a rugosidade média 3D (S_a) dos substratos: bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e insertos com cobertura: texturizado a laser e convencional (pré-cobertura).....	75
Figura 4.5: Comparação entre a rugosidade 3D Assimetria ou “Skewness” (S_{sk}) dos substratos: bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e insertos com cobertura: texturizados a laser e convencional (pré-cobertura).....	76
Figura 4.6: Comparação entre a rugosidade 3D Curtose ou “Kurtosis” (S_{ku}) dos substratos: bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e insertos com cobertura: texturizado a laser e convencional (pré-cobertura).....	78
Figura 4.7: Comparação dos valores de rugosidades 3D entre: (a) substrato bruto; (b) substrato texturizado a laser sem cobertura e (c) inserto texturizado convencional pré-revestimento, com cobertura e (d) inserto texturizado a laser pré-revestimento, com cobertura.....	79
Figura 4.8: Aspectos gerais das superfícies de saída dos substratos de desbaste (classe ISO M25): (a), (c) e (e) bruto e (b), (d) e (f) texturizado a laser, pré-recobrimento, com estrutura de pó sinterizado exposta.....	82
Figura 4.9: Aspectos gerais das superfícies de folga dos substratos de desbaste (classe ISO M25): (a), (c) e (e) bruto e (b), (d) e (f) texturizado a laser, pré-recobrimento, com micro-poros de sopro e estrutura de pó sinterizado exposta.....	83
Figura 4.10: (a) e (b) Análise de EDS nas superfícies de saída dos substratos bruto e texturizado a laser, pré-cobertura, da ferramenta de desbaste (classe ISO M25).....	85
Figura 4.11: Porcentagem de cobalto nas superfícies bruta e texturizada a laser dos substratos pré-cobertura na ferramenta de desbaste (classe ISO M25).....	87
Figura 4.12: Aspectos gerais das superfícies de saída dos insertos de desbaste (classe ISO M25), recobertos de TiAlN por processo PVD, (a) e (c): texturizado por jateamento de micro-partículas (convencional), pré-recobrimento; (b) e (d): texturizado a laser, pré-recobrimento	88
Figura 4.13: Aspectos gerais das superfícies de folga dos insertos de desbaste (classe ISO M25), recobertos de TiAlN por processo PVD, (a) e (c): texturizado por jateamento de micro-partículas (convencional), pré-recobrimento; (b) e (d): texturizado a laser, pré-recobrimento	89
Figura 4.14: Fluxograma dos ensaios de torneamento dos insertos de desbaste (classe ISO M25).....	91

Figura 4.15:Média dos valores do resultado de <i>vida de ferramenta em volume de material removido</i> obtidos no ensaio das ferramentas de Desbaste (classe ISO M25). O critério de fim de vida foi o da altura máxima do desgaste de flanco $V_{Bmax} = 0,3mm$	92
Figura 4.16: Gráfico de Pareto dos Efeitos sobre a variável de resposta <i>vida da ferramenta em volume de material removido</i> ($\alpha = 0,05$)......	94
Figura 4.17: Principais Efeitos sobre a <i>vida de ferramenta em volume de material removido</i>	95
Figura 4.18: Interações sobre a <i>vida de ferramenta em volume de material removido</i>	96
Figura 4.19:Média dos valores dos picos da <i>potência de corte</i> obtidos com ferramentas em início e final de vida nos diversos ensaios de desbaste (classe ISO M25). O critério de fim de vida foi o da altura máxima do desgaste de flanco $V_{Bmax} = 0,3mm$	98
Figura 4.20: Gráfico de Pareto dos efeitos sobre a <i>potência de corte</i> de ferramentas em início e final de vida ($\alpha = 0,05$)......	100
Figura 4.21: Principais efeitos sobre a <i>potência de corte</i> de ferramenta em final de vida.....	100
Figura 4.22:(a) Micrografia do desgaste da ferramenta; (b) Análise de EDS do ensaio de torneamento em desbaste na superfície de folga do inserto texturizado com jateamento de micro-partículas (convencional) no pré-revestimento e $v_c = 150$ m/min.....	102
Figura 4.23:(a) Micrografia do desgaste da ferramenta; (b) Análise de EDS do ensaio de torneamento em desbaste na superfície de folga do inserto texturizado a laser no pré-revestimento e $v_c = 150$ m/min.....	103
Figura 4.24: (a) Micrografia do desgaste da ferramenta; (b) Análise de EDS do ensaio de torneamento em desbaste na superfície de folga do inserto texturizado com jateamento de micro-partículas (convencional)no pré-revestimento e $v_c = 180$ m/min.....	104/105
Figura 4.25: (a) Micrografia do desgaste da ferramenta; (b) Análise de EDS do ensaio de torneamento em desbaste na superfície de folga do inserto texturizado a laser no pré-revestimento e $v_c = 180$ m/min.....	106
Figura 4.26:Indentações Rockwell C de ferramentas revestidas de acabamento (classe ISO M15), lados A e B: (a) Texturizadas pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convecional) e (b) Texturizadas pré-recobrimento a laser. As micrografias foram feitas em MEV.....	109
Figura 4.27:(a) e (b) Micrografia de indentação Rockwell C em exemplo de ferramenta de acabamento (classe ISO M15), com texturização pré-recobrimento por jateamento de micro-	

partículas (convencional) e (c) Micrografia obtida pelo feixe de elétrons retroespalhados (BSE) do MEV.....111

Figura 4.28: (a) Comprimento e (b) número de trincas de indentações Rockwell C para as ferramentas de acabamento (classe ISO M15) com texturização pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convencional) e com texturização a laser, obtida pelo feixe de elétrons retroespalhados (BSE) do MEV.....112

Figura 4.29: Comparação entre a rugosidade média 3D (S_a) dos substratos: bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e insertos com cobertura: texturizado a laser e convencional (pré-cobertura).....114

Figura 4.30: Comparação entre a rugosidade 3D Assimetria ou “skewness” (S_{sk}) dos substratos: bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e insertos com cobertura: texturizado a laser e convencional (pré-cobertura).....114

Figura 4.31: Comparação entre a rugosidade 3D “kurtosis” (S_{ku}) dos substratos: bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e insertos com cobertura: texturizado a laser e convencional (pré-cobertura).....116

Figura 4.32: Comparação dos valores de rugosidades 3D entre: (a) substrato bruto; (b) substrato texturizados a laser sem cobertura e (c) inserto texturizados convencional pré-revestimento, com cobertura e (d) inserto texturizado a laser pré-revestimento, com cobertura.....117

Figura 4.33: Aspectos gerais das superfícies de saída dos substratos de acabamento (classe ISO M15): (a), (c) e (e) bruto e (b), (d) e (f) texturizado a laser, pré-recobrimento, com micro-poros de sopro e micro-trincas119

Figura 4.34: Aspectos gerais das superfícies de folga dos substratos de acabamento (classe ISO M15): (a), (c) e (e) bruto e (b), (d) e (f) texturizado a laser, pré-recobrimento, com micro-poros de sopro e micro-trincas.....120

Figura 4.35: Análise de EDS nas superfícies de saída dos substratos: (a) bruto e (b) texturizado a laser, pré-cobertura, da ferramenta de acabamento (classe ISO M15).....122

Figura 4.36: Porcentagem de cobalto nas superfícies bruta e texturizada a laser dos substratos pré-cobertura na ferramenta de acabamento (classe ISO M15).....123

Figura 4.37: Aspectos gerais das superfícies de saída dos insertos de acabamento (classe ISO M15), recobertos de TiAlN por processo PVD: (a) e (c) texturizado por jateamento de micro-partículas (convencional) pré-recobrimento e (b) e (d) texturizado a laser, pré-recobrimento.....125

Figura 4.38: Aspectos gerais das superfícies de folga dos insertos de acabamento (classe ISO M15), recobertos de TiAlN por processo PVD: (a) e (c) texturizado por jateamento de micro-

partículas (convencional) pré-recobrimento e (b) e (d) texturizado a laser, pré-recobrimento.....	126
Figura 4.39: Fluxograma dos ensaios de torneamento dos insertos de acabamento (classe ISO M15).....	128
Figura 4.40:Média dos valores do resultado de <i>vida de ferramenta em volume de material removido</i> obtidos nos ensaios das ferramentas de Acabamento (classe ISO M15). O critério de fim de vida foi o da altura máxima do desgaste de flanco $V_{Bmax} = 0,3mm$	129
Figura 4.41: Gráfico de Pareto dos Efeitos sobre a variável de resposta <i>vida da ferramenta em volume de material removido</i> ($\alpha = 0,05$).....	131
Figura 4.42: Principais efeitos sobre a <i>vida de ferramenta em volume de material removido</i>	132
Figura 4.43: Interações sobre o <i>volume de material removido</i>	133
Figura 4.44: Média dos valores dos picos da potência de corte obtidos nos ensaios com ferramentas em início e final de vida nos diversos ensaios de acabamento (classe ISO M15). O critério de fim de vida foi o da altura máxima do desgaste de flanco $V_{Bmax} = 0,3mm$	135
Figura 4.45: Gráficos de Pareto dos Efeitos sobre a variável de resposta <i>potência de corte</i> de ferramentas em início e final de vida ($\alpha = 0,05$).....	137
Figura 4.46: Principais efeitos sobre a <i>potência de corte</i> de ferramenta em início e final de vida.....	137
Figura 4.47: Valores do resultado: rugosidade média (R_a) nos ensaios realizados com insertos de acabamento (classe ISO M15).....	140
Figura 4.48: Gráfico de Pareto dos Efeitos sobre a variável de resposta <i>rugosidade 2D dos corpos de prova</i> ($\alpha = 0,05$).....	142
Figura 4.49:(a) Micrografia do desgaste da ferramenta e (b) Análise de EDS do ensaio de torneamento em acabamento na superfície de folga do inserto texturizado com jateamento de micro-partículas (convencional) no pré-revestimento e $v_c = 220$ m/min.....	143
Figura 4.50:(a) Micrografia do desgaste da ferramenta; (b) Análise de EDS do ensaio de torneamento em acabamento na superfície de folga do inserto texturizado a laser no pré-revestimento e $v_c = 220$ m/min.....	144
Figura 4.51:(a) Micrografia do desgaste da ferramenta; (b) Análise de EDS do ensaio de torneamento em acabamento na superfície de folga do inserto texturizado com jateamento de micro-partículas (convencional) no pré-revestimento e $v_c = 265$ m/min.....	145/146

Figura 4.52: Micrografia do desgaste da ferramenta; (b) Análise de EDS do ensaio de torneamento em acabamento na superfície de folga do inserto texturizado a laser no pré-revestimento e $v_c = 265$ m/min.....147

Figura A.1: (a), (b), (c) e (d)Valores da Distribuição F para $\alpha = 0,05$ (ANDERSEN et al., 2011).....170, 171, 172 e 173

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Condições de usinagem de Desbaste recomendadas pelo fabricante da ferramenta código: VBMT 160408 MM (SANDVIK Coromant).....	68
Tabela 3.2: Condições de usinagem de Desbaste recomendadas pelo fabricante da ferramenta código: VBMT 160408 MM (SANDVIK Coromant).....	68
Tabela 3.3: Velocidade de corte de Acabamento recomendada pelo fabricante da ferramenta para usinagem de aço inoxidável austenítico (SANDVIK Coromant).....	69
Tabela 4.1 -Valores dos comprimento e quantidade das trincas do teste de aderência dos insertos convencional e texturizados a laser usados nos testes de usinagem de desbaste (classe ISO M25).....	74
Tabela 4.2 -Valores de porcentagem de cobalto nas superfícies bruta e texturizada a laser dos substratos pré-cobertura, das ferramentas de desbaste (classe ISO M25).....	86
Tabela 4.3 – Combinações de (2 ^k) testes feitos com insertos de desbaste (classe ISO M25).....	90
Tabela 4.4 – Médias e desvios padrão do resultado <i>vida da ferramenta em volume de material removido</i> dos (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, com insertos de desbaste (classe ISO M25).....	92
Tabela 4.5 -da análise de variância ANOVA para o resultado <i>vida de ferramenta em volume de material removido</i> por insertos de desbaste (classe ISO M25).....	93
Tabela 4.6 – Valores do resultado <i>potência de corte de ferramenta</i> nos ensaios de torneamento com insertos de desbaste (classe ISO M25).....	97
Tabela 4.7-Valores da análise de variância ANOVA para o resultado: <i>potência de corte</i> por insertos de desbaste (classe ISO M25) em início e final de vida.....	99
Tabela 4.8 -Valores dos comprimento e quantidade das trincas do teste de aderência dos insertos convencional e texturizados a laser usados nos testes de usinagem de acabamento (classe ISO M15).....	112

Tabela 4.9 -Valores de porcentagem de cobalto nas superfícies bruta e texturizada a laser dos substratos pré-cobertura das ferramentas de acabamento (classe ISO M15).....	123
Tabela 4.10 – Combinações de (2^k) testes feitos com insertos de acabamento (classe ISO M15).....	127
Tabela 4.11 – Médias e desvios padrão do resultado <i>vida da ferramenta em volume de material removido</i> dos (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, com insertos de acabamento (classe ISO M15).....	129
Tabela 4.12 -Valores da análise de variância ANOVA para o resultado <i>vida de ferramenta em volume de material removido</i> por insertos de acabamento (classe ISO M15).....	130
Tabela 4.13 – Valores do resultado: potência de corte nos ensaios realizados com insertos de acabamento (classe ISO M15).....	134
Tabela 4.14 -Valores da análise de variância ANOVA para o resultado: <i>potência de corte</i> por insertos de acabamento (classe ISO M15) em início e final de vida.....	136
Tabela 4.15 – Valores do resultado: rugosidade média (Ra) nos ensaios realizados com insertos de acabamento (classe ISO M15).....	139
Tabela 4.16 -Valores da análise de variância ANOVA para o resultado: <i>rugosidade 2D dos corpos de prova</i> usinados por insertos de acabamento (classe ISO M15).....	141
Tabela A.1 – Valores do resultado <i>vida de ferramenta em volume de material removido</i> para os (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, com insertos de Desbaste (ISO M25).....	165
Tabela B.1 – Valores do resultado <i>potência de corte</i> dos (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, com insertos de Desbaste (ISO M25).....	166
Tabela C.1 – Valores do resultado <i>vida de ferramenta em volume de material removido</i> para os (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, com insertos de Acabamento (ISO M15).....	167
Tabela D.1 – Valores do resultado <i>potência de corte</i> dos (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, com insertos de Acabamento (ISO M15).....	168
Tabela E.1 – Valores do resultado <i>rugosidade 2D dos corpos de prova</i> dos (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, com insertos de Acabamento (ISO M15).....	169

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>	
a_p	Profundidade axial de corte	[mm]
APC	Aresta postiça de corte	
BSE	Elétrons retro-espalhados	
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental	
CLA	<i>Centre Line Average</i>	
CN	Comando numérico	
CNC	Comando numérico computadorizado	
CuHBr	Laser de vapor de cobre.	
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i> (Deposição Química de Vapor)	
E	Módulo de elasticidade	[GPa]
EDS	<i>Energy Dispersive x-ray Spectrometer</i>	
EPI	Equipamento de Proteção Individual	
eV	Unidade de potência monitorada em torno, com fator de conversão para kW de (1,47)	
f	Avanço	[mm/volta]
F tabelado	Estatística de teste de igualdade de k médias populacionais	
fl	Fluência do laser	[J/cm ²]
F_o	F calculado (MSTR - Quadrado médio dos tratamentos dividido por MSE - Quadrado médio dos erros)	
GPa	10 ⁹ Pascal	
HB	Dureza Brinell	
HF1 a HF6	Referencia de adesão avaliada por indentação Rockwel C.	
HR _c	Dureza Rockwell C	
HV	Micro-dureza Vickers	
Hz	Unidade de frequência (Hertz)	
I_0	Intensidade temporal média do laser	

ISO	<i>International Organization for Standardization.</i>	
J/cm ²	Unidade de medida que caracteriza a fluência de um laser pulsado no processamento materiais	
k	Número aleatório de fatores no planejamento fatorial	
K01 a K40	Classe de metal duro para ferros fundidos	
kHz	Unidade de frequência equivalente a 10 ³ Hz	
kJ/mol	Unidade de energia livre de Gibbs	
kW	Unidade de potência equivalente a 10 ³ Watt	
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation	
M pixels	Mega-pixels	
M10 a M40	Classe de metal duro para aços inoxidáveis	
MD	Metal duro	
MEV	Microscópio eletrônico de varredura	
mJ	Unidade de energia de um pulso do laser equivalente a 10 ⁻³ J	
mm/rev	Unidade de avanço	
MW/cm ²	Unidade de irradiância	
n	Rotação do eixo árvore	[rpm]
Nd-YAG	<i>Neodymium doped yttrium aluminium garnet</i> (Cristal de neodímio dopado com alumínio granada de ítrio). Cristal utilizado como meio de se obter laser de estado sólido.	
nm	Unidade de comprimento equivalente a 10 ⁻⁹ m	
ns	Unidade de tempo equivalente a 10 ⁻⁹ s	
P01 a P50	Classe de metal duro para aços	
Pa	Pascal	
ps	Unidade de tempo equivalente a 10 ⁻¹² s	
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i> (Deposição física de vapor)	
Q-switched	Técnica de chaveamento pela qual se pode produzir um feixe de laser pulsado a partir de um laser contínuo.	
R _a	Rugosidade média 2D (Bidimensional)	[μm]
R _q	Rugosidade 2D	[μm]
R _z	Rugosidade de profundidade média 2D	[μm]
S _a	Rugosidade média 3D (Tridimensional)	[μm]

S_{ku}	<i>Kurtosis</i> (Rugosidade 3D Curtose)	[μm]
S_{sk}	<i>Skewness</i> (Rugosidade 3D Assimetria)	[μm]
V316L	Aço cromo-molibidênio inoxidável austenítico	
Valor-p	<i>p-value</i> (Probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema que aquela observada em um amostra, sob a hipótese nula)	
V_B	Desgaste de flanco medido na superfície de folga da ferramenta de corte	[mm]
$V_{B\text{máx}}$	Desgaste de flanco máximo	[mm]
v_c	Velocidade de corte	[m/min]
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i> (Associação Alemã de Engenheiros)	
W	Unidade de potência (Watt)	
WC-Co	Metal duro sinterizado composto de carbetto de tungstênio e cobalto	

Letras Gregas

γ_0	Ângulo de saída	[°]
λ	Comprimento de onda	[nm]
λ_s	Ângulo de inclinação	[°]
μm	Unidade de comprimento equivalente a 10^{-6} m	
τ_p	Medida temporal de duração de um pulso laser	[ns]
χ_r	Ângulo de posição da ferramenta	[°]

Lista de Elementos Químicos e Compostos

Al	Alumínio
(Al,Cr) ₂ O ₃	Óxido de alumínio cromado
Al ₂ O ₃	Alumina
AlCrN	Nitreto de alumínio cromado
B ₄ C ₄	Carbetto de Boro
C	Carbono

Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Fe	Ferro
HfC	Carbeto de Háfênio
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
Nb	Nióbio
NbC	Carbeto de nióbio
Nd	Neodímio
Ni	Níquel
O	Oxigênio
P	Fósforo
S	Enxofre
Si	Silício
SiC	Carbeto de silício
Ta	Tântalo
TaC	Carbeto de tântalo
Ti	Titânio
TiAlN	Nitreto de titânio alumínio
TiC	Carbeto de titânio
TiC _{1-x} N _x	Carbonitreto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
W	Tungstênio
WC	Carbeto de tungstênio
Xe	Xenônio
Y	Ítrio
Y ₂ Al ₅ O ₁₂	Alumínio granada de ítrio

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE TABELAS.....	xxi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xxiii
1 INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Objetivos deste trabalho.....	07
2 REVISÃO TEÓRICA.....	09
2.1 Processo de torneamento de face.....	09
2.2 Aço Inoxidável austenítico V316L.....	09
2.3 Substratos classe ISO M25 e M15 com Revestimento multi-camadas TiAlN/(Al,Cr) ₂ O ₃ /TiAlN no processo PVD.....	11
2.4 Texturização de Superfícies por jateamento e a laser.....	20
2.5 Rugosidades tridimensional (3D) e bidimensional (2D).....	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1 Materiais.....	42
3.1.1 Máquina ferramenta.....	42
3.1.2 Fluido de corte.....	43
3.1.3 Rugosímetro tridimensional (3D).....	43
3.1.4 Rugosímetro bidimensional (2D).....	44
3.1.5 Microscópio óptico.....	44
3.1.6 Microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	45
3.1.7 Durômetro Rockwell C.....	45
3.1.8 Suporte porta-ferramentas.....	45
3.1.9 Ferramenta: Inserto de metal duro para Desbaste.....	47
3.1.10 Ferramenta: Inserto de metal duro de Acabamento.....	50
3.1.11 Corpos de Prova.....	53
3.2 Métodos.....	55
3.2.1 Texturização a laser do substrato de Desbaste (ISO M25) e de Acabamento (ISOM15).....	55
3.2.2 Caracterização superficial.....	63
3.2.2.1 Rugosidade tridimensional.....	63
3.2.2.2 Rugosidade bidimensional.....	63
3.2.3 Caracterização visual.....	63
3.2.4 Caracterização estrutural.....	64
3.2.4.1 Caracterização da aderência do revestimento no substrato.....	64
3.2.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS.....	66
3.2.5 Ensaios de torneamento da face (Ensaio de vida de ferramenta).....	67
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
4.1 Ensaios em condições de desbaste (ferramentas classe ISO M25).....	71
4.1.1 Análise da aderência do revestimento no substrato das ferramentas.....	71
4.1.2 Medições de rugosidade 3D das superfícies das ferramentas.....	75
4.1.3 Análise entre texturizações do substrato de desbaste (classe ISO M25).....	81

4.1.4	Análise da porcentagem de cobalto.....	84
4.1.5	Análise dos revestimentos dos insertos classe ISO M25.....	87
4.1.6	Planejamento fatorial dos ensaios de vida da ferramenta de desbaste.....	90
4.1.7	Análise da vida das ferramentas de corte.....	91
4.1.8	Análise das medições da potência de corte.....	96
4.1.9	Mecanismos de desgaste das ferramentas de torneamento em condições de desbaste.....	101
4.1.10	Discussão sobre a interação dos resultados dos ensaios de vida de ferramenta e dos ensaios de caracterização das superfícies para a ferramenta de desbaste.....	107
4.2	Ensaio em condições de acabamento (ferramentas classe ISO M15).....	108
4.2.1	Análise da aderência do revestimento no substrato das ferramentas.....	108
4.2.2	Medições de rugosidade 3D das superfícies das ferramentas.....	113
4.2.3	Análise entre texturizações do substrato de acabamento (classe ISO M15).....	118
4.2.4	Análise da porcentagem de Cobalto.....	121
4.2.5	Análise entre revestimentos dos insertos classe ISO M15.....	124
4.2.6	Planejamento fatorial dos ensaios de vida da ferramenta de acabamento.....	127
4.2.7	Análise da vida das ferramentas de corte.....	127
4.2.8	Análise das medições da potência de corte.....	133
4.2.9	Análise das medições da rugosidade 2D dos corpos de prova.....	138
4.2.10	Mecanismos de desgaste das ferramentas de torneamento em condições de acabamento.....	142
4.2.11	Discussão sobre a interação dos ensaios de vida de ferramenta e dos ensaios de caracterização das superfícies para a ferramenta de acabamento.....	148
5	CONCLUSÕES.....	150
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	152
	REFERÊNCIAS.....	153
	REFERÊNCIAS CONSULTADAS.....	159
	APÊNDICES.....	165
	ANEXOS.....	170

1 INTRODUÇÃO

Os materiais estão provavelmente mais entranhados na nossa cultura, do que a maioria de nós percebe. Nos transportes, habitação, vestuário, comunicação, recreação e produção de alimentos. Historicamente, o desenvolvimento e o avanço das sociedades têm estado intimamente ligados às habilidades dos seus membros, em produzir e manipular os materiais para satisfazer as suas necessidades.

Os primeiros seres humanos tiveram acesso a apenas aqueles materiais presentes na natureza: pedra, madeira, argila, peles e assim por diante. Com o tempo, esses primeiros seres humanos descobriram técnicas para a produção de novos materiais com propriedades superiores às das dos materiais naturais, como as cerâmicas e vários metais. O conhecimento das relações entre os elementos estruturais dos materiais e suas propriedades, adquirido ao longo dos últimos 60 anos aproximadamente, criou condições para moldar em grande parte, as características dos materiais. Assim, dezenas de milhares de materiais diferentes foram desenvolvidos, como metais, plásticos, vidros e fibras.

O desenvolvimento de muitas tecnologias, que tornam nossa existência tão confortável, está intimamente associado ao acesso a materiais adequados. Por exemplo, o automóvel não teria sido possível ser fabricado e vendido, se não fosse pela disponibilidade a baixo custo de aço ou de algum outro material substituto comparável, e de seus atuais processos de fabricação (CALLISTER, 2006).

As peças metálicas fabricadas pelos processos metalúrgicos convencionais, como por exemplo fundição e forjamento, geralmente apresentam superfícies mais ou menos grosseiras e que, portanto, exigem um determinado acabamento.

Por outro lado, os processos citados nem sempre permitem obter certas peculiaridades, como determinados tipos de saliências ou reentrâncias e furos rosqueados.

Finalmente, para alguns tipos de peças, os processos de fabricação convencionais não apresentam as melhores condições de custo e produtividade.

O processo de usinagem possibilita atingir esses e outros objetivos (CHIAVERINI, 1986).

No estudo das operações dos metais, distinguem-se duas grandes classes de trabalho: as operações de usinagem e as operações de conformação.

Como operações de usinagem entende-se aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco. Pela definição, cavaco é a porção de material da peça, retirada pela ferramenta de corte, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular (FERRARESI, 1977).

Os materiais a princípio utilizados na fabricação de máquinas a vapor eram de ferro fundido, latão e bronze, facilmente usinados com as ferramentas de aço-carbono temperado disponíveis na época.

Em 1797, foi desenvolvido o primeiro torno com avanço automático, permitindo a produção de roscas com passo definido. Após a mandriladora e o torno, surgiu a plainadora e em 1860, a retificadora. A primeira fresadora universal surgiu em 1862 e foi utilizada inicialmente para a produção de canais em brocas helicoidais. E em 1896, foi desenvolvida uma máquina capaz de produzir praticamente qualquer tipo de engrenagem.

Já no século XX surgiram produtos feitos de materiais mais duráveis e consequentemente, mais difíceis de serem usinados. O advento das ferramentas de aço rápido, e mais tarde de carbeto de tungstênio, permitiu a usinagem de aços e de outros materiais metálicos com produtividade crescente. Isto, também, favorecido pelos avanços tecnológicos no campo das máquina-ferramentas, como o desenvolvimento de máquinas automáticas e, mais tarde, de máquinas comandadas numericamente (CN). A partir de 1940, os processos não convencionais de usinagem passaram a ganhar importância, pela capacidade de produzir peças de geometria complexa em materiais de difícil usinabilidade, garantindo assim, acabamento de elevada qualidade e tolerâncias estreitas.

A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos, algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas.

Apesar dessa popularidade, trata-se de um processo bastante imprevisível, devido às dificuldades em determinar as condições ideais de corte. Estas condições ideais são aquelas capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento, ao menor custo possível. Por outro lado, trata-se também de um processo simples, porque uma vez determinadas essas condições, o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de intervenção do operador.

A usinagem é um processo essencialmente prático e que envolve um elevado número de variáveis. Shaw (1984) afirma que é praticamente impossível prever o desempenho no corte dos metais.

De acordo com Black (1995), a imprevisibilidade da usinagem se deve ao fato de esse ser o único processo de deformação plástica cuja restrição é oferecida pela ferramenta de corte. Além disso, a usinagem envolve altas deformações combinadas com altas taxas de deformação. Existe uma variedade de opções para os parâmetros de entrada do processo, que resultam em infinitas combinações. Há apenas três maneiras de lidar com tal complexidade: por meio de experiência adquirida por sucessivas tentativas e erros, ao longo de anos e comparações com situações análogas; por meio de experimentação, que é onerosa, demorada e restrita àquela situação encontrada e não podendo ser generalizada; e por intermédio de modelos teóricos, de simples a sofisticados. Em geral, nenhuma dessas abordagens é capaz de, sozinha, encontrar soluções satisfatórias, sendo recomendada a combinação de duas ou mesmo três destas três abordagens (MACHADO, 2009).

Os materiais são classificados em quatro níveis:

- 1) Materiais naturais;
- 2) Materiais desenvolvidos por meio de sistemática experimental empírica;
- 3) Materiais desenvolvidos com auxílio de conhecimentos científicos;
- 4) Materiais projetados (novos ou aperfeiçoados).

O descobrimento dos aços inoxidáveis é enquadrado no nível (3).

A extração e a transformação do ferro e do aço, nos seus cerca de 5.000 anos de história, sofreram um enorme e contínuo desenvolvimento. Apesar do esforço dos metalurgistas, desde o início do século XIX até o início do século XX, os objetos de ferro e aço, não eram suficientemente resistentes à corrosão.

Porém, na Inglaterra, em 1912, dois trabalhos foram publicados descrevendo experiências em ligas resistentes a corrosão, contendo 12,8% de cromo e 0,24% de carbono, configurando o que hoje se chama aços inoxidáveis martensíticos.

Nos Estados Unidos, em 1911, foram iniciadas experiências com ligas contendo de 14 a 16% de cromo e de 0,007 a 0,015% de carbono (baixo teor), descobrindo-se assim os chamados aços inoxidáveis ferríticos.

Na Alemanha, em 1912, foi desenvolvida a liga contendo 20% de cromo, 7% de Níquel e 0,25% de carbono, e surgiram os aços inodáveis austeníticos.

A indústria química e as aplicações em altas temperaturas tinham então, à disposição, uma nova classe de materiais mais adequada para suas instalações em meios agressivos. E entre 1950 e 1980, dois terços da produção de aços inoxidáveis já era de austeníticos.

A ampla utilização destes aços inoxidáveis deve-se a uma combinação favorável de propriedades, tais como resistência à corrosão e oxidação, resistência mecânica a quente, trabalhabilidade e soldabilidade.

Não é somente a matriz austenítica que determina as propriedades desses materiais. Numerosas fases podem estar presentes na microestrutura destes aços inoxidáveis. A quantidade, o tamanho, a distribuição e a forma destas fases têm influência marcantes nas propriedades do material (PADILHA, 2004).

Os elementos de liga dos aços inoxidáveis, que têm a finalidade de elevar a sua resistência à corrosão, são o cromo, o níquel, o cobre, o alumínio, o silício e o molibidênio (DINIZ, 2010).

Uma teoria sobre a resistência a corrosão destes aços é a de que a superfície metálica é envolvida por uma fina camada protetora, de óxido de cromo, aderente e impermeável, que impede o acesso de agentes agressivos.

Quanto à composição química, os aços inoxidáveis caracterizam-se por um teor mínimo de cerca de 12% de cromo; pode atingir 8% de níquel, nos aços inoxidáveis austeníticos; na ordem de 2 a 4% de molibidênio; e conter ainda enxofre; titânio, nióbio e tântalo. O níquel favorece a formação da austenita em temperatura ambiente e depois do cromo, é o segundo mais importante e característico elemento destes aços, pois faz aumentar consideravelmente a resistência ao calor. O molibidênio, além da resistência à corrosão, também melhora a resistência a quente destes aços. O enxofre, quando adicionado intencionalmente, tem a função de melhorar a usinabilidade. O titânio, o nióbio e o tântalo possuem grande afinidade pelo carbono e são adicionados aos aços inoxidáveis como estabilizadores de estrutura, formando carbeto muito estáveis.

O aço inoxidável austenítico é muito utilizado em equipamentos para indústria química e petroquímica, alimentícia (cutelaria), farmacêutica, na construção civil e para utensílios domésticos, como em baixelas (VILLARES, 1982).

O Brasil vem fabricando e empregando ferramentas de corte fabricadas por metalurgia do pó, há muitos anos e as perspectivas futuras, como nos países mais

industrializados, são de uso crescente da técnica para atender às demandas da indústria nacional, em função mesmo, do contínuo e rápido desenvolvimento tecnológico, que caracteriza essa técnica.

É de admitir-se, pois, um crescimento contínuo da aplicação da metalurgia do pó, principalmente no desenvolvimento de novos materiais, ferramentas de formas sofisticadas e com estrutura e características físicas e mecânicas fora do comum, visto que seu campo de aplicação é praticamente ilimitado (CHIAVERINI, 1982).

Uma das notícias importantes a respeito da técnica da metalurgia do pó tem-se no início do século XIX, quando em 1829, desenvolveu-se um processo de produção de platina compacta, a partir de pó esponjoso de platina, obtido por transformação de um cloreto de amônio e platina.

Os mais importantes passos, entretanto, no desenvolvimento industrial da técnica, foram dados no início do século XX, quando se estudou a possibilidade de fabricação, por sinterização, de molibdênio e tungstênio, ditos metais refratários, cujos pontos de fusão extremamente elevados, impossibilitavam sua obtenção pelos métodos metalúrgicos convencionais. Em 1909, foi desenvolvido um processo de fabricação de fios de tungstênio dúcteis, para emprego em lâmpadas incandescentes, a partir do pó de tungstênio.

Os passos seguintes foram rápidos, como: produção de ligas duras sinterizadas, a partir de partículas de carbeto de tungstênio, aglomeradas com um metal do grupo de ferro, o cobalto, e produção de misturas para materiais de contato elétrico, para mancais de lubrificação permanente e para escovas coletoras de corrente.

Deve-se admitir que o rápido crescimento que a técnica vem experimentando nos últimos anos é atribuído ao fato de que o processo de metalurgia do pó é econômico, rápido e permite produção em grande escala de ferramentas exatamente iguais ou muito próximas das dimensões e forma definitiva, dentro de tolerâncias muito estreitas, sem praticamente necessidade de qualquer operação final de usinagem ou acabamento.

Entre os produtos que praticamente são exclusivos da metalurgia do pó inclui-se o metal duro ou carbeto de metais com W, o Ta e o Ti, aglomerados com cobalto.

Outras vantagens do processo residem nos seguintes pontos, no controle rigoroso da composição do material e eliminação ou redução a um mínimo das impurezas introduzidas pelos processos metalúrgicos convencionais; na operação em atmosferas rigorosamente controladas ou em vácuo; na redução ou eliminação das perdas de

material ou produção de sucata e na maior economia de fabricação (CHIAVERINI, 1986).

O metal duro é um material da metalurgia do pó, composto de partículas duras, finamente divididas de carbetos de metais refratários, sinterizados com metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto) formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão. As partículas duras são: carbetos de tungstênio (WC), usualmente em combinação com outros carbetos, como: carbetos de titânio, tântalo e nióbio.

Nos metais duros mais usuais o tamanho destas partículas varia entre 1 a 10mm e ocupam de 60 a 95% do volume do material.

A quantidade e composição do ligante rico em cobalto metálico (Co) controla a tenacidade e a resistência da classe do metal duro quanto à deformação plástica. Um teor de ligante muito baixo pode resultar em um material quebradiço.

As propriedades que se exigem de qualquer material utilizado em ferramenta de usinagem são: dureza em altas temperaturas (ou resistência ao desgaste), tenacidade (ou capacidade de resistência ao choque ou ruptura transversal), dureza em temperatura ambiente e estabilidade química.

A dureza do metal duro varia em função da temperatura, do teor de cobalto e do teor de TiC+TaC - da densidade. (DINIZ, 2010).

Atualmente, de 80 a 90% de todas as ferramentas de metal duro vendidas são de metal duro revestido por uma fina camada de material extremamente dura. Isto devido à combinação da resistência ao desgaste e tenacidade, além de sua habilidade para conformidade com formatos complexos.

As ferramentas de metal duro revestidas têm maior resistência ao desgaste, geram menores esforços de corte e tem vida mais longa que aquelas sem cobertura.

Atualmente dentre os processos de aplicação de revestimentos para ferramentas encontram-se a Deposição química de vapor, conhecido como CVD (*Chemical Vapour Deposition*), que pode ser definida como a deposição de um sólido sobre uma superfície aquecida via reação química, com transporte de vapor de natureza atomística (PIERSON, 1992) e a Deposição física de vapor, conhecido como PVD (*Physical Vapour Deposition*), cuja deposição é feita por meio de vapores gerados no interior de fornos a baixa pressão (TRENT e WRIGHT, 2000).

Muitas coberturas de ferramentas tem sido desenvolvidas recentemente com resultados muito interessantes para o aumento de produtividade das ferramentas de metal duro recobertas. Porém, um incremento ainda maior na eficiência destas

ferramentas poderia ser possível, se a adesão entre camada de cobertura e substrato de metal duro fosse melhor entendida e, assim, fosse possível se ter uma maior coesão entre cobertura e substrato. Este trabalho tem o objetivo de contribuir nesta área.

1.1 Objetivos deste trabalho

Os objetivos específicos para as duas partes deste trabalho são os descritos a seguir:

- Analisar e comparar por meio de ensaios de vida no torneamento de face de aço inoxidável austenítico, utilizando planejamento fatorial, o desempenho de ferramentas com substratos texturizados por jateamento e revestidos com ferramentas com substratos texturizados a laser e revestidos. O revestimento utilizado nos dois substratos foi o multicamadas: $\text{TiAlN}/(\text{Al,Cr})_2\text{O}_3/\text{TiAlN}$ e o processo de Deposição Física a Vapor, o PVD.
- Avaliar e comparar por meio de microscopia eletrônica de varredura e EDS, o desgaste das ferramentas ensaiadas.
- Analisar e comparar por meio de registro dos valores da potência de corte durante a usinagem no torno.
- Avaliar a topografia das ferramentas, antes e depois da texturização por jateamento e a laser, e depois do revestimento, através de microscopia eletrônica de varredura e rugosidade 3D.
- Investigar a influência das texturizações por jateamento e a laser, na adesividade do revestimento feito pelo processo PVD, por meio de microscopia eletrônica de varredura e feixe de elétrons retroespalhados.
- Avaliar a topografia da face usinada dos corpos de prova usinados com ferramentas de substrato de acabamento, através de rugosidade 2D.
- Avaliar e comparar por meio de microscopia eletrônica de varredura e EDS, a porcentagem de cobalto na superfície de saída das ferramentas antes e depois das texturizações convencional e a laser.

Buscou-se atingir estes objetivos tanto em condições de torneamento em desbaste, utilizando para isto ferramenta da classe ISO M25, quanto em condições de usinagem em acabamento, utilizando-se ferramenta da classe ISO M15.

A escolha do material de usinagem, aço inoxidável austenítico V316L, foi feita para se utilizar um material que fosse difícil de usinar, a fim de acelerar o processo de desgaste da ferramenta.

O processo de torneamento de face foi escolhido com base no catálogo de especificações do fabricante do suporte porta-ferramenta.

As especificações de todo o processo de texturização a laser deste trabalho são as mesmas que apresentaram maior vida de ferramenta; na tese de doutorado do Dr. David Neves, defendida em 20/12/2010, cujo título é: “Influência da texturização laser na vida de ferramentas de torneamento revestidas por CVD e PVD”.

2 REVISÃO TEÓRICA

A revisão teórica descrita a seguir está concentrada nos seguintes itens:

2.1 Processo de torneamento de face

2.2 Aço inoxidável austenítico V316L

2.3 Substratos classe ISO M25 e M15 com Revestimento multi-camadas

TiAlN/(Al,Cr)₂O₃/TiAlN no processo PVD

2.4 Texturização de Superfícies por jateamento e a laser

2.5 Rugosidades tridimensional e bidimensional

2.1 Processo de torneamento de face

O torneamento é usado para obtenção de superfícies de revolução, para o que a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo determinadas trajetórias (CHIAVERINI, 1982).

O torneamento radial é aquele no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina.

Quando o torneamento radial visa a obtenção de uma superfície plana, o torneamento é denominado torneamento de face (FERRARESI, 1977).

No faceamento, a ferramenta pode avançar radialmente, nos dois sentidos: tanto de fora para dentro (do diâmetro externo para o centro da peça), quanto de dentro para fora (do centro para o diâmetro externo da peça), neste caso, desde que haja um pré furo, para facilitar a entrada da ferramenta de corte.

2.2 Aço inoxidável austenítico V316L

O aço V316L é um aço cromo-níquel-molibdênio inoxidável austenítico de extra-baixo teor de carbono, amagnético e não temperável. Ele possui boa resistência a

corrosão. Tem a propriedade de manter boas características de tenacidade até temperaturas extremamente baixas. (VILLARES, 1982)

Os aços inoxidáveis austeníticos são de difícil usinagem. Eles têm alta taxa de encruamento e grande zona plástica e por isso, formam cavacos longos e com tendência a empastarem sobre a superfície de saída da ferramenta podendo resultar na formação de aresta postiça de corte.

Outras características deste aço são: baixa condutividade térmica, dificultando a extração de calor da região de corte, o que facilita o desgaste da ferramenta; alto coeficiente de atrito, que tem como consequência o aumento do esforço de corte e do calor gerado; alto coeficiente de dilatação térmica, o que torna difícil a manutenção de tolerâncias apertadas.

Em termos de geometria da ferramenta, é importante que ela possua ângulos positivos para minimizar o encruamento do cavaco (DINIZ, 2010).

A Figura 2.1 mostra um diagrama com indicações gerais sobre as velocidades de corte e os avanços para o torneamento de aços inoxidáveis austeníticos com insertos de metal duro.

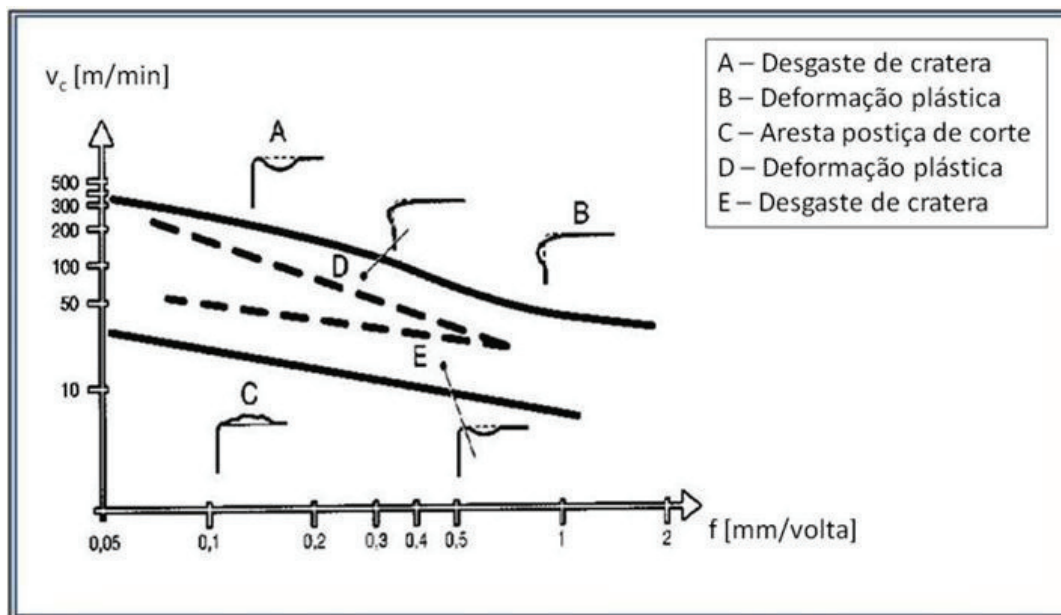


Figura 2.1: Indicações gerais sobre condições de usinagem para o torneamento de aços inoxidáveis austeníticos. (*Modern Metal Cutting*).

Na região A desta figura, uma alta taxa de desgaste de cratera deve acontecer, causado pelo processo difusivo gerado pela alta temperatura, devido à alta velocidade de corte.

Na região B, a deformação plástica da ferramenta é excessiva, devido às altas forças de corte, causadas pelo alto avanço e devido às temperaturas, geradas graças à combinação de altas velocidades de corte e altos avanços.

Na área C, devido às baixas velocidades de corte e à tendência ao empastamento do cavaco desse tipo de aço, ocorre a formação de aresta postiça de corte.

Ainda pode ocorrer alguma deformação plástica da ferramenta na região D e algum desgaste na região E (DINIZ, 2010).

2.3 Substratos classe ISO M25 e M15 com Revestimento multi-camadas TiAlN/(Al,Cr)₂O₃/TiAlN no processo PVD

O metal ligante cobalto (Co), ao aglomerar as partículas de alta dureza e elevada resistência ao desgaste dos carbeto do metal duro carbeto de tungstênio (WC), de titânio (TiC), de nióbio (NbC) e de tântalo (TaC), confere tenacidade ao produto final. Ele é empregado em maior teor nos substratos de aplicações em que a tenacidade é a característica fundamental e não a dureza (CHIAVERINI, 1982). Assim quando se deseja alta tenacidade da ferramenta, como em processos de desbaste ou em operações com tendência à vibração ou com corte interrompido, utiliza-se ferramenta com alto teor de Co (até próximo de 15%). Porém, a inserção de cobalto diminui a dureza e resistência ao desgaste da ferramenta. Assim, quando se necessita maior resistência ao desgaste, como em operações de acabamento, utiliza-se ferramentas com baixo teor de cobalto e alto teor de carbeto. Portanto, um desafio presente na área de fabricação de ferramentas de usinagem é se conjugar na mesma ferramenta tenacidade com resistência ao desgaste. Isto se torna possível com a utilização de ferramentas revestidas, que conjuga a resistência ao desgaste da fina camada de cobertura bastante dura, com a tenacidade do substrato, frequentemente feito com metal duro de alto teor de cobalto (DINIZ, 2010).

Como geralmente os grãos do substrato são finos ou micro-finos, além da boa resistência ao calor obtém-se uma boa tenacidade da aresta de corte.

Dentre os principais revestimentos tem-se: Carbetos de Titânio (TiC), Óxido de Alumínio (Al_2O_3), Nitreto de Titânio (TiN), Camada dupla de TiC e TiN, Carbetos de Háfio (HfC), Carbetos de todos os metais do grupo IV-B e V-B da tabela periódica, além do Oxicarbeto de Titânio (SUH, 1976; HUNT e SANTHANAM, 1990).

Existe uma concepção geral de que estes materiais apresentam boa dureza e boa resistência ao desgaste, além de relativas inércias químicas e estabilidade a alta temperatura. Alguns destes materiais formam ligações mecânicas com a superfície do substrato, em lugar de ligações químicas, devido às suas inerentes propriedades químicas. Estas ligações mecânicas são fracas e por essa razão, tornam-se um problema para muitas ferramentas revestidas. Outro problema inerente é a perda de tenacidade quando as ferramentas de metal duro são revestidas com uma camada de carbeto (SUH, 1976).

Com o desenvolvimento e as inovações nos processos de deposição de revestimento, nas décadas de 1970 e 1980, foi possível resolver os problemas apresentados pelas ferramentas, além de aumentar ainda mais a produtividade e melhorar a qualidade da superfície das peças usinadas.

Os processos de aplicação de revestimentos foram essenciais na evolução das ferramentas revestidas e, conseqüentemente, no ganho de produtividade da indústria metal-mecânica.

Mais do que nunca se tem investigado cautelosamente o desempenho de ferramentas de corte com o intuito de estender potencialmente sua vida e melhorar a qualidade da peça usinada.

Na busca de novas ferramentas tem-se focado bastante na utilização de revestimentos aplicados ao substrato. Antes de decidir pelo revestimento a ser utilizado na ferramenta, é necessário uma análise prévia dos processos disponíveis para a aplicação destes.

A deposição de revestimentos tem como objetivo alterar as propriedades de uma superfície. Entre as características modificadas por meio de revestimentos pode-se destacar as propriedades ópticas, magnéticas, eletrônicas, químicas, resistência mecânica e resistência ao desgaste (HOGMARK et al., 2000).

Atualmente, dentre os processos de formação de uma cobertura dura de nitreto, na superfície de corte das ferramentas encontra-se o processo com deposição química de vapor (CVD), que ocorre por meio de reações químicas em temperaturas, em geral, entre 700 e 1050°C.

As coberturas CVD possuem alta resistência ao desgaste e excelente adesão ao metal duro. O primeiro metal duro revestido pelo processo CVD era de única camada de cobertura de carbeto de titânio (TiC). Depois foram introduzidas coberturas de óxido de alumínio (Al_2O_3) e coberturas de nitreto de titânio (TiN). Mais recentemente as coberturas de carbonitreto de titânio (Ti(C,N) ou (TiCN), foram desenvolvidas para melhorar as propriedades da ferramenta, devido à habilidade em manter a interface de metal duro intacta, conforme mostrado na Figura 2.2.

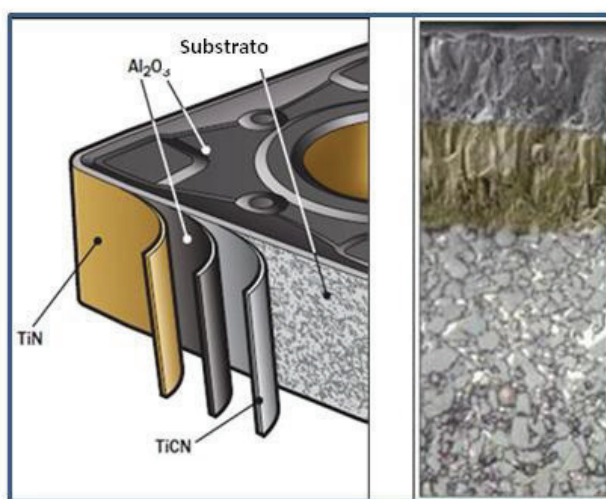


Figura 2.2: Inserto com revestimento de tripla-camadas pelo processo CVD – TiN, Al_2O_3 e TiCN (adaptado de SANDVIK Coromant, 2012).

As propriedades da cobertura foram melhoradas continuamente quanto às propriedades de adesão, tenacidade e desgaste, em virtude de otimizações e tratamentos posteriores micro-estruturais (SANDVIK Coromant, 2012).

Os modernos revestimentos multi-camadas utilizando-se processo CVD combinam:

- Ti(C,N) carbonitreto de titânio e Ti(C) carbeto de titânio: Esta camada é mais dura do que TiN, agrega resistência ao desgaste de flanco, possui excelente resistência ao desgaste por abrasão, funciona como elemento que promove a adesão das camadas de cobertura com o metal duro do núcleo, uma vez que não se consegue uma forte adesão entre o óxido de alumínio (camada normalmente acima do Ti(C,N)) e o substrato de metal duro, devido à diferença entre os

coeficientes de dilatação térmica destes dois materiais. Essa diferença geraria trincas na interface durante o resfriamento após o processo de cobertura CVD, se uma camada de Al_2O_3 fosse depositada diretamente sobre o metal duro. Por isto, em geral, ou uma destas camadas (TiCN) é a única camada de cobertura, ou é a camada que está por debaixo das outras camadas. A dureza da camada de TiC é da ordem 3000 HV, maior que as durezas de todos os outros materiais utilizados como cobertura do metal duro.

Outras características importantes deste material: baixa tendência de soldagem com o material da peça, dificultando o desgaste por adesão e a formação de aresta postiça de corte e baixo coeficiente de dilatação térmica. O carbonitreto de titânio (TiCN), tem propriedades similares ao TiC (dureza, resistência ao desgaste e capacidade de adesão ao núcleo), a menos de seu coeficiente de atrito, que é mais baixo que o do TiC. Tanto a camada de TiC, quanto a de TiCN, por conterem carbono, necessitam de uma barreira térmica para evitar o desgaste difusivo durante o processo de usinagem. Por esta razão, muitas vezes, o óxido de alumínio é utilizado como camada de cobertura sobre a camada de TiC ou TiCN. A espessura da camada é de 4 a 8 μm ;

- Al_2O_3 (óxido de alumínio): Esta camada é usada por ser quimicamente inerte, resistir à craterizações, garantir a estabilidade térmica necessária em temperaturas elevadas, devido ao fato de ser um material cerâmico refratário, com baixa condutividade térmica e alta dureza a quente, possuir alta resistência à oxidação, alta estabilidade química na presença do ferro (Fe) e melhorar a resistência à deformação plástica. A camada de óxido de alumínio é a principal responsável pela baixa tendência de formação de desgaste de cratera das ferramentas de metal duro recoberto. Por outro lado, esta camada apresenta pequena resistência a choques térmicos e mecânicos.
- TiN nitreto de titânio (cor: dourada): Esta camada melhora a resistência ao desgaste, possui propriedades de uso geral, é usada para detecção de desgaste, é quimicamente mais estável que o TiC, isto é, tem menor tendência à difusão com aços e reduz o coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco. A espessura de camada é entre 5 a 7 μm . (DINIZ, 2010; SANDVIK Coromant, 2012).

Alguns tratamentos posteriores à aplicação destes revestimentos pelo processo CVD melhoram a tenacidade da aresta em cortes interrompidos e reduzem a tendência à abrasão.

A espessura total das camadas que recobrem o metal duro varia entre 2 a 12 μm . Quando se aumenta a espessura da cobertura, a resistência ao desgaste aumenta, porém a tenacidade diminui e começa a aumentar a tendência ao lascamento das arestas. (DINIZ, 2010; SANDVIK Coromant, 2012).

O outro processo de formação de uma cobertura dura de nitreto, na superfície de corte das ferramentas é o processo com deposição física de vapor (PVD), em que ocorre por meio de vapores de um metal, que reage, por exemplo, com nitrogênio, gerados no interior de fornos a baixa pressão com temperaturas, em geral, na faixa de 400 – 600°C. Este processo é usado para ferramentas de corte com arestas mais afiadas e para usinagem de materiais mais dúcteis, propícias para uso em temperaturas inferiores ao do processo de CVD (SANDVIK Coromant, 2012).

As vantagens de se usar o revestimento pelo processo de PVD são:

- 1) Adequado para uso em insertos com arestas muito afiadas, até menores que 10 micrometros;
- 2) Aresta de corte tenaz (Insertos para operações com tendência a lascamentos, com choque de cavacos ou desgaste de entalhe) e
- 3) Indicado para trabalhos com baixos avanço e profundidade de corte (SANDVIK Coromant, 2012).

As desvantagens são:

- 1) O calor gerado geralmente é uma restrição. A velocidade de corte e avanço deveriam ser baixos, geralmente velocidade de corte de 30 a 170 m/min e avanço de 0,05 a 0,35 mm/volta, dependendo do material. Mas dependendo da peça e do material de aplicação, dados mais elevados podem ser usados.
- 2) São menos seguras quando o final da vida útil da ferramenta é atingido. Os desgastes de flanco ou de cratera também aumentam o calor no processo de corte, conduzindo assim para a deformação plástica da aresta. Portanto, para se manter uma produção segura, é recomendado pelo fabricante, que revestimentos de PVD sejam utilizados apenas até 80% de seu limite máximo de desgaste (SANDVIK Coromant, 2012).

O revestimento da ferramenta feito pelo processo PVD, à base de óxido, tem excelente resistência a materiais abrasivos e boa adesão em arestas vivas. Isto garante a tenacidade, desgaste uniforme de flanco e alto desempenho. Além disto, como geralmente os grãos do substrato são finos ou micro-finos, além da boa resistência ao calor agrega-se ainda mais tenacidade à aresta de corte.

O processo de revestimento PVD é realizado em baixas temperaturas, o que permite substancial eliminação da decarbonetação do substrato de metal duro e a manutenção da tenacidade e resistência (KONYASHIN, 1995).

Os modernos revestimentos multi-camadas em processo PVD combinam:

- TiN (nitreto de titânio): Esta camada tem como importante característica a resistência de adesão entre a camada de revestimento e o substrato, que é necessária para suportar vários tipos de carga, como cargas cíclicas, mecânicas e térmicas. (KIM et al, 2003). O aumento da resistência ao desgaste da ferramenta revestida com TiN pode ser esperado quando a rugosidade da superfície do substrato é menor que a espessura do revestimento. As superfícies revestidas desgastam-se muito lentamente em comparação com as superfícies sem revestimento. Quando o revestimento quebra, a taxa de desgaste aumenta e se aproxima da taxa de desgaste das superfícies sem revestimentos (ZEGHNI et al., 2004).
- Ti(C,N) carbonitreto de titânio: Esta camada vem se despontando nos últimos anos, entre as várias alternativas de revestimento. Algumas propriedades básicas deste revestimento, tais como morfologia, estrutura e composição são resultantes de uma solução sólida de nitreto de titânio e carbeto de titânio. Desta forma, este revestimento incorpora as vantagens e características dos dois revestimentos. O revestimento de TiCN em comparação com o TiN apresenta melhor resistência à abrasão e melhor propriedade antiadesiva. A comparação do desempenho dos dois revestimentos mostra que em ensaios de desgaste, a resistência ao desgaste do TiCN é de três a quatro vezes superior ao TiN e o coeficiente de atrito medido contra uma superfície de alumina do TiCN e do TiN são respectivamente 0,2 e 1,0 a 1,5. Para diversos outros materiais de contrapeça utilizados em testes de atrito, o coeficiente de atrito do TiCN apresenta-se menor que o do TiN (BERTONCELLO et al., 1992). O carbonitreto de titânio possui uma melhor estabilidade química quando comparado ao carbeto de titânio

(NARASIMHAN et al., 1995). Os revestimentos de TiCN possuem valores e coeficiente de condução de calor maiores que os valores dos revestimentos de TiN e TiAlN (CHUNG-CHEN et al., 2002). A dureza do revestimento de TiCN aumenta com o teor de carbono no revestimento. As boas propriedades apresentadas pelos revestimentos TiC_xN_y poderiam estar relacionadas ao efeito conjunto da alta dureza do revestimento de TiC aliada à alta estabilidade química do revestimento de TiN (SIENNA et al., 2005). O comportamento tribológico de TiC_xN_{1-x} varia de acordo com o substrato, método de deposição, espessura do filme, sequência de deposição e o tipo de desgaste. A adesão do revestimento é melhorada pelo uso de uma camada intermediária de TiN, mas a espessura desta camada deve ser minimizada para obter o melhor coeficiente de atrito e a melhor resistência ao desgaste. A geração de microtrincas em função das tensões residuais deve ser evitada (BULL et al., 2003b).

- TiAlN (nitreto de titânio-alumínio): Esta camada possui maior dureza em combinação com resistência à oxidação, melhorando a resistência geral ao desgaste (SANDVIK Coromant, 2012). O revestimento de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) pode ser chamado de nitreto de alumínio-titânio (AlTiN), dependendo se houver mais alumínio do que titânio na cobertura (DINIZ, 2010). O revestimento de TiAlN representa um importante papel no desenvolvimento dos revestimentos aplicados pelo processo PVD. Ele é uma evolução do largamente utilizado revestimento de nitreto de titânio e somente pode ser produzido por processos que geram a formação de um plasma, para que ele seja depositado como uma fase cristalográfica metaestável. Baseado em diferentes parâmetros como a composição do material alvo, a taxa de evaporação e dos parâmetros de ionização do plasma, parte do titânio pode ser substituído pelo alumínio em diferentes níveis (TONSHOFF et al., 1997). A vantagem fundamental do uso do TiAlN é que este revestimento forma uma densa e altamente adesiva camada protetiva de Al_2O_3 na sua superfície quando aquecido, durante o processo de usinagem, prevenindo a difusão de oxigênio para o material do substrato. O uso de revestimento contendo Al é relatado também como sendo vantajoso em operações de usinagem que combinam altas temperaturas de corte com altas cargas mecânicas no material da ferramenta. Isto é usualmente explicado por dois efeitos. O primeiro efeito é a formação de uma

fina camada de Al_2O_3 na superfície da ferramenta, que é uma barreira protetora contra o O_2 , protegendo contra a tribo-oxidação. Isto é importante para as operações de corte interrompido e para a redução do desgaste de entalhe na aresta de corte do metal duro. O segundo efeito é a comparativamente alta dureza em elevada temperatura. O revestimento TiAlN passa a ser mais duro que o TiN e TiCN, a partir de 800°C , propiciando boa resistência ao desgaste abrasivo na usinagem em alta velocidade de corte (KLOCKE, 1999). Uma outra vantagem para as aplicações do revestimento de TiAlN em usinagem é a sua baixa condutividade térmica. Consequentemente, com seu uso ocorre uma maior dissipação do calor para o cavaco. Também isso propicia, que altas velocidades de corte sejam utilizadas, uma vez que a carga térmica no substrato é menor (HSIEH et al., 1998). O relativo bom desempenho do TiAlN em elevadas velocidades de deslizamento é explicada pela sua baixa taxa de oxidação em elevadas temperaturas (HEDENQVIST, 1997).

- $(\text{Al,Cr})_2\text{O}_3$ (óxido de alumínio cromado): Esta camada é usada por ser quimicamente inerte, resistir à craterizações, garantir a estabilidade térmica necessária em temperaturas elevadas, devido ao fato de ser um material cerâmico refratário, com baixa condutividade térmica e alta dureza a quente, possuir alta resistência à oxidação e alta estabilidade química na presença do ferro (Fe). A camada de óxido de alumínio cromado é a principal responsável pela baixa tendência de formação de desgaste de cratera das ferramentas de metal duro recoberto, por outro lado, apresenta pequena resistência a choques térmicos e mecânicos (SANDVIK Coromant, 2012).

A aplicação da tecnologia do revestimento de múltiplas camadas no campo dos revestimentos duros e resistentes ao desgaste é predominantemente motivada pelo desejo de alcançar uma forte adesão entre o filme e o substrato, com a criação de um filme protetor ao desgaste, com baixa reatividade química, baixo coeficiente de atrito e com um aumento da dureza e da tenacidade (BOUZAKIS et al., 2006).

Os revestimentos multicamadas são promissores para aperfeiçoar propriedades e desempenho dos revestimentos. As camadas da interface podem ser utilizadas para melhorar a adesão de um revestimento ao substrato e assegurar uma suave transição entre as propriedades do revestimento e do substrato. Depositando várias camadas finas com diferentes propriedades mecânicas, a concentração de tensão na região da

superfície e as condições de propagação de trincas podem ser alteradas. As propriedades de um revestimento composto por filmes diferentes dispostos em camadas podem ser melhores que a deposição de camadas individuais, que separadamente tem características diferentes, tais como resistência à corrosão, resistência ao desgaste, isolamento térmico, condutividade elétrica, barreira de difusão e adesão ao substrato (HSIEH et al., 1998).

Um revestimento multi-camadas em TiAlN típico, feito pelo processo PVD, tem as seguintes camadas, conforme mostrado na Figura 2.3:

- A primeira camada sobre o substrato, de TiAlN (nitreto de titânio e alumínio), na cor: laranja, possui maior dureza em combinação com resistência à oxidação, melhorando a resistência geral ao desgaste;
- A segunda camada sobre a primeira, de $(Al,Cr)_2O_3$ (óxido de alumínio cromado), na cor escura, é usada por ser quimicamente inerte e resistente à craterizações;
- A terceira camada sobre a segunda, também de TiAlN (nitreto de titânio e alumínio), é na cor acobreada.

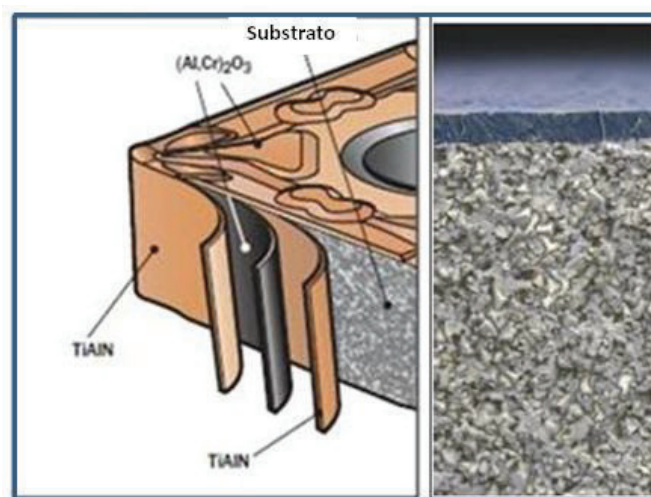


Figura 2.3: Inserto com revestimento de tripla-camadas pelo processo PVD - TiAlN, $(Al,Cr)_2O_3$ e TiAlN (adaptado de SANDVIK Coromant, 2012).

A espessura total destas três camadas de revestimento nas faces é de 1,5 a 3,5 micrometros e nas laterais é de 2,0 a 4,5 micrometros, o que proporciona excelente

tenacidade da aresta combinado com uma boa resistência de flanco. Mas para se evitar a deformação plástica e/ou desgaste excessivo de cratera, há a restrição de se usar a velocidade de corte e avanço de baixo para médio (DINIZ, 2010; SANDVIK Coromant, 2012).

2.4 Texturização de Superfícies por jateamento e a laser

Os processos mecânicos de texturização da superfície dos substratos das ferramentas de usinagem são os de remoção e/ou deformação do material da superfície do substrato e os processos de ataque químico são os de remoção do cobalto e/ou os que otimizam a rugosidade para aplicação de camadas de transição entre o substrato e o revestimento. Estes processos podem ser usados de forma isolada, combinada entre elas e ainda com processos térmicos específicos (BOUZAKIS et al, 2001).

No processo industrial de fabricação de ferramentas de metal duro, utiliza-se usualmente como processos mecânicos o jateamento com micro-partículas abrasivas e/ou jateamento com água em alta pressão.

Tem sido estudado intensamente também, o processo mecânico da texturização a laser na superfície do substrato, com vários tipos de laser; vários processamentos do laser e em várias ferramentas utilizadas em diversos tipos de processos de usinagem, com diferentes substratos, revestimentos e processos de revestimentos.

Os processos de preparação do substrato para receber a cobertura, a fim de melhorar a aderência do revestimento sobre o substrato de metal duro, agem conforme o tipo de revestimento e do tipo de meio de deposição (TAHER, 1999), das seguintes maneiras:

- a) Bloqueando o efeito nocivo do cobalto da superfície do substrato mediante sua remoção seletiva;
- b) Aumentando a aderência básica através de tratamentos químicos;
- c) Incrementando o bloqueio mecânico mediante a otimização da rugosidade do substrato;

- d) Controlando a propagação de trincas com o melhoramento dos estados superficiais de tensões e/ou incrementando a tenacidade da interface.

Durante a fase líquida do processo de sinterização, o composto WC-Co é um sistema bi-fásico sólido-líquido, em que os espaços entre grãos sólidos de WC são preenchidos com Co líquido. Quando existe heterogeneidade no teor do cobalto dentro do composto, o Co líquido tende a migrar das regiões de teor elevado para outras regiões com teor mais baixo (FAN e FANG, 2009). Possivelmente este fenômeno produz também o excesso de Co observado frequentemente na superfície livre dos componentes de metal duro sinterizados.

A textura de uma superfície é a composição de desvios típicos de uma superfície real, que incluem a rugosidade e as ondulações (ANSI/ASME, 2002)

O processo de modificação da topografia de uma superfície, pela criação de um novo micro-relevo, com novas asperezas e depressões uniformemente distribuídas, alterando substancialmente a morfologia da superfície, de maneira controlada, tem sido chamado de texturização superficial. O objetivo desta texturização é o de melhorar o desempenho das superfícies e a confiabilidade dos componentes em engenharia, em diferentes aspectos (COSTA, 2005).

As aplicações da texturização artificial (ou controlada) de uma superfície podem ser a remoção de resíduos de desgaste; o aumento de atrito; a redução da aderência entre superfícies em contato; a melhoria do travamento mecânico entre as superfícies; a melhoria da adesão; a melhoria da vedação dos elementos mecânicos; o controle da molhabilidade da superfície; o aumento da resistência mecânica; o efeito aero ou hidrodinâmico e o aumento da transferência de calor (COSTA, 2005), dentre outras aplicações.

Na usinagem, a texturização superficial vem sendo aplicada principalmente para melhorar a adesividade de revestimentos duros sobre ferramentas de corte.

Alguns dos atuais processos que podem ser usados para modificar uma texturização no substrato de uma ferramenta são: retificação, polimento, jateamento de micro-partículas de pós de vidro, jateamento interrompido de granalha, de água em alta pressão, com ou sem abrasivo, eletroerosão, eletroquímica, ataque químico usando ácido clorídrico, sulfúrico, nítrico, laser e outros processos com controle. (TONHOFF e SEEGER, 2000; BOUZAKIS et al., 2001; TIEJUN et al., 2002; LIMA et al., 2005 e POLINI, 2006).

Um dos processos de texturização mais utilizados atualmente na fabricação de insertos de metal duro recobertos é o jateamento em altas velocidades de micro-partículas de pós de vidro (óxido de alumínio) na superfície do substrato, antes da operação de recobrimento, também chamado de micro-blasting. O objetivo deste processo é o de melhorar o desempenho das ferramentas já recobertas, uma vez que este reduz ou remove os defeitos de manufatura das arestas de corte; altera a microgeometria da ferramenta; aumenta a erosão da superfície e consequentemente o ancoramento do revestimento no substrato, reduz a delaminação do revestimento no substrato, induz tensões compressivas no substrato e altera a microdureza do substrato (LEWIS et al., 1996; BUNSHAH, 2001 e KLOCKE et al., 2007).

Em substratos de metal duro, esta texturização pré-recobrimento pelo processo PVD, por jateamento de micro-partículas otimiza o desempenho das ferramentas recobertas (TONSHOFF e SEEGER, 2000).

Durante a fabricação das ferramentas, os substratos de metal duro ao serem retificados, recebem durante a aplicação dos grãos do rebolo, elevadas forças e deformações plásticas. Elevadas temperaturas são geradas nestas superfícies devido às condições de atrito deste processo, que ao serem refrigeradas, ganham regiões de elevados gradientes de temperatura, que acabam causando elevados gradientes de tensões residuais (TONSHOFF e SEEGER, 2000).

Também, devido aos esforços de corte nas ferramentas já revestidas, cargas adicionais são geradas na superfície do substrato e surgem mais elevadas tensões nesta mesma região.

A carga total a que a superfície do substrato da ferramenta foi submetida antes e depois de revestida, durante seu uso, é um fator decisivo para a qualidade da adesividade do revestimento em seu substrato o que reflete em seu desempenho na produção.

Para o aumento da adesividade dos revestimentos PVD em seus substratos, falhas na superfície do substrato, devem ser evitadas ao máximo (TONSHOFF e SEEGER, 2000).

Uma opção para o processo de alívio das tensões residuais existentes nas superfícies do substrato das ferramentas de metal duro é usar um processo que evite estas falhas nas superfícies, modificando suas propriedades através de texturizações, o que é o caso das texturizações por jateamento com micro-partículas ou por jato

interrompido em elevada pressão de água, com ou sem abrasivo (TONSHOFF et al., 1997 e TONSHOFF et al., 1998).

Uma característica importante do processo de jateamento por micro-partículas, a ser controlada, é o tamanho das partículas utilizadas.

Outra característica importante a ser mantida neste processo de jateamento é uma determinada abrasividade das partículas, para que elas consigam remover o ligante cobalto deixado na superfície do substrato após o processo de sinterização do metal duro, pois este elemento interfere quimicamente na formação da interface: substrato e revestimento. O cobalto afeta a nucleação, o crescimento e a adesividade do revestimento no substrato da ferramenta de metal duro (SILVA 1997 e TIEJUN et al., 2002).

A abrasividade do processo de jateamento precisa ser muito bem controlada, uma vez que estas micro-partículas abrasivas podem também arrancar os grãos de carbeto da matriz de cobalto.

Os carbeto distribuídos na matriz de cobalto do substrato da ferramenta precisam ficar muito bem incrustados na ferramenta.

Para isso, a rugosidade da superfície do substrato de metal duro após ter sido jateado por micro-partículas deve ser menor do que o raio médio do carbeto (BOUZAKIS et al., 2005). Também é necessário que os carbeto fiquem suficientemente expostos na superfície, para que possam servir de pontos de ancoragem para o revestimento depois. E ainda, as micro-partículas durante o processo de jateamento, pelo efeito abrasivo ou de deformação plástica, não devem fraturar ou extrair os carbeto da superfície do substrato.

Devido à influência direta da qualidade da superfície texturizada do substrato de metal duro no desempenho da ferramenta revestida, observa-se que algumas características do processo por jateamento de micro-partículas, de fácil execução, porém de texturização desordenada, precisam ser controladas rigorosamente (BOUZAKIS et al., 2005).

As características do processo de jateamento a serem controladas são: a pressão do jato; a distância entre o bico do jato e a superfície; a distribuição, o tamanho e a forma das micro-partículas; a duração da operação de jatear e a limpeza prévia da superfície, para estar livre de óleos e graxas.

Sem um adequado controle destas características citadas, a uniformidade da texturização em substratos de metal duro fica impossível e, conseqüentemente, a

remoção uniforme da camada de cobalto e os cuidados para se evitar os danos aos grãos de carbeto presentes na matriz ficam muito difíceis.

Em resumo então, algumas características deste processo de texturização de substrato de metal duro por jateamento de micro-partículas de óxido de alumínio são:

- a) De fácil execução;
- b) Cria uma textura (rugosidade) superficial desordenada e aleatória;
- c) De difícil controle dos parâmetros do processo;
- d) Utiliza bastante mão de obra operacional;
- e) Requer trabalho por lotes grandes, para viabilizar tempo de set-up da máquina;
- f) Demorado;
- g) Oferece riscos para a saúde dos operadores, que podem inalar as micro-partículas abrasivas em suspensão no ar, se não usarem corretamente seus equipamentos de proteção individual (EPI);
- h) Necessita que os resíduos sólidos ou líquidos saídos da máquina, por representarem um risco ambiental, tenham um dos dois destinos: sejam encaminhados a uma empresa de reciclagem de abrasivos, para produção de por exemplo: discos de corte, rebolos e lixas ou sejam destinados a uma empresa de beneficiamento, que os transformará em briquetes, para serem vendidos para siderúrgicas.

Devido a algumas destas características citadas, consideradas como desvantajosas deste processo de texturização por jateamento de micro-partículas, um outro processo de texturização de substratos de metal duro para fabricação de ferramentas recobertas tem sido estudado, testado e avaliado também por seus prós e contras.

Este é o processo de texturização a laser das superfícies dos substratos de metal duro.

A palavra LASER é formada pelas primeiras letras da locução em inglês: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (NDCEE, 1999), cuja tradução para o português é: Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação.

O laser é um dispositivo que gera luz monocromática coerente, que pode ser focada e concentrada, dentro de um feixe estreito de intensa energia (NDCEE,1999).

Este dispositivo é uma fonte de energia fotônica com propriedades únicas.

Um laser consiste basicamente de três partes (ARROYO, 2009), conforme mostrado na Figura 2.4:

- 1) Meio ativo: esta parte contém os átomos ou moléculas, em que seus elétrons, através dos saltos de níveis de energia, emitem a luz ou fótons. Este pode ser sólido, líquido e gasoso. Exemplo de meio ativo de se obter laser de estado sólido é o: Nd-YAG (cristal de neodímio dopado com alumínio granada de ítrio).
- 2) Fonte de energia: esta parte faz com que a maioria dos átomos com seus elétrons fiquem excitados, a fim de que nos decaimentos de energia, haja produção de luz ou emissão de fótons. Nos lasers industriais as fontes mais comuns são elétrica, óptica e química.
- 3) Cavidade óptica: consiste de um meio para promover o ganho do laser e um mecanismo de geração do feixe de laser.

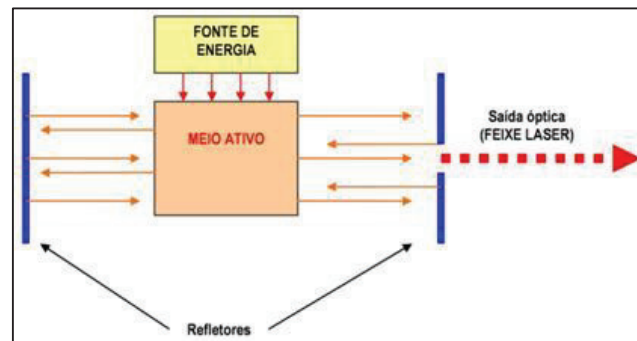


Figura 2.4: Esquema de um equipamento de geração do feixe de laser (ARROYO, 2009).

Adicionalmente um laser precisa de sistemas de potência e controle e frequentemente, de um sistema de refrigeração (ARROYO, 2009).

Uma aplicação bem sucedida do laser depende da escolha apropriada do sistema laser e da adequada compreensão da física do processo (ZHANG e YAO, 2004 apud ARROYO, 2009).

Uma das principais características do laser no processamento de materiais é sua capacidade de transmitir uma quantidade de elevada energia para uma pequena área focalizada sobre a superfície desejada, produzindo um rápido aquecimento na região. A radiação laser que atinge a superfície da amostra é em parte absorvida pela superfície do material, em parte transmitida pelo material todo e em parte refletida para fora do material. A camada que é absorvida transforma-se em calor numa camada fina próxima à superfície (OLIVEIRA, 2006). Esta energia absorvida além de aquecer, pode dissociar os materiais da superfície (ZHANG e YAO, 2004).

A boa qualidade no processamento de uma superfície que recebe uma radiação por feixe de laser depende de uma combinação entre as propriedades do material e parâmetros do feixe de laser.

Basicamente, as propriedades do material de maior influência no processamento a laser da superfície são (READY, 1997 apud OLIVEIRA, 2006):

- Capacidade de absorção do material (condutividade térmica, calor específico, densidade e difusividade térmica);
- Refletividade da superfície, comprimento de onda e ângulo de incidência do feixe de laser;
- Propriedades termodinâmicas do material (calor latente da fusão ou da vaporização).

A transferência de energia no processamento de materiais pode ser realizada por meio de feixe de laser: contínuo ou pulsado. O feixe de laser contínuo vai emitindo sua energia aos poucos, com uma intensidade muito pequena. Nestes lasers (material de estado gasoso), a emissão se dá da seguinte forma: a luz é constantemente refletida de um lado para o outro, dentro de um tubo, que contém um gás. A cada passagem do feixe de luz, a intensidade aumenta um pouco, se não houver algo que absorva a luz. Caso contrário, a emissão do laser amortece. Neste modo contínuo, pode ocorrer um aquecimento excessivo da região focada, resultando danos indesejáveis ao material. O laser pulsado fornece uma determinada quantidade de energia em um tempo muito pequeno, com uma potência extremamente alta. Nestes lasers (material de estado

sólido), a emissão se dá da seguinte forma: a energia acumulada nos átomos de um cristal é liberada em um tempo muito curto.

Na operação do laser Nd-YAG, por regime pulsado, o laser é transmitido de forma não contínua, produzindo uma série de pulsos, separados por curtíssimos intervalos de tempo e permitindo o controle exato do mesmo. Desta forma pulsada, uma energia dezenas de vezes maior do que a contínua, pode ser aplicada. Isto, porque não ocorre danos térmicos, uma vez que a elevada energia transmitida por esse pulso, provoca a ablação instantânea de material, antes que o material possa transmitir, por condução térmica, o calor ao material vizinho. O processo de laser pulsado é preferido, pois ele possibilita um melhor controle da energia de texturização das superfícies.

Para um laser pulsado, os principais parâmetros de influência no processamento do material são:

- Potência média do laser;
- Energia de pulso;
- Tempo do pulso;
- Diâmetro do feixe de laser;
- Intensidade, densidade de potência ou irradiação do laser.

Quanto maior a intensidade do laser, maior será a energia despendida sobre o material, cujo aumento provocado da temperatura, pode ser suficiente para induzir mudanças de fase no mesmo (DUMITRU et al., 2005).

O controle da intensidade do laser pode provocar desde mudanças superficiais no material, por exemplo: endurecimento superficial ou revenimento, remoção precisa de material, por exemplo: micro-usinagem ou gravação ou até mesmo a remoção substancial de material, por exemplo: corte ou furação (DUMITRU et al., 2005).

Em resumo, o processo de texturização a laser de substratos de metal duro consiste de um feixe focado que transfere parte de sua energia para a peça. Então, quando a densidade de energia transferida do laser para a superfície do metal duro é suficientemente alta localmente, o fenômeno de absorção provoca efeitos térmicos, com ocorrência de mudança de fase de seus elementos (como a fusão ou a vaporização) ou efeitos atérmicos (como a ablação), de acordo com a Figura 2.5.

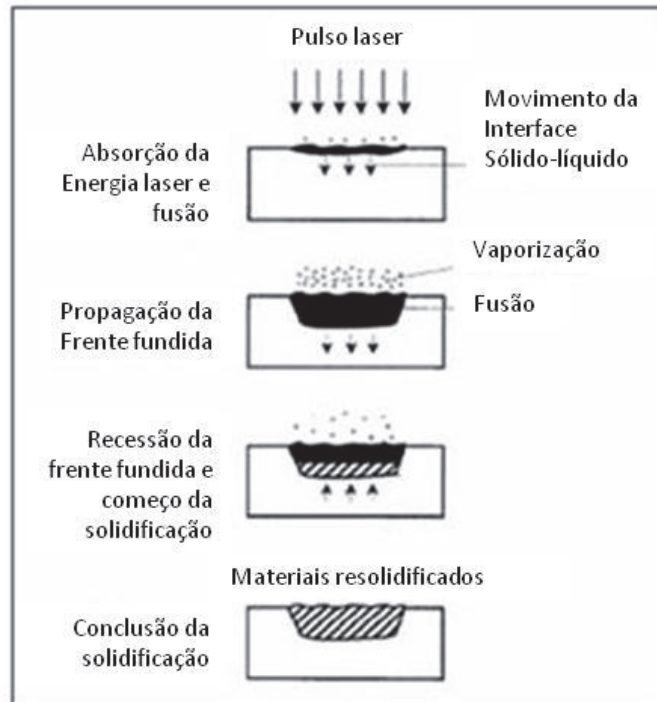


Figura 2.5: Ciclo térmico básico gerado por um pulso laser. O seguinte pulso interagirá com parte ou com todo o material ressolidificado (FOLTYN, 1994).

A ablação ocorre quando a energia transferida do laser para a superfície de metal duro provoca o deslocamento ou a remoção de material da superfície (ALLMEN, 1987).

Os efeitos sobre o material dependem de parâmetros do laser como:

- Fluência ou energia por unidade de área;
- Comprimento de onda;
- Ajustes temporais;
- Ângulo de incidência (VERDIER et al., 2003).

A absorção da radiação melhora com o aumento da temperatura do material, devido à presença de mais elétrons livres (ZHANG e YAO, 2004).

A interação do laser com o material pode ser muito complexa, pois envolve: fusão, vaporização, formação de plasma (quarto estado da matéria) com ondas de choque, condução térmica e dinâmica de fluidos.

No metal duro WC-Co, o coeficiente de absorção varia pouco com o comprimento de onda da irradiação laser:

- Coeficiente de absorção: 76-74% com comprimento de onda: 1064nm;
- Coeficiente de absorção: 85% com comprimento de onda: 355nm.

Em pulsos com duração de nano segundos (ns), a transferência de energia acontece no intervalo de duração do pulso em condições de equilíbrio térmico.

A remoção de material ocorre principalmente por fundição e vaporização, sendo determinantes as propriedades térmicas dos grãos de WC e da matriz de Co.

O ponto de fusão do Co puro é de: 1495°C e o ponto de vaporização é: 2927°C, valor vizinho do ponto de fusão do WC: 2870°C.

Entretanto, o ponto de fusão das fases WC e Co, quando embebidas começa na faixa de: 1250°C a 1300°C, devido à reação eutética.

A temperatura eutética binária WC-Co está por volta de: 1310°C.

A temperatura eutética ternária WC-Co está por volta de: 1280°C (DUMITRU et al., 2005).

O ponto de vaporização do WC é: 6000°C (TIEJUN et al., 2001a).

No processo de texturização a laser da superfície do substrato de metal duro a fase Co se funde e se vaporiza primeiro e a ablação do material ocorre, principalmente por remoção seletiva do elemento aglomerante. Depois disso os grãos de WC são removidos pelo líquido e/ou pelos vapores de Co ejetados. Com altas densidades de energia, pode-se alcançar a temperatura de fusão do WC, produzindo o crescimento de grãos de WC maiores (uns poucos micrometros) durante a solidificação (DUMITRU et al., 2005).

Dependendo do método utilizado na aplicação do laser pulsado, há a possibilidade de se formar na superfície do substrato de metal duro, vales e picos consecutivos de material. Geralmente estes picos e vales são interconectados e uniformemente distribuídos sobre a superfície, conforme foi feita a distribuição dos pulsos do laser (FU et al., 2001). Assim cria-se um padrão de textura superficial, tão importante na busca pela remoção uniforme da camada de cobalto e nos cuidados para se evitar os danos aos grãos de carbeto presentes na matriz.

Esta padronização de textura superficial do substrato de metal duro é importante também para o desempenho da ferramenta revestida, pois provoca um travamento mecânico uniforme do revestimento sobre o substrato e diminui a possibilidade de ocorrência de falhas no revestimento, ocorridas devido à falta de adesividade.

Em resumo então, algumas características deste processo de texturização de substrato de metal duro por laser são:

- a) Facilidade de automação (execução com programação por computador);
- b) Cria uma textura (rugosidade) superficial regular e ordenada em um padrão;
- c) De fácil controle dos parâmetros do processo;
- d) Por ser bastante automatizada, utiliza um mínimo de mão de obra de programação e operacional;
- e) Permite trabalho até unitário, se desejado, por causa do reduzido tempo de set-up da máquina;
- f) Rápido;
- g) Os riscos que oferece para a saúde dos operadores são os efeitos térmicos da radiação a laser (classe: 4), como danos a pele e olhos, por interação direta ou refletância difusa, se não usarem corretamente seus equipamentos de proteção individual (EPI) e efeitos fotoquímicos;
- h) Não há necessidade de descarte especial do meio ativo do laser, após término de sua vida útil, pois ele sendo inerte e extremamente estável, não apresenta riscos de contaminação radioativa ou química ao meio ambiente, diferentes da de qualquer equipamento eletrônico. Quanto ao sistema de bombeamento, se for por diodos lasers, estes também são inertes e estáveis. Se o bombeamento for feito por lâmpada, esta também não apresenta risco de contaminação em seu descarte, pois ela não tem metais pesados, como mercúrio, por exemplo, somente gases nobres. Quanto ao descarte da fonte de alimentação e controle, esta deve ser tratada como uma fonte convencional. Em resumo, não há motivos para se ter cuidados especiais ao se efetuar o descarte destes componentes do equipamento de laser.
- i) Necessita que os resíduos gasosos saídos da região da texturização, por representarem um risco ambiental, sejam aspirados e filtrados, e os filtros sejam encaminhados para incineração por uma empresa autorizada pela CETESB.

Neves et al., (2006) também estudaram o desempenho de brocas de aço rápido M2 com 62 HRC texturizadas a laser comparando-o ao de brocas jateadas por micro-partículas (convencional), ambas revestidas com TiN, pelo processo PVD. O laser usado na texturização foi o Nd-YAG, em regime pulsado.

Numa primeira etapa, Neves et al., (2006) compararam a adesão das camadas de cobertura utilizando o teste de indentação Rockwell C, tanto para brocas texturizadas pelo processo convencional quanto para brocas texturizadas a laser, em diversas condições de laser. Na segunda etapa, realizaram experimentos de furação em dois blocos de aço inoxidável austenítico AISI 304 em três velocidades de corte (22, 27,5 e 33 m/min). Na primeira etapa eles concluíram que a adesão da camada de cobertura sobre as superfícies texturizadas a laser era maior do que das superfícies convencionais e que o melhor conjunto de condições de texturização ocorreu com os parâmetros do laser: Largura de pulso (τ_p) = 100 ns e Fluência do laser (f_l) = 0,41 J/cm², pois a superfície obtida promoveu maior ancoragem mecânica da cobertura TiN no substrato de aço M2.

Dos experimentos de furação com brocas convencionais e texturizadas a laser, pré-revestimento, dos blocos de aço inoxidável AISI 304, Neves et al., (2006) concluíram que, para os furos iniciais realizados com brocas quase sem desgaste, as Forças de avanço são praticamente as mesmas, para os dois tipos de ferramentas. A partir que o desgaste começa a se desenvolver, as brocas convencionais se desgastam mais depressa, fazendo com que as forças de avanço aumentem numa taxa maior que nas brocas texturizadas a laser, pré-revestimento. No caso das brocas texturizadas a laser, verificou-se que não ocorreu aumento da força de avanço ao longo da execução dos 100 furos do ensaio, usinando com velocidade de corte de 22 m/min.

Quanto aos resultados das medições do momento de torção das brocas da pesquisa de Neves et al., (2006), verificou-se que as brocas convencionais apresentaram valores mais elevados e com tendência crescente à medida que os furos eram realizados numa taxa de crescimento muito maior do que a das brocas texturizadas a laser. Além disso, a taxa de crescimento do desgaste da ferramenta foi muito menor nas brocas texturizadas a laser, do que na broca convencional, independentemente da velocidade de corte utilizada.

Arroyo (2009) realizou experimentos com insertos de metal duro classe ISO P25 e P40 revestidos por uma cobertura de tripla camada, depositada pelo processo CVD de TiCN (sobre substrato), Al₂O₃ (intermediária) e TiN (superfície), comparando através

de ensaios de vida de ferramenta de fresamento de topo, a seco, tanto insertos texturizados a laser quanto com texturizado convencional feita com jateamento.

Os ensaios da pesquisa do Arroyo (2009) foram executados num fresamento de faceamento, em desbaste leve e semi-acabamento, em aço para molde classe ISO P20. Inicialmente foram comparadas amostras dos metais duros com a mesma cobertura utilizada nos ensaios de fresamento, texturizadas com diversos parâmetros de laser pulsado de CuHBr. Para esta comparação de desempenho foram utilizadas análises com MEV, rugosímetro 3D e difratômetro de raio X e indentação Rockwell C. Baseados nestes ensaios iniciais foram escolhidos dois conjuntos de condições de laser para texturizar os insertos da fresa dos ensaios de vida da ferramenta. A fresa utilizada tinha diâmetro efetivo de 26,63 mm, com dois alojamentos para insertos, código: RCKT1204MC.

Nas conclusões do trabalho do Arroyo (2009) foi destacado que a vida das ferramentas de fresamento ensaiadas com os dois conjuntos de parâmetros de texturização a laser foi estatisticamente semelhante a das ferramentas convencionais, portanto, podendo ser considerada um processo alternativo ao jateamento. Também foi concluído que na usinagem todas as ferramentas apresentaram um desgaste semelhante e que, portanto, em nenhum dos casos ocorreu uma queda da aderência do revestimento que viesse a comprometer o rendimento das ferramentas.

Quanto às avarias e aos mecanismos de desgaste, ocorridos nos ensaios do trabalho do Arroyo (2009), não foram detectadas diferenças importantes entre as arestas de ferramentas convencionais e texturizadas a laser. Em todas as arestas ocorreu remoção do material de revestimento, principalmente por abrasão e aparentemente por difusão, mas na maioria dos casos, sem desgastar completamente o revestimento. O fenômeno *attrition* foi detectado na superfície de folga de todas as ferramentas ensaiadas. Em quase todas as arestas ocorreu uma trinca de origem térmica, geralmente solitária, na região de maior espessura média do cavaco, Houve deformação plástica acentuada na classe (ISO P25). Quanto à resistência à delaminação, tanto as ferramentas comerciais quanto as texturizadas a laser, apresentaram resistência similar. Portanto, os resultados baseados nestes resultados pode-se dizer, que a texturização a laser produz similar efeito ao do jateamento por micro-partículas, quando se tem ferramentas recobertas pelo processo CVD.

Viana (2009) estudou a texturização a laser em insertos revestidos pelo processo PVD em TiAlN-Futura, AlCrN-Alcrons e AlCrN-Hélica, através de ensaios de vida de

ferramentas em fresamento frontal de superfícies interrompidas, com insertos de metal duro, classe ISO K25, em corpos de prova de ferro fundido vermicular (237 HB). O desempenho de insertos texturizados a laser revestidos foi comparado, ao dos insertos jateados com micro-partículas (processo convencional) e também revestidos com estas mesmas três coberturas.

Várias análises das ferramentas foram realizadas pelo Viana (2009) em ferramentas com diversos parâmetros de laser, como rugosidade, adesividade do revestimento pelos testes de indentação Rockwell C e de riscamento com carga progressiva e a análise da resistência ao desgaste abrasivo, pelo caloteste.

Foi verificado também, no trabalho do Viana (2009), que a rugosidade 3D (S_a , S_q , S_z e S_t) dos substratos jateados é menor do que a dos texturizados a laser. Quanto aos ensaios de indentação, as ferramentas texturizadas a laser (delaminação em pontos isolados) apresentaram menor delaminação, do que as jateadas (delaminação contínua das bordas). Quanto aos ensaios do caloteste (micro-abrasão), constatou-se que estatisticamente, não houve diferença entre os coeficientes de desgaste das ferramentas obtidas com os dois tipos de texturização. A fresa utilizada nos ensaios de vida de ferramenta, tinha de diâmetro 80 mm e com seis alojamentos para os insertos código: SEMN1204AZ.

Os parâmetros de texturização de melhor desempenho da pesquisa do Viana (2009) foram: Comprimento de onda (λ) = 510 nm; Tempo de pulso (τ) = 30 ns; diâmetro focal = 30 μ m; Frequência de pulsação (f) = 13,8 kHz; Velocidade do feixe = 30 cm/s; Potência média = 2 W e Irradiância = 683 MW/cm². Nos ensaios de fresamento foram feitas oito combinações de condições de usinagem, para três variáveis (velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de corte), em dois níveis cada. Nas conclusões deste trabalho foi destacado que a texturização a laser pode ser uma alternativa no tratamento do substrato de metal duro antes da deposição dos revestimentos em substituição ao processo convencional. Os ensaios de vida neste fresamento frontal de ferro fundido vermicular mostraram o melhor desempenho das ferramentas com texturização a laser pré-cobertura. Os revestimentos TiAlN-Futura e AlCrN-Hélica foram os mais eficientes no processo e condições de usinagem escolhidos. As formas de desgaste observadas foram as de flanco e cratera e os mecanismos de desgaste atuantes foram os de abrasão e adesão para todas as ferramentas ensaiadas.

Ladario (2009), realizou vários ensaios de vida de brocas de aço rápido M2, revestidas com TiN, em aço carbono e aço inoxidável. O desempenho das brocas texturizadas a laser e revestidas foi comparado ao das brocas jateadas por micro-partículas (processo convencional) e revestidas, também por TiN.

Na primeira etapa, do trabalho do Ladario (2009), foram feitos pré-testes para obtenção dos melhores parâmetros do feixe de laser pulsado CuHBr, texturizando corpos de prova, isto é, cilindros do mesmo aço das brocas, com diâmetro 15mm e espessura retificada de 5mm. As análises nos substratos tratados foram visuais (microscópio óptico) e de rugosidade 2D. Após esta etapa de texturização dos corpos de prova, eles foram revestidos.

Nos corpos de prova revestidos, da pesquisa do Ladario (2009), foram feitas análises utilizando-se indentação Vickers (HV) e Rockwell C para os testes de aderência e o MEV para medição do comprimento das trincas. A última etapa consistiu de ensaios de vida da ferramenta. Estes ensaios mostraram que durante a usinagem dos blocos de aço carbono, a broca que executou o maior número de furos, por vida da ferramenta foi a broca texturizada a laser, pré-revestimento, com potência de 1 W (total = 1.680 furos) e a broca que executou o menor número de furos, foi a broca convencional (total = 1.200 furos), representando um aumento de produtividade de 40% a favor do processo de texturização a laser. Mostraram ainda que, durante a usinagem dos blocos de aço inoxidável, a broca mais produtiva foi a broca texturizada a laser, pré revestimento, com potência de 4 W (total = 240 furos), a segunda broca foi a texturizada a laser, com potência de 1 W (total = 190 furos) e as brocas menos produtivas foram empatadas, as brocas convencional e a texturizada a laser, pré-revestimento, com potência de 6W (total = 60 furos).

2.5 Rugosidades tridimensional (3D) e bidimensional (2D)

As superfícies, por mais perfeitas que pareçam, são uma herança do método empregado em sua obtenção, por exemplo, tipo de operação (torneamento, fresamento, retificação, metalurgia do pó ou lapidação). Elas apresentam saliências (picos) e reentrâncias (vales) com espaçamento regular ou irregular, que tendem a formar um padrão ou uma textura característica em sua formação (MITUTOYO, 2012).

A rugosidade ou textura primária é formada por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça e se encontra superposta ao perfil da ondulação.

A ondulação ou textura secundária é o conjunto das irregularidades repetidas em ondas de comprimento bem maior que sua amplitude, surgidas por imprecisões de movimentos dos equipamentos.

A textura superficial é medida através de diversos tipos de aparelhos como ópticos, a laser ou eletro-mecânicos, que são os mais utilizados. Os aparelhos usados para medição da rugosidade são chamados rugosímetros.

Quando se mede a rugosidade, o aparelho mostra o perfil da peça composto da rugosidade e das ondulações, mas através de uma filtragem adequada, ele separa os desvios de forma da rugosidade. (NOVASKI, 1994).

Para se avaliar o perfil da rugosidade ou textura de uma superfície, a medição bidimensional usando rugosímetro que possui apalpador que tem contato com a peça, possui algumas desvantagens. O raio da agulha de contato, que é de aproximadamente 10 micrometros, impossibilita a identificação de pequenos detalhes geométricos do perfil ou de picos muito afiados, o que influencia nos parâmetros derivados da rugosidade. Outro inconveniente, é que a agulha não penetra em superfícies reentrantes, nem em encostas muito íngremes, presentes em superfícies deformadas. Mais uma desvantagem é que materiais muito macios podem ser riscados pela agulha, que também pode comprometer o cálculo dos parâmetros de rugosidade.

Para superar estas limitações dos métodos bidimensionais, foram desenvolvidos vários métodos tridimensionais, sendo que o mais frequentemente usado é o processo de interferometria.

Este processo é baseado em um feixe monocromático de luz que se divide em dois. Um destes feixes é refletido da superfície a medir e o outro de uma referência plana. As duas imagens são sobrepostas, revelando um mapa topográfico, com linhas de contorno alternadas brilhantes e escuras, formando um padrão de interferência, que é fotografado e processado por um software, resultando em uma reprodução gráfica da superfície.

Uma descrição do padrão 3D das superfícies texturizadas por jateamento de micro-partículas e por jateamento a laser é essencial para uma avaliação da rugosidade obtida por estes processos antes e depois das ferramentas serem revestidas e para posterior análise dos desempenhos das ferramentas, em seus testes práticos

(STEPHENSON e AGAPIOU, 1997; QUINSAT, SABOURIN e LARTIGUE, 2007; SCHEY, 1983).

A escolha apropriada do perfil de rugosidade deve ser baseada em conhecimento prévio da relação entre as características da superfície e o desempenho funcional do componente. Se a superfície estiver sujeita a atrito ou deslizamento, esta não deve exibir picos, a fim de se evitar maior geração de ruído e calor, ou vales, que facilitam o micro-fissuramento e a corrosão profundos.

Alguns dos parâmetros da rugosidade tridimensional, mais significativos para análises de superfícies de ferramentas, são:

- Rugosidade Média 3D (S_a) ou distância da linha média (“*Centre Line Average – CLA*”): Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição. Uma das desvantagens deste parâmetro é que nenhuma distinção é feita, entre picos e vales. Este parâmetro pode ser usado em superfícies que foram texturizadas, principalmente, por processo regular e ordenado, como no caso da texturização a laser. Quanto mais baixo o valor, menos rugosa é a superfície.
- Rugosidade 3D Assimetria da curva de distribuição de frequência ou “Skewness” (S_{sk}), mostrada na Figura 2.6: Representa o grau de inclinação, tanto na direção de subida, como da de descida, de uma curva de distribuição de amplitude. O sinal de S_{sk} indica a predominância de picos ($S_{sk}>0$) ou de vales ($S_{sk}<0$) na superfície.

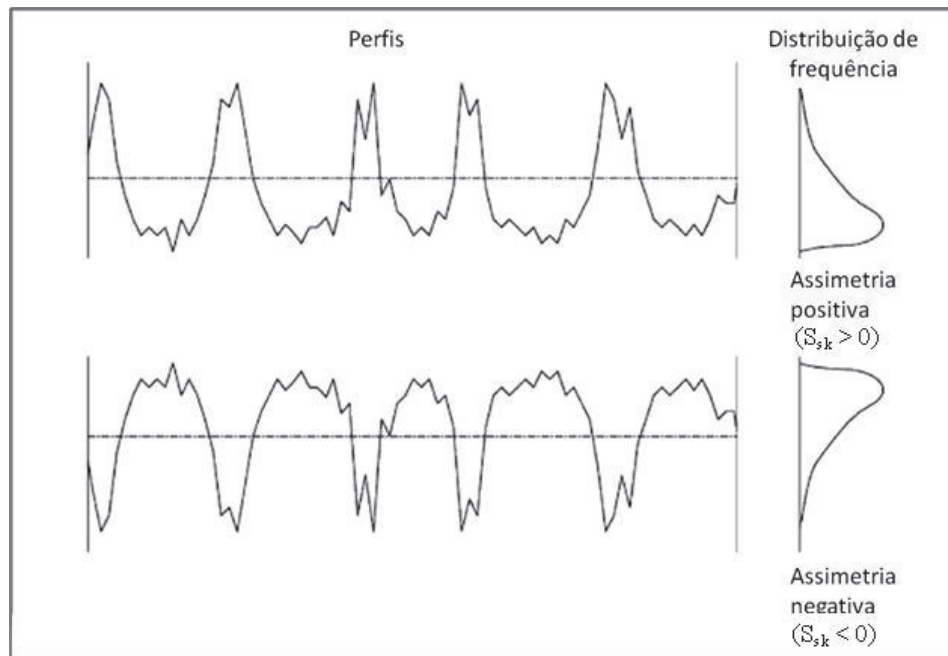


Figura 2.6: Parâmetro S_{sk} ou Assimetria e curva de distribuição de frequência (GADELMAWLA et al., 2002).

- Rugosidade 3D Curtose (medida do achatamento da curva de distribuição de frequência) “Kurtosis” (S_{ku}) ou textura periódica, mostrada na Figura 2.7: Representa o grau de concentração em volta da linha média de uma curva de distribuição da amplitude. Ele avalia a presença ($S_{ku} > 3,00$) ou ausência ($S_{ku} < 3,00$) de altos picos ou vales profundos de maneira desordenada na superfície. Assim esse parâmetro permite avaliar a presença de defeitos nos picos ou vales, por comparação após a ocorrência do atrito.

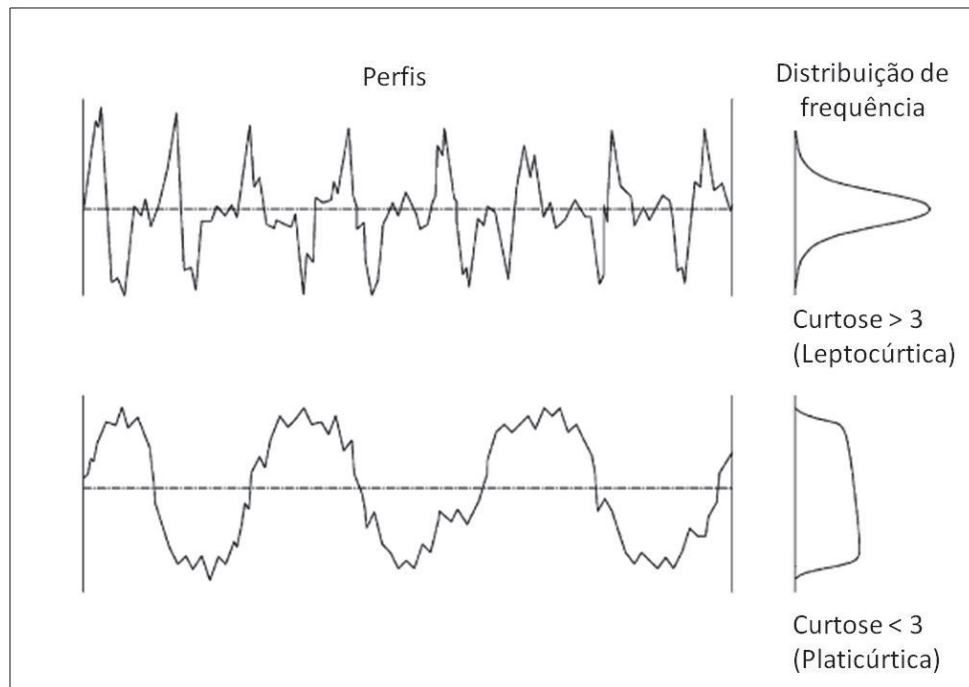


Figura 2.7: Parâmetro S_{ku} ou curtose e curva de distribuição de frequência (GADELMAWLA et al., 2002).

Alguns dos parâmetros de avaliação da Rugosidade bidimensional (2D), que são mais usados são:

- Rugosidade média 2D (R_a): Média aritmética dos valores absolutos dos desvios do perfil (Y_i). Este parâmetro pode ser usado em superfícies, em que o processo de usinagem apresenta sulcos bem orientados, como no caso do torneamento de face. A Figura 2.8 mostra o esquema de cálculo deste parâmetro de Rugosidade 2D.

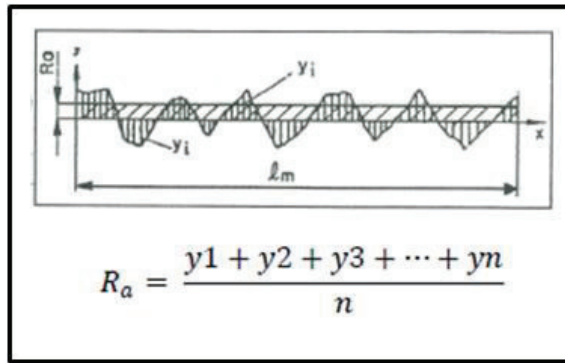


Figura 2.8: Representação esquemática do parâmetro Rugosidade média 2D R_a (MITUTOYO, 2012).

- Rugosidade média 2D (R_z): Média aritmética dos cinco valores da rugosidade parcial Z_i , que graficamente é a altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, dentro do comprimento de amostragem l_c . A Figura 2.9 mostra o esquema de cálculo deste parâmetro de Rugosidade 2D.

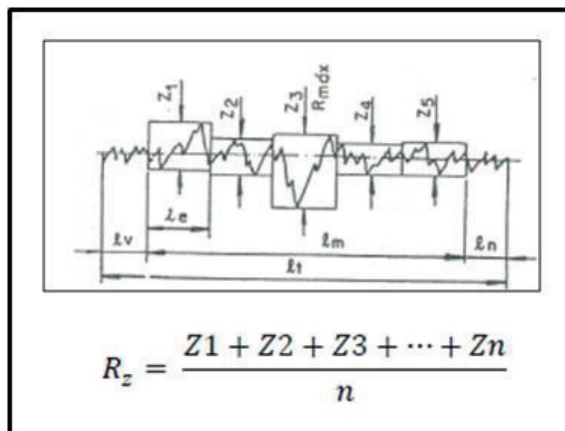


Figura 2.9: Representação esquemática do parâmetro Rugosidade média 2D R_z (MITUTOYO, 2012).

- Rugosidade 2D (R_q): Raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos desvios do perfil (Y_i), a partir da linha média (NOVASKI, 1994). A Figura 2.10 mostra o esquema de cálculo deste parâmetro de Rugosidade 2D.

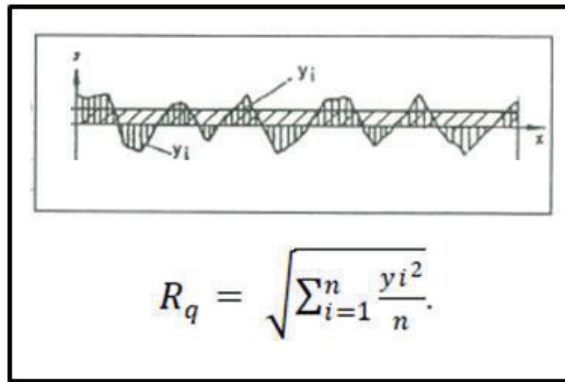
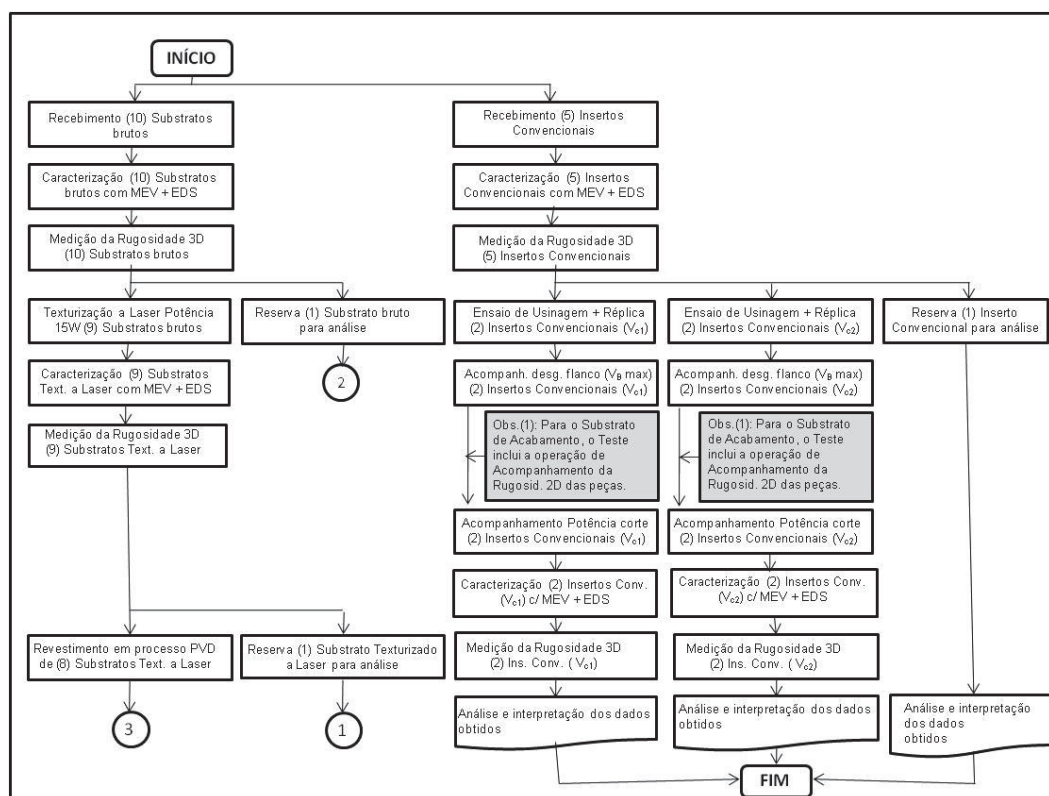


Figura 2.10: Representação esquemática do parâmetro Rugosidade 2D R_q (MITUTOYO, 2012).

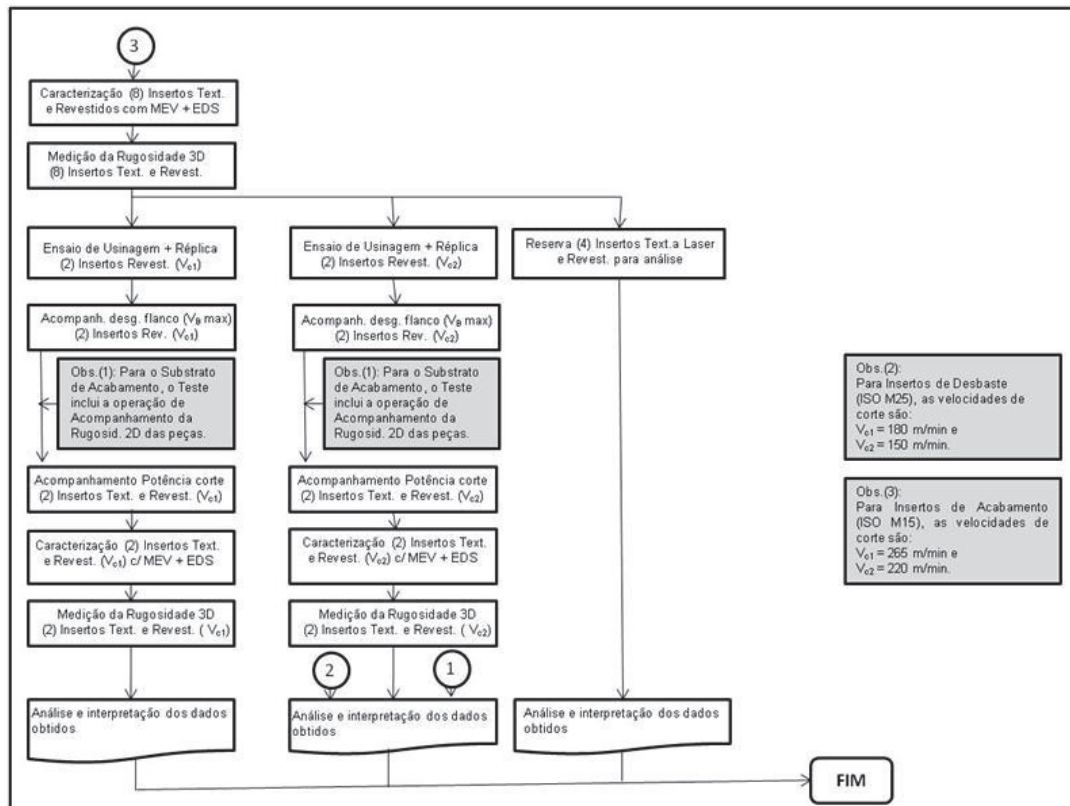
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais e equipamentos utilizados neste trabalho, além dos métodos e planejamento experimental empregados. Estas informações são de suma importância para a documentação deste trabalho científico, uma vez que possibilita o registro de seus detalhes e um melhor entendimento dos processos empregados, para uma possível reprodução do mesmo por pesquisadores, com intenções de futuro desenvolvimento deste mesmo assunto. O planejamento experimental deste trabalho está dividido em duas etapas, a dos experimentos de torneamento de face usando ferramentas e condições de usinagem específicas para desbaste e as específicas para acabamento.

Nas Figuras 3.1 (a) e (b) são mostrados um fluxograma das tarefas realizadas para que os experimentos fossem concluídos e, a partir do item 3.1, tem-se a descrição dos materiais utilizados, bem como dos métodos.



(a)



(b)

Figura 3.1:(a) e (b) Fluxograma das atividades desenvolvidas para realização dos ensaios.

3.1 Materiais

3.1.1 Máquina ferramenta

A máquina ferramenta utilizada nos testes práticos de torneamento de face deste trabalho está localizada no Laboratório de Usinagem do DEF da UNICAMP e é um Torno horizontal CNC modelo: Galaxy 20, fabricante ROMI, computência de 15 kW e rotação máxima do eixo árvore de 4.500 rpm, conforme mostrado na Figura 3.2.



Figura 3.2:Máquina ferramenta utilizada nos testes práticos.

A potência de corte consumida nesta operação de usinagem foi monitorada e registrada, segundo a segundo, no microcomputador acoplado à máquina, em que os sinais foram processados por um programa especial feito com software MATLAB, que fornece a análise gráfica da potência de corte, sob o parâmetro de (eV), que multiplicado pelo fator: (1,47), pode nos fornecer os valores da potência consumida em (kW).

3.1.2 Fluido de corte

A operação de torneamento da face deste trabalho foi feita utilizando uma emulsão oleosa, de fluido de corte, à base de óleo mineral, miscível em água e isento de cloro, fornecida pelo fabricante BLASER Swisslube, na concentração de 6%.

3.1.3 Rugosímetro tridimensional (3D)

O rugosímetro 3D utilizado foi um perfilômetro, modelo: WYKO NT1100, fabricado pela empresa: VEECO Instruments e pertencente ao Laboratório de Engenharia de Precisão da Escola de Engenharia de São Carlos, USP (EESC-USP).

3.1.4 Rugosímetro bidimensional (2D)

O rugosímetro portátil 2D utilizado era do modelo SJ 201-P, fabricado pela empresa: MITUTOYO, pertencente ao Laboratório de Usinagem da Engenharia de Fabricação (DEF/FEM) da UNICAMP, conectado a um microcomputador, em que os sinais são processados pelo programa: SJ-201 (Excel), que fornece a análise gráfica do perfil além de três parâmetros de rugosidade: R_a , R_q e R_z .

3.1.5 Microscópio óptico

O microscópio óptico utilizado neste trabalho foi o modelo: BX51-M, fabricado pela empresa: OLYMPUS e a câmera óptica de 1,3 M pixels usada foi a modelo: Moticom 1000, marca: MOTIC, ambos conectados a um microcomputador, em que os sinais são processados por um programa de processamento de imagens MOTIC Images Plus, com o qual se pode medir o valor de desgaste de flanco das ferramentas (V_B). Estes equipamentos, conforme mostrados na Figura 3.3, estão localizados no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica (DEF/FEM) da UNICAMP.



Figura 3.3: Microscópio e câmera ópticos usados para medição do desgaste de flanco das ferramentas.

3.1.6 Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado neste trabalho foi o modelo EVO/MA15, marca: ZEISS (Alemanha), pertencente ao Laboratório de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica (DEMA/FEM) da UNICAMP. O MEV possui o recurso de Espectrometria de energia dispersiva (EDS), que permite a identificação semi-quantitativa dos elementos químicos presentes na superfície analisada e de Elétrons Retroespalhados (BSE), para identificação de delaminações e micro-trincas no revestimento das ferramentas analisadas, após o teste de indentação Rockwell C. Também foi utilizado para análise do mecanismo de desgaste das ferramentas em fim de vida.

3.1.7 Durômetro Rockwell C

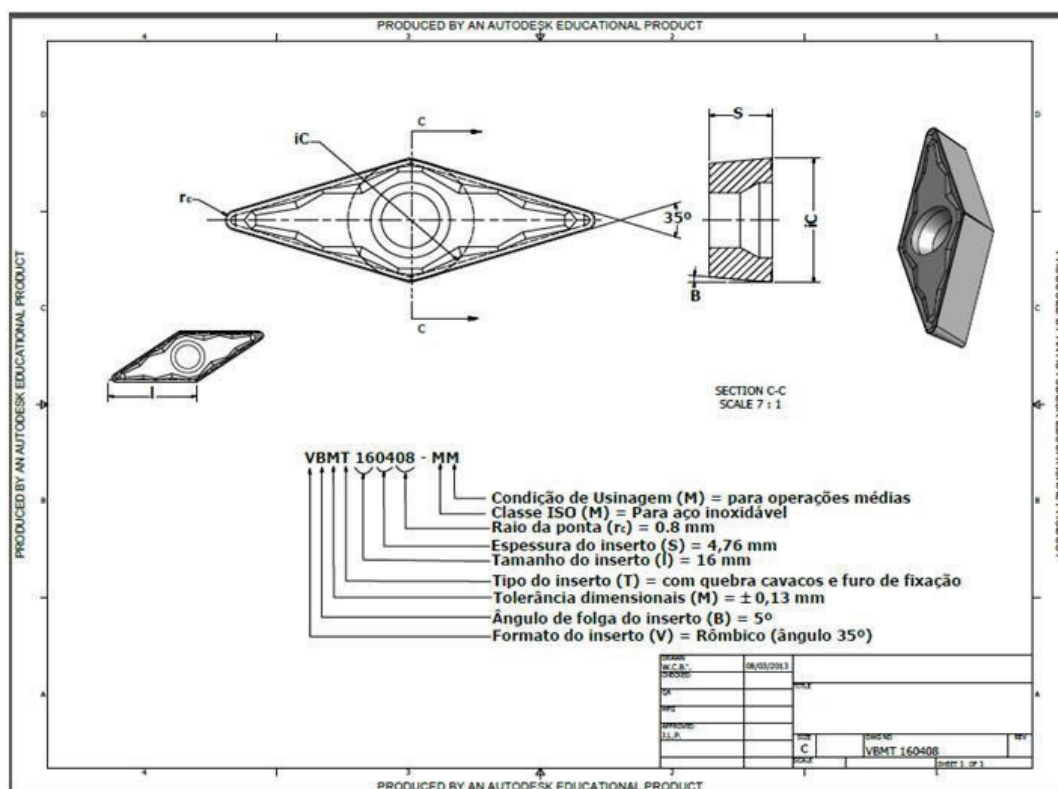
O durômetro Rockwell C utilizado neste trabalho (nos testes de indentação Rockwell C das coberturas de ferramentas) foi o modelo Pantec, fabricante PANAMBRA (Alemanha) do Departamento de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica (DEMA/FEM) da UNICAMP.

3.1.8 Suporte porta-ferramentas

Os testes práticos deste trabalho foram realizados com um Suporte porta-ferramenta fornecido pela empresa SANDVIK Coromant, código: SVJBR 2525 M16, conforme mostrado na Figura 3.4 e no detalhamento do código na Figura 3.5.

3.1.9 Ferramenta: Inserto de metal duro para Desbaste

Os testes práticos com ferramentas em condições de usinagem de Desbaste foram realizados com dois tipos de Insertos de metal duro fornecidos pela empresa SANDVIK Coromant, ambos com código ISO VBMT 160408-MM e substrato classe ISO M25, conforme detalhamento mostrado na Figura 3.6.



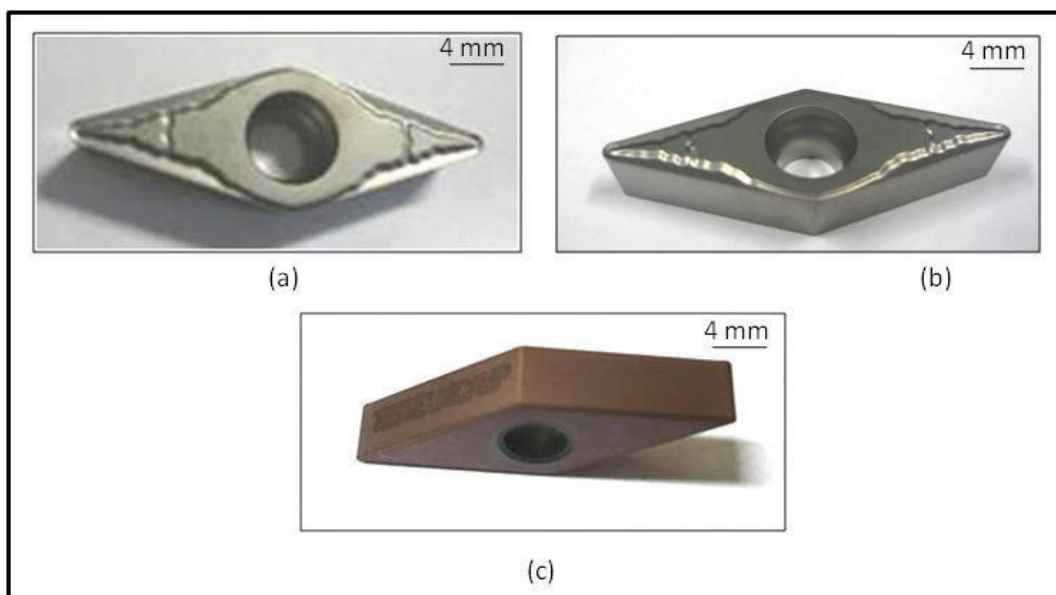


Figura 3.7: (a) Substrato bruto de metal duro de Desbaste (ISO M15) como recebido do fabricante; (b) Substrato texturizado a laser; (c) Inserto texturizado a laser pré-revestimento com cobertura TiAlN, para usonos testes práticos.

O outro tipo de ferramenta de Desbaste (ISO M25) recebida para este trabalho foi na condição de Inserto convencional ou jateado com micro-partículas de óxido de alumínio e revestido com tripla-camadas de TiAlN/(Al,Cr)₂O₃/TiAlN pelo processo PVD.

A análise do substrato do inserto revestido foi feita em amostra embutida em baquelite e posteriormente polida, conforme mostrado nas Figuras 3.8 (a) e (b), de acordo com processo usado na metrologia do fabricante das ferramentas e no equipamento de microscopia eletrônica de varredura (MEV), pertencente ao Laboratório do DEMA/FEM da UNICAMP.

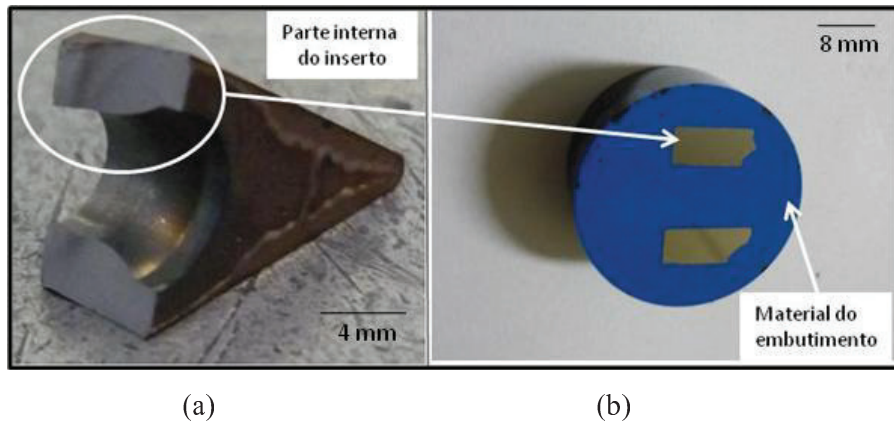


Figura 3.8:(a) Inserto de metal duro texturizado a laser com cobertura; (b) Corpos de prova embutidos e polidos da parte interna de inserts de metal duro revestidos para análise da microestrutura do substrato e espessura do revestimento.

O substrato do inserto utilizado nos ensaios de Desbaste (classe ISO M25) é constituído de micro-grãos, conforme mostrado na Figura 3.9.

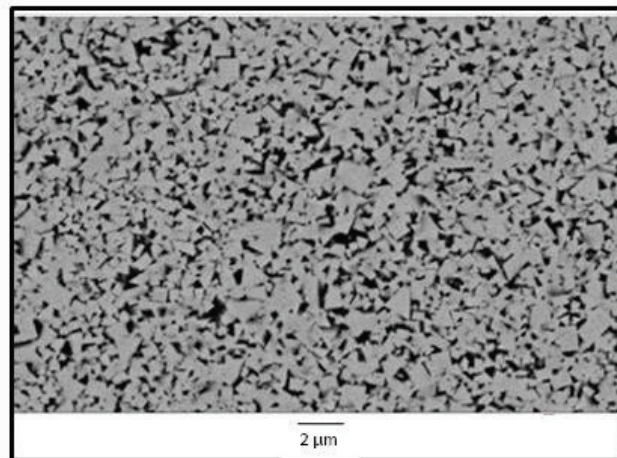


Figura 3.9: Micrografia do substrato do inserto de metal duro utilizado no ensaio de Desbaste (classe ISO M25) no corpo de prova embutido e polido.

O fabricante recomenda que este inserto classe ISO M25 seja utilizado em velocidades de corte médias até baixas. Este substrato é excelente quando for necessário a ação de corte vivo com tenacidade superior da aresta. A grande resistência a choques térmicos o torna adequado para cortes levemente intermitentes (SANDVIK Coromant, 2012).

A principal função da primeira camada deste revestimento tripla camadas (TiAlN / (Al, Cr)₂O₃ / TiAlN) deste inserto, a de nitreto, é a de aumentar a tenacidade da aresta de corte.

A função da segunda camada, a de óxido, é a de aumentar a resistência ao calor e a resistência ao desgaste de cratera da ferramenta.

A função da terceira camada, de nitreto, é a de dar uma cor uniforme à ferramenta e melhorar a detecção do desgaste (SANDVIK Coromant, 2012) e também diminuir seu coeficiente de atrito.

A espessura média encontrada nos insertos revestidos de TiAlN pelo processo PVD de Desbaste deste trabalho foi de 3,702 μm , conforme mostrado na Figura 3.10.

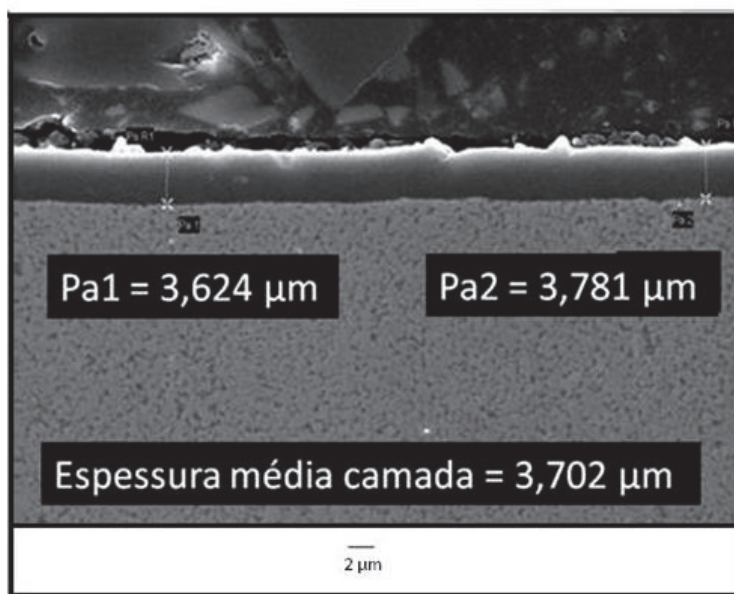


Figura 3.10: Análise da espessura média do revestimento de TiAlN / (Al,Cr)₂O₃ / TiAlN do inserto utilizado no ensaio de Desbaste (classe ISO M25), no corpo de prova embutido e polido.

3.1.10 Ferramenta: Inserto de metal duro de Acabamento

Os testes práticos com ferramentas em condições de usinagem de Acabamento foram realizados com dois tipos de Insertos de metal duro fornecidos pela empresa SANDVIK Coromant, ambos também com código ISO VBMT 160408-MM, porém

com substrato classe ISO M15, conforme o mesmo detalhamento mostrado na Figura 3.6.

Um dos dois tipos de ferramentas de Acabamento também recebido para este trabalho foi na condição de Substrato de metal duro bruto (ISO M15), para depois ser texturizado a laser. Depois de texturizado a laser este substrato foi revestido com tripla-camadas de $\text{TiAlN}/(\text{Al,Cr})_2\text{O}_3/\text{TiAlN}$ pelo processo PVD, também feito pelo fabricante, para ser usado nos ensaios e está ilustrada nas Figuras 3.11 (a), (b) e (c).

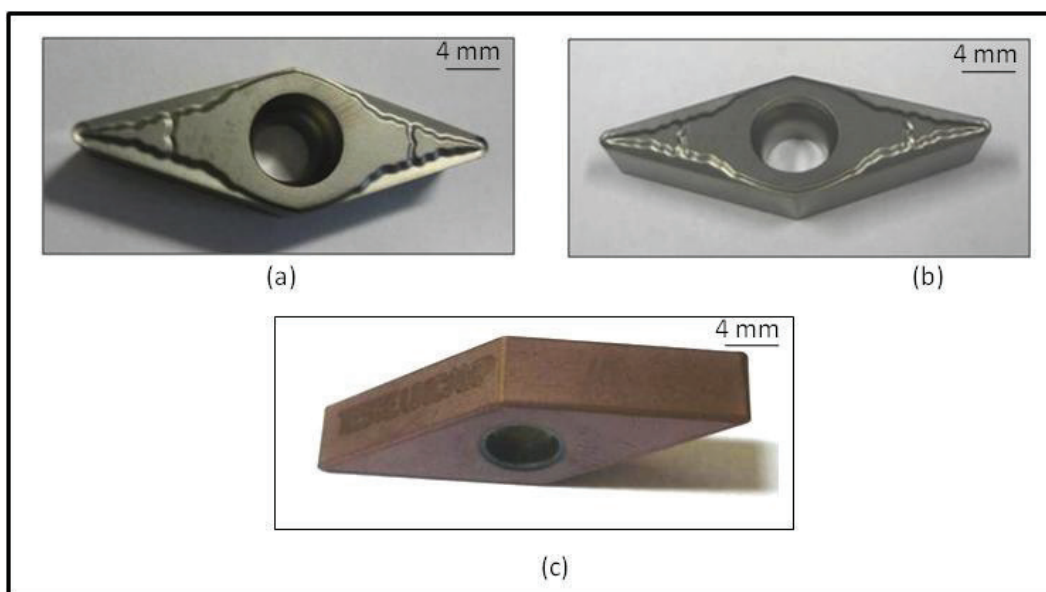


Figura 3.11: (a) Substrato bruto de metal duro de Desbaste (ISO M15) como recebido do fabricante; (b) Substrato texturizado a laser; (c) Inserto texturizado a laser pré-revestimento com cobertura TiAlN , para uso nos testes práticos.

O outro tipo de ferramenta de Acabamento (ISO M15) recebido para este trabalho também foi na condição de Inserto convencional ou jateado com micropartículas de óxido de alumínio e revestido com tripla-camadas de $\text{TiAlN}/(\text{Al,Cr})_2\text{O}_3/\text{TiAlN}$ pelo processo PVD.

O substrato do inserto utilizado nos ensaios de Acabamento (classe ISO M15) é constituído de grão finos, conforme mostrado na Figura 3.12.

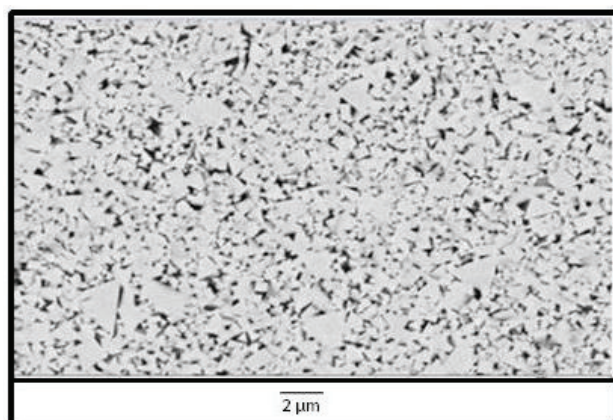


Figura 3.12: Micrografia do substrato do inserto de metal duro utilizado no ensaio de Acabamento (classe ISO M15) no corpo de prova embutido e polido.

Este inserto de classe ISO M15 tem alta dureza ao calor e boa resistência contra deformação plástica, combinado com a boa segurança da aresta de corte.

O revestimento do processo PVD à base de óxidos tem excelente resistência a materiais abrasivos e boa adesão a arestas vivas. Isto garante a tenacidade, desgaste de flanco uniforme e alto desempenho (SANDVIK Coromant, 2012).

A espessura média encontrada nos insertos revestido de TiAlN pelo processo PVD de Acabamento deste trabalho foi de 3,857 μm , conforme mostrado na Figura 3.13.

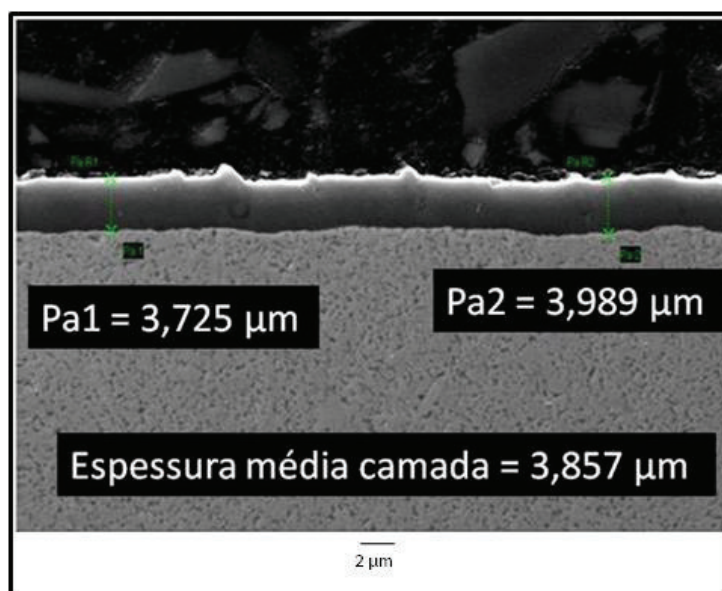


Figura 3.13: Análise da espessura média do revestimento de TiAlN / (Al,Cr)₂O₃ / TiAlN do inserto utilizado no ensaio de Acabamento (classe ISO M15) no corpo de prova embutido e polido.

3.1.11 Corpos de Prova

O material escolhido para os corpos de prova dos testes práticos foi o aço inoxidável V316L, que foi fornecido pelo fornecedor Villares Metals, em barras redondas com dimensões diâmetro 100 mm x comprimento 500 mm e na composição química de: 0,028%C; 0,34%Si; 1,75%Mn; 16,70%Cr; 10,30% Ni; 2,11% Mo; 0,35% Cu; 0,38% P e 0,003% S; com Módulo de elasticidade de 278,5 GPa; densidade de 7,85 gm³; dureza 160,5 a 184,1 HB. Este aço inoxidável é indicado para a fabricação de conjuntos soldados, que não podem ser austenitizados após a solda; aplicações criogênicas, sujeitas a choques e impactos; nas indústrias química e petroquímica; nas indústrias de alimentos e bebidas; nas indústrias farmacêutica e hospitalar; nas indústrias de papel e celulose; em máquinas e equipamentos; em aplicações gerais e na indústria naval.

As barras de 500 mm de comprimento foram cortadas na Serra horizontal de fita localizada no Laboratório de Usinagem do DEF da UNICAMP, em sete pedaços de aproximadamente 70 mm de comprimento.

Um croqui dos corpos de prova com suas dimensões está mostrado na figura 3.14e alguns exemplos dos corpos de prova em barra cortada e as Vistas lateral e frontal dos corpos de prova pré-torneados e pré-furados estão mostrados nas Figuras 3.15 (a), (b) e (c).

3.2 Métodos

3.2.1 Texturização a laser do substrato de Desbaste (ISO M25) e de Acabamento (ISO M15)

Para o processo de texturização a laser dos substratos de Desbaste e Acabamento deste trabalho foi utilizado o laser de Nd-YAG (cristal de neodímio dopado com alumínio granada de ítrio), do fabricante: COHERENT (EUA), que vem sendo utilizado no IEAv/CTA em São José dos Campos, desde 1983.

O laser do IEAv é de alta potência e é uma matriz de $Y_2 Al_5 O_{12}$ (alumínio granada de ítrio) dopada com cerca de 1% de Nd (íons de Neodímio Nd^{3+}), que ocupam o lugar do ítrio (Y^{3+}). O bombeamento do laser é óptico e feito por diodo laser, por lâmpada de Xenônio (Xe - 0,5 até 1,5 atm) para operação pulsada. A emissão do laser ocorre devido às transições eletrônicas em 1,06 μm e é operado em regime de Q-Switched. As características operacionais do sistema da fonte laser são:

- Comprimento de onda e com feixe: 532nm,
- Frequência de operação: fixada em 10 kHz;
- Largura de pulso: 130 ns;
- Estabilidade da Energia: < 0,08% rms;
- Diâmetro do feixe: 5 mm nominal;
- Potência máxima do feixe: 45W.

Alguns destes parâmetros de um feixe de laser de Nd-YAG são mostrados na Figura 3.16.

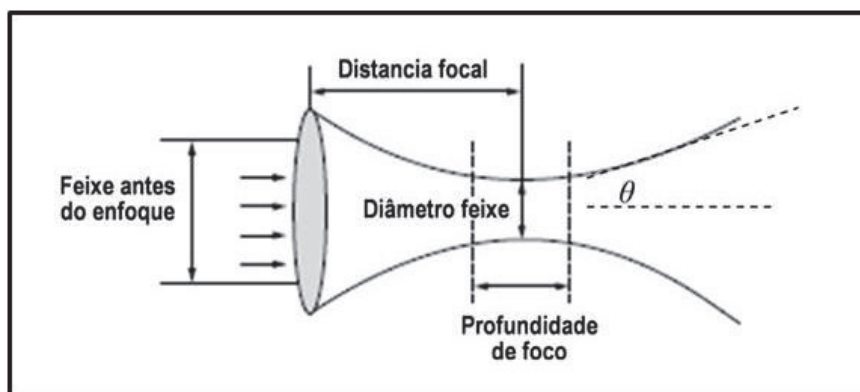


Figura 3.16: Principais parâmetros espaciais do feixe laser focalizado [adaptado de ZHANG , YAO e CHENG, 2006].

O sistema laser utilizado neste trabalho opera em regime pulsado, com taxas de repetição de pulsos variáveis entre 5 kHz e 25 kHz. Neste intervalo de operação, a largura temporal do pulso de laser varia de 40 ns a 130 ns. A energia e a potência de pico dos pulsos de radiação variam com a taxa de repetição e a corrente de bombeamento dos diodos. O sistema é composto de uma fonte de potência, uma cabeça laser e um microcomputador de controle.

Para a execução deste trabalho foi escolhido o conjunto de parâmetros de laser e o processo de texturização que obteve a maior vida das ferramentas, na tese de doutorado do Dr. David Neves, cujo título é: “Influência da texturização laser na vida de ferramentas de torneamento revestidas por CVD e PVD” (NEVES, 2010).

Também foi utilizado um dispositivo especial de fixação dos inserts na mesa do equipamento de laser, conforme mostrado nas Figuras 3.17 e 3.18 (a), (b) e (c), a fim de que as superfícies de saída e de folga das ferramentas a serem texturizadas, ficassem exatamente a um ângulo de 90° do feixe do laser.

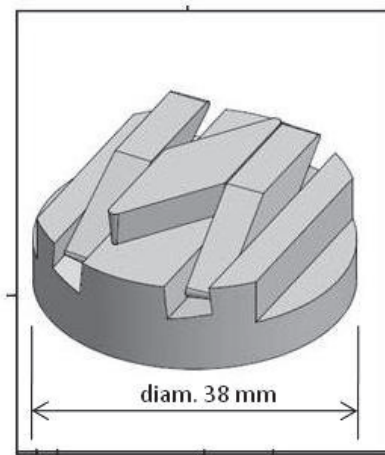


Figura 3.17: Dispositivo de fixação dos substratos de metal duro para processo de texturização a laser.

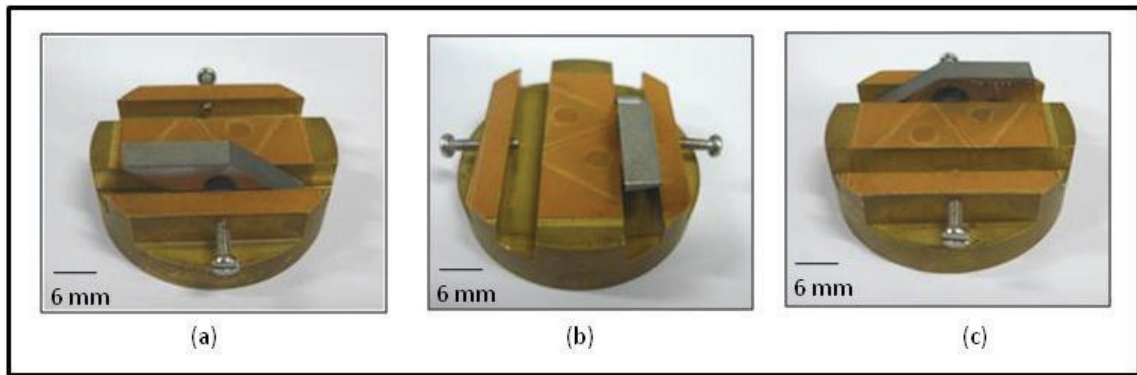


Figura 3.18: (a) Vista posterior do substrato no dispositivo de fixação construído para posicionar os substratos de metal duro no equipamento de texturização a laser; (b) Vista de topo; (c) Vista frontal do substrato na posição de texturização da superfície de folga.

A redução do diâmetro do feixe de 5 mm da fonte do laser para um diâmetro de 0,1 mm incidente sobre a superfície a ser texturizada, se dá através de um conjunto de espelhos e lentes, que direciona o feixe para um sistema galvanométrico de varredura. Este sistema é um conjunto monobloco, que consiste de uma montagem de dois espelhos, cada um acoplado a um motor com detector de posição e uma lente de focalização, que garantem o preciso posicionamento de um trem de pulsos sobre a superfície da amostra, conforme mostrado na figura 3.19.

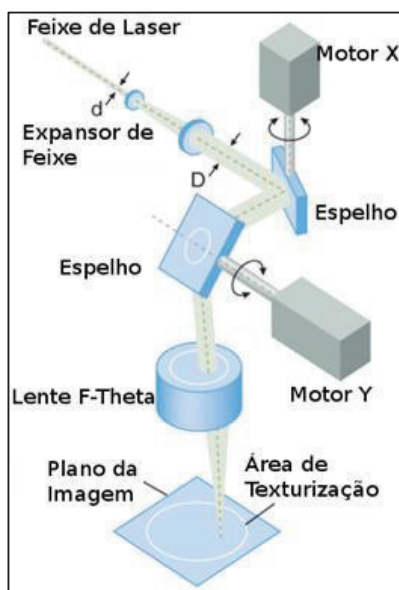


Figura 3.19:Esquema do Sistema de Galvanométrico de Texturização.

Desta forma, utilizando uma variedade de fontes de laser é possível realizar, mediante programação de um software dedicado, interação entre laser e material, que pode consistir de pulsos seqüenciais únicos tangentes, superpostos ou defasados. Com isso, é possível gerar em uma superfície plana, qualquer elemento geométrico composto por uma sucessão de pulsos. A utilização deste sistema impõe uma perda de potência luminosa, fazendo com que a energia, que incide sobre a superfície a ser texturizada, seja de exatamente um terço da energia de saída da fonte do laser (NEVES, 2010).

A potência, a intensidade e a fluência acumulada do laser adotadas neste trabalho foram também as que resultaram em melhor vida útil das ferramentas da tese de referência (NEVES, 2010), isto é, 15 W, 147 MW/cm² e 57,30 J/cm² respectivamente.

A texturização a laser do substrato de metal duro foi feita pela digitalização da superfície com trilhos paralelos de pulsos de laser de foco de diâmetro (100 µm), espaçados por intervalos de (70 µm), isto é, 70% do diâmetro do feixe, conforme ilustrado na Figura 3.20.

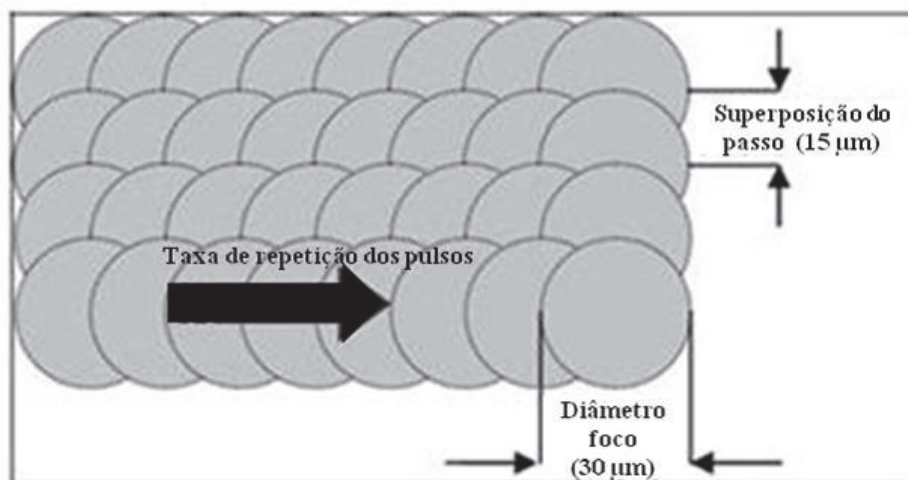


Figura 3.20: Esquema de distribuição dos pulsos de laser na superfície do substrato (NEVES, 2010).

Cada pulso na sua interação com a superfície pode provocar o aquecimento, a fusão, a evaporação e a ablação de material, e desta forma promover micro alterações superficiais. A Figura 3.21 mostra aspectos geométricos da texturização a laser na superfície da ferramenta.

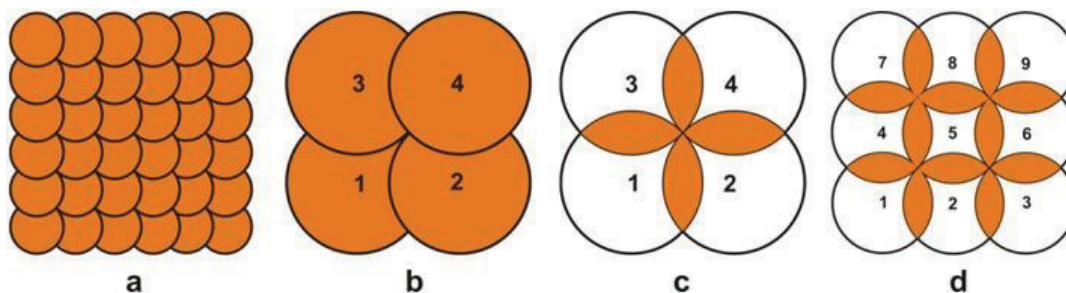


Figura 3.21: Aspectos geométricos da texturização. (a) Superposição de pulsos de texturização; (b) Sequenciamento de pulsos; (c) Áreas superexpostas; (d) Formação de padrão de texturização.

A idéia da superposição dos pulsos tem como conseqüência a geração de áreas que se interceptam, isto é, que são expostas mais de uma vez, à interação com o laser. Como as regiões resultantes da intersecção de pulsos sofrem duas interações com o laser, estas regiões podem apresentar possíveis depressões formadas na superfície, devido à dupla exposição do material ao feixe de laser.

A fim de aumentar o número de texturizações, com vales e picos, que poderiam ser induzidos pela existência de áreas de simples e dupla exposição do laser, como no caso das regiões de intersecção dos pulsos, foi adotado um sistema de repetição triplo da varredura do laser sobre a superfície. Cada uma das três varreduras foi feita rotacionando-se em 60° , o programa de pulsos do feixe de laser sobre a superfície da ferramenta, conforme ilustrado nos esquemas ilustrativos das Figuras 3.22 (b) texturização no ângulo de 0° , Figura 3.22 (c) texturização no ângulo de 60° e Figura 3.22 (d) texturização no ângulo de 120° .

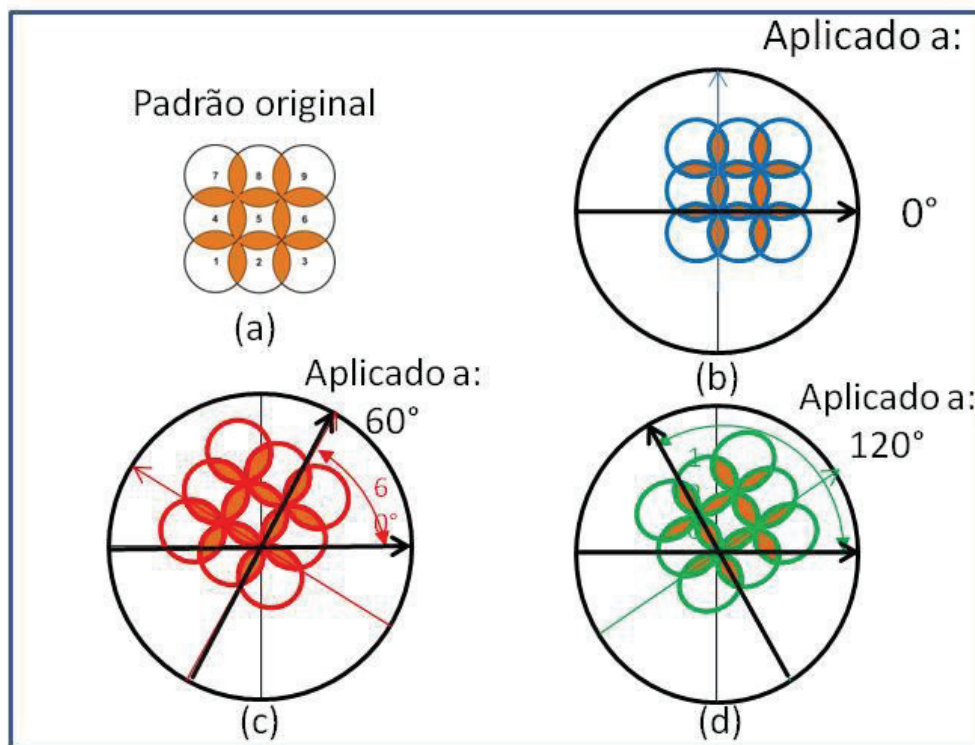


Figura 3.22: Esquema de aplicação do padrão de texturização a laser: (a) Padrão original; (b) Aplicação do padrão a 0° do eixo horizontal; (c) Aplicação do padrão a 60° do eixo horizontal; (d) Aplicação do padrão a 120° do eixo horizontal.

Na Figura 3.23 observa-se um esquema ilustrativo destas três texturizações que foram sobrepostas na mesma superfície, defasadas em ângulos diferentes, com suas respectivas regiões de simples e dupla exposição do laser (regiões de intersecção dos pulsos) e portanto, tendo como resultado a presença de regiões de simples até sêxtupla exposição do laser.

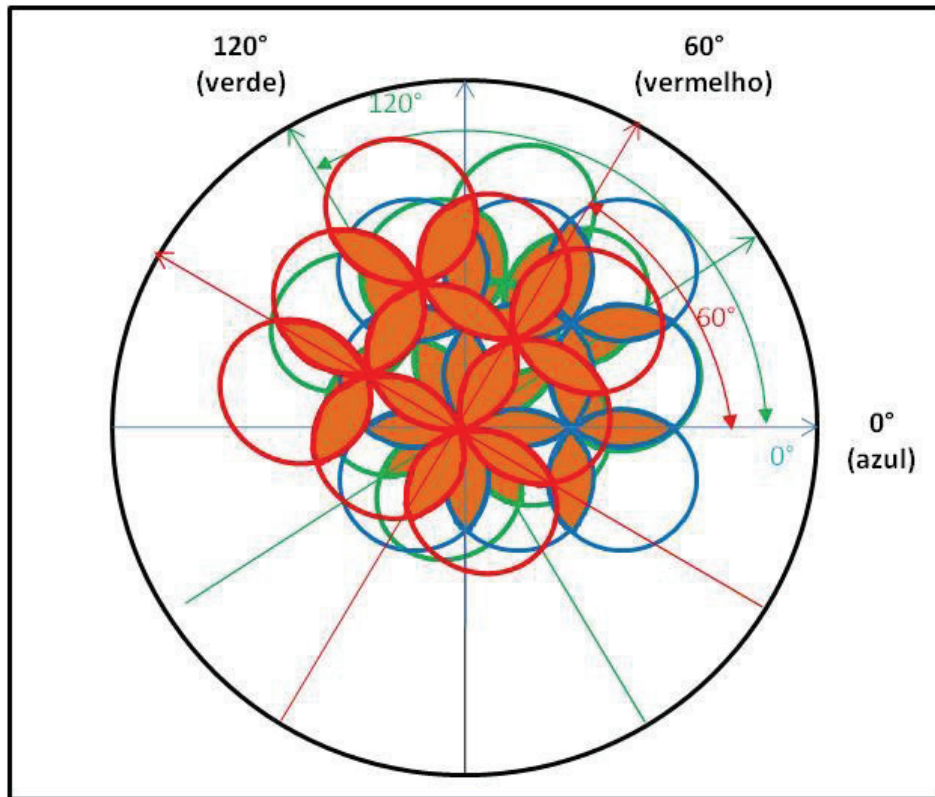


Figura 3.23: Resultado da aplicação do padrão original da texturização a laser em sobreposição a: 0° do eixo horizontal (foco do laser em azul), 60° do eixo horizontal (foco do laser em vermelho) e 120° do eixo horizontal (foco do laser em verde).

As Figuras 3.24 (a) e (b) mostram micrografias de exemplos de superfícies de folga e as Figuras 3.25 mostram exemplos de superfícies de saída de substratos de metal duro, texturizado a laser, utilizados nos ensaios de: (a) e (c) Desbaste, (b) e (d) Acabamento, resultantes do processo de texturização deste trabalho.

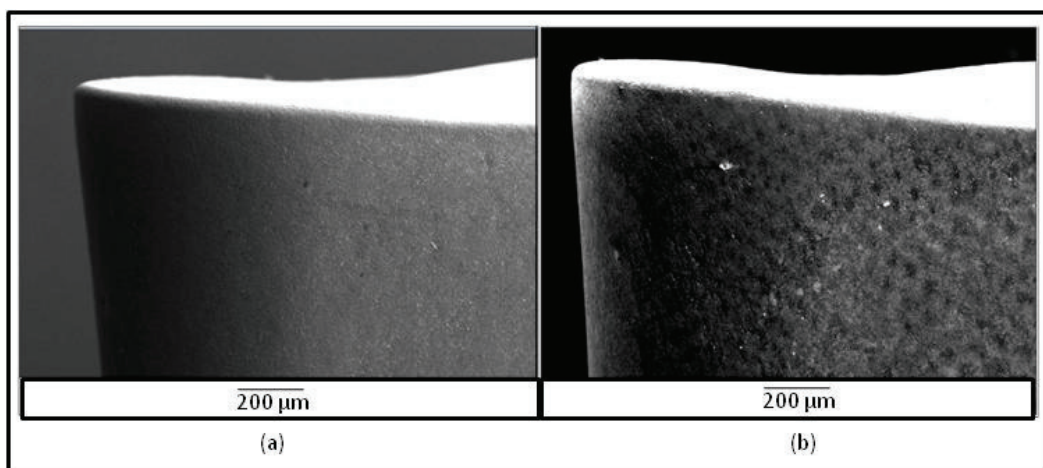


Figura 3.24: Morfologia das superfícies de folga dos substratos sem cobertura: (a) Bruto e (b) Texturizado a laser.

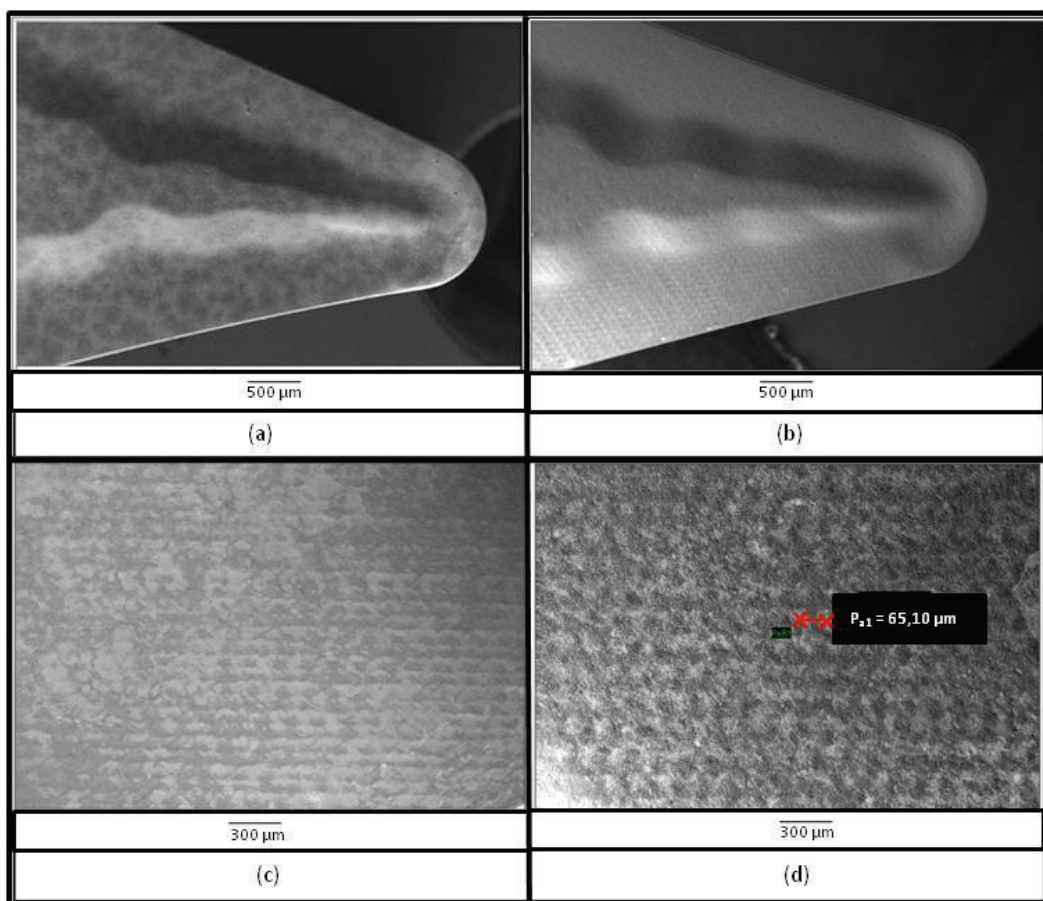


Figura 3.25: Morfologia das superfícies de saída dos substratos texturizados a laser, utilizados nos ensaios de: (a) e (c) Desbaste e (b) e (d) Acabamento.

3.2.2 Caracterização superficial

Tanto os substratos dos insertos, quanto a ferramenta já pronta para uso após o processo de revestimento e também os corpos de prova dos ensaios de torneamento, passaram por diversas análises que estão descritas a seguir.

3.2.2.1 Rugosidade tridimensional

O perfil de rugosidade dos substratos: bruto e texturizados a laser e dos insertos revestidos por PVD, foi avaliado tridimensionalmente pelo processo de interferometria.

3.2.2.2 Rugosidade bidimensional

O perfil de rugosidade dos corpos de prova usinados com ferramentas em condições de usinagem de acabamento foi avaliado bidimensionalmente, na face das peças, em três medições, no sentido radial e na direção perpendicular às marcas de avanço deixadas pela ferramenta do torneamento de face. O valor adotado de cut-off foi de: 0,8 mm.

3.2.3 Caracterização visual

A caracterização visual e a visualização da progressão do desgaste das ferramentas, até atingir a largura máxima do desgaste de flanco ($V_{Bmax} = 0,3 \text{ mm}$) e atingir o fim da vida da ferramenta, durante os testes práticos foram avaliadas pelo processo: óptico.

3.2.4 Caracterização estrutural

O objetivo destes testes foi verificar possíveis mudanças da dureza dos substratos bruto, texturizados a laser e depois revestidos por PVD e poder compará-las com os valores informados pelo fabricante para as ferramentas convencionais. Para esta caracterização foram feitos teste de aderência utilizando indentação Rockwell C e exames no microscópio eletrônico de varredura com análise EDS. Estes testes estão descritos a seguir.

3.2.4.1 Caracterização da aderência do revestimento no substrato

Para avaliar a aderência do revestimento no substrato das ferramentas de metal duro utilizadas neste trabalho, foi realizado o teste de indentação Rockwell C, utilizando um durômetro. Foi usado um penetrador cônico de diamante (120° , Raio de ponta 0,2mm), pré-carga de 10 kgf e carga de 150 kgf. Este teste foi escolhido por ser rápido, de baixo custo e empregado em pesquisas e ambientes industriais.

Foram feitas duas indentações Rockwell C em cada inserto de metal duro revestido, em locais pré-definidos, uma de cada lado do furo de fixação, conforme mostrado na Figura 3.26.

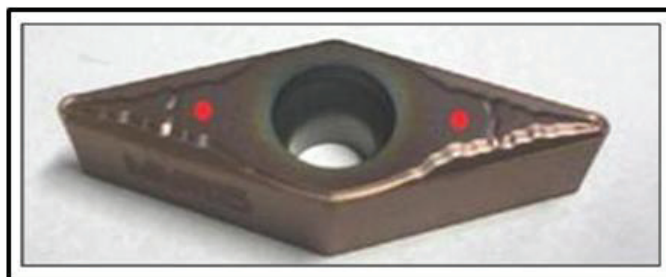


Figura 3.26: Locais das indentações Rockwell C (círculos em vermelho), em um exemplo de inserto de metal duro revestido, utilizado nos ensaios de Desbaste.

Após isso, foram feitas micrografias destas indentações Rockwell C no equipamento de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e, através do processo de elétrons retro-espalhados (BSE), também no MEV, foram feitas as análises das trincas dos revestimentos, conforme mostrado nas Figuras 3.27 (a), (b), (c), (d) e (e).

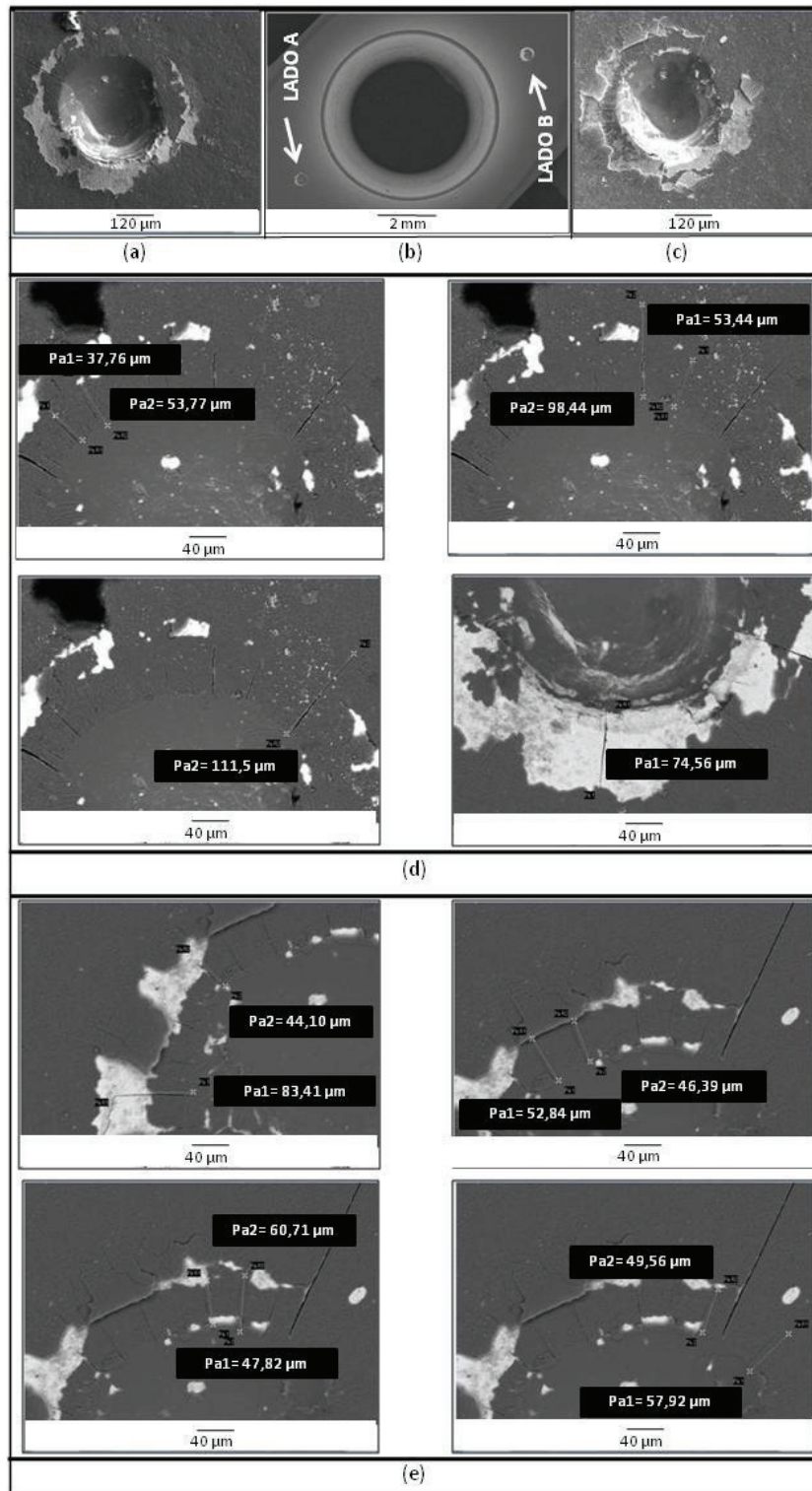


Figura 3.27:(a), (b) e (c) Indentações Rockwell C; (d) e (e): Trincas do revestimento após indentações Rockwell C, nos lados A e B de um exemplo de inserto de metal duro revestido, utilizado para ensaios de Acabamento.

A comparação entre os diferentes tipos de insertos foi feita também, seguindo os seguintes critérios:

- 1) Comprimento das trincas;
- 2) Quantidade de trincas.

As imagens obtidas no MEV foram então, analisadas e comparadas com o padrão mostrado na Figura 3.28. A comparação da indentação na amostra com este padrão dá uma visão qualitativa de aderência de cobertura com o substrato.

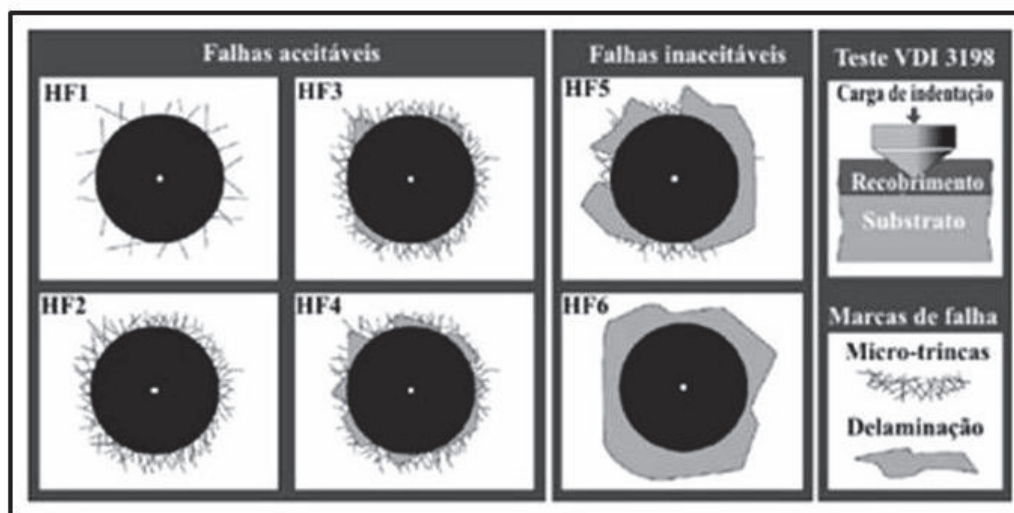


Figura 3.28: Princípio do Teste de Aderência por Indentação VDI 3198 (Rockwell C). (VIDAKIS, ANTONIADIS e BILALIS, 2003).

3.2.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS

Para facilitar a análise do processo de texturização a laser, os substratos de metal duro antes e depois de terem sido texturizados a laser e os insertos depois de revestidos por PVD foram analisados em um microscópio eletrônico de varredura com EDS, pertencente ao Laboratório do DEMA/FEM da UNICAMP.

Para a análise dos fenômenos de desgaste, as ferramentas de torneamento também foram inspecionadas no MEV com EDS após os ensaios de torneamento da face.

3.2.5 Ensaio de torneamento da face (Ensaio de vida de ferramenta)

Esta etapa do trabalho foi realizada no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica (DEF/FEM) da UNICAMP.

A trajetória da ferramenta de corte nos ensaios realizados está mostrada na Figura 3.29.

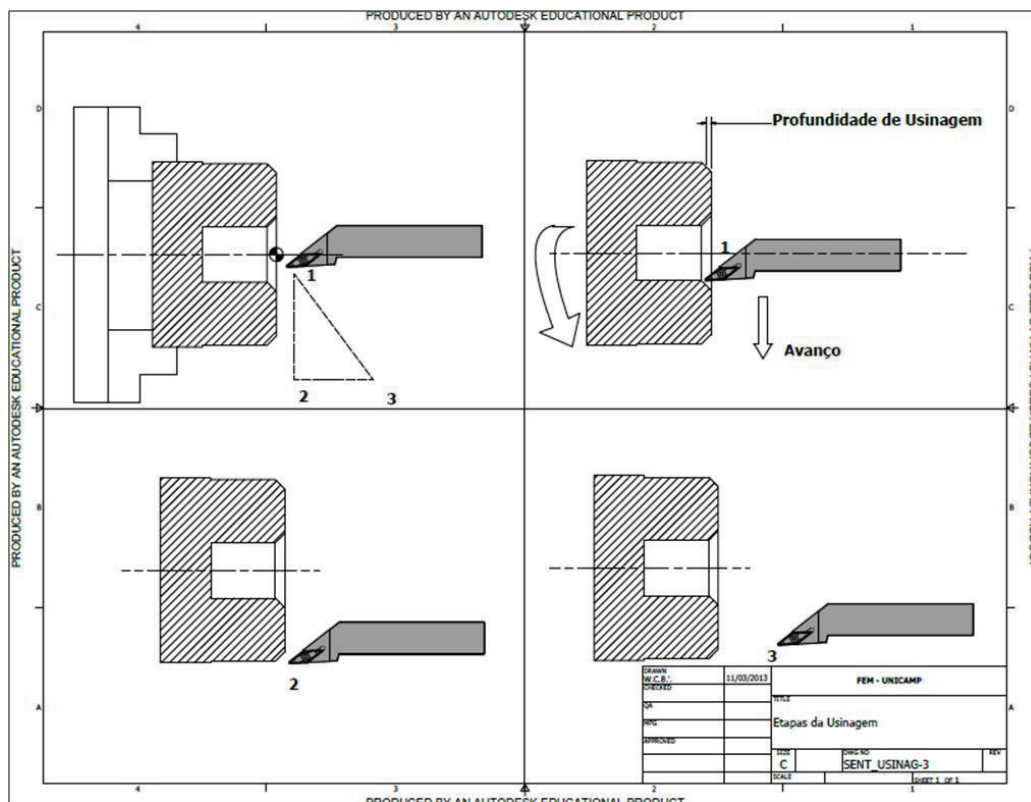


Figura 3.29: Croqui da trajetória da ferramenta de corte.

As condições de usinagem de Desbaste, profundidade de usinagem (a_p) e avanço (f), foram escolhidas de acordo com as recomendações do fabricante das ferramentas, conforme mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Condições de usinagem de Desbaste recomendadas pelo fabricante da ferramenta código: VBMT 160408 MM (SANDVIK Coromant).

Pastilha	Profundidade de corte recomendada $a_p = \text{mm}$			Avanço de corte recomendado $f_n = \text{mm/r}$		
		Mín.	Máx		Mín.	Máx
VBMT160408-MM	0.72	0.45	2.70	0.18	0.09	0.27

A velocidade de corte (v_c) recomendada pelo fabricante das ferramentas para usinagem de aço inoxidável austenítico, de classe ISO M25 (código do fabricante GC 1125) são as mostradas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Condições de usinagem de Desbaste recomendadas pelo fabricante da ferramenta código: VBMT 160408 MM (SANDVIK Coromant).

ISO M		Aços inoxidáveis	Força de corte específica k_s 0,4	Dureza Brinell	<<<< RESISTENCIA AO DESGASTE			GC1125
					GC1525	GC1005	GC1105	
N° MC	No. CMC	Material	N/mm²	HB	h_{res} mm = avanço f_n mm/r			0.1-0.2-0.3
					0.1-0.2	0.1-0.2-0.3	0.1-0.2-0.3	
					Velocidade de corte (V_c) m/min			
M1.0.ZAQ	05.21	Austeníticos Barras/forjadas Austeníticos	2300	180	220-195	410-330-265	410-330-265	220-160-135

Portanto, os primeiros testes de torneamento da face (avanço radial da ferramenta) dos corpos de prova de aço inoxidável V316L, em Desbaste (ISO M25), foram feitos com as seguintes condições de usinagem recomendadas pelo fabricante:

- Velocidade de corte (v_{c1}) = 180 m/min;
- Avanço (f) = 0,18mm e
- Profundidade de usinagem (a_p) = 1,0mm.

E os segundos testes em Desbaste foram feitos com a seguinte velocidade de corte, aproximadamente 15% menor que a recomendada pelo fabricante:

- Velocidade de corte (v_{c2}) = 150 m/min.

As condições de usinagem de Acabamento, profundidade de usinagem (a_p) e avanço (f), foram escolhidas de acordo com recomendação do fabricante das ferramentas, conforme também mostrado na Tabela 3.1.

A velocidade de corte (v_c) recomendada pelo fabricante das ferramentas para usinagem de aço inoxidável austenítico, de classe ISO M15 (código do fabricante GC 1115) está mostrada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Velocidade de corte de Acabamento recomendada pelo fabricante da ferramenta para usinagem de aço inoxidável austenítico (SANDVIK Coromant).

ISO M	No. CMC	Aços inoxidáveis	Força de corte específica k_s 0,4	Dureza Brinell	<<<< RESISTÊNCIA AO DESGASTE			
					GC1525	GC1005	GC1105	GC1115
					f_m , mm = avanço f_m , mm/r			
N° MC	Material	N/mm²	HB	0.1-0.2	0.1-0.2-0.3	0.1-0.2-0.3	0.1-0.2-0.3	
				Velocidade de corte (V_c) m/min				
M1.0.Z.AQ	05.21	Austeníticos Barras/forjadas Austeníticos	2300	180	220-195	410-330-265	410-330-265	265-215-165

Portanto, os primeiros testes de torneamento da face (avanço radial da ferramenta) dos corpos de prova de aço inoxidável V316L, em Acabamento (ISO M15), foram feitos então, com as seguintes condições de usinagem recomendadas pelo fabricante:

- Velocidade de corte (v_{c1}) = 265 m/min;
- Avanço (f) = 0,1 mm e
- Profundidade de usinagem (a_p) = 0,5 mm.

E os segundos testes em Acabamento foram feitos com a velocidade de corte, aproximadamente 15% menor que a recomendada pelo fabricante, isto é,

- Velocidade de corte (v_{c2}) = 220 m/min.

Com a máquina ajustada nestas condições de usinagem, os ensaios do fim da vida das ferramentas foram feitos:

- 1) Controlando o desgaste de flanco das ferramentas, até que o desgaste de flanco da ferramenta atingisse o valor $V_{Bmax} = 0,3\text{mm}$;
- 2) Registrando a potência de corte das ferramenta no torno, em tempo real;
- 3) No caso de insertos com condições de usinagem de acabamento (ISO M15), medindo a rugosidade bidimensional dos corpos de prova, a cada cinco passadas de faceamento, determinadas pelo programa CNC da máquina.

O sistema de fixação na máquina, dos corpos de prova de 100 mm de diâmetro, que foram utilizados neste trabalho, foi um jogo composto de três castanhas, que foram torneadas no próprio torno.

Durante os ensaios das ferramentas de Desbaste, nem o corpo de prova para medição da rugosidade superficial e nem o suporte porta-ferramenta foram retirados da máquina. Neste caso, só foi retirado o inserto de metal duro para a medição do desgaste de flanco.

Durante os ensaios das ferramentas de Acabamento, só não foi retirado da máquina, o suporte porta-ferramenta, porque neste caso, a medição da rugosidade superficial dos corpos de prova foi feita na bancada de inspeção.

4 Resultados e Discussões

4.1. Ensaios em condições de desbaste (ferramentas classe ISO M25)

4.1.1. Análise da aderência do revestimento no substrato das ferramentas

São mostradas nas Figuras 4.1 (a) e (b), duas indentações Rockwell C feitas sobre a camada de cobertura na superfície de saída, lados A e B, de uma ferramenta de desbaste (classe ISO M25), de substrato texturizado pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convencional) e duas indentações na superfície de uma ferramenta texturizada a laser, obtidas pelo MEV.

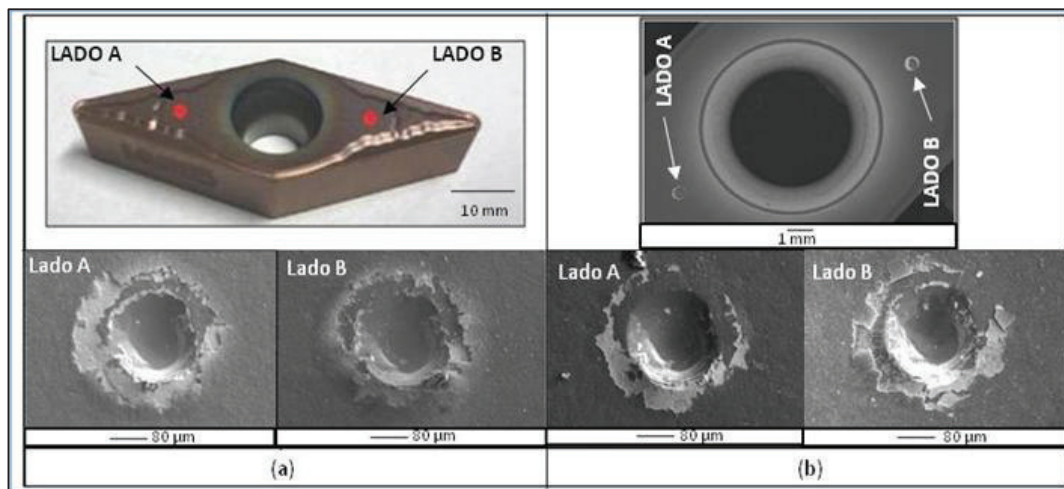


Figura 4.1: Indentações Rockwell C de ferramentas revestidas de desbaste (classe ISO M25), lados A e B: (a) Texturizadas pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convencional) e (b) Texturizadas pré-recobrimento a laser. As micrografias foram feitas em MEV.

Nesta Figura 4.1 observa-se a ocorrência de uma grande área de delaminação do revestimento TiAlN, depositado tanto nos dois lados da ferramenta convencional,

quanto nos dois lados da ferramenta texturizada a laser, expondo de forma semelhante os substratos de metal duro, na cor cinza claro.

Analisando-se o aspecto da fragmentação dos revestimentos depositados sobre os substratos com ambas texturas, não é possível distinguir-se formas diferentes de delaminação dos revestimentos. Para ambas texturizações, ocorre uma delaminação dos revestimentos na periferia das indentações, de forma contínua e com grandes áreas de destacamento. Em outras palavras, a texturização a laser não significou maior força de adesão entre cobertura e substrato da ferramenta. Este resultado difere daquele obtido por Neves (2010), que mostrou que, nas ferramentas texturizadas a laser, as falhas da cobertura nas bordas das indentações eram bem menores que nas ferramentas convencionais.

Comparando-se estas quatro indentações com o padrão do Teste VDI 3198, mostrado na Figura 3.27, verifica-se a ocorrência de “Falha Inaceitável código: HF5”.

A forma similar de fragmentação dos revestimentos nos substratos de desbaste ensaiados demonstra neste trabalho, que a modificação da topografia do substrato realizada pelo feixe de laser, uma topografia periódica, que será mostrada mais a frente, não foi o suficiente para criar uma textura que propiciasse um ancoramento mecânico mais efetivo dos revestimentos, quando comparado à textura feita pelo jateamento com micro-partículas (convencional), uma topografia com orientação desordenada.

As Figuras 4.2 (a) e (b) mostram um exemplo de indentação Rockwell C na superfície de saída, do lado A, de uma ferramenta de desbaste (classe ISO M25), de substrato texturizado pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convencional) e a Figura 4.2 (c) mostra a micrografia feita também pelo MEV, com o feixe de elétrons retroespalhados (BSE). Estas Figuras mostram que a região delaminada da camada de cobertura era repleta de trincas. Isto ocorreu nos dois tipos de ferramenta, convencional e texturizada a laser.

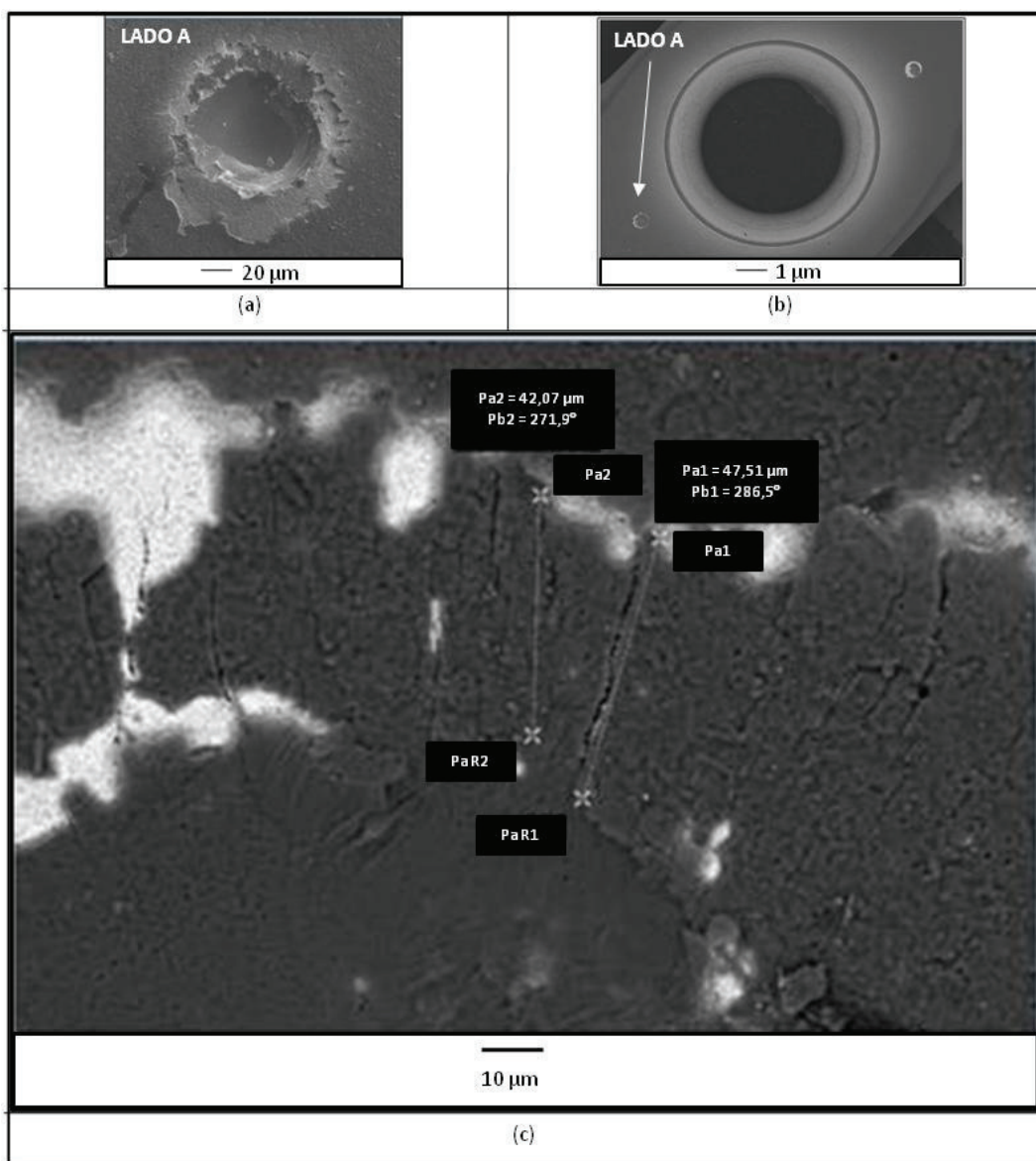
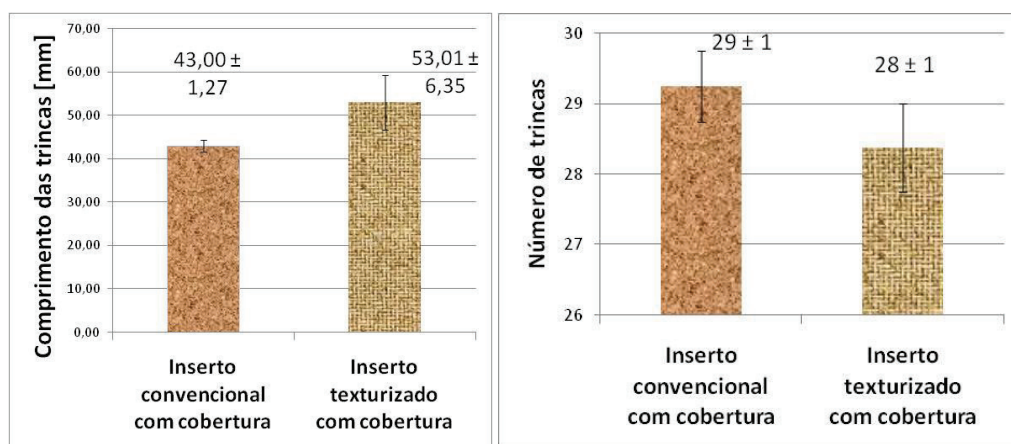


Figura 4.2:(a) e (b)Micrografia de indentação Rockwell C em exemplo de ferramenta de desbaste (classe ISO M25), com texturização pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convecional) e (c) Micrografiaobtida pelo feixe de elétrons retroespalhados (BSE) do MEV.

A partir destas figuras foi possível registrar-se os comprimentos das trincas e calcular-se a quantidade delas. De posse destes dados pode-se obter então, a Tabela 4.1 e os seguintes dois gráficos das Figuras 4.3 (a) e (b).

Tabela 4.1: Valores de comprimento e quantidade das trincas do teste de aderência dos insertsos convencional e texturizados a laser usados nos testes de usinagem de desbaste (classe ISO M25).

DESBASTE		Comprimento das trincas do teste de aderência [mm]		Quantidade de trincas do teste de aderência	
		Inserto convencional com cobertura	Inserto texturizado a laser com cobertura	Inserto convencional com cobertura	Inserto texturizado a laser com cobertura
Teste	Lado A	42,73	56,72	30	28
	Lado B	41,66	44,49	30	29
Réplica	Lado A	42,89	58,81	29	29
	Lado B	44,73	52,01	30	29
Média		43,00	53,01	29	28
Desvio padrão		1,27	6,35	1	1
Porcentagem		2,96%	11,99%	1,71%	2,22%



(a)(b)

Figura 4.3:(a) Comprimento e (b) Número de trincas de indentações Rockwell C para as ferramentas de desbaste (classe ISO M25) com texturização pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convencional) e com texturização a laser, obtida pelo feixe de elétrons retroespalhados (BSE) do MEV.

Pode-se ver nestas figuras que também não foi constatada diferença de comprimento e nem de quantidade das trincas verificadas nas imagens das indentações das ferramentas, feitas pelo feixe de elétrons retroespalhados do MEV.

A similaridade das trincas apresentadas nas delaminação do revestimento TiAlN para as ferramentas convencional e texturizada a laser também indica uma adesividade e

uma capacidade em suportar carregamentos muito semelhantes sobre os substratos de metal duro. Esta similaridade de adesividade se refletiu no desempenho similar de ambas ferramentas obtidos nos ensaios de torneamento, cujos exemplos de resultados serão mostrados no item 4.1.7 (ferramentas de desbaste).

4.1.2. Medições de rugosidade 3D das superfícies das ferramentas

A Figura 4.4 mostra a média dos valores de rugosidade média 3D (S_a) dos substratos bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e os respectivos insertos com cobertura. Os resultados mostram que a texturização a laser aumentou a rugosidade média 3D (S_a) da superfície dos substratos em cerca de 8%, que o revestimento sobre a superfície texturizada a laser aumentou a rugosidade em cerca de 6,7% e que no inserto convencional a cobertura diminuiu bastante a rugosidade da superfície em relação ao substrato. Assim, a ferramenta texturizada a laser com cobertura apresentou uma rugosidade média quase três vezes maior que a do inserto convencional (2,9 x). Observa-se, que por alguma razão, quando a cobertura é realizada sobre um substrato com a topografia texturizada a laser, ela praticamente mantém a rugosidade do substrato, mas quando a mesma cobertura é depositada sobre um substrato com a topografia da ferramenta convencional, ela alisa a superfície.

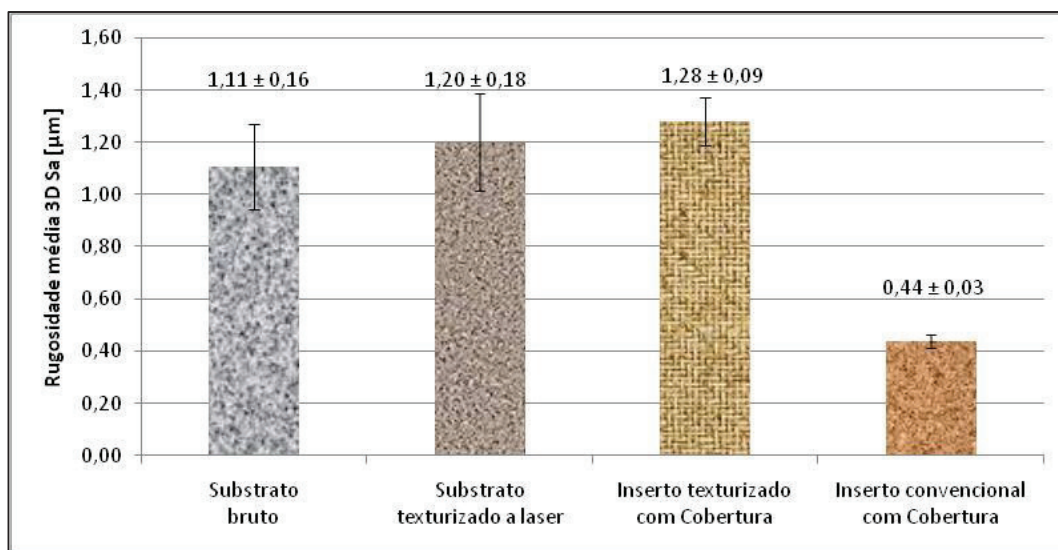


Figura 4.4: Comparação entre a rugosidade média 3D (S_a) dos substratos: bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e insertos com cobertura: texturizado a laser e convencional (pré-cobertura).

A Figura 4.5 mostra a média dos valores de rugosidade 3D Assimetria ou “Skewness” (S_{sk}) dos substrato bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e seus respectivos insertos com cobertura.

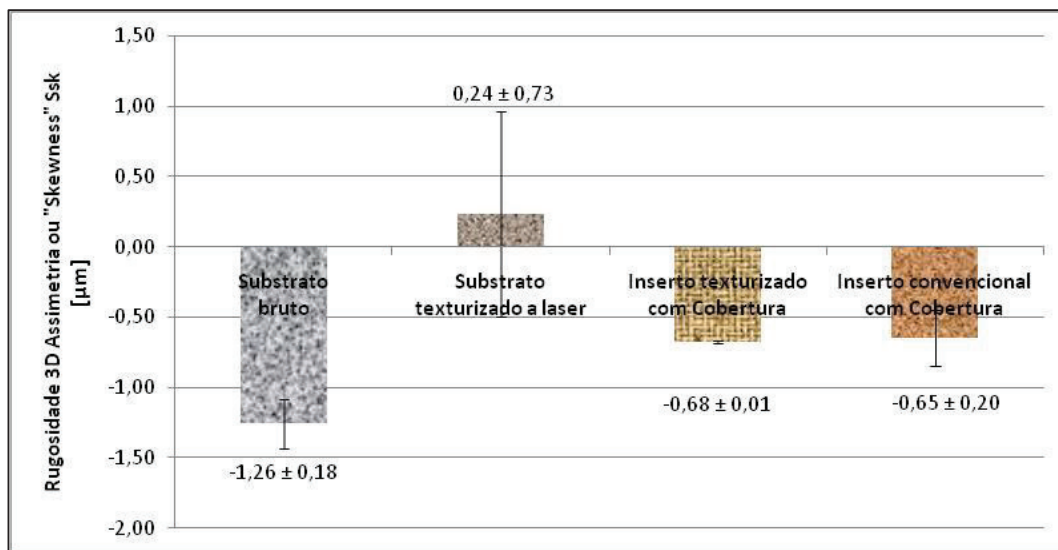


Figura 4.5: Comparação entre a rugosidade 3D Assimetria ou “Skewness” (S_{sk}) dos substratos: bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e insertos com cobertura: texturizados a laser e convencional (pré-cobertura).

Os resultados mostram que as superfícies dos substratos brutos apresentaram a média de Assimetria S_{sk} menor que zero, isto é, superfícies com predominância de vales, isto é, com ausência de altos picos, conforme mostrado na Figura 2.6. Esta pode ser a explicação para o fato de que o revestimento sobre o substrato bruto tenha alisado a superfície da ferramenta, como mostrado na Figura 4.5. O revestimento penetrou nos vales do perfil do substrato bruto e não acompanhou seus picos.

Para as superfícies dos substratos texturizados a laser os resultados apresentaram a média de Assimetria S_{sk} maior que zero, isto é, superfícies com predominância de picos. Também é possível entender-se isto, pois conforme explicado no item 2.4 deste trabalho, o processo de texturização a laser de uma superfície provoca de forma consecutiva e ordenada, a fundição, vaporização e ablação da face Co, remoção e fusão de grãos de WC e resolidificação dos materiais, que receberam a alta densidade de energia do laser. Verificou-se então, que a texturização a laser além de inverter o perfil da rugosidade das superfícies sobre a linha média (de vales para picos), reduziu a

assimetria média deste perfil em cerca de (80%), isto é, quase se tem uma superfície com distribuição igual de picos e vales. Esta é a razão do fato do revestimento do substrato texturizado a laser ter acompanhado a rugosidade média S_a do substrato: existem menos vales a serem preenchidos e assim, a cobertura repete o padrão de picos do substrato.

Os resultados mostram ainda, que a superfície dos insertos texturizados a laser, que foram revestidos pelo processo PVD apresentaram de novo a média de Assimetria S_{sk} menor que zero, isto é, superfícies com predominância de picos com alguns vales. Isto também pode ser entendido, porque os substratos texturizados a laser ao passarem pelo processo de recobrimento por deposição física de vapores (PVD) com multicamadas de coberturas duras ($TiAlN$, $(Al,Cr)_2 O_3$, $TiAlN$) acabam tendo contato com várias substâncias, que reagem quimicamente umas com as outras para formar outros componentes, que são injetadas dentro do forno, com uma pressão negativa (SANDVIK Coromant). Verificou-se então, que a processo de revestimento por PVD no substrato texturizado a laser, além de inverter o perfil da rugosidade das superfícies sobre a linha média (de vales para picos), aumentou de novo a Assimetria média deste perfil em cerca de (183%).

Os resultados mostram por fim, que as superfícies dos insertos texturizados por jateamento de micro-partículas (convencional) que foram também revestidos pelo processo PVD, também apresentaram a média de Assimetria S_{sk} menor que zero, isto é, mantiveram as superfícies com predominância de picos e alguns vales. Isto mais uma vez pode ser entendido, porque os substratos texturizados por jateamento de micro-partículas ao passarem também pelo processo de recobrimento de PVD acabam tendo o mesmo contato com várias substâncias, que reagem quimicamente umas com as outras para formar outros componentes, que são injetadas dentro do forno. Verificou-se neste caso, que o processo de revestimento por PVD apenas diminuiu a Assimetria média deste perfil em cerca de (48%).

Portanto, em resumo, analisando-se os resultados da Figura 4.16, os resultados mostram que as superfícies dos insertos texturizados por jateamento de micro-partículas (convencional) e os texturizados a laser, que foram revestidos pelo processo PVD, apresentaram a média de S_{sk} menor que zero, isto é, superfícies com predominância de picos e alguns vales e uma similaridade entre elas, que mais uma vez, só vem reforçar as análises obtidas nos ensaios de torneamento, a serem mostrados mais a frente.

A Figura 4.6 mostra as médias dos valores de rugosidade 3D Curtose ou “Kurtosis” (S_{ku}) dos substratos bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e seus respectivos insertos com cobertura.

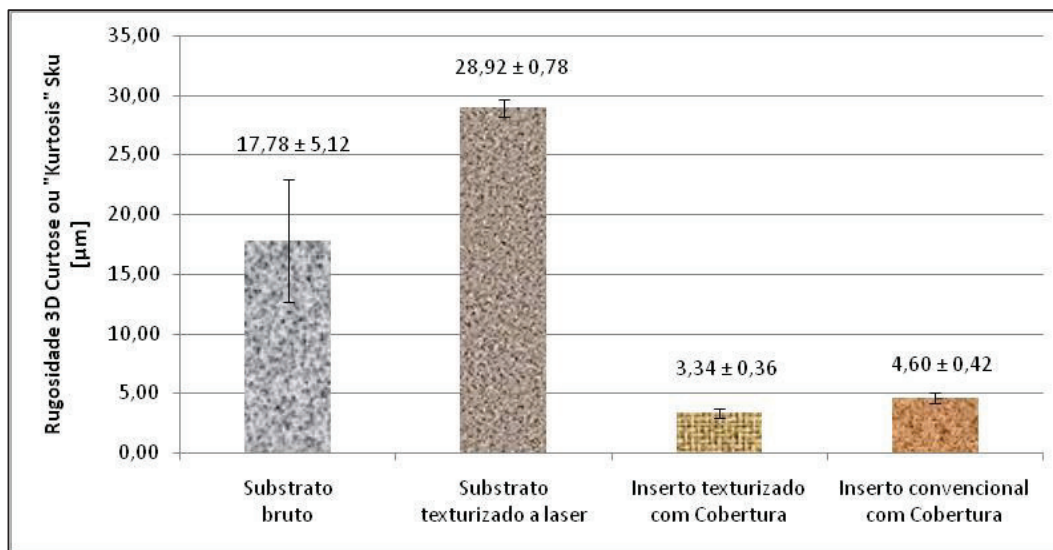


Figura 4.6: Comparação entre a rugosidade 3D Curtose ou “Kurtosis” (S_{ku}) dos substratos: bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e insertos com cobertura: texturizado a laser e convencional (pré-cobertura).

Os resultados mostram que as superfícies dos substratos brutos, texturizados a laser (sem cobertura), insertos com cobertura: texturizado a laser (pré-cobertura) e convencional apresentaram a média de Curtose S_{ku} maior que três, isto é, superfícies com predominância de altos picos e baixos vales (grande curtose). Em outras palavras, o período do perfil de rugosidade é grande, como mostra a Figura 2.7.

Analisando os resultados, verificou-se que o valor da média de Curtose (S_{ku}) dos substratos brutos depois de terem sido texturizados a laser aumentou em 38%. Isto, também pode ser explicado, pelo descrito no item 2.4 deste trabalho, que indica que o processo de texturização a laser de uma superfície provoca o aumento dos altos picos e baixos vales da rugosidade, de forma consecutiva e ordenada.

Os resultados mostram ainda, que a superfície dos insertos texturizados a laser, que foram então revestidos pelo processo PVD apresentaram uma redução da média de Curtose em 88% e que as superfícies dos insertos texturizados por jateamento de micro-

partículas (convencional), depois de recobertas, apresentarem uma redução da Curtose média de 74%.

Em resumo, analisando-se os resultados da Figura 4.6, vê-se que as superfícies dos substratos dos insertos antes do processo PVD têm perfis com período bem curto, cheia de picos e vales (S_{ku} acima de três) independentemente do processo de texturização e, depois de recobertas, as superfícies das ferramentas apresentam períodos mais longos, com S_{ku} pouco acima de três.

Reagrupando as informações comentadas anteriormente, dos valores das rugosidades 3D (S_a (rugosidade média), S_{sk} (Assimetria) e S_{ku} (Curtose)), para as ferramentas analisadas neste trabalho (substrato texturizado convencional, substrato texturizado a laser, inserto texturizado convencional revestido e inserto texturizado a laser revestido), conforme mostrado nas Figuras 4.7 (a), (b), (c) e (d), pode-se fazer as seguintes observações.

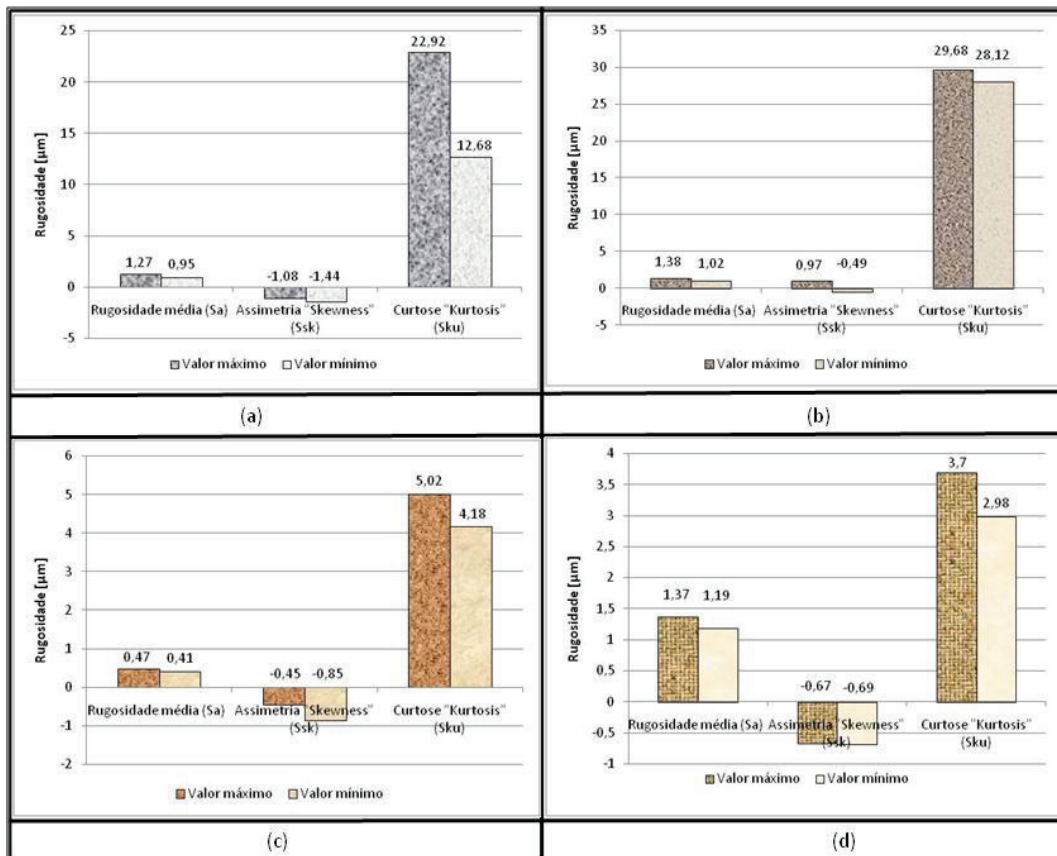


Figura 4.7: Comparação dos valores de rugosidades 3D entre: (a) substrato bruto; (b) substrato texturizado a laser sem cobertura e (c) inserto texturizado convencional pré-revestimento, com cobertura e (d) inserto texturizado a laser pré-revestimento, com cobertura.

Comparando-se os dois tipos de substratos, vê-se que os dois têm rugosidade média S_a próximas e razoavelmente lisas e têm Curtose S_{ku} bem acima de três, tendo o substrato a laser um Curtose S_{ku} ainda maior que o substrato bruto.

Depois da aplicação da cobertura no substrato texturizado a laser, a superfície do inserto texturizado a laser com cobertura se apresenta com rugosidade média S_a similar ao do seu substrato. A superfície texturizada a laser revestida continua com Assimetria S_{sk} menor que zero, mas só com predominância de vales, com valor de distância do zero, similar ao do seu substrato. E esta superfície do inserto texturizado a laser pré-revestimento fica com Curtose S_{ku} maior que três, com distância entre vales muito menos estreita, bem menor do que o valor da superfície de seu substrato, pois seu valor diminuiu muito, ficando bem mais próximo do valor três.

Analisando-se a superfície do inserto texturizado convencional com cobertura, ele se apresenta com rugosidade média S_a pequeno e bem menor do que o do inserto texturizado a laser com cobertura. A superfície texturizada convencional e com cobertura continua com Assimetria S_{sk} menor que zero, com predominância de vales, mas com valor de distância do zero, similar ao valor do inserto texturizado a laser com cobertura. E a superfície do inserto texturizado convencional e recoberto fica com Curtose S_{ku} maior que três, distância entre vales estreita, um pouco maior do que o valor da superfície do inserto texturizado a laser revestido, com distância maior ao valor três.

Se por hipótese, considera-se a melhor superfície de ferramenta, aquela com rugosidade média S_a baixa, com Assimetria S_{sk} igual a zero, para que se tenha homogeneidade entre picos e vales e Curtose S_{ku} igual a três, para que se tenha uma textura periódica média, isto é, nem estreita e nem larga.

Portanto, se esta hipótese estiver correta, não se pode afirmar que o inserto texturizado convencional revestido é melhor do que o inserto texturizado a laser revestido, pois o inserto texturizado convencional revestido tem a rugosidade média S_a menor do que a rugosidade média S_a do inserto texturizado a laser revestido e a Assimetria S_{sk} do inserto texturizado convencional revestido é similar a Assimetria S_{sk} do inserto texturizado a laser revestido. Quanto ao Curtose, o S_{ku} do inserto texturizado convencional revestido é maior do que o S_{ku} do inserto texturizado a laser revestido, isto é, o Curtose é mais distante do valor três.

4.1.3. Análise entre texturizações do substrato de desbaste (classe ISO M25)

Superfícies originais de metal duro retificadas de classe ISO M25, chamadas aqui de substrato, receberam neste trabalho, a texturização a laser, com o intuito de se provocar uma mudança superficial deste substrato e melhorar a aderência com o revestimento de TiAlN, a ser depositado pelo processo de PVD.

A mudança superficial ocorre devido à fusão e evaporação de Co, fusão de WC, ablação de Co e WC e resolidificação de gotículas de material, quando aparecem os micro-furos de sopro, para saída de vapores e/ou gases da superfície. A superfície resultante é uma estrutura uniforme de picos e vales, superposta aos grãos de WC ressolidificados.

De acordo com Yilbras et al., 2007, na texturização a laser da superfície de metal duro, a rápida fusão e evaporação da fase aglomerante de Co acelera o resfriamento do volume de material atingido, retardando a fusão e a evaporação dos grãos de WC. Além disso, o resfriamento rápido do WC fundido induz a tensões térmicas, que promovem a formação de trincas compridas no WC resolidificado e, possivelmente, na interface entre a camada ressolidificada e o substrato abaixo dela. As trincas propagadas evidenciam sua ocorrência durante a solidificação da camada fundida.

Na avaliação destas superfícies bruta e texturizada a laser da ferramenta para uso em desbaste (classe ISO M25), pelas micrografias do MEV, para substratos bruto e texturizado a laser, observa-se alguns defeitos em suas superfícies de saída (micro-trincas e presença de estrutura de pó sinterizado), conforme mostrado nas Figuras 4.9. Verifica-se também, alguns defeitos nas superfícies de folga dos substratos (micro-trincas, micro-furos de sopro e presença de estrutura de pó sinterizado), conforme mostrado nas Figuras 4.8 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) e Figuras 4.9 (a), (b), (c), (d), (e) e (f).

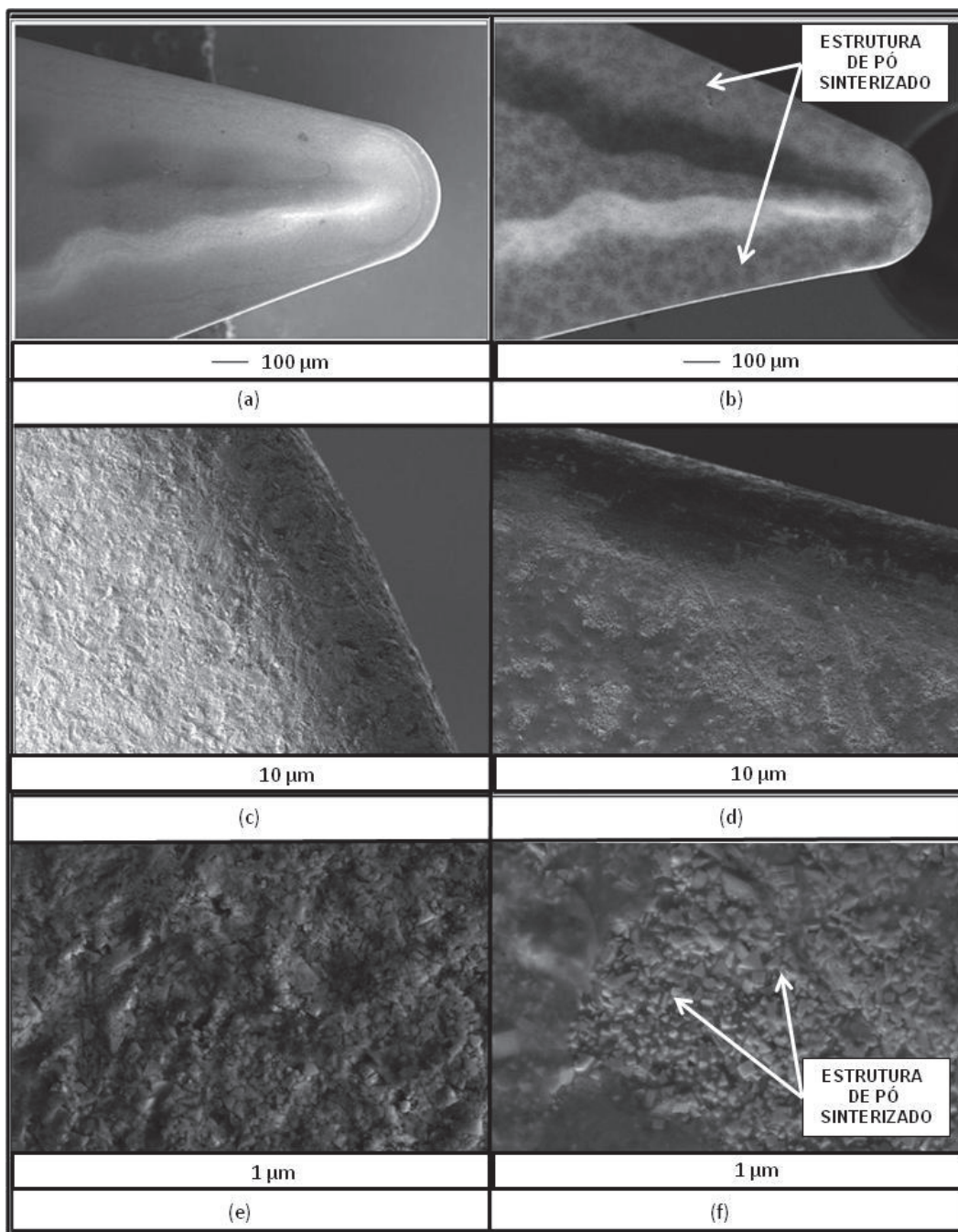


Figura 4.8: Aspectos gerais das superfícies de saída dos substratos de desbaste (classe ISO M25):(a), (c) e (e) bruto e (b), (d) e (f) texturizado a laser, pré-recobrimento, com estrutura de pó sinterizado exposta.

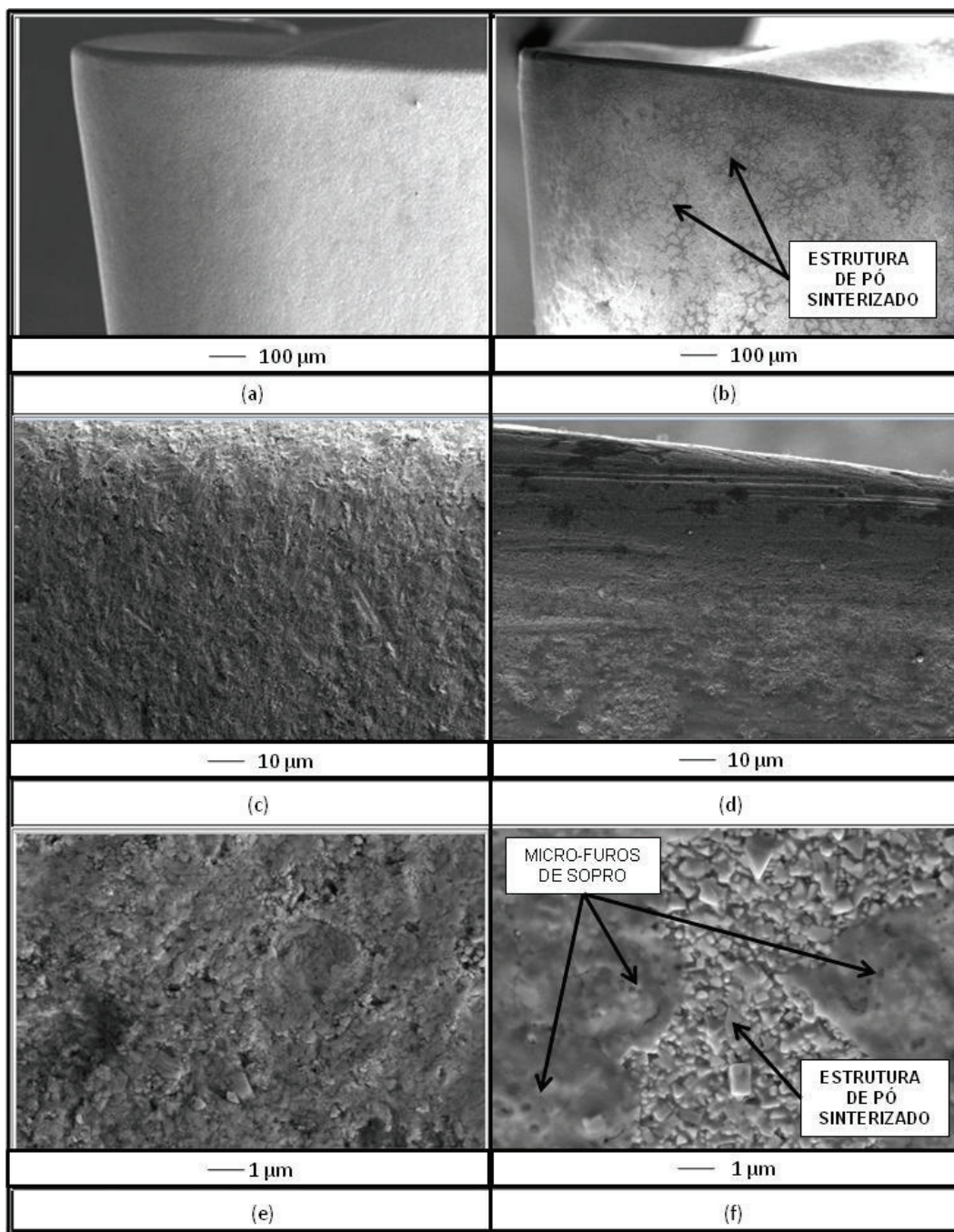


Figura 4.9: Aspectos gerais das superfícies de folga dos substratos de desbaste (classe ISO M25):(a), (c) e (e) bruto e (b), (d) e (f) texturizado a laser, pré-recobrimento, com micro-poros de sopro e estrutura de pó sinterizado exposta.

Analisando-se os exemplos de defeitos apresentados nas texturizações a laser, das superfícies de saída e folga, dos substratos da ferramenta de desbaste (classe ISO M25), conforme mostrados nas Figuras 4.9, verifica-se que na texturização à laser

realizada neste trabalho, ocorreu a necessidade de saída de vapores e/ou gases (micro-furos de sopro) e aparente instabilidade na fusão, evaporação e sublimação de Co, com fluxo irregular de material fundido, pelo baixo teor de Co (presença de estrutura de pó sinterizado).

Portanto, por causa da presença destes micro-defeitos nas superfícies dos substratos, observada neste trabalho, indica-se uma possível tendência dos insertos texturizados a laser e recobertos pelo processo de PVD, terem um desempenho inferior ao dos insertos jateados por micro-partículas (convencional).

4.1.4. Análise da porcentagem de cobalto

A composição química da ferramenta, também pode influenciar na adesividade dos revestimentos sobre o substrato, em especial, o teor de Co do substrato.

O excesso de cobalto na superfície de substratos de metal duro produz uma pobre adesividade do revestimento (TONSHOFF et al., 1999; BOUZAKIS et al., 2000 e DINIZ et al., 2007).

Uma das técnicas utilizadas para a remoção das camadas de cobalto, prejudiciais a adesividade das coberturas, é justamente a utilização do jateamento de micro-partículas duras, de Al_2O_3 , SiC e B_4C_4 , juntamente com água, glicerina ou jateamento a seco (HUDDINGE e GAVLE, 2000).

No trabalho de Kano e Inoue (2006) foi detectado na superfície de metal duro, um leve incremento do teor de cobalto, com o aumento da quantidade de pulsos e/ou da densidade de potência utilizadas na texturização a laser.

Neste trabalho, a análise da porcentagem do elemento cobalto, na superfície do substrato bruto e na superfície texturizada a laser do substrato, antes da aplicação do revestimento sobre o inserto de metal duro classe ISO M25, vai ser feita baseada nos valores medidos em linha, pelo MEV/EDS, conforme mostrado nas Figuras 4.10 (a) e (b).

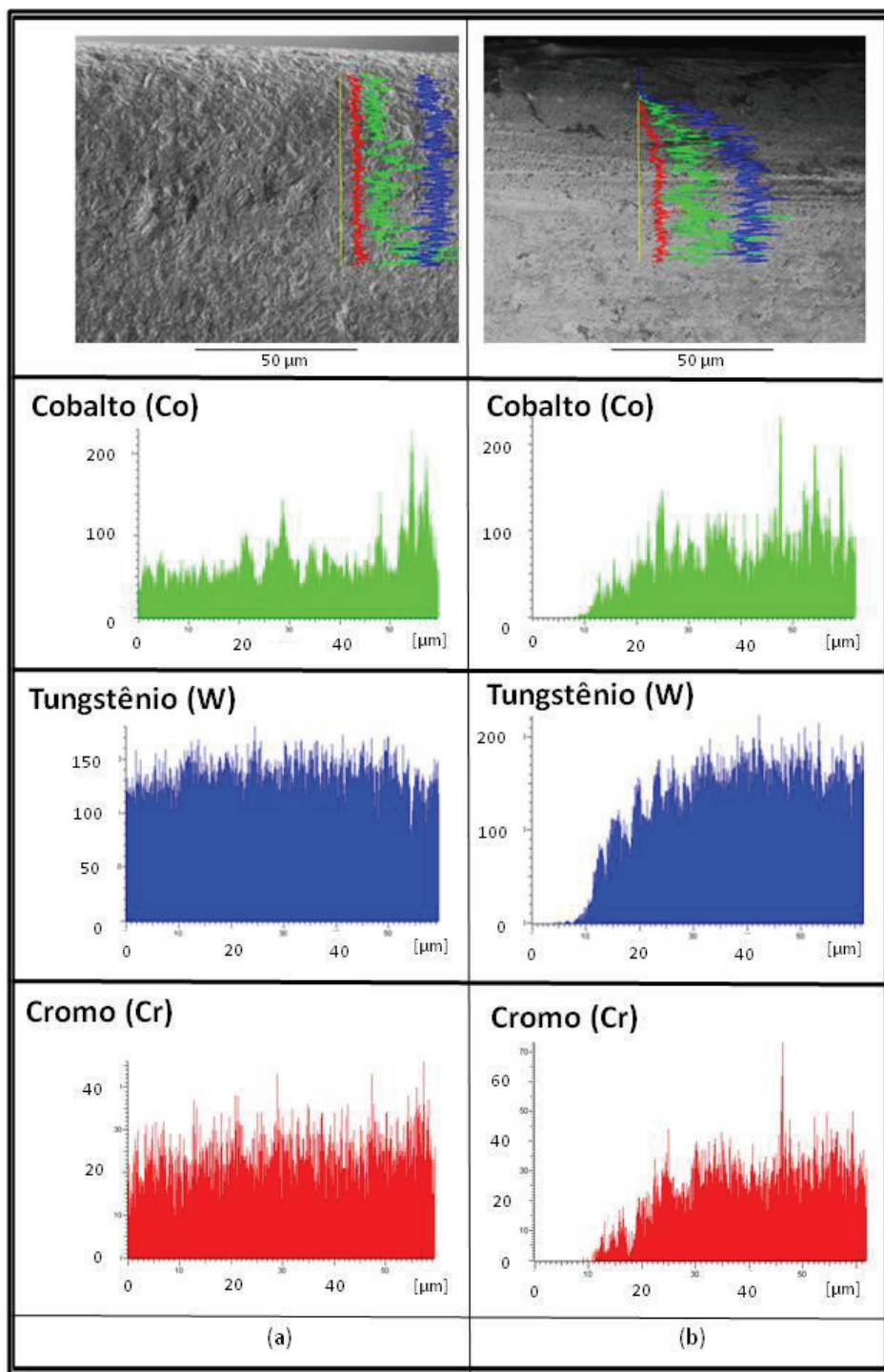


Figura 4.10: (a) e (b) Análise de EDS nas superfícies de saída dos substratos bruto e texturizado a laser, pré-cobertura, da ferramenta de desbaste (classe ISO M25).

A Tabela 4.2 relaciona os valores individuais da porcentagem de cobalto, dos substratos das ferramentas utilizadas nos (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, no total de (8) valores.

Tabela 4.2: Valores de porcentagem de cobalto nas superfícies bruta e texturizada a laser dos substratos pré-cobertura, das ferramentas de desbaste (classe ISO M25).

Testes práticos		Substrato bruto [%]	Substrato texturizado a laser [%]
1		8,36	11,27
2		5,47	3,61
3		6,63	5,87
4		14,71	8,40
5	Réplica	5,55	11,89
6	Réplica	16,84	3,53
7	Réplica	15,76	
8	Réplica		19,66
Média		10,47	9,18
Desvio Padrão		5,08	5,72
Porcentagem		48,5%	62,3%

A Tabela 4.2 mostra também a média calculada dos valores da porcentagem de cobalto, nas superfícies bruta e texturizada a laser, bem como os desvios padrões destes valores que foram superiores a 10% da média.

A Figura 4.11 mostra graficamente estas duas médias da porcentagem de cobalto nas superfícies dos substratos de classe ISO M25, bem como suas dispersões.

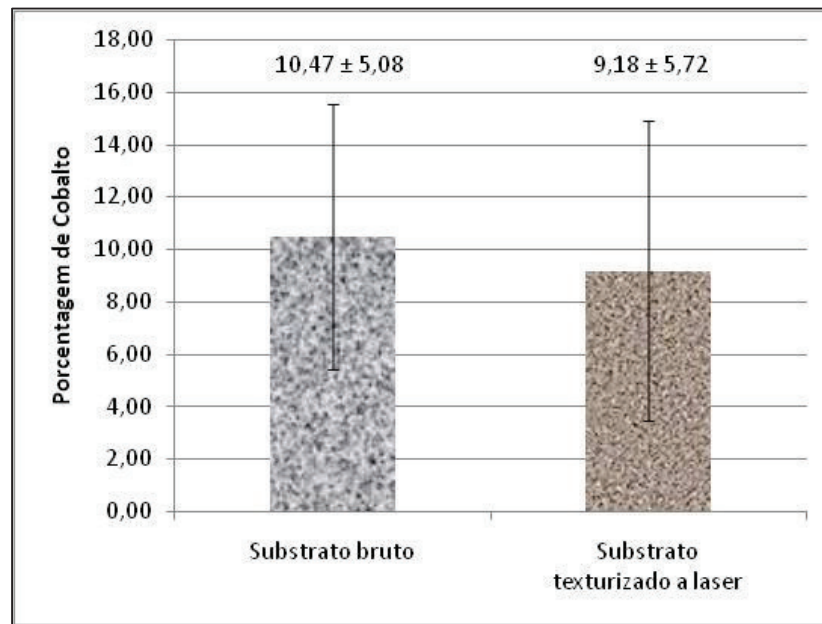


Figura 4.11: Porcentagem de cobalto nas superfícies bruta e texturizada a laser dos substratos pré-cobertura na ferramenta de desbaste (classe ISO M25).

Analisando-se os resultados da porcentagem superficial de cobalto da Figura 4.13, verifica-se que os substratos bruto e o texturizado a laser, apresentaram porcentagens similares de cobalto e que portanto, o processo de texturização a laser não influenciou nesta porcentagem nas ferramentas deste trabalho. Outra coisa a ser notada nestes resultados é a forte dispersão destes resultados. Em outras palavras, os teores de Co variam muito ao longo do substrato de metal duro, tanto na ferramenta convencional, quanto na ferramenta texturizada, o que pode implicar em diferença na retenção dos carbeto ao longo do corpo da ferramenta e também, em diferença de adesividade com a cobertura ao longo da superfície do substrato.

4.1.5. Análise dos revestimentos dos insertos classe ISO M25

Os substratos das ferramentas usadas em condições de desbaste (classe ISO M25) deste trabalho receberam pelo processo de PVD, uma cobertura de tripla camada de TiAlN, (Al,Cr)₂O₃ e TiAlN. Na avaliação desta cobertura em MEV, para insertos texturizados por jateamento de micro-partículas (convencional) e texturizados a laser,

não observa-se diferenças entre as superfícies de saída das ferramentas, conforme mostrado nas Figuras 4.12 (a), (b), (c) e (d) e nem entre as superfícies de folga, mostradas nas Figuras 4.13 (a), (b), (c) e (d).

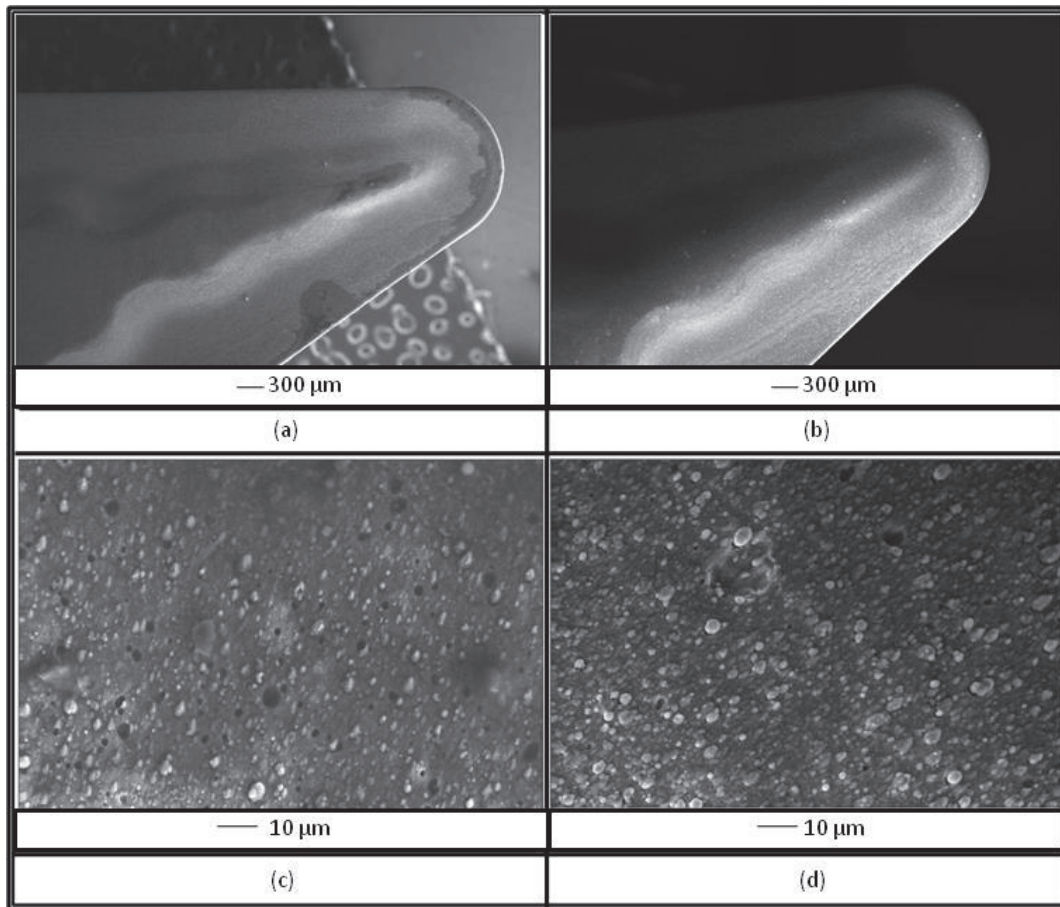


Figura 4.12: Aspectos gerais das superfícies de saída dos inserts de desbaste (classe ISO M25), recobertos de TiAlN por processo PVD,(a) e (c): texturizado por jateamento de micro-partículas (convencional), pré-recobrimento;(b) e (d): texturizado a laser, pré-recobrimento.

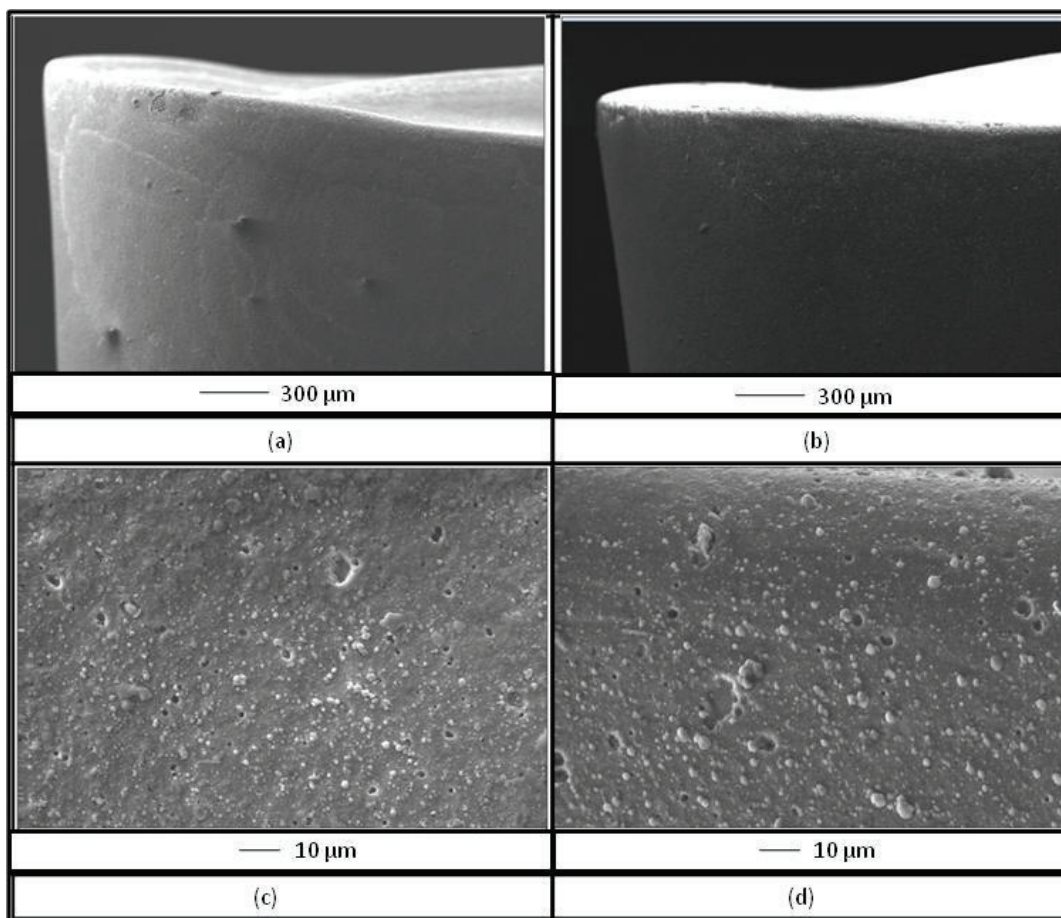


Figura 4.13: Aspectos gerais das superfícies de folga dos inserts de desbaste (classe ISO M25), recobertos de TiAlN por processo PVD, (a) e (c): texturizado por jateamento de micro-partículas (convencional), pré-recobrimento; (b) e (d): texturizado a laser, pré-recobrimento.

As gotículas, oriundas do sistema de evaporação a arco, que é usado no processo de revestimento, estão aderidas à superfície da cobertura. Estas micro-partículas aumentam a rugosidade final do revestimento depositado. Até aquela data não existia um método que prevenisse completamente a deposição de gotículas no substrato, sem que fosse usado um sistema especial de manipulação óptica de plasmas. Estas irregularidades na interface com micro-partículas agem como ponto de início de trinca, gerando defeitos e falhas coesivas do revestimento. Além de aumentarem a rugosidade do filme, as micro-partículas contribuem para a adesão de material do cavaco no revestimento (GERTH et al. 2009).

Apesar da presença destes defeitos nos inserts das Figuras 4.08 e 4.09, que foram recobertos por processo PVD, não se observa neles defeitos grosseiros na

cobertura, como poros e trincas e nem uma densa quantidade destes defeitos em todas as suas superfícies.

Portanto, analisando-se as micrografias das Figuras 4.12 e 4.13, verifica-se que o revestimento dos insertos texturizados por jateamento de micro-partículas (convencional) e dos texturizados a laser, ambos revestidos pelo processo PVD, apresentaram seus aspectos gerais dos revestimentos muito semelhantes visualmente.

4.1.6. Planejamento fatorial dos ensaios de vida da ferramenta de desbaste

Neste trabalho, foi feito um planejamento fatorial de 2^k ensaios de torneamento, no qual k fatores tiveram seus efeitos analisados no desempenho das ferramentas de corte, com dois níveis cada um, por isso a base dois.

Foram escolhidos então, $k = 2$ fatores neste estudo, sendo um deles a texturização da superfície dos insertos pré-revestimento e o outro, a velocidade de corte das ferramentas.

Para cada ensaio de torneamento foi feito uma réplica e todas as combinações possíveis destes dois fatores foram investigadas.

Em resumo, foram executados (2^2) ensaios de torneamento e uma réplica cada, num total de (8) testes.

A Tabela 4.3 relaciona os dois fatores k (texturização e velocidade de corte) e os seus respectivos dois níveis de valores, referentes às condições de usinagem em desbaste.

Tabela 4.3: Combinações de (2^k) testes feitos com insertos de desbaste (classe ISO M25).

Nº Fatores (k)	Fatores de controle	Nível de cada fator (base do fatorial)	Valores	
1	Texturização	2	Convencional	a Laser
2	Velocidade de corte [m/min]	2	180	150

4.1.7. Análise da vida das ferramentas de corte

A análise da *vida das ferramentas em volume de material removido* utilizadas em ensaios de desbaste (classe ISO M25) deste trabalho vai ser feita procurando descobrir a influência dos parâmetros de *texturização* das ferramentas de corte (convencional e a laser) e do parâmetro de usinagem (*velocidade de corte*) sobre a *vida da ferramenta medida em volume de cavaco removido* pela aresta da ferramenta, utilizando-se como critério do fim da vida da aresta, a altura máxima do desgaste de flanco $V_{Bmax} = 0,3\text{mm}$. A Figura 4.14 apresenta o fluxograma dos ensaios de torneamento destes insertos, com seus fatores e resultados.

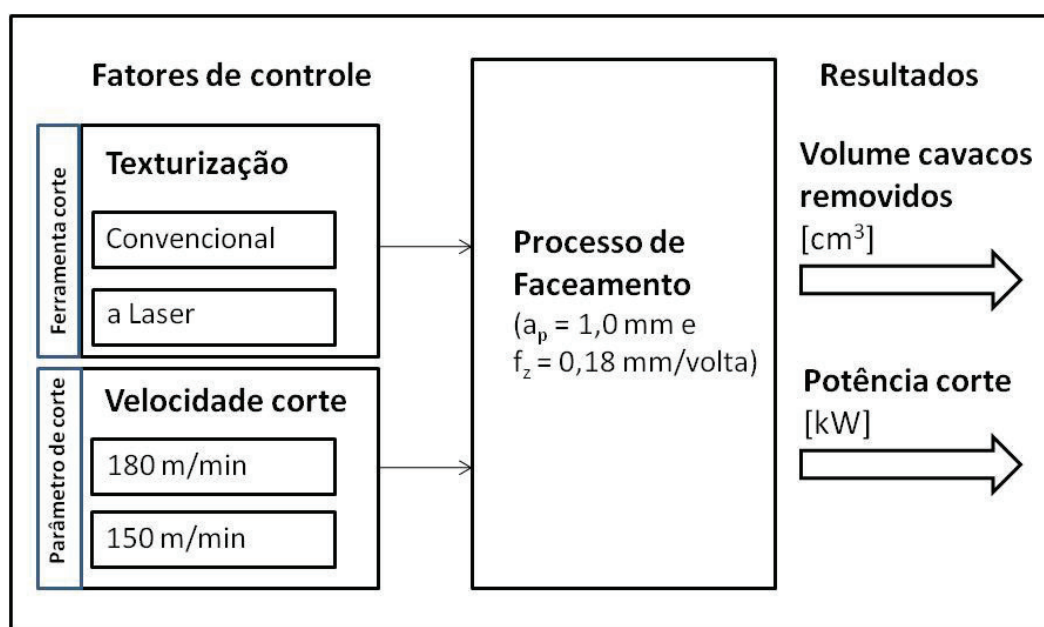


Figura 4.14: Fluxograma dos ensaios de torneamento dos insertos de desbaste (classe ISO M25).

A Tabela 4.4 mostra resultados médios de *vida da ferramenta em volume de material removido*, bem como os desvios nos diversos ensaios realizados e a Figura 4.15 mostra graficamente estes resultados.

Tabela 4.4: Médias e desvios padrão do resultado *vida da ferramenta em volume de material removido* dos (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, com insertos de desbaste (classe ISO M25).

	Inserto convencional V_c 150 m/min [cm ³]	Inserto texturizado a laser V_c 150 m/min [cm ³]	Inserto convencional V_c 180 m/min [cm ³]	Inserto texturizado a laser V_c 180 m/min [cm ³]
Teste	512,45	505,62	280,14	307,47
Réplica	519,28	478,28	321,13	280,14
Média	515,86	491,95	300,64	293,80
Desvio Padrão	4,83	19,33	28,99	19,33
Porcentagem	0,9%	3,9%	9,6%	6,6%

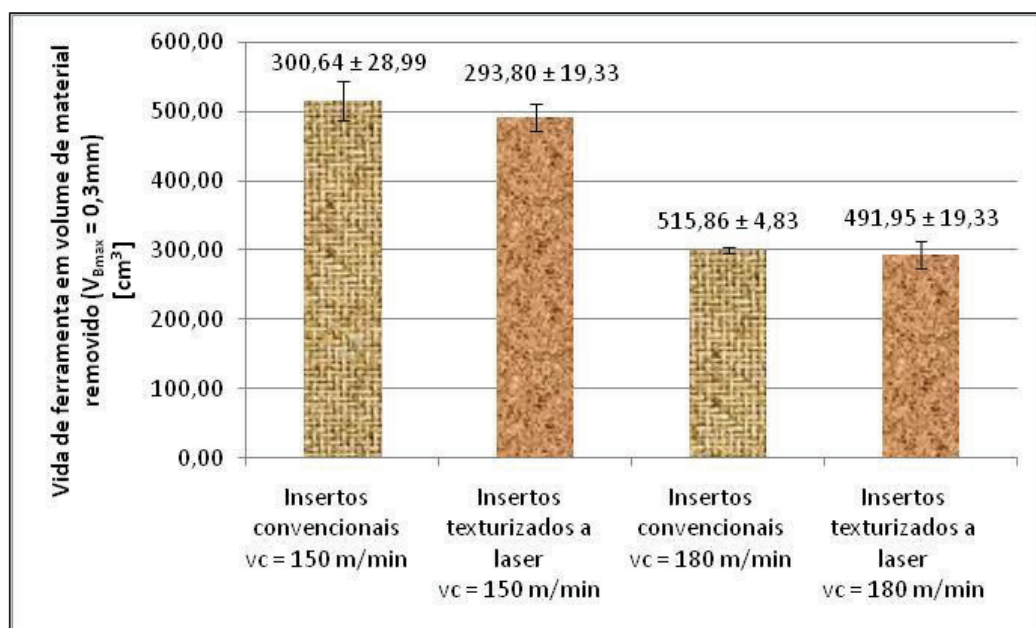


Figura 4.15: Média dos valores do resultado de *vida da ferramenta em volume de material removido* obtidos no ensaio das ferramentas de Desbaste (classe ISO M25). O critério de fim de vida foi o da altura máxima do desgaste de flanco $V_{Bmax} = 0,3$ mm.

Analisando-se a Figura 4.15 é possível verificar que quando a *velocidade de corte* cresceu, a *vida da ferramenta* diminuiu, de acordo com o que é fartamente citado na literatura. Além disso, pode-se verificar que não houve diferença significativa com relação à *vida das ferramentas*, quando se compara as *texturizações* convencional com a laser.

Com os resultados de *vida das ferramentas* de corte obtidos nos ensaios de torneamento descritos acima, foi possível estabelecer uma análise da influência dos

parâmetros de corte (*texturização* e *velocidade de corte*) e suas interações no resultado *volume de material removido* e consequentemente, *na vida das ferramentas* testadas.

Para esta análise foi utilizado o programa computacional MINITAB 16 e calculada a análise de variância ANOVA do fatorial completo 2^2 para o resultado *vida de ferramenta em volume de material removido* por insertos de desbaste (classe ISO M25), conforme apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Valores da análise de variância ANOVA para o resultado *vida de ferramenta em volume de material removido* por insertos de desbaste (classe ISO M25).

Fatores de controle	Gruas de Liberdade GL	Soma dos Quadrados SS	Soma dos Quadrados Ajustado SS Ajustado	Quadrado Médio Ajustado MS Ajustado	Fo	valor-P
Velocidade corte	1	85.439,4	85.439,4	85.439,4	212,19	0,000
Texturização	1	472,6	472,6	472,6	1,17	0,340
Veloc.corte * Texturização	1	145,9	145,9	145,9	0,36	0,580
Erro	4	1.610,6	1.610,6	402,7		
Total	7	87.668,6				
Valor do F tabelado		Grau de liberdade (GL) para cada fator				1
		GL para o Erro				4
		Significância				5 %
		F tabelado = 7,71				

Como para todos os fatores que apresentam $F_o > F$ tabelado (Anexo A) = 7,71, tem-se a indicação de que há menos de 5% de risco de assumirmos que os mesmos são significantes, quando de fato não são, então, analisando-se a Tabela 4.5 e com significância de 5%, pode-se afirmar que a *velocidade de corte* é causa de variações na *vida da ferramenta em volume de material removido*, enquanto que o fator *texturização* e a interação de 2ª ordem *velocidade de corte x texturização* não apresentaram significância estatística no resultado.

O gráfico de Pareto, mostrado na Figura 4.16, mostra que a única variável de influência no resultado com significância α de 5%, é a *velocidade de corte*.

Isto confirma o descrito por Diniz et al.(2006), de que a *velocidade de corte* é o parâmetro de usinagem que exerce maior influência sobre a *vida da ferramenta*, que neste trabalho está sendo medida pelo *volume de material removido*.

Contudo, nos ensaios de torneamento realizados, a *texturização* da superfície pré-revestimento não influenciou na vida das ferramentas em volume de material

removido, ao contrário do que se esperava. Isto se confirma ao observado na Figura 4.16, em que a vida de ferramenta em volume de material removido dos insertos de *texturização* convencional foram muito similares aos dos insertos *texturizados* a laser. Assim, a diferença de vida da ferramenta que supostamente deveria ser causada pela diferença de *texturização*, devido ao suposto aumentada rugosidade superficial e da aderência da cobertura, não ocorreu.

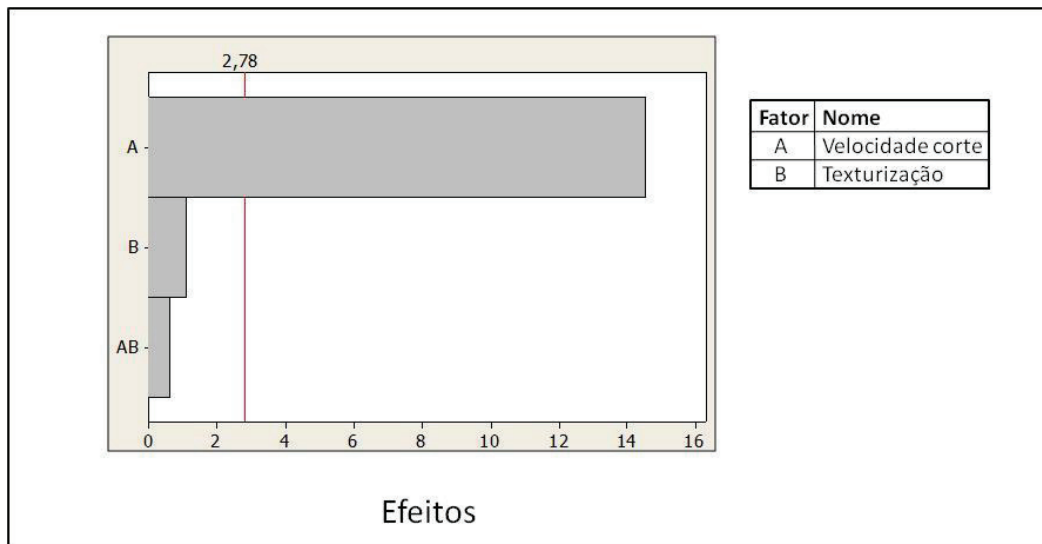


Figura 4.16: Gráfico de Pareto dos Efeitos sobre a variável de resposta *vida da ferramenta em volume de material removido* ($\alpha = 0,05$).

Na Figura 4.17, vê-se os efeitos principais no processo de torneamento da face, da *velocidade de corte* da *texturização* na *vida da ferramenta em volume de material removido*.

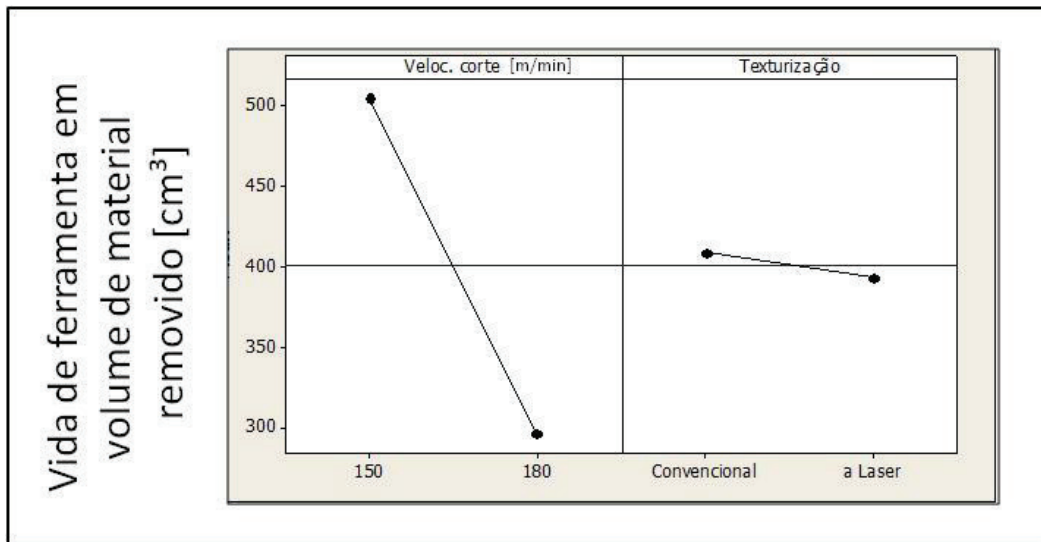


Figura 4.17: Principais Efeitos sobre a vida de ferramenta em volume de material removido.

A *velocidade de corte* tem um efeito sobre a *vida de ferramenta em volume de material removido* muito maior que a *texturização* dos substratos dos insertos, conforme mostrado no gráfico dos Efeitos Principais, pela inclinação da linha conectando as velocidades de corte de 150 e 180 m/min que é muito maior do que a da linha conectando a *texturização* convencional e a laser. O gráfico da Figura 4.17 também indica que:

- A *velocidade de corte* de 150 m/min produz mais *volume de cavaco removido* do que a *velocidade de corte* de 180 m/min;
- A *texturização* convencional produz *volume de material removido* similar ao da *texturização* a laser.

Na Figura 4.18, tem-se o gráfico da interação, que mostra o impacto que a mudança das configurações da *velocidade de corte* e *texturização* exerce sobre a *vida de ferramenta em volume de material removido*.

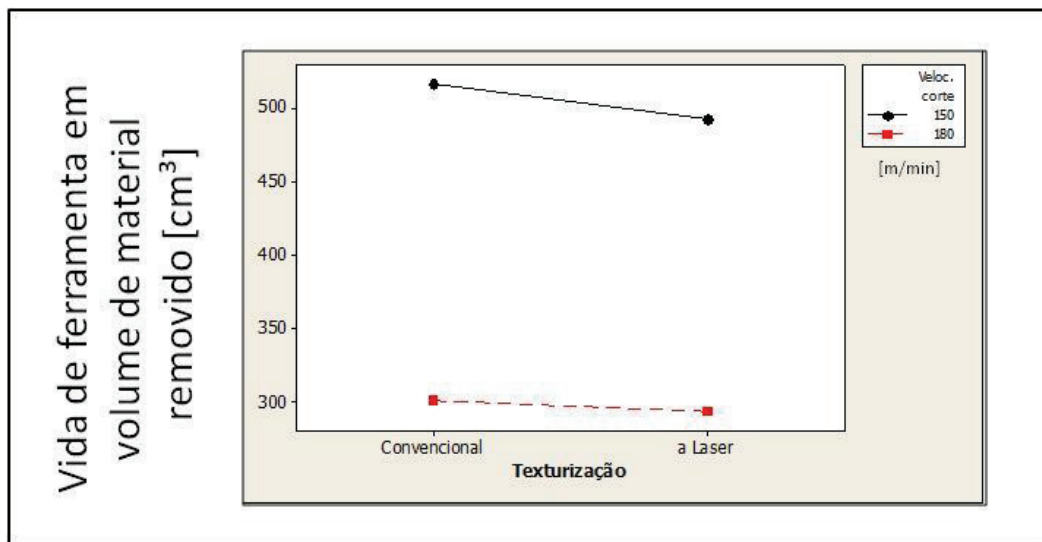


Figura 4.18: Interações sobre a vida de ferramenta em volume de material removido.

Este gráfico mostra que a velocidade de corte de 150m/min produz maior vida de ferramenta em volume de material removido e que a velocidade de corte e texturização interferem na vida de ferramenta em volume de material removido, mas não interagem, isto é, o efeito velocidade de corte não depende do efeito texturização, para afetar mais ou menos a vida de ferramenta em volume de material removido.

Pode-se então concluir, que a texturização a laser do substrato da ferramenta de classe ISO M25 não produziu o resultado esperado, pelo menos quando a ferramenta foi utilizada nas condições deste trabalho, isto é, a texturização a laser não contribuiu para o aumento da vida desta ferramenta. Uma tentativa de se explicar as razões deste fato vai ser feita no item 4.1.10 deste trabalho.

4.1.8. Análise das medições da potência de corte

A análise das medições da potência de corte das ferramentas de desbaste (classe ISO M25) deste trabalho vai ser feita procurando descobrir a influência dos parâmetros de texturização das ferramentas de corte (convencional e a laser), do parâmetro de usinagem (velocidade de corte) e da condição de desgaste da ferramenta (início e fim de

vida) sobre a potência de corte. A Figura 4.14 apresenta o fluxograma dos ensaios de torneamento destes insertos, com seus fatores e resultados.

A Tabela 4.6 mostra as médias calculadas dos picos das potências de corte obtidas nos ensaios com insertos de desbaste (classe ISO M25), nos diversos ensaios realizados e seus respectivos desvios padrão.

Tabela 4.6: Valores do resultado *potência de corte de ferramenta* nos ensaios de torneamento com insertos de desbaste (classe ISO M25).

Ferramenta em		Insertos convencionais vc = 150 m/min [kW]	Insertos texturizados a laser vc = 150 m/min [kW]	Insertos convencionais vc = 180 m/min [kW]	Insertos texturizados a laser vc = 180 m/min [kW]
Início de vida	Teste	0,83	0,95	0,99	0,85
	Réplica	0,53	0,82	0,62	0,75
	Média	0,68	0,88	0,80	0,80
	Desvio Padrão	0,21	0,09	0,26	0,07
	Porcentagem	30,9%	10,3%	32,7%	8,8%
Final de vida	Teste	1,05	1,10	1,45	1,33
	Replica	1,01	0,97	1,30	1,34
	Média	1,03	1,03	1,37	1,34
	Desvio Padrão	0,03	0,09	0,11	0,01
	Porcentagem	2,8%	8,4%	8,1%	0,4%

A Figura 4.19 mostra graficamente as médias dos valores dos picos do sinal de potência de corte obtidos nos ensaios de desbaste, tanto no início quanto no fim de vida da ferramenta, nos diversos ensaios realizados e seus respectivos desvios padrão.

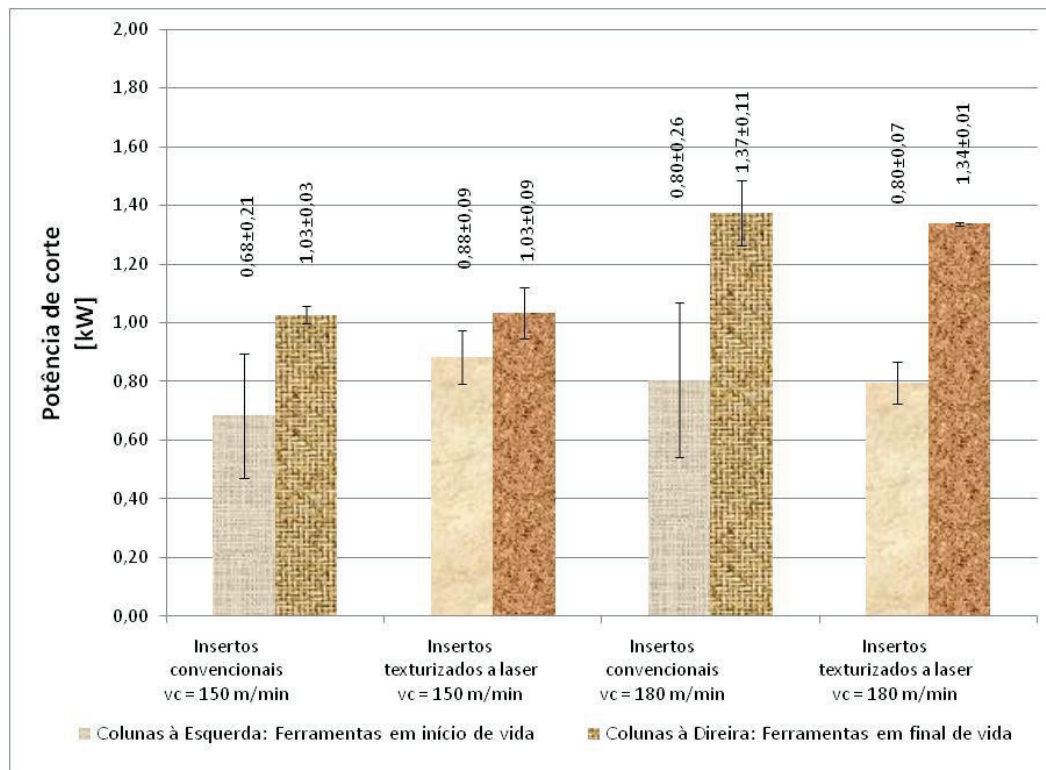


Figura 4.19: Média dos valores dos picos da *potência de corte* obtidos com ferramentas em início e final de vida nos diversos ensaios de desbaste (classe ISO M25). O critério de fim de vida foi o da altura máxima do desgaste de flanco $V_{Bmax} = 0,3\text{mm}$.

A Figura 4.19 mostra que o aumento do desgaste da ferramenta causa um aumento na *potência de corte* e é possível verificar, que a *potência de corte* aumenta quando se utiliza velocidade de corte mais alta (180 m/min). Estes resultados estão de acordo com o que a literatura afirma. Além disso, pode-se notar que não houve diferença significativa com relação à *potência de corte*, quando se compara os cortes realizados pelas ferramentas com texturizações convencionais e a laser.

Com os resultados de potência de corte obtidos nos testes práticos descritos acima, foi possível estabelecer uma análise da influência dos parâmetros de corte (texturização, nível de desgaste da ferramenta e velocidade de corte) e suas interações no resultado *potência de corte* nos ensaios realizados.

Para esta análise também foi utilizado o programa computacional MINITAB 16 e calculada a análise de variância ANOVA do fatorial completo 2^3 para o resultado *potência de corte* para os ensaios realizados com insertos de Desbaste (ISO M25), conforme apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Valores da análise de variância ANOVA para o resultado: *potência de corte* por insertos de desbaste (classe ISO M25) em início e final de vida.

ANÁLISE DE REGRESSÃO (CLASSE BSC-125) EM MILHO E MAMÃO VERDE.						
Fontes	Graus de Liberdade GL	Soma dos Quadrados SS	Soma dos Quadrados Ajustado SS Ajustado	Quadrado Médio Ajustado MS Ajustado	Fo	valor-P
Velocidade corte	1	0,117310	0,117306	0,117306	6,36	0,036
Texturização	1	0,006810	0,006806	0,006806	0,37	0,560
Nível desgaste	1	0,644010	0,644006	0,644006	34,94	0,000
Veloc.corte * Texturização	1	0,016260	0,016256	0,016256	0,88	0,375
Veloc.corte * Nível desgaste	1	0,091510	0,091506	0,091506	4,96	0,056
Texturização * Nível desgaste	1	0,013810	0,013806	0,013806	0,75	0,412
Velocidade * Texturização * Nível desgaste	1	0,006810	0,006806	0,006806	0,37	0,560
Erro	8	0,147450	0,147450	0,018431		
Total	15	1,043940				
Valor do F tabelado						
		Grau de liberdade (GL) para cada fator				1
		GL para o Erro				8
		Significância				5 %
F tabelado = 5.32						

Como para todos os fatores que apresentam $F_o > F$ tabelado (Anexo A) = 5,32, tem-se a indicação de que há menos de 5% de risco de assumirmos que os mesmos são significantes, quando de fato não são, então, analisando-se a Tabela 4.7 e com significância de 5%, pode-se afirmar que os fatores *velocidade de corte* e *nível de desgaste* são causas de variações na *potência de corte*, enquanto que o fator *texturização* e as interações de 2ª ordem *velocidade de corte x texturização*, *velocidade de corte x nível de desgaste*, *texturização x nível de desgaste* e a interação de 3ª ordem *velocidade x texturização x nível de desgaste* não apresentaram significância estatística no resultado.

Na Figuras 4.20 tem-se o gráfico de Pareto com os sete efeitos observados nos ensaios de usinagem, sendo que as variáveis *nível de desgaste* e *velocidade de corte* se mostraram ser de influência para a *potência de corte*, com significância α de 5%.

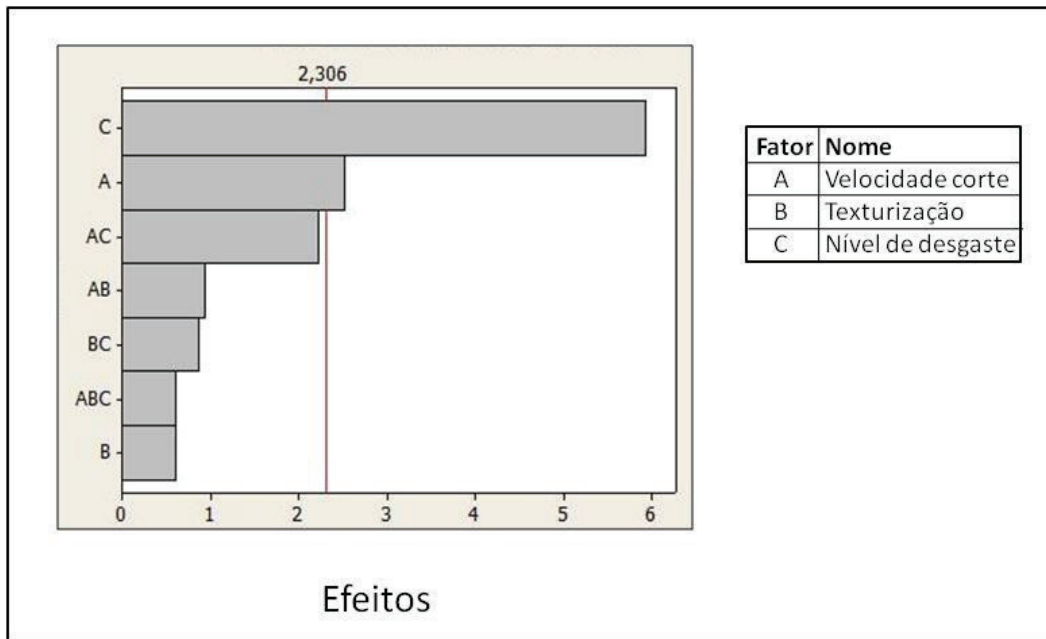


Figura 4.20: Gráfico de Pareto dos efeitos sobre a *potência de corte* de ferramentas em início e final de vida ($\alpha = 0,05$).

Na Figura 4.21, vê-se graficamente a influência das variáveis de maior significância no processo de torneamento da face, que são *nível de desgaste* e *velocidade de corte* na *potência de corte*.

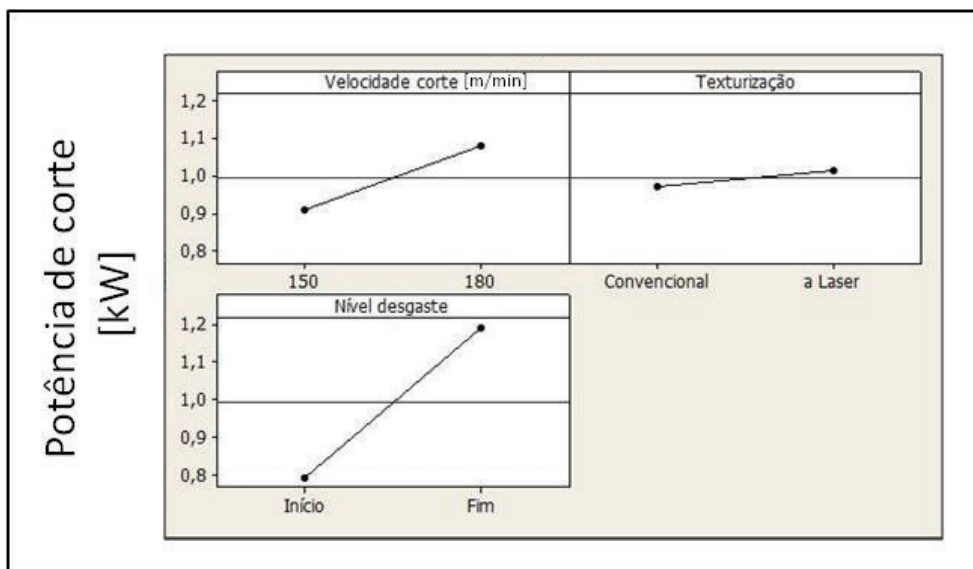


Figura 4.21: Principais efeitos sobre a *potência de corte* de ferramenta em final de vida.

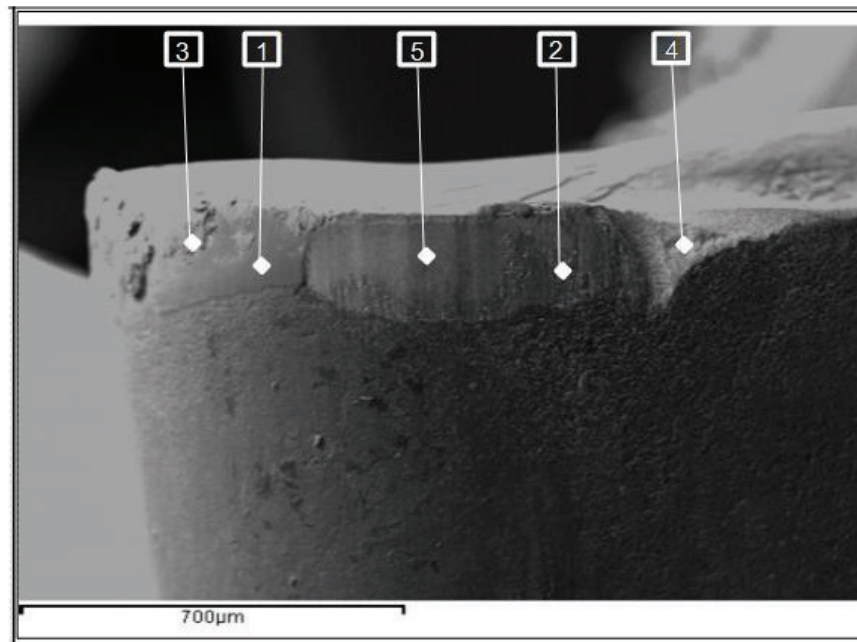
A partir da inclinação das linhas dos gráficos da Figura 4.21 pode-se verificar que o *nível de desgaste* das ferramentas tem um efeito sobre a *potência de corte* muito maior do que a *velocidade de corte*, pelo gráfico da Figura 4.21 também indica que:

- O *nível de desgaste* de início de vida da ferramenta exige menos potência de corte do que no final de vida;
- A *velocidade de corte* de 150 m/min exige menos potência de corte, do que a *velocidade de corte* de 180 m/min;
- A *texturização* convencional exige similar potência de corte do que a *texturização* a laser.

Pode-se então concluir, que a texturização a laser do substrato da ferramenta de classe ISO M25 não produziu o resultado esperado, isto é, a texturização a laser não contribuiu para a diminuição da potência consumida no corte. Como as ferramentas tinham sempre as mesmas geometria e material, tanto na ferramenta com texturização convencional, quanto com texturização a laser, o único fator que poderia influenciar a potência consumida seria uma diferença no coeficiente de atrito entre ferramenta e peça, e ferramenta e cavaco. Então, o fato da condição do substrato não influenciar a potência de corte indica que o processo de texturização do substrato não influenciou este coeficiente. Assim, as pequenas variações de rugosidade do substrato e do revestimento entre as ferramentas convencionais e texturizadas a laser não foram capazes de modificar o coeficiente de atrito da ferramenta a ponto de causar variação na potência consumida pelo corte.

4.1.9. Mecanismos de desgaste das ferramentas de torneamento em condições de desbaste

A Figura 4.22(a) é uma micrografia da região desgastada da ferramenta texturizada com jateamento de micro-partículas (convencional) no pré-revestimento utilizada nos ensaios em condições de desbaste com $v_c = 150$ m/min, mostrando também na Figura 4.22 (b), valores semi-quantitativos das composições químicas de alguns pontos destas regiões obtidos com a análise EDS da superfície de folga, do inserto convencional.



(a)

Porcentagem [%]												
TIPO DE PONTO EM ANÁLISE		REVESTIMENTO		MATERIAL ADERIDO						SUBSTRATO		Total
		Al	Ti	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	W	Co	
1	Revestimento	36,98	63,02									100,00
2	Material aderido			68,17	17,31	9,58	2,6	0,5	1,84			100,00
3	Material aderido			66,41	17,7	10,23	3,19	0,64	1,83			100,00
4	SUBSTRATO			7,22	3,97	0,96			0,53	86,03	1,29	100,00
5	SUBSTRATO			2,1	1,53					87,67	8,7	100,00

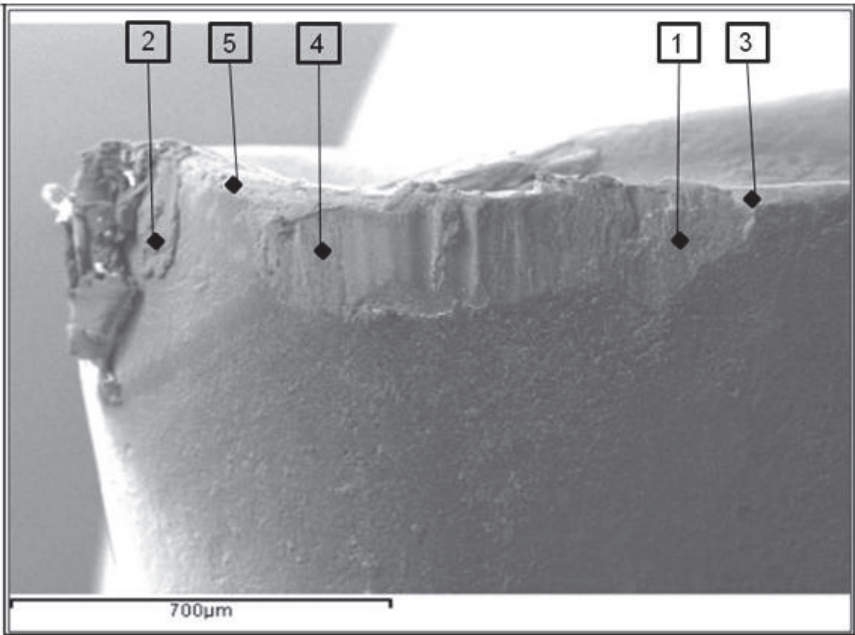
(b)

Figura 4.22:(a) Micrografia do desgaste da ferramenta; (b) Análise de EDS do ensaio de torneamento em desbaste na superfície de folga do inserto texturizado com jateamento de micro-partículas (convencional) no pré-revestimento e $v_c = 150$ m/min.

Analisando-se a Figura 4.22 (b) pode-se ver que a região indicadas por “1” mostrada na Figura 4.22 (a) possui o revestimento mais externo de TiAlN intacto, sem nenhuma marca de abrasão (riscos abrasivos paralelos na direção de corte). Nas regiões “4” e “5” o substrato foi exposto, isto é, o revestimento externo de TiAlN foi removido e o W e Co do substrato foram detectados pelo EDS. As regiões “2” e “3” são formadas pelo material da peça, que se aderiu à superfície de folga da ferramenta, devido à extrusão do cavaco em formação, entre a aresta de corte e a superfície usinada, gerada pela alta pressão normal, que o cavaco impõe à ferramenta e também, por alguma

vibração entre ferramenta e peça, que possibilitava a geração de espaços, para que este cavaco em formação passasse entre a ferramenta e a peça.

A Figura 4.23(a) é uma micrografia da região desgastada da ferramenta texturizada a laser no pré-revestimento, utilizada no ensaio em condições de desbaste com $v_c = 150$ m/min, mostrando também na Figura 4.23 (b) valores semi-quantitativos das composições químicas de alguns pontos destas regiões obtidos com a análise EDS da superfície de folga, do inserto (convencional) no pré-revestimento.



(a)

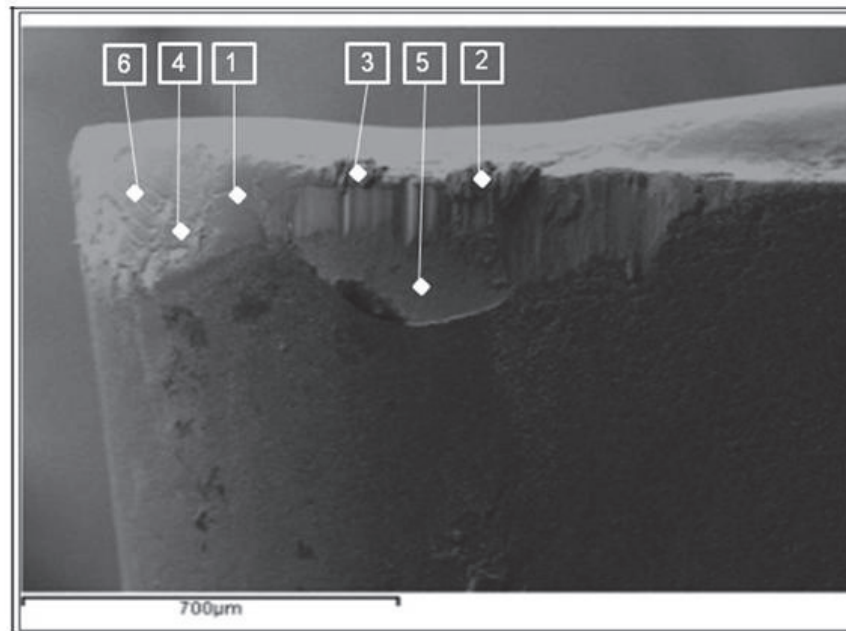
Porcentagem [%]												
TIPO DE PONTO EM ANÁLISE		REVESTIMENTO		MATERIAL ADERIDO						SUBSTRATO		Total
		Al	Ti	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	W	Co	
1	Material aderido			67,32	17,69	10	2,54	0,48	1,98			100,01
2	Material aderido			66,36	18,11	9,9	3,22	0,56	1,85			100,00
3	SUBSTRATO			2,72	2,06	0,7				87,02	7,5	100,00
4	SUBSTRATO			17,24	7,4	2,44			1,02	66,64	5,26	100,00
5	SUBSTRATO	1,6	3,48	6,28	6,82	0,75			1,47	73,06	6,54	100,00

(b)

Figura 4.23:(a) Micrografia do desgaste da ferramenta; (b) Análise de EDS doensaio de torneamento em desbaste na superfície de folga do inserto texturizado a laser no pré-revestimento e $v_c = 150$ m/min.

Os resultados das análises EDS da Figura 4.23 (b) desta ferramenta mostram que nas regiões indicadas por “3”, “4” e “5” da Figura 4.23 (a), o substrato foi exposto, isto é, o revestimento externo de TiAlN foi removido. As regiões “1” e “2” são formadas pelo material da peça, que se aderiu à superfície de folga da ferramenta, devido à extrusão do cavaco em formação, que já foi comentada anteriormente. Consegue-se também visualizar algumas marcas de abrasão (riscos paralelos à direção de corte), ocorridas durante a remoção deste material da peça aderido.

A Figura 4.24 (a) é uma micrografia das regiões desgastadas da ferramenta texturizada com jateamento de micro-partículas (convencional) pré-revestimento utilizada nos ensaios em condições de desbaste com $v_c = 180$ m/min, mostrando também na Figura 4.24 (b), valores semi-quantitativos das composições químicas de alguns pontos destas regiões obtidos com a análise EDS das superfícies de folga dos insertos convencionais.



(a)

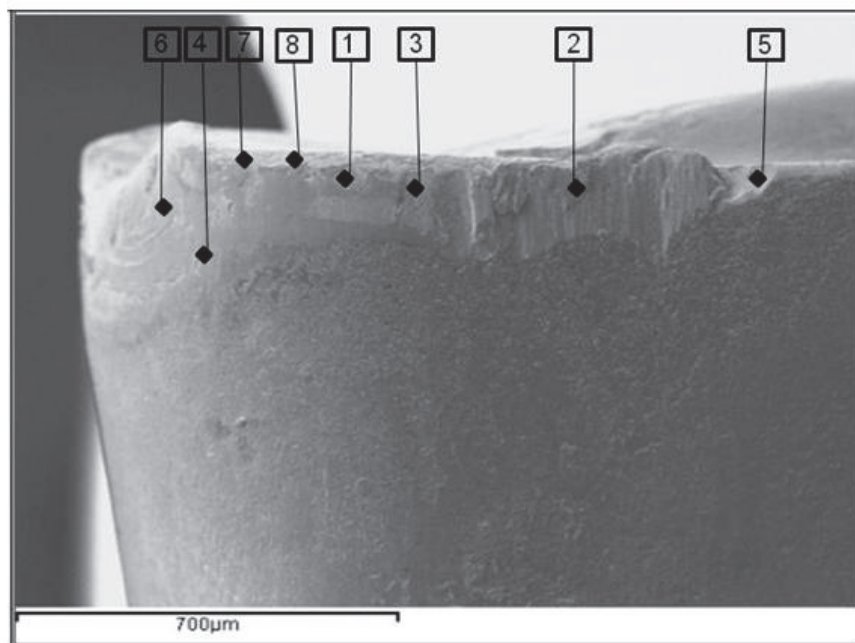
Porcentagem [%]												
TIPO DE PONTO EM ANÁLISE		REVESTIMENTO		MATERIAL ADERIDO						SUBSTRATO		Total
		Al	Ti	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	W	Co	
1	Revestimento	36,62	63,38									100,00
2	Material aderido			67,92	17,53	9,54	2,48	0,51	2,02			100,00
3	Material aderido			66,86	17,63	10,41	2,73	0,53	1,84			100,00
4	Material aderido	12,15	20,61	40,27	15,61	6,84	2,24	1,11	1,17			100,00
5	SUBSTRATO			0,82	1,56					87,05	10,57	100,00
6	SUBSTRATO			1,44	1,16	1,09				89,38	6,93	100,00

(b)

Figura 4.24:(a) Micrografia do desgaste da ferramenta; (b) Análise de EDS do ensaio de torneamento em desbaste na superfície de folga do inserto texturizado com jateamento de micro-partículas (convencional)no pré-revestimento e $v_c = 180$ m/min.

Os resultados das análises EDS da Figura 4.24 (b) desta ferramenta mostram que a região indicadas por “1” da Figura 4.24 (a) possui o revestimento mais externo de TiAlN intacto, sem nenhuma marca de abrasão (riscos abrasivos paralelos à direção de corte). Nas regiões “5” e “6”, o substrato foi exposto, isto é, o revestimento externo de TiAlN foi removido. As regiões “3” e “4” são formadas pelo material da peça, que se aderiu à superfície de folga da ferramenta, devido à extrusão do cavaco em formação, que já foi comentada anteriormente. Consegue-se também visualizar na região desgastada, marcas de abrasão (riscos paralelos à direção de corte).

A Figura 4.25(a) é uma micrografia das regiões desgastadas da ferramenta texturizada a laser no pré-revestimento utilizada nos ensaios em condições de desbaste com $v_c = 180$ m/min, mostrando também na Figura 4.25 (b), valores semi-quantitativos das composições químicas de alguns pontos destas regiões obtidos com a análise EDS das superfícies de folga do insertos texturizados a laser no pré-revestimento.



Porcentagem [%]												
TIPO DE PONTO EM ANÁLISE		REVESTIMENTO		MATERIAL ADERIDO						SUBSTRATO		Total
		Al	Ti	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	W	Co	
1	Revestimento	26,37	73,63									100,00
2	Material aderido			69,77	17,71	10,22		0,47	1,83			100,00
3	Material aderido			68,55	17,33	9,48	2,33	0,39	1,92			100,00
4	Material aderido			64,33	17,6	9,48	6,18	0,67	1,74			100,00
5	SUBSTRATO			53,95	15,48	7,42			1,65	21,51		100,01
6	SUBSTRATO	15,04	28,97	4,76	2,52	0,59				44,71	3,41	100,00
7	SUBSTRATO		0,36	10,67	10,38	1,34			1,35	71,35	4,65	100,10
8	SUBSTRATO			16,25	10,93	2,26			2,18	66,52	1,86	100,00

Figura 4.25:(a) Micrografia do desgaste da ferramenta; (b) Análise de EDS do ensaio de torneamento em desbaste na superfície de folga do inserto texturizado a laser no pré-revestimento e $v_c = 180$ m/min.

Os resultados das análises EDS da Figura 4.25(b) desta ferramenta mostram que a região indicada por “1” da Figura 4.25 (a) possui o revestimento mais externo de TiAlN intacto, sem nenhuma marca de abrasão (riscos abrasivos paralelos na direção de corte). Nas regiões “5”, “6”, “7” e “8”, o substrato foi exposto, isto é, o revestimento externo de TiAlN foi removido. As regiões “2”, “3”, “4” e “5” são formadas pelo material da peça, que se aderiu à superfície de folga da ferramenta, devido à extrusão do

cavaco em formação, que já foi comentado anteriormente. Consegue-se também visualizar algumas poucas marcas de abrasão (riscos paralelos na direção de corte).

Resumindo os fenômenos de desgaste ocorridos nas ferramentas utilizadas, pode-se dizer que houve abrasão, que auxiliou na remoção da camada de cobertura da ferramenta na superfície de folga, que por sua vez, incentivou a adesão. Uma vez que o material da peça ficou aderido, o movimento relativo entre a ferramenta e a peça removeu ciclicamente a camada aderida, levando consigo, partículas da ferramenta, que ao atritarem com a porção da ferramenta a sua frente, promoveram mais desgaste por abrasão. Este fenômeno é chamado por Trent (2000), de *attrition*. Vê-se nas Figuras mostradas, que as variáveis de entrada “velocidade de corte” e “condições do substrato” não alteraram o fenômeno de desgaste. O aumento da variável *velocidade de corte*, no entanto, fez com que estes fenômenos ocorressem mais rapidamente, o que causou a diminuição da vida da ferramenta, conforme mostrado no item 4.1.7.

4.1.10. Discussão sobre a interação dos resultados dos ensaios de vida de ferramenta e dos ensaios de caracterização das superfícies para a ferramenta de desbaste

Há que se começar esta discussão com a afirmação, de que os resultados deste trabalho não foram os esperados, isto é, a texturização a laser do substrato não aumentou a vida da ferramenta, pelo menos, para a ferramenta classe ISO M25, testada nas condições utilizadas, ao contrário do que ocorreu no trabalho de NEVES, 2010, que deu origem às investigações deste trabalho.

Mas isto ocorreu, porque a texturização a laser não foi capaz de modificar substancialmente, nem a textura do substrato, nem o percentual de Co da superfície. Consequentemente, ela não influenciou na adesividade do revestimento, medida pelo teste Rockwell C e nem na vida da ferramenta, que como visto, não foi influenciada pelo método de texturização. Vejamos, em termos de percentual de Co da superfície do substrato, mostrado na Figura 4.11, que não existe diferença estatística entre os teores de Co dos substratos bruto e texturizado a laser. Em termos de rugosidade, como já foi comentado, o substrato texturizado a laser, pode ser apontado como mais adequado por ter Assimetria S_{sk} positivo, que de acordo com a hipótese feita neste trabalho é melhor,

mas nem este substrato é muito positivo e nem o convencional é muito negativo. Porém, crê-se que o prejuízo à ancoragem dos revestimentos causado pelo grande valor de Curtose S_{ku} dos dois tipos de substrato, fez com que ambas as ferramentas se comportassem mal no teste de indentação Rockwell C e fez também, com que o fator *tipo de texturização* não causasse influência na resposta *vida de ferramenta*. Além disso, também as superfícies revestidas de ambas as ferramentas foram similares em termos de rugosidade. A ferramenta convencional é mais lisa que a ferramenta texturizada a laser, ambas após o processo de revestimento, o que é pouco positivo para ela, de acordo com a hipótese proposta. Não há praticamente diferença em termos de Assimetria S_{sk} , pois este parâmetro para as duas ferramentas é um pouco negativo e em termos de Curtose S_{ku} , a ferramenta revestida e com substrato texturizado a laser é mais adequada, já que tem Curtose S_{ku} mais próximo de três. Então, enquanto a ferramenta convencional era melhor em termos do parâmetro Rugosidade média S_a , uma vez que era mais lisa, a ferramenta texturizada a laser era melhor em termos de Curtose S_{ku} , o que foi mais um fator a fazer com que as mesmas tivessem desempenho similares, tanto no teste de indentação, quanto nos ensaios de vida da ferramenta. A ferramenta texturizada a laser apresentou um maior número de defeitos em seu substrato, mas estes defeitos não foram suficientes para fazer com que ela apresentasse vidas mais curtas das ferramentas.

4.2. Ensaios em condições de acabamento (ferramentas classe ISO M15)

4.2.1. Análise da aderência do revestimento no substrato das ferramentas

São mostradas nas Figuras 4.26 (a) e (b), duas indentações Rockwell C feitas sobre a camada do revestimento na superfície de saída, lado A e B, de uma ferramenta de acabamento (classe ISO M15), (a) de substrato texturizado pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convencional) e duas indentações na superfície de uma ferramenta texturizada a laser, obtidas pelo MEV.

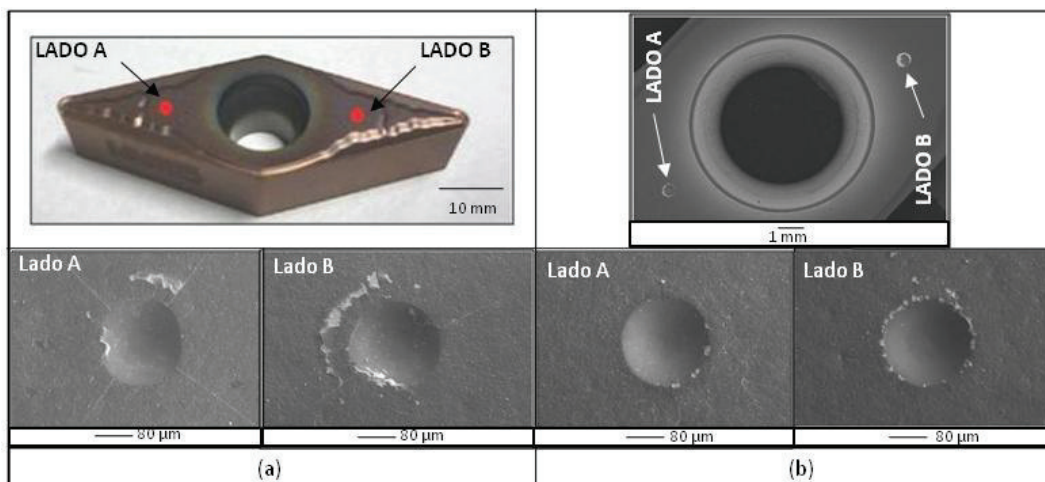


Figura 4.26: Indentações Rockwell C de ferramentas revestidas de acabamento (classe ISO M15), lados A e B: (a) Texturizadas pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convencional) e (b) Texturizadas pré-recobrimento a laser. As micrografias foram feitas em MEV.

Observa-se nesta figura, a ocorrência de delaminação do revestimento TiAlN da ferramenta convencional, em forma de área irregular de extensão e localizada nas áreas ao redor das indentações, expondo parcialmente os substratos de metal duro, na cor cinza claro. Entretanto, na ferramenta texturizada a laser, a delaminação do revestimento de TiAlN apresenta-se muito pequena, localizada em áreas pequenas, especificamente nas bordas das indentações.

Comparando-se estas quatro indentações com o padrão do Teste VDI 3198, mostrado na Figura 3.27, verifica-se a ocorrência de “Falha Inaceitável código: HF5”, para a ferramenta convencional e algo entre HF3 e HF4, para a ferramenta texturizada a laser.

Este resultado mostra que a modificação prévia do substrato pelo feixe de laser, foi suficiente para criar uma textura que propiciasse um ancoramento mecânico mais efetivo dos revestimentos, quando comparado à textura feita pelo jateamento com micro-partículas (convencional). Este tipo de ancoramento foi mais eficiente à remoção da camada de cobertura pelo menos em um teste estático, do tipo “indentações Rockwell C”. Porém, como se verificou nos ensaios de usinagem, mostrados no item 4.2.7, este maior ancoramento não resultou em maior tempo de permanência da camada de cobertura e, conseqüentemente, maior vida da ferramenta.

Um outro ponto a ser notado, é que a delaminação apresentada pela ferramenta de acabamento texturizada a laser é bem menor, que aquela apresentada pela ferramenta de desbaste, também texturizada a laser. Importante lembrar que a camada de revestimento depositada nas duas ferramentas é a mesma. A diferença entre elas é o substrato. Assim, comprova-se, que uma superfície reage diferentemente de outra ao feixe a laser, dependendo de fatores, como sua refletividade e condutividade térmica.

As Figuras 4.27(a) e (b) mostram um exemplo de indentação Rockwell C na superfície de saída, do lado B, de uma ferramenta de acabamento (classe ISO M15), de substrato texturizado pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convencional) e a Figura 4.27 (c) mostra a micrografia feita também pelo MEV, com o feixe de elétrons retroespalhados (BSE).

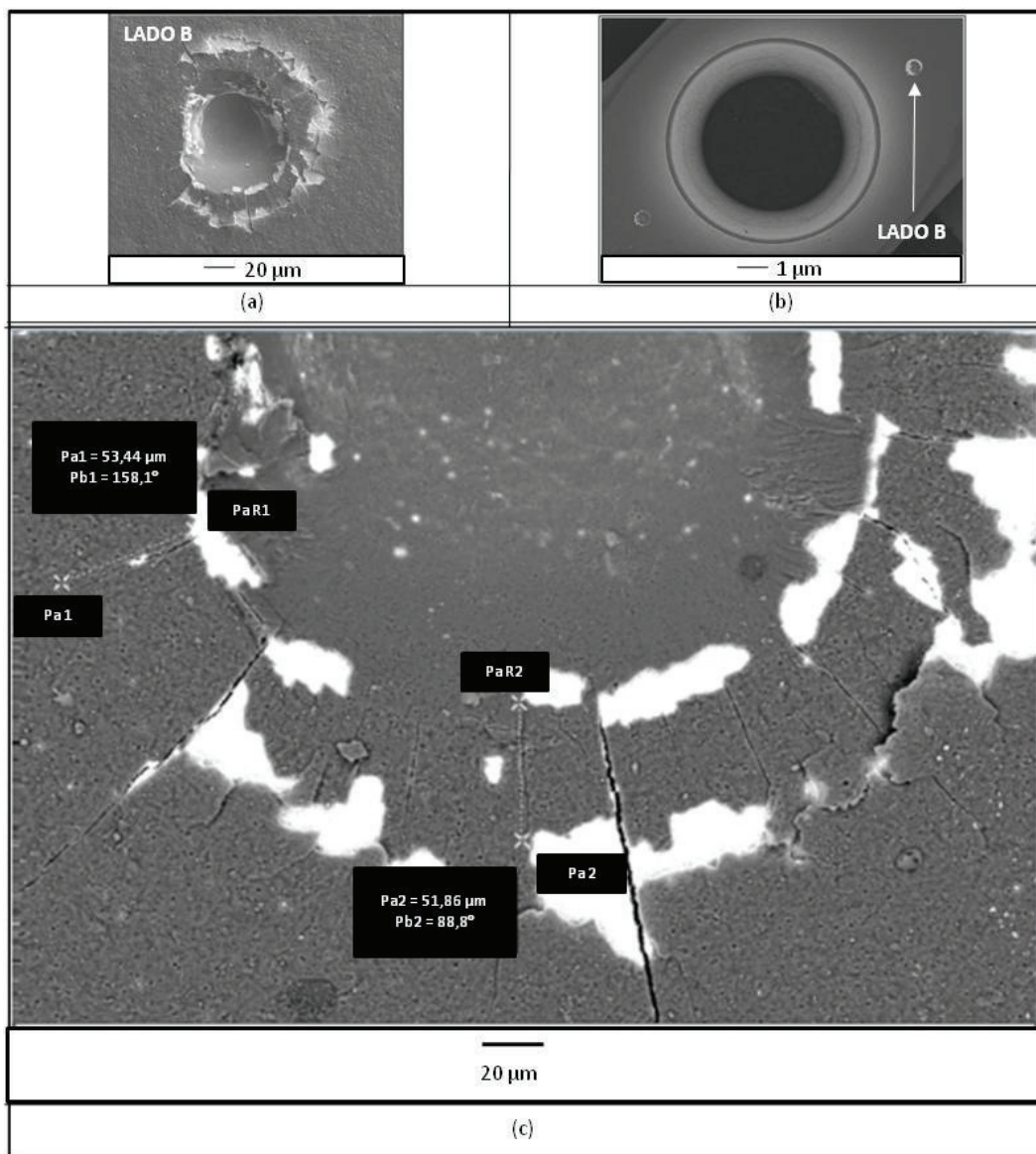


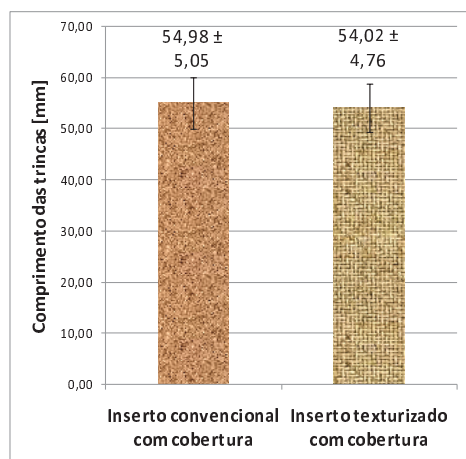
Figura 4.27: (a) e (b) Micrografia de indentação Rockwell C em exemplo de ferramenta de acabamento (classe ISO M15), com texturização pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convencional) e (c) Micrografia obtida pelo feixe de elétrons retroespalhados (BSE) do MEV.

A partir destas figuras de duas indentações Rockwell C da superfície de saída, lado A e B, de cada (4) ferramentas de acabamento (classe ISO M15), de substrato texturizado pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convencional) e duas indentações na superfície de cada (4) ferramentas texturizadas a laser, foi possível registrar-se os comprimentos das trincas e contar-se a quantidade delas. De posse destes

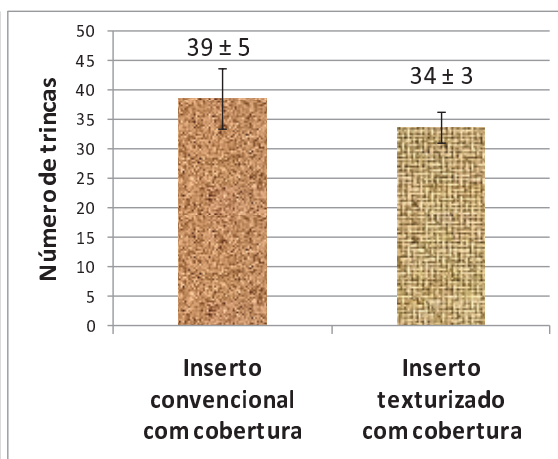
dados pode-se obter então, a Tabela 4.8 e os seguintes dois gráficos das Figuras 4.28 (a) e (b).

Tabela 4.8: Valores dos comprimento e quantidade das trincas do teste de aderência dos insertos convencional e texturizados a laser usados nos testes de usinagem de acabamento (classe ISO M15).

ACABAMENTO		Comprimento das trincas do teste de aderência [mm]		Quantidade de trincas do teste de aderência	
		Inserto convencional com cobertura	Inserto texturizado a laser com cobertura	Inserto convencional com cobertura	Inserto texturizado a laser com cobertura
Teste	Lado A	58,96	55,33	35	37
	Lado B	50,36	52,89	37	31
Réplica	Lado A	50,89	59,62	46	33
	Lado B	59,73	48,22	37	35
Média		54,98	54,02	39	34
Desvio padrão		5,05	4,76	5	3
Porcentagem		9,18%	8,81%	13,12%	7,90%



(a)



(b)

Figura 4.28:(a) Comprimento e (b) número de trincas de indentações Rockwell C para as ferramentas de acabamento (classe ISO M15) com texturização pré-recobrimento por jateamento de micro-partículas (convencional) e com texturização a laser, obtida pelo feixe de elétrons retroespalhados (BSE) do MEV.

Nas ferramentas com textura convencional e textura a laser também não foi constatada diferença de comprimento e nem de quantidade das trincas verificadas nas imagens das indentações de (4) ferramentas, nos dois lados, pelo feixe de elétrons retroespalhados do MEV.

A similaridade das trincas apresentadas nas delaminação do revestimento TiAlN para as ferramentas convencional e texturizada a laser, também indica uma adesividade muito semelhante sobre os substratos de metal duro e uma capacidade em suportar carregamentos, reforçadas pelo desempenho similar de ambas nos testes práticos.

4.2.2. Medições de rugosidade 3D das superfícies das ferramentas

A Figura 4.290 mostra a média dos valores de rugosidade média 3D (S_a) dos substratos: bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e insertos com cobertura: texturizado a laser (pré-cobertura) e convencional. Os resultados mostram que a texturização a laser aumentou a rugosidade média 3D (S_a) da superfície dos substratos em cerca de 24%, que o revestimento diminuiu a rugosidade da ferramenta texturizada a laser em cerca de 30% e da ferramenta convencional, em cerca de 69%. Portanto, o inserto texturizado com cobertura apresentou uma rugosidade quase três vezes maior que a do inserto convencional (2,8 vezes). Isto representa uma vantagem para os insertos convencionais, quanto à rugosidade média 3D (S_a) das ferramentas. Comparando-se estes resultados com aqueles obtidos na ferramenta de desbaste, vê-se que as ferramentas revestidas tiveram a rugosidade média S_a próximas, mas os substratos desta ferramenta (M15) foram mais rugosos que os da ferramenta de desbaste (M25).

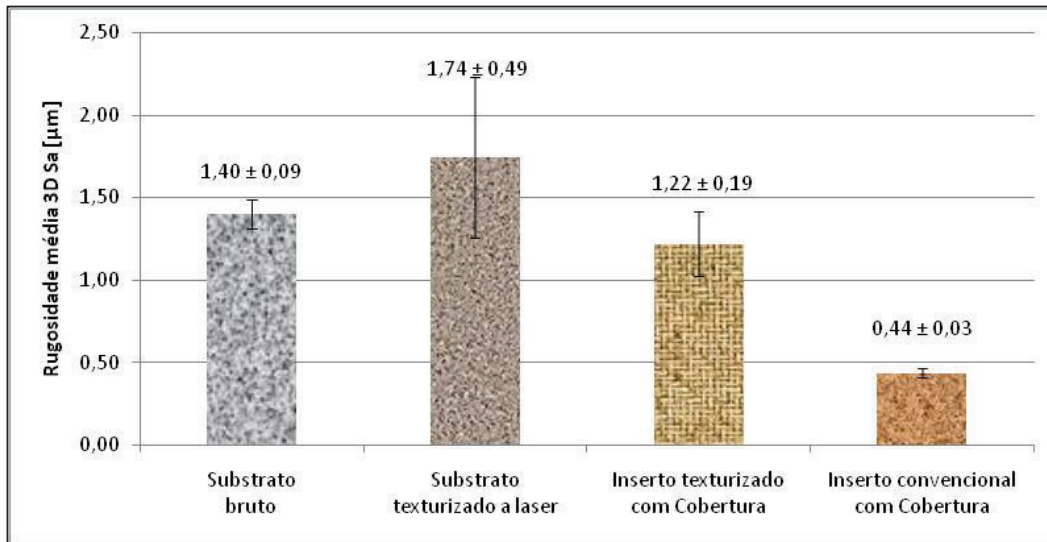


Figura 4.29: Comparação entre a rugosidade média 3D (S_a) dos substratos: bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e insertos com cobertura: texturizado a laser e convencional (pré-cobertura).

A Figura 4.30 mostra a média dos valores de rugosidade 3D Assimetria ou “Skewness” (S_{sk}) dos substratos bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e insertos com cobertura texturizado a laser (pré-cobertura) e convencional.

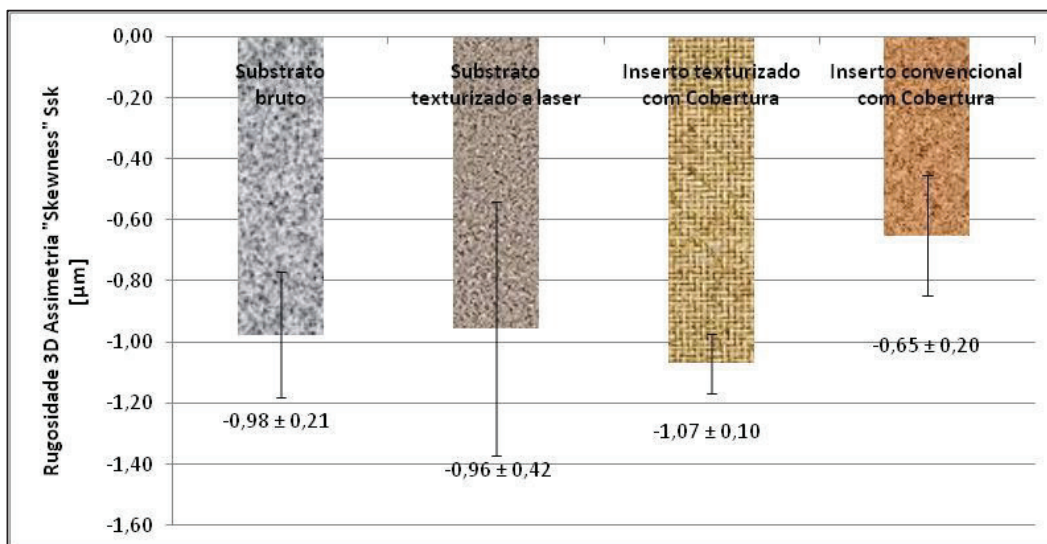


Figura 4.30: Comparação entre a rugosidade 3D Assimetria ou “skewness” (S_{sk}) dos substratos: bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e insertos com cobertura: texturizado a laser e convencional (pré-cobertura).

Os resultados mostram que as superfícies dos substratos brutos apresentaram a média de Assimetria S_{sk} menor que zero, isto é, superfícies com predominância de picos (maior parte do perfil está acima da linha média) e alguns profundos vales. Este resultado é similar ao que ocorreu para as ferramentas de desbaste.

Para as superfícies dos substratos texturizados a laser os resultados apresentaram também a média de Assimetria S_{sk} menor que zero, mas menor (menos negativo), que a ferramenta convencional. Este resultado é diferente daquele obtido na ferramenta de desbaste, que teve S_{sk} positivo. Novamente se comprova que a exposição de superfícies diferentes (no caso, substratos M15 e M25) ao mesmo feixe de laser (os parâmetros de laser utilizados nas duas superfícies foram idênticos) pode gerar texturas diferentes, dependendo da interação do laser com a superfície. Na ferramenta convencional, os valores de Assimetria das duas classes de ferramenta (M15 e M25) foram bem próximos, mas na ferramenta texturizada a laser, a Assimetria da ferramenta de acabamento (M15) teve módulo maior (mais negativo), que a ferramenta de desbaste (M25).

Os resultados mostram ainda, que a superfície dos insertos texturizados a laser, que foram então revestidos pelo processo PVD apresentaram de novo a média de Assimetria S_{sk} menor que zero. Verificou-se então, que o processo de revestimento por PVD manteve neste caso o mesmo perfil da rugosidade das superfícies sobre a linha média (substrato e superfície revestida tem S_{sk} negativos) com valores de Assimetria muito similares.

Os resultados mostram por fim, que as superfícies dos insertos texturizados por jateamento de micro-partículas (convencional) que foram também revestidos pelo processo PVD, apresentaram a média de S_{sk} menor que zero, isto é, mantiveram as superfícies com maior parte do perfil acima da linha média. Verificou-se neste caso, que o processo de revestimento por PVD diminuiu a Assimetria média deste perfil em cerca de (33%).

Também nas ferramentas utilizadas em desbaste teve-se a Assimetria das superfícies revestidas negativa. As ferramentas convencionais revestidas de desbaste e acabamento tiveram S_{sk} muito próximos, mas a ferramenta texturizada a laser e revestida de acabamento apresentou S_{sk} maior (mais negativo) que a ferramenta de desbaste.

A Figura 4.31 mostra a média dos valores de rugosidade 3D Curtose ou “Kurtosis” (S_{ku}) dos substratos: bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e insertos com cobertura: texturizado a laser (pré-cobertura) e convencional.

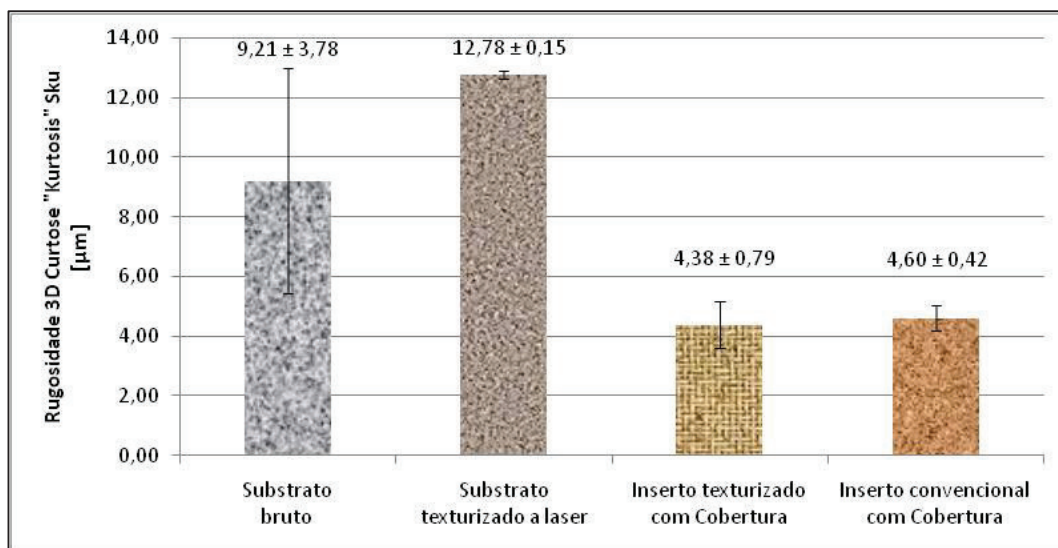


Figura 4.31: Comparação entre a rugosidade 3D “kurtosis” (S_{ku}) dos substratos: bruto e texturizado a laser (sem cobertura) e insertos com cobertura: texturizado a laser e convencional (pré-cobertura).

Os resultados mostram que as superfícies dos substratos brutos, texturizados a laser (sem cobertura), insertos com cobertura: texturizado a laser (pré-cobertura) e convencional apresentaram a média de Curtose S_{ku} maior que três, isto é, superfícies com períodos do perfil de rugosidade pequeno e, com isso, cheias de picos e vales (grande curtose).

Analisando os resultados, verificou-se que o valor da média de curtose (S_{ku}) dos texturizados a laser é 38% maior que do substrato bruto.

Os resultados mostram ainda, que a superfície dos insertos texturizados a laser, que foram então revestidos pelo processo PVD apresentaram uma redução da média de Curtose em (66%).

As superfícies dos insertos texturizados por jateamento de micro-partícula (convencional) que foram também revestidos pelo processo PVD, apresentaram uma redução da Curtose média de (50%).

Outro resultado mostrado na Figura 4.31, é que as superfícies dos insertos texturizados por jateamento de micro-partículas (convencional) e os texturizados a laser,

ambos revestidos pelo processo PVD, ainda apresentaram a média de Curtose S_{ku} maior que três, apesar de bem menores, do que os seus substratos, isto é, superfícies com predominância de altos picos e baixos vales e mais uma vez, uma similaridade, neste caso agora de cerca de 5,0% de diferença entre elas.

Comparando-se os resultados da Figura 4.31 com os da Figura 4.6, relativa ao Curtose obtido nas ferramentas de desbaste, vê-se que em termos de comportamento, os resultados são similares, isto é, o Curtose dos substratos é muito acima de três e das superfícies revestidas é pouco maior que três. Porém, o Curtose dos substratos da ferramenta de acabamento é menor que o das ferramentas de desbaste e o Curtose das superfícies revestidas das duas classes de ferramenta (M15 e M25) é próximo.

Para tornar mais fácil a comparação destas superfícies com as hipóteses criadas neste item do trabalho sobre características do substrato e das superfícies revestidas mais adequadas para uso como ferramenta de usinagem construiu-se as Figuras 4.32 (a), (b), (c) e (d).

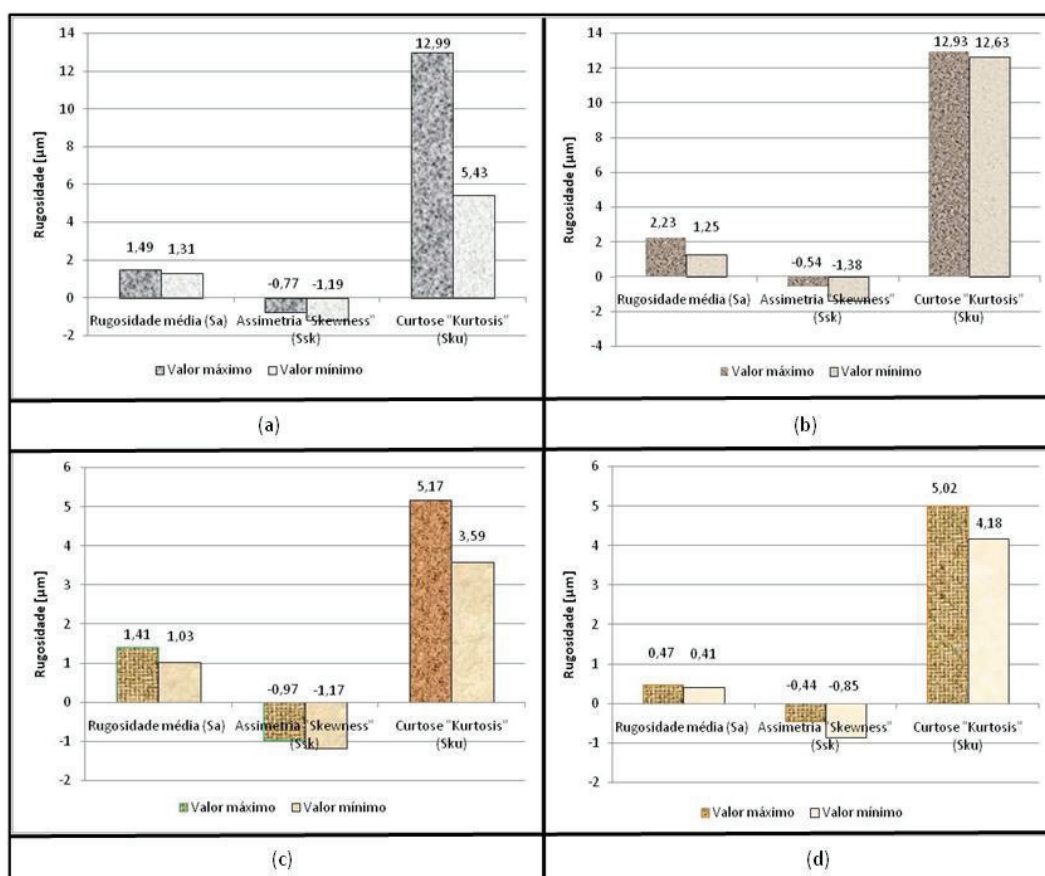


Figura 4.32: Comparação dos valores de rugosidades3D entre: (a) substrato bruto; (b) substrato texturizados a laser sem cobertura e (c) inserto texturizados convencional pré-

revestimento, com cobertura e (d) inserto texturizado a laser pré-revestimento, com cobertura.

Comparando-se os dois tipos de substratos, vê-se que os dois apresentam os valores da rugosidade média S_a altos, com o S_a do substrato texturizado maior que o bruto. Assimétrias praticamente iguais, sendo ambas negativas, o que de acordo com a hipótese não é adequado para o ancoramento do revestimento e Curtose de ambos sendo altos, isto é, bem distantes de três, o que também não é adequado, de acordo com a hipótese construída. Em termos de rugosidade do substrato, o que pode explicar o melhor resultado da ferramenta texturizada a laser no teste de indentação, uma vez que apresentou menor área delaminada, é o fato desta superfície ser mais rugosa, isto é, com rugosidade média S_a mais alta. Comparando-se as duas superfícies revestidas com a hipótese criada neste item do trabalho, vê-se que a superfície revestida convencional é mais lisa, isto é, com rugosidade média S_a menor, do que a texturizada a laser, que é um ponto positivo para a superfície texturizada convencional no pré-revestimento, pois ambas têm Assimetria S_{sk} negativas. Entretanto, a superfície texturizada a laser é mais negativa que a convencional, o que é um ponto a favor da ferramenta texturizada a laser e ambas têm Curtose, com valores próximos a três, o que é bom para as duas. Então, em termos de adequação da superfície da cobertura para uso como ferramenta de usinagem, vê-se que as duas ferramentas se equivalem, já que a texturizada a laser é melhor em termos de Assimetria S_{sk} , mas é pior em termos de rugosidade média S_a .

4.2.3. Análise entre texturizações do substrato de acabamento (classe ISO M15)

Na avaliação dos substratos bruto e texturizado a laser da ferramenta para uso em acabamento (classe ISO M15), pelas micrografias do MEV, observa-se alguns defeitos em suas superfícies de saída (micro-trincas e presença de estrutura de pó sinterizado), conforme mostrado nas Figuras 4.33 (a), (b), (c), (d), (e) e (f).. Verifica-se também, alguns defeitos nas superfícies de folga dos substratos (micro-trincas, micro-

furos de sopro e presença de estrutura de pó sinterizado), conforme mostrado nas Figuras 4.34 (a), (b), (c), (d), (e) e (f).

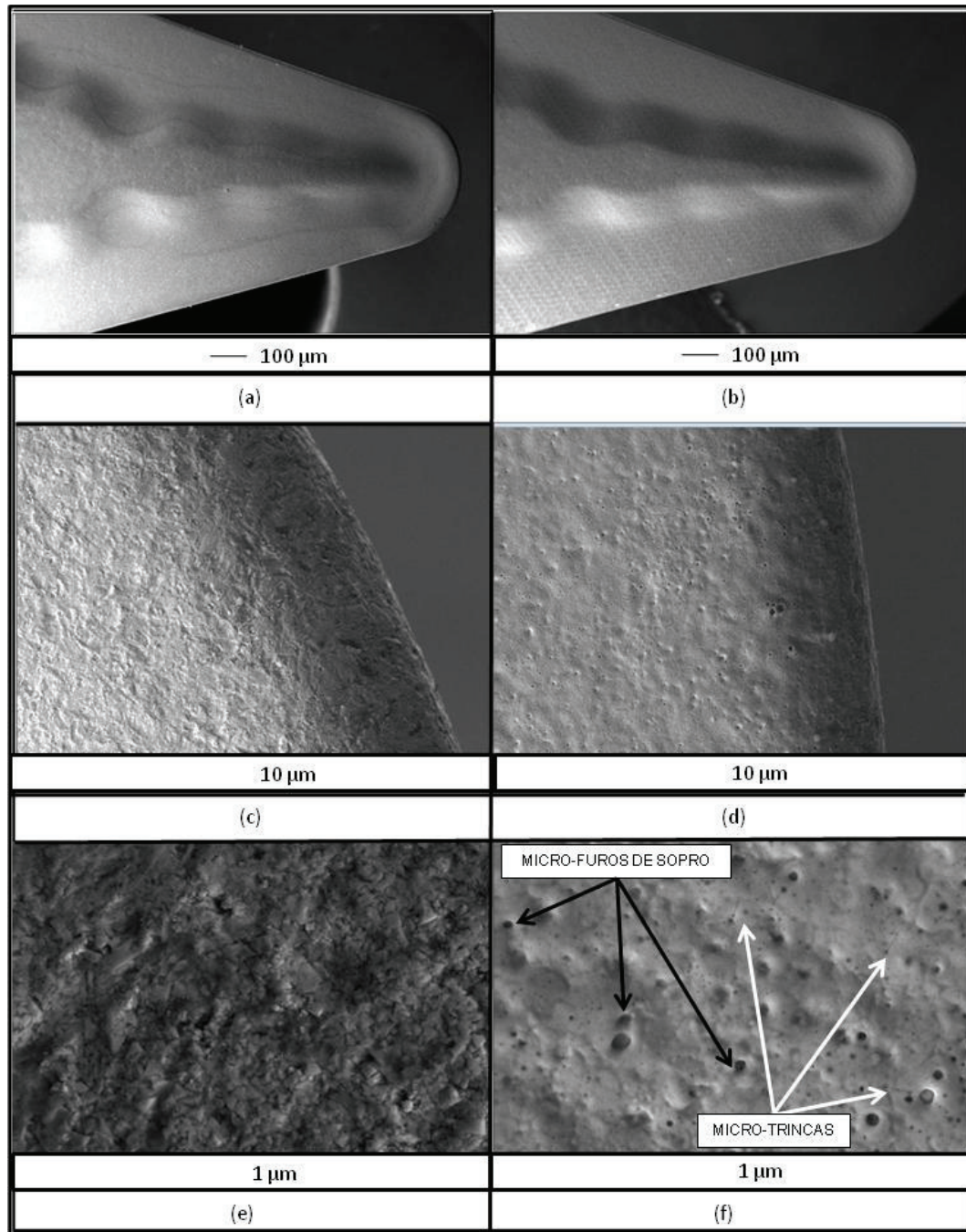


Figura 4.33: Aspectos gerais das superfícies de saída dos substratos de acabamento (classe ISO M15): (a), (c) e (e) bruto e (b), (d) e (f) texturizado a laser, pré-recobrimento, com micro-poros de sopro e micro-trincas.

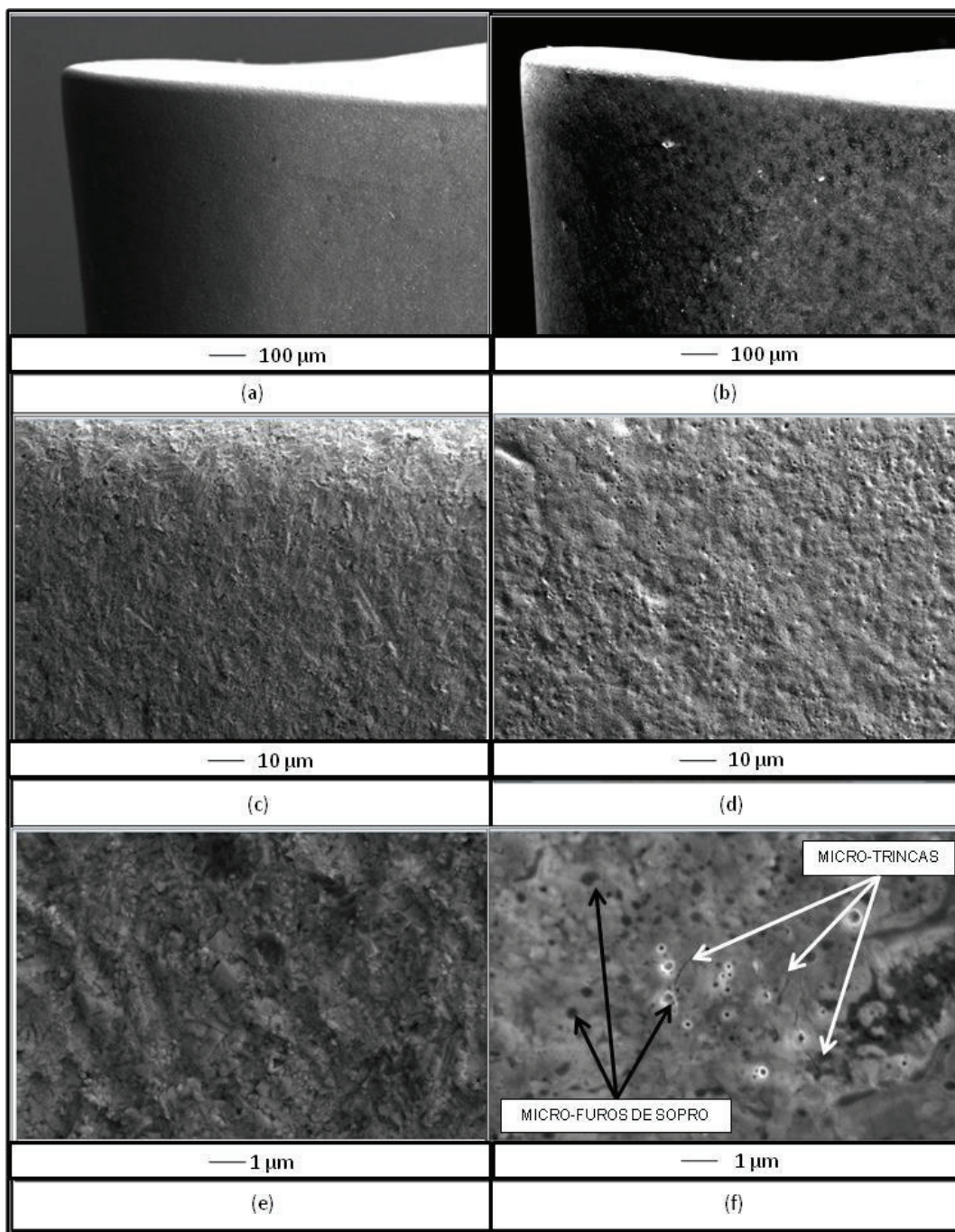


Figura 4.34: Aspectos gerais das superfícies de folga dos substratos de acabamento (classe ISO M15): (a), (c) e (e) bruto e (b), (d) e (f) texturizado a laser, pré-recobrimento, com micro-poros de sopro e micro-trincas.

Analisando-se os exemplos de defeitos apresentados nas texturizações a laser, das superfícies de saída e folga, dos substratos da ferramenta de acabamento (classe ISO M15), conforme mostrados nas Figuras 4.33 e 4.34, verifica-se que nas superfícies

texturizadas texturização a laser, ocorreram mais defeitos como micro-tensões térmicas na solidificação da camada fundida (micro-trincas), necessidade de saída de vapores e/ou gases (micro-furos de sopro) e aparente instabilidade na fusão, evaporação e sublimação de Co, com fluxo irregular de material fundido, pelo baixo teor de Co (presença de estrutura de pó sinterizado).

Portanto, por causa da presença destes micro-defeitos nas superfícies dos substratos de acabamento, observada neste trabalho, indica-se uma possível tendência dos inserts texturizados a laser e recobertos pelo processo de PVD, terem um desempenho inferior ao dos inserts jateados por micro-partículas (convencional).

4.2.4. Análise da porcentagem de Cobalto

Neste trabalho, a análise da porcentagem do elemento cobalto, na superfície do substrato bruto e na superfície texturizada a laser do substrato, antes da aplicação do revestimento sobre o inserto de acabamento (classe ISO M15), vai ser feita baseada nos valores medidos em linha, pelo MEV, conforme mostrado nas Figuras 4.35 (a) e (b).

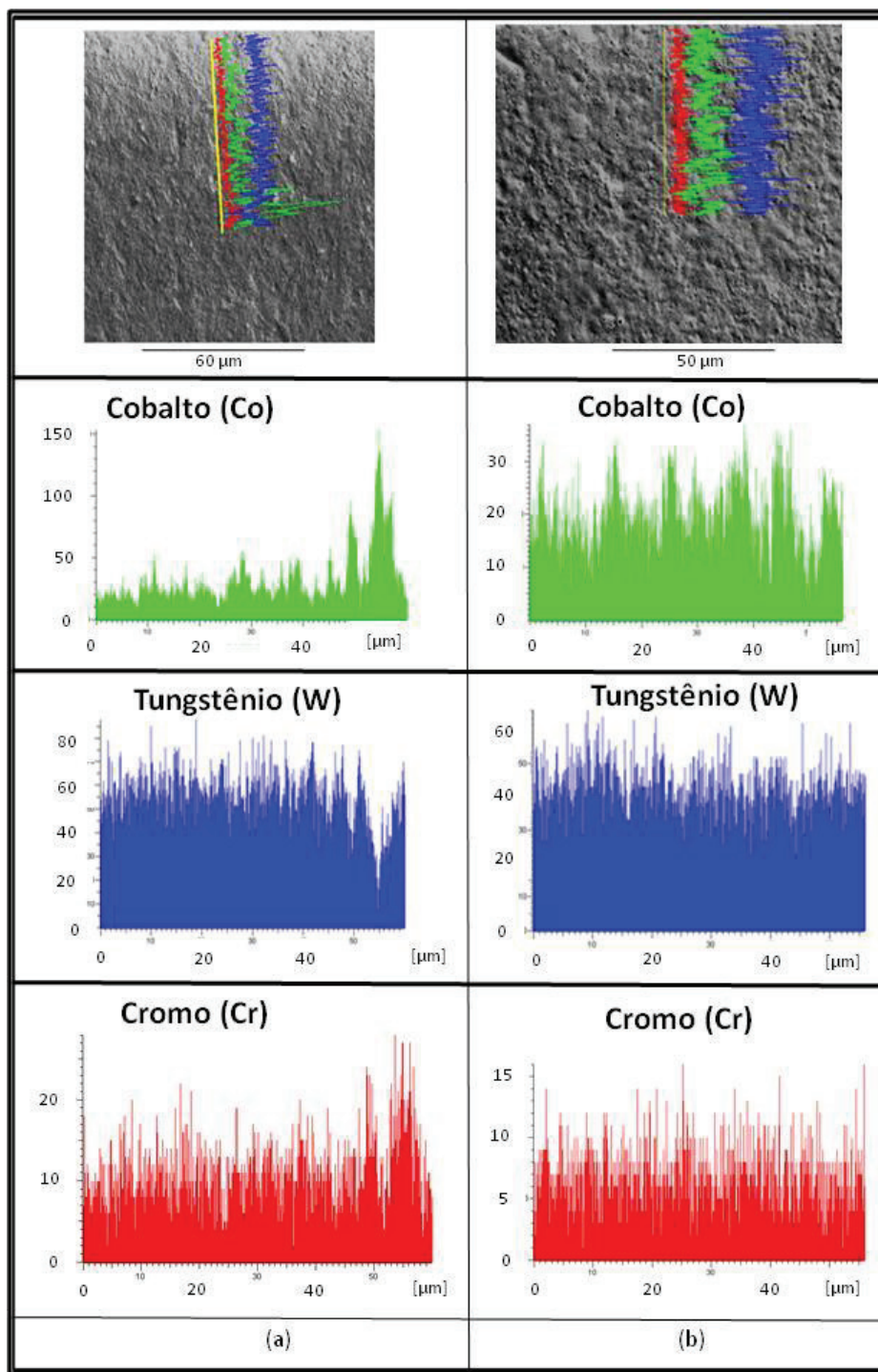


Figura 4.35: Análise de EDS nas superfícies de saída dos substratos: (a) bruto e (b) texturizado a laser, pré-cobertura, da ferramenta de acabamento (classe ISO M15).

A Tabela 4.9 relaciona os valores individuais da porcentagem de cobalto, dos (4) testes práticos e uma réplica cada, no total de (8) valores.

Tabela 4.9: Valores de porcentagem de cobalto nas superfícies bruta e texturizada a laser dos substratos pré-cobertura das ferramentas de acabamento (classe ISO M15).

Testes práticos		Substrato bruto [%]	Substrato texturizado a laser [%]
1		3,57	5,00
2		11,30	6,33
3			8,98
4			5,61
Média		7,44	6,48
Desvio Padrão		5,47	1,75
Porcentagem		73,5%	27,1%

A Tabela 4.9 mostra a média calculada dos valores da porcentagem de cobalto, nas superfícies bruta e texturizada a laser, bem como os desvios padrões destes valores, que foram bem superiores a 10% da média.

A Figura 4.36 mostra graficamente estas duas médias da porcentagem de cobalto nas superfícies dos substratos de acabamento (classe ISO M15).

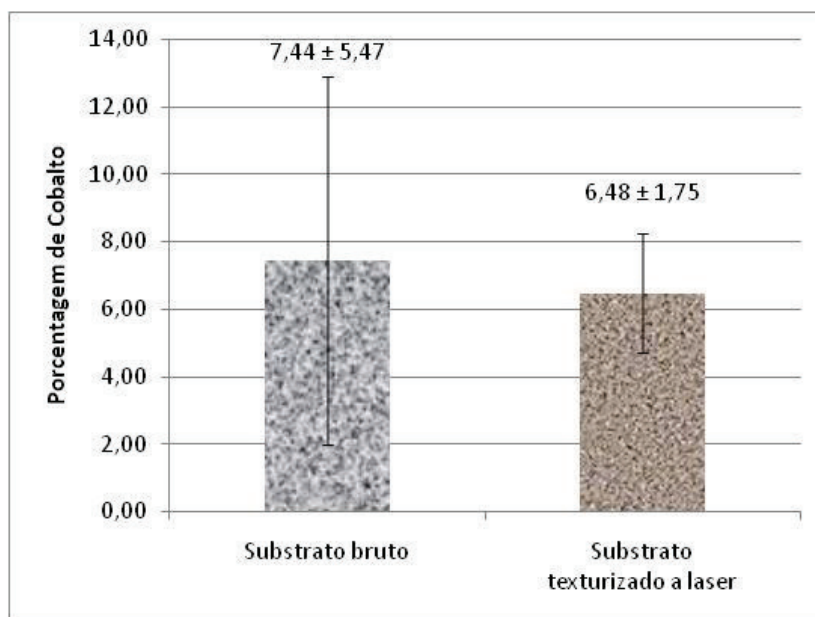


Figura 4.36: Porcentagem de cobalto nas superfícies bruta e texturizada a laser dos substratos pré-cobertura na ferramenta de acabamento (classe ISO M15).

Analisando-se os resultados da porcentagem superficial de cobalto da Figura 4.36, verifica-se que os substratos bruto e o texturizado a laser, apresentaram porcentagens similares de cobalto e que portanto, o processo de texturização a laser não influenciou nesta porcentagem nas ferramentas deste trabalho. Outra coisa a ser notada nestes resultados é a forte dispersão deles, principalmente no substrato bruto. Em outras palavras, os teores de Co variam muito ao longo do substrato de metal duro, tanto na ferramenta convencional, quanto na ferramenta texturizada, o que pode implicar em diferença na retenção dos carbeto ao longo do corpo da ferramenta e também em diferença de adesividade com a cobertura ao longo da superfície do substrato.

4.2.5. Análise entre revestimentos dos insertos classe ISO M15

Os substratos de acabamento (classe ISO M15) deste trabalho receberam pelo processo de PVD, uma cobertura de tripla camada de TiAlN, $(Al,Cr)_2O_3$ e TiAlN. Na avaliação desta cobertura em MEV, para insertos texturizados por jateamento de micro-partículas (convencional) e texturizados a laser, observa-se alguns defeitos nas superfícies das ferramentas (micro-poros e “droplets”), conforme mostrado nas Figuras 4.37 (a), (b), (c) e (d), para as superfícies de saída e na Figura 4.38 (a), (b), (c) e (d), para as superfícies de folga.

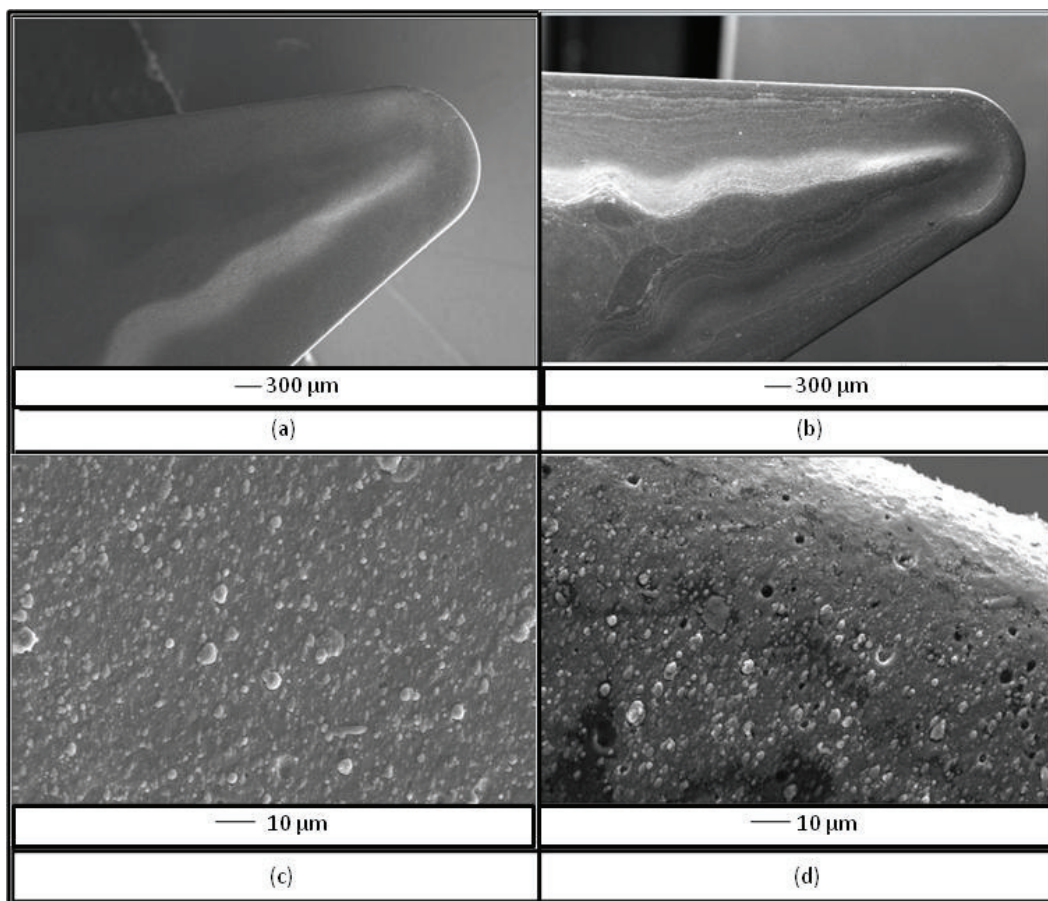


Figura 4.37: Aspectos gerais das superfícies de saída dos inserts de acabamento (classe ISO M15), recobertos de TiAlN por processo PVD: (a) e (c) texturizado por jateamento de micro-partículas (convencional) pré-recobrimento e (b) e (d) texturizado a laser, pré-recobrimento.

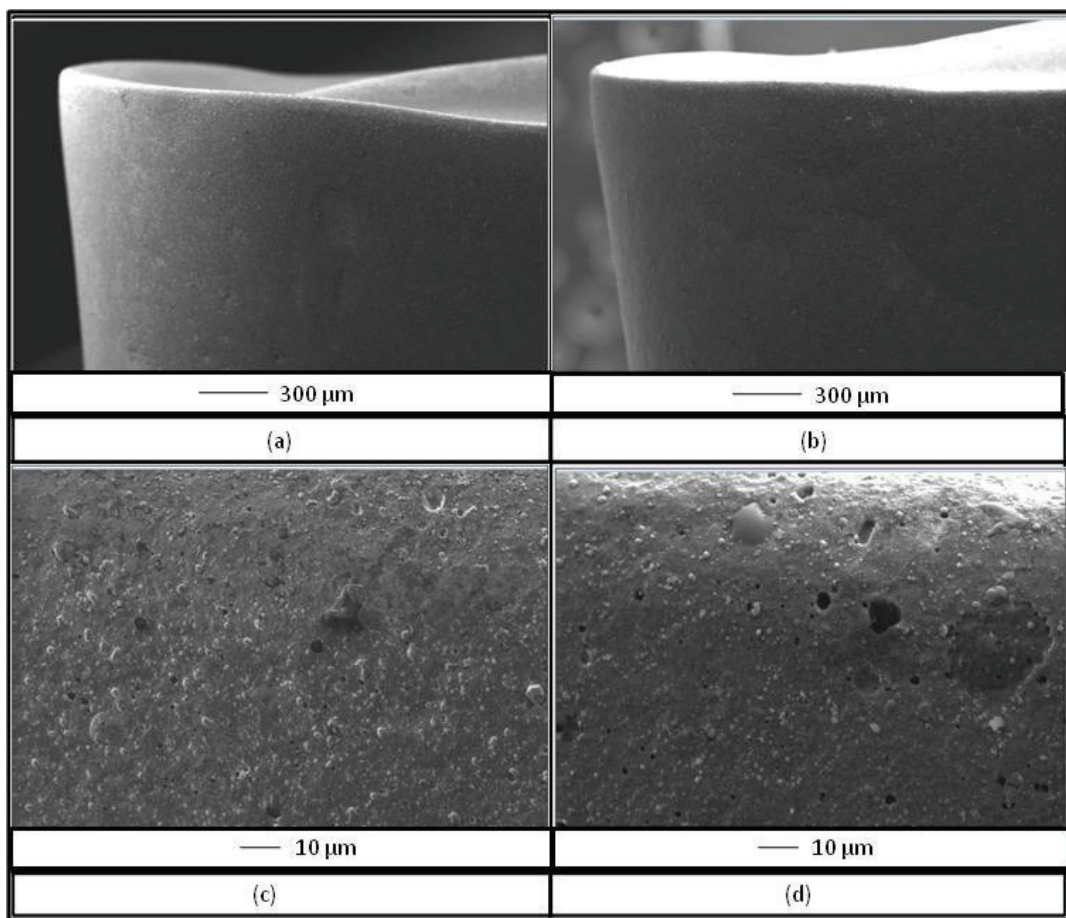


Figura 4.38: Aspectos gerais das superfícies de folga dos inserts de acabamento (classe ISO M15), recobertos de TiAlN por processo PVD: (a) e (c) texturizado por jateamento de micro-partículas (convencional) pré-recobrimento e (b) e (d) texturizado a laser, pré-recobrimento.

As gotículas oriundas do sistema de evaporação a arco (“droplets”) estão aderidas à superfície da cobertura. Estas micro-partículas aumentam a rugosidade final do revestimento depositado. Até aquela data não existia um método que prevenisse completamente a deposição de gotículas no substrato, sem que fosse usado um sistema especial de manipulação óptica de plasmas. Estas irregularidades na interface com micro-partículas agem como ponto de início de trinca, gerando defeitos e falhas coesivas do revestimento. Além de aumentarem a rugosidade do filme, as micro-partículas contribuem para a adesão de material do cavaco no revestimento (GERTH et al. 2009).

Apesar da presença destes defeitos nos inserts das Figuras 4.33 e 4.34, não se observa nela defeitos grosseiros na cobertura, como poros e trincas.

Portanto, analisando-se as micrografias das Figuras 4.37 e 4.38, verifica-se que o revestimento dos insertos texturizados por jateamento de micro-partículas (convencional) e dos texturizados a laser, ambos revestidos pelo processo PVD, apresentaram seus aspectos gerais dos revestimentos muito semelhantes em seu aspecto visual.

4.2.6. Planejamento fatorial dos ensaios de vida da ferramenta de acabamento

Neste trabalho, também foram executados (2^2) testes práticos e uma réplica cada, num total de (8) testes, para os insertos de acabamento (classe ISO M15).

A Tabela 4.10 relaciona os dois fatores k (texturização e velocidade de corte) e os seus respectivos dois níveis de valores, referentes às condições de usinagem em acabamento.

Tabela 4.10: Combinações de (2^k) testes feitos com insertos de acabamento (classe ISO M15).

Nº Fatores (k)	Fatores de controle	Nível de cada fator (base do fatorial)	Valores	
1	Texturização	2	Convencional	a Laser
2	Velocidade de corte [m/min]	2	265	220

4.2.7. Análise da vida das ferramentas de corte

A análise da *vida das ferramentas em volume de material removido* utilizadas em ensaios de acabamento (classe ISO M15) deste trabalho vai ser feita procurando descobrir a influência dos parâmetros de *texturização* das ferramentas de corte (convencional e a laser) e do parâmetro de usinagem (*velocidade de corte*) sobre a *vida*

da ferramenta medida em volume de material removido pela aresta da ferramenta, utilizando-se como critério do fim da vida da aresta a altura máxima do desgaste de flanco $V_{B_{\max}} = 0,3\text{mm}$. A Figura 4.39 apresenta o fluxograma dos ensaios de torneamento destes insertos, com seus fatores e resultados.

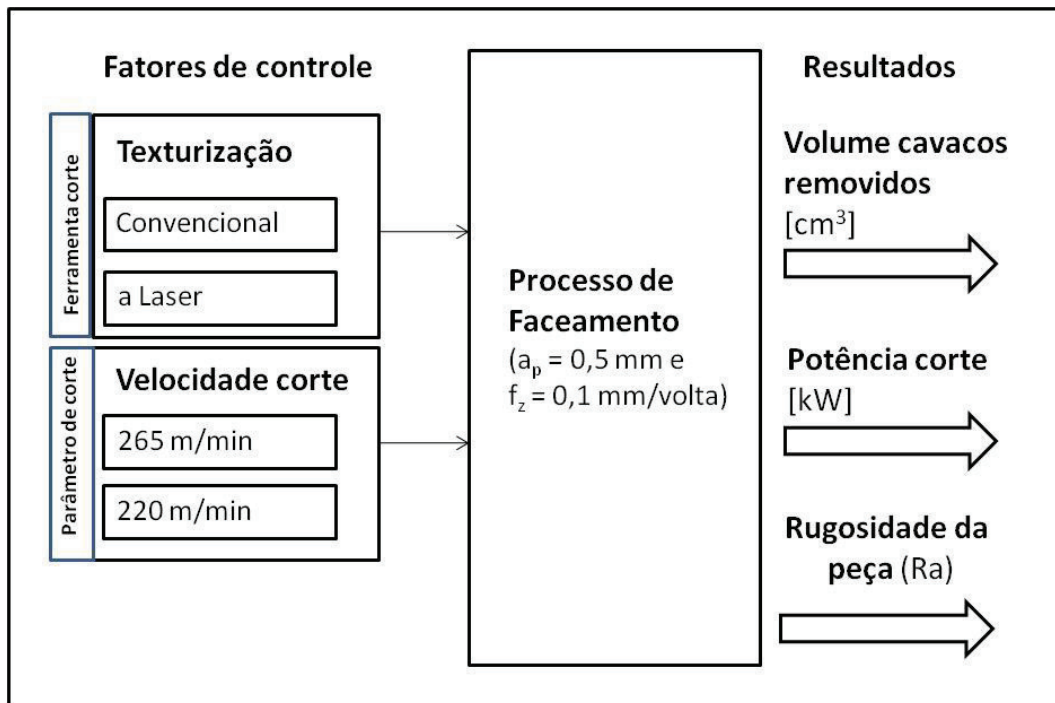


Figura 4.39 – Fluxograma dos ensaios de torneamento dos insertos de acabamento (classe ISO M15).

A Tabela 4.11 mostra os resultados médios de *vida da ferramenta em volume de material removido* bem como os desvios padrões nos diversos ensaios realizados e a Figura 4.40 mostra graficamente estes resultados.

Tabela 4.11: Médias e desvios padrão do resultado *vida da ferramenta em volume de material removido* dos (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, com insertos de acabamento (classe ISO M15).

	Insertos convencionais $v_c = 220\text{m/min}$ [cm ³]	Insertos texturizados a laser $v_c = 220\text{m/min}$ [cm ³]	Insertos convencionais $v_c = 265\text{m/min}$ [cm ³]	Insertos texturizados a laser $v_c = 265\text{m/min}$ [cm ³]
Teste	204,98	225,48	153,73	170,82
Replica	204,98	191,31	140,07	157,15
Média	204,98	208,40	146,90	163,98
Desvio Padrão	0,00	24,16	9,66	9,66
Porcentagem	0,0%	11,6%	6,6%	5,9%

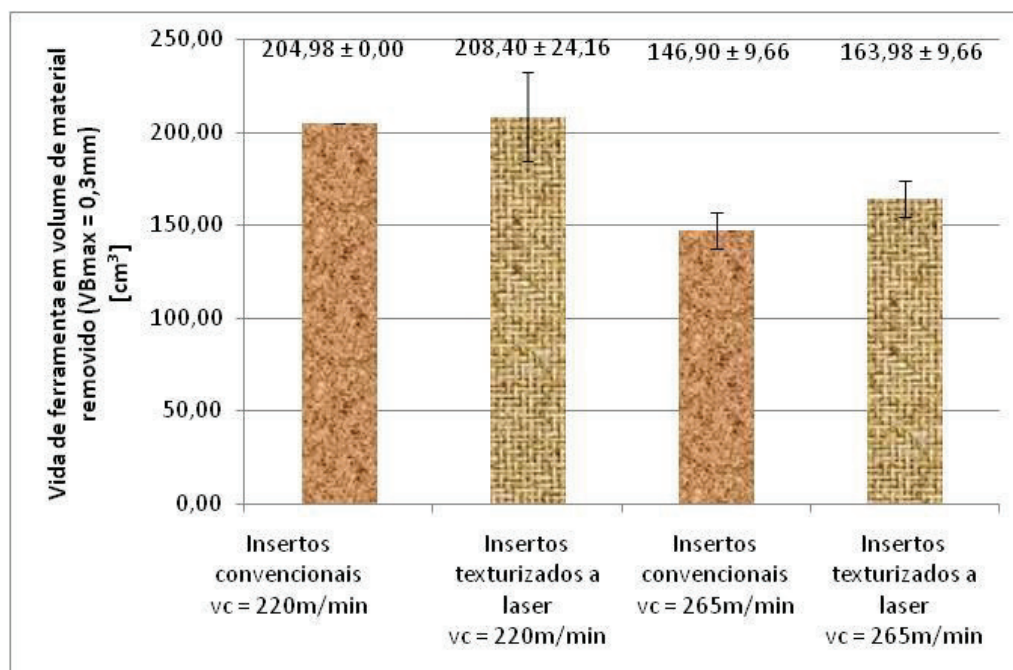


Figura 4.40: Média dos valores do resultado de *vida da ferramenta em volume de material removido* obtidos nos ensaios das ferramentas de Acabamento (classe ISO M15). O critério de fim de vida foi o da altura máxima do desgaste de flanco $V_{B\max} = 0,3\text{mm}$.

Analisando-se a Figura 4.40 é possível verificar que quando a *velocidade de corte* cresceu, a *vida das ferramentas* é maior, como é fartamente citado na literatura. Além disso, pode-se verificar que não houve diferença significativa com relação à *vida das ferramentas*, quando se compara as *texturizações* convencionais e a laser.

Com os resultados de *vida das ferramentas* de corte obtidos nos ensaios experimentais descritos acima, foi possível estabelecer uma análise da influência dos

parâmetros de corte (*texturização* e *velocidade de corte*) e suas interações no resultado *volume de material removido*, e consequentemente, na *vida das ferramentas* testadas.

Para esta análise foi utilizado o programa computacional MINITAB 16 e calculada a análise de variância ANOVA do fatorial completo 2^2 para o resultado *vida de ferramenta em volume de material removido* por insertos de acabamento (classe ISO M15), conforme apresentado na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Valores da análise de variância ANOVA para o resultado *vida de ferramenta em volume de material removido* por insertos de acabamento (classe ISO M15).

Fontes	Gruas de Liberdade GL	Soma dos Quadrados SS	Soma dos Quadrados Ajustado SS Ajustado	Quadrado Médio Ajustado MS Ajustado	Fo	valor-P
Velocidade corte	1	5.252,1	5.252,1	5.252,1	27,26	0,006
Texturização	1	210,1	210,1	210,1	1,09	0,355
Veloc.corte * Texturização	1	93,4	93,4	93,4	0,49	0,524
Erro	4	770,5	770,5	192,6		
Total	7	6.326,2				
Valor do F tabelado		Grau de liberdade (GL) para cada fator				1
		GL para o Erro				4
		Significância				5 %
		F tabelado = 7,71				

Como para todos os fatores que apresentam $F_o > F$ tabelado (Anexo A) = 7,71, tem-se a indicação de que há menos de 5% de risco de assumirmos que os mesmos são significantes, quando de fato não são, então, analisando-se a Tabela 4.12 e com significância de 5%, pode-se afirmar que o fator *velocidade de corte*, enquanto que o fator *texturização* e a interação de 2ª ordem *velocidade de corte x texturização* não apresentaram significância estatística, no resultado.

O gráfico de Pareto, mostrado na Figura 4.49, mostra que a única variável de influência no resultado com significância α de 5%, é a *velocidade de corte*.

Isto confirma o descrito por Diniz et al.(2006), de que a *velocidade de corte* é o parâmetro de usinagem que exerce maior influência sobre a *vida da ferramenta*, que neste trabalho está sendo medida pelo *volume de material removido*.

Contudo, nos ensaios de torneamento realizados, a *texturização* da superfície pré-revestimento não influenciou na *vida das ferramentas em volume de material*

removido, ao contrário do que se esperava. Isto se confirma ao observado na Figura 4.41, em que *a vida da ferramenta em volume de material removido* dos insertos de *texturização* convencional foram muito similares aos dos insertos *texturizados a laser*. Assim, a diferença de vida da ferramenta que supostamente deveria ser causada pela diferença de *texturização*, devido ao suposto aumentada rugosidade superficial e da aderência da cobertura, não ocorreu.

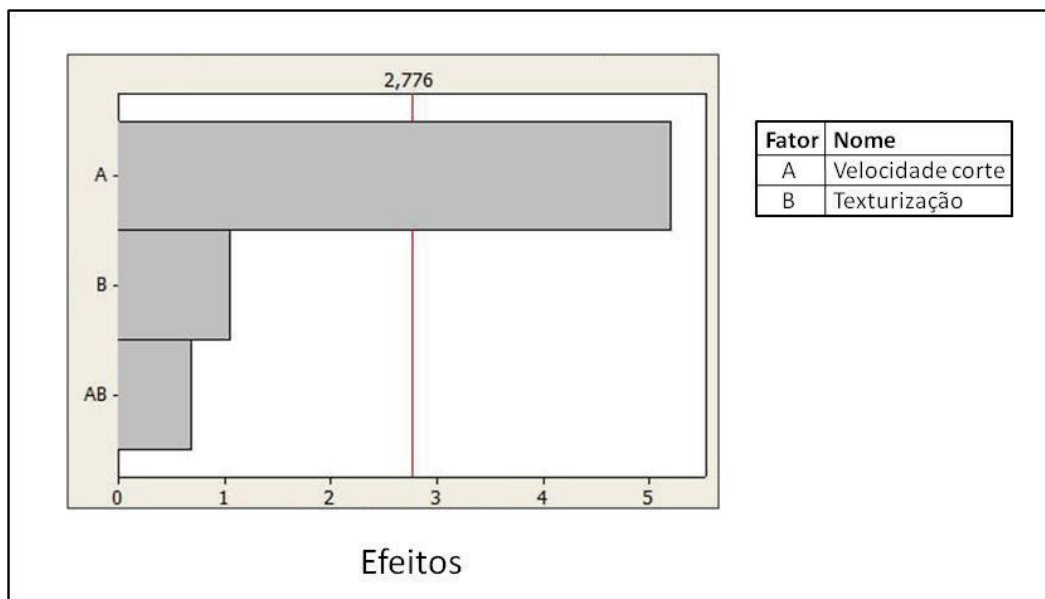


Figura 4.41: Gráfico de Pareto dos Efeitos sobre a variável de resposta *vida da ferramenta em volume de material removido* ($\alpha = 0,05$).

Na figura 4.42, vê-se os efeitos principais no processo de torneamento da face, da *velocidade de corte* e *texturização* na *vida da ferramenta em volume de material removido*.

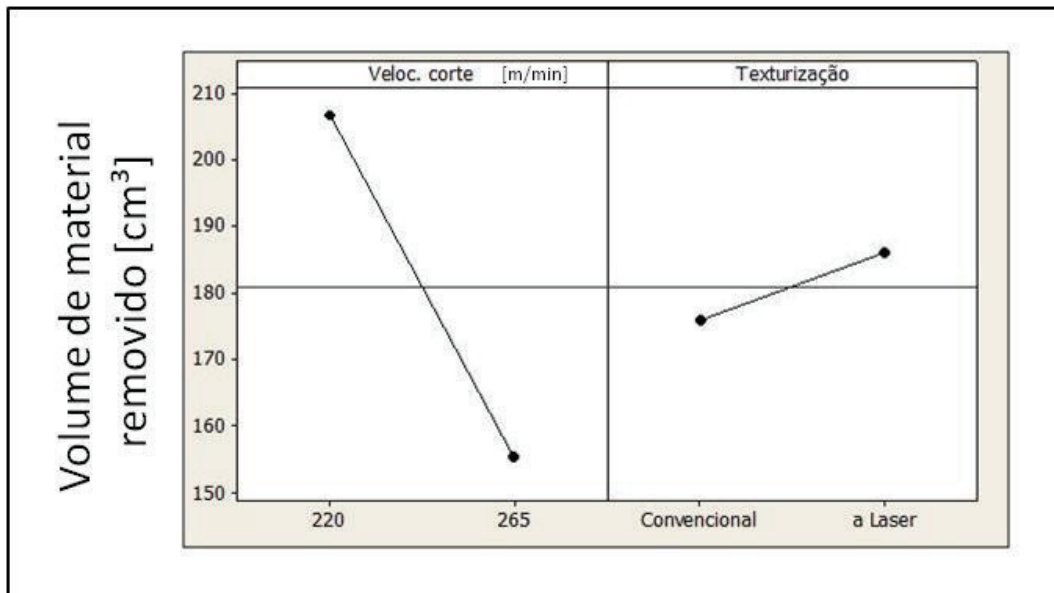


Figura 4.42: Principais efeitos sobre a *vida de ferramenta em volume de material removido*.

A *velocidade de corte* tem um efeito sobre a *vida de ferramenta em volume de material removido* muito maior que a *texturização* dos substratos dos inserts, conforme mostrado no Gráfico dos Efeitos Principais, pela inclinação da linha conectando as velocidades de corte de 220 e 265 m/min que é muito maior do que a da linha conectando a *texturização* convencional e a laser. O gráfico da Figura 4.42 também indica que:

- A *velocidade de corte* de 220 m/min produz mais *volume de cavaco removido* do que a *velocidade de corte* de 265 m/min;
- A *texturização* convencional produz *volume de material removido* similar ao da *texturização a laser*.

Na Figura 4.43, tem-se o gráfico da interação, que mostra o impacto que a mudança das configurações da *velocidade de corte* e *texturização* exerce sobre a *vida de ferramenta em volume de material removido*.

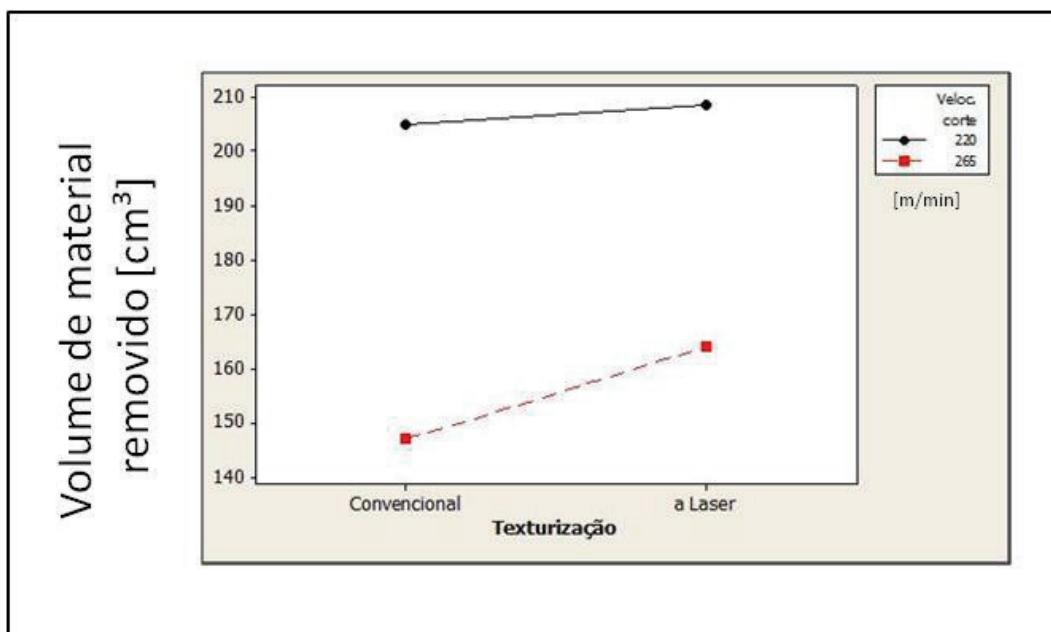


Figura 4.43: Interações sobre o *volume de material removido*.

Este gráfico mostra que a *velocidade de corte de 220 m/min* produz maior *vida de ferramenta em volume de material removido* que a *velocidade de corte e texturização* interferem na *vida de ferramenta em volume de material removido*, mas não interagem, isto é, o efeito *velocidade de corte* não depende do efeito *texturização*, para afetar mais ou menos a *vida de ferramenta em volume de material removido*.

Pode-se então concluir, que a *texturização a laser* do substrato da ferramenta de classe ISO M25 não produziu o resultado esperado, pelo menos quando a ferramenta foi utilizada nas condições deste trabalho, isto é, a *texturização a laser* não contribuiu para o aumento da *vida desta ferramenta*. Uma tentativa de se explicar as razões deste fato vai ser feita no item 4.2.1 deste trabalho.

4.2.8. Análise das medições da potência de corte

A análise das medições da potência de corte das ferramentas de acabamento (ISO M15) deste trabalho vai ser feita procurando descobrir a influência dos parâmetros de texturização das ferramentas de corte (convencional e a laser), do parâmetro de usinagem (velocidade de corte) e da condição da ferramenta (início e fim de vida) sobre

a potência de corte da ferramenta. A Figura 4.40 apresenta o fluxograma dos testes práticos destes insertos, com seus fatores e resultados.

A Tabela 4.13 mostra as médias calculadas das potências de corte obtidas nos ensaios com insertos de acabamento (ISO M15) e seus respectivos desvios padrão, que não foram superiores a (10%) da média.

Tabela 4.13: Valores do resultado: potência de corte nos ensaios realizados com insertos de acabamento (classe ISO M15).

Ferramenta em		Insertos convencionais vc = 220 m/min [kW]	Insertos texturizados a laser vc = 220 m/min [kW]	Insertos convencionais vc = 265 m/min [kW]	Insertos texturizados a laser vc = 265 m/min [kW]
Início de vida	Teste	0,86	0,86	1,26	1,21
	Réplica	0,89	0,84	1,30	1,26
	Média	0,87	0,85	1,28	1,24
	Desvio Padrão	0,02	0,01	0,03	0,03
	Porcentagem	2,74%	1,52%	2,21%	2,65%
Final de vida	Teste	0,93	0,86	1,30	1,35
	Réplica	0,90	0,92	1,37	1,38
	Média	0,92	0,89	1,33	1,37
	Desvio Padrão	0,03	0,04	0,05	0,02
	Porcentagem	2,76%	4,98%	3,45%	1,67%

A Figura 4.44 mostra graficamente as médias dos valores dos picos do sinal de potência de corte obtidos nos ensaios realizados com ferramentas de acabamento (classe ISO M15).

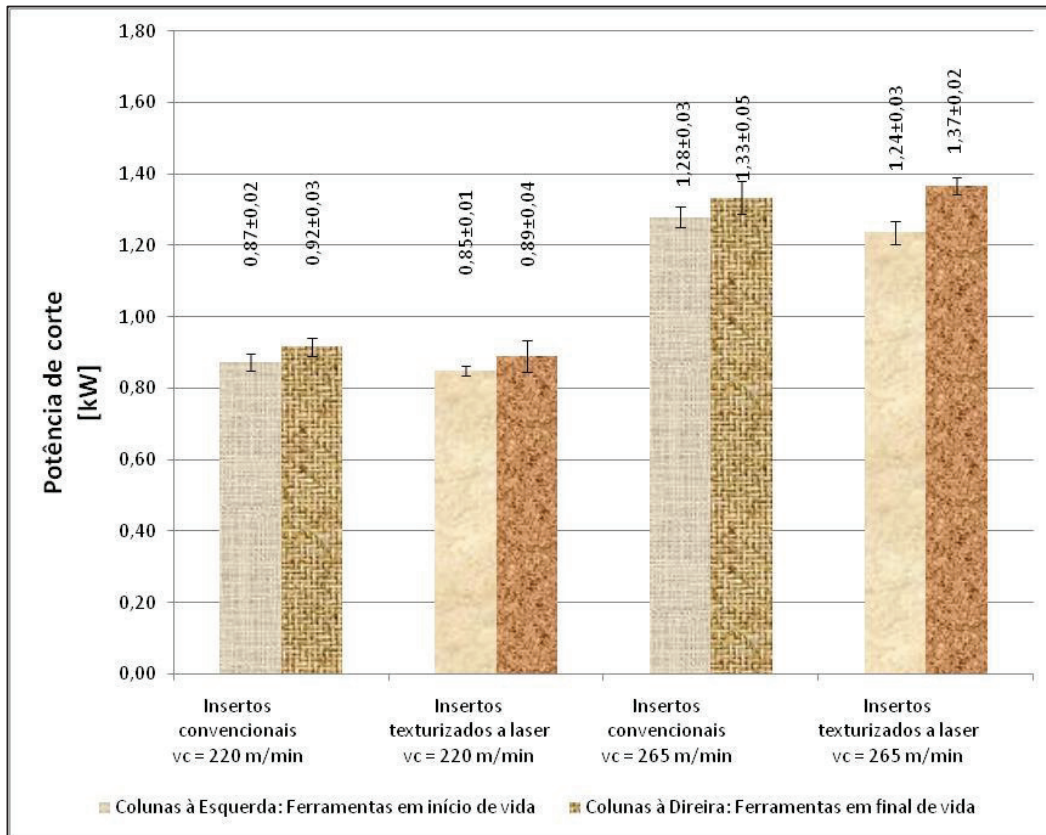


Figura 4.44: Média dos valores dos picos da potência de corte obtidos nos ensaios com ferramentas em início e final de vida nos diversos ensaios de acabamento (classe ISO M15). O critério de fim de vida foi o da altura máxima do desgaste de flanco $V_{Bmax} = 0,3\text{mm}$.

A Figura 4.44 mostra que o aumento do desgaste da ferramenta causa um aumento na *potência de corte* e é possível verificar, que a *potência de corte* das ferramentas aumenta quando se utiliza velocidade de corte mais alta (265 m/min). Estes resultados estão de acordo com o que a literatura afirma. Além disso, pode-se notar que não houve diferença significativa com relação à *potência de corte*, quando se compara os resultados obtidos nos ensaios realizados com ferramentas, com texturizações convencionais e a laser. Porém, o que se pode notar aqui é que a influência do nível de desgaste na potência de corte é bem menos o que ocorreu nos ensaios de desbaste (ver Figura 4.19).

Com os resultados de potência de corte obtidos nos testes práticos descritos acima, foi possível estabelecer uma análise da influência dos parâmetros de corte (texturização, velocidade de corte e nível de desgaste) e suas interações no resultado: *potência de corte* nos ensaios realizados.

Para esta análise também foi utilizado o programa computacional MINITAB 16 e calculada a análise de variância ANOVA do fatorial completo 2^3 , para o resultado *potência de corte* por insertos de acabamento (ISO M15), conforme apresentado na Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Valores da análise de variância ANOVA para o resultado: *potência de corte* por insertos de acabamento (classe ISO M15) em início e final de vida.

Fontes	Grupos de Liberdade GL	Soma dos Quadrados SS	Soma dos Quadrados Ajustado SS Ajustado	Quadrado Médio Ajustado MS Ajustado	Fo	valor-P
Velocidade corte	1	0,709806	0,709806	0,709806	723,37	0,000
Texturização	1	0,001056	0,001056	0,001056	1,08	0,330
Nível desgaste	1	0,017556	0,017556	0,017556	17,89	0,003
Veloc.corte * Texturização	1	0,000306	0,000306	0,000306	0,31	0,592
Veloc.corte * Nível desgaste	1	0,002756	0,002756	0,002756	2,81	0,132
Texturização * Nível desgaste	1	0,001406	0,001406	0,001406	1,43	0,266
Velocidade * Texturização * Nível desgaste	1	0,001406	0,001406	0,001406	1,43	0,266
Erro	8	0,007850	0,007850	0,000981		
Total	15	0,742144				
Valor do F tabelado		Grau de liberdade (GL) para cada fator				1
		GL para o Erro				8
		Significância				5 %
		F tabelado = 5,32				

Como para todos os fatores que apresentam $F_o > F$ tabelado (Anexo A) = 5,32, tem-se a indicação de que há menos de 5% de risco de assumirmos que os mesmos são significantes, quando de fato não são, então, analisando-se a Tabela 4.14 e com significância de 5%, pode-se afirmar que os fatores *velocidade de corte* e *nível de desgaste* são causas de variações na *potência de corte*, enquanto que o fator *texturização* e as interações de 2ª ordem *velocidade de corte x texturização*, *velocidade de corte x nível de desgaste*, *texturização x nível de desgaste* e a interação de 3ª ordem *velocidade x texturização x nível de desgaste* não apresentaram significância estatística no resultado.

Na Figuras 4.45 tem-se o gráfico de Pareto com os sete efeitos observados nos ensaios de usinagem para ferramentas, sendo que as variáveis *velocidade de corte* e *nível de desgaste* se mostraram ser de influência para a *potência de corte*, com significância α de 5%.

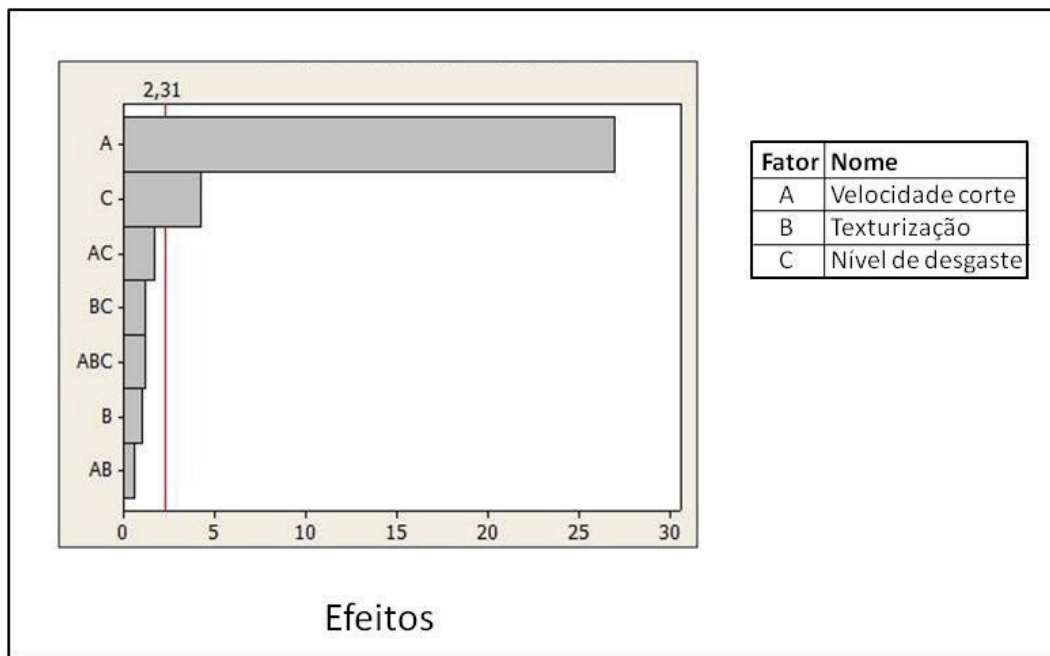


Figura 4.45: Gráficos de Pareto dos Efeitos sobre a variável de resposta *potência de corte* de ferramentas em início e final de vida ($\alpha = 0,05$).

Na Figura 4.46, vê-se graficamente a influência das variáveis de maior significância no processo de torneamento da face, que são *velocidade de corte* e *nível de desgaste* na *potência de corte*.

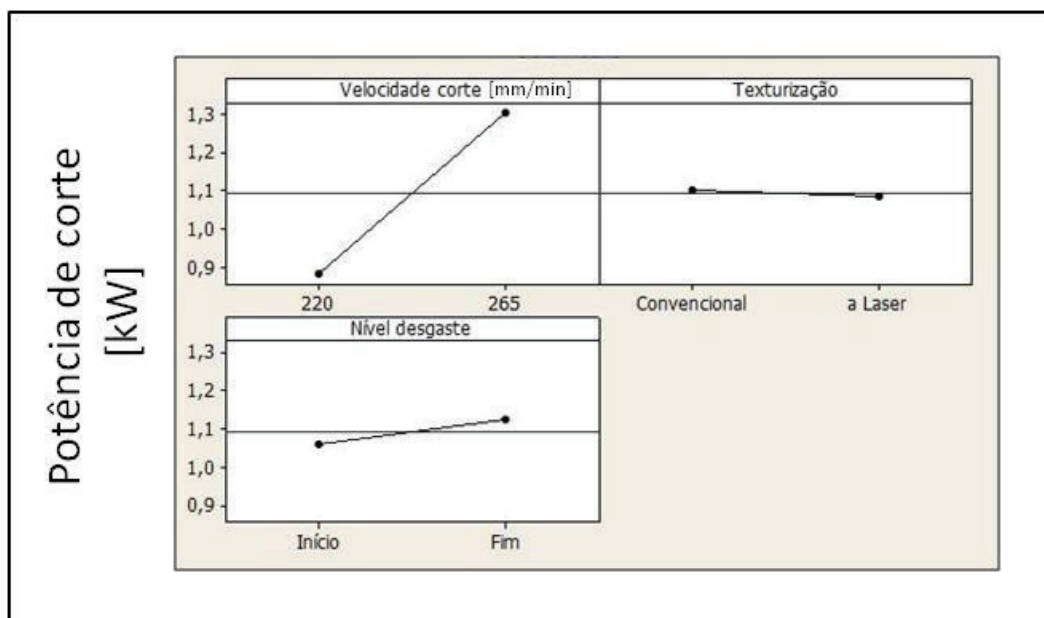


Figura 4.46: Principais efeitos sobre a *potência de corte* de ferramenta em início e final de vida.

A partir da inclinação das linhas dos gráficos da Figura 4.46, pode-se verificar que a *velocidade de corte* das ferramentas tem um efeito sobre a *potência de corte* muito maior do que o *nível de desgaste*. Este resultado é diferente do que ocorreu nos ensaios de desbaste, nos quais a velocidade de corte era menos influente na potência que o nível de desgaste, conforme mostrado na Figura 4.21. Isto aponta para o fato de que o tipo de desgaste das ferramentas de acabamento foi diferente daquele obtido nas ferramentas de desbaste, o que possibilitou que desgastes de mesma altura (V_B era 0,3 mm para ambas as ferramentas no fim da vida) gerassem variação de potência em relação à potência consumida no início de vida bem diferentes. O gráfico da Figura 4.46 também indica que:

- A *velocidade de corte* de 220 m/min exige menos potência de corte, do que a *velocidade de corte* de 265 m/min;
- O *nível de desgaste* de início de vida da ferramenta exige potência de corte pouco menor que no final de vida;
- A *texturização* convencional exige similar potência de corte do que a *texturização* a laser.

Pode-se então concluir, que a texturização a laser do substrato da ferramenta de classe ISO M15 não produziu o resultado esperado, isto é, também nos ensaios de acabamento a texturização a laser não contribuiu para diminuição da potência de corte. Como já foi afirmado, quando se comentou este fato nos ensaios de desbaste, pode-se afirmar que as pequenas variações de rugosidade do substrato e do revestimento entre as ferramentas convencionais e texturizadas a laser não foram capazes de modificar o coeficiente de atrito da ferramenta a ponto de causar variação na potência consumida pelo corte.

4.2.9. Análise das medições da rugosidade 2D dos corpos de prova

A Tabela 4.15 mostra a rugosidade média 2D (R_a) dos corpos de prova durante uso das ferramentas de acabamento (classe ISO M15), pelo critério de fim de vida da altura máxima do desgaste de flanco $V_{Bmax} = 0,3$ mm.

Tabela 4.15: Valores do resultado: rugosidade média (Ra) nos ensaios realizados com insertos de acabamento (classe ISO M15).

Vida de ferramenta em volume de material removido [cm³]	Inserto convencional v _c 220 m/min [μm]	Inserto texturizado a laser v _c 220 m/min [μm]	Inserto convencional v _c 265 m/min [μm]	Inserto texturizado a laser v _c 265 m/min [μm]
17,08	0,64	0,50	0,60	0,58
34,16	0,70	0,52	0,61	0,62
51,24	0,70	0,49	0,64	0,61
68,33	0,75	0,49	0,64	0,60
85,41	0,73	0,48	0,62	0,57
102,49	0,71	0,47	0,68	0,56
119,57	0,72	0,50	0,65	0,55
136,65	0,68	0,52	1,05	0,52
153,73	0,69	0,53	1,07	0,56
170,82		0,58		1,15
187,90		0,86		
204,98		0,87		

A análise das medições da rugosidade 2D dos corpos de prova usinados pelas ferramentas de acabamento (classe ISO M15) deste trabalho vai ser feita baseada na influência dos parâmetros de texturização das ferramentas de corte (convencional e a laser) e do parâmetro de usinagem (velocidade de corte) sobre a rugosidade 2D dos corpos de prova usinados ao longo da vida da ferramenta. A Figura 4.39 apresenta o fluxograma dos testes práticos destes insertos, com seus fatores e resultados.

A Figura 4.47 mostra graficamente os valores de rugosidade 2D(R_a) dos corpos de prova usinados pelas ferramentas de acabamento (classe ISO M15), ao longo da vida da ferramenta.

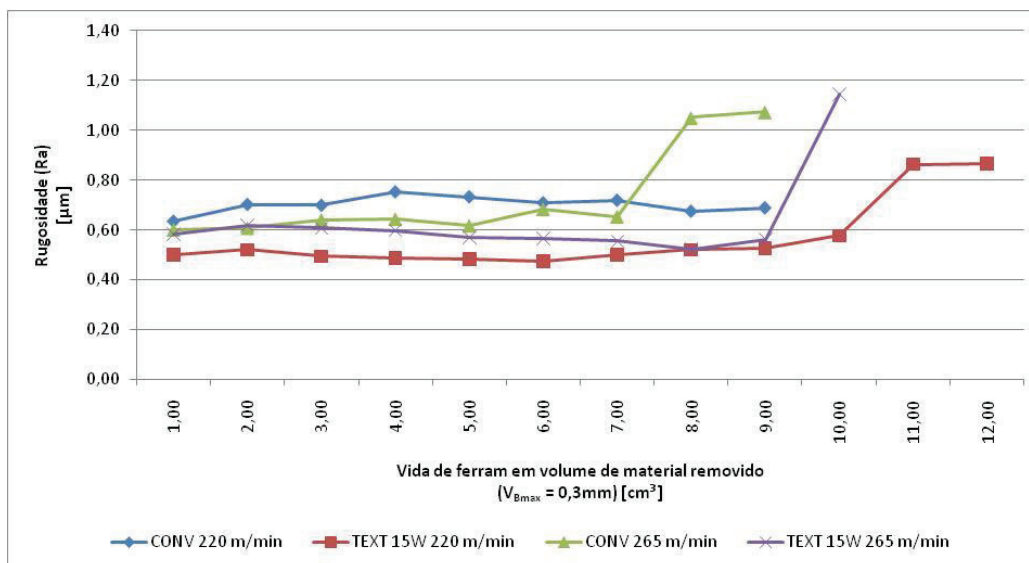


Figura 4.47: Valores do resultado rugosidade 2D dos corpos de prova obtida nos ensaios experimentais com ferramentas de Acabamento (classe ISO M15). O critério de fim de vida foi o da altura máxima do desgaste de flanco $V_{Bmax} = 0,3mm$.

Analisando-se esta Figura, pode-se verificar que no início da vida da ferramenta a variação dos valores de R_a é muito pequena, isto é, eles variam na faixa entre 0,57 e 0,70 μm independentemente da velocidade de corte ou da condição de texturização utilizada. Pode-se ver também que, em geral, a rugosidade permanece praticamente constante ao longo da vida da ferramenta e somente aumenta seu valor quando o desgaste de flanco já está próximo do valor usado como critério de fim de vida. Isto indica que a ponta da ferramenta não foi deformada pelo desgaste de flanco, enquanto este não tinha valor alto. Somente próximo ao valor de $V_B = 0,3 mm$ é que o desgaste causou deformação de forma original da ponta da ferramenta o que, consequentemente, aumentou a rugosidade da peça.

Com os resultados de vida das ferramentas de corte obtidos nos testes práticos descritos acima, foi possível estabelecer uma análise da influência dos parâmetros de corte (texturização e velocidade de corte) e suas interações no resultado: rugosidade 2D dos corpos de prova.

Para esta análise foi utilizado o programa computacional MINITAB 16 e calculada a análise de variância ANOVA do fatorial completo 2^2 para o resultado: rugosidade 2D dos corpos de prova usinados por insertos de acabamento (classe ISO M15), conforme apresentado na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Valores da análise de variância ANOVA para o resultado: *rugosidade 2D dos corpos de prova* usinados por insertos de acabamento (classe ISO M15).

Fontes	Gruas de Liberdade GL	Soma dos Quadrados SS	Soma dos Quadrados Ajustado SS Ajustado	Quadrado Médio Ajustado MS Ajustado	Fo	valor-P
Velocidade corte	1	0,023112	0,023112	0,023112	1,73	0,259
Texturização	1	0,049612	0,049612	0,049612	3,71	0,127
Veloc.corte * Texturização	1	0,007812	0,007812	0,007812	0,58	0,487
Erro	4	0,053550	0,053550	0,013388		
Total	7	0,134087				
Valor do F tabelado		Grau de liberdade (GL) para cada fator				1
		GL para o Erro				4
		Significância				5 %
		F tabelado = 7,71				

Como para todos os fatores que apresentam $F_o > F$ tabelado (Anexo A) = 7,71, tem-se a indicação de que há menos de 5% de risco de assumirmos que os mesmos são significantes, quando de fato não são, então, analisando-se a Tabela 4.16 e com significância de 5%, pode-se afirmar que nenhum dos fatores testados, nem a interação entre eles apresentaram significância estatística no resultado.

Na Figura 4.48, tem-se o gráfico de Pareto com os três efeitos observados nos testes práticos, sendo que nenhuma das três variáveis apresentaram significância para α de 5%, uma vez que nenhuma está localizada para além da linha vermelha e portanto, nenhuma das três possui efeito significativo.

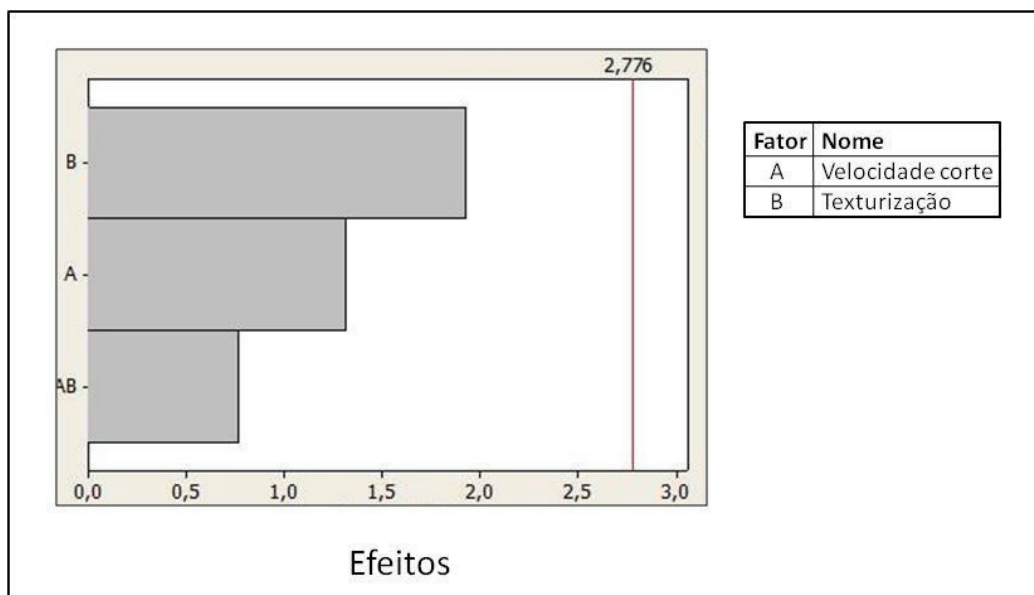
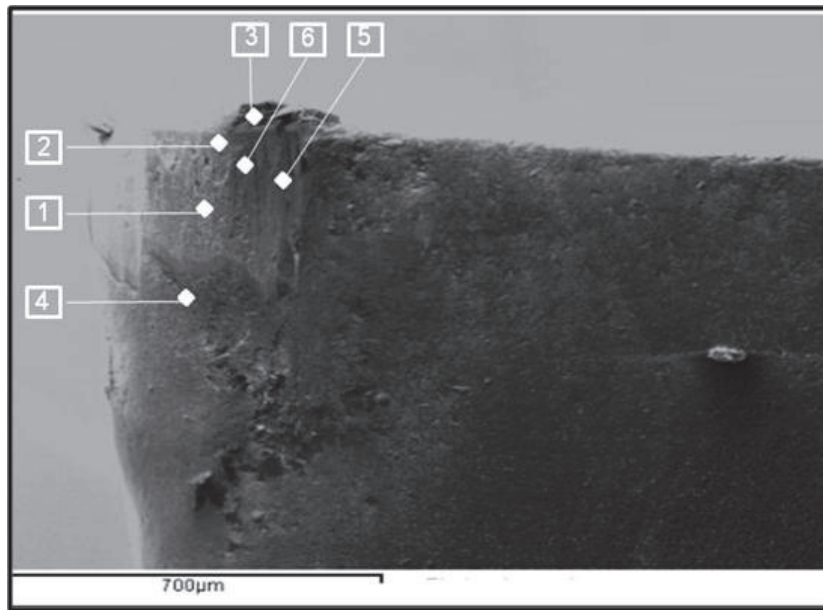


Figura 4.48: Gráfico de Pareto dos Efeitos sobre a variável de resposta *rugosidade 2D dos corpos de prova* ($\alpha = 0,05$).

Já foi visto neste trabalho, que a texturização da superfície pré-revestimento não influenciou na vida das ferramentas, ao contrário do que se esperava. Isto também ocorreu com a rugosidade da peça, isto é, a rugosidade 2D dos corpos de prova usinados pelos insertos de texturização convencional foram muito similares aos dos insertos texturizados a laser. Assim, a diferença na rugosidade da peça que supostamente deveria ser causada pela diferença de texturização, devido ao suposto aumento da rugosidade 2D superficial e da aderência da cobertura, não ocorreu.

4.2.10. Mecanismos de desgaste das ferramentas de torneamento em condições de acabamento

A Figura 4.49 (a) é uma micrografia das regiões desgastadas da ferramenta texturizada com jateamento de micro-partículas (convencional) pré-revestimento utilizada nos ensaios em condições de acabamento com $v_c = 220$ m/min, mostrando também na Figura 4.49 (b), valores semi-quantitativos das composições químicas de alguns pontos destas regiões com a análise EDS das superfícies de folga dos insertos convencionais.



(a)

Porcentagem [%]												
TIPO DE PONTO EM ANÁLISE		REVESTIMENTO		MATERIAL ADERIDO						SUBSTRATO		Total
		Al	Ti	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	W	Co	
1	Material aderido			66,47	18,04	9,98	3,08	0,56	1,87			100,00
2	Material aderido			64,72	15,90	10,24			1,76	7,38		100,00
3	Material aderido			67,07	17,86	10,03	2,58	0,50	1,96			100,00
4	Revestimento	32,88	67,12									100,00
5	SUBSTRATO			4,03	2,11	0,59				86,57	6,70	100,00
6	SUBSTRATO			6,00	2,09	0,94				86,43	4,54	100,00

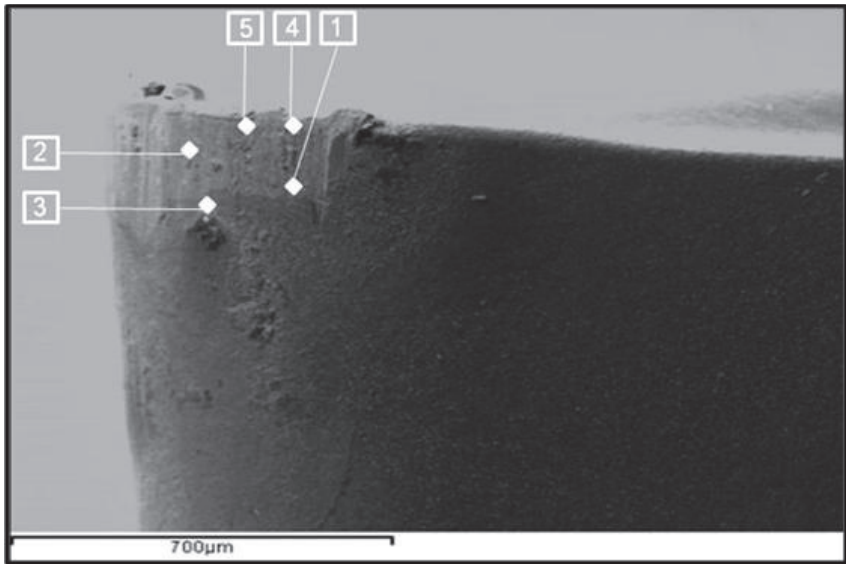
(b)

Figura 4.49:(a) Micrografia do desgaste da ferramenta e (b) Análise de EDS doensaio de torneamento em acabamento na superfície de folga do inserto texturizado com jateamento de micro-partículas (convencional) no pré-revestimento e $v_c = 220$ m/min.

Os resultados das análises EDS da Figura 4.49 (b) desta ferramenta mostram que a região indicada por “4” possui o revestimento mais externo de TiAlN intacto, ou seja, o contato com a peça não conseguiu remover a revestimento da ferramenta nestes pontos. Nas regiões “5” e “6” vê-se o substrato exposto (presença de W e Co), isto é, o revestimento externo de TiAlN foi removido. As regiões “1”, “2” e “3” são formadas por material da peça, que se aderiu à superfície de folga da ferramenta, devido à extrusão do cavaco em formação entre aresta de corte e superfície usinada gerada, conforme já explicado.

A Figura 4.50 (a) é uma micrografia das regiões desgastadas da ferramenta texturizada a laser no pré-revestimento utilizada nos ensaios em condições de

acabamento com $v_c = 220$ m/min, mostrando também na Figura 4.50 (b), valores semi-quantitativos das composições químicas de alguns pontos destas regiões obtidos com a análise EDS das superfícies de folga do insertos texturizados a laser no pré-revestimento.



(a)

Porcentagem [%]												
TIPO DE PONTO EM ANÁLISE		REVESTIMENTO		MATERIAL ADERIDO						SUBSTRATO		Total
		Al	Ti	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	W	Co	
1	Revestimento	30,53	69,47									100,00
2	Material aderido			66,61	17,83	10,32	2,75	0,60	1,89			100,00
3	Material aderido	6,29	13,53	64,95	2,27	0,32		8,28	4,36			100,00
4	SUBSTRATO	0,98		9,40	22,19	1,30			12,39	50,85	2,89	100,00
5	SUBSTRATO			4,29	1,90	0,82				86,50	6,49	100,00

(b)

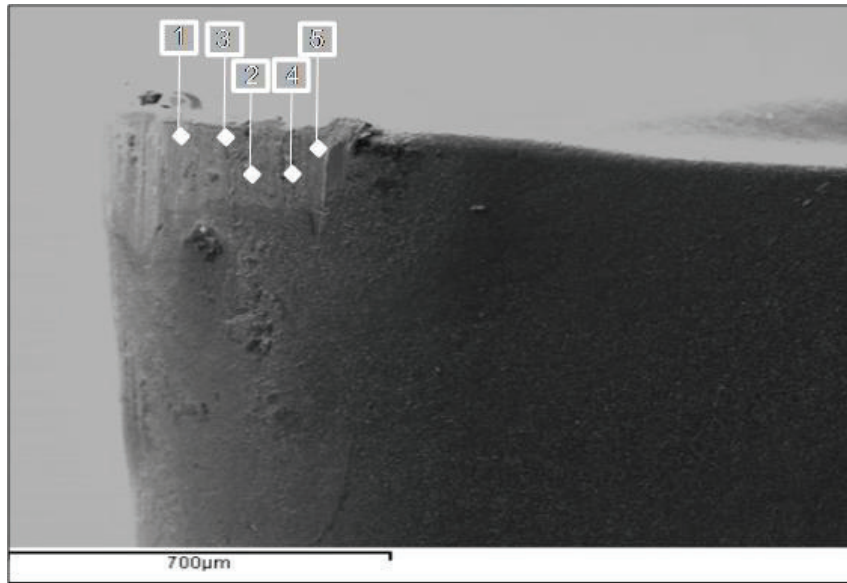
Figura 4.50:(a) Micrografia do desgaste da ferramenta; (b) Análise de EDS do ensaio de torneamento em acabamento na superfície de folga do inserto texturizado a laser no pré-revestimento e $v_c = 220$ m/min.

Os resultados das análises EDS da Figura 4.50 (b) desta ferramenta mostram que a região indicada por “1” possui o revestimento mais externo de TiAlN intacto. Nas regiões “4” e “5”, o substrato foi exposto, isto é, o revestimento externo de TiAlN foi removido, em função do contato com a peça. As regiões “2” e “3” são formadas pelo material da peça, que se aderiu à superfície de folga da ferramenta, devido à extrusão de

material do cavaco em formação entre aresta e peça. Também se consegue ver, marcas de abrasão no substrato na região desgastada.

Analisando-se os resultados das Figuras 4.49 (a) e 4.50 (a), verifica-se que os insertos texturizados por jateamento de micro-partículas (convencional) e os texturizados a laser, ambos revestidos pelo processo PVD e desgastados nos testes práticos com $v_c = 220$ m/min, apresentaram fenômenos de desgaste muito semelhantes, mais uma vez.

A Figura 4.51 (a) é uma micrografia da região desgastada da ferramenta texturizada com jateamento de micro-partículas (convencional) no pré-revestimento utilizada nos ensaios em condições de acabamento com $v_c = 265$ m/min, mostrando também na Figura 4.51 (b), valores semi-quantitativos das composições químicas de alguns pontos destas regiões obtidos com a análise EDS das regiões desgastadas das superfícies de folga das ferramentas de acabamento (classe M15), do inserto convencional.



(a)

Porcentagem [%]											
TIPO DE PONTO EM ANÁLISE		REVESTIMENTO		MATERIAL ADERIDO						SUBSTRATO	
		Al	Ti	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	W	Co
1	Revestimento	37,01	62,99								
2	Material aderido			66,94	17,65	10,24	2,84	0,58	1,75		
3	Material aderido		0,66	66,52	17,02	10,26	3,11	0,63	1,80		
4	Material aderido			67,10	17,53	10,30	2,80	0,52	1,75		
5	SUBSTRATO			6,81	2,38	1,02				84,63	5,16
										Total	
										100,00	
										100,00	
										100,00	
										100,00	
										100,00	

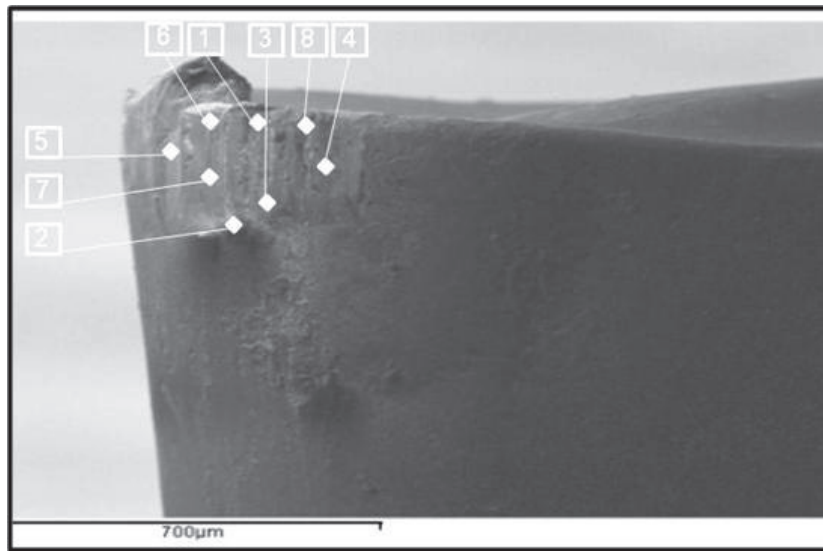
(b)

Figura 4.51:(a) Micrografia do desgaste da ferramenta; (b) Análise de EDS doensaio de torneamento em acabamento na superfície de folga do inserto texturizado com jateamento de micro-partículas (convencional) no pré-revestimento e $v_c = 265$ m/min.

Durante os ensaios experimentais do inserto convencional, o desgaste de flanco também foi o dominante, até que o critério de fim de vida fosse atingido ($V_{B \max} = 0,3$ mm), conforme mostrado na Figura 4.51 (a).

Os resultados das análises EDS da Figura 4.51 (b) desta ferramenta mostram que a região indicada por “1” possui o revestimento mais externo de TiAlN intacto e nenhuma marca de abrasão. Na região “5”, o substrato foi exposto, isto é, o revestimento externo de TiAlN foi removido. As regiões “2”, “3” e “4” são formadas pelo material da peça, que se aderiu à superfície de folga da ferramenta, devido à extrusão do cavaco em formação, que já foi comentada anteriormente. Consegue-se também visualizar, em boa parte da região desgastada, marcas de abrasão (riscos paralelos à direção de corte) no substrato já exposto, ocorrida durante a remoção deste material da peça aderido.

A Figura 4.52 (a) é uma micrografia da região desgastada da ferramenta texturizada a laser no pré-revestimento, utilizada nos ensaios em condições de acabamento com $v_c = 265$ m/min, mostrando também na Figura 4.52 (b), valores semi-quantitativos das composições químicas de alguns pontos destas regiões obtidos com a análise EDS da superfície de folga, do inserto convencional no pré-revestimento.



(a)

Porcentagem [%]											
TIPO DE PONTO EM ANÁLISE		REVESTIMENTO		MATERIAL ADERIDO						SUBSTRATO	
		Al	Ti	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	W	Co
1	Revestimento	30,91	69,09								
2	Material aderido			68,70	18,10	10,63		0,69	1,88		
3	Material aderido			68,90	18,20	10,41		0,59	1,90		
4	Material aderido	0,49		61,03	16,62	8,00			1,86	12,00	
5	Material aderido			69,48	17,90	10,08		0,57	1,97		
6	SUBSTRATO			11,28	4,30	1,41				79,75	3,26
7	SUBSTRATO	4,09	7,91	11,92	15,66	1,44	2,69		3,17	50,99	2,13
8	SUBSTRATO			7,09	12,82	0,94				74,19	4,96

(b)

Figura 4.52: Micrografia do desgaste da ferramenta; (b) Análise de EDS do ensaio de torneamento em acabamento na superfície de folga do inserto texturizado a laser no pré-revestimento e $v_c = 265$ m/min.

Os resultados das análises EDS da Figura 4.52 desta ferramenta mostram que a região indicada por “7” possui traços do revestimento de TiAlN, somado a material da peça aderido e a elementos do substrato (W e Co). Nas regiões “6” e “8”, o substrato foi exposto, isto é, o revestimento externo de TiAlN foi removido, em função do contato com a peça e também se tem elementos do material da peça. As regiões “2”, “3”, “4” e “5” são formadas exclusivamente pelo material da peça, que se aderiu à superfície de folga da ferramenta, devido à extrusão de material do cavaco em formação entre aresta e peça. Também se consegue ver, marcas de abrasão na região desgastada.

Resumindo os fenômenos de desgaste ocorridos nas ferramentas utilizadas, pode-se dizer que houve abrasão, que auxiliou na remoção da camada de cobertura da

ferramenta na superfície de folga, que por sua vez, incentivou a adesão. Uma vez que o material da peça ficou aderido, o movimento relativo entre a ferramenta e a peça removeu ciclicamente a camada aderida, levando consigo, partículas da ferramenta, que ao atritarem com a porção da ferramenta a sua frente, promoveram mais desgaste por abrasão. Este fenômeno é chamado por Trent (2000), de *attrition*. Vê-se nas Figuras mostradas, que as variáveis de entrada “velocidade de corte” e “condições do substrato” não alteraram o fenômeno de desgaste. O aumento da variável “velocidade de corte”, no entanto, fez com que estes fenômenos ocorressem mais rapidamente, o que causou a diminuição da vida da ferramenta, conforme mostrado no item 4.2.8.

4.2.11. Discussão sobre a interação dos ensaios de vida de ferramenta e dos ensaios de caracterização das superfícies para a ferramenta de acabamento

Novamente há que se afirmar que, também para a ferramenta de acabamento, este trabalho não conseguiu atingir seu principal objetivo, que era o de provar que a texturização a laser do substrato da ferramenta provocaria uma maior ancoragem do revestimento e conseqüentemente, uma maior vida da ferramenta. Os resultados apontaram que o tratamento dado ao substrato não influenciou na vida da ferramenta.

Alguns pontos que precisam ainda ser levantados são:

- a) Como ocorreu com a ferramenta de desbaste, as rugosidades das superfícies do substrato e do revestimento não têm grande diferença entre as ferramentas texturizadas a laser e convencional. O substrato texturizado a laser é mais rugoso que o convencional, uma vez que a rugosidade média S_a é maior, e de acordo com a hipótese construída, isto seria uma vantagem. Em termos de rugosidade do revestimento, ainda de acordo com a hipótese, a ferramenta convencional tem a vantagem de ser mais lisa, isto é, ter a rugosidade média S_a menor, porém tem a desvantagem de ter a Assimetria (S_{sk}) menos negativa que a texturizada a laser. Portanto, em termos de rugosidade da superfície, a texturização a laser não foi capaz de gerar superfícies obviamente melhores e o maior valor de rugosidade média S_a do substrato não foi suficiente para proporcionar uma maior vida da ferramenta;

- b) Em termos de percentual de cobalto na superfície do substrato, não se pode dizer que existe diferença entre as duas superfícies. Novamente, a texturização a laser não foi capaz de diferenciar substancialmente os dois substratos.
- c) Em termos de defeitos da superfície do substrato, notou-se que a ferramenta texturizada a laser possui mais defeitos que a convencional. Porém, este maior número de defeitos não teve influência na vida da ferramenta;
- d) O maior número de defeitos do substrato texturizado não gerou superfícies da ferramenta revestida mais defeituosas do que ocorreu na ferramenta convencional. Ambas as ferramentas tiveram quantidade de “droplets” sobre a superfície revestida similares;
- e) As pequenas diferenças entre as ferramentas texturizadas a laser e convencional não foram também capazes de alterar o mecanismo de desgaste. Ambas as ferramentas desgastaram principalmente por *attrition* e por abrasão.
- f) Mesmo sendo similar à ferramenta convencional em todos estes aspectos, a ferramenta texturizada a laser apresentou melhor resultado no teste de indentação Roxkwel C, devido provavelmente ao fato de ter um substrato mais rugoso. Porém, este resultado mostra que um teste quase estático como este não é capaz de simular o que acontece durante o corte dos metais e assim, a maior adesão do revestimento sobre o substrato apontada por esta teste não representou uma maior adesão no teste que realmente importa, que é o ensaio de vida da ferramenta.

5 Conclusões

Com base nos resultados apresentados e em condições similares às utilizadas neste trabalho, pode-se concluir que para as ferramentas usadas neste trabalho, tanto em condições de acabamento, quanto em condições de desbaste, que:

- A intensidade, quantidade de pulsos e número de texturizações de laser que foram utilizados no substrato durante a texturização a laser, os mesmos que obtiveram a maior vida de ferramenta (classe ISO M15), na tese de doutorado Neves (2010), produziram resistência de aderência entre o revestimento e o substrato similar às ferramentas convencionais, quando avaliadas pelos ensaios de indentação Rockwell C.
- Os parâmetros da texturização a laser realizada sobre o substrato utilizado nos ensaios de desbaste, não foram capazes de texturizar regulamente toda a superfície do substrato, deixando regiões de exposição de pó sinterizado e regiões com micro-furos de sopro.
- Nos ensaios comparativos, a vida das ferramentas de torneamento de face texturizadas com estes parâmetros de laser escolhidos e revestidas pelo processo de PVD de tripla camadas de TiAlN / (Al, Cr)₂ O₃ / TiAlN, foi estatisticamente igual à das ferramentas texturizadas por jateamento de micro-partículas de alumina e revestidas (convencional).
- Os mecanismos de desgaste não sofreram nenhuma alteração entre as ferramentas texturizadas convencionais e texturizadas a laser pré-revestimento, nos ensaios de torneamento de face, isto é, foram com ambas as ferramentas os principais mecanismos de desgaste foram adesão, abrasão e *attrition*.
- Houve pequenas diferenças entre as rugosidades dos dois tipos de substrato e entre as rugosidades das ferramentas recobertas, mas estas diferenças não foram capazes de influenciar o desempenho das mesmas.
- Estes fatos descritos acima conduzem à conclusão de que o desempenho das ferramentas usadas nos ensaios de desbaste e acabamento, texturizadas a laser foi o mesmo das ferramentas texturizadas por jateamento de micro-partículas de alumina (convencional) e que portanto, este processo de texturização por laser de superfícies de metal duro pré-revestimento pode ser considerado um processo

alternativo ao processo convencional, para o tipo de usinagem, ferramenta e condições de usinagem utilizados neste trabalho.

6 Sugestões para trabalhos futuros

As sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros são:

- Avaliar o comportamento, ensaiar e caracterizar o revestimento das mesmas ferramentas de metal duro texturizadas a laser com outros diferentes parâmetros de laser, e revestidas com a mesma cobertura, para buscar experimentalmente um o conjunto de parâmetros do laser que conduza a maior vida de ferramenta do que a ferramenta convencional;
- Avaliar o comportamento e ensaiar as mesmas ferramentas de metal duro texturizadas a laser com os mesmos parâmetros de laser, com corpos de prova em corte interrompido;
- Avaliar o comportamento e ensaiar as mesmas ferramentas de metal duro texturizadas a laser com os mesmos parâmetros de laser, com corpos de prova de diferentes materiais e respectivas condições de usinagem;
- Avaliar o comportamento, ensaiar e caracterizar o revestimento dos mesmos substratos em ferramentas de geometrias diferentes e em operações diferentes de torneamento, texturizadas com os mesmos parâmetros de laser;
- Avaliar o comportamento, ensaiar e caracterizar outros revestimentos nas mesmas ferramentas de metal duro texturizadas a laser com os mesmos parâmetros de laser;
- Investigar a adesividade do revestimento por meio de ensaios de risco com carga progressiva.

REFERÊNCIAS

ALLMEN, M. V. *Laser-Beam Interactions with Material*. Springer-Verlag, Berlin, 1987

ANSI/ASME. **Norma B46.1**: *Surface Texture, Surface Roughness, Waviness and Lay*, American Society of Mechanical Engineers. 2002. 110p.

ARROYO, J. M. **Investigação sobre o Uso da Texturização a Laser na Preparação da Superfície a Ser Recoberta em Ferramentas de Metal Duro para Fresamento**. 2009. 168p. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BERTONCELLO, R.; CASAGRANDE, A.; CASARIN, M.; GLISENTI, A.; LANZONI, E.; MIRENGHI, L.; TONDELLO, E. *TiN, TiC and Ti(C,N) film characterization and its relationship to tribological behaviour*. **Surface and Interface Analysis**, v.18, n.7, p.525-531, 1992.

BLACK, J. T. *Introduction to machining processes*. **Metals handbook: machining**. 9. ed, Nova Iorque: ASM International, 1995.

BOUZAKIS, K.-D.; SKORDARIS, G.; MICHAILIDIS, N.; ASIMAKOPOULOS, A.; ERKENS, G. *Effect on PVD coated cemented carbide inserts cutting performance of micro-blasting and lapping of their substrates*. **Surface and Coatings Technology**, v.200, p.28-132, 2005.

BOUZAKIS, K.-D.; KOUTOUPAS, G.; SIGANOS, A.; LEYENDECKER, T.; ERKENS, G.; PAPAPANAGIOTOU, A.; NIKOLAKAKIS, P. *Increasing of cutting performance of PVD coated cemented carbide inserts in chipboard milling through improvement of the film adhesion, considering the coating cutting loads*. **Surface and Coatings Technology**, v.133-134, p.548-554, 2000.

BOUZAKIS, K.-D.; ANASTOPOULOS, J.; ASIMAKOPOULOS, A.; MICHAILIDIS, N.; ERKENS, G. *Wear development of cemented carbide inserts coated with mono and multilayer PVD films, considering their strength properties, adhesion and the cutting loads*. **Surface and Coatings Technology**, v.201, p.4395-4400, 2006.

BOUZAKIS, K.-D.; MICHAILIDIS, N.; HADJIYIANNIS, S.; EFSTATHIOU, K.; PAVLIDOU, E.; ERKENS, G.; RAMBADT, S.; WIRTH, I. *Improvement of PVD coated inserts cutting performance, through appropriate mechanical treatments of substrate and coating surface*. **Surface and Coatings Technology**, v.146-147, p.443-450, 2001.

BULL, S.J.; BHAT, D.G.; STAIA, M.H. *Properties and performance of commercial TiCN coatings. Part 2: tribological performance*. **Surface and Coatings Technology**, v.163-164, p.507-514, 2003.

BUNSHAH R. F. Vapor Deposition Technologies. In: Bunshah, R. F. (ed.) *Handbook of Hard Coatings: Deposition Technologies, Properties and Applications*, Noyes Publications, p.370-410, 2001.

CALLISTER JR, W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: uma abordagem integrada**. 2. ed, Nova Iorque: *John Wiley & Sons*, 2006, cap.20, p.595–625.

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó**. 1. ed, São Paulo: ABM Associação Brasileira de Metais, 1982. 272p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. 2. ed, São Paulo: Mc Graw-Hill, 1986. 315p.

CHUNG-CHEN, T., HONG, H. *Comparison of the tool life of tungsten carbides coated by multi-layer TiCN and TiAlCN for end mills using the Taguchi method*. *Journal of Materials Processing Technology*, v.123, n1, p.1-4, 2002.

COSTA, H. L. *Modification of Surface Topography. Manufacturing Methods and Applications*. 2005. 321p. *Doctoral Thesis, University of Cambridge, Inglaterra*.

DINIZ, A. E.; LIMA, M.S.F.; OSÓRIO, J.M.A. *WC-Co Coated Carbide Substrate Surface Texturing with a Pulsed CuHBr Laser*. 2007. p.1-10. In: *COBEM 2007 19th International Congress of Mechanical Engineering*, Brasília.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 5. ed, São Paulo: Artliber Editora, 2010. 268p.

DUMITRU, G.; LÜSCHER, B.; KRACK, M.; BRUNEAU, S.; HERMANN, J.; GERBIG, Y. *Laser processing of hardmetals: Physical basics and applications*. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, v.23, n.4-6, p.278–286, 2005.

FAN, P.; FANG, Z. Z. *Numerical simulation of kinetics of the cobalt gradient change in WC-Co during liquid phase sintering*. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. v.27, p.37-42, 2009.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1977. 751p.

FOLTYN, S. R., *Surface modification of materials by cumulative laser irradiation* In: D. B. Chrisey (ed.), G. K. Hubler (ed.) *Pulsed Laser Deposition of Thin Films*. Wiley, Nova Iorque, 1994, 1994.89p.

FU, Y.; Du, H.; Zhang, S. *Sputtering Deposited TiN Films: Relationship Among Processing, Stress Evolution and Phase Transformation Behaviours*, *Surface and Coatings Technology*, v.167, p.120-128, 2001

GADELMAWLA, E. S.; Koura, M. M.; MAKSOUD, T. M. A.; ELEWA, I. M.; SOLIMAN, H. H. *Roughness parameters*. *Journal of Materials Processing Technology*, v.123, p.133-145, 2002.

GERTH, J.; LARSSON, M.; WIKLUND, U.; RIDDAR, F.; HOGMARK, S. *On the wear of PVD-coated HSS hobs in dry gear cutting*. **Wear**, v.266, n3-4, p.444-452, 2009.

HEDENQVIST, P.; JACOBSON, S.; HOGMARK, S. *Tribological Laboratory Evaluation of Thin Hard Coatings*. **Surface And Coating Technology**, v.97, p.656-660, 1997.

HOGMARK, S.; Jacobson, S.; Larsson, M. *Design and Evaluation in Tribological Coatings*. **Wear**, v. 246, p. 20–33, 2000.

HSIEH, J.H.; LIANG, C.; YU, C. H.; WU, W. *Deposition and characterization of TiAlN and multi-layered TiN / TiAlN coatings using unbalanced magnetron sputtering*. **Surface and Coatings Technology**, v.108–109, p.132–137, 1998.

HUDDINGE, P. L.; GAVLE, A. J. *Method of Blasting Cutting Tool Inserts*. Sandvik AB, U.S. Patent 6132293, 2000.

HUNT, J. L.; SANTHANAM, A. T. *Coated Carbide Metal Cutting Tools: Development and Applications*. **The winner Anual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers**. v. 25-30, p. 139-155, 1990.

KANO, S.; INOUE, T. *Surface softening and hardening of WC-Co using pulsed laser irradiation*. **Surface and Coatings Technology**. v.201, p.223-229, 2006.

KIM, G.S.; LEE, S. Y.; HAHN, J. H.; LEE, B. Y.; HAN, J. G.; LEE, J. H.; LEE, S. Y. *Effects of the thickness of Ti buffer layer on the mechanical properties of TiN coatings*. **Surface and Coatings Technology**, v.171, n.1-3, p.83-90, 2003.

KLOCKE, F., KRIEG, T. *Coated tools for metal cutting – features and applications*. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.48, n.2, p.515-525, 1999.

KLOCKE, F.; Schroeder, T.; Bouzakis, E.; KLEIN, A. *Manipulation of Coating and Subsurface Properties in Reconditioning of WC-Co Carbide Cutting Tools*, **Surface & Coatings Technology**, v.202, p.1194-1198, 2007.

KONYASHIN I.Y. *PVD/CVD technology for coating cemented carbides*. **Surface and Coatings Technology**, v.71, n.3, p.277-283, 1995.

LADARIO, F. P. *Microtexturização de superfícies de aço ferramenta com laser*. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, 2009.

LEWIS, D.B.; BRADBURY, S.R.; SARWAR, M. *The effect of substrate surface preparation on the wear and failure modes of TiN coated high speed steel circular saw blades*. **Wear**, n.197, n.1-2, p.82-88, 1996.

LIMA, M. S. F.; NEVES, D.; DINIZ, A. E. *Machining with a Laser Treated Tool Steel Drill: Surface and Tool Life Aspects*, **I International Conference on Heat Treatment and Surface Engineering of Tools and Dies**, 8-11 de Junho, Pula-Croatia, 2005

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1. ed, São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2009. 371p.

MITUTOYO. **Apostila do Curso A4Rugosidade Superficial**. São Paulo: Instituto de Metrologia da Mitutoyo, 2012. 43p.

NARASIMHAN, K.; BOPPANA, S.P.; BHAT, D.G. *Development of a graded TiCN coating for cemented carbide cutting tools-a design approach*. **Wear**, v.188, p.123-129, 1995.

NDCEE - *National Defense Center for Environmental, Investigation of Laser Based De-Coating Technology*, U.S. Army, Final Report, 1999. 43p.

NEVES, D. **Influência da Texturização Laser na Vida de Ferramentas de Torneamento Revestidas por CVD e PVD**. 2010. 197p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

NEVES, D.; DINIZ, A.E.; LIMA, M.S.F. *Efficiency of the laser texturing on the adhesion of the coated twist drills*. **Journal of Materials Processing Technology**, v.179, n.1-3, p.139-145, 2006.

NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**. 1. ed, São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1994.

OLIVEIRA, A. C. **Microsoldagem em Chapas Finas Utilizando um Laser de Cu-HBr**, Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 112 p., 2006

PADILHA, A.F.; GUEDES, L.C. **Aços inoxidáveis austeníticos: micro-estrutural e propriedades**. São Paulo: Hemus, p. 170, 1994.

PIERSON, H. O. *Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD): Principles, Technology, and Applications*. 2. ed, **Norwich, New York, U.S.A.: Noyes Publications / William Andrew Publishing, LLC**, v. 1, p. 506, 1992.

POLINI, R. *Chemically vapour deposited diamond coatings on cemented tungsten carbides: Substrate pretreatments, adhesion and cutting performance*. **Thin Solid Films**, v.515, p.4–13, 2006.

QUINSAT, Y.; SABOURIN, L.; LARTIGUE, C.; *Surface topography in ball end milling process: Description of 3D surface roughness parameter*, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 195, p. 135-143, 2008.

READY, J. F. **Industrial Applications of Lasers**, Ed. Academic Press, 2.ed. 1997, 125p.

SANDVIK COROMANT. **Manual Técnico de Usinagem**. São Paulo, 2012. 600p.

SCHEY, J. A. *Tribology in metalworking: friction, lubrication and wear*, **American Society for metals, Metals Park, Ohio**, p.54-56, 134-135, 143, 175-176, 1983.

SHAW, M. C. *Metal cutting principles*. 2. ed, New York: Oxford University Press, 1984.594p.

SIENNA, L.F.; ACHETE, C. A.; HIRSCH, T.; MATTOS, O. Characterization of PVD TiCN layers by physical and electrochemical methods. *Surface Engineering*, v.21, n.2, p.144-150, 2005.

SILVA, S. **Recobrimento de Ferramentas de Corte com Filmes de Diamante**, Dissertação de Mestrado, Instituto de Física – Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 1997.137p.

STEPHENSON, D.; A., AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York: Basel M. Dekker, 1997. 898p.

SUH, N. P. *Coated Carbides – Past, Present and Future International Conference on Hard Materials Tool Technology*. Carnegie – Mellon University, Pitsburg, Pensilvania, p.118-143, 1976.

TAHER, M. A. *An investigation of the mechanical and physical issues of the adhesion of chemically vapor deposited (CVD) diamond coatings on cemented carbide cutting tool inserts*. Doctoral Dissertation, University of Arkansas, 1999.271p.

TIEJUN, L.; QIHONG, L.; JINGXING, D.; YUNROND, W.; JUN, Z. JINGRU, L.; ZHIMING, Z.; FANGHONG, S. Improved adhesion of diamond coating on cobalt-cemented tungsten carbide hardmetal by using pulsed-UV-laser substrate surface pretreatment. *Applied Surface Science*. n. 193, p.102-119, 2002.

TIEJUN, L.; LOU, Q.; DONG, J.; WEI, Y.; LIU, J. Modified surface morphology in surface ablation of cobalt-cemented tungsten carbide with pulsed UV laser radiation. *Applied Surface Science*, n. 172, p. 331-344, 2001.

TÖNSHOFF, H.; KARPUSCHEWSKI, B.; MOHLFELD, A.; SEEGER, H. Influence of subsurface properties on the adhesion strength of sputtered hard coatings. *Surface and Coatings Technology*. v.116-119, p. 524-529, 1999.

TÖNSHOFF, H. K.; KARPUSCHEWSKI, B.; MOHLFELD, A.; SEEGER, H. Influence of Stress Distribution on Adhesion Strength of Sputtered Hard Coatings, *Thin Solid Films*, v. 332, p.146-150, 1998

TÖNSHOFF, H. K.; SEEGER, H. Influence of Residual Stress Gradients on the Adhesion Strength of Sputtered Hard Coatings, *Thin Solid Films*, v.377-378, p.340-345, 2000.

TÖNSHOFF, H.K.; MOHLFELD, A.; LEYENDECKER, T.; FUB, H. G.; ERKENS, G.; WENKE, R.; CSELLE, T.; SCHWENCK, M. Wear mechanisms of $(Ti_{1-x}Al_x)N$ coatings in dry drilling. *Surface And Coatings Technology*, v.94-95, p.603-609, 1997.

TRENT, E. M.; WRIGHT P. K. *Metal Cutting*. 4. ed, Boston: Butterworth- Heinemann, 2000.446p.

VERDIER, M.; COSTIL, S.; CODDET, C.; OLTRA, R.; PERRET, O. *On the topographic and energetic surface modifications induced by laser treatment of metallic substrates before plasma spraying.* **Applied Surface Science**. n. 205, p.3-21, 2003.

VIANA, R. **Estudo da Caracterização de Ferramentas De Corte Texturizadas a Laser e Revestidas Utilizadas no Fresamento Frontal De Ferro Fundido Vermicular.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

VIDAKIS, N.; ANTONIADIS, A.; BILALIS, N. *The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds.* **Journal of Materials Processing Technology, Proceedings of the International Conference on the Advanced Materials Processing Technology**. n. 143-144, p.481-485, 2003.

VILLARES. **Aços inoxidáveis.** Manual técnico - Aços Villares S.A. São Paulo. 1982.

ZEGHNI, A.E.; HASHMI, M.S.J. *Comparative wear characteristics of tin and tic coated and uncoated tool steel.* **Journal of Materials Processing Technology**, v.155–156, p.1923–1926, 2004.

ZHANG, W.; YAO, Y. L. *Laser Materials Processing.* In: Geng, H. (ed.). **Manufacturing Engineering Handbook**, McGraw-Hill, p.34.1-34.22, 2004.

REFERÊNCIAS CONSULTADAS

ALI, M.; HAMZAH, E.; ALI, N. *Adhesion strength of TiN coatings at various ion etching deposited on tool steels using cathodic arc PVD technique*. World Scientific Publishing Company. 2009. p.29-35.

ANDERBERG, C.; PAWLUS, P.; ROSEN, B. G.; THOMAS, T. R. 2009. *Alternative descriptions of roughness for cylinder liner production*. **Journal Of Materials Processing Technology**, v.209, p.1936–1942.

ANDERSEN, K. N.; BIENK, E. J.; SCHWEITZ, K. O.; REITZ, H.; CHEVALLIER, J.; KRINGHOJ, P.; BOTTIGER, J. *Deposition, microstructure and mechanical and tribological properties of magnetron sputtered TiN/TiAlN multilayers*. **Surface and Coatings Technology**, v.123, p.219-226, 2000.

ANDERSON, D. R.; SWEENEY, D. J.; WILLIAMS, T. A. **Estatística Aplicada à Administração e Economia**. 2.ed, São Paulo: Cengage Learning, 2011. 597p.

ARROYO, J.M.; DINIZ, A.E.; LIMA, M.S.F. 2010a. *Cemented carbide surface modifications using laser treatment and its effects on hard coating adhesion*. **Surface and Coatings Technology**, v.204, n.15, p.2410-2416.

ARROYO, J.M.; DINIZ, A.E.; LIMA, M.S.F. 2010b. *Wear performance of laser precoating treated cemented carbide milling tools*. **Wear**, v.268, n.11-12, p.1329-1336.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. ANSI/ASME B46.1-2002: *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay)*, American Society of Mechanical Engineers. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. ISO 1302: *Geometrical product specifications (GPS)- Indication of surface texture in technical product documentation*. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. ISO 13565-2: *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties - Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve*. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. ISO 25178-2: *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal Part 2 Terms, definitions and surface texture parameters*. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. ISO 25178-3: *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal Part 3 Specification operators*. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. ISO 4287: *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters*. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. NBR 6405: Rugosidade das superfícies. Rio de Janeiro, 1988. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. NBR 8404: Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos. Rio de Janeiro, 2002. 14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. NBR ISO 4287. Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002. 18p.

BAGNATO, V. S. **Laser e suas aplicações em Ciência e Tecnologia**. 1. ed, São Paulo: Editora Livraria da Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.

BARSHILIA, H.C.; RAJAM, K. S.; JAIN, A.; GOPINADHAN, K.; CHAUDHARY, S. 2006. *A comparative study on the structure and properties of nanolayered TiN/NbN and TiAlN/TiN multilayer coatings prepared by reactive direct current magnetron sputtering*. **Thin Solid Films**, v.503, n.1-2, p.158-166.

BHUSHAN, B.; GUPTA, B. K. *Macro and Micromechanical and Tribological Properties*. In: Bhushan, B. and Gupta, B. K. (ed.) **Handbook of Hard Coatings: Deposition Technologies, Properties and Applications**, Noyes Publications, p.229-369, 2001.

BOUZAKIS, K.-D. ; MICHAILIDIS, N.; SKORDARIS, G.; KOMBOGIANNIS, S.; HADJIYIANNIS, S.; EFATATHIOU, K.; ERKENS, G.; RAMBADT, S.; WIRTH, I. *Effect of the cutting edge radius and its manufacturing procedure, on the milling performance of PVD coated cemented carbide inserts*. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.51, n.1, 2002, p.61–64.

BOUZAKIS, K.-D.; SKORDARIS, G.; MIRISIDIS, I.; MESOMERIS, G.; MICHAILIDIS, N.; PAVLIDOU, E.; ERKENS, G. Micro-blasting of PVD films, an effective way to increase the cutting performance of coated cemented carbide tools. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.54, n.1, p.95-98. 2005.

BOUZAKIS, K.-D; SKORDARIS, G.; MIRISIDIS, I.; MICHAILIDIS, N.; MESOMERIS, G.; PAVLIDOU, E; ERKENS, G. *Cutting performance improvement through micro-blasting on well-adherent PVD films on cemented carbide inserts*. **Surface and Coatings Technology**, v.200, p.1879-1884, 2005.

BUJ CORRAL I.; CALVET J.V.; SALCEDO, M.C. *Use of roughness probability parameters to quantify the material removed in plateau-honing*. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, n.50, p.621–629. 2010.

BULL, S. J.; RICKERBY, D. S. *Characterization of Hard Coatings*. In: Bull, S. J. and Rickerby, D. S. (ed.) **Handbook of Hard Coatings: Deposition Technologies, Properties and Applications**, Noyes Publications, p.181-228, 2001.

BYRNE, G.; DORNFELD, D.; DENKINA, B. *Advancing cutting technology*. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.52, n.2, p.483-507. 2003.

CAPPELLI, E.; ORLANDO, S.; PINZARI, F. NAPOLI, A.; KACIULIS, S. WC-Co cutting tool surface modifications induced by pulsed laser treatment. **Applied Surface Science**, v.138-139, n.1-4, p.376-382, 1999.

COELHO, R. T.; NG, E-G.; ELBESTAWI, M. A. Tool wear when turning hardened AISI 4340 with coated PCBN tools using finishing cutting conditions. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.47, n.47, p.263-272, 2007.

DINIZ, A. E.; LIMA, S. F.; OSÓRIO, J. M. A. *WC-Co coated carbide substrate surface texturing with a pulsed CuHBr laser*. 2007. p.1-8. In: *COBEM 2007 19th International Congress of Mechanical Engineering*, Brasília, DF.

FONSECA, M. D.; FAVERO FILHO, A.; VIANA, R.; SILVA, R. B.; MACHADO, A. R.; LIMA, M. S. F. **Avaliação da adesividade do TiAlN, AlCrN e AlCr depositados sobre insertos de metal duro através de ensaios de indentação mecânica**. 2008. p.1-9. In: VIII Encontro Interno, XII Seminário de Iniciação Científica. Uberlândia, MG.

FRANCO, R. F.; PINEDO, C. E.; VENCOSKY, P. K.; TSCHIPTSCHIN, A. P. **Efeito do acabamento superficial de substratos de aço-ferramenta AISI D2 na aderência de revestimentos de TiN depositados por PVD**. p.44502- 44512. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 14, 2000. São Pedro, SP.

GERTH, J.; WIKLUND, U. *The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel*. **Wear**, v.264, p.885-892, 2008.

GRZESIK, W. Analytical models based on composite layer for computation of tool-chip interface temperatures in machining steels with multilayer coated cutting tools, **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.54, n.1, 2005, p. 91-94.

GU, J.; BARBER, G.; TUNG, S.; GU, R.-J. *Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts*. **Wear**, v.225-229, n.1, p.273-284. 1999.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física, Óptica e Física Moderna**. 9. ed, Rio de Janeiro: LTC. v.4, p.257-271. 2012.

HOLLECK, H.; SCHIER, V. *Multilayer PVD coatings for wear protection*. **Surface and Coatings Technology**, v.76-77, p.328-336. 1995.

HSIEH, J.H.; LIANG, C.; YU, C. H.; WU, W. *Deposition and characterization of TiAlN and multi-layered TiN / TiAlN coatings using unbalanced magnetron sputtering*. **Surface and Coatings Technology**, v.108-109, p.132-137. 1998.

HULTMAN, L.; SUNDGREN, J. E. *Structure/Property Relationships For Hard Coatings*. In: Hultman, L. and Sundgren, J. E. (ed.) **Handbook of Hard Coatings: Deposition Technologies, Properties and Applications**, Noyes Publications, p.108-180, 2001.

JINDAL, P. C.; SANTHANAM, A. T.; SCHLEINKOFER, U.; SHUSTER, A.F. *Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN coated cemented carbide tools in turning. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, v.17, p.163-170, 1999.

JOSHI, S. V.; SUNDARARAJAN, G. *Lasers for Metallic and Intermetallic Coatings*. In: Joshi, S. V. and Sundararajan, G. (ed.) ***Lasers in Surface Engineering – Surface Engineering Series – Volume I***, Narendra B. Dahotre Publications, p.121-177, 2001.

KALSS, W.; REITER, A.; DERFLINGER, V.; GEY, C.; ENDRINO, J. L. *Modern coatings in high performance cutting applications. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, v.24, p.399-404, 2006.

KNOTEK, O.; LÖFFLER, F.; KRÄMER, G. *Applications to Cutting Tools*. In: Knotek, O., Löffler, F. and Krämer, G. (ed.) ***Handbook of Hard Coatings: Deposition Technologies, Properties and Applications***, Noyes Publications, p.370-410, 2001.

Lee, D.-G.; Fitz-Gerald, J.M.; Singh, R.K. *Novel method for adherent diamond coatings on cemented carbide substrates. Surface and Coatings Technology*, v.100–101, n.1–3, p.187–191, 1998.

LI, T.; LOU, Q.; DONG, J.; WEI, Y.; LIU, J. *Selective removal of cobalt binder in surface ablation of tungsten carbide hardmetal with pulsed UV laser. Surface And Coatings Technology*, v.145, p.16-23.2001.

LIMA, M. S. F. L.; VASCONCELOS, G.; RIVA, R. *Laser surface engineering as a tool for more efficient satellite components. Journal of Aerospace Engineering, Science and Application*, v.4, n.4, p.105-111, 2012.

LIMA, M. S. F. *Preparação de superfícies de aço por laser para deposições PVD de nitreto de titânio. Relatório final de atividades Fundação Amparo e Pesquisa do estado de São Paulo, São Paulo. 2002.*

LIMA, M. S. F.; FOLIO, F.; MISCHLER, S. *Microstruture and surface properties of laser-remelted titanium nitride coatings on titanium. Surface and Coatings Technology*, v.199, p.83-91, 2005.

LIMA, M. S. F.; VENCOVSKY, P.; VIEIRA Jr., N. D.; MORATO, S. P. *Increasing life-time of tools by a new laser treatment and coating processes. Computational methods in materials characterisatio*. Ed. AA Mammoli and C. A. Brebbia, Southampton (UK), p.339-348, 2004.

MAYRHOFER, P.H.; MITTERER, C.; HULTMAN, L.; CLEMENS, H. *Microstructural design of hard coatings. Progress in Materials Science*, v.51, p.1032-1114. 2006.

MINISTÉRIO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. *Recomendações e procedimentos de segurança do trabalho para os laboratórios de pesquisa do CBPF, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas*. p.1-39. 2012.

NOME, R. Laser – Aspectos de segurança. 2012. 1ª Semana Interna de Prevenção de Acidentes, SIPAT do Instituto de Química. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

OLLENDORF, H.; SCHNEIDER, D. *A comparative study of adhesion test methods for hard coatings*. **Surface and Coatings Technology**, v.113, n.1-2, p.86-102, 1999.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. **Aços Inoxidáveis Austenísticos. Microestrutura e Propriedades**. 1. ed, Hemus. 2004.

PALDEY, S.; DEEVI, S.C. *Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: A review*. **Materials Science and Engineering A**, v.342 n.1-2, p.58-79. 2003.

PRENGEL, H.G.; SANTHANAM, A. T.; PENICH, R. M.; JINDAL, P. C.; WENDT, K. H. *Advanced PVD-TiAlN coatings on carbide and cermet cutting tools*. **Surface and Coatings Technology**, v.94-95, p.597-602. 1997.

Quinto, D.T. *Technology perspective on CVD and PVD coated metal-cutting tools*. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v.14, n.1-3, p.7-20. 1996.

SEMAK, V. V.; DAHOTRE, N. B. *Laser Surface Texturing*. In: Semak, V. V. and Dahotre, N. B. (ed.) **Lasers in Surface Engineering – Surface Engineering Series – Volume 1**, Narendra B. Dahotre Publications, p.35-67, 2001.

SIMÕES, J. G. A. B. Estruturação a laser em superfícies internas cilíndricas metálicas. 2009. 126p. Dissertação (Mestrado) em Física e Química dos Materiais Aeroespaciais. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

SÖDERBERG, S.; SJÖSTRAND, M.; LJUNGBERG, B. *Advances in coating technology for metal cutting tools*. **Metal Powder Report**, v.56, n.4, p.24-30. 2001.

SONA, A. *Lasers for Surface Engineering: Fundamentals and Types*. In: Sona A. (ed.) **Lasers in Surface Engineering – Surface Engineering Series – Volume 1**, Narendra B. Dahotre Publications, p.1-33, 2001.

SUAREZ, M. P.; MARTINS, E. M.; LIMA, M. S. F.; SILVA, F. J.; MACHADO, A. R. **Efeito do tipo de textura a laser na superfície de saída da ferramenta de corte sobre as forças de usinagem**. p.1-8. In: 6º COBEF Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 2011. Caxias do Sul, RS.

SUBRAMANIAN, C.; STRAFFORD, K.N.; WILKS, T.P.; WARD, L.P. *On the design of coating systems: metallurgical and other considerations*, **Journal of Materials Processing Technology**, v.56, n.1-4, 1996, p. 385-397.

TIEJUN, L.; QIHONG, L.; JINGXING, D.; YUNROND, W.; JUN, Z. JINGRU, L. *Ablation of cobalt with pulsed UV laser radiation*. **Applied Surface Science**. n. 172, p.356-365, 2001.

TÖNSHOFF, H. K.; MOHLFELD, A. *Surface treatment of cutting tool substrates*. **Institute for Production Engineering and Machine Tools**. Universidade de Hanover, Alemanha. v.47, n.47, p.263–272, 2007.

TÖNSHOFF, H.K.; MOHLFELD, A. *Surface treatment of cutting tool substrates*. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.38, n.5-6, p.469-476. 1998.

UHLMANN, E.; RICHARZ, S., MIHOTOVIC, V. *Substrate pre-treatment of cemented carbides using abrasive flow machining and laser beam ablation*. **Production Engineering**, v.3, n.1, p.81-86. 2009.

ULMANN, E.; RICHARZ, S.; MIHOTOVIC, V. *Substrate pre-teratment of cemented carbides using abrasive flow machining and laser beam ablation*. **Institute for Machine Tools and Factory Management**. Berlim, Alemanha. v.3, 2009, p.81-86.

VERDIER, M.; COSTIL, S.; CODDET, C.; OLTRA, R.; PERRET, O. *On the topographic and energetic surface modifications induced by laser treatment of metallic substrates before plasma spraying*. **Applied Surface Science**, v.205, n.1–4, 2003, p.3–21.

VIANA, R.; MACHADO, A.R. **Desempenho de revestimentos de brocas na usinagem de um liga Al-Si**. p.1-8. In: 13º POSMEC Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, SP.

VIANA, R.; MACHADO, A.R. **Furação de uma liga Al-Si com brocas de aço-rápido revestidas**. p.1-10. In: 15º POSMEC Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, SP.

VIDAKIS, N.; ANTONIADIS, A.; BILALIS, N. *The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds*. **Journal of Materials Processing Technology**. v.143–144, n.1, 2003, p.481–485.

YILBAS, B.S.; ARIF, A. F. M.; KARATAS, C.; AHSAN, M. *Cemented carbide cutting tool: Laser processing and thermal stress analysis*. **Applied Surface Science**, v.253, p.5544-5552. 2007.

ZHIGILEI, L.V.; KODALI, P.B.S.; GARRISON, B.J. *A microscopic view of laser ablation*. **Journal of Physical Chemistry B**, v.102, n.16, p.2845-2853. 1998.

APÊNDICE A – Resultado das análises de vida das ferramentas de desbaste em volume de material removido

A Tabela A.1 relaciona os valores individuais do resultado *vida de ferramenta em volume de material removido*, para os (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, no total de (8) valores, conforme descrito no planejamento fatorial, no item 4.1.6.

Tabela A.1: Valores do resultado *vida de ferramenta em volume de material removido* para os (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, com insertos de Desbaste (ISO M25).

			FATORES DE CONTROLE				RESPOSTA
Testes práticos	Inserto Convencional nº	Inserto Texturizado a Laser nº	Texturização	Veloc. Corte [m/min]	Avanço [mm/volta]	Profundade Corte [mm]	Volume material removido [cm ³]
1	12		Convencional	180	0,18	1,0	280,14
2	13		Convencional	150	0,18	1,0	512,45
3		3	a Laser	150	0,18	1,0	505,62
4		7	a Laser	180	0,18	1,0	307,47
5	Réplica	8	a Laser	180	0,18	1,0	280,14
6	Réplica 14		Convencional	180	0,18	1,0	321,13
7	Réplica	4	a Laser	150	0,18	1,0	478,28
8	Réplica 15		Convencional	150	0,18	1,0	519,28

APÊNDICE B – Resultado das análises das medições de potência de corte das ferramentas de desbaste

A Tabela B.1 relaciona os valores individuais do resultado *potência de corte*, dos (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, no total de (8) valores, conforme descrito no planejamento fatorial, no item 4.1.6.

Tabela B.1: Valores do resultado *potência de corte* dos (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, com insertos de Desbaste (ISO M25).

			FATORES DE CONTROLE				RESPOSTA	
Testes práticos		Inserto Convencional nº	Inserto Texturizado a Laser nº	Texturização	Veloc. Corte [m/min]	Avanço [mm/volta]	Profundade Corte [mm]	Potência de corte [KW]
1		12		Convencional	180	0,18	1,0	1,45
2		13		Convencional	150	0,18	1,0	1,05
3			3	a Laser	150	0,18	1,0	1,10
4			7	a Laser	180	0,18	1,0	1,33
5	Réplica		8	a Laser	180	0,18	1,0	1,34
6	Réplica	14		Convencional	180	0,18	1,0	1,30
7	Réplica		4	a Laser	150	0,18	1,0	0,97
8	Réplica	15		Convencional	150	0,18	1,0	1,01

APÊNDICE C – Resultado das análises de vida das ferramentas de acabamento em volume de material removido

A Tabela C.1 relaciona os valores individuais do resultado *vida de ferramenta em volume de material removido*, para os (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, no total de (8) valores, conforme descrito no planejamento fatorial, no item 4.2.6.

Tabela C.1: Valores do resultado *vida de ferramenta em volume de material removido* para os (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, com insertos de Acabamento (ISO M15).

				VARIÁVEIS DE CONTROLE				RESPOSTA
Testes práticos		Inserto Convencional nº	Inserto Texturizado a Laser nº	Texturização	Veloc. Corte [m/min]	Avanço [mm/volta]	Profund. Corte [mm]	Volume material removido [cm³]
1		11		Convencional	265	0,1	0,5	153,73
2			1	a Laser	265	0,1	0,5	170,82
3		12		Convencional	220	0,1	0,5	204,98
4			4	a Laser	220	0,1	0,5	225,48
5	Réplica		8	a Laser	220	0,1	0,5	191,31
6	Réplica	13		Convencional	220	0,1	0,5	204,98
7	Réplica		7	a Laser	265	0,1	0,5	157,15
8	Réplica	14		Convencional	265	0,1	0,5	140,07

APÊNDICE D – Resultados das análises das medições de potência de corte das ferramentas de acabamento

A Tabela D.1 relaciona os valores individuais do resultado *potência de corte*, dos (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, no total de (8) valores, conforme descrito no planejamento fatorial, no item 4.2.6.

Tabela D.1: Valores do resultado *potência de corte* dos (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, com insertos de Acabamento (ISO M15).

				VARIÁVEIS DE CONTROLE				RESPOSTA
Testes práticos		Inserto Convencional nº	Inserto Texturizado a Laser nº	Texturização	Veloc. Corte [m/min]	Avanço [mm/volta]	Profund. Corte [mm]	Potência de corte [KW]
1		11		Convencional	265	0,1	0,5	1,25
2			1	a Laser	265	0,1	0,5	1,22
3		12		Convencional	220	0,1	0,5	0,82
4			4	a Laser	220	0,1	0,5	0,85
5	Réplica		8	a Laser	220	0,1	0,5	0,81
6	Réplica	13		Convencional	220	0,1	0,5	0,81
7	Réplica		7	a Laser	265	0,1	0,5	1,29
8	Réplica	14		Convencional	265	0,1	0,5	1,24

APÊNDICE E – Resultado das análises das medições de rugosidade 2D das ferramentas de acabamento

A Tabela E.1 relaciona os valores individuais do resultado *rugosidade 2D dos corpos de prova*, dos (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, no total de (8) valores, conforme descrito no planejamento fatorial, no item 4.2.6.

Tabela E.1: Valores do resultado *rugosidade 2D dos corpos de prova* dos (4) ensaios de torneamento e uma réplica cada, com inserts de Acabamento (ISO M15).

				VARIÁVEIS DE CONTROLE				RESPOSTA
Testes práticos		Inserto Convencional nº	Inserto Texturizado a Laser nº	Texturização	Veloc. Corte [m/min]	Avanço [mm/volta]	Profund. Corte [mm]	Rugosidade dos corpos de prova (Ra)
1		11		Convencional	265	0,1	0,5	0,73
2			1	a Laser	265	0,1	0,5	0,63
3		12		Convencional	220	0,1	0,5	0,70
4			4	a Laser	220	0,1	0,5	0,57
5	Réplica		8	a Laser	220	0,1	0,5	0,65
6	Réplica	13		Convencional	220	0,1	0,5	0,95
7	Réplica		7	a Laser	265	0,1	0,5	0,49
8	Réplica	14		Convencional	265	0,1	0,5	0,59

ANEXO A – Tabela de Distribuição F para $\alpha = 0,05$

As Figuras A.1 (a), (b), (c) e (d) relacionam valores de Distribuição F para significância $\alpha = 0,05$, que mede a razão entre duas *chi quadrado*, utilizada na análise de variância, conforme descrito no planejamento fatorial, nos itens 4.1.6 (ferramentas de desbaste) e 4.2.6 (ferramentas de acabamento).

Tabela 4 Distribuição F

O gráfico mostra a curva da distribuição F, que é assimétrica à direita. O eixo horizontal representa o valor de F, e o eixo vertical representa a densidade de probabilidade. Uma linha vertical tracejada indica o valor crítico F_{α} na cauda superior. A área sob a curva à direita de F_{α} é sombreada e rotulada como 'Área ou probabilidade'. O ponto F_{α} também é rotulado no eixo horizontal.

Os registros na tabela fornecem valores de F_{α} , em que α é a área ou probabilidade na cauda superior da distribuição F. Por exemplo, com 4 graus de liberdade do numerador, 8 graus de liberdade do denominador, e uma área de 0,05 na cauda superior, $F_{0,05} = 3,48$.

Graus de Liberdade do Denominador	Área na Cauda Superior	Graus de Liberdade do Numerador																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	60	100	1.000
1	0,10	39,86	49,50	53,59	55,83	57,24	58,20	58,91	59,44	59,86	60,19	61,22	61,74	62,05	62,26	62,53	62,79	63,01	63,30
	0,05	161,45	199,50	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77	238,88	240,54	241,88	245,95	248,02	249,26	250,10	251,14	252,20	253,04	254,19
	0,025	647,79	799,48	864,15	899,60	921,83	937,11	948,20	956,64	963,28	968,63	984,87	993,08	998,09	1.001,40	1.005,60	1.009,79	1.013,16	1.017,76
	0,01	4.032,18	4.997,34	5.403,53	5.624,26	5.763,96	5.858,95	5.928,33	5.980,95	6.022,40	6.055,93	6.156,97	6.208,66	6.239,86	6.260,35	6.286,43	6.312,97	6.333,92	6.362,80
2	0,10	8,53	9,00	9,16	9,24	9,29	9,33	9,35	9,37	9,38	9,39	9,42	9,44	9,45	9,46	9,47	9,47	9,48	9,49
	0,05	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,43	19,45	19,46	19,46	19,47	19,48	19,49	19,49
	0,025	38,51	39,00	39,17	39,25	39,30	39,33	39,36	39,37	39,39	39,40	39,43	39,45	39,46	39,46	39,47	39,48	39,49	39,50
	0,01	98,50	99,00	99,16	99,25	99,30	99,33	99,36	99,38	99,39	99,40	99,43	99,45	99,46	99,47	99,48	99,49	99,50	99,50
3	0,10	5,54	5,46	5,39	5,34	5,31	5,28	5,27	5,25	5,24	5,23	5,20	5,18	5,17	5,17	5,16	5,15	5,14	5,13
	0,05	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,70	8,66	8,63	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
	0,025	17,44	16,04	15,44	15,10	14,88	14,73	14,62	14,54	14,47	14,42	14,25	14,17	14,12	14,08	14,04	13,99	13,96	13,91
	0,01	34,12	30,82	29,46	28,71	28,24	27,91	27,67	27,49	27,34	27,23	26,87	26,69	26,58	26,50	26,41	26,32	26,24	26,14
4	0,10	4,54	4,32	4,19	4,11	4,05	4,01	3,98	3,95	3,94	3,92	3,87	3,84	3,83	3,82	3,80	3,79	3,78	3,76
	0,05	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
	0,025	12,22	10,65	9,98	9,60	9,36	9,20	9,07	8,98	8,90	8,84	8,66	8,56	8,50	8,46	8,41	8,36	8,32	8,26
	0,01	21,20	18,00	16,69	15,98	15,52	15,21	14,98	14,80	14,66	14,55	14,20	14,02	13,91	13,84	13,75	13,65	13,58	13,47
5	0,10	4,06	3,78	3,62	3,52	3,45	3,40	3,37	3,34	3,32	3,30	3,24	3,21	3,19	3,17	3,16	3,14	3,13	3,11
	0,05	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,62	4,56	4,52	4,50	4,46	4,41	4,37	4,32
	0,025	10,01	8,43	7,76	7,39	7,15	6,98	6,85	6,76	6,68	6,62	6,43	6,33	6,27	6,23	6,18	6,12	6,08	6,00
	0,01	16,26	13,27	12,06	11,39	10,97	10,67	10,46	10,29	10,16	10,05	9,72	9,55	9,45	9,38	9,29	9,20	9,13	9,03

Figura A.1 (a): Valores da Distribuição F para $\alpha = 0,05$ (ANDERSON et al., 2011).

Tabela 4 Distribuição F (continuação)

Tabela 4 Distribuição F (continuação)																																					
Graus de Liberdade do Denominador	Área na Cauda Superior	Graus de Liberdade do Numerador																																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	60	100	1.000																		
6	0,10 3,78 3,46 3,29 3,18 3,11 3,05 3,01 2,98 2,96 2,94 2,87 2,84 2,81 2,80 2,78 2,76 2,75 2,72 2,67	0,05 5,99 5,14 4,76 4,53 4,39 4,28 4,21 4,15 4,10 4,06 3,94 3,87 3,83 3,81 3,77 3,74 3,71 3,67 3,67	0,025 8,81 7,26 6,60 6,23 5,99 5,82 5,70 5,60 5,52 5,46 5,27 5,17 5,11 5,07 5,01 4,96 4,92 4,86 4,86	0,01 13,75 10,92 9,78 9,15 8,75 8,47 8,26 8,10 7,98 7,87 7,56 7,40 7,30 7,23 7,14 7,06 6,99 6,89 6,89	0,10 3,59 3,26 3,07 2,96 2,88 2,83 2,78 2,75 2,72 2,70 2,63 2,59 2,57 2,56 2,54 2,51 2,50 2,47 2,47	0,05 5,59 4,74 4,35 4,12 3,97 3,87 3,79 3,73 3,68 3,64 3,51 3,44 3,40 3,38 3,34 3,30 3,27 3,23 3,23	0,025 8,07 6,54 5,89 5,52 5,29 5,12 4,99 4,90 4,82 4,76 4,57 4,47 4,40 4,36 4,31 4,25 4,21 4,15 4,15	0,01 12,25 9,55 8,45 7,85 7,46 7,19 6,99 6,84 6,72 6,62 6,31 6,16 6,06 5,99 5,91 5,82 5,75 5,66 5,66	0,10 3,46 3,11 2,92 2,81 2,73 2,67 2,62 2,59 2,56 2,54 2,46 2,42 2,40 2,38 2,36 2,34 2,32 2,30 2,30	0,05 5,32 4,46 4,07 3,84 3,69 3,58 3,50 3,44 3,39 3,35 3,22 3,15 3,11 3,08 3,04 3,01 2,97 2,93 2,93	0,025 7,57 6,06 5,42 5,05 4,82 4,65 4,53 4,43 4,36 4,30 4,10 4,00 3,94 3,89 3,84 3,78 3,74 3,68 3,68	0,01 11,26 8,65 7,59 7,01 6,63 6,37 6,18 6,03 5,91 5,81 5,52 5,36 5,26 5,20 5,12 5,03 4,96 4,87 4,87	0,10 3,36 3,01 2,81 2,69 2,61 2,55 2,51 2,47 2,44 2,42 2,34 2,30 2,27 2,25 2,23 2,21 2,19 2,16 2,16	0,05 5,12 4,26 3,86 3,63 3,48 3,37 3,29 3,23 3,18 3,14 3,01 2,94 2,89 2,86 2,83 2,79 2,76 2,71 2,71	0,025 7,21 5,71 5,08 4,72 4,48 4,32 4,20 4,10 4,03 3,96 3,77 3,67 3,60 3,56 3,51 3,45 3,40 3,34 3,34	0,01 10,56 8,02 6,99 6,42 6,06 5,80 5,61 5,47 5,35 5,26 4,96 4,81 4,71 4,65 4,57 4,48 4,41 4,32 4,32	0,10 3,29 2,92 2,73 2,61 2,52 2,46 2,41 2,38 2,35 2,32 2,24 2,20 2,17 2,16 2,13 2,11 2,09 2,06 2,06	0,05 4,96 4,10 3,71 3,48 3,33 3,22 3,14 3,07 3,02 2,98 2,85 2,77 2,73 2,70 2,66 2,62 2,59 2,54 2,54	0,025 6,94 5,46 4,83 4,47 4,24 4,07 3,95 3,85 3,78 3,72 3,52 3,42 3,35 3,31 3,26 3,20 3,15 3,09 3,09	0,01 10,04 7,56 6,55 5,99 5,64 5,39 5,20 5,06 4,94 4,85 4,56 4,41 4,31 4,25 4,17 4,08 4,01 3,92 3,92	0,10 3,23 2,86 2,66 2,54 2,45 2,39 2,34 2,30 2,27 2,25 2,17 2,12 2,10 2,08 2,05 2,03 2,01 1,98 1,98	0,05 4,84 3,98 3,59 3,36 3,20 3,09 3,01 2,95 2,90 2,85 2,72 2,65 2,60 2,57 2,53 2,49 2,46 2,41 2,41	0,025 6,72 5,26 4,63 4,28 4,04 3,88 3,76 3,66 3,59 3,53 3,33 3,23 3,16 3,12 3,06 3,00 2,96 2,89 2,89	0,01 9,65 7,21 6,22 5,67 5,32 5,07 4,89 4,74 4,63 4,54 4,25 4,10 4,01 3,94 3,86 3,78 3,71 3,61 3,61	0,10 3,18 2,81 2,61 2,48 2,39 2,33 2,28 2,24 2,21 2,19 2,10 2,06 2,03 2,01 1,99 1,96 1,94 1,91 1,91	0,05 4,75 3,89 3,49 3,26 3,11 3,00 2,91 2,85 2,80 2,75 2,62 2,54 2,50 2,47 2,43 2,38 2,35 2,30 2,30	0,025 6,55 5,10 4,47 4,12 3,89 3,73 3,61 3,51 3,44 3,37 3,18 3,07 3,01 2,96 2,91 2,85 2,80 2,73 2,73	0,01 9,33 6,93 5,95 5,41 5,06 4,82 4,64 4,50 4,39 4,30 4,01 3,86 3,76 3,70 3,62 3,54 3,47 3,37 3,37	0,10 3,14 2,76 2,56 2,43 2,35 2,28 2,23 2,20 2,16 2,14 2,05 2,01 1,98 1,96 1,93 1,90 1,88 1,85 1,85	0,05 4,67 3,81 3,41 3,18 3,03 2,92 2,83 2,77 2,71 2,67 2,53 2,46 2,41 2,38 2,34 2,28 2,26 2,21 2,21	0,025 6,41 4,97 4,35 4,00 3,77 3,60 3,48 3,39 3,31 3,25 3,05 2,95 2,88 2,84 2,78 2,72 2,67 2,60 2,60	0,01 9,07 6,70 5,74 5,21 4,86 4,62 4,44 4,30 4,19 4,10 3,82 3,66 3,57 3,51 3,43 3,34 3,27 3,18 3,18	0,10 3,10 2,73 2,52 2,39 2,31 2,24 2,19 2,15 2,12 2,10 2,01 1,96 1,93 1,91 1,89 1,86 1,83 1,80 1,80	0,05 4,60 3,74 3,34 3,11 2,96 2,85 2,76 2,70 2,65 2,60 2,46 2,39 2,34 2,31 2,27 2,22 2,19 2,14 2,14	0,025 6,30 4,86 4,24 3,89 3,66 3,50 3,38 3,29 3,21 3,15 2,95 2,84 2,78 2,73 2,73 2,67 2,61 2,56 2,50 2,50	0,01 8,86 6,51 5,56 5,04 4,69 4,46 4,28 4,14 4,03 3,94 3,66 3,51 3,41 3,35 3,27 3,18 3,11 3,02 3,02	0,10 3,07 2,70 2,49 2,36 2,27 2,21 2,16 2,12 2,09 2,06 1,97 1,92 1,89 1,87 1,85 1,82 1,79 1,76 1,76
7	0,10 3,59 3,26 3,07 2,96 2,88 2,83 2,78 2,75 2,72 2,70 2,63 2,59 2,57 2,56 2,54 2,51 2,50 2,47 2,47	0,05 5,59 4,74 4,35 4,12 3,97 3,87 3,79 3,73 3,68 3,64 3,51 3,44 3,40 3,38 3,34 3,30 3,27 3,23 3,23	0,025 8,07 6,54 5,89 5,52 5,29 5,12 4,99 4,90 4,82 4,76 4,57 4,47 4,40 4,36 4,31 4,25 4,21 4,15 4,15	0,01 12,25 9,55 8,45 7,85 7,46 7,19 6,99 6,84 6,72 6,62 6,31 6,16 6,06 5,99 5,91 5,82 5,75 5,66 5,66	0,10 3,46 3,11 2,92 2,81 2,73 2,67 2,62 2,59 2,56 2,54 2,46 2,42 2,40 2,38 2,36 2,34 2,32 2,30 2,30	0,05 5,32 4,46 4,07 3,84 3,69 3,58 3,50 3,44 3,39 3,35 3,22 3,15 3,11 3,08 3,04 3,01 2,97 2,93 2,93	0,025 7,57 6,06 5,42 5,05 4,82 4,65 4,53 4,43 4,36 4,30 4,10 4,00 3,94 3,89 3,84 3,78 3,74 3,68 3,68	0,01 11,26 8,65 7,59 7,01 6,63 6,37 6,18 6,03 5,91 5,81 5,52 5,36 5,26 5,20 5,12 5,03 4,96 4,87 4,87	0,10 3,36 3,01 2,81 2,69 2,61 2,55 2,51 2,47 2,44 2,42 2,34 2,30 2,27 2,25 2,23 2,21 2,19 2,16 2,16	0,05 5,12 4,26 3,86 3,63 3,48 3,37 3,29 3,23 3,18 3,14 3,01 2,94 2,89 2,86 2,83 2,79 2,76 2,71 2,71	0,025 7,21 5,71 5,08 4,72 4,48 4,32 4,20 4,10 4,03 3,96 3,77 3,67 3,60 3,56 3,51 3,45 3,40 3,34 3,34	0,01 10,56 8,02 6,99 6,42 6,06 5,80 5,61 5,47 5,35 5,26 4,96 4,81 4,71 4,65 4,57 4,48 4,41 4,32 4,32	0,10 3,29 2,92 2,73 2,61 2,52 2,46 2,41 2,38 2,35 2,32 2,24 2,20 2,17 2,16 2,13 2,11 2,09 2,06 2,06	0,05 4,96 4,10 3,71 3,48 3,33 3,22 3,14 3,07 3,02 2,98 2,85 2,77 2,73 2,70 2,66 2,62 2,59 2,54 2,54	0,025 6,94 5,46 4,83 4,47 4,24 4,07 3,95 3,85 3,78 3,72 3,52 3,42 3,35 3,31 3,26 3,20 3,15 3,09 3,09	0,01 10,04 7,56 6,55 5,99 5,64 5,39 5,20 5,06 4,94 4,85 4,56 4,41 4,31 4,25 4,17 4,08 4,01 3,92 3,92	0,10 3,23 2,86 2,66 2,54 2,45 2,39 2,34 2,30 2,27 2,25 2,17 2,12 2,10 2,08 2,05 2,03 2,01 1,98 1,98	0,05 4,84 3,98 3,59 3,36 3,20 3,09 3,01 2,95 2,90 2,85 2,72 2,65 2,60 2,57 2,53 2,49 2,46 2,41 2,41	0,025 6,72 5,26 4,63 4,28 4,04 3,88 3,76 3,66 3,59 3,53 3,33 3,23 3,16 3,12 3,06 3,00 2,96 2,89 2,89	0,01 9,65 7,21 6,22 5,67 5,32 5,07 4,89 4,74 4,63 4,54 4,25 4,10 4,01 3,94 3,86 3,78 3,71 3,61 3,61	0,10 3,18 2,81 2,61 2,48 2,39 2,33 2,28 2,24 2,21 2,19 2,10 2,06 2,03 2,01 1,99 1,96 1,94 1,91 1,91	0,05 4,75 3,89 3,49 3,26 3,11 3,00 2,91 2,85 2,80 2,75 2,62 2,54 2,50 2,47 2,43 2,38 2,35 2,30 2,30	0,025 6,55 5,10 4,47 4,12 3,89 3,73 3,61 3,51 3,44 3,37 3,18 3,07 3,01 2,96 2,91 2,85 2,80 2,73 2,73	0,01 9,33 6,93 5,95 5,41 5,06 4,82 4,64 4,50 4,39 4,30 4,01 3,86 3,76 3,70 3,62 3,54 3,47 3,37 3,37	0,10 3,14 2,76 2,56 2,43 2,35 2,28 2,23 2,20 2,16 2,14 2,05 2,01 1,98 1,96 1,93 1,90 1,88 1,85 1,85	0,05 4,67 3,81 3,41 3,18 3,03 2,92 2,83 2,77 2,71 2,67 2,53 2,46 2,41 2,38 2,34 2,28 2,26 2,21 2,21	0,025 6,41 4,97 4,35 4,00 3,77 3,60 3,48 3,39 3,31 3,25 3,05 2,95 2,88 2,84 2,78 2,72 2,67 2,60 2,60	0,01 9,07 6,70 5,74 5,21 4,86 4,62 4,44 4,30 4,19 4,10 3,82 3,66 3,57 3,51 3,43 3,34 3,27 3,18 3,18	0,10 3,10 2,73 2,52 2,39 2,31 2,24 2,19 2,15 2,12 2,10 2,01 1,96 1,93 1,91 1,89 1,86 1,83 1,80 1,80	0,05 4,60 3,74 3,34 3,11 2,96 2,85 2,76 2,70 2,65 2,60 2,46 2,39 2,34 2,31 2,27 2,22 2,19 2,14 2,14	0,025 6,30 4,86 4,24 3,89 3,66 3,50 3,38 3,29 3,21 3,15 2,95 2,84 2,78 2,73 2,73 2,67 2,61 2,56 2,50 2,50	0,01 8,86 6,51 5,56 5,04 4,69 4,46 4,28 4,14 4,03 3,94 3,66 3,51 3,41 3,35 3,27 3,18 3,11 3,02 3,02	0,10 3,07 2,70 2,49 2,36 2,27 2,21 2,16 2,12 2,09 2,06 1,97 1,92 1,89 1,87 1,85 1,82 1,79 1,76 1,76				
8	0,10 3,46 3,11 2,92 2,81 2,73 2,67 2,62 2,59 2,56 2,54 2,46 2,42 2,40 2,38 2,36 2,34 2,32 2,30 2,30	0,05 5,32 4,46 4,07 3,84 3,69 3,58 3,50 3,44 3,39 3,35 3,22 3,15 3,11 3,08 3,04 3,01 2,97 2,93 2,93	0,025 7,57 6,06 5,42 5,05 4,82 4,65 4,53 4,43 4,36 4,30 4,10 4,00 3,94 3,89 3,84 3,78 3,74 3,68 3,68	0,01 11,26 8,65 7,59 7,01 6,63 6,37 6,18 6,03 5,91 5,81 5,52 5,36 5,26 5,20 5,12 5,03 4,96 4,87 4,87	0,10 3,36 3,01 2,81 2,69 2,61 2,55 2,51 2,47 2,44 2,42 2,34 2,30 2,27 2,25 2,23 2,21 2,19 2,16 2,16	0,05 5,12 4,26 3,86 3,63 3,48 3,37 3,29 3,23 3,18 3,14 3,01 2,94 2,89 2,86 2,83 2,79 2,76 2,71 2,71	0,025 7,21 5,71 5,08 4,72 4,48 4,32 4,20 4,10 4,03 3,96 3,77 3,67 3,60 3,56 3,51 3,45 3,40 3,34 3,34	0,01 10,56 8,02 6,99 6,42 6,06 5,80 5,61 5,47 5,35 5,26 4,96 4,81 4,71 4,65 4,57 4,48 4,41 4,32 4,32	0,10 3,29 2,92 2,73 2,61 2,52 2,46 2,41 2,38 2,35 2,32 2,24 2,20 2,17 2,16 2,13 2,11 2,09 2,06 2,06	0,05 4,96 4,10 3,71 3,48 3,33 3,22 3,14 3,07 3,02 2,98 2,85 2,77 2,73 2,70 2,66 2,62 2,59 2,54 2,54	0,025 6,94 5,46 4,83 4,47 4,24 4,07 3,95 3,85 3,78 3,72 3,52 3,42 3,35 3,31 3,26 3,20 3,15 3,09 3,09	0,01 10,04 7,56 6,55 5,99 5,64 5,39 5,20 5,06 4,94 4,85 4,56 4,41 4,31 4,25 4,17 4,08 4,01 3,92 3,92	0,10 3,23 2,86 2,66 2,54 2,45 2,39 2,34 2,30 2,27 2,25 2,17 2,12 2,10 2,08 2,05 2,03 2,01 1,98 1,98	0,05 4,84 3,98 3,59 3,36 3,20 3,09 3,01 2,95 2,90 2,85 2,72 2,65 2,60 2,57 2,53 2,49 2,46 2,41 2,41	0,025 6,72 5,26 4,63 4,28 4,04 3,88 3,76 3,66 3,59 3,53 3,33 3,23 3,16 3,12 3,06 3,00 2,96 2,89 2,89	0,01 9,65 7,21 6,22 5,67 5,32 5,07 4,89 4,74 4,63 4,54 4,25 4,10 4,01 3,94 3,86 3,78 3,71 3,61 3,61	0,10 3,18 2,81 2,61 2,48 2,39 2,33 2,28 2,24 2,21 2,19 2,10 2,06 2,03 2,01 1,99 1,96 1,94 1,91 1,91	0,05 4,75 3,89 3,49 3,26 3,11 3,00 2,91 2,85 2,80 2,75 2,62 2,54 2,50 2,47 2,43 2,38 2,35 2,30 2,30	0,025 6,55 5,10 4,47 4,12 3,89 3,73 3,61 3,51 3,44 3,37 3,18 3,07 3,01 2,96 2,91 2,85 2,80 2,73 2,73	0,01 9,33 6,93 5,95 5,41 5,06 4,82 4,64 4,50 4,39 4,30 4,01 3,86 3,76 3,70 3,62 3,54 3,47 3,37 3,37	0,10 3,14 2,76 2,56 2,43 2,35 2,28 2,23 2,20 2,16 2,14 2,05 2,01 1,98 1,96 1,93 1,90 1,88 1,85 1,85	0,05 4,67 3,81 3,41 3,18 3,03 2,92 2,83 2,77 2,71 2,67 2,53 2,46 2,41 2,38 2,34 2,28 2,26 2,21 2,21	0,025 6,41 4,97 4,35 4,00 3,77 3,60 3,48 3,39 3,31 3,25 3,05 2,95 2,88 2,84 2,78 2,72 2,67 2,60 2,60	0,01 9,07 6,70 5,74 5,21 4,86 4,62 4,44 4,30 4,19 4,10 3,82 3,66 3,57 3,51 3,43 3,34 3,27 3,18 3,18	0,10 3,10 2,73 2,52 2,39 2,31 2,24 2,19 2,15 2,12 2,10 2,01 1,96 1,93 1,91 1,89 1,86 1,83 1,80 1,80	0,05 4,60 3,74 3,34 3,11 2,96 2,85 2,76 2,70 2,65 2,60 2,46 2,39 2,34 2,31 2,27 2,22 2,19 2,14 2,14	0,025 6,30 4,86 4,24 3,89 3,66 3,50 3,38 3,29 3,21 3,15 2,95 2,84 2,78 2,73 2,73 2,67 2,61 2,56 2,50 2,50	0,01 8,86 6,51 5,56 5,04 4,69 4,46 4,28 4,14 4,03 3,94 3,66 3,51 3,41 3,35 3,27 3,18 3,11 3,02 3,02	0,10 3,07 2,70 2,49 2,36 2,27 2,21 2,16 2,12 2,09 2,06 1,97 1,92 1,89 1,87 1,85 1,82 1,79 1,76 1,76								
9	0,10 3,36 3,01 2,81 2,69 2,61 2,55 2,51 2,47 2,44 2,42 2,34 2,30 2,27 2,25 2,23 2,21 2,19 2,16 2,16	0,05 5,12 4,26 3,86 3,63 3,48 3,37 3,29 3,23 3,18 3,14 3,01 2,94 2,89 2,86 2,83 2,79 2,76 2,71 2,71	0,025 7,21 5,71 5,08 4,72 4,48 4,32 4,20 4,10 4,03 3,96 3,77 3,67 3,60 3,56 3,51 3,45 3,40 3,34 3,34	0,01 10,56 8,02 6,99 6,42 6,06 5,80 5,61 5,47 5,35 5,26 4,96 4,81 4,71 4,65 4,57 4,48 4,41 4,32 4,32	0,10 3,29 2,92 2,73 2,61 2,52 2,46 2,41 2,38 2,35 2,32 2,24 2,20 2,17 2,16 2,13 2,11 2,09 2,06 2,06	0,05 4,96 4,10 3,71 3,48 3,33 3,22 3,14 3,07 3,02 2,98 2,85 2,77 2,73 2,70 2,66 2,62 2,59 2,54 2,54	0,025 6,94 5,46 4,83 4,47 4,24 4,07 3,95 3,85 3,78 3,72 3,52 3,42 3,35 3,31 3,26 3,20 3,15 3,09 3,09	0,01 10,04 7,56 6,55 5,99 5,64 5,39 5,20 5,06 4,94 4,85 4,56 4,41 4,31 4,25 4,17 4,08 4,01 3,92 3,92	0,10 3,23 2,86 2,66 2,54 2,45 2,39 2,34 2,30 2,27 2,25 2,17 2,12 2,10 2,08 2,05 2,03 2,01 1,98 1,98	0,05 4,84 3,98 3,59 3,36 3,20 3,09 3,01 2,95 2,90 2,85 2,72 2,65 2,60 2,57 2,53 2,49 2,46 2,41 2,41	0,025 6,72 5,26 4,63 4,28 4,04 3,88 3,76 3,66 3,59 3,53 3,33 3,23 3,16 3,12 3,06 3,00 2,96 2,89 2,89	0,01 9,65 7,21 6,22 5,67 5,32 5,07 4,89 4,74 4,63 4,54 4,25 4,10 4,01 3,94 3,86 3,78 3,71 3,61 3,61	0,10 3,18 2,81 2,61 2,48 2,39 2,33 2,28 2,24 2,21 2,19 2,10 2,06 2,03 2,01 1,99 1,96 1,94 1,91 1,91	0,05 4,75 3,89 3,49 3,26 3,11 3,00 2,91 2,85 2,80 2,75 2,62 2,54 2,50 2,47 2,43 2,38 2,35 2,30 2,30	0,025 6,55 5,10 4,47 4,12 3,89 3,73 3,61 3,51 3,44 3,37 3,18 3,07 3,01 2,96 2,91 2,85 2,80 2,73 2,73	0,01 9,33 6,93 5,95 5,41 5,06 4,82 4,64 4,50 4,39 4,30 4,01 3,86 3,76 3,70 3,62 3,54 3,47 3,37 3,37	0,10 3,14 2,76 2,56 2,43 2,35 2,28 2,23 2,20 2,16 2,14 2,05 2,01 1,98 1,96 1,93 1,90 1,88 1,85 1,85	0,05 4,67 3,81 3,41																			

FiguraA.1 (b): Valores da Distribuição F para $\alpha = 0,05$ (ANDERSON et al., 2011).

Tabela 4 Distribuição F (continuação)																			
Graus de liberdade do nominador	Área na Cauda Superior	Graus de Liberdade do Numerador																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	60	100	1.000
16	0,10	3,05	2,67	2,46	2,33	2,24	2,18	2,13	2,09	2,06	2,03	1,94	1,89	1,86	1,84	1,81	1,78	1,76	1,72
	0,05	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,35	2,28	2,23	2,19	2,15	2,11	2,07	2,02
	0,025	6,12	4,69	4,08	3,73	3,50	3,34	3,22	3,12	3,05	2,99	2,79	2,68	2,61	2,57	2,51	2,45	2,40	2,32
	0,01	8,53	6,23	5,29	4,77	4,44	4,20	4,03	3,89	3,78	3,69	3,41	3,26	3,16	3,10	3,02	2,93	2,86	2,76
17	0,10	3,03	2,64	2,44	2,31	2,22	2,15	2,10	2,06	2,03	2,00	1,91	1,86	1,83	1,81	1,78	1,75	1,73	1,69
	0,05	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,31	2,23	2,18	2,15	2,10	2,06	2,02	1,97
	0,025	6,04	4,62	4,01	3,66	3,44	3,28	3,16	3,06	2,98	2,92	2,72	2,62	2,55	2,50	2,44	2,38	2,33	2,26
	0,01	8,40	6,11	5,19	4,67	4,34	4,10	3,93	3,79	3,68	3,59	3,31	3,16	3,07	3,00	2,92	2,83	2,76	2,66
18	0,10	3,01	2,62	2,42	2,29	2,20	2,13	2,08	2,04	2,00	1,98	1,89	1,84	1,80	1,78	1,75	1,72	1,70	1,66
	0,05	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,27	2,19	2,14	2,11	2,06	2,02	1,98	1,92
	0,025	5,98	4,56	3,95	3,61	3,38	3,22	3,10	3,01	2,93	2,87	2,67	2,56	2,49	2,44	2,38	2,32	2,27	2,20
	0,01	8,29	6,01	5,09	4,58	4,25	4,01	3,84	3,71	3,60	3,51	3,23	3,08	2,98	2,92	2,84	2,75	2,68	2,58
19	0,10	2,99	2,61	2,40	2,27	2,18	2,11	2,06	2,02	1,98	1,96	1,86	1,81	1,78	1,76	1,73	1,70	1,67	1,64
	0,05	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,94	1,88
	0,025	5,92	4,51	3,90	3,56	3,33	3,17	3,05	2,96	2,88	2,82	2,62	2,51	2,44	2,39	2,33	2,27	2,22	2,14
	0,01	8,18	5,93	5,01	4,50	4,17	3,94	3,77	3,63	3,52	3,43	3,15	3,00	2,91	2,84	2,76	2,60	2,50	2,50
20	0,10	2,97	2,59	2,38	2,25	2,16	2,09	2,04	2,00	1,96	1,94	1,84	1,79	1,76	1,74	1,71	1,68	1,65	1,61
	0,05	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,20	2,12	2,07	2,04	1,99	1,95	1,91	1,85
	0,025	5,87	4,46	3,86	3,51	3,29	3,13	3,01	2,91	2,84	2,77	2,57	2,46	2,40	2,35	2,29	2,22	2,17	2,09
	0,01	8,10	5,85	4,94	4,43	4,10	3,87	3,70	3,56	3,46	3,37	3,09	2,94	2,84	2,78	2,69	2,61	2,54	2,43
21	0,10	2,96	2,57	2,36	2,23	2,14	2,08	2,02	1,98	1,95	1,92	1,83	1,78	1,74	1,72	1,69	1,66	1,63	1,59
	0,05	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,88	1,82
	0,025	5,83	4,42	3,82	3,48	3,25	3,09	2,97	2,87	2,80	2,73	2,53	2,42	2,36	2,31	2,25	2,18	2,13	2,05
	0,01	8,02	5,78	4,87	4,37	4,04	3,81	3,64	3,51	3,40	3,31	3,03	2,88	2,79	2,72	2,64	2,55	2,48	2,37
22	0,10	2,95	2,56	2,35	2,22	2,13	2,06	2,01	1,97	1,93	1,90	1,81	1,76	1,73	1,70	1,67	1,64	1,61	1,57
	0,05	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,15	2,07	2,02	1,98	1,94	1,89	1,85	1,79
	0,025	5,79	4,38	3,78	3,44	3,22	3,05	2,93	2,84	2,76	2,70	2,50	2,39	2,32	2,27	2,21	2,14	2,09	2,01
	0,01	7,95	5,72	4,82	4,31	3,99	3,76	3,59	3,45	3,35	3,26	2,98	2,83	2,73	2,67	2,58	2,50	2,42	2,32
23	0,10	2,94	2,55	2,34	2,21	2,11	2,05	1,99	1,95	1,92	1,89	1,80	1,74	1,71	1,69	1,66	1,62	1,59	1,55
	0,05	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,13	2,05	2,00	1,96	1,91	1,86	1,82	1,76
	0,025	5,75	4,35	3,75	3,41	3,18	3,02	2,90	2,81	2,73	2,67	2,47	2,36	2,29	2,24	2,18	2,11	2,06	1,98
	0,01	7,88	5,66	4,76	4,26	3,94	3,71	3,54	3,41	3,30	3,21	2,93	2,78	2,69	2,62	2,54	2,45	2,37	2,27
24	0,10	2,93	2,54	2,33	2,19	2,10	2,04	1,98	1,94	1,91	1,88	1,78	1,73	1,70	1,67	1,64	1,61	1,58	1,54
	0,05	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,11	2,03	1,97	1,94	1,89	1,84	1,80	1,74
	0,025	5,72	4,32	3,72	3,38	3,15	2,99	2,87	2,78	2,70	2,64	2,44	2,33	2,26	2,21	2,15	2,08	2,02	1,94
	0,01	7,82	5,61	4,72	4,22	3,90	3,67	3,50	3,36	3,26	3,17	2,89	2,74	2,64	2,58	2,49	2,40	2,33	2,22

Tabela 4 Distribuição F (continuação)																			
Graus de Liberdade do Denominador	Área na Cauda Superior	Graus de Liberdade do Numerador																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	60	100	1.000
25	0,10	2,92	2,53	2,32	2,18	2,09	2,02	1,97	1,93	1,89	1,87	1,77	1,72	1,68	1,66	1,63	1,59	1,56	1,52
	0,05	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,78	1,72
	0,025	5,69	4,29	3,69	3,35	3,13	2,97	2,85	2,75	2,68	2,61	2,41	2,30	2,23	2,18	2,12	2,05	2,00	1,91
	0,01	7,77	5,57	4,68	4,18	3,85	3,63	3,46	3,32	3,22	3,13	2,85	2,70	2,60	2,54	2,45	2,36	2,29	2,18
26	0,10	2,91	2,52	2,31	2,17	2,08	2,01	1,96	1,92	1,88	1,86	1,76	1,71	1,67	1,65	1,61	1,58	1,55	1,51
	0,05	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,07	1,99	1,94	1,90	1,85	1,80	1,76	1,70
	0,025	5,66	4,27	3,67	3,33	3,10	2,94	2,82	2,73	2,65	2,59	2,39	2,28	2,21	2,16	2,09	2,03	1,97	1,89
	0,01	7,72	5,53	4,64	4,14	3,82	3,59	3,42	3,29	3,18	3,09	2,81	2,66	2,57	2,50	2,42	2,33	2,25	2,14
27	0,10	2,90	2,51	2,30	2,17	2,07	2,00	1,95	1,91	1,87	1,85	1,75	1,70	1,66	1,64	1,60	1,57	1,54	1,50
	0,05	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,06	1,97	1,92	1,88	1,84	1,79	1,74	1,68
	0,025	5,63	4,24	3,65	3,31	3,08	2,92	2,80	2,71	2,63	2,57	2,36	2,25	2,18	2,13	2,07	2,00	1,94	1,86
	0,01	7,68	5,49	4,60	4,11	3,78	3,56	3,39	3,26	3,15	3,06	2,78	2,63	2,54	2,47	2,38	2,29	2,22	2,11
28	0,10	2,89	2,50	2,29	2,16	2,06	2,00	1,94	1,90	1,87	1,84	1,74	1,69	1,65	1,63	1,59	1,56	1,53	1,48
	0,05	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,73	1,66
	0,025	5,61	4,22	3,63	3,29	3,06	2,90	2,78	2,69	2,61	2,55	2,34	2,23	2,16	2,11	2,05	1,98	1,92	1,84
	0,01	7,64	5,45	4,57	4,07	3,75	3,53	3,36	3,23	3,12	3,03	2,75	2,60	2,51	2,44	2,35	2,26	2,19	2,08
29	0,10	2,89	2,50	2,28	2,15	2,06	1,99	1,93	1,89	1,86	1,83	1,73	1,68	1,64	1,62	1,58	1,55	1,52	1,47
	0,05	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,03	1,94	1,89	1,85	1,81	1,75	1,71	1,65
	0,025	5,59	4,20	3,61	3,27	3,04	2,88	2,76	2,67	2,59	2,53	2,32	2,21	2,14	2,09	2,03	1,96	1,90	1,82
	0,01	7,60	5,42	4,54	4,04	3,73	3,50	3,33	3,20	3,09	3,00	2,73	2,57	2,48	2,41	2,33	2,23	2,16	2,05
30	0,10	2,88	2,49	2,28	2,14	2,05	1,98	1,93	1,88	1,85	1,82	1,72	1,67	1,63	1,61	1,57	1,54	1,51	1,46
	0,05	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,01	1,93	1,88	1,84	1,79	1,74	1,70	1,63
	0,025	5,57	4,18	3,59	3,25	3,03	2,87	2,75	2,65	2,57	2,51	2,31	2,20	2,12	2,07	2,01	1,94	1,88	1,80
	0,01	7,56	5,39	4,51	4,02	3,70	3,47	3,30	3,17	3,07	2,98	2,70	2,55	2,45	2,39	2,30	2,21	2,13	2,02
40	0,10	2,84	2,44	2,23	2,09	2,00	1,93	1,87	1,83	1,79	1,76	1,66	1,61	1,57	1,54	1,51	1,47	1,43	1,38
	0,05	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	1,92	1,84	1,78	1,74	1,69	1,64	1,59	1,52
	0,025	5,42	4,05	3,46	3,13	2,90	2,74	2,62	2,53	2,45	2,39	2,18	2,07	1,99	1,94	1,88	1,80	1,74	1,65
	0,01	7,31	5,18	4,31	3,83	3,51	3,29	3,12	2,99	2,89	2,80	2,52	2,37	2,27	2,20	2,11	2,02	1,94	1,82
60	0,10	2,79	2,39	2,18	2,04	1,95	1,87	1,82	1,77	1,74	1,71	1,60	1,54	1,50	1,48	1,44	1,40	1,36	1,30
	0,05	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,84	1,75	1,69	1,65	1,59	1,53	1,48	1,40
	0,025	5,29	3,93	3,34	3,01	2,79	2,63	2,51	2,41	2,33	2,27	2,06	1,94	1,87	1,82	1,74	1,67	1,60	1,49
	0,01	7,08	4,98	4,13	3,65	3,34	3,12	2,95	2,82	2,72	2,63	2,35	2,20	2,10	2,03	1,94	1,84	1,75	1,62
100	0,10	2,76	2,36	2,14	2,00	1,91	1,83	1,78	1,73	1,69	1,66	1,56	1,49	1,45	1,42	1,38	1,34	1,29	1,22
	0,05	3,94	3,09	2,70	2,46	2,31	2,19	2,10	2,03	1,97	1,93	1,77	1,68	1,62	1,57	1,52	1,45	1,39	1,30
	0,025	5,18	3,83	3,25	2,92	2,70	2,54	2,42	2,32	2,24	2,18	1,97	1,85	1,77	1,71	1,64	1,56	1,48	1,36
	0,01	6,90	4,82	3,98	3,51	3,21	2,99	2,82	2,69	2,59	2,50	2,22	2,07	1,97	1,89	1,80	1,69	1,60	1,45
1.000	0,10	2,71	2,31	2,09	1,95	1,85	1,78	1,72	1,68	1,64	1,61	1,49	1,43	1,38	1,35	1,30	1,25	1,20	1,08
	0,05	3,85	3,00	2,61	2,38	2,22	2,11	2,02	1,95	1,89	1,84	1,68	1,58	1,52	1,47	1,41	1,33	1,26	1,11
	0,025	5,04	3,70	3,13	2,80	2,58	2,42	2,30	2,20	2,13	2,06	1,85	1,72	1,64	1,58	1,50	1,41	1,32	1,13
	0,01	6,66	4,63	3,80	3,34	3,04	2,82	2,66	2,53	2,43	2,34	2,06	1,90	1,79	1,72	1,61	1,50	1,38	1,16

FiguraA.1 (d): Valores da Distribuição F para $\alpha = 0,05$ (ANDERSON et al., 2011).