

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA  
FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

CLAUDEMIR TREVISAN

COMPARAÇÃO DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DE ARESTA DE  
CORTE POR EDM E ESCOVAMENTO NO TORNEAMENTO DE AÇO

SANTA BÁRBARA D'OESTE – SP  
2018

CLAUDEMIR TREVISAN

COMPARAÇÃO DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DE ARESTA DE  
CORTE POR EDM E ESCOVAMENTO NO TORNEAMENTO DE AÇO

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Klaus Schützer  
Co-orientador: Prof. Dr. Eng. Fred Amorim

SANTA BÁRBARA D'OESTE – SP  
2018

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIMEP  
Bibliotecária: Marjory Harumi Barbosa Hito - CRB-8/9128.

T814c	Trevisan, Claudemir Comparação do processo de preparação de aresta de corte por EDM e escovamento no torneamento de aço / Claudemir Trevisan. – 2018. 166 f. : il. ; 30 cm  Orientador: Prof. Dr.-Ing. Klaus Schützer. Coorientador: Prof. Dr. Fred Amorim. Tese (Doutorado) – Universidade Metodista de Piracicaba, Engenharia de Produção, Santa Bárbara d'Oeste, 2018.  1. Eletroerosão. 2. Corte. I. Schützer, Klaus. II. Amorim, Fred. III. Título.
	CDU – 658.5

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus pela sabedoria e força para concluir este trabalho.

Ao Professor Dr -Ing Klaus Schützer pela orientação e incentivo para a conclusão deste trabalho.

Ao Professor Dr. Fred Lacerda Amorim pela ajuda incondicional durante os trabalhos na PUCPR.

Aos Professores Carlos Augusto Henning Laurindo e Paulo Soares da PUCPR, pela ajuda com as medições do MEV.

Aos Professores Renato Antunes e Erik Gustavo Del Conte da UFABC, pela ajuda com o ensaio de risco.

À empresa Sandvik do Brasil, divisão Coromant, pelas ferramentas de corte cedidas para a realização dos ensaios de usinagem.

Aos Srs. José Fiorezi, Aldeci Santos, Ricardo Cereto e Welington Renzo da empresa Sandvik, pela ajuda com o processo de aquisição e cobertura dos insertos.

Ao Núcleo de Bionanomanufatura do IPT, pela ajuda com as medições do MEV.

Aos técnicos do Laboratório de Processos de Fabricação e Metrologia desta instituição, pelo auxílio na preparação e medição dos corpos de prova.

A todos os professores, funcionários e colegas da Unimep, que colaboraram de forma direta e indireta no decorrer deste trabalho.

A todos que de uma maneira geral contribuíram para a realização deste trabalho.



a minha esposa Maria Odete  
e a minha filha Gisele

TREVISAN, Claudemir. **Comparação do processo de preparação de aresta de corte por EDM e escovamento no torneamento de aço**. 2018. 166 f. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

## Resumo

O presente trabalho compara dois métodos para preparar a microtopografia da aresta de corte do inserto e com isso, aumentar a aderência na interface substrato-cobertura e prolongar a vida das ferramentas de metal duro. Um dos processos de tratamento da aresta é o escovamento (comercial) e o outro foi preparado por eletroerosão obtido através da texturização da aresta de corte da ferramenta. Os ensaios de torneamento foram executados com o inserto DNMG 150608 PM, sem refrigeração e através do teste normal de vida da ferramenta no aço ABNT 1045. Ambos os substratos foram recobertos pelo processo CVD de tripla camada. Foram comparados os seguintes parâmetros para essa avaliação: a evolução do desgaste de flanco ( $VB_B$ ), a rugosidade da peça e as componentes da força de usinagem. Foram realizados ensaios de aderência através dos testes de indentação e ensaio de risco. Pelos resultados dos ensaios de torneamento, o inserto texturizado por EDM teve um desgaste menor de 28% para o primeiro ensaio e 36% para a réplica em relação ao inserto comercial nas médias de todas as velocidades de corte. A força para o inserto texturizado também foi menor em todos os ensaios realizados em relação ao inserto comercial e no ensaio de rugosidade obtiveram valores similares. A grande diferença foi notada no ensaio de indentação, onde o inserto texturizado mostrou-se com uma aderência maior em relação ao comercial.

Palavras-chave: eletroerosão, aresta de corte, texturização.

TREVISAN, Claudemir. **Comparação do processo de preparação de aresta de corte por EDM e escovamento no torneamento de aço**. 2018. 166 f. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

### Abstract

The present thesis compares two methods to prepare the micro topography of the substrate and with that, to increase the adhesion in the substratum-coating interface and to prolong the life of the carbide tools. Edge treatment processes is brushing (commercial) and the other was prepared by EDM obtained by texturizing the cutting edge of the tool. Turning tests were performed with the DNMG 150608 PM insert, without cooling and through the normal tool life test on ABNT 1045 steel. Both substrates were covered by the triple layer CVD process. Following parameters were compared for this evaluation: evolution of flank wear ( $VB_B$ ), roughness of the part and the components of the machining force. Adherence tests were performed through indentation tests and Scratch Test. Residual stress of the coatings was also compared by X-ray diffraction. By the results of the turning tests, EDM-textured insert had a wear less than 28% for first test and 36% for second one with respect to commercial insert in the averages of all the cutting speeds. Cutting force for the textured insert was also lower in all tests carried out in relation to commercial insert and in the roughness test similar values were obtained. Great difference was noted in the indentation test, where the textured insert showed a greater adhesiveness than the commercial one.

Keywords: EDM, cutting edges, texturing.

## Lista de Figuras

Figura 2-1 - Formas de preparação das arestas de corte (Adaptado de Rodriguez [15]).....	7
Figura 2-2 - Fatores que influenciam a seleção e o design da geometria da aresta de corte (Adaptado de Rodriguez [15]) .....	8
Figura 2-3 - Caracterização do arredondamento da aresta de corte [18].....	9
Figura 2-4 - Parâmetros para arredondamentos das arestas de corte - Sandvik .....	10
Figura 2-5 - (a) Máquina de preparação de aresta e (b) Filamentos abrasivos de nylon [21] .....	11
Figura 2-6 - Máquina de corte por jato de água (Adaptado de Silveira [27])....	13
Figura 2-7 - Demonstração da máquina no teste de usinagem [32].....	14
Figura 2-8 - Aresta da broca antes e depois da usinagem abrasiva magnética [32].....	15
Figura 2-9 - Fenômeno de eletroerosão [35].....	16
Figura 2-10 - Processos de eletroerosão analisados pelos autores [42].....	18
Figura 2-11 - Molde de injeção de plástico, em aço de elevada dureza, confeccionado por eletroerosão [46].....	19
Figura 2-12 - Eletrodo de cobre, matriz e faca de cozinha [46].....	19
Figura 2-13 - a) placa de molde para gabinete de placas eletrônicas; b) eletrodo ferramenta (Adaptado de Campos [50]).....	21
Figura 2-14 - Impacto ambiental da usinagem por descargas elétricas por penetração [55] .....	22
Figura 2-15 - Princípio de arredondamento de aresta por eletroerosão (Adaptado de YUSSEFIAN e KOSHY [17]) .....	23
Figura 2-16 - Esquema de arredondamento por eletroerosão [56] .....	23
Figura 2-17 - (a) eletroerosão no inserto CCMT, (b) arredondamento da aresta de corte e (c) aresta sem preparo por eletroerosão (Adaptado de Koshi [56]) .....	24
Figura 2-18 - Efeito do parâmetro pulso na integridade da superfície do metal duro [56].....	25
Figura 2-19 - Tempo de processamento do raio de aresta em função da espessura da folha de alumínio [56] .....	25
Figura 2-20 - Comparação entre arestas arredondadas por eletroerosão (a), escova abrasiva (b) e sem arredondamento (c) [8].....	26
Figura 2-21 - Efeito do preparo da aresta na vida da ferramenta [58].....	27
Figura 2-22 - Técnicas que envolvem adição localizada de material (Adaptado de Costa [60]) .....	29

Figura 2-23 - Técnicas que envolvem remoção localizada de material (Adaptado de Costa [60]) .....	30
Figura 2-24 - Técnicas que envolvem movimentação de material de uma região da superfície para outra (Adaptado de Costa [60]) .....	30
Figura 2-25 - Técnicas que envolvem a geração de regiões de diferentes durezas na superfície da peça, que durante a sua utilização irão se desgastar de forma diferenciada, gerando uma textura superficial (Adaptado de Costa [60]) .....	31
Figura 2-26 - Comparação de diferentes texturas: a) sulcos, b) canais perpendiculares a aresta de corte e c) canais paralelos a aresta de corte [68] .....	31
Figura 2-27 - Aderência do revestimento definida de A - F através de ensaio de indentação Rockwell C (Adaptado de VDI 3198, [77]) .....	37
Figura 2-28 - Indentação com carga de 100 Kgf na cobertura de AlCrN: (a) superfície jateada e (b) superfície texturizada a laser (Adaptado de Viana et al., [3]) .....	38
Figura 3-1 - Planejamento do trabalho .....	41
Figura 3-2 - Microscópio eletrônico de varredura da empresa Tescan .....	44
Figura 3-3 - Conjunto microscópio-computador utilizado para fazer as medições dos raios das arestas de corte .....	44
Figura 3-4 - Máquina utilizada para o ensaio de risco .....	47
Figura 3-5 - Disposição do inserto no ensaio de risco .....	48
Figura 3-6 - Corpo de prova utilizado nos ensaios .....	49
Figura 3-7 - Micrografia transversal do aço ABNT 1045 .....	49
Figura 3-8 - Medidas de dureza na seção transversal do material .....	50
Figura 3-9 - Valores da dureza em relação ao diâmetro do material .....	51
Figura 3-10 - Fixação da peça na placa de 3 castanhas .....	51
Figura 3-11 - Suporte para inserto DNMG .....	52
Figura 3-12 - Esquema do sistema de aquisição de dados de força .....	53
Figura 3-13 - Rugosímetro utilizado para as medições da rugosidade das peças usinadas .....	54
Figura 4-1 - Texturização da aresta de corte na folha de alumínio .....	57
Figura 4-2 - EDS da superfície do inserto DNMG 150608 após a texturização .....	58
Figura 4-3 - Análise química no ponto 1 do inserto DNMG 150608 .....	58
Figura 4-4 - Análise química no ponto 2 do inserto DNMG 150608 .....	59
Figura 4-5 - Arredondamento da aresta de corte: médias W e H .....	60
Figura 4-6 - Comparação da relação W/H das arestas de corte medidas .....	60

Figura 4-7 - Medição das vinte e quatro arestas de corte feita pela Sandvik...	61
Figura 4-8 - Arredondamento da aresta de corte: médias W e H do inserto texturizado .....	62
Figura 4-9 - Comparação da relação W/H das arestas de corte do inserto texturizado .....	63
Figura 4-10 - Comparação dos processos de arredondamentos das arestas de corte .....	63
Figura 4-11 - Medição do raio de aresta da ferramenta DNMG 150608 PM comercial e sem cobertura.....	64
Figura 4-12 - Imagem 3D do inserto DNMG 150608 somente com o escovamento da aresta de corte.....	65
Figura 4-13 - Medição do raio de aresta da ferramenta DNMG 150608 PM comercial e com cobertura.....	65
Figura 4-14 - Imagem 3D do inserto DNMG 150608 comercial .....	66
Figura 4-15 - Medição do raio de aresta da ferramenta DNMG 150608 PM com texturização e sem cobertura.....	66
Figura 4-16 - Imagem 3D do inserto DNMG 150608 somente com a texturização da aresta de corte .....	67
Figura 4-17 - Medição do raio de aresta da ferramenta DNMG 150608 PM com texturização e com cobertura.....	67
Figura 4-18 - Imagem 3D do inserto DNMG 150608 com a texturização da aresta de corte e a camada de cobertura .....	68
Figura 4-19 - Comparação entre a medição dos raios de arestas dos insertos que foram utilizados nos ensaios.....	68
Figura 4-20 - Desgaste do inserto com $VB_B$ de 0,3 mm.....	70
Figura 4-21 - Medição da cobertura do inserto Comercial (a) e Texturizado (b) .....	73
Figura 4-22 - Mapa de composição química do inserto DNMG 150608 comercial .....	73
Figura 4-23 - Mapa de composição química do inserto DNMG 150608 texturizado .....	74
Figura 4-24 - Corte da ponta do inserto DNMG 150608 .....	74
Figura 4-25 - Pontas dos inserto embutidas (texturizada e comercial) .....	75
Figura 5-1 - Força de usinagem para $v_c$ de 280 m/min .....	77
Figura 5-2 - Comparação entre os dois ensaios realizados para $v_c$ de 280 m/min .....	78
Figura 5-3 - Comparação entre os dois ensaios realizados para $v_c$ de 280 m/min .....	78
Figura 5-4 - Força de usinagem para $v_c$ de 315 m/min .....	79

Figura 5-5 - Comparação entre os dois ensaios realizados para $v_c$ de 315 m/min .....	80
Figura 5-6 - Comparação entre os dois ensaios realizados para $v_c$ de 315 m/min .....	81
Figura 5-7 - Força de usinagem para $v_c$ de 350 m/min .....	82
Figura 5-8 - Comparação entre os dois ensaios realizados para $v_c$ de 350 m/min .....	82
Figura 5-9 - Comparação entre os dois ensaios realizados para $v_c$ de 350 m/min .....	83
Figura 5-10 - Força de usinagem para $v_c$ de 390 m/min .....	84
Figura 5-11 - Comparação entre os dois ensaios realizados para $v_c$ de 390 m/min .....	85
Figura 5-12 - Comparação entre os dois ensaios realizados para $v_c$ de 390 m/min .....	85
Figura 5-13 - Desgaste $VB_B$ por comprimento usinado para o 1º ensaio.....	87
Figura 5-14 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 1º ensaio .....	87
Figura 5-15 - Desgaste $VB_B$ por comprimento usinado para o 2º ensaio.....	88
Figura 5-16 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 2º ensaio .....	88
Figura 5-17 - Erro padrão para todos os ensaios com $v_c$ de 280 m/min .....	89
Figura 5-18 - Desgaste $VB_B$ por comprimento usinado para o 1º ensaio.....	90
Figura 5-19 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 1º ensaio .....	90
Figura 5-20 - Desgaste $VB_B$ por comprimento usinado para o 2º ensaio.....	91
Figura 5-21 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 2º ensaio .....	92
Figura 5-22 - Erro padrão para todos os ensaios com $v_c$ de 315 m/min .....	93
Figura 5-23 - Desgaste $VB_B$ por comprimento usinado para o 1º ensaio.....	93
Figura 5-24 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 1º ensaio .....	94
Figura 5-25 - Desgaste $VB_B$ por comprimento usinado para o 2º ensaio.....	94
Figura 5-26 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 2º ensaio .....	95
Figura 5-27 - Erro padrão para todos os ensaios com $v_c$ de 350 m/min .....	96
Figura 5-28 - Desgaste $VB_B$ por comprimento usinado para o 1º ensaio.....	96
Figura 5-29 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 1º ensaio .....	97

Figura 5-30 - Desgaste VB <sub>B</sub> por comprimento usinado para o 2º ensaio.....	97
Figura 5-31 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 2º ensaio .....	98
Figura 5-32 - Erro padrão para todos os ensaios com v <sub>c</sub> de 390 m/min .....	99
Figura 5-33 - Valores da diferença de desgaste em função da velocidade de corte .....	100
Figura 5-34 - Ensaio de indentação para o inserto comercial (1º ensaio).....	101
Figura 5-35 - Detalhe das áreas analisadas pelo EDS .....	101
Figura 5-36 - Mapa dos componentes químicos no spectrum 6 da amostra..	102
Figura 5-37 - Mapa dos componentes químicos no spectrum 7 da amostra..	103
Figura 5-38 - Mapa dos componentes químicos no spectrum 8 da amostra..	103
Figura 5-39 - Ensaio de indentação para o inserto texturizado (1º ensaio)....	104
Figura 5-40 - Detalhe das áreas analisadas pelo EDS .....	105
Figura 5-41 - Mapa dos componentes químicos no spectrum 3 da amostra..	105
Figura 5-42 - Mapa dos componentes químicos no spectrum 4 da amostra..	106
Figura 5-43 - Mapa dos componentes químicos no spectrum 5 da amostra..	107
Figura 5-44 - Ensaio de indentação para o inserto comercial (2º ensaio).....	108
Figura 5-45 - Ensaio de indentação para o inserto texturizado (2º ensaio)....	108
Figura 5-46 - Comparação das delaminações entre o inserto comercial (a) e o inserto texturizado (b) para o 1º ensaio; inserto comercial (c) e o inserto texturizado (b) para o 2º ensaio .....	109
Figura 5-47 - Concavidades feitas pela eletroerosão na aresta de corte .....	110
Figura 5-48 - Ensaio de risco no inserto DNMG 150608.....	111
Figura 5-49 - Trilha do risco no ensaio do inserto DNMG 150608 comercial.	112
Figura 5-50 - Trilha do risco no ensaio do inserto DNMG 150608 texturizado	112
Figura 5-51 - (a)Trilha do risco no ensaio do inserto DNMG 150608 texturizado e (b) ampliação do risco.....	113
Figura 5-52 - (a)Trilha do risco no ensaio do inserto DNMG 150608 comercial e (b) ampliação da delaminação .....	114
Figura 5-53 - Ensaio de risco (Força de atrito) para o inserto DNMG 150608 comercial e texturizado .....	115
Figura 5-54 - Ensaio de risco (COF) para o inserto DNMG 150608 comercial e texturizado .....	116
Figura 5-55 - Rugosidade média com v <sub>c</sub> de 280 m/min .....	117
Figura 5-56 - Rugosidade média com v <sub>c</sub> de 315 m/min .....	117
Figura 5-57 - Rugosidade média com v <sub>c</sub> de 350 m/min .....	118



Figura 5-58 - Rugosidade média com  $v_c$  de 390 m/min ..... 118

## Lista de Tabelas

Tabela 3-1 - Planejamento dos ensaios para insertos comerciais e texturizados .....	46
Tabela 3-2 - Composição química do aço ABNT 1045 (Fonte: Acelor Mittal) ..	48
Tabela 3-3 - Valor de dureza do aço ABNT 1045 ao longo da seção da barra	50
Tabela 4-1 - Condição final dos parâmetros para texturização das ferramentas nos testes para escolha da melhor texturização .....	55
Tabela 4-2 - Comparação entre os ensaios de EDM validados .....	56
Tabela 4-3 - Valores recomendados pela Norma ISO 3685 para ensaios de usinagem (Adaptado da ISO 3685, [88]).....	69
Tabela 4-4 - Limites de condições de corte recomendados pela Norma ISO 3685 para ensaios de usinagem (Adaptado da ISO 3685, [88]) .....	69
Tabela 4-5 - Intervalo de passadas em milímetros para torneamento do corpo de prova .....	71
Tabela 5-1 - Valores do p-valor para velocidade de corte de 280 m/min .....	77
Tabela 5-2 - Valores do p-valor para velocidade de corte de 315 m/min .....	79
Tabela 5-3 - Valores do p-valor para velocidade de corte de 350 m/min .....	81
Tabela 5-4 - Valores do p-valor para velocidade de corte de 390 m/min .....	83
Tabela 5-5 - Tabela de erro padrão para a média dos dois ensaios .....	89
Tabela 5-6 - Tabela de erro padrão para a média dos dois ensaios .....	92
Tabela 5-7 - Tabela de erro padrão para a média dos dois ensaios .....	95
Tabela 5-8 - Tabela de erro padrão para a média dos dois ensaios .....	98

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – Instituto Americano do Aço e Ferro (*American Iron and Steel Institute*)

$a_p$  – Profundidade de corte

APC – Aresta postiça de corte

ASTM – Sociedade Americana para Testes e Materiais (*American Society for Testing and Materials*)

BSE – Retroespalhamento de elétrons (Backscattering)

C1 – Inseto comercial no primeiro ensaio

CNC – Comando Numérico Computadorizado

COF – Coeficiente de atrito

CVD – Deposição química de vapor (Chemical Vapor Deposition)

EDM – Eletroerosão por penetração (Electrical Discharge Machining)

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva (Energy Dispersive Spectroscopy)

ER – Arredondamento da aresta (Edge Roundness)

$f$  – avanço (mm/rev)

$F_x$  – força no eixo x [N]

$F_y$  – força no eixo y [N]

$F_z$  – força no eixo z [N]

HRC – Dureza Rockwell C

HSS – Aço super-rápido (High Speed Steel)

HV – Dureza Vickers

Hz – Hertz

ISO – Organização Internacional para Padronização (International Organization for Standardization)

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

PVD – Deposição física de vapor (Physical Vapor Deposition)

Ra – Rugosidade média aritmética [ $\mu\text{m}$ ]

Rq – Rugosidade média quadrática ou desvio médio quadrático [ $\mu\text{m}$ ]

Rt – Rugosidade total [ $\mu\text{m}$ ]

SAE – Associação dos Engenheiros Automotivos (*Society of Automotive Engineers* - EUA)

S $\gamma$  – Segmento do raio da face

S $\alpha$  – Segmento do raio do flanco

T1 – Inseto texturizado no primeiro ensaio

T2 – Inseto texturizado no segundo ensaio

Ti – Titânio

TiCN – Carbonitreto de titânio

TiN – Nitreto de titânio

TiAlN – Nitreto de titânio e alumínio

VB<sub>B</sub> – Desgaste de flanco médio

v<sub>c</sub> – Velocidade de corte (m/min)

VDI – Associação dos Engenheiros Alemães (*Verein Deutscher Ingenieure*)

## Sumário

Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas.....	xiv
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	xv
Sumário.....	xvii
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Estrutura do trabalho.....	3
2 Revisão da Literatura.....	5
2.1 Arredondamento da aresta de corte da ferramenta.....	5
2.1.1 Importância da preparação da aresta de corte.....	5
2.1.2 Processos Convencionais de arredondamento de aresta.....	11
2.1.3 Outros processos de arredondamento.....	12
2.1.3.1 Usinagem por jato de água abrasivo.....	12
2.1.3.2 Usinagem abrasiva magnética.....	14
2.1.4 Processo de eletroerosão.....	15
2.1.4.1 Eletrodo.....	20
2.1.4.2 Fluido Dielétrico.....	21
2.1.4.3 Limitações do Processo EDM.....	22
2.1.5 Arredondamento de aresta de corte por eletroerosão.....	22
2.2 Texturização de superfície.....	28
2.3 Aderência dos revestimentos.....	33
2.3.1 Medição da aderência.....	35
2.3.1.1 Ensaio de indentação mecânica.....	36
2.3.1.2 Ensaio de risco ( <i>Scratch Test</i> ).....	38
3 Materiais e Métodos.....	41
3.1 Método de pesquisa.....	41
3.2 Preparação dos insertos.....	42
3.2.1 Texturização por EDM.....	43
3.2.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	43
3.2.3 Microscópio laser.....	44

3.2.4	Outros equipamentos utilizados.....	45
3.3	Ensaios.....	45
3.3.1	Testes de usinagem.....	45
3.3.2	Ensaios de caracterização dos revestimentos.....	46
3.3.2.1	Ensaio de indentação Rockwell.....	46
3.3.2.2	Ensaio de risco com carga progressiva.....	47
3.4	Corpos de Prova.....	48
3.5	Suporte para os insertos.....	51
3.6	Torno CNC.....	52
3.7	Medição das forças de usinagem.....	52
3.8	Rugosidade da peça.....	53
3.9	Microscópio estereoscópico.....	54
4	Desenvolvimento do Trabalho.....	55
4.1	Escolha da texturização.....	55
4.1.1	Análise por microscopia eletrônica de varredura – MEV.....	55
4.1.2	Modificação superficial e deposição dos revestimentos nas ferramentas.....	57
4.1.3	Análise por espectroscopia de energia dispersiva – EDS.....	57
4.1.4	Medição dos raios de aresta da ferramenta de corte.....	59
4.1.4.1	Medição dos raios das arestas dos insertos recobertos DNMG 150608.....	61
4.1.4.2	Medição dos raios das arestas de corte – Raio total.....	64
4.2	Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.....	69
4.3	Medição do desgaste de flanco VB <sub>B</sub> .....	70
4.4	Tabela de comparação múltipla (Teste de hipóteses).....	71
4.5	Medição da espessura dos revestimentos.....	72
4.6	Preparação para o ensaio de indentação.....	74
5	Resultados e Discussão.....	76
5.1	Resultados dos ensaios de usinagem da ferramenta.....	76
5.1.1	Análise da força de usinagem (Fu).....	76
5.1.1.1	Velocidade de corte de 280 m/min.....	76
5.1.1.2	Velocidade de corte de 315 m/min.....	79
5.1.1.3	Velocidade de corte de 350 m/min.....	81
5.1.1.4	Velocidade de corte de 390 m/min.....	83

5.1.2	Análise do desgaste de flanco $VB_B$ .....	86
5.1.2.1	Velocidade de corte de 280 m/min.....	86
5.1.2.2	Velocidade de corte de 315 m/min.....	90
5.1.2.3	Velocidade de corte de 350 m/min.....	93
5.1.2.4	Velocidade de corte de 390 m/min.....	96
5.1.2.5	Análise do desgaste $VB_B$ da aresta de corte.....	99
5.1.3	Ensaio de indentação Rockwell.....	100
5.1.4	Ensaio de risco com carga progressiva.....	111
5.1.5	Análise da rugosidade.....	116
6	Conclusões.....	120
7	Referências.....	123
	Anexos.....	131

## 1 Introdução

Desde a revolução industrial no início do século XIX até hoje em dia, o desenvolvimento de ferramentas de corte de alto desempenho é um dos principais objetivos da engenharia. Além disso, o foco atual da fabricação moderna está mudando para processo de usinagem eficiente e favorável ao meio ambiente. Isso ocorre em resposta ao aumento do custo da matéria-prima e de energia, bem como das mudanças climáticas.

A aplicação de ferramentas de corte de alto desempenho com melhorias no comportamento de desgaste, maior vida útil da ferramenta e confiabilidade do processo leva a uma maior produtividade do processo, redução do tempo devido à troca de ferramentas e conseqüentemente a uma usinagem mais eficiente. Melhoras significativas de materiais de ferramentas de corte, sinterização e técnicas de revestimento podem ser claramente reconhecidas nas últimas décadas. Os fabricantes de ferramentas são hoje capazes de produzir uma ampla gama de ferramentas de corte e diferentes propriedades do revestimento [1].

Em virtude da grande aplicabilidade industrial dos revestimentos, há uma necessidade crescente em compreender as propriedades fundamentais desses filmes finos e como eles agem na proteção de uma superfície. O estudo dos revestimentos tem um aspecto multidisciplinar, pois envolve o conhecimento de suas propriedades químicas, físicas e tribológicas [2].

A diferença no desempenho de ferramentas de corte revestidas e ferramentas sem revestimentos é resultado da interação entre suas propriedades, que modificam a região de interface cavaco-ferramenta, melhorando o desempenho da ferramenta revestida. Na necessidade de entender como os revestimentos modificam o desempenho das ferramentas de corte é importante que o revestimento seja analisado tanto em ensaios de usinagem, quanto em ensaios que possam caracterizar sua morfologia, sua microestrutura e principalmente sua aderência sobre o substrato [3].

A atuação do revestimento depositado sobre a superfície da ferramenta, suportando mudanças constantes nas solicitações mecânicas e térmicas do



processo de usinagem, dependerá, sobretudo, de uma boa aderência do filme sobre o substrato. Uma aderência adequada do revestimento é muito importante, pois a ferramenta com aderência insuficiente do revestimento pode se comportar pior que aquela sem revestimento. A formação de partículas duras e abrasivas, resultantes da destruição prematura do revestimento, acelera o desgaste das superfícies que estão em contato [4].

Uma boa opção para aproximar as propriedades do substrato da ferramenta e do revestimento, sem causar prejuízo à tenacidade da ferramenta, é modificar as propriedades do substrato, somente em regiões próximas a interface com o revestimento [5].

Para Parreira [6] o tratamento de uma superfície controlando a textura somente quando e onde for necessário, criando um microrelevo uniforme com asperidades e depressões regularmente distribuídas, é conhecido como texturização superficial.

Esta técnica tem sido aplicada com grande sucesso em diversas áreas da engenharia, com o objetivo de aumentar o desempenho de componentes mecânicos em vários aspectos. Na usinagem, esta técnica é utilizada na modificação superficial de substratos de ferramentas de corte, com o intuito de melhorar a aderência dos revestimentos duros [7].

Uma maneira de modificar a textura do substrato da ferramenta e melhorar a aderência dos revestimentos é através do processo de eletroerosão.

A modificação da topografia superficial por meio de eletroerosão, gerando padrões com geometrias regulares, conhecida por texturização superficial, tem potencial de utilização em diversas outras áreas da engenharia, tais como a melhora do aspecto estético de superfícies, a melhora da aderência, etc. Em particular, a utilização de técnicas de texturização de superfícies com a finalidade de melhorar o desempenho tribológico de componentes mecânicos tem se intensificado na última década [8].

## **1.1 Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o arredondamento da aresta de corte através do processo de texturização por EDM na aderência de revestimentos depositados por processo CVD em ferramentas de metal duro utilizadas na operação de torneamento.

Os objetivos específicos deste trabalho são estudar a influência do processo de arredondamento da aresta de corte, comparando o inserto comercial, cujo processo de tratamento da aresta é o escovamento ou jateamento seco, com outro preparado por eletroerosão obtido através da texturização da aresta de ferramenta. Para esta comparação entre os processos de preparação da aresta de corte, foram analisados os seguintes parâmetros no torneamento: a evolução do desgaste de flanco ( $VB_B$ ), a rugosidade da peça e as componentes da força de usinagem. Foram realizados também ensaios de verificação de aderência através dos testes de indentação e ensaio de risco. Os ensaios de torneamento foram executados com o inserto DNMG 150608 PM, sem refrigeração e através de ensaios de vida da ferramenta.

Este assunto necessita ainda de muitas investigações visto que são poucos os trabalhos publicados na área. Pelo seu potencial observa-se que é uma alternativa para melhorar a aderência de revestimentos em ferramentas de corte. Assim, a principal justificativa para realização deste trabalho é contribuir com novas investigações e fornecer dados que darão suporte técnico na viabilização da utilização desta nova tecnologia em ferramentas de corte, e assim contribuir para a otimização das condições de usinagem.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

Depois da introdução, no segundo capítulo é apresentada uma síntese da literatura relevante, cobrindo os seguintes temas: processos de arredondamento de arestas de corte, processo de eletroerosão, texturização de superfície e aderência dos revestimentos.

No terceiro capítulo, se apresentam os métodos experimentais e os materiais utilizados: preparação dos insertos, ensaios e corpos de prova.

No quarto capítulo é apresentado o desenvolvimento do trabalho com os pré-testes, escolha da texturização e medição dos raios das arestas de corte.

No quinto capítulo se apresentam os resultados dos ensaios com os insertos de metal duro, considerando: desgaste de flanco  $VB_B$ , análise da força de usinagem, ensaio de indentação Rockwell e ensaio de risco com carga progressiva.

No encerramento do trabalho, no capítulo 6, além da apresentação das conclusões, são elencadas sugestões para trabalhos futuros.

## **2 Revisão da Literatura**

Os tópicos a seguir abordam sobre texturização de superfície, aderência dos revestimentos, processo de eletroerosão e arredondamento da aresta de corte da ferramenta, mediante análise de livros textos e artigos publicados em periódicos de suma importância.

### **2.1 Arredondamento da aresta de corte da ferramenta**

Os processos de usinagem com ferramentas de geometrias definidas necessitam de uma confiabilidade elevada para a produção industrial. Deste modo, a microgeometria da aresta de corte é um dos fatores que influenciam o desgaste da ferramenta e, por conseguinte, a vida da ferramenta, a confiabilidade do processo e a qualidade da peça. Por consequência, muitas atividades de pesquisa analisam o processo de preparação e a caracterização da aresta de corte, bem como o desempenho resultante de ferramentas preparadas em diferentes aplicações de usinagem [9].

#### **2.1.1 Importância da preparação da aresta de corte**

A preparação da aresta de corte é uma necessidade para todo trabalho feito com ferramentas de metal duro [10]. Dependendo da aplicação da ferramenta de corte, as preparações das arestas são aplicadas numa variedade de tamanhos e formas [11]. A preparação adequada é importante para o desempenho da ferramenta, uma vez que fortalece a aresta e ajuda a reduzir a quebra. Além disso, elimina imperfeições da ponta e prepara a aresta para o revestimento.

Durante o processo de corte, o impacto de elevadas cargas térmicas e mecânicas sobre a aresta de corte resulta no desgaste [12]. Além disso, a qualidade da superfície usinada é afetada pela forma da aresta de corte. As exigências da produção moderna são de alta produtividade e alta confiabilidade do processo e para atender a esta demanda, a preparação da aresta de corte é fundamental para o processo [13].

Para Yussefian [8], a microgeometria da aresta de corte afeta muitos aspectos de uma operação de usinagem, como força, qualidade da superfície, a

tensão superficial e a distribuição da temperatura na ferramenta, o desgaste e a vida útil da ferramenta.

Um estudo foi conduzido por Varela *et al.* [14] em um aço 300M para compreender o papel de geometria da ferramenta de corte e condições de integridade na superfície usinada. As geometrias das ferramentas de corte utilizadas ao longo da aresta foram: chanfro, arredondada e chanfro-arredondada. Utilizou-se um inserto CNGA com uma  $v_c$  de 150 m/min,  $a_p$  de 0,2 e 0,4 mm e avanço (f) de 0,1 e 0,2 mm/rev. A ferramenta com aresta chanfrada e a arredondada geraram uma superfície com rugosidade maior em relação a chanfro-arredondada.

A aplicação de novas estratégias de corte para melhorar a produtividade no processo de usinagem e a qualidade de peças requer o desenvolvimento de modernas ferramentas de corte. Para um desenvolvimento integral e sistêmico de uma ferramenta de corte são considerados quatro aspectos [15]:

- Material da ferramenta de corte - economicamente viável e atender aos requisitos de uma aplicação específica.
- A tecnologia de revestimento - economicamente viável na melhoria das propriedades do substrato.
- Macrogeometria - tecnologicamente adequada para o transporte e quebra do cavaco.
- Preparação da aresta de corte - precisa, reproduzível, controlável e compatível com uma aplicação específica.

Com o objetivo de encontrar uma geometria de aresta adequada, o trabalho de Ventura *et al.* [16] investiga a influência das geometrias de arestas preparadas para avaliar o desgaste de ferramentas de CBN. Os ensaios foram realizados com uma  $v_c$  de 200 m/min em um aço 16MnCrS5 com dureza de 60 HRC. Em relação ao desgaste de flanco da ferramenta, os resultados mostraram que uma única ponta chanfrada é o mais adequado, uma vez que reforça a ponta sem aumentar excessivamente cargas mecânicas e térmicas. O principal

mecanismo de desgaste observado para todas as microgeometrias foi o desgaste por abrasão.

Para especificar a forma da aresta de corte, os designers e fabricantes de ferramentas oferecem várias possibilidades de geometrias de ferramenta, que são comumente referidas como preparação da aresta. A Figura 2-1 mostra os principais tipos de desenho de preparação da aresta de corte, que são usados na maioria das ferramentas de corte comerciais. Em geral, existem três tipos: aresta viva, aresta arredondada e aresta chanfrada, além de combinações entre chanfrada e arestas arredondadas [15].

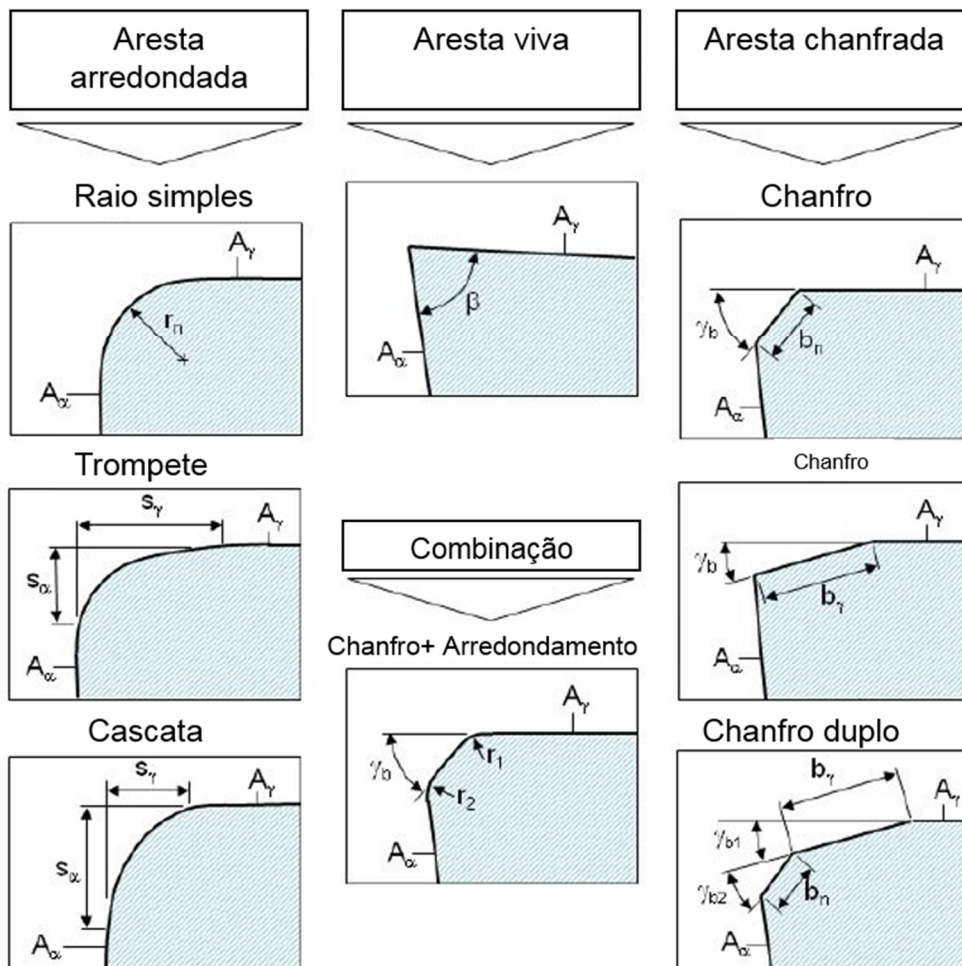


Figura 2-1 - Formas de preparação das arestas de corte (Adaptado de Rodriguez [15])

A fim de definir a geometria e preparação de aresta de corte adequada para uma aplicação específica, é necessário considerar os seguintes aspectos: condição inicial da aresta de corte, tipo de operação de usinagem, os parâmetros

do processo, micro aspectos de usinagem, material da peça, material da ferramenta (substrato), macro geometria da ferramenta e necessidade do revestimento [13]. A Figura 2-2 mostra uma gama de fatores que influenciam na geometria da aresta de corte da ferramenta.

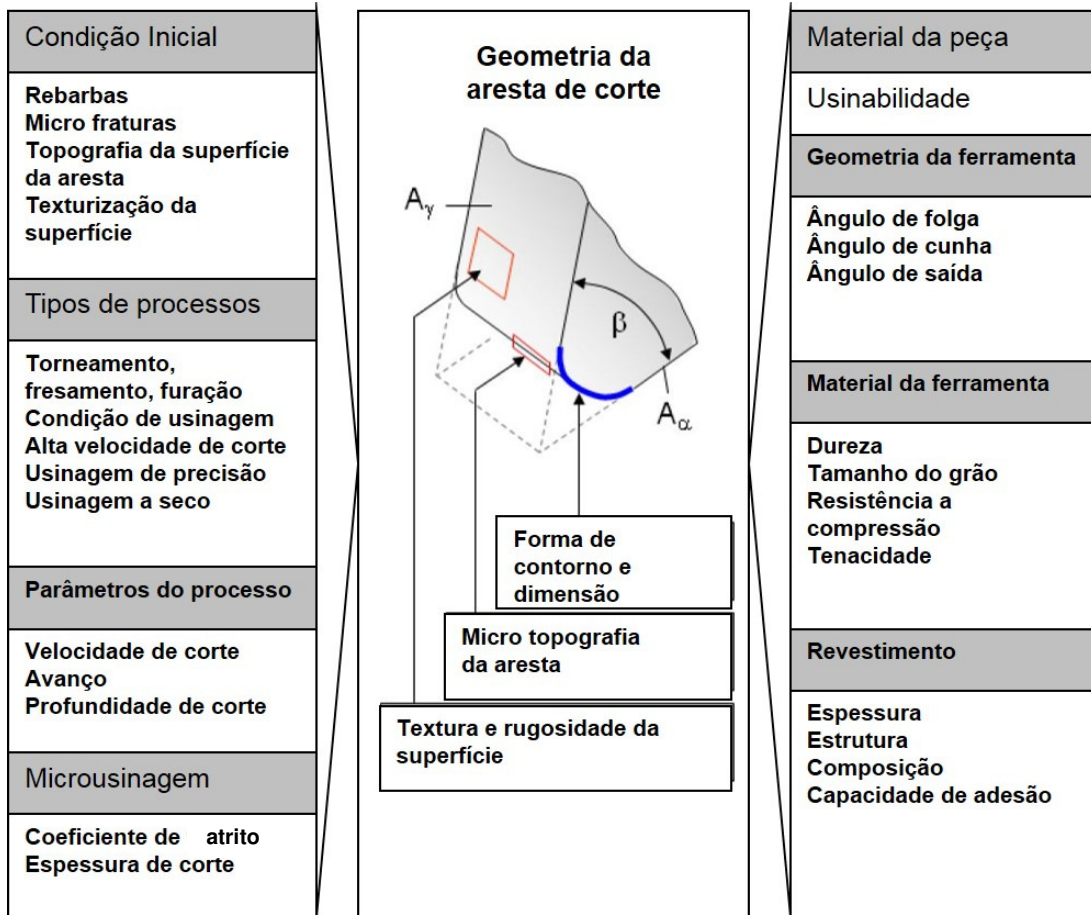


Figura 2-2 - Fatores que influenciam a seleção e o design da geometria da aresta de corte (Adaptado de Rodriguez [15])

O processo de preparação da aresta gera o contorno da aresta de corte, muda a microtopografia e também modifica a microestrutura das superfícies na vizinhança da aresta [17]. Estes aspectos da preparação da aresta influenciam o processo de corte. A preparação da geometria da aresta de corte influencia os aspectos termomecânicos do processo de corte:

- Distribuição da temperatura no corte
- Força de usinagem
- Distribuição de tensões no corte

Esses efeitos por sua vez afetam:

- Formação e escoamento dos cavacos
- Integridade da superfície da peça
- Resistência do desgaste da ferramenta

Diferentes tamanhos e formas de microgeometrias da aresta de corte podem ser produzidas por meio de retificação, escovação, técnicas de ablação a laser, jateamento, usinagem abrasiva magnética, etc. A caracterização da microgeometria da ferramenta de corte é uma exigência fundamental, a fim de investigar sua influência específica nos processos de usinagem [18].

Apenas o arredondamento da aresta (ER) não é suficiente para caracterizar as diferentes microgeometrias da aresta de corte precisamente. Isto pode ser conseguido pela definição de quatro parâmetros fundamentais ( $S_r$ ,  $S_\alpha$ ,  $K$ ,  $\Delta r$ ) mostrados na Figura 2-3. Aplicando esta caracterização na aresta de corte é possível distinguir três casos. A microgeometria da aresta de corte simétrica é definida por um fator de forma  $K = 1$ , enquanto o  $K > 1$  indica uma inclinação para a face e  $K < 1$  descreve uma inclinação na direção do flanco. O tamanho do arredondamento das arestas de corte assimétrica é descrito pelos parâmetros  $S_r$ ,  $S_\alpha$ , e  $K$  [18].

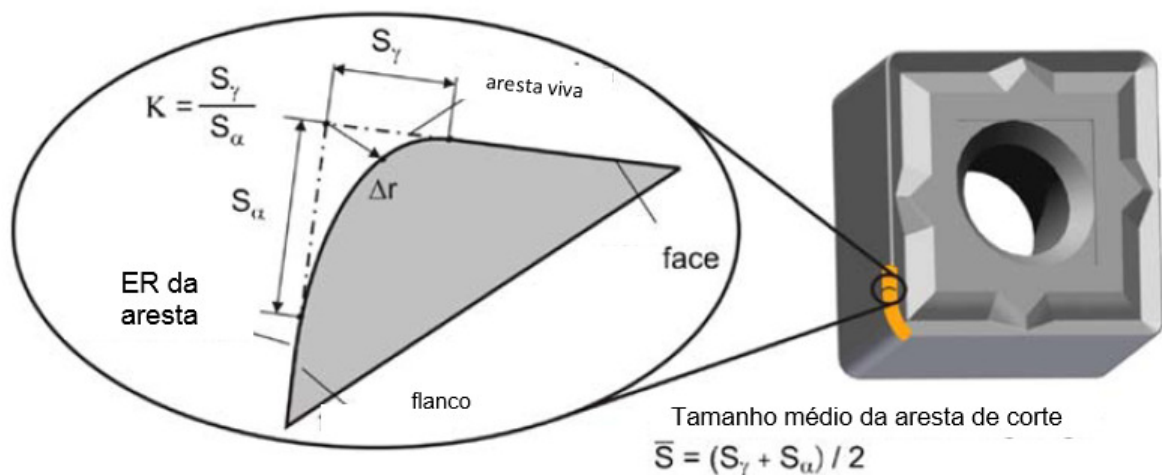


Figura 2-3 - Caracterização do arredondamento da aresta de corte [18]



Para Basset [1], o desenho da microgeometria da ferramenta de corte influencia o perfil de carga termomecânica sobre a aresta de corte. Com o arredondamento adequado na aresta de corte, há uma melhora do comportamento do desgaste e aumento da vida útil da ferramenta. Para o autor, as elevadas forças de corte na usinagem e temperatura, podem ser descritos como um efeito colateral da preparação da aresta de corte.

Devido à sua baixa resistência a carga, as arestas de corte sem arredondamento são geralmente consideradas desvantajosas para processos de corte de alto desempenho. Conseqüentemente, a preparação da aresta de corte a fim de melhorar a vida da ferramenta e desempenho tornou-se cada vez mais importante [19].

A similaridade de parâmetros pode ser observada em relação a nomenclatura usada pela empresa Sandvik, empresa parceira neste trabalho, onde os parâmetros tratados recebem a seguinte nomenclatura:

- W = Width (Valor do ER medido na face de corte do inserto), equivalente ao termo  $S_r$ .
- H = High (Valor do ER medido na lateral do inserto), equivalente ao termo  $S_a$ .

A Figura 2-4 mostra a relação entre W e H utilizada para a fabricação dos insertos.

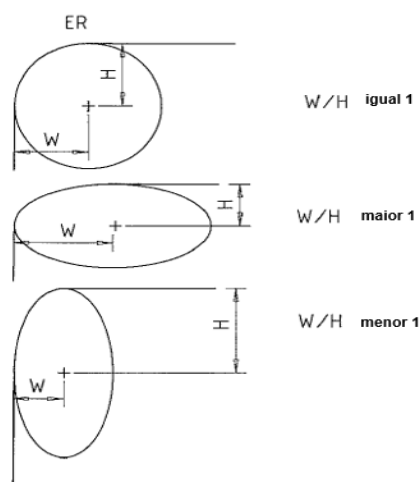


Figura 2-4 - Parâmetros para arredondamentos das arestas de corte - Sandvik

Fazendo uma comparação da relação  $S\gamma/S\alpha$  igual ao fator de forma K [18] com a relação W/H, deve ser sempre maior que 1. Isto se deve ao fato de que um  $W/H > 1$  faz com que o fluxo de cavaco seja direcionado a fluir sobre a superfície de saída e se for  $< 1$  faz com que o cavaco seja direcionado no flanco do inserto provocando ou acelerando o desgaste frontal do inserto com a criação de aresta postiça.

### 2.1.2 Processos Convencionais de arredondamento de aresta

Um método usado para arredondar as arestas de corte emprega escova com filamentos de nylon abrasivo. Neste método, os insertos afiados entram em contato com escovas de nylon impregnadas com grãos abrasivos (carbeto de boro). Em alguns casos, os insertos são colocados em uma mesa rotativa, onde passam por debaixo da escova abrasiva. Ao variar o tempo, velocidade, profundidade de contato entre a ferramenta e a escova, pode-se gerar diferentes raios na geometria da aresta de corte [20]. A Figura 2-5 mostra uma máquina para arredondamento de aresta e o rolo abrasivo.

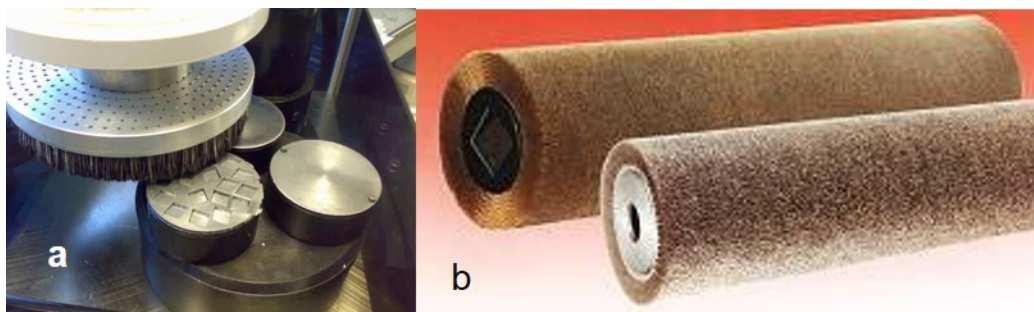


Figura 2-5 - (a) Máquina de preparação de aresta e (b) Filamentos abrasivos de nylon [21]

Usinagem abrasiva, também chamada de jateamento, é um processo que utiliza uma corrente de ar de alta pressão para propulsionar pequenas partículas abrasivas para colidir com a superfície da peça para remoção do material e geração de forma. A remoção ocorre devido à ação erosiva de partículas lançadas à superfície da peça. O jateamento tem a capacidade limitada de remoção de material e é normalmente usado como um processo de acabamento [22].

Para Klocke *et al.* [23], o jateamento pode melhorar o desempenho das ferramentas de corte revestidas, pois reduz ou remove os defeitos de manufatura ao longo das arestas de corte da ferramenta; altera a microgeometria da ferramenta; a erosão da superfície do substrato promove um efeito fundamental no ancoramento do revestimento depositado; formação de um revestimento com uma microestrutura de grãos colunares densamente compactada; induz tensões compressivas no substrato; altera a microdureza do substrato e reduz a delaminação entre o revestimento e a superfície do substrato.

O grande problema com estas técnicas é a variabilidade significativa na geometria da aresta gerada [24], a qual é evidente não apenas entre os insertos, mas também ao longo das arestas da mesma pastilha. A variação do raio da aresta pode ficar em até 40% ao longo da mesma aresta [25]. Para Bassett *et al.* [1] que documentaram a natureza do processo para aperfeiçoar o arredondamento por escova abrasiva decorrente da condição dos filamentos na escova, no seu trabalho, após a afiação de 80 insertos, houve um desvio de 12% e apenas cerca de 75% dos insertos afiados estavam dentro dos limites especificados, o que ressaltou a necessidade de adequada adaptação e otimização do processo.

### **2.1.3 Outros processos de arredondamento**

As limitações dos métodos com escova abrasiva e jateamento como técnicas convencionais de preparação de aresta, juntamente com a crescente demanda por alto desempenho de ferramentas de corte, têm levado ao surgimento de novas técnicas para preparação de aresta nos últimos 5 anos [8].

#### **2.1.3.1 Usinagem por jato de água abrasivo**

A introdução de partículas abrasivas no processo de Usinagem por Jato de água no início dos anos 1980 originou o processo de Usinagem por Jato de Água Abrasivo (*AWJM-Abrasive Water Jet Machining*), o que abriu um novo ramo na usinagem, com o aumento da taxa de remoção de material devido à alta pressão de corte (acima de 3000 Bar) e, recentemente, a usinagem de precisão. A faixa de materiais que têm sido cortados por esse processo inclui materiais metálicos e tradicionais materiais de baixa usinabilidade, tais como: vidro,

cerâmicos e materiais compósitos. Entretanto, a adição de abrasivos no jato de água a alta pressão gerou um processo de remoção de material muito complexo. O mecanismo de remoção de material em materiais dúcteis pelo impacto das partículas abrasivas é uma compilação de micro fratura, erosão e fusão [26]. A Figura 2-6 apresenta uma foto do equipamento AWJM.



*Figura 2-6 - Máquina de corte por jato de água (Adaptado de Silveira [27])*

O processo de Usinagem por Jato de Água Abrasivo envolve a força de impacto de partículas abrasivas na remoção de material da superfície da peça [28]. Geralmente, esse processo é muito utilizado em operações de corte, limpeza de superfícies já usinadas por outros processos e trepanação de furos, mas vários trabalhos em diferentes materiais têm mostrado que também pode ser utilizado como ferramenta de corte para operações de torneamento, fresamento e furação com razoável sucesso [29]. Alguns dos parâmetros de maior influência no processo AWJM são a pressão do jato de água, a distância entre a peça e o bocal de injeção e o tipo e tamanho do abrasivo e fluxo. Essas escolhas são, entretanto, afetadas significativamente por outros fatores tais como material e geometria do bocal de jateamento.

Para Biermann e Terwey [30] que empregaram o processo de jateamento abrasivo por jato de água para preparar diversos modelos de ponta de brocas de metal duro antes de ser revestido, a água pressurizada foi misturada com o meio abrasivo em uma câmara de agitação. O impacto dos grãos na aresta de corte com alta velocidade removeu pequena quantidade de material. Variando a

velocidade do jato de alimentação, eles foram capazes de gerar um raio variável na aresta ao longo da broca helicoidal. Concluiu-se que o tamanho do arredondamento de ponta não tem uma influência acentuada no desgaste da ferramenta e na qualidade do furo, enquanto arestas com maior arredondamento exibiram maior estabilidade e diminuíram o lascamento. Melhor aderência do revestimento foi o responsável por um melhor desempenho do processo.

### 2.1.3.2 Usinagem abrasiva magnética

No método de usinagem abrasiva magnética (*MAM-Magnetic Abrasive Machining*), um campo magnético é utilizado para gerar as forças de corte e polimento para tratar a superfície de uma peça torneada [13]. O campo magnético se comporta como um laço elástico para os grãos abrasivos ferromagnéticos e permite a utilização mais eficaz das arestas de corte, além disso, proporciona condições para uma pequena força de usinagem e uma baixa temperatura de superfície para operações de acabamento [31].

Foi investigado por Karpuschewski [32] a influência da usinagem magnética abrasiva na microgeometria das arestas de corte da broca de aço rápido. A Figura 2-7 mostra o processo de arredondamento das arestas de corte da broca.

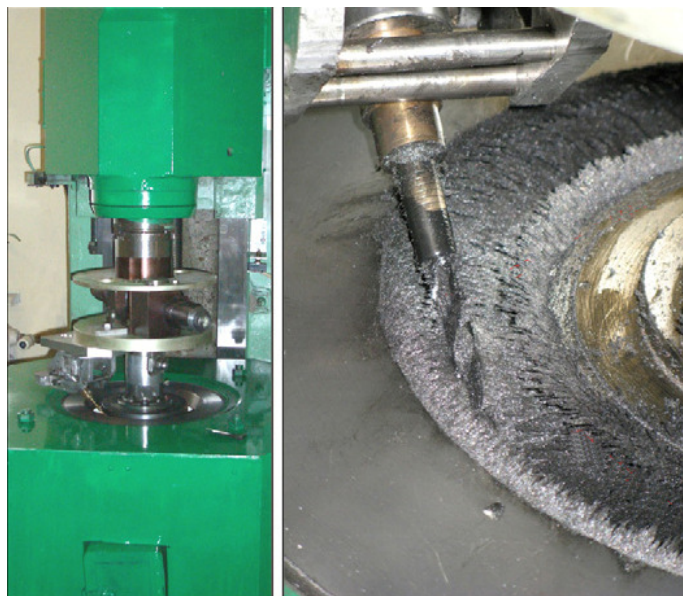


Figura 2-7 - Demonstração da máquina no teste de usinagem [32]

Os resultados dos testes mostram que, com a utilização do processo magnético, um aumento do tempo de vida útil das brocas até 87% pode ser conseguido. Isso depende de uma maior estabilidade do arredondamento das arestas de corte, bem como menor atrito entre a superfície do material da peça e a ferramenta. A Figura 2-8 mostra a diferença de acabamento entre os processos de retífica e usinagem abrasiva magnética.

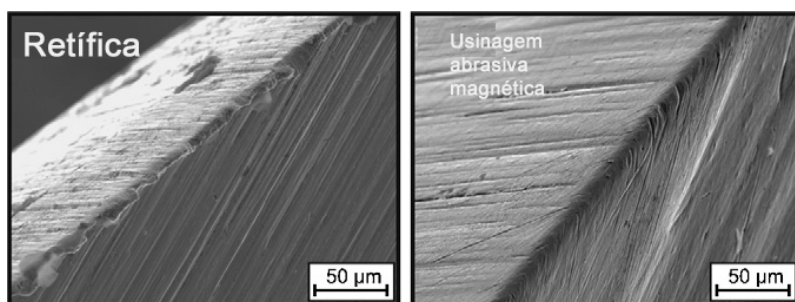


Figura 2-8 - Aresta da broca antes e depois da usinagem abrasiva magnética [32]

#### 2.1.4 Processo de eletroerosão

O processo de eletroerosão (EDM) é um dos primeiros processos de usinagem não-tradicionais, processo este, baseado em energia termelétrica entre a peça de trabalho e um eletrodo [33].

O EDM consiste na remoção de material pelo bombardeamento de elétrons ou íons contra a superfície da peça, produzindo a retirada dos resíduos por fusão e resolidificação, gerando cavidades profundas e tridimensionais [34]. Entre a peça e a ferramenta, ou eletrodo, é aplicada uma diferença de potencial elétrico que pode ser contínua, ou variável no tempo. A usinagem pode ser feita em qualquer material condutor elétrico, em operações de desbaste e de acabamento.

O processo pode atingir temperaturas entre 15.000 °C e 20.000 °C. Durante a remoção, a peça e o eletrodo são mantidos em uma distância chamada de *GAP*, permitindo um canal de plasma entre o ânodo (eletrodo) e o cátodo (peça). O material é então expelido da peça, em minúsculas partículas de metal ou cavaco, geralmente em forma de esferas [35]. A Figura 2-9 apresenta este processo.

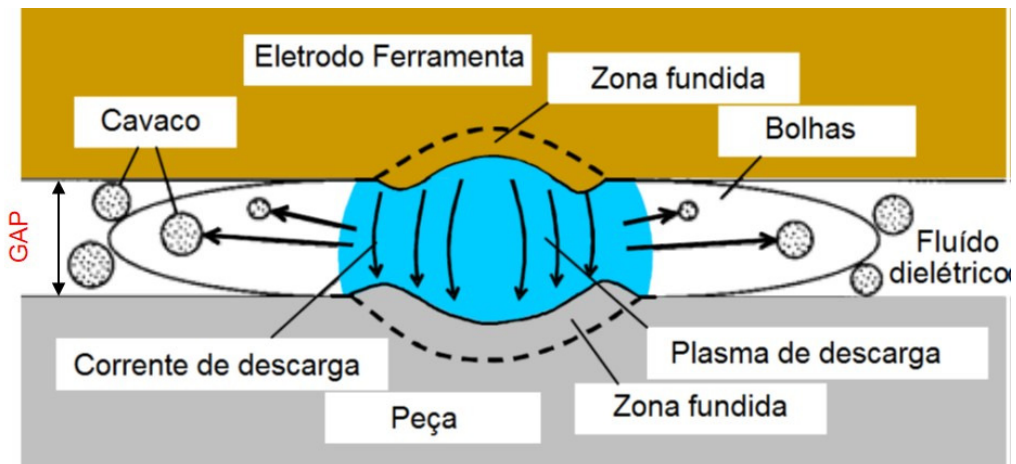


Figura 2-9 - Fenômeno de eletroerosão [35]

Sob o fenômeno da colisão dos elétrons em alta velocidade [36,37], “inicia-se a ionização por impacto, tendo na sequência a multiplicação em altíssima velocidade deste fenômeno, gerando um superaquecimento seguido de evaporação de uma pequena quantidade do dielétrico. Desta maneira é provocado, simultaneamente, um aumento da corrente elétrica e um decréscimo da resistência do dielétrico. Podem ser observadas nesse instante a formação e a intensificação de túneis transportadores de energia elétrica (*streamers*) tanto para o ânodo quanto para o cátodo, resultando na queda da tensão em aberto para a tensão de ruptura do dielétrico, havendo na sequência um grande aumento da corrente elétrica, até atingir o nível especificado pelo operador.”

A polaridade, a corrente e sua frequência são parâmetros significativos que influenciam a taxa de remoção de material e o acabamento superficial. Também em eletroerosão, ocorrem defeitos e falhas, principalmente na superfície sendo usinada, como, por exemplo, a formação da camada branca devido à resolidificação de material e à presença de zona termicamente afetada. Essa região de camada branca apresenta integridade superficial deficiente e, frequentemente, vem acompanhada de formação de microtrincas [34].

Um ponto positivo do processo de eletroerosão é o de viabilizar a usinagem de peças previamente endurecidas por tratamentos térmicos. Isso corrige os desvios de forma, ou empenamentos, que os tratamentos térmicos normalmente produzem e ainda reduz o número de operações no processo de

fabricação. Apesar do processo de remoção de material ser de natureza térmica, a eletroerosão é um processo relativamente “frio”, em escala macroscópica, pois a geração de calor fica restrita a regiões micrométricas muito localizadas. Outro benefício adicional é que, por não haver contato entre a ferramenta e a peça, não há geração de forças de corte. Este é um recurso valioso para usinagem de peças extremamente frágeis com alto risco de fratura [38].

Segundo Mahardika *et al.* [39], ao se usinar qualquer componente deve-se ter em mente que existem dois importantes aspectos que devem ser definidos e controlados. O primeiro está relacionado com as irregularidades geométricas da superfície e é denominado textura superficial, e o segundo, com as alterações metalúrgicas da superfície e camada subsuperficial, denominado integridade superficial. No processamento de alguns produtos, esses dois aspectos (textura superficial e integridade superficial) devem ser definidos, medidos e mantidos dentro dos limites especificados. Também citam que as principais causas de alterações superficiais produzidas pelo processo de usinagem por eletroerosão são: altas temperaturas geradas no processo (escala microscópica), reações químicas e excessiva corrente elétrica durante a usinagem.

De todo material fundido produzido em cada descarga, só 15%, ou menos, são retirados pelo líquido dielétrico. O restante do material fundido ressolidifica-se formando uma superfície rugosa. As características da superfície obtida, sobreposição de crateras, glóbulos de impurezas, “chaminés”, bolhas (formadas quando os gases presos são liberados pelo material ressolidificado), são reveladas pela análise por microscopia eletrônica de varredura [40].

A forma e o volume de uma cratera, gerada em uma superfície usinada por descargas elétricas, estão diretamente relacionados com a taxa de remoção de material que determinam por sua vez a rugosidade final da superfície usinada [41].

A qualidade superficial e subsuperficial de moldes fabricados em aço por meio de eletroerosão é tratada por Bleys *et al.* [42] com base em investigações experimentais nos três processos: (a) eletroerosão, (b) *WEDM wire eletro*



*discharge machining* (eletroerosão a fio) e (c) *milling EDM* (fresamento por eletroerosão), conforme Figura 2-10.

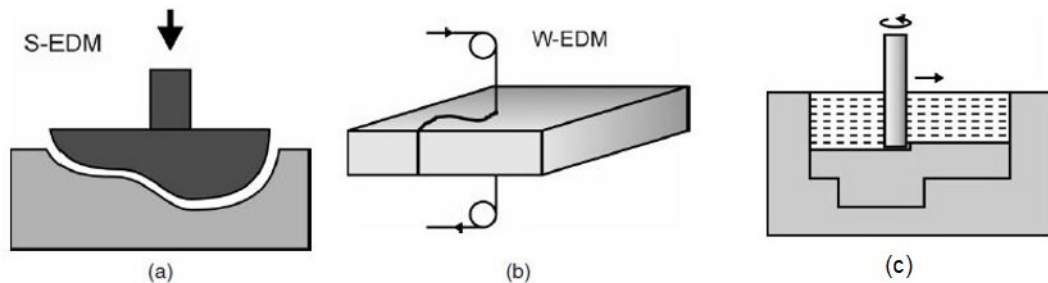


Figura 2-10 - Processos de eletroerosão analisados pelos autores [42]

Os autores discutiram a influência dos parâmetros dos processos nas propriedades superficiais e subsuperficiais que incluem rugosidade, microestrutura, microdureza, tensões residuais e composição química. Eles afirmam que não só o fluido dielétrico influencia a composição da superfície da peça, mas também há transferência do material do eletrodo pela descarga para a zona refundida ou sobre a superfície usinada. No processo WEDM, cobre, bronze, zinco e recobrimentos à base de tungstênio, de origem do fio, podem ser observados no interior ou sobre a zona refundida. Também em eletroerosão por penetração, algum material do eletrodo pode ser transferido para a peça. Com eletrodo de cobre, pequenas quantidades desse material (menos de 1%) são encontradas na zona refundida. No fresamento por eletroerosão, usando eletrodo de cobre, uma percentagem mais elevada desse material encontra-se na zona refundida, se comparado com o processo de eletroerosão por penetração, com os mesmos parâmetros

Segundo Wang *et al.* [43], a rugosidade superficial da peça usinada pelo processo de eletroerosão, tende a diminuir com o aumento da frequência e com a redução da corrente. O referido autor relata que a usinagem por descargas elétricas tende a produzir uma superfície caracterizada por ser totalmente preenchida por pequenas crateras cuja profundidade e diâmetro variam de 2 a 13  $\mu\text{m}$  e 12 a 60  $\mu\text{m}$ , respectivamente, quando se usina em regimes de baixa e alta energia.

O parâmetro rugosidade média Ra, obtido em uma superfície usinada pelo processo de eletroerosão, atinge valores na faixa de 0,2 a 12,5  $\mu\text{m}$ , tendo em vista que o tamanho da cratera varia diretamente com a energia da descarga e com regime de usinagem empregado. A formação dessas crateras também sofre influência do fluido dielétrico e do material do eletrodo empregado [44].

Para Kumar [45], a abundância de glóbulos (crateras) na superfície se deve ao fato de gotículas de material fundido, serem expelidas das mais variadas formas durante as descargas e logo após se ressolidificam na superfície da peça. Estas afetam fortemente a rugosidade superficial de peças usinadas por eletroerosão.

As Figura 2-11 e Figura 2-12 apresentam exemplos de peças usinadas por eletroerosão e suas aplicações.



*Figura 2-11 - Molde de injeção de plástico, em aço de elevada dureza, confeccionado por eletroerosão [46]*



*Figura 2-12 - Eletrodo de cobre, matriz e faca de cozinha [46]*

#### 2.1.4.1 Eletrodo

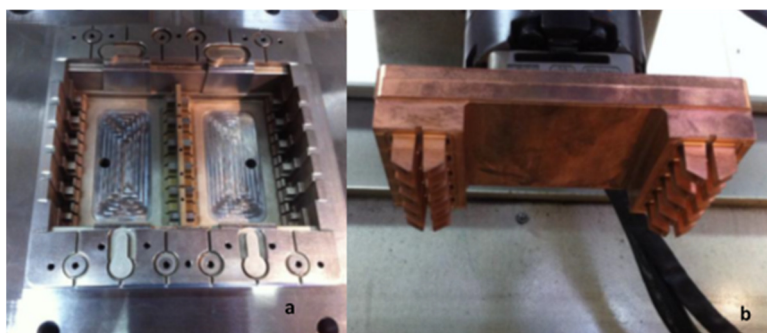
O material do eletrodo é responsável pelo transporte da corrente elétrica. Entre os materiais usados na fabricação de eletrodos ferramenta, podem-se citar: bronze, ligas de cobre-tungstênio, carbetos de tungstênio, ligas de prata-tungstênio, ligas de telúrio-cobre e ligas de cobre-grafita, mas os preferidos são o cobre eletrolítico ou puro e classes especiais de grafita [47].

O custo do eletrodo é o fator mais crítico em operações de eletroerosão. Fabricação, material, desgaste e custo de dressagem (remoção da camada carbonizada do eletrodo) devem ser cuidadosamente avaliados para determinar qual é o melhor material. O eletrodo deve ter alta condutividade elétrica, alto ponto de fusão, facilidade para ser usinado, e não apresentar deformações quando trabalhado pelos processos convencionais de usinagem [34].

Para Silva [48], o cobre funciona muito bem como material para eletrodos ferramenta, sendo amplamente utilizado quando são necessários acabamentos muito precisos na superfície da peça. Pode ser usinado por todos os métodos convencionais, como furação, torneamento, fresamento, retificação, etc. Mas a usinagem, às vezes, pode ser difícil, porque o cobre tende a aderir à ferramenta de corte e ao rebolo nas operações de retificação. Nesse caso, uma liga de 2% de telúrio-cobre apresenta melhor usinabilidade. Formas complexas podem ser obtidas por eletroerosão a fio em eletrodos de cobre. Outra vantagem do cobre é sua capacidade de ser cunhado, o que o torna um material bom para eletrodos de gravação.

Outro material bastante empregado é a grafita que pode ser encontrada em diferentes classes, com grandes dimensões dos grãos (200  $\mu\text{m}$ ), para operações de alto desbaste, a grãos muito finos (1  $\mu\text{m}$ ), para operações de acabamento. A grafita apresenta elevada taxa de remoção de material e baixo desgaste, dependendo dos parâmetros utilizados. Para fabricação de grandes eletrodos, a grafita torna-se o melhor material devido a sua baixa densidade [49].

A Figura 2-13 mostra o eletrodo de cobre eletrolítico usado na usinagem por eletroerosão.



*Figura 2-13 - a) placa de molde para gabinete de placas eletrônicas; b) eletrodo ferramenta (Adaptado de Campos [50])*

Outros materiais têm sido investigados para utilização como eletrodo na eletroerosão. Eletrodos feitos de alumínio fundido promoveram resultados semelhantes ao cobre e a grafite. Porém, eles promovem um desgaste 15% superior quando usado na usinagem grosseira de aço. O latão, embora seja um material altamente estável quando sujeito às descargas elétricas, tem um desgaste relativamente alto, restringindo sua utilização. A liga cobre e tungstênio também pode ser empregado como eletrodo. Ela produz altas taxas de remoção de material com baixo desgaste, porém, é uma liga de custo elevado e apresenta dificuldades de usinagem. O seu uso é, geralmente, limitado a usinagem que exige elevada exatidão [51].

#### **2.1.4.2 Fluido Dielétrico**

Para Santos [52], as principais funções do dielétrico são no controle da potência de abertura do arco, provocado pela descarga elétrica, remoção das partículas sublimadas da peça, refrigeração da peça e do eletrodo e proteção contra oxidação e contaminação durante e após o processo.

O arrastamento adequado é o grande responsável pela presença de uma camada refundida e muito importante para o desempenho otimizado do processo. A capacidade de arrefecimento influencia também o desempenho do processo, pois uma refrigeração adequada permite um resfriamento relativamente rápido das partículas erodidas, evitando-se assim um aumento de partículas que voltarão a se solidificar e integrar o material constitutivo da camada refundida, o que acaba por ser muito prejudicial à integridade superficial da peça [53].

### 2.1.4.3 Limitações do Processo EDM

Para Arantes [54], a eletroerosão é um processo lento, com baixas TRMs (Taxa de Remoção de Material) quando comparada com outros processos não tradicionais de usinagem, inclusive Usinagem por Jato de Água ou Usinagem por Jato Abrasivo. Esse fator torna o processo caro, devido ao excessivo número de horas para operação.

O impacto ambiental resultante do uso do processo de eletroerosão é mostrado na Figura 2-14. Durante a operação, a emissão resultante da quebra do dielétrico pode ser facilmente inalada pelo operador e pode causar efeitos adversos à saúde, especialmente quando hidrocarbonetos são utilizados [55].

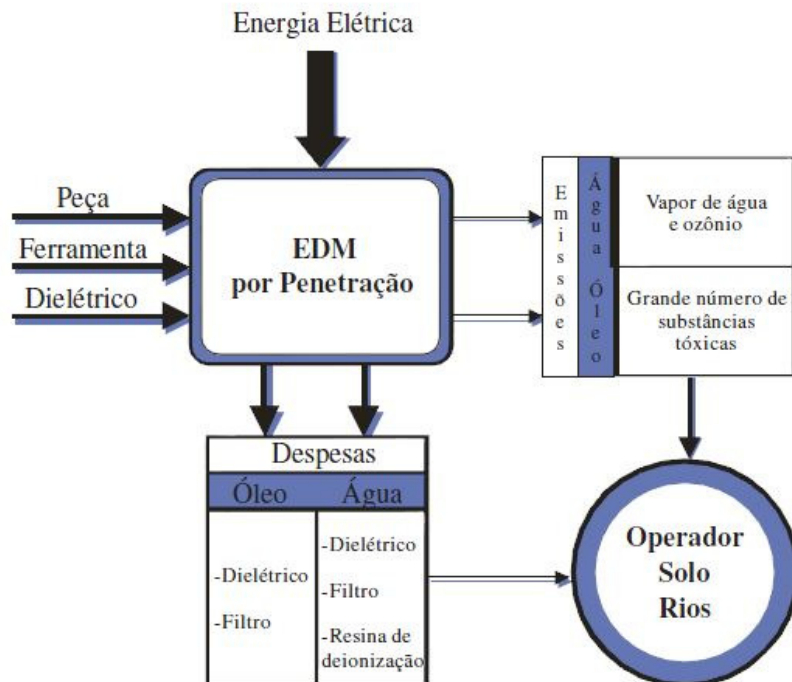


Figura 2-14 - Impacto ambiental da usinagem por descargas elétricas por penetração [55]

### 2.1.5 Arredondamento de aresta de corte por eletroerosão

O arredondamento por eletroerosão é um processo que explora o desgaste do eletrodo na usinagem por eletroerosão. O processo envolve essencialmente a penetração de uma ferramenta de corte em uma folha de um material apropriado para gerar a geometria redonda da aresta, Figura 2-15 [17].

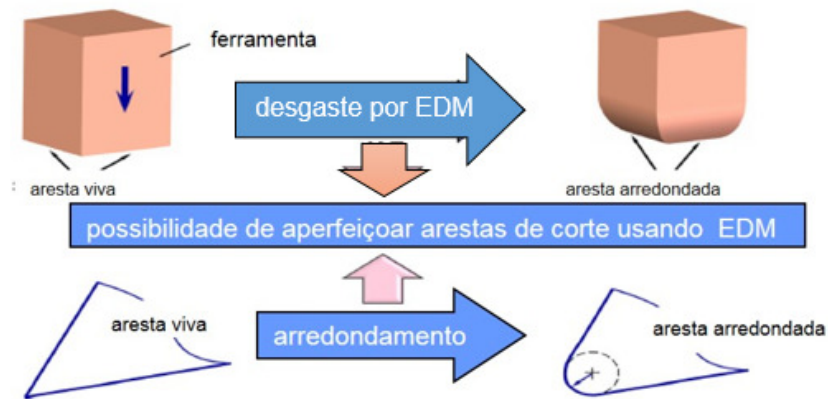


Figura 2-15 - Princípio de arredondamento de aresta por eletroerosão (Adaptado de YUSSEFIAN e KOSHY [17])

No experimento desenvolvido por Koshy [56], foi desenvolvida uma nova forma para texturizar as arestas de corte através do processo de eletroerosão, Figura 2-16. Utilizando-se de uma folha de alumínio muito fina, da ordem de 25 a 100  $\mu\text{m}$ , o inserto é forçado a transpassar a folha de alumínio consumindo-a e ao mesmo tempo formando a aresta de corte na ferramenta. A variação do raio da aresta de corte depende da espessura da folha de alumínio, mas segundo os relatos do autor, a aresta usinada por eletroerosão pode atingir valores entre 30 e 50  $\mu\text{m}$ .

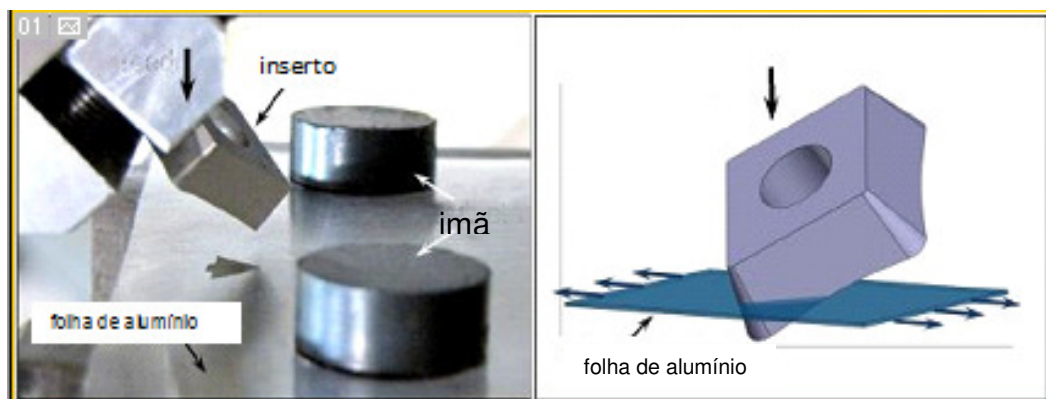


Figura 2-16 - Esquema de arredondamento por eletroerosão [56]

Em uma análise mais detalhada do inserto preparado por eletroerosão, pode-se notar a diferença de acabamento (Figura 2-17) na aresta de corte da ferramenta preparada. Nota-se que o arredondamento da aresta é uniforme em relação ao acabamento preparado por outro processo em um inserto tipo CCMT.



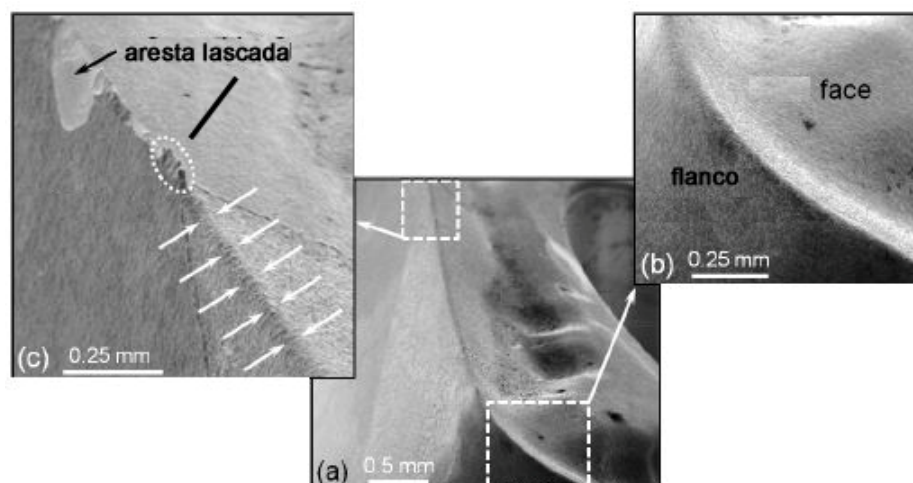


Figura 2-17 - (a) eletroerosão no inserto CCMT, (b) arredondamento da aresta de corte e (c) aresta sem preparo por eletroerosão (Adaptado de Koshi [56])

Em geral, a eletroerosão acarreta problemas nas superfícies relativos à reformulação do material, micro rachaduras e tensões residuais, como consequência do mecanismo de remoção de material sendo principalmente de natureza térmica. No metal duro, isso se traduz em uma degradação da resistência à flexão [57].

Neste mesmo trabalho, Koshy [56] optou por fazer os testes de eletroerosão com duas simulações, sendo um empregado um pulso com  $t = 0,4 \mu\text{s}$  e uma corrente de 1,2 A com uma tensão de 50 V (lado 1 da Figura 2-18) e outro com  $t=13 \mu\text{s}$  e uma tensão de 110 V (lado 2 da Figura 2-18). A rugosidade  $R_a$  da superfície obtida foi de  $0,20 \mu\text{m}$  (1) e  $0,23 \mu\text{m}$  (2) respectivamente. O lado 2 um pouco mais escuro indica a migração de carbono a partir da decomposição dos hidrocarbonetos do dielétrico durante o processo de arredondamento das arestas de corte. Na imagem (g) do lado2, indica que houve uma diminuição do cobalto comparando com a imagem (h) do lado 1.

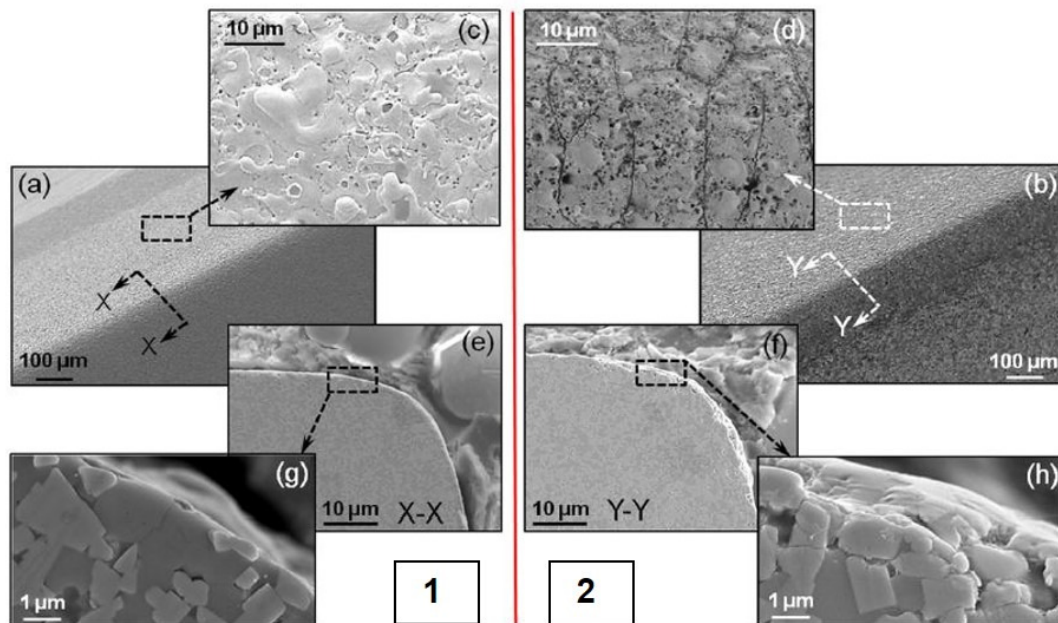


Figura 2-18 - Efeito do parâmetro pulso na integridade da superfície do metal duro [56]

Segundo Koshy [56] um fator importante para aceitação da nova tecnologia no meio industrial é o tempo de processamento da aresta de corte. Para o autor os tempos de processamento indicados na Figura 2-19, são comparáveis ao processo de escovamento (*brush honing*), que são largamente utilizados na indústria.

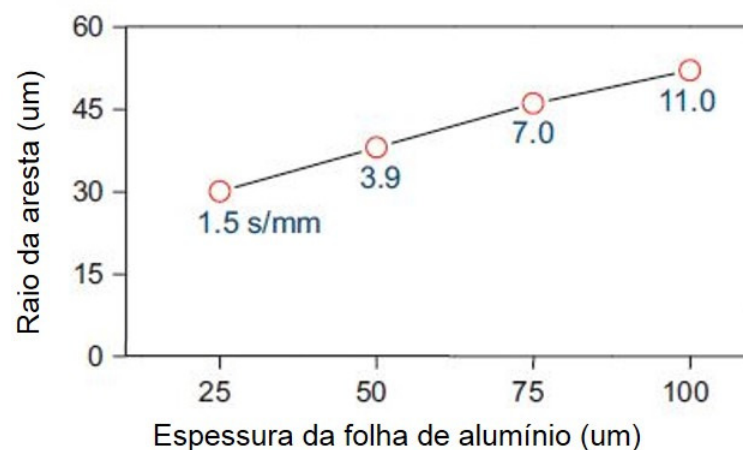
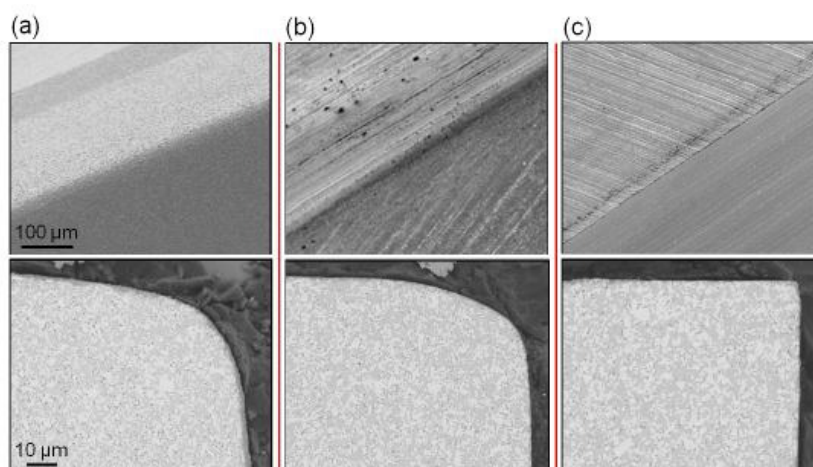


Figura 2-19 - Tempo de processamento do raio de aresta em função da espessura da folha de alumínio [56]

No artigo desenvolvido por Yussefian [58], que também trabalhou com arredondamento de aresta por eletroerosão, o processo mostrou-se capaz de



aumentar a vida da ferramenta em até quatro vezes e com uma variação da aresta menor do que 10%, comparado com processos convencionais. A Figura 2-20 mostra o trabalho desenvolvido por Yussefian [8], quando compara dois tipos de arredondamento de arestas, sendo um por eletroerosão e outro por escova abrasiva. A rugosidade da superfície da aresta arredondada por eletroerosão resultou 0,2  $\mu\text{m}$ , similar à executada por escova abrasiva que mediu 0,14  $\mu\text{m}$ .



*Figura 2-20 - Comparação entre arestas arredondadas por eletroerosão (a), escova abrasiva (b) e sem arredondamento (c) [8]*

No estado atual de desenvolvimento, texturização por eletroerosão mostrou ser comparável ao arredondamento por escova abrasiva em termos de vida da ferramenta e ao tempo de processamento. Este novo processo merece mais investigação, pois oferece grande margem para reduzir ainda mais o tempo de ciclo e também melhorar o desempenho da ferramenta. Considerando que texturização por eletroerosão é um processo térmico que não é limitado pela dureza da ferramenta, o processo oferece mais perspectivas para preparação de ferramentas de diamante policristalino, que atualmente apresentam problemas quando se utiliza os processos convencionais [56].

O tempo necessário para a preparação de uma aresta é muito pequeno, o que é comparável aos processos convencionais. O baixo volume de remoção permite ainda parâmetros conservadores em eletroerosão, o que assegura a integridade da aresta gerada que é fundamental para o seu desempenho. A

excelente repetibilidade no processo de eletroerosão é de fato uma vantagem na geração da aresta de corte que, como indicado anteriormente, é atualmente um problema com os processos convencionais de preparação da aresta [8].

Para Koshy [56], a eficiência da aresta da ferramenta na usinagem é muito importante e também considerando que todos os componentes que compõem o sistema de usinagem também o são, e, caso a ponta deixe de funcionar como pretendido, o sistema se tornaria completamente ineficaz. Para garantir o desempenho da ferramenta, as arestas de corte são geralmente preparadas para ter uma forma aproximadamente arredondada, com o raio medindo na casa dos microns. Além deste processo de reforço da resistência da aresta para impedir a quebra da ferramenta, estendendo a vida e melhorando a capacidade de segurar o revestimento, ele exerce uma influência considerável sobre a mecânica de formação de cavacos, com conseqüentes implicações na integridade da superfície gerada.

Por conseguinte, as técnicas para a caracterização, bem como a preparação da aresta de corte estão assumindo grande importância nos últimos tempos, especialmente na usinagem de componentes de alto valor [56].

Um trabalho desenvolvido por Yussefian [58] ao usinar um aço AISI 1045 com ferramenta de aço rápido e limitando o desgaste da ferramenta em 300  $\mu\text{m}$  através da curva de vida da ferramenta de Taylor, conseguiu significativas melhoras para a ferramenta com a aresta de corte arredondada em relação a aresta com canto vivo, conforme mostrado na Figura 2-21.

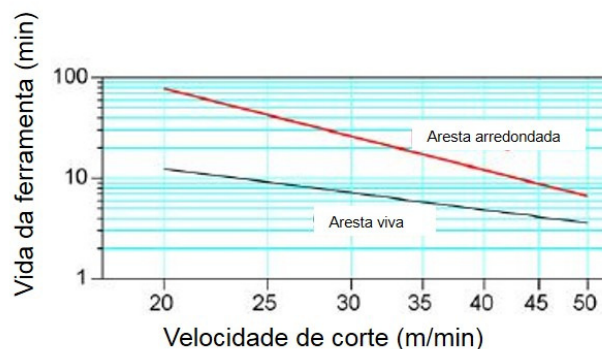


Figura 2-21 - Efeito do preparo da aresta na vida da ferramenta [58]

## 2.2 Texturização de superfície

A modificação da topografia superficial, gerando texturas com geometrias regulares, conhecida por texturização superficial, tem potencial de utilização em várias áreas da engenharia, oferecendo vantagens tais como: aplicações hidrodinâmicas [59], a melhora do aspecto estético de superfícies, a melhora da aderência entre superfícies, a geração de superfícies com grande capacidade de absorção luminosa, e uma melhor troca de calor na peça [60].

Algumas ideias em texturização de superfície foram provavelmente inspiradas pela observação das superfícies da natureza, uma vez que é muito comum encontrar superfícies texturizadas naturalmente. Isto sugere que a texturização de superfície pode ser aplicada a superfícies móveis em líquidos para reduzir as perdas por arrasto [61].

Outro motivo para o recente interesse na texturização de superfície é o grande avanço tecnológico na área de microfabricação. O desenvolvimento nesta área tem sido impulsionado principalmente pela indústria de microeletrônica. Muitas técnicas estão disponíveis no momento para criar características de superfície com tamanhos na faixa de micrômetros [62]. No entanto, muitas dessas técnicas apresentam alto tempo de processamento e custo, o que as tornam inadequadas para produzir um grande número de componentes de baixo custo. Para estas aplicações, são necessários métodos de texturização alternativos, de forma a tornar rentável a texturização de superfície.

Vários métodos de texturização foram classificados de acordo com o seu princípio [63]. Alguns destes métodos já são utilizados na indústria ou em laboratório, enquanto outros são novas técnicas. São quatro classes de métodos de texturização:

- a) técnicas que envolvem remoção localizada de material,
- b) técnicas que envolvem adição localizada de material;
- c) técnicas que envolvem movimentação de material de uma região da superfície para outra;

d) técnicas que envolvem a geração de regiões de diferentes durezas na superfície da peça, que durante a sua utilização irão se desgastar de forma diferenciada, gerando uma textura superficial.

Foram identificados 39 possíveis métodos de texturização, o que mostra o grande potencial de inovação na área. Inovação e criatividade são apontadas como fatores fundamentais para o sucesso da utilização da texturização superficial em grandes escalas industriais, já que o custo tem sido o principal fator limitante para a utilização da texturização superficial para melhorar o seu comportamento tribológico [63].

A Figura 2-22 mostra os processos de texturização através da adição de material e a Figura 2-23 mostra os processos através da remoção de material segundo Costa [60].

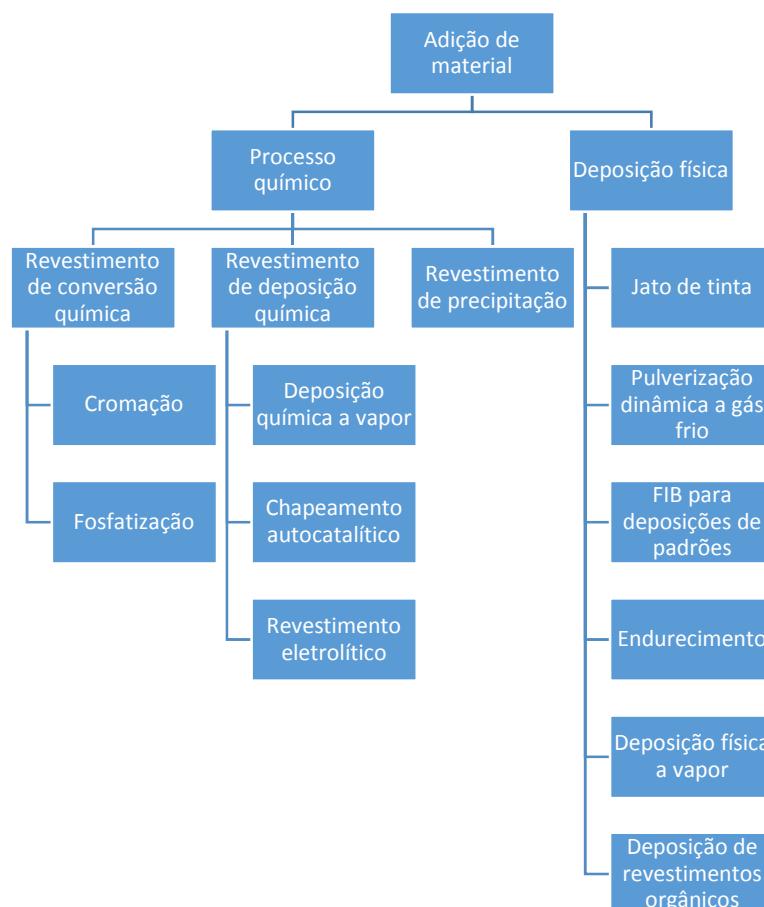


Figura 2-22 - Técnicas que envolvem adição localizada de material (Adaptado de Costa [60])

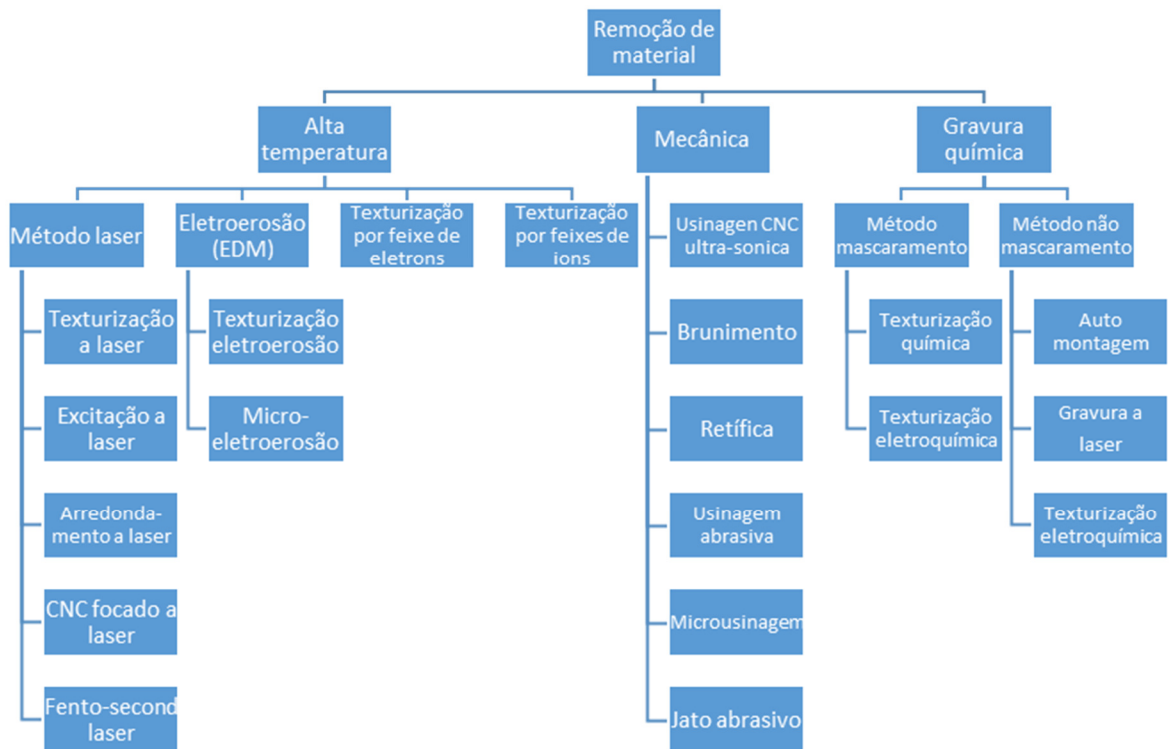


Figura 2-23 - Técnicas que envolvem remoção localizada de material (Adaptado de Costa [60])

A Figura 2-24 elenca as texturizações feitas através da movimentação do material e a Figura 2-25 são através da auto formação de desgaste segundo Costa [60].

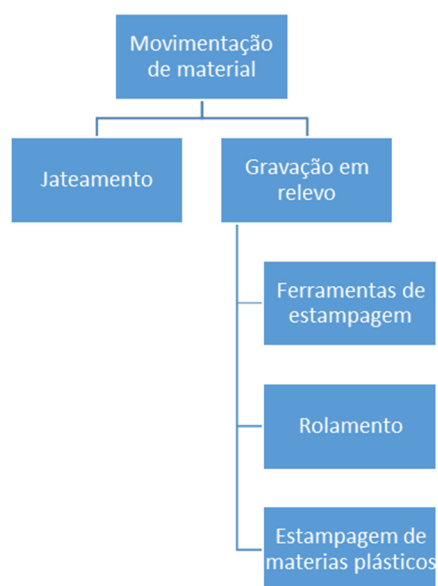
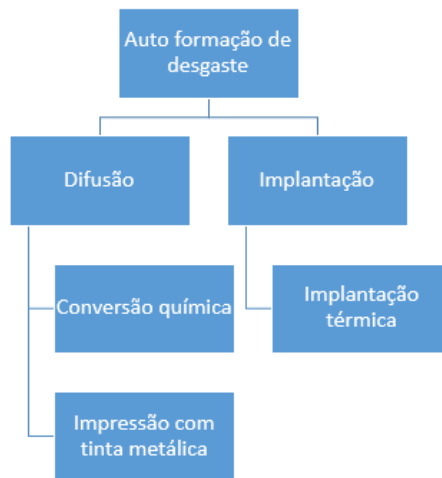


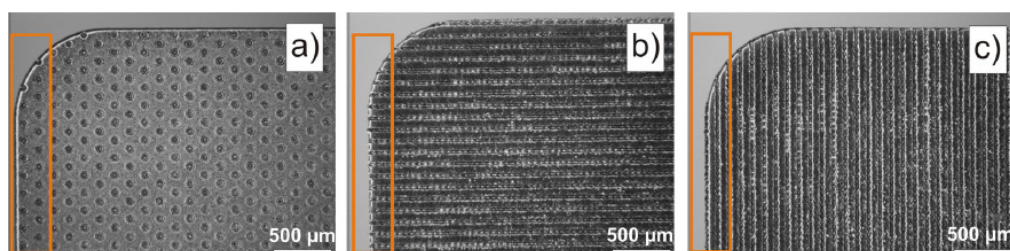
Figura 2-24 - Técnicas que envolvem movimentação de material de uma região da superfície para outra (Adaptado de Costa [60])



*Figura 2-25 - Técnicas que envolvem a geração de regiões de diferentes durezas na superfície da peça, que durante a sua utilização irão se desgastar de forma diferenciada, gerando uma textura superficial (Adaptado de Costa [60])*

O principal método utilizado hoje em superfícies de textura em aplicações de engenharia é a texturização laser [64,65,66]. Isto envolve a remoção de material localizada por meio de um feixe de laser. Diferentes técnicas são utilizadas para localizar a remoção de material, tais como interrupção de um feixe de laser através de um disco rotativo, o uso de lasers pulsados [67], acionados por uma unidade de CNC, e projeção de um feixe de laser de grande secção transversal através de uma máscara.

A face de insertos de metal duro sem cobertura, Figura 2-26, foi texturizada utilizando o processo laser e posteriormente utilizado na usinagem de aço SAE 1045 com  $v_c$  variando de 50 até 150 m/min. Os resultados demonstraram que o inserto com sulcos obteve as melhores respostas quanto a aresta postiça de corte e também ao desgaste [68].



*Figura 2-26 - Comparação de diferentes texturas: a) sulcos, b) canais perpendiculares a aresta de corte e c) canais paralelos a aresta de corte [68]*

No trabalho de Arroyo Osorio [69] foram pré-processadas as superfícies de folga e de saída de várias ferramentas cujo desempenho na usinagem em fresamento frontal foi comparado com relação a ferramentas comerciais com o tratamento de superfície por jateamento. Os ensaios de usinagem mostraram que as ferramentas com o processo de preparação da superfície através de texturização a laser tiveram um desempenho similar às aquelas pré-processadas com jateamento.

Para Viana [3], que texturizou inserto de metal duro antes de receber a cobertura de TiAlN, AlCrN e comparou com inserto texturizado por jateamento e que é vendido comercialmente, os resultados mostraram que a vida útil da ferramenta com textura feita pelo processo laser superou as ferramentas de corte comerciais sob as condições testadas. O resultado de aderência medido por ensaio Rockwell de indentação apresentou maior delaminação das ferramentas jateadas em relação as ferramentas de textura laser.

Segundo Zhang [70], a presença de sulcos criados pela técnica a laser na superfície de saída resultou em diminuição das forças de corte, coeficiente de atrito, rugosidade superficial e desgaste da ferramenta em comparação com as ferramentas sem textura. A influência benéfica das texturas foi principalmente evidente em condições de uma melhor lubrificação, enquanto as forças de corte foram reduzidas em 21,2-34,7% trabalhando com uma velocidade de corte de 200 m/min. O efeito da texturização se deu principalmente pelas ranhuras que servem de microreservatório de líquido de reposição constante.

O uso de texturização a laser apresenta várias limitações. Em primeiro lugar, o mecanismo de remoção provoca a formação de rebarbas em torno das cavidades, que se originam a partir do material fundido expelido. As bordas laterais são normalmente duras devido ao calor associado ao processo, de forma que precisam ser removidas por uma operação mecânica posterior [60].

Em segundo lugar, o processo é de baixo rendimento, uma vez que as cavidades são produzidas normalmente uma de cada vez. Muitos componentes podem ter seu desempenho aumentado com a texturização de superfície, tais como camisas de cilindro em motores de combustão interna, que normalmente

são de baixo custo. Eles exigem métodos de texturização com menor custo para fazer o aumento no desempenho tribológico alcançado com a texturização [60].

Em terceiro lugar, as geometrias padrão obtidas com texturização a laser são muito limitadas. Os padrões mais comuns obtidos por texturização a laser são arranjos regulares de cavidades circulares ou elípticas, embora a utilização de máscara de proteção permita que as formas mais complexas possam ser produzidas. Espera-se que o padrão que contém características com formas especiais, possa proporcionar um desempenho superior. Isso exigiria métodos com maior flexibilidade em termos de geometrias possíveis de serem feitas [60].

Na usinagem, a texturização superficial vem sendo aplicada principalmente para melhorar a aderência de revestimentos duros sobre ferramentas de corte. Diversos métodos podem ser utilizados para provocar a modificação na textura do substrato de uma ferramenta. Dentre eles tem-se a retificação, polimento, jateamento com partículas duras – *Microblasting*, jateamento interrompido de granalha – *Shotpeening*, jato de água interrompido com ou sem abrasivo a elevada pressão – *Water Peening*, eletroerosão, eletroquímica e laser ([71,72]).

A texturização por descarga elétrica em ferramentas de corte [73], demonstrou uma redução significativa da força de usinagem, sendo melhorada através da lubrificação da interface cavaco-ferramenta. A textura contínua com sobreposição de crateras típicos de superfícies usinadas por EDM revelou-se ser mais eficaz do que uma textura linear que compreende uma série de ranhuras. A fim de maximizar a redução da força, mostrou-se que a textura necessita estar afastada da aresta de corte, a uma distância que depende do avanço. Os testes foram executados com  $v_c$  variando de 2 m/min até 75 m/min e usinando um aço 1045.

### **2.3 Aderência dos revestimentos**

A Sociedade Americana para Testes de Materiais (ASTM D 907-70) define aderência como “o estado no qual duas superfícies estão ligadas através de forças interfaciais que podem por sua vez serem constituídas por forças de



valência ou forças interligadas ou ainda de ambas”. Estas forças de ligação podem ser do tipo Van der Waals, eletrostáticas e/ou forças de ligação química.

Uma distinção importante deve ser feita entre a anterior definição teórica de aderência (ASTM D907-70) ou “aderência básica” (AB) que é o valor atingível máximo possível, e a aderência experimental ou “aderência prática” (AP), que depende de outros fatores tais como o tipo de teste, os níveis de tensão residual no recobrimento e a distribuição interfacial das falhas. Assim,  $AB > AP$ .

Este teste de aderência é um teste qualitativo do revestimento bastante crítico, já que, caso a aderência seja fraca há que refletir sobre as condições de deposição, de modo a garantir um produto final aderente que contemple as exigências da sua futura aplicação. No entanto, estes testes pecam na quantificação da aderência, o que lhes renega para um caráter mais qualitativo do que quantitativo [74].

Informações empíricas garantem que um dos fatores que proporcionam uma boa aderência tem a ver com a qualidade do polimento prévio dos substratos antes da deposição. Deste modo é desejável manter uma rugosidade no substrato sempre inferior a  $0,3 \mu\text{m}$  [74].

Uma aderência adequada do revestimento é muito importante, pois a ferramenta com um revestimento e com uma aderência insuficiente pode se comportar pior que aquela sem revestimento. A formação de partículas duras e abrasivas, resultantes da destruição prematura do revestimento, acelera o desgaste das superfícies que estão em contato [4].

Devido à importância da questão mencionada acima, torna-se necessário ter novos processos de deposição disponíveis, um melhor controle do processo de deposição, das fontes de suprimentos dos materiais que constituem o revestimento, materiais de substrato com propriedades que ofereçam menor discrepância com as propriedades do revestimento e mesmo técnicas que possam modificar fisicamente o substrato sem alterar significativamente suas propriedades mecânicas para melhorar a aderência na interface substrato/revestimento.

O desenvolvimento de substratos de ferramentas com propriedades compatíveis com as propriedades do revestimento pode ser uma boa alternativa para melhorar a aderência do revestimento sobre o substrato. Mas deve-se atentar, por exemplo, ao fato de que um aumento de dureza do substrato para se aproximar da dureza do revestimento, obtendo-se assim menor discrepância entre essas propriedades, pode ocasionar um efeito um tanto indesejável ao substrato que é a diminuição de sua tenacidade [75]. Isso pode ser indesejável nas ferramentas de corte para usinagem, principalmente no corte intermitente onde as ferramentas sofrem constantemente com os impactos na peça e solicitações de compressão e tração ao entrarem e saírem da peça, respectivamente.

Uma boa opção para aproximar as propriedades do substrato da ferramenta e do revestimento, sem causar prejuízo à tenacidade da ferramenta, é modificar as propriedades do substrato, somente em regiões próximas à interface com o revestimento [5].

### **2.3.1 Medição da aderência**

Para Bunshah [76], os métodos utilizados para ensaios de aderência de revestimentos podem ser divididos em três métodos:

A - Métodos de Nucleação: são ensaios baseados na medida da taxa de nucleação da película e na sua densidade, no tempo de deposição dos átomos constituintes do revestimento. Os ensaios requerem detalhada investigação através de microscopia eletrônica de varredura, e podem ser difíceis para realizar ou interpretar;

B - Métodos Mecânicos: a aderência é determinada pela aplicação de uma força ao conjunto substrato/revestimento. A força pode ser normal à interface como no ensaio de tração, ou paralelo, como no ensaio de cisalhamento. As forças também podem ser introduzidas dentro do conjunto substrato/revestimento por algum outro estímulo mecânico como no ensaio de indentação ou ensaio de risco (*Scratch Test*);

C - Métodos Variados: nestes ensaios, a aderência é obtida através de ensaios indiretos como a utilização de difração de raio-X, ciclo térmico, etc.

Para este trabalho, utilizaram-se os métodos mecânicos (ensaios de indentação e risco), que são mais práticos e têm sido utilizados extensivamente para caracterizar a aderência de revestimentos finos [76].

### **2.3.1.1 Ensaio de indentação mecânica**

O teste de indentação é utilizado normalmente para revestimentos finos, o padrão de falha é utilizado para indicar o comportamento aceitável do revestimento em serviço [3].

O teste consiste em introduzir uma trinca mecanicamente estável dentro da interface substrato/revestimento utilizando-se um indentador convencional, como Vickers ou Rockwell. A resistência à propagação da trinca ao longo da interface é então utilizada como uma medida de aderência ou de resistência à fratura. Apesar do teste tentar elucidar o comportamento da interface substrato/revestimento, ele é baseado, sobretudo, numa análise superficial qualitativa da impressão deixada após a indentação, na formação de trincas ou na delaminação do revestimento ao redor da borda da impressão indentada (Bunshah, [76]).

Para Osório [69], o teste mais frequentemente utilizado é a indentação baseada no teste de dureza Rockwell (norma ASTM E18) usando o indentador de diamante com ponta esfero-cônica de 120° e 0,2 mm de raio. O procedimento consiste em forçar o indentador em direção normal à superfície sob duas forças determinadas conhecidas como pré-carga e carga de teste.

O teste de aderência por indentação baseado no método Rockwell C é de uso comum na indústria de recobrimentos. Este teste é conhecido também como método Daimler-Benz e é prescrito na norma alemã VDI 3198 (Verein Deutscher Ingenieure, VDI guidelines 3198/1991) como teste destrutivo de qualidade para componentes recobertos [77].

Neste método é utilizado um indentador cônico padrão Rockwell C, que após a aplicação de uma carga máxima de 150 kgf pode gerar microtrincas

laterais ou delaminação do revestimento no contorno da impressão deixada pela indentação. Após a indentação, a impressão é visualizada por microscopia óptica e classificada a adesão do revestimento como HF1 a HF6 (HF é abreviação alemã de resistência a adesão), de acordo com a quantidade de trincas ou delaminação no revestimento ao redor da impressão, conforme os padrões indicados na Figura 2-27. Os padrões de trincas apresentadas em HF1 a HF4 representam morfologias típicas de revestimentos com suficiente aderência, ao passo que as apresentadas em HF5 e HF6 representam uma aderência insuficiente do revestimento [77].

Para utilizar o método de indentação Rockwell C e qualificar a adesão de um revestimento, a dureza do filme deve ser maior do que 54 HRC e a espessura do filme deve ser no máximo 5  $\mu\text{m}$  [77].

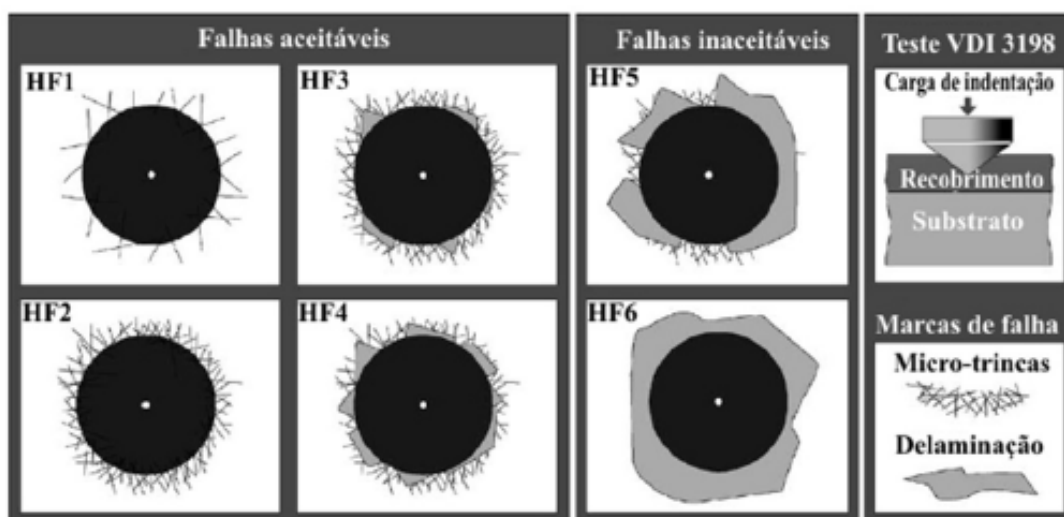


Figura 2-27 - Aderência do revestimento definida de A - F através de ensaio de indentação Rockwell C (Adaptado de VDI 3198, [77])

No trabalho desenvolvido por Viana *et al.* [3], foi comparado a texturização a laser com outro feito pelo processo de jateamento em diversos tipos de substratos. Foram realizados testes de indentação e de risco com carga progressiva. A Figura 2-28 mostra um ensaio de indentação com carga de 100 Kgf.

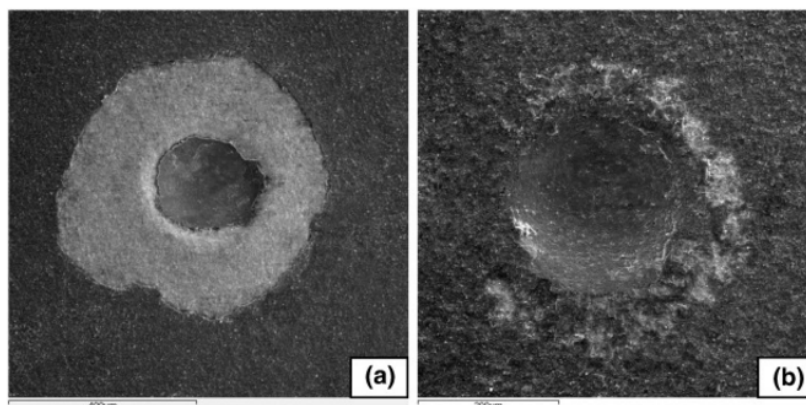


Figura 2-28 - Indentação com carga de 100 Kgf na cobertura de AlCrN: (a) superfície jateada e (b) superfície texturizada a laser (Adaptado de Viana et al., [3])

### 2.3.1.2 Ensaio de risco (*Scratch Test*)

O ensaio de risco (*scratch test*) possibilita a caracterização da aderência do revestimento ao substrato utilizado. Este teste de aderência é um teste qualitativo do revestimento bastante crítico, já que, caso a aderência seja fraca há que se refletir sobre as condições de deposição (que envolvem bastantes parâmetros) de modo a garantir um produto final aderente que contemple as exigências da sua futura aplicação [78].

O procedimento para o ensaio de risco (*scratch test*) é descrito na Norma ASTM C1624 [79]. Neste ensaio, um indentador de diamante, padrão Rockwell C, move-se transversalmente com velocidade pré-estabelecida sobre a superfície revestida com aplicação de uma força normal constante ou progressivamente crescente até a falha parcial ou completo destacamento do revestimento [76]. Após a passagem do indentador, o trilho ou canal formado na superfície é analisado, através de microscopia eletrônica de varredura para analisar o dano induzido no recobrimento, a fim de se estimar a chamada carga crítica ( $F_c$ ) na qual começa a remoção do recobrimento deixando para atrás um sulco de substrato visível.

Segundo Osório [69], o processo de riscamento pode ser acompanhado também através do registro dos sinais acústicos emitidos, que são fracos enquanto o recobrimento ainda se mantém aderido, com um incremento apreciável no instante da falha do recobrimento. A força no instante do aumento abrupto do nível de emissão acústica causado pelo cisalhamento ou pela fratura

na interface recobrimento-substrato tem sido interpretada como a carga crítica  $F_c$  de delaminação, tornando desnecessária a necessidade da examinação microscópica.

Geralmente, duas cargas críticas são utilizadas para distinguir o tipo de falha no revestimento. A primeira carga crítica,  $Lc_1$ , corresponde à falha coesiva do revestimento, isto é, são os primeiros defeitos ou falhas no interior do revestimento, normalmente com a formação de trincas. A segunda carga crítica,  $Lc_2$ , corresponde ao destacamento do revestimento do substrato, caracterizando uma falha adesiva [80].

O ensaio tem sido aceito como um meio de avaliar a força de adesão em revestimentos que possuem espessura variando de 0,1 a 20  $\mu\text{m}$  (segundo norma ISO 20502 [81]), faixa esta que abrange um grande número de aplicações em engenharia de superfície. No entanto, é necessário cuidado na realização do teste, devido à influência de parâmetros extrínsecos e intrínsecos sobre o valor da carga crítica. Enquanto os fatores intrínsecos estão relacionados com as condições do ensaio (taxa da carga, a velocidade do risco, a forma e o desgaste do indentador, fatores do equipamento), os parâmetros extrínsecos estão ligados ao sistema filme-substrato (propriedades do revestimento e substrato, coeficiente de atrito, condição da superfície e ambiente do teste) [82].

O ensaio é geralmente considerado como apenas semiquantitativo quando estes parâmetros são conhecidos. Muitos desses fatores intrínsecos são específicos do instrumento e exigem uma abordagem de calibração cuidadosa, se os resultados forem comparados entre instrumentos. Já os fatores extrínsecos, tais como a espessura do revestimento e dureza do substrato, também devem ser conhecidos para que os resultados do teste sejam validados [83].

O comportamento tribológico por riscamento linear do aço inoxidável AISI 410 nitretado por plasma com mistura gasosa de 75% $\text{N}_2$  + 25% $\text{H}_2$ , em temperatura de 400°C, por 20 horas foi estudado por Sanjuán *et al.* [84] Como resultado da nitretação, obtiveram uma camada da ordem de 20  $\mu\text{m}$  de espessura, dureza de 1470 HV0,001, contendo martensita expandida e nitretos

de ferro do tipo  $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N e  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N. O mecanismo de falha apresentado é decorrente do deslocamento do indentador que causa esforços de tração na camada. As trincas correspondem aos locais em que a tensão de ruptura da camada nitretada é superada pela tensão de tração exercida pelo indentador em movimento. Em seus estudos, os autores atribuíram a causa da diminuição dos valores de coeficiente de atrito de 0,35 (amostra não-tratada e carga de 45 N) para 0,2 (amostra nitretada por plasma e carga de 45 N), com consequente melhoria na resistência ao desgaste, à presença de martensita expandida e nitretos na superfície do aço nitretado.

Para Batista *et al.* [85], os resultados mostraram que o substrato com revestimento duplex (nitretação a plasma + TiN) apresenta valores mais elevados de Lc1 e Lc2 em relação ao substrato apenas revestido de TiN, sendo que para Lc2 o aumento foi significativo de 52,3 para 152,1 N, pois a nitretação a plasma melhora a capacidade do substrato em suportar carga e, conseqüentemente, a resistência ao risco do revestimento duplex é mais elevada.

### 3 Materiais e Métodos

Este capítulo descreve todos os equipamentos e materiais utilizados, assim como também os procedimentos e planejamento utilizados durante os experimentos.

#### 3.1 Método de pesquisa

O trabalho foi dividido em duas etapas, sendo uma de preparação dos insertos, que consistia em fazer o arredondamento da aresta de corte através da texturização pelo processo de eletroerosão, posteriormente a cobertura pelo processo de CVD dos mesmos e por fim os ensaios, conforme mostrado na Figura 3-1 .

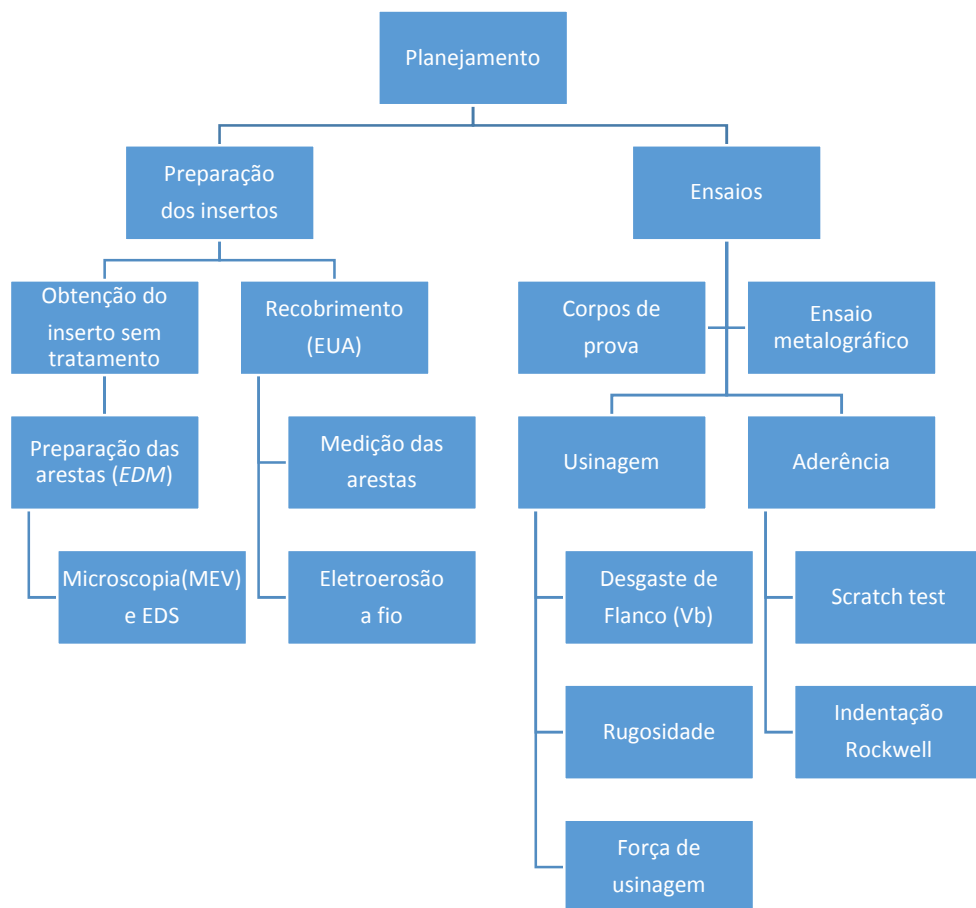


Figura 3-1 - Planejamento do trabalho

A proposta apresentada na Figura 3-1 é caracterizada pelas etapas descritas a seguir.



A preparação dos insertos consistiu na obtenção dos mesmos sem tratamento (inserto que foi retirado da linha de fabricação antes do processo de arredondamento das arestas e também da cobertura pelo processo de CVD). Preparação do arredondamento das arestas de corte através da texturização pelo processo de eletroerosão por penetração. Medição das arestas de corte por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e escolha da melhor preparação para replicação nas outras arestas de corte. Após a produção de todas as arestas de corte, os insertos retornam para a Sandvik para a cobertura dos mesmos pelo processo CVD e medição das arestas de corte em equipamentos próprios da Sandvik. Depois do retorno dos insertos que foram levados para ser colocada a cobertura pelo processo de CVD, foi retirado um inserto para ser cortado na máquina de eletroerosão a fio, em uma secção perpendicular à aresta de corte e feita a medição das camadas de carbonitreto de titânio, alumina e nitreto de titânio. A mesma operação foi feita para o inserto comercial e comparada as duas medidas, a fim de mostrar que as coberturas tiveram o mesmo tratamento e medidas próximas.

Os ensaios de usinabilidade foram baseados na vida da ferramenta, sendo utilizado o ensaio de longa duração. Para a comparação entre o inserto comercialmente vendido e o modificado através do arredondamento por texturização através do processo de eletroerosão, foram verificados a evolução do desgaste de flanco ( $VB_B$ ), a rugosidade da peça ( $R_a$ ) e as componentes da força de usinagem. Para os ensaios de aderência foram realizados o *Scratch Test* (ensaio de risco), que possibilita a caracterização da aderência do revestimento ao substrato utilizado e o teste de indentação Rockwell, que é utilizado normalmente para revestimentos finos, onde o padrão de falha é utilizado para indicar o comportamento aceitável do revestimento em serviço.

### **3.2 Preparação dos insertos**

Após contato com a Sandvik foi acertado a doação dos insertos DNMG 150608-PM para a realização dos ensaios. A empresa cedeu insertos que são vendidos comercialmente e que foram utilizados para a comparação dos ensaios de usinagem, aderência e também insertos sem o arredondamento das arestas

de corte e sem cobertura. Após o processo de arredondamento das arestas de corte pelo processo de eletroerosão, os insertos retornaram para a Sandvik para o recobrimento pelo processo CVD e posteriormente para os ensaios.

Com o intuito da medição de desgaste da ferramenta procura-se utilizar uma classe de ferramentas que alie uma maior resistência ao desgaste, além de uma boa tenacidade. Dentre as opções disponíveis optou-se por utilizar uma classe de ferramentas Sandvik, cuja classe escolhida foi a GC 4235, que é uma classe de metal duro com cobertura CVD e uma cobertura espessa resistente ao desgaste em um substrato de gradiente de uso geral que serve para acabamento até desbaste em aços e fundidos de aços [86].

### **3.2.1 Texturização por EDM**

Os ensaios de texturização da aresta de corte foram feitos pelo processo de eletroerosão por penetração, sendo realizados no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LAUS), do Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR, na máquina de eletroerosão por penetração da marca Charmilles Technologies, modelo Roboform 30 - CNC 4 eixos, com corrente de descarga máxima de 32 A, dimensão da mesa de trabalho de 500 mm x 400 mm, velocidade manual máxima de 900 mm/min e resolução de medição de 0,5  $\mu\text{m}$ .

### **3.2.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

Foi utilizada microscopia eletrônica de varredura (MEV) para observar as mudanças morfológicas e espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para verificar a composição dos substratos de metal duro. Para as análises MEV e EDS foi utilizado o microscópio marca Tescan, modelo VEGA3 LM com uma sonda de espectrometria de energia dispersiva da marca Oxford, conforme Figura 3-2, instalado no laboratório MEV do Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR. A análise EDS é do tipo qualitativo, não sendo apropriada para estabelecer as porcentagens exatas dos elementos presentes num determinado material.



*Figura 3-2 - Microscópio eletrônico de varredura da empresa Tescan*

### **3.2.3 Microscópio laser**

A medição dos raios das arestas do inserto DNMG 150608 – PM foi executada no Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS), do Departamento de Engenharia de Produção da EESC – USP. Foi utilizado um microscópio laser da marca Olympus, modelo LEXT, com capacidade de até 17.000 vezes de ampliação e resolução de 1 nm. A Figura 3-3 mostra o conjunto microscópio-computador utilizado para fazer as medições dos raios das arestas dos insertos escolhidos para execução dos testes.



*Figura 3-3 - Conjunto microscópio-computador utilizado para fazer as medições dos raios das arestas de corte*

### **3.2.4 Outros equipamentos utilizados**

Para o trabalho de embutimento do inserto cortado por eletroerosão a fio, foi utilizada uma embutidora da marca Leco, modelo PR 25.

Para o trabalho de acabamento superficial das amostras cortadas, foi utilizada uma politriz da marca Struers, modelo Labopol 21.

Os trabalhos de corte dos insertos foram feitos pelo processo de eletroerosão a fio, na máquina da marca Charmilles Technologies, modelo Robofil 290 - CNC 3 eixos.

Para a adição de micropartículas de ouro (película fina) na amostra embutida, foi utilizado um pulverizador catódico (Sputtering) da marca Quorum, modelo Q150R. Operação necessária para que o MEV consiga fazer as análises na amostra embutida, que está fixada junto com um polímero.

Para o ensaio de indentação foi utilizado um durômetro da marca Wilson, modelo série 600.

Todos equipamentos descritos acima pertencem ao Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR.

## **3.3 Ensaaios**

Os ensaios foram divididos em testes de usinagem (força e desgaste  $VB_B$ ), rugosidade e testes de aderência. Todos estes ensaios foram executados com o inserto que é vendido comercialmente e também com o inserto que teve a aresta de corte preparada por EDM.

### **3.3.1 Testes de usinagem**

Os testes foram divididos em duas etapas e para ambas foram realizadas as réplicas. A primeira foi executada com insertos comerciais em condições de corte mostrada na Tabela 3-1. A segunda etapa foi executada com insertos também fornecidos pela Sandvik, sendo que o arredondamento da aresta de corte foi feito na Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR pelo processo de eletroerosão, onde os insertos foram retirados do processo normal de fabricação sem cobertura e enviados para fazer o arredondamento da aresta

de corte por texturização através do processo de eletroerosão. Depois de terminado o processo de arredondamento, os insertos retornaram para a Sandvik para o processo final de cobertura dos mesmos. Os ensaios foram executados a seco para os insertos comerciais e com texturização (arredondamento das arestas de corte).

Tabela 3-1 - Planejamento dos ensaios para insertos comerciais e texturizados

	Ensaio	$a_p$ (mm)	$f$ (mm.rot <sup>-1</sup> )	$v_c$ (m.min <sup>-1</sup> )
DNMG	1	1,60	0,25	280
	2	1,60	0,25	315
PM	3	1,60	0,25	350
	4	1,60	0,25	390

Para os resultados de  $a_p$  e  $f$  da Tabela 3-1 foram levados em conta a Norma ISO 3685 e a maior velocidade de corte foi determinada pela potência máxima da máquina.

### 3.3.2 Ensaios de caracterização dos revestimentos

Para a caracterização dos revestimentos foram realizados ensaios de aderência. As avaliações da aderência dos revestimentos foram realizadas por dois tipos de ensaios: ensaio de indentação Rockwell e ensaio de risco com carga progressiva. A metodologia para execução destes ensaios é apresentada a seguir.

#### 3.3.2.1 Ensaio de indentação Rockwell

O objetivo deste ensaio foi avaliar qualitativamente a aderência dos revestimentos depositados sobre as ferramentas de metal duro comparando a texturização feita pelo método de escovamento com outra feita pelo processo de eletroerosão.

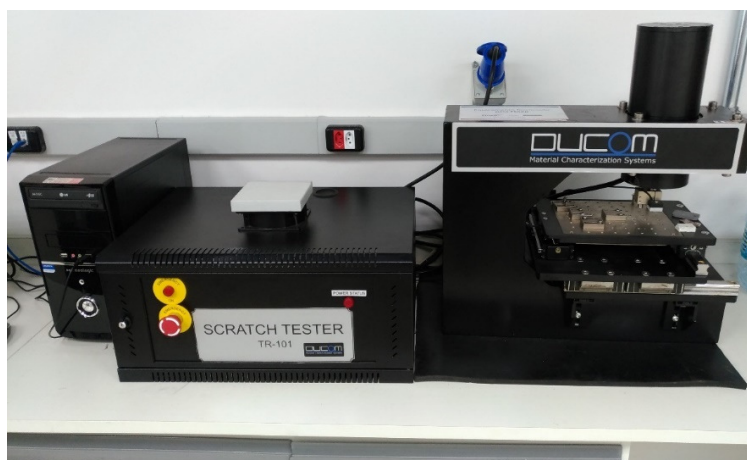
O ensaio consistiu em indentar os conjugados revestimentos/substratos por meio de um ensaio de dureza Rockwell, penetrador com cone esférico de diamante com ângulo de 120° no vértice, ponta esférica com raio de 0,2 mm e carga de indentação de 150 kgf. As indentações foram realizadas na superfície de folga das ferramentas, na parte texturizada. Após a realização das indentações, as impressões deixadas foram visualizadas por meio de

microscopia eletrônica de varredura. A visualização das indentações permitiu medir a área de delaminação e identificar as falhas dos revestimentos.

### 3.3.2.2 Ensaio de risco com carga progressiva

O objetivo deste ensaio foi avaliar qualitativamente e quantitativamente o desempenho dos conjugados revestimentos/substratos estudados, relacionando a fratura do revestimento com a carga aplicada numa dada posição. Foram realizados dois riscos para cada conjugado substrato/revestimento.

O ensaio consistiu em fazer um risco com penetrador Rockwell na superfície de folga das ferramentas com texturas escovadas e por EDM, revestidas e foi utilizado um Scratch Tester, da marca Ducom, modelo TR-101. O ensaio foi realizado no Laboratório de Nanotecnologia da Universidade Federal do ABC (UFABC). A Figura 3-4 mostra o aparelho utilizado para fazer os ensaios de risco.

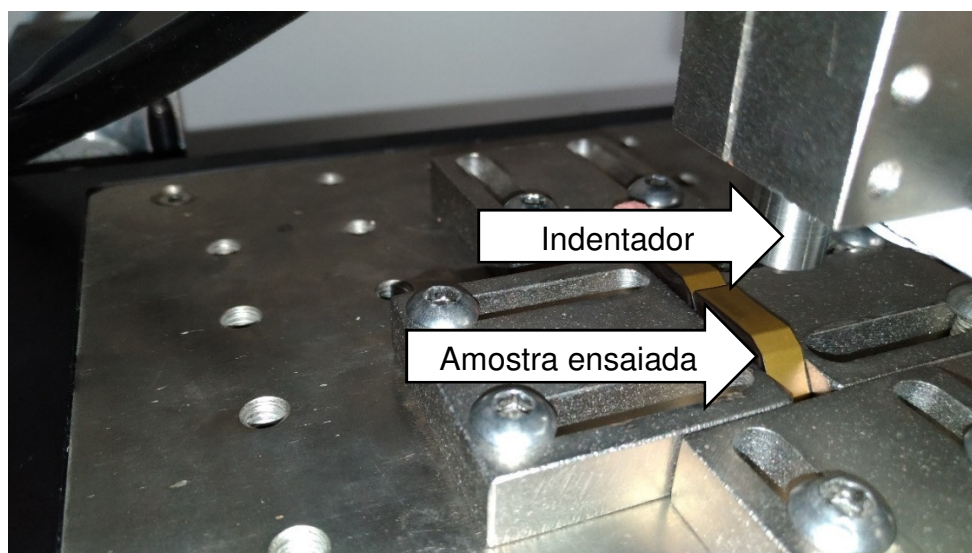


*Figura 3-4 - Máquina utilizada para o ensaio de risco*

O controle do risco foi realizado por um microcomputador utilizando o software Winducom 2008. O comprimento do risco foi de 6 mm com velocidade de riscamento de 0,5 mm/s. A carga de penetração foi aumentada progressivamente à medida que o penetrador se aprofunda no substrato da ferramenta, com carga máxima para o equipamento de 160N.

As superfícies foram submetidas à mesma variação linear crescente em módulo de carga (1 a 120N), (Figura 3-5) representado pela força normal ( $F_z$ ). A

força lateral ( $F_x$ ) está relacionada com a força de atrito e durante o trajeto do indentador ela poderá sofrer variações significativas, dependendo dos tipos de falhas experimentadas pela superfície.



*Figura 3-5 - Disposição do inserto no ensaio de risco*

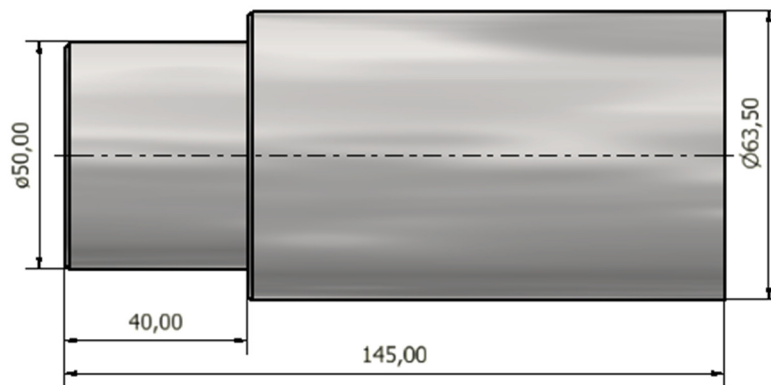
As indentações Rockwell e os riscos formados após a indentação dinâmica dos substratos também foram visualizados por meio de um microscópio eletrônico de varredura VEGA 3 da Tescan.

### **3.4 Corpos de Prova**

Para os ensaios de usinagem foram preparados 60 corpos de prova conforme desenho mostrado na Figura 3-6. O material utilizado foi o aço ABNT 1045, como recebido. A análise química do material utilizado nos ensaios está descrita na Tabela 3-2, análise esta fornecida pelo fabricante do material Arcelor Mittal, cuja descrição completa se encontra no Anexo 1.

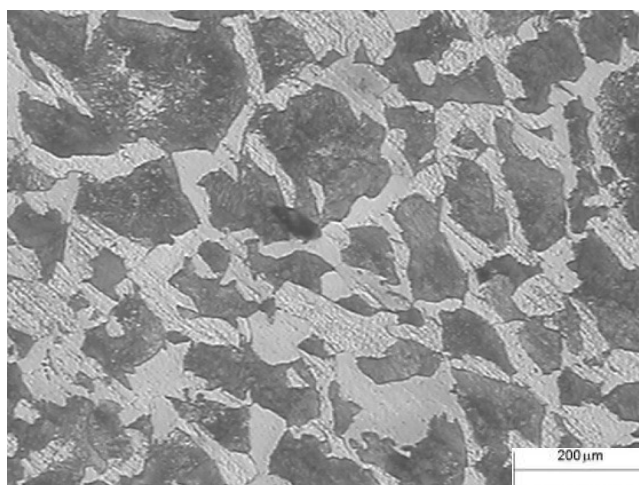
Tabela 3-2 - Composição química do aço ABNT 1045 (Fonte: Arcelor Mittal)

El. Químico	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Sn	Mo	Ni
%	0,450	0,640	0,190	0,021	0,020	0,180	0,070	0,060	0,009	0,007	0,006



*Figura 3-6 - Corpo de prova utilizado nos ensaios*

O ensaio metalográfico foi feito no Laboratório de Ensaios Metalográfico da UNIMEP, com a passagem das lixas (lixamento), polimento, seguido de ataque químico com Nital a 5% e posteriormente feito a captação da imagem em um microscópio. A micrografia é mostrada na Figura 3-7.



*Figura 3-7 - Micrografia transversal do aço ABNT 1045*

Pode-se observar a matriz ferrítica (parte clara) e os grãos de perlita, a parte escura. Essa liga é do tipo hipoeutetoide, visto que se formou com aproximadamente 0,45 % de carbono, estando à esquerda do ponto eutetoide (0,77 %C) no diagrama de fases. A perlita é constituída de lamelas de ferrita e cementita e a ferrita pro-eutetoide que nucleou nos contornos de grão.

Não foi feito tratamento térmico em nenhum dos corpos de prova usinados. Quanto à variação da dureza em relação ao diâmetro do material e em



relação ao comprimento, foi medido o perfil transversal (Figura 3-8), dos corpos de prova número 1, 21, 40 e 60 em um durômetro marca Heckert, do Laboratório de Ensaio Metalográficos da Unimep, cujos valores são mostrados na Tabela 3-3. Cada ponto no qual foi efetuada a medição, situa-se em uma distância de aproximadamente 5 mm distante da anterior e foram feitas a partir do diâmetro externo para o diâmetro interno.

Tabela 3-3 - Valor de dureza do aço ABNT 1045 ao longo da seção da barra

Aço	Dureza Vickers				
	Ponto1 ø50	Ponto2 ø40	Ponto3 ø30	Ponto4 ø20	Ponto5 ø10
ABNT 1045					
Corpo 01	240	246	234	240	228
Corpo 21	228	234	240	234	234
Corpo 40	240	240	240	240	234
Corpo 60	234	228	234	228	234
Média	236	237	237	236	233
Desv.Pad.	4,975	6,708	3,000	4,975	2,598



Figura 3-8 - Medidas de dureza na seção transversal do material

Considerando a média dos valores medidos dos pontos 1 a 5 houve uma variação de aproximadamente 3% entre a maior dureza e a menor.

A Figura 3-9 mostra o exemplo da evolução da dureza ao longo do diâmetro do material, medida esta feita pela média de 4 corpos de prova (01, 21, 40, 60).

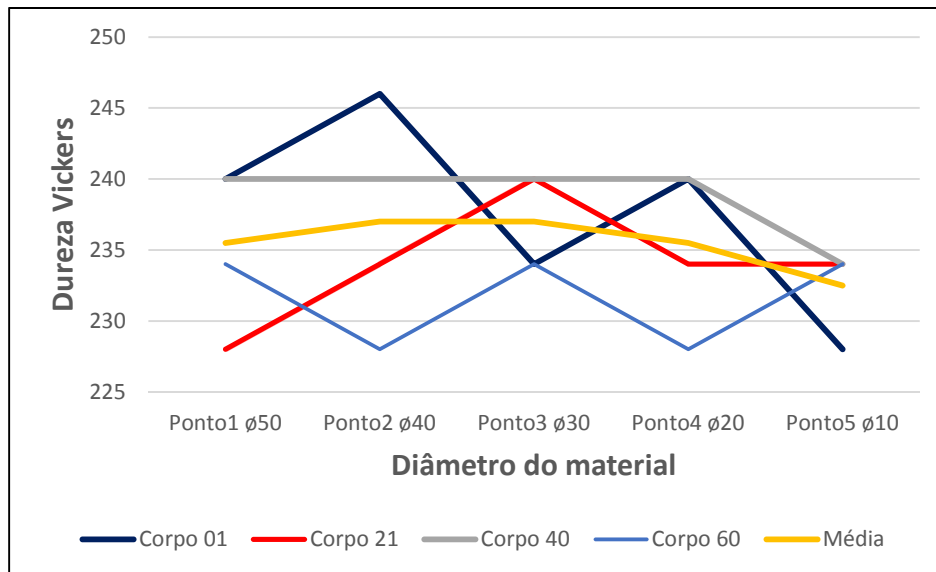


Figura 3-9 - Valores da dureza em relação ao diâmetro do material

A fixação dos corpos de prova durante os ensaios foi feita com uma placa de três castanhas, conforme Figura 3-10. Os corpos de prova foram usinados até o diâmetro de 15 mm, pois, segundo a norma ISO 3685, o diâmetro usinado nunca deve ser menor que 1/10 do comprimento usinado.

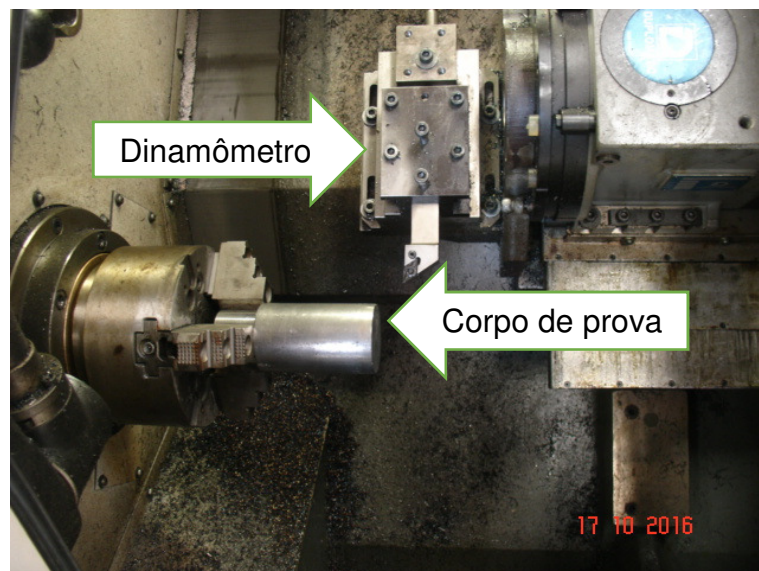


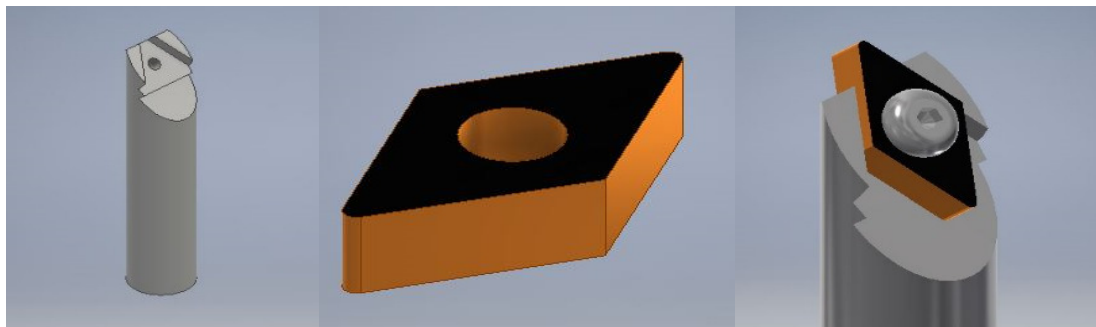
Figura 3-10 - Fixação da peça na placa de 3 castanhas

### 3.5 Suporte para os insertos

Foi escolhido um suporte de ferramenta convencional T-Max® P para torneamento modelo PDJNL 2525M – 15 da Sandvik para realizar os ensaios no

torno CNC. É um suporte que trabalha com sistema de alavanca, tem muita estabilidade e rigidez para desempenhar o papel na usinagem de acabamento e também para desbaste [86].

O suporte utilizado para fixar o inserto de metal duro na máquina de eletroerosão foi projetado e desenvolvido em Piracicaba, no Instituto Federal de Educação de São Paulo. A Figura 3-11 mostra o suporte desenvolvido no software paramétrico Autodesk Inventor 2016.



*Figura 3-11 - Suporte para inserto DNMG*

### **3.6 Torno CNC**

Os testes de torneamento foram realizados no Centro de Torneamento Cincinnati Milacron, modelo Hawk 150, sem refrigeração, com potência nominal de 5,5 kW e rotação máxima de 5.500 rpm no eixo árvore, dotado de um comando GE Fanuc 21i-T, com curso no eixo X de 215 mm e no eixo Z de 440 mm. A torre tem capacidade para 12 ferramentas, sua placa é de fixação hidráulica. O equipamento pertence ao Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LAUS), do Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR, onde foram realizados os ensaios de usinagem.

### **3.7 Medição das forças de usinagem**

Para a medição das forças de corte, de avanço e passiva nos ensaios em torneamento cilíndrico externo foi utilizada a arquitetura, formado de um conjunto de instrumentos de medição e equipamentos descritos na Figura 3-12 sendo constituídos por: (A) plataforma piezelétrica, (B) amplificadores de sinais, (C) placa de aquisição e conversão de sinais, (D) software LabView® e computador.

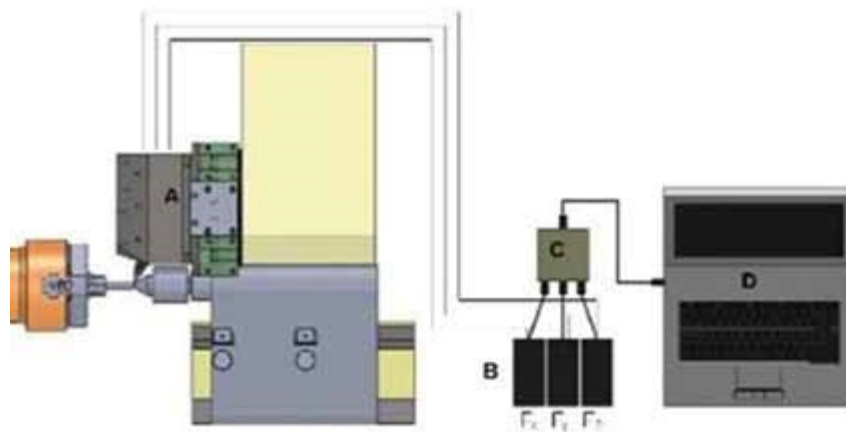


Figura 3-12 - Esquema do sistema de aquisição de dados de força

Todos os valores de  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  que correspondem respectivamente a  $F_f$  (força de avanço),  $F_p$  (força passiva) e  $F_c$  (força de corte), foram coletados e armazenados no computador. Posteriormente os dados foram colocados em uma planilha de Excel<sup>®</sup> para cálculo da força de usinagem ( $F_u$ ). Esta sistemática foi adotada para todas as determinações das componentes da força de Usinagem ( $F_f$ ,  $F_p$  e  $F_c$ ) e usados para geração de gráficos de força de usinagem para posterior análise em Resultados e Discussões.

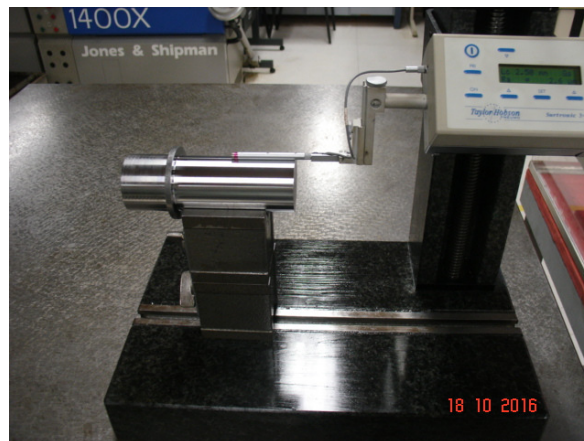
A plataforma utilizada nos ensaios é um transdutor piezelétrico para a medição de forças em três componentes ortogonais  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ . O dinamômetro utilizado é da marca Kistler, tipo 9272 montado sobre um adaptador modelo 9257B. Esta plataforma é constituída de células de quartzo, o que torna um equipamento de medição com grande rigidez.

No ensaio foi utilizado amplificador de sinal, que converte a carga gerada pelo transdutor piezelétrico em um sinal elétrico proporcional. A taxa de aquisição utilizada foi de 10 Hz e foi utilizado um filtro passa baixa de 30 Hz.

### 3.8 Rugosidade da peça

Como o foco da pesquisa não é o acabamento superficial, utilizou-se como padrão a rugosidade média aritmética  $R_a$ . A avaliação da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) foi feita por um rugosímetro marca Taylor Hobson modelo TalySurf Series 2 do Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LAUS), do Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do

Paraná – PUCPR. A rugosidade teórica do material usinado foi de 3,25  $\mu\text{m}$  e o cut-off utilizado foi de 2,5 mm, conforme Norma NBR ISO 4287/2002 [87]. A Figura 3-13 mostra o equipamento utilizado.



*Figura 3-13 - Rugosímetro utilizado para as medições da rugosidade das peças usinadas*

### **3.9 Microscópio estereoscópico**

Para identificar o desgaste de flanco foi utilizado um microscópio estereoscópico, com capacidade de ampliação de até 150x. O equipamento utilizado foi da marca Zeiss, modelo Discovery V12, com uma lente Carl Zeiss, do Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LAUS), do Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR.

## 4 Desenvolvimento do Trabalho

Neste capítulo são descritos os ensaios realizados para analisar o inserto DNMG 150608-PM comercial e também o inserto texturizado por eletroerosão.

### 4.1 Escolha da texturização

Para escolha da texturização ideal foram realizados vários testes com diversos parâmetros e duas espessuras de folha de alumínio. Todos os dados disponíveis estão no Anexo 2.

A Tabela 4-1 refere-se apenas à preparação da texturização da aresta de corte que não mostraram problemas visuais ou de alguma intercorrência durante o processo de usinagem.

Tabela 4-1 - Condição final dos parâmetros para texturização das ferramentas nos testes para escolha da melhor texturização

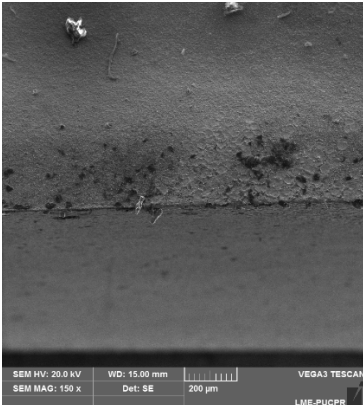
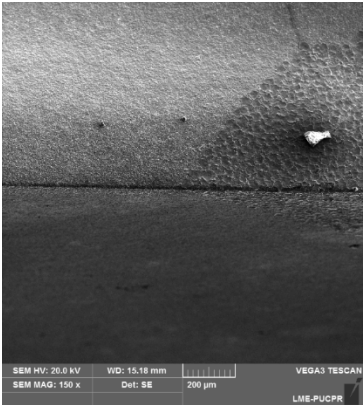
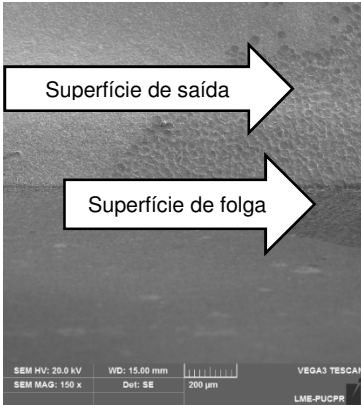
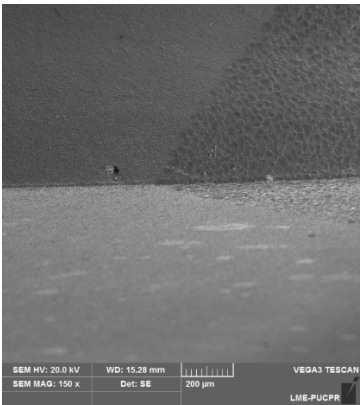
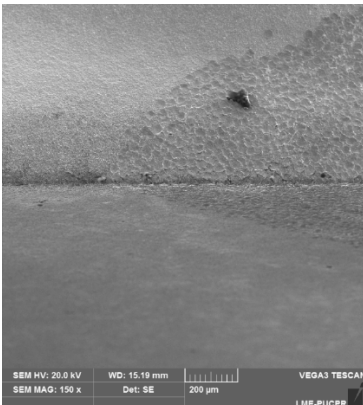
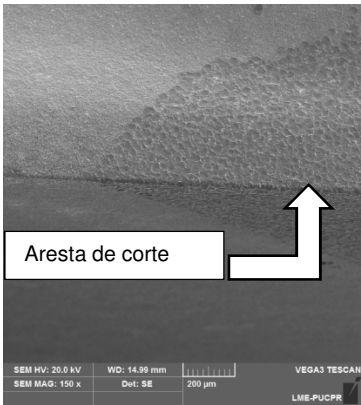
Testes	T3	T8	T9	T10	T12	T13
V	160	160	160	160	160	160
P (A)	1	1,5	1,5	1,5	1	1
A (μs)	0,8	0,8	1,6	0,4	0,4	1,6
B (μs)	0,8	0,8	1,6	0,4	0,4	1,6
Tempo(s)	115	124	101	203	109	141
Folha(um)	25	25	25	25	25	25

Depois, as amostras foram enviadas para o laboratório de imagem para visualização e caracterização via MEV (microscópio eletrônico de varredura). Foram escolhidas as amostras T3, T8, T9, T10, T12 e T13, que foram texturizadas com a folha de alumínio de 25 μm.

#### 4.1.1 Análise por microscopia eletrônica de varredura – MEV

A Tabela 4-2 mostra a comparação entre os ensaios de EDM validados. As seis imagens mostram a superfície de saída da ferramenta e a superfície de folga. Após a análise de todas as imagens produzidas pelo MEV, verificou-se que todas as amostras produziram o arredondamento da aresta.

Tabela 4-2 - Comparação entre os ensaios de EDM validados

<p>Amostra T3</p> <p>Escala: 200 <math>\mu</math>m</p> <p>Corrente: 1 A</p> <p>Tempo: 115 s</p>  <p>SEM HV: 20.0 kV WD: 15.00 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 150 x Det: SE 200 <math>\mu</math>m LME-PUCPR</p>	<p>Amostra T8</p> <p>Escala: 200 <math>\mu</math>m</p> <p>Corrente: 1,5 A</p> <p>Tempo: 124 s</p>  <p>SEM HV: 20.0 kV WD: 15.18 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 150 x Det: SE 200 <math>\mu</math>m LME-PUCPR</p>	<p>Amostra T9</p> <p>Escala: 200 <math>\mu</math>m</p> <p>Corrente: 1,5 A</p> <p>Tempo: 101 s</p>  <p>SEM HV: 20.0 kV WD: 15.00 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 150 x Det: SE 200 <math>\mu</math>m LME-PUCPR</p>
<p>Amostra T10</p> <p>Escala: 200 <math>\mu</math>m</p> <p>Corrente: 1,5 A</p> <p>Tempo: 203 s</p>  <p>SEM HV: 20.0 kV WD: 15.28 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 150 x Det: SE 200 <math>\mu</math>m LME-PUCPR</p>	<p>Amostra T12</p> <p>Escala: 200 <math>\mu</math>m</p> <p>Corrente: 1A</p> <p>Tempo: 109 s</p>  <p>SEM HV: 20.0 kV WD: 15.19 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 150 x Det: SE 200 <math>\mu</math>m LME-PUCPR</p>	<p>Amostra T13</p> <p>Escala: 200 <math>\mu</math>m</p> <p>Corrente: 1A</p> <p>Tempo: 141 s</p>  <p>SEM HV: 20.0 kV WD: 14.99 mm VEGA3 TESCAN SEM MAG: 150 x Det: SE 200 <math>\mu</math>m LME-PUCPR</p>

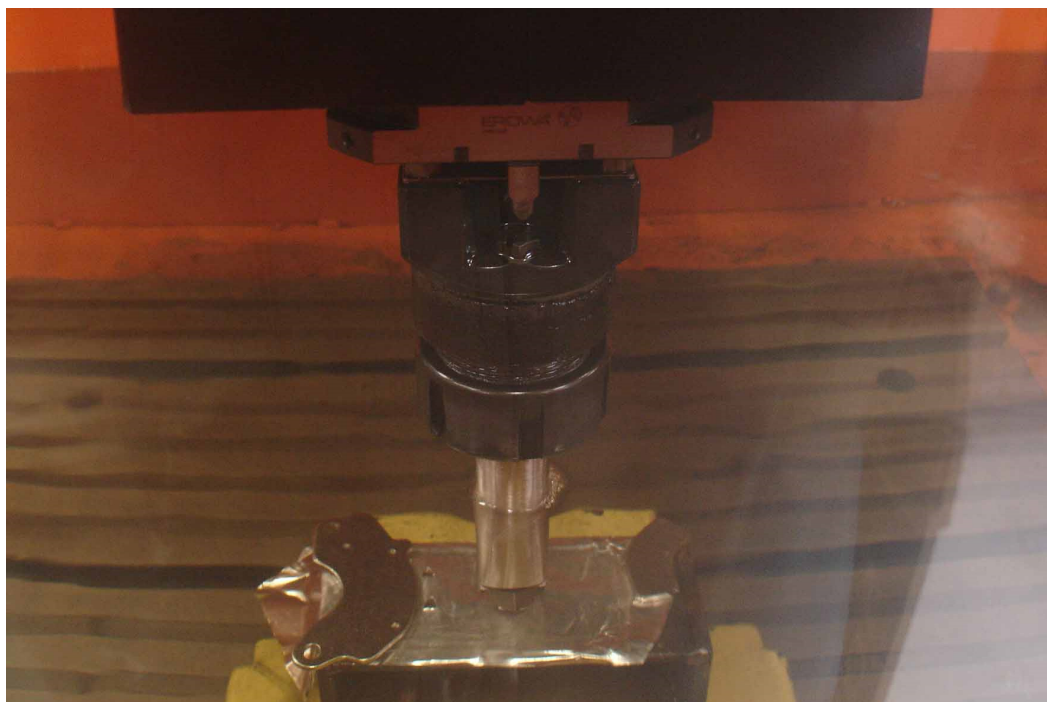
Após a análise do MEV e das medições das arestas de corte, a escolha recaiu sobre a **amostra T9** para serem replicadas 24 arestas. Segundo as análises feitas nas arestas de corte, a T9 obteve um melhor arredondamento da aresta, as concavidades mostraram-se mais homogêneas e o tempo de



usinagem por EDM foi de 101 segundos, também o menor de todas as amostras avaliadas.

#### **4.1.2 Modificação superficial e deposição dos revestimentos nas ferramentas**

As ferramentas de metal duro foram modificadas superficialmente na saída e na folga, antes da deposição dos revestimentos, pelo processo de texturização por eletroerosão. A texturização final foi realizada em 6 insertos (24 arestas de corte) DNMG 150608-PM. A Figura 4-1 mostra o detalhe no momento da penetração do inserto na folha de alumínio, gerando o arredondamento da aresta de corte.



*Figura 4-1 - Texturização da aresta de corte na folha de alumínio*

Após a texturização das arestas de corte, os insertos (6) foram enviados para a Sandvik para a cobertura dos mesmos pelo processo CVD.

#### **4.1.3 Análise por espectroscopia de energia dispersiva – EDS**

Uma verificação qualitativa, através de EDS, dos elementos químicos presentes na superfície texturizada da ferramenta é mostrada na Figura 4-2.



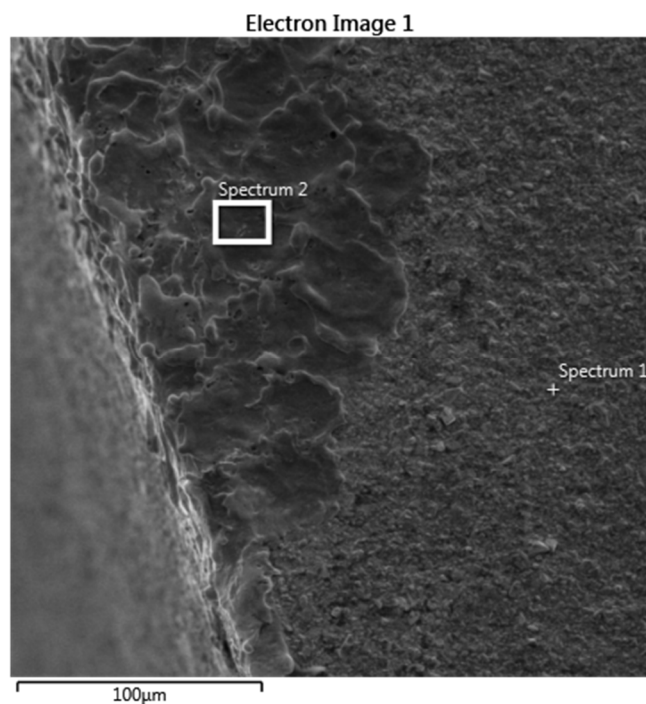


Figura 4-2 - EDS da superfície do inserto DNMG 150608 após a texturização

Observa-se que no ponto Spectrum 1, os elementos pesados (metálicos) presentes nos resultados de EDS são aqueles que compõem a ferramenta de corte, pois trata-se de um ponto fora da região de texturização, conforme Figura 4-3.

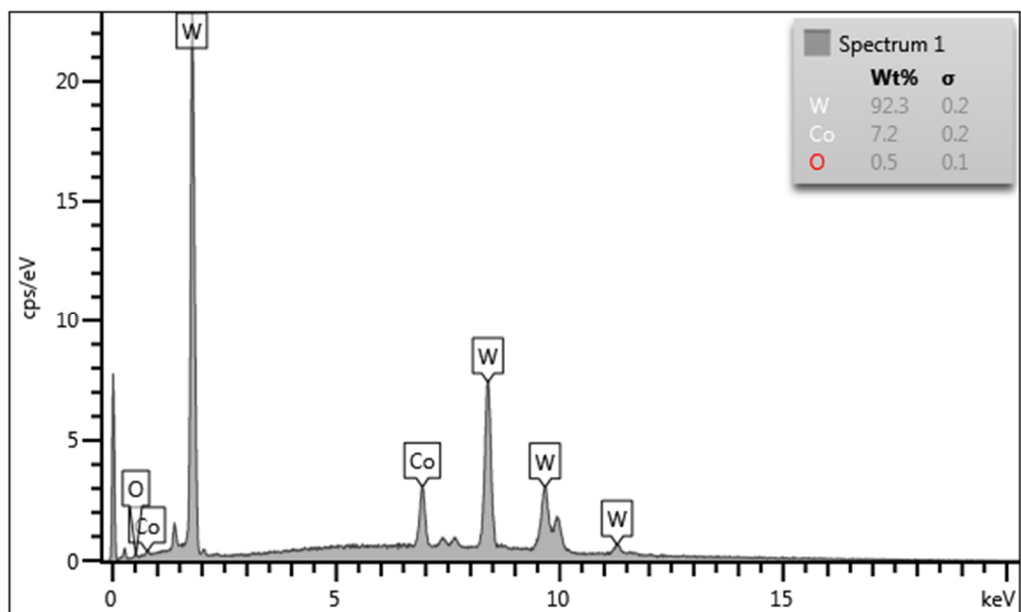


Figura 4-3 - Análise química no ponto 1 do inserto DNMG 150608

Observa-se que no ponto Spectrum 2 (Figura 4-4) há a presença do carbono (C), um novo elemento químico devido ao fato da presença de hidrocarbonetos (fluido dielétrico) na região da texturização. As análises comprovam as porcentagens de materiais existentes no inserto de metal duro.

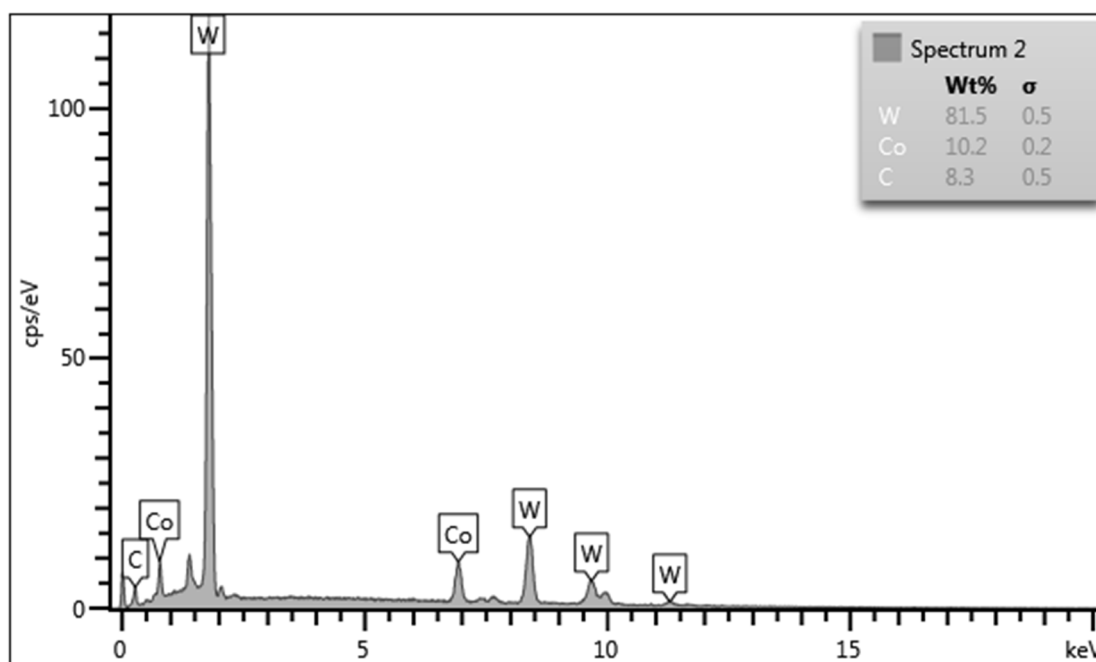


Figura 4-4 - Análise química no ponto 2 do inserto DNMG 150608

#### 4.1.4 Medição dos raios de aresta da ferramenta de corte

As medições dos raios das arestas de corte do inserto DNMG 150608-PM foram realizadas em duas etapas: Sandvik, onde os raios foram medidos considerando-se duas partes (W e H) conforme Figura 2-4 e Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS), do Departamento de Engenharia de Produção da EESC – USP, onde foram medidos como um todo, ou seja, W e H unidos gerando apenas um raio de aresta.

A primeira etapa realizada na empresa Sandvik contou com os insertos de arestas texturizadas por eletroerosão no Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR, (T3, T8, T9, T10, T12, T13) e com o inserto apenas com o escovamento da aresta de corte e sem a tripla camada de cobertura.

Na Figura 4-5 são mostradas as médias de W e H (as arestas foram medidas três vezes) das arestas de corte dos insertos que foram feitos o arredondamento por eletroerosão das amostras (T3, T8, T9, T10, T12, T13).

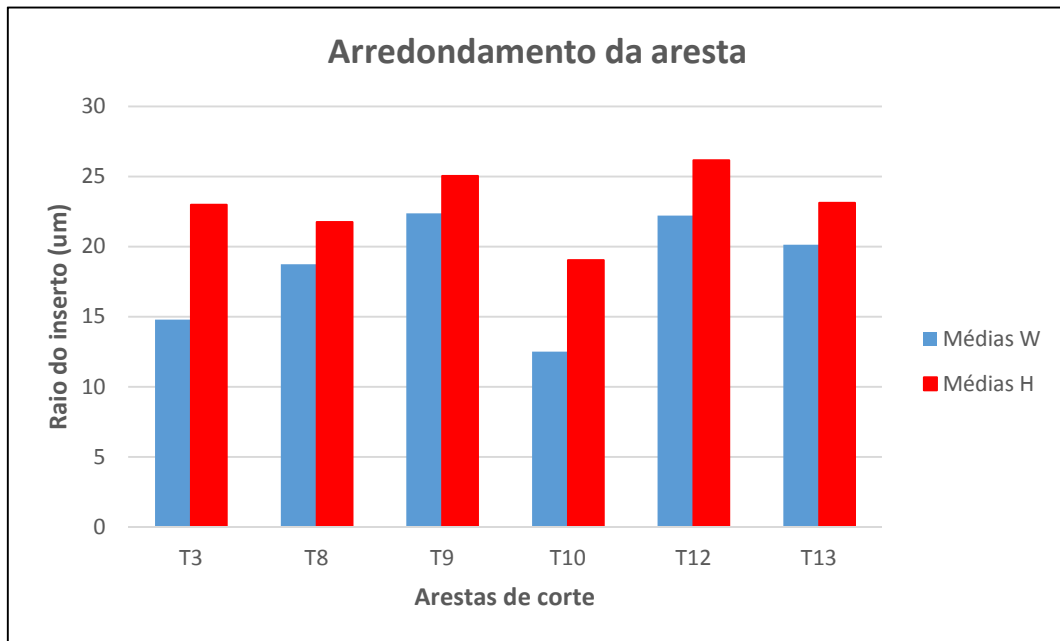


Figura 4-5 - Arredondamento da aresta de corte: médias W e H

A Figura 4-6 mostra a comparação da relação W/H dos insertos que foram feitos o arredondamento por eletroerosão das amostras (T3, T8, T9, T10, T12, T13) e do inserto que foi feito o escovamento da aresta de corte.

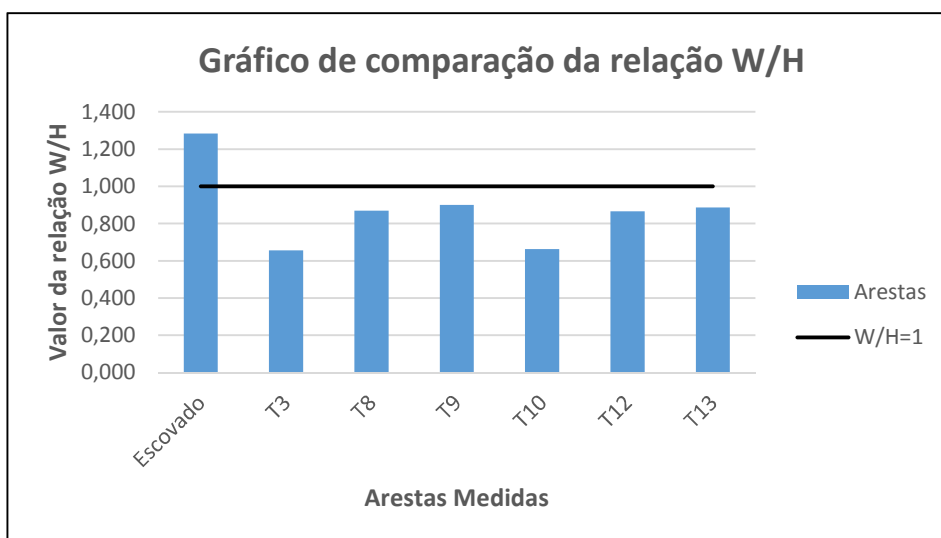


Figura 4-6 - Comparação da relação W/H das arestas de corte medidas

Na relação W/H é desejável que o valor seja sempre maior ou igual a 1, para que o fluxo de cavaco seja direcionado a fluir sobre a superfície de saída e se for menor que 1, faz com que o cavaco seja direcionado na lateral do inserto, provocando ou acelerando o desgaste de flanco do inserto com a criação de aresta postiça.

Embora os valores de comparação da relação W/H estejam na faixa abaixo de 1, é importante ressaltar que ainda haverá a cobertura e que esta melhorou a relação W/H do inserto escolhido para ser replicado para os testes de usinagem, devido ao ângulo de deposição da tripla camada de cobertura do inserto realizado no processo CVD.

#### 4.1.4.1 Medição dos raios das arestas dos insertos recobertos DNMG 150608

As vinte e quatro arestas de corte tratadas por eletroerosão foram medidas antes da cobertura pelo processo CVD na Sandvik. A faixa verde da Figura 4-7 demonstra que as medidas das arestas de corte (vinte e quatro) feitas pela Sandvik estão dentro da faixa aceitável, que pode variar de 0,500 até 2,300 na relação W/H, valores definidos pela Sandvik.

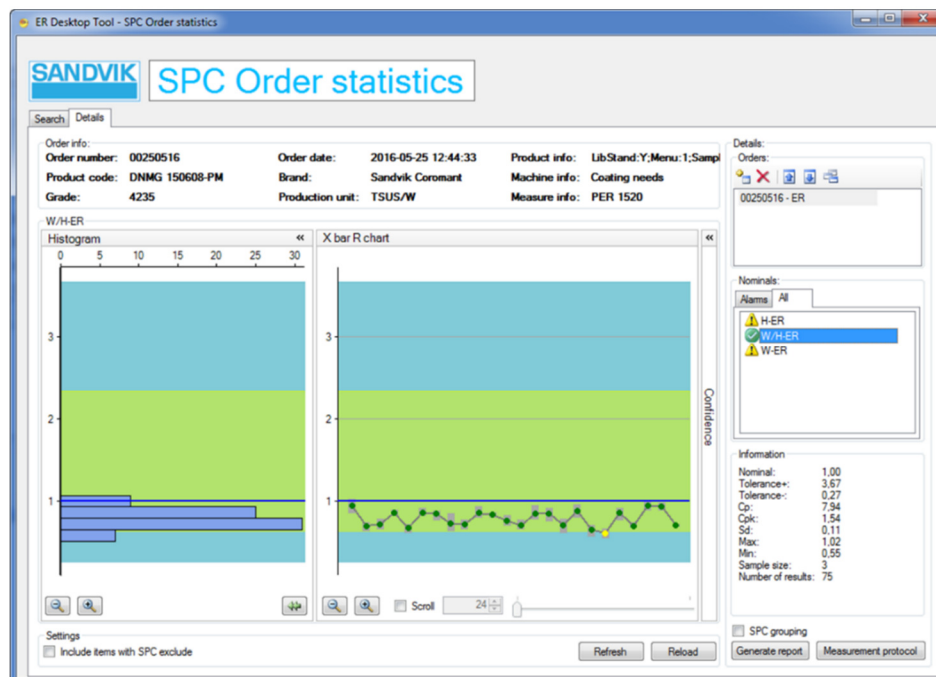


Figura 4-7 - Medição das vinte e quatro arestas de corte feita pela Sandvik

Após a medição das vinte e quatro arestas de corte, os insertos foram encaminhados para o recobrimento e retornaram para os testes de usinagem. Apenas um inserto ficou para a medição final da aresta de corte, juntamente com um inserto preparado por escovamento pela própria Sandvik, para posteriormente ser feito uma comparação com o preparado por eletroerosão.

A Figura 4-8 mostra os valores dos raios das quatro arestas de corte (A1 até A4) referente ao inserto (T9) que ficou para medição após o recobrimento da tripla camada de CVD. A mesma mostra que em um mesmo inserto, os raios de arestas também podem variar.

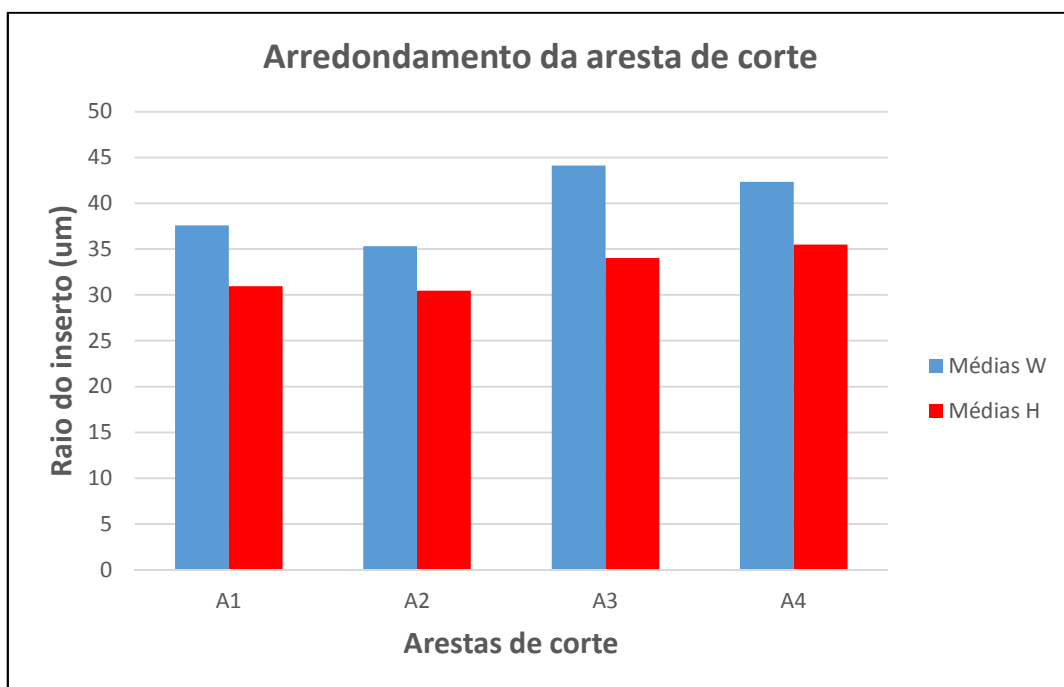


Figura 4-8 - Arredondamento da aresta de corte: médias W e H do inserto texturizado

A Figura 4-9 mostra a relação W/H das quatro arestas do inserto texturizado medidas pela Sandvik. Nota-se que após a cobertura, as medidas W ficaram maiores do que as medidas H, fazendo com que a relação W/H ficasse maior que um. Isto se deve ao do ângulo de deposição da tripla camada de cobertura do inserto. As deposições preenchem mais o raio da aresta relativo ao W do que a parte lateral relativa ao H.

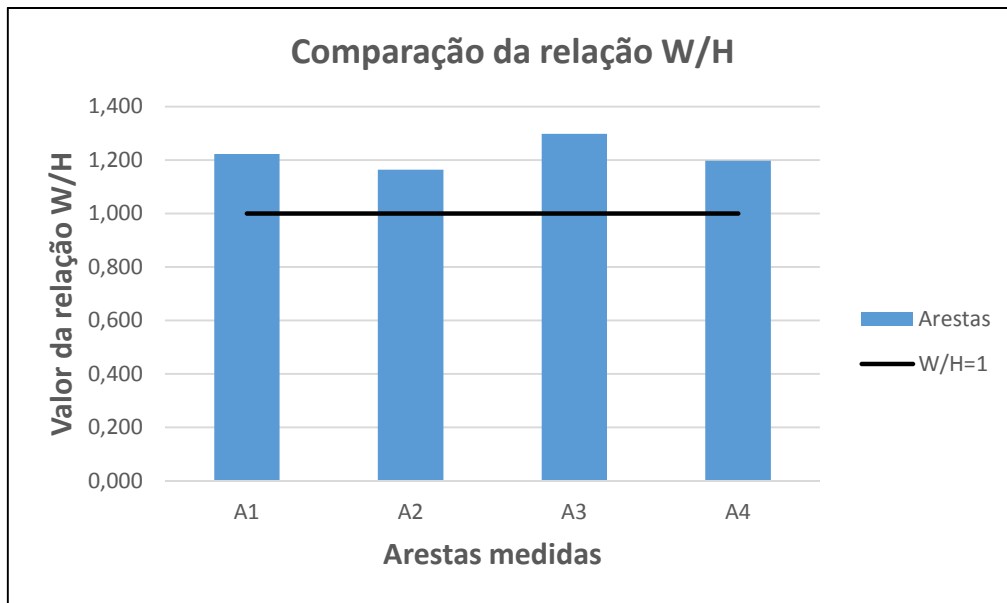


Figura 4-9 - Comparação da relação W/H das arestas de corte do inserto texturizado

Para elencar os dois tipos de processos de arredondamento das arestas de corte e fazer um comparativo, a Figura 4-10 mostra a relação W/H do arredondamento da aresta de corte feito por escovamento (vendido comercialmente) e do arredondamento feito por eletroerosão. Os resultados mostraram-se próximos para os dois processos.

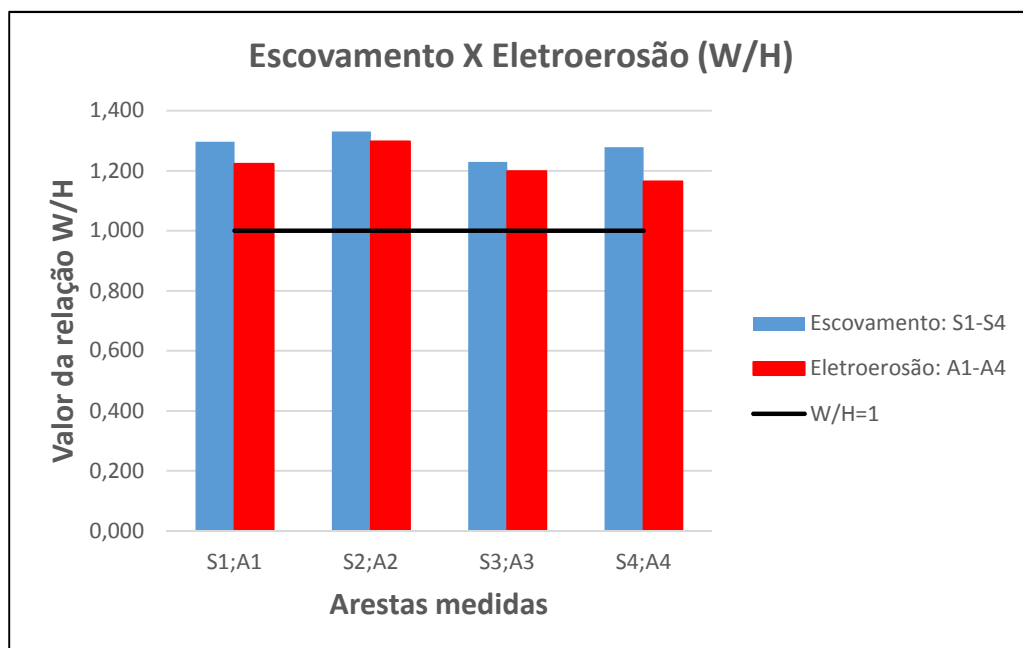


Figura 4-10 - Comparação dos processos de arredondamentos das arestas de corte

#### 4.1.4.2 Medição dos raios das arestas de corte – Raio total

A segunda etapa de medição foi realizada na Escola de Engenharia de São Carlos e foram medidos quatro insertos com preparações diferentes: inserto com a aresta preparada por eletroerosão na PUCPR (T9 sem cobertura), inserto novo que é vendido comercialmente, inserto com aresta de corte arredondado por escovamento e sem revestimento e inserto com a aresta de corte arredondada por eletroerosão e recoberta pela tripla camada no processo CVD. A medição ocorreu em apenas uma aresta de cada inserto e diferentemente da medição realizada pela Sandvik, esta mediu o raio total da aresta de corte, não sendo dividido em W e H.

O primeiro raio de aresta medido foi o do inserto comercial e sem cobertura (apenas escovamento), da família T-max P, modelo DNMG 150608 PM, classe 4235, fornecido pela Sandvik para a execução dos ensaios. O valor médio de medição do raio da aresta de corte foi de 37,604  $\mu\text{m}$ . Foram feitas três medidas no raio de aresta da ferramenta de corte e o próprio software fez o cálculo da média e emitiu o relatório, conforme Anexo 3 no fim da tese. A Figura 4-11 mostra os valores obtidos para o raio de aresta da ferramenta de corte.

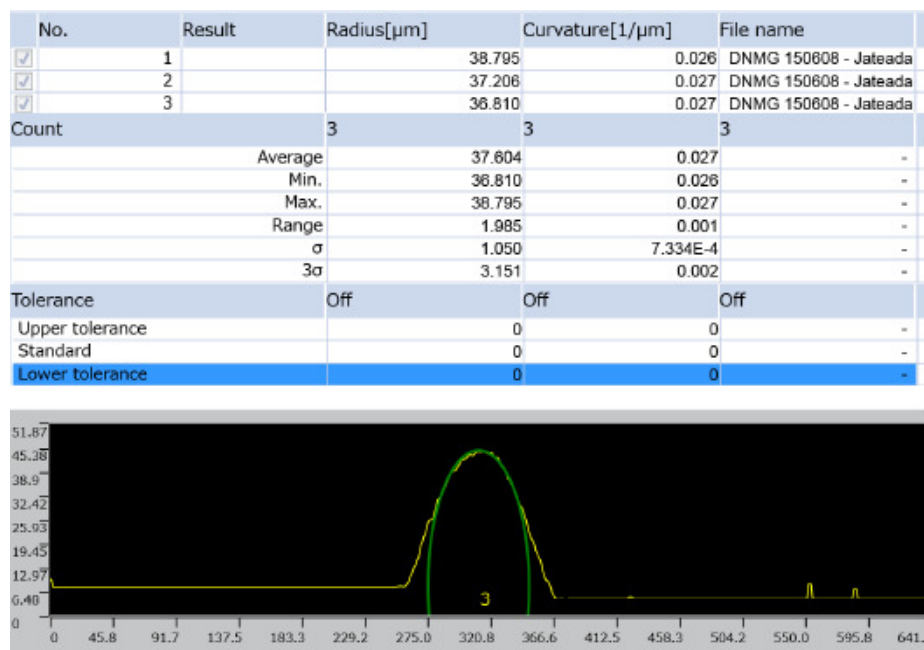


Figura 4-11 - Medição do raio de aresta da ferramenta DNMG 150608 PM comercial e sem cobertura

Além da medição, o microscópio laser também fez a imagem tridimensional da aresta de corte medida, conforme mostrada na Figura 4-12.

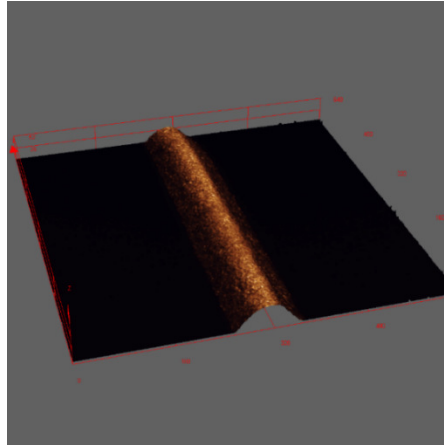


Figura 4-12 - Imagem 3D do inserto DNMG 150608 somente com o escovamento da aresta de corte

O segundo raio de aresta medido foi do inserto comercial e com cobertura. Este inserto da mesma família e classe do inserto anterior, que foi cedido pela Sandvik. O valor médio de medição do raio da aresta de corte foi de 57,141  $\mu\text{m}$ . A Figura 4-13 mostra os valores obtidos para o raio de aresta da ferramenta de corte.

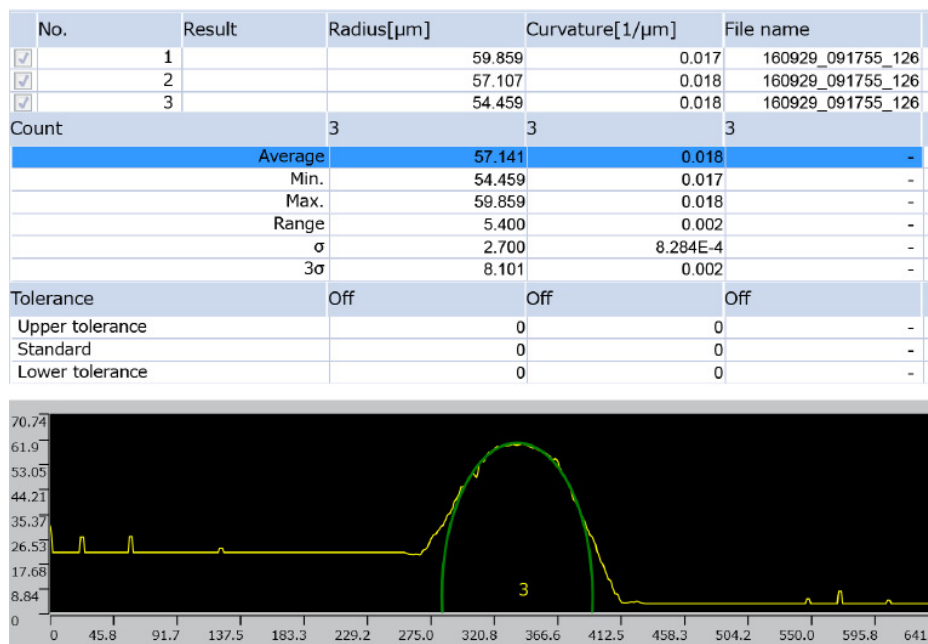


Figura 4-13 - Medição do raio de aresta da ferramenta DNMG 150608 PM comercial e com cobertura



A Figura 4-14 mostra a imagem 3D do inserto que é vendido comercialmente pela Sandvik.

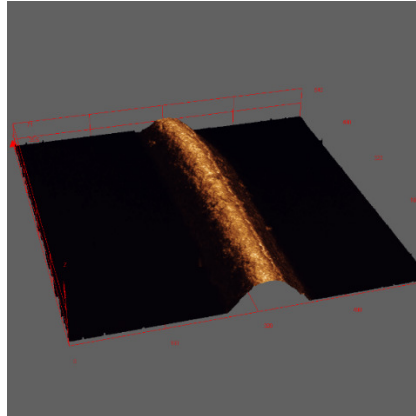


Figura 4-14 - Imagem 3D do inserto DNMG 150608 comercial

A terceira medição foi executada com insertos texturizados por EDM e sem cobertura. Depois de tomadas três medidas do raio de aresta da ferramenta, obteve-se a média de 22,906  $\mu\text{m}$  conforme mostrado na Figura 4-15.

No.	Result	Radius[ $\mu\text{m}$ ]	Curvature[1/ $\mu\text{m}$ ]	File name
<input checked="" type="checkbox"/>	1	22.389	0.045	DNMG 150608 - EDM 13
<input checked="" type="checkbox"/>	2	24.613	0.041	DNMG 150608 - EDM 13
<input checked="" type="checkbox"/>	3	21.717	0.046	DNMG 150608 - EDM 13
Count		3	3	3
Average		22.906	0.044	-
Min.		21.717	0.041	-
Max.		24.613	0.046	-
Range		2.895	0.005	-
$\sigma$		1.515	0.003	-
$3\sigma$		4.546	0.008	-
Tolerance		Off	Off	Off
Upper tolerance		0	0	-
Standard		0	0	-
Lower tolerance		0	0	-

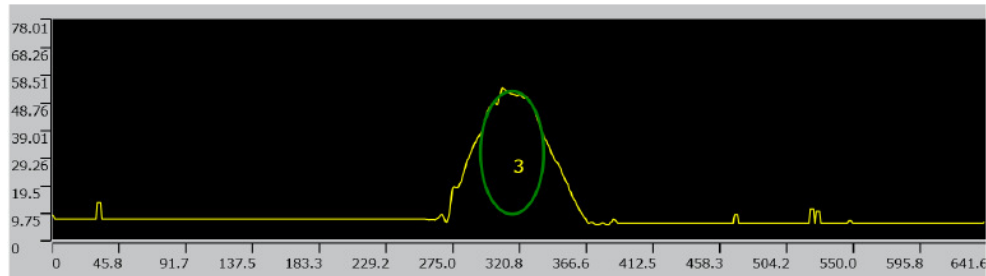


Figura 4-15 - Medição do raio de aresta da ferramenta DNMG 150608 PM com texturização e sem cobertura

A Figura 4-16 mostra a imagem 3D da aresta de corte medida. Esta aresta de corte está somente com a texturização pelo processo de eletroerosão.

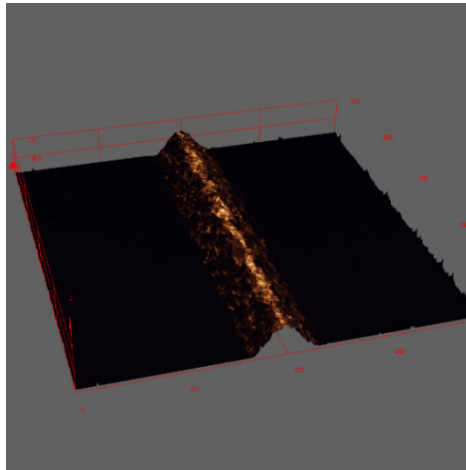


Figura 4-16 - Imagem 3D do inserto DNMG 150608 somente com a texturização da aresta de corte

O quarto raio da aresta medido foi executado com insertos texturizados por EDM e com cobertura, sendo que a texturização foi feita na PUCPR pelo processo de eletroerosão. Depois de tomadas três medidas do raio de aresta da ferramenta, obteve-se a média de 36,750  $\mu\text{m}$ , conforme mostrado na Figura 4-17.

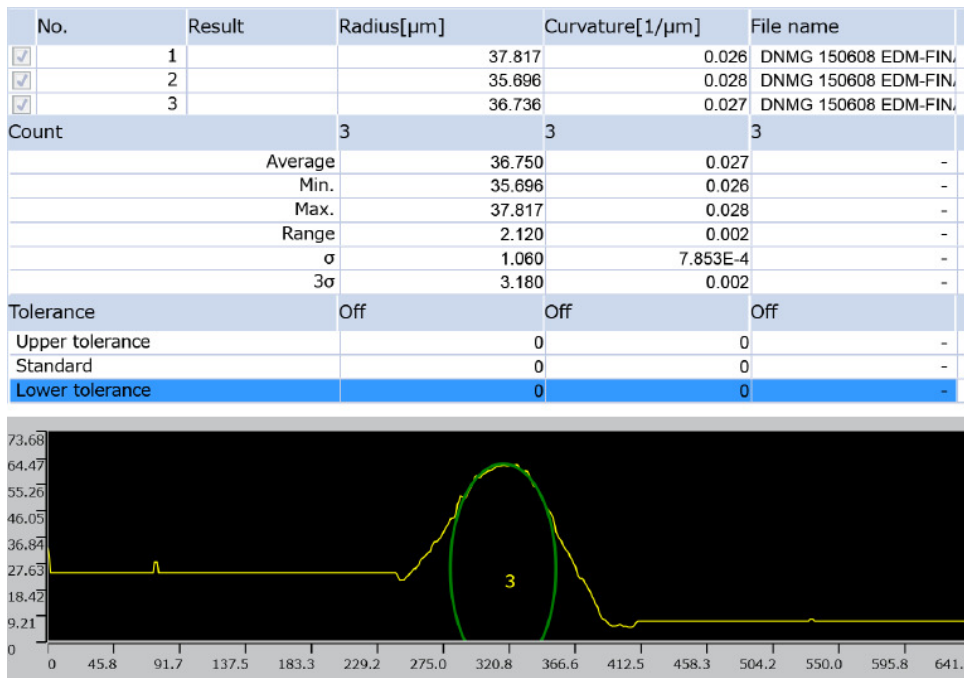


Figura 4-17 - Medição do raio de aresta da ferramenta DNMG 150608 PM com texturização e com cobertura

A Figura 4-18 mostra a imagem 3D do inserto com a aresta de corte texturizada por EDM e com a cobertura pelo processo CVD.

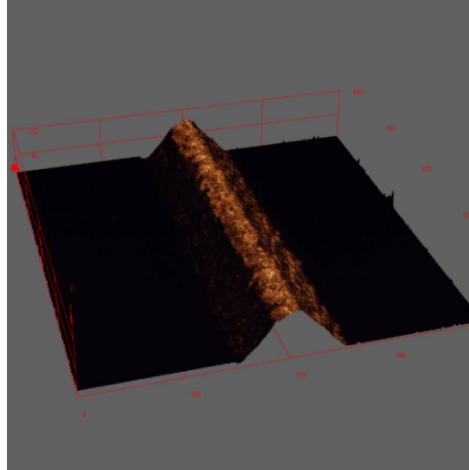


Figura 4-18 - Imagem 3D do inserto DNMG 150608 com a texturização da aresta de corte e a camada de cobertura

Visando a uma melhor comparação entre as médias dos raios de arestas gerados pelo software, fez-se um gráfico para demonstração dos dados originados mostrado na Figura 4-19.

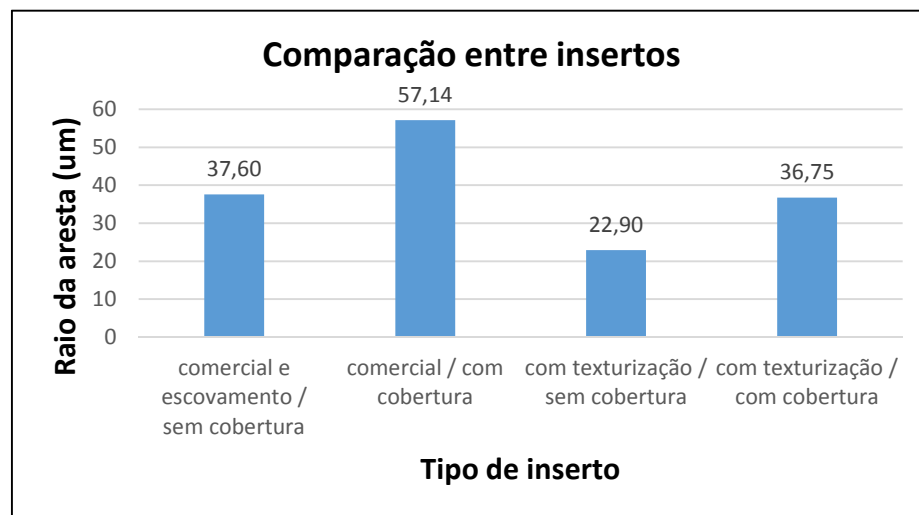


Figura 4-19 - Comparação entre a medição dos raios de arestas dos insertos que foram utilizados nos ensaios

Com relação aos dados da Figura 4-19 observa-se que o valor do raio do arredondamento da aresta de corte pelo processo de EDM é menor em relação ao inserto sem cobertura feito pelo processo de escovamento e que é utilizado

para fazer o inserto comercial. Nos insertos com cobertura, o comercial teve um raio de aresta maior em relação ao inserto texturizado por EDM.

Na média geral, os valores dos raios de aresta da ferramenta podem variar de 20 a 100  $\mu\text{m}$  para insertos preparados por escovamento (*brush honing*) e de 30 a 50  $\mu\text{m}$  para os insertos preparados por eletroerosão [56].

#### 4.2 Parâmetros de corte utilizados nos ensaios

Os dados de corte foram selecionados com base em recomendações do catálogo Sandvik, fornecedor das ferramentas testadas e também com base na Norma ISO 3685 [88]. A Tabela 4-3 mostra os parâmetros recomendados para o ensaio de usinagem retirados da Norma ISO 3685.

Tabela 4-3 - Valores recomendados pela Norma ISO 3685 para ensaios de usinagem (Adaptado da ISO 3685, [88])

Condição de corte	A	B	C	D
Avanço (f), mm/rot	0,1	0,25	0,4	0,63
Profundidade de corte (ap), mm	1	2,5	2,5	2,5
Raio ferramenta (re), mm	0,4	0,8	0,8	1,2

Caso não seja possível escolher uma condição de corte padrão, conforme mostrado na Tabela 4-3, deve-se obedecer um limite de condição de corte em função da profundidade de corte ou do avanço, conforme mostrado na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 - Limites de condições de corte recomendados pela Norma ISO 3685 para ensaios de usinagem (Adaptado da ISO 3685, [88])

Limite de condições de corte	
Mínima profundidade de corte	2 vezes o raio da ferramenta
Máxima profundidade de corte	10 vezes o avanço
Máximo avanço	0,8 vezes o raio da ferramenta

O avanço para ambos os ensaios foi de 0,25 mm/rot conforme Norma ISO 3685 [88] e para a profundidade de corte foi utilizado o valor de 1,6 mm.

Para a velocidade de corte não existe uma tabela de comparação e sim uma recomendação de que a variação da  $v_c$  seja multiplicada por 1,12 a partir da escolha da velocidade de corte inicial para ferramentas de metal duro.

### 4.3 Medição do desgaste de flanco $VB_B$

Os ensaios de vida baseado no desgaste de flanco com inserto DNMG 150608-PM foram realizados com o torneamento do aço ABNT 1045 com velocidade de corte constante.

A partir das relações entre desgaste de flanco e número de passes, obtêm-se o fim da vida da ferramenta de corte, estipulado como sendo o momento no qual o desgaste de flanco ( $VB_B$ ) atinge o valor de 0,3 mm (ISO 3685).

O acompanhamento da evolução do desgaste de flanco nas ferramentas foi realizado por meio da medição das marcas de desgaste conforme Figura 4-20. O método utilizado para monitorar a evolução do desgaste em cada ferramenta consistirá na medição das marcas de desgastes via aquisição de imagens.

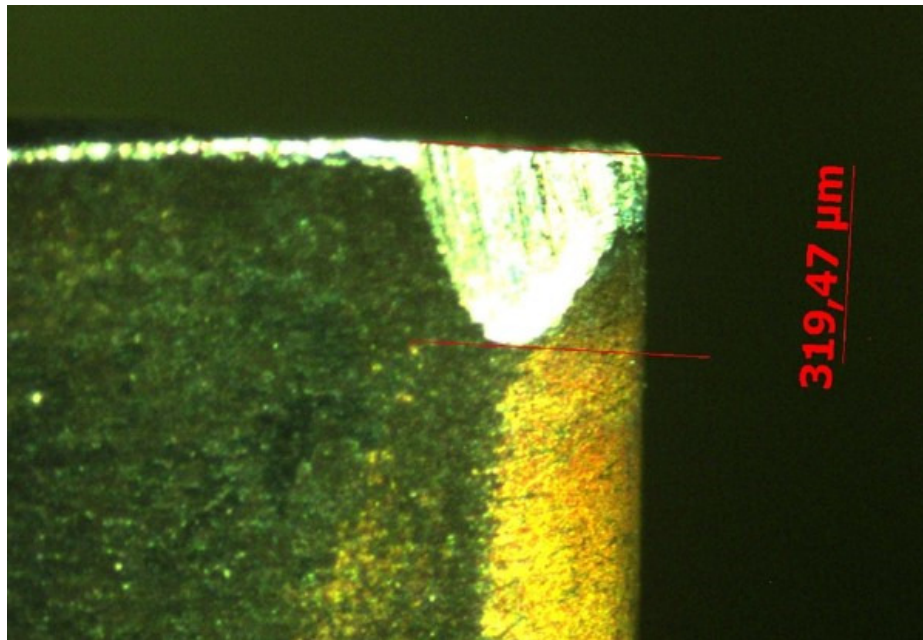


Figura 4-20 - Desgaste do inserto com  $VB_B$  de 0,3 mm

A cada intervalo selecionado da Tabela 4-5, o inserto foi retirado do suporte e colocado em um microscópio, onde foi realizada a aquisição das fotos do flanco, bem como as medições dos desgastes. Após a medição, o inserto foi recolocado na máquina, continuando a usinagem até o limite de desgaste máximo previsto para os ensaios.

Tabela 4-5 - Intervalo de passadas em milímetros para torneamento do corpo de prova

Intervalo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ensaio sem refrigeração										
Ensaio 1 ao 4	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500

Os ensaios 1 ao 4 referem-se as quatro velocidades de corte utilizadas nos testes de usinagem e o corpo de prova utilizado para fazer o teste tem um comprimento útil de 100 mm. O intervalo de 500 mm refere-se a cinco passadas da ferramenta sobre o corpo de prova. Isto é na teoria, pois na prática os valores podem alterar devido ao desgaste da ferramenta. Caso o desgaste esteja lento, aumenta-se o número de passadas, mas se o desgaste estiver acentuado, diminui-se o número de passadas para que a curva de desgaste da ferramenta possa ser plotada em um gráfico do Excel®.

#### 4.4 Tabela de comparação múltipla (Teste de hipóteses)

Para os ensaios de força de usinagem, foi realizada uma comparação múltipla, que verifica se existe diferença significativa com 95% de confiança entre as médias das forças da amostra comercial e da aresta arredondada por eletroerosão (texturizada).

Para isso, é realizado um teste que verifica as seguintes hipóteses [89]:

A hipótese testada é que a diferença entre as médias = 0

- $h_0$  – diferença entre as médias=0 (testa a hipótese de que as médias são iguais)
- $h_a$  - diferença entre as médias $\neq$ 0 (testa a hipótese de que as médias são diferentes)

Quando o p-valor for  $>0,05$  (nível de significância), aceita-se  $h_0$ , ou seja, as médias são estatisticamente iguais, caso contrário, rejeita-se  $h_0$  e as médias são estatisticamente diferentes.

O p-valor, também denominado nível descritivo do teste, é a probabilidade de que a estatística do teste (como variável aleatória) tenha valor extremo em relação ao valor observado (estatística) quando a hipótese  $h_0$  é verdadeira.

Para os cálculos do p-valor foi utilizado o software Minitab 17, utilizando 2 amostras do tipo t, que determina se a média difere significativamente entre os dois grupos.

#### **4.5 Medição da espessura dos revestimentos**

O conhecimento da espessura de um filme produzido é muito importante, pois permite ajustar uma determinada carga de indentação, quando se efetua um teste de microdureza ou de adesão. A medição também é muito importante para comparar as espessuras da tripla camada de cobertura do inserto DNMG 150608 que é vendido comercialmente com o inserto que a aresta de corte foi preparada pelo processo de eletroerosão e posteriormente recebeu a mesma cobertura do inserto comercial.

Para a medição das espessuras das camadas de cobertura ( $TiCN$ ,  $Al_2O_3$  e  $TiN$ ), os insertos foram cortados na eletroerosão a fio, lixados na politriz e posteriormente levado para o microscópio (MEV) para a medição de todas as camadas.

A Figura 4-21 mostra as medições das camadas dos dois insertos. O lado (a) da figura mostra as medidas feitas no inserto comercial e o lado (b) mostra as medidas feitas no inserto texturizado. Após as medições, verificou-se uma similaridade das medidas das três camadas que recobrem o inserto.



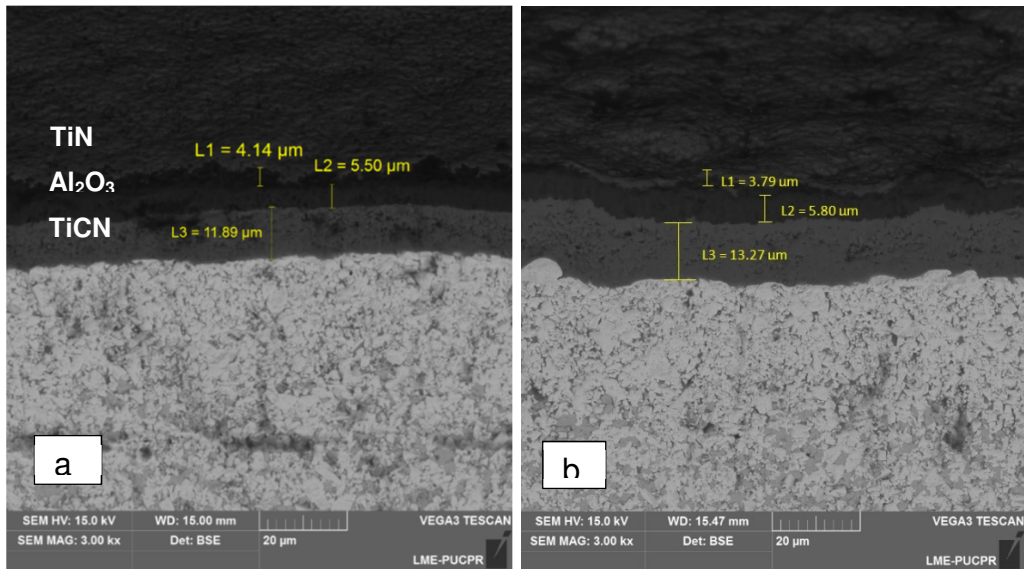


Figura 4-21 - Medição da cobertura do inserto Comercial (a) e Texturizado (b)

A análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) mostra a composição química da base do substrato e também da cobertura do inserto DNMG 150608 comercial, conforme Figura 4-22.

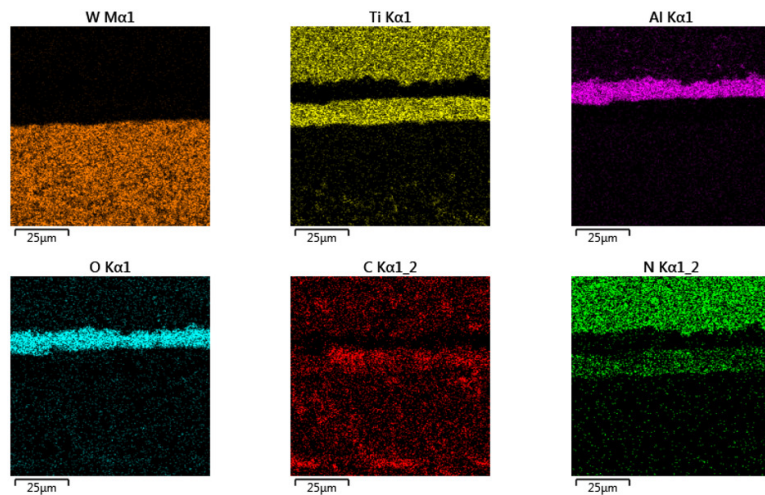
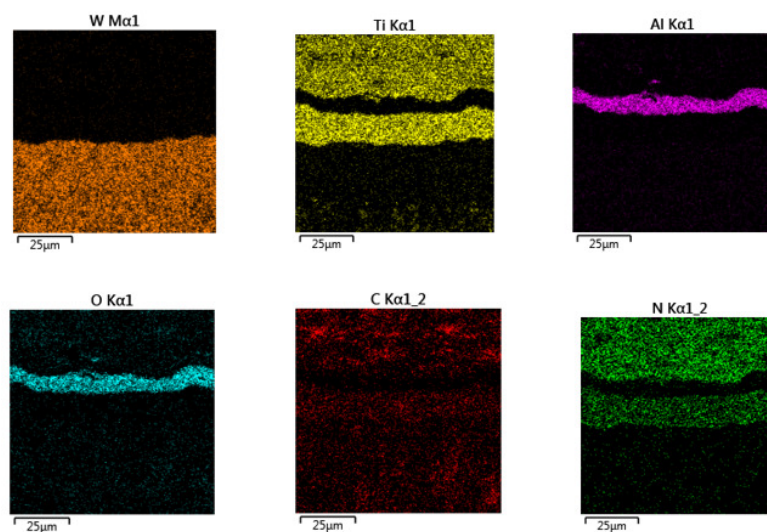


Figura 4-22 - Mapa de composição química do inserto DNMG 150608 comercial

A Figura 4-23 mostra a composição química da base do substrato e também da cobertura do inserto DNMG 150608 texturizado. Pode-se notar a semelhança entre as figuras com relação aos componentes químicos caracterizados pelo EDS.

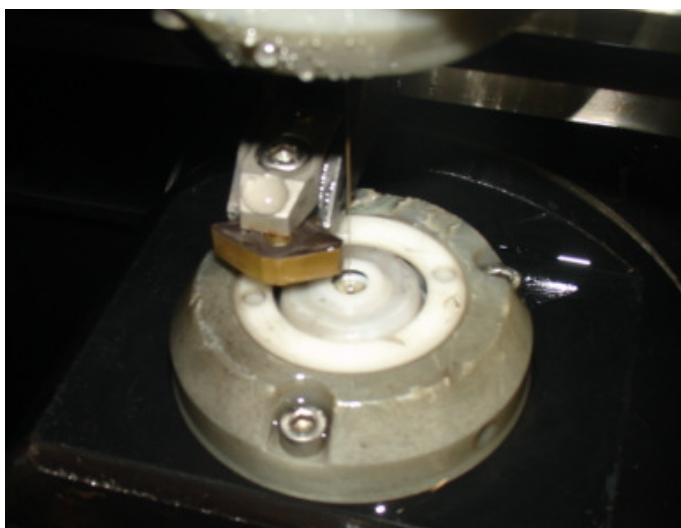




*Figura 4-23 - Mapa de composição química do inserto DNMG 150608 texturizado*

#### **4.6 Preparação para o ensaio de indentação**

Os insertos DNMG 150608 comercial e texturizado foram preparados para o ensaio de indentação. A preparação consistiu em cortar as pontas dos insertos através da eletroerosão a fio e posteriormente fazer o embutimento das amostras. A Figura 4-24 mostra o inserto preso na máquina de eletroerosão a fio depois da execução do corte.



*Figura 4-24 - Corte da ponta do inserto DNMG 150608*

Após os cortes, as pontas dos insertos foram colocadas na embutidora e preparadas as amostras para posteriormente serem executados os ensaios de

indentação. A Figura 4-25 mostra as pontas embutidas e prontas para o teste de indentação.



*Figura 4-25 - Pontas dos inserto embutidas (texturizada e comercial)*

O material em seguida passou por um processo de pulverização catódica (*Sputtering*) para inserção do revestimento de ouro na amostra, e com isso a mesma se torne condutora para que possam ser realizadas as análises por MEV.

## 5 Resultados e Discussão

Nesta parte serão apresentadas as análises estatísticas, medições e posteriormente, os desgastes das ferramentas, os esforços de corte, rugosidade e adesão.

### 5.1 Resultados dos ensaios de usinagem da ferramenta

Para a comparação entre o inserto comercialmente vendido e o modificado através do arredondamento da aresta de corte através do processo de eletroerosão, foram verificadas a evolução do desgaste de flanco ( $VB_B$ ), a rugosidade da peça e as componentes da força de usinagem. Para os ensaios de aderência foram realizados o *Scratch Test* (ensaio de risco) e o teste de indentação Rockwell.

#### 5.1.1 Análise da força de usinagem ( $F_u$ )

Como explicado no item 4.4, o p-valor foi calculado com o auxílio do software Minitab 17 para duas amostras do tipo t (teste de hipótese da média de uma ou duas populações distribuídas normalmente), sendo utilizados todos os dados de força coletados no dinamômetro. O valor  $\bar{X}_C$  representa a médias das forças do inserto comercial para as determinadas distâncias de usinagem e o valor  $\bar{X}_T$  idem para o inserto arredondado por eletroerosão (Texturizado).

##### 5.1.1.1 Velocidade de corte de 280 m/min

A Tabela 5-1 mostra os valores do p-valor para os comprimentos usinados, comparando o inserto comercial com o texturizado. Observa-se que todos os p-valores resultaram em zero, significando que todas as comparações entre os valores em uma determinada faixa de comprimento (médias  $\bar{X}_C$  e  $\bar{X}_T$ ) são estatisticamente diferentes.

Tabela 5-1 - Valores do p-valor para velocidade de corte de 280 m/min

Comprimento (mm)	p-valor	$\bar{X}C(N)$	$\bar{X}T(N)$	Desv.pad.C	Desv.pad.T
500	0,000	464	422	41	30,6
1000	0,000	466,9	422,2	36,9	23,9
1500	0,000	463,5	417	34	29,6
2000	0,000	485,2	429,1	35,1	31,8
2500	0,000	488,9	433,9	29,1	23,7
3000	0,000	479,6	429,3	28,2	27,8
3500	0,000	504,6	448,9	37,4	29,1
4000	0,000	504,9	449,1	38,3	25,1
4500	0,000	486,2	436,7	35,4	26,5
5000	0,000	529,9	465,1	40,1	35,7
5500	0,000	521,5	470	38,6	34,1
6000	0,000	499,4	462,7	41,7	32,8
6500	0,000	502,6	442,1	50,6	38,1

Para o ensaio foi feito também um gráfico de comparação de força entre o inserto comercial e o inserto cuja as arestas foram arredondadas pelo processo de eletroerosão, conforme mostrado na Figura 5-1. Nota-se que a força despendida para a usinagem com o inserto texturizado foi significativamente menor em relação ao inserto comercial em todas as distâncias usinadas.

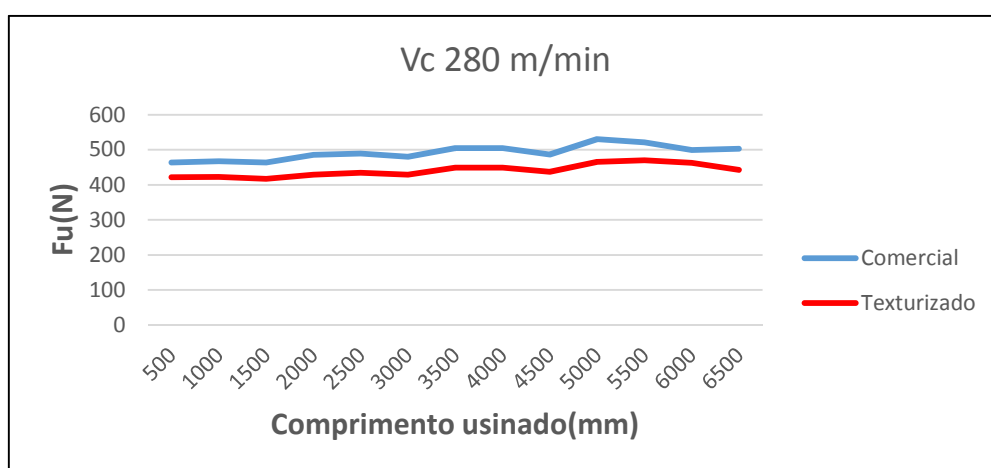


Figura 5-1 - Força de usinagem para  $v_c$  de 280 m/min

Para a comparação de força dos ensaios com  $v_c$  de 280 m/min foi realizado pelo Minitab 17 um Boxplot. Para efeito de demonstração dos dados, são apresentados os Boxplot da primeira usinagem (500 mm) e da última usinagem (6500 mm), sendo as demais figuras colocadas no Anexo 5. A Figura

5-2 compara os dois ensaios (C1 e T1) realizados dentro de um mesmo comprimento usinado para a velocidade de corte de 280 m/min.

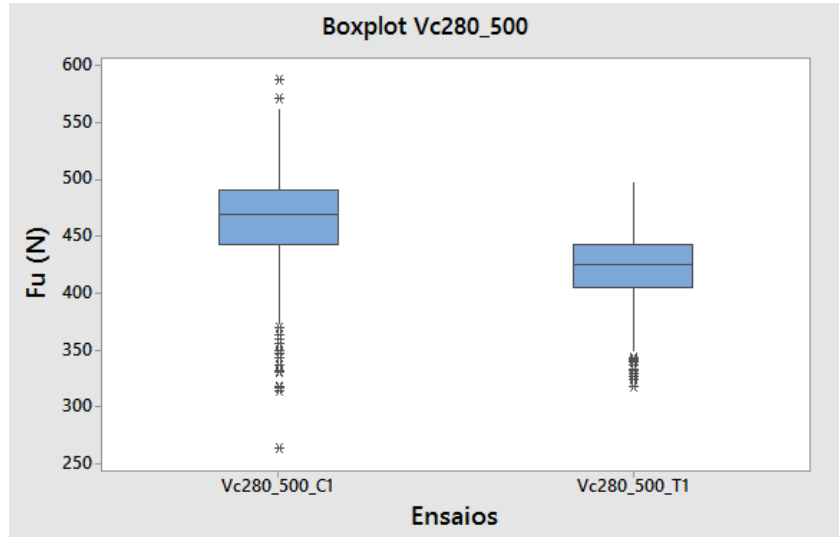


Figura 5-2 - Comparação entre os dois ensaios realizados para  $v_c$  de 280 m/min

A Figura 5-3 mostra a variação de força entre os dois ensaios para o comprimento de 6500 mm. Mostra também no mesmo ensaio, que a força exercida pelo inserto texturizado foi menor do que o inserto comercial.

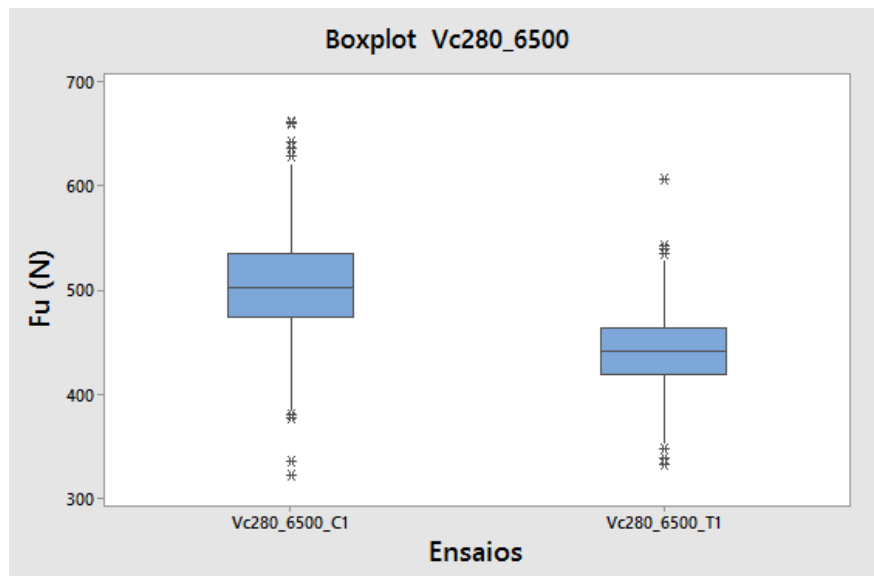


Figura 5-3 - Comparação entre os dois ensaios realizados para  $v_c$  de 280 m/min

### 5.1.1.2 Velocidade de corte de 315 m/min

Os valores do p-valor são mostrados na Tabela 5-3 para os comprimentos usinados, comparando o inserto comercial com o texturizado. Observa-se que todos os p-valores resultaram em zero, significando que todas as comparações entre os valores em uma determinada faixa de comprimento (médias  $\bar{X}C$  e  $\bar{X}T$ ) são estatisticamente diferentes

Tabela 5-2 - Valores do p-valor para velocidade de corte de 315 m/min

Comprimento (mm)	p-valor	$\bar{X}C(N)$	$\bar{X}TN(N)$	Desv.pad.C	Desv.pad.T
500	0,000	457,1	420	37	29,9
1000	0,000	466,2	420,9	27,9	25
1500	0,000	460,6	419,4	31,5	35,8
2000	0,000	484	436	38,4	28,8
2500	0,000	494,7	438,4	30,8	25,6
3000	0,000	487,6	436,5	31	31,3
3500	0,000	529,3	465,3	45,3	32
4000	0,000	540,3	467,8	33,3	26,1
4500	0,000	529	460	34,8	30,1
5000	0,000	594,2	506	57,9	35,9
5500	0,000	646	512,1	27,5	24,6

Para o ensaio foi feito um gráfico de comparação de força entre o inserto que é vendido comercialmente e o inserto cuja as arestas foram arredondadas pelo processo de eletroerosão, conforme mostrado na Figura 5-4. A força despendida para a usinagem com o inserto texturizado foi significativamente menor em relação ao inserto comercial em todas as distâncias usinadas.

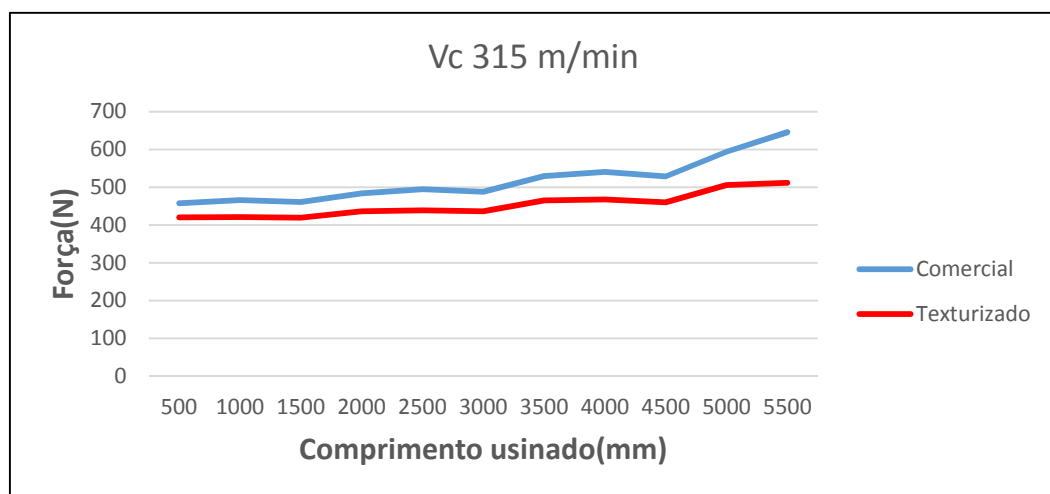


Figura 5-4 - Força de usinagem para  $v_c$  de 315 m/min

Para a comparação de força dos dois ensaios com  $v_c$  de 315 m/min foi realizado pelo Minitab 17 um Boxplot. Para efeito de demonstração dos dados, são apresentados os Boxplot da primeira usinagem (500 mm) e da última usinagem (5500 mm), sendo as demais figuras colocadas no Anexo 5. A Figura 5-5 compara os dois ensaios (C1 e T1) realizados dentro de um mesmo comprimento usinado para a velocidade de corte de 315 m/min.

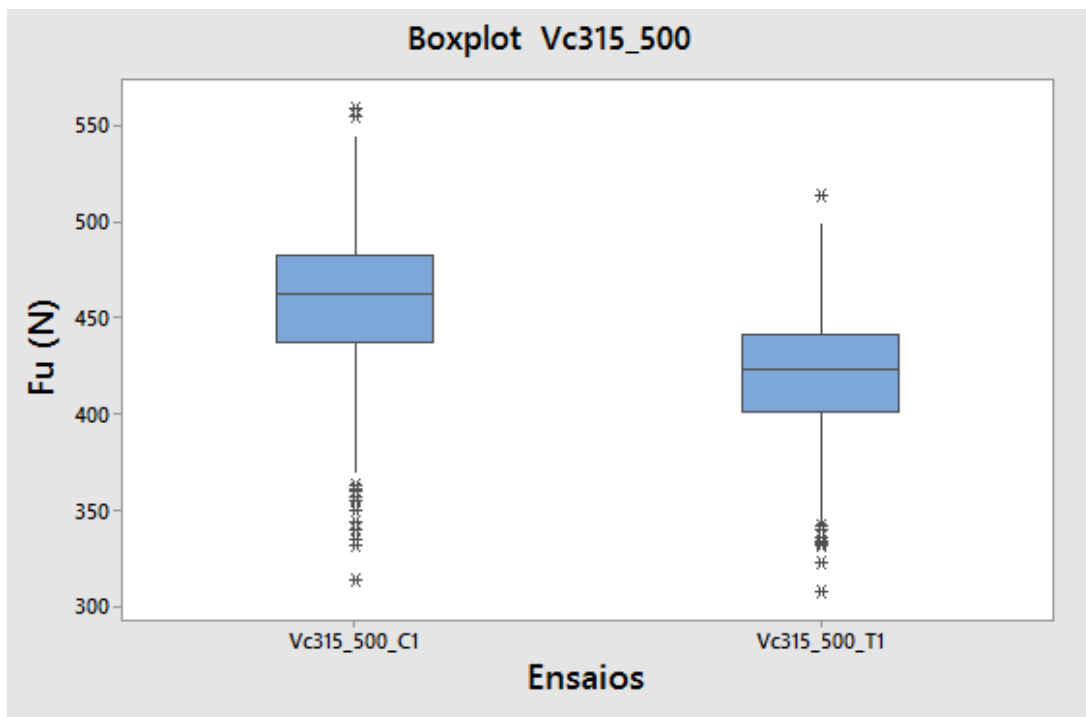


Figura 5-5 - Comparação entre os dois ensaios realizados para  $v_c$  de 315 m/min

Nota-se na Figura 5-5 que para o ensaio, a força exercida pelo inserto texturizado foi menor do que o inserto comercial.

A Figura 5-6 mostra a variação de força entre os dois ensaios para o comprimento de 5.500 mm. Mostra também no mesmo ensaio, que a força exercida pelo inserto texturizado foi menor do que o inserto comercial.

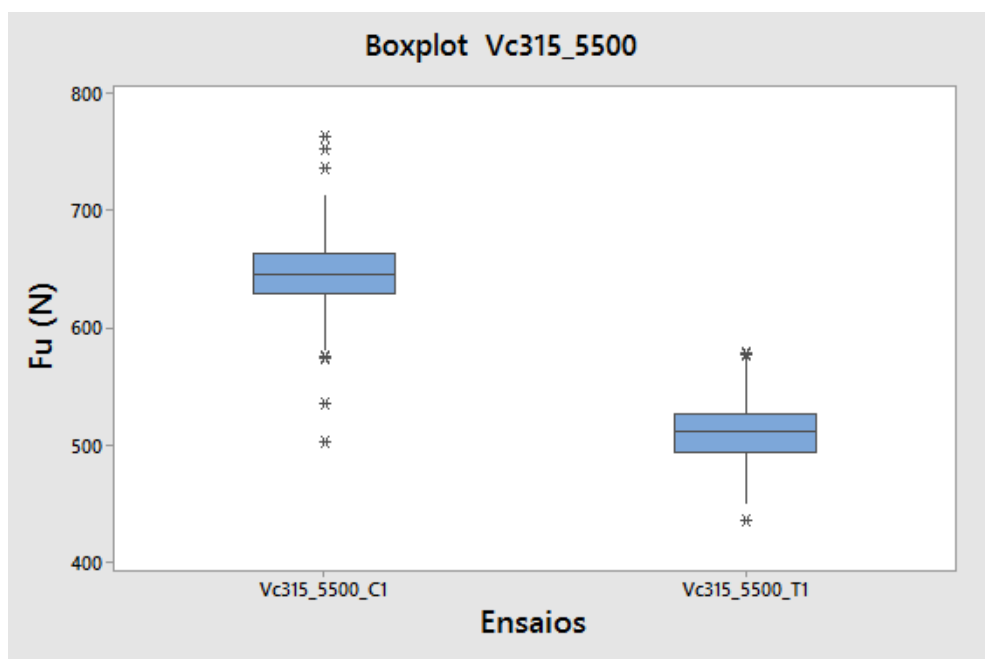


Figura 5-6 - Comparação entre os dois ensaios realizados para  $v_c$  de 315 m/min

### 5.1.1.3 Velocidade de corte de 350 m/min

A Tabela 5-5 mostra os valores do p-valor para os comprimentos usinados, comparando o inserto comercial com o texturizado. Observa-se que todos os p-valores resultaram em zero, significando que todas as comparações entre os valores em uma determinada faixa de comprimento (médias  $\bar{X}C$  e  $\bar{X}T$ ) são estatisticamente diferentes. As médias também são mostradas na tabela.

Tabela 5-3 - Valores do p-valor para velocidade de corte de 350 m/min

Comprimento (mm)	p-valor	$\bar{X}C$	$\bar{X}T$	Desv.pad.C	Desv.pad.T
500	0,000	448	413,6	36	35,2
1000	0,000	458,8	424,3	27,3	24,7
1500	0,000	467,5	433,5	28,2	28,3
2000	0,000	498,6	453,1	42,4	37
2500	0,000	519,4	468	27,5	24,6
3000	0,000	510,5	470,3	33	24,4
3500	0,000	580,3	424,3	65,4	24,7
4000	0,000	628,4	514,2	26,8	25,4

Com os valores das médias da tabela acima, foi feito um gráfico de comparação de força entre o inserto comercial e o texturizado, conforme mostrado na Figura 5-7. Nota-se que a força despendida para a usinagem com o inserto texturizado foi menor em relação ao inserto comercial em todas as



distâncias usinadas. Para a distância de 4.000 mm houve uma diferença mais significativa da força exercida pela ferramenta.

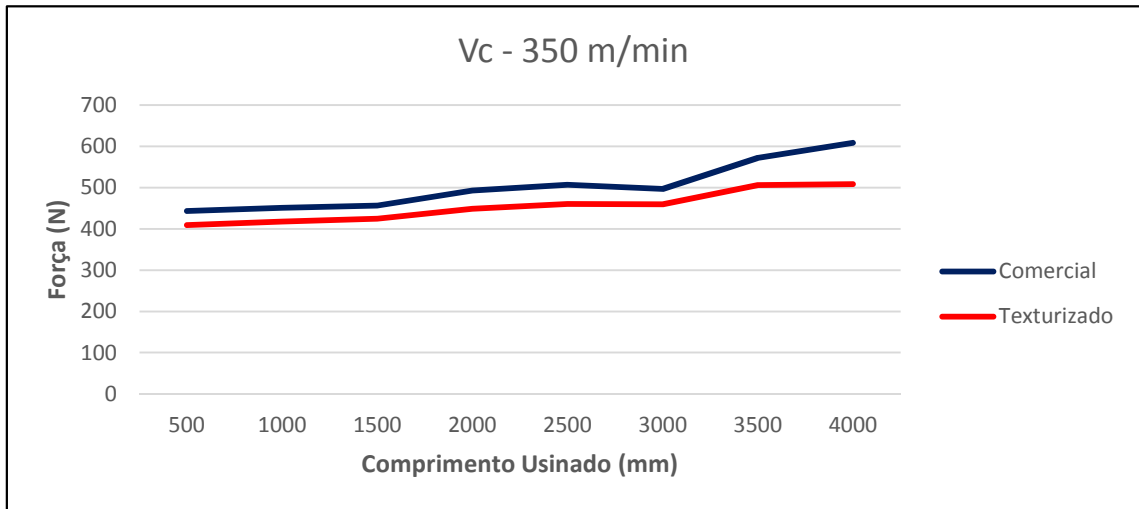


Figura 5-7 - Força de usinagem para  $v_c$  de 350 m/min

Os ensaios com  $v_c$  de 350 m/min foram comparados através do Boxplot. Para efeito de demonstração dos dados, são apresentados os Boxplot da primeira usinagem (500 mm) e da última usinagem (4000 mm), sendo as demais figuras colocadas no Anexo 5. A Figura 5-8 compara os dois ensaios (C1 e T1) realizados dentro de um mesmo comprimento usinado para a velocidade de corte de 350 m/min.

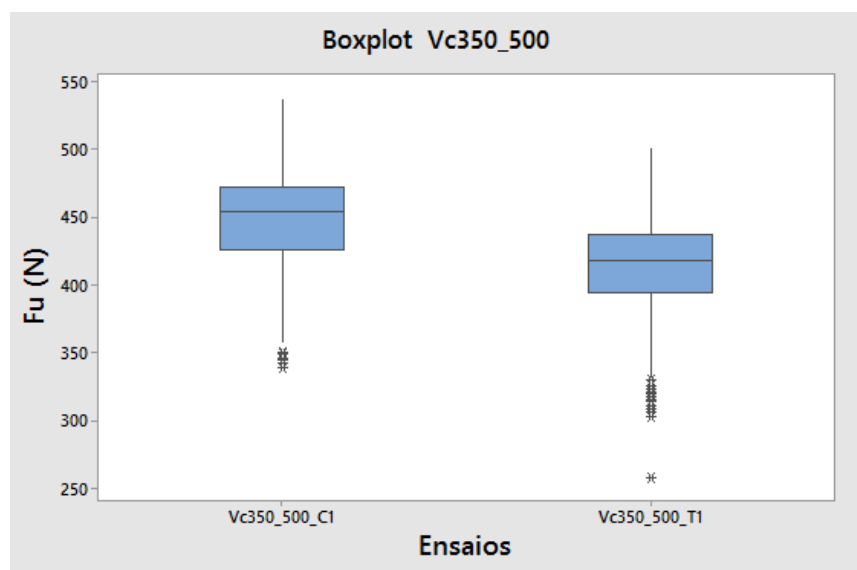


Figura 5-8 - Comparação entre os dois ensaios realizados para  $v_c$  de 350 m/min

A Figura 5-9 mostra a variação de força entre os dois ensaios para o comprimento de 4.000 mm. Mostra também no mesmo ensaio, que a força exercida pelo inserto texturizado foi menor do que o inserto comercial.

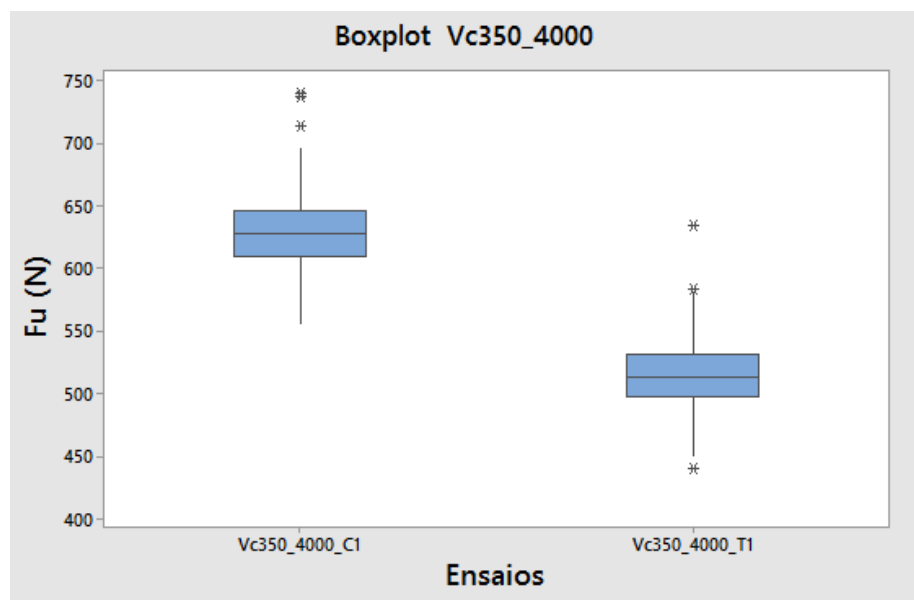


Figura 5-9 - Comparação entre os dois ensaios realizados para  $v_c$  de 350 m/min

#### 5.1.1.4 Velocidade de corte de 390 m/min

Os valores do p-valor são mostrados na Tabela 5-7. Todos os p-valores resultaram em zero, significando que todas as comparações entre os valores em uma determinada faixa de comprimento (médias  $\bar{X}_C$  e  $\bar{X}_T$ ) são estatisticamente diferentes

Tabela 5-4 - Valores do p-valor para velocidade de corte de 390 m/min

Comprimento (mm)	p-valor	$\bar{X}_C(N)$	$\bar{X}_T(N)$	Desv.pad.C	Desv.pad.T
300	0,000	456,8	416,5	38,7	33,7
600	0,000	476,8	431,7	25,5	22,8
900	0,000	483,7	436,3	24	29,1
1200	0,000	485,2	441,9	26,9	24,8
1500	0,000	492,7	448,7	31,1	28,6
1800	0,000	511,3	464,1	45	34,6
2100	0,000	548,3	498,2	46,4	22,5
2400	0,000	564,2	509,2	34,2	29,9
2700	0,000	569,3	509,3	25,3	25,1
3000	0,000	565,4	501,8	28	26,6
3300	0,000	637,9	557,2	60,5	42,6

Neste ensaio, os comprimentos de usinagem foram reduzidos para 300 mm, para não causar o desgaste prematuro do inserto, devido a velocidade de corte ser muito alta. A figura de comparação de força entre o inserto comercial e o texturizado é mostrado na Figura 5-10. A força despendida para a usinagem com o inserto texturizado foi menor em relação ao inserto comercial em todas as distâncias usinadas. Observa-se também que as duas linhas seguem um padrão quase que idêntico durante a usinagem.

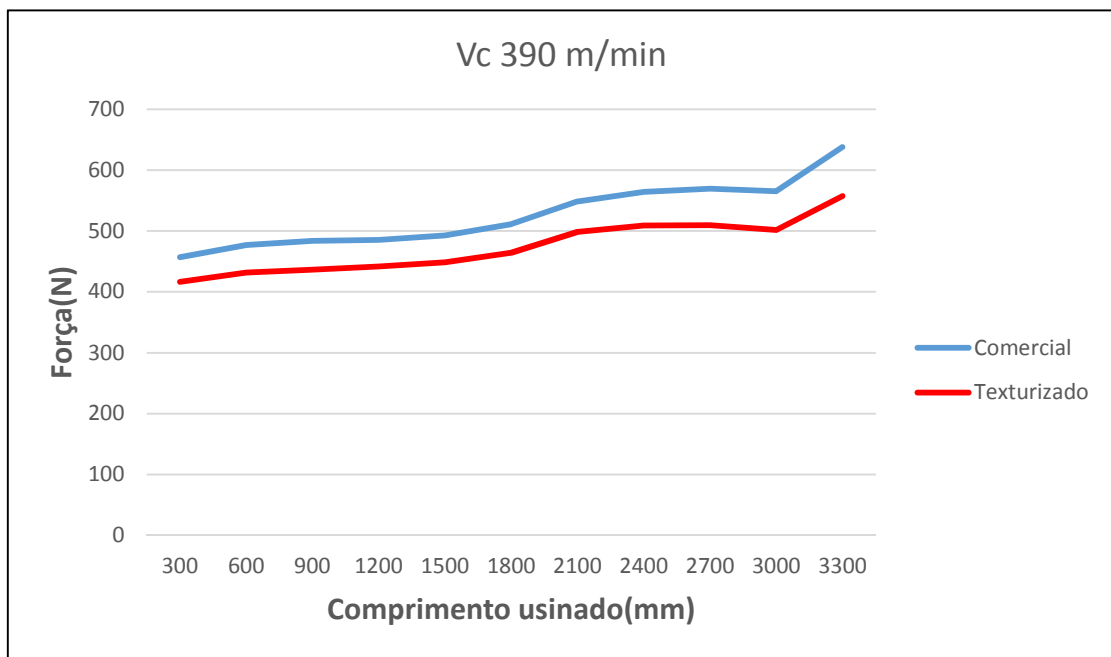


Figura 5-10 - Força de usinagem para  $v_c$  de 390 m/min

A força executada pela ferramenta nos dois ensaios com  $v_c$  de 390 m/min foi colocada em um Boxplot. Para efeito de demonstração dos dados, são apresentados os Boxplot da primeira usinagem (300 mm) e da última usinagem (3300 mm), sendo as demais figuras colocadas no Anexo 5. A Figura 5-11 compara os dois ensaios (C1 e T1) realizados dentro de um mesmo comprimento usinado para a velocidade de corte de 390 m/min.

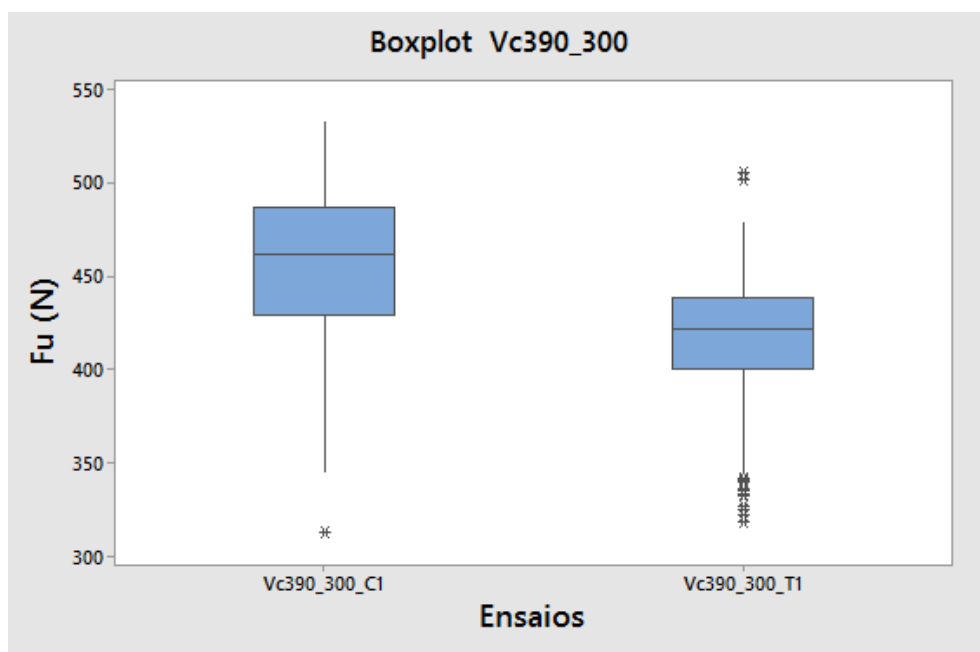


Figura 5-11 - Comparação entre os dois ensaios realizados para  $v_c$  de 390 m/min

A Figura 5-12 mostra a variação de força entre os dois ensaios para o comprimento de 3.300 mm. Mostra também no mesmo ensaio, que a força exercida pelo inserto texturizado foi menor do que o inserto comercial.

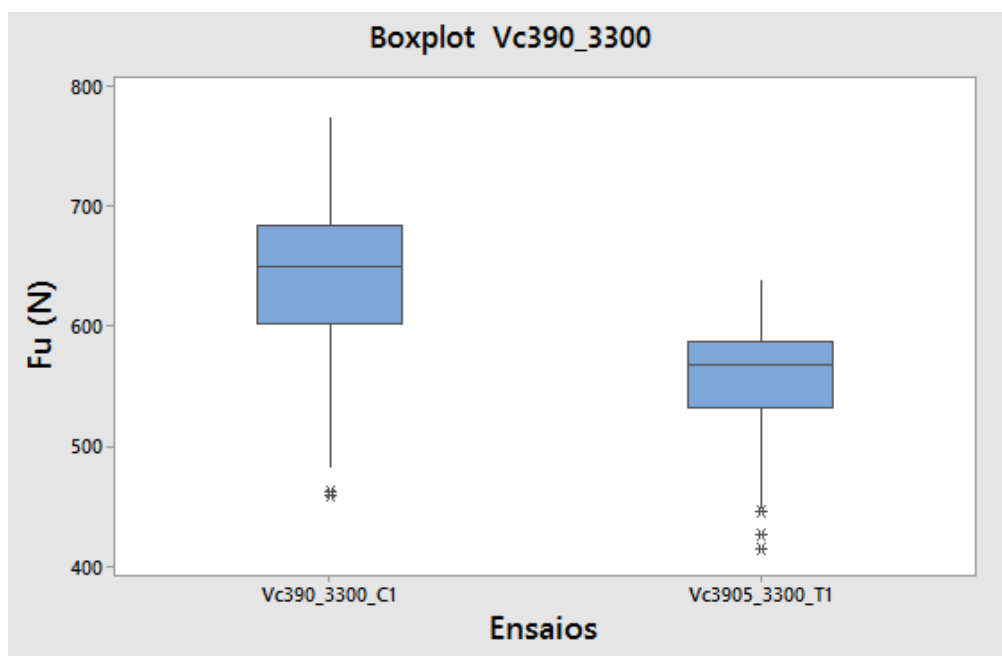


Figura 5-12 - Comparação entre os dois ensaios realizados para  $v_c$  de 390 m/min

Todos os ensaios mostraram que o inserto texturizado demandou uma força menor para a usinagem do aço ABNT 1045 em relação ao inserto comercial. Estatisticamente também foi comprovado através dos cálculos dos p-valores que resultaram em zero, significando que todas as comparações entre os valores em uma determinada faixa de comprimento (médias  $\bar{X}_C$  e  $\bar{X}_T$ ) são estatisticamente diferentes.

O coeficiente de atrito menor do inserto texturizado teve um papel importante para a diferença de força em relação ao comercial, fazendo com que a força de usinagem ficasse abaixo nas quatro velocidades de corte testadas.

### **5.1.2 Análise do desgaste de flanco $VB_B$**

A norma ISO 3685 define que o fim da vida é atingido quando uma ferramenta deixar de produzir peças de dimensões e qualidade da superfície desejada ou quando está fisicamente incapaz de realizar o corte. Na prática, o desgaste da superfície de folga da ferramenta normalmente tem efeito mais crítico sobre a qualidade das peças. Desta forma a largura do desgaste de flanco  $VB_B$  é frequentemente utilizada como critério de vida útil da ferramenta.

Foram realizados dois ensaios para cada velocidade de corte selecionada no trabalho.

#### **5.1.2.1 Velocidade de corte de 280 m/min**

A Figura 5-13 mostra o crescimento do desgaste de flanco da ferramenta no 1º ensaio de torneamento da ferramenta DNMG 150608, realizado com  $v_c = 280$  m/min,  $a_p = 1,6$  mm, e  $f = 0,25$  mm/rot. Observa-se nesta figura que o crescimento do desgaste foi mais irregular no inserto comercial e mais uniforme no inserto texturizado. Após a usinagem de 6.500 mm, o desgaste do inserto texturizado foi 26,91% menor em relação ao comercial.

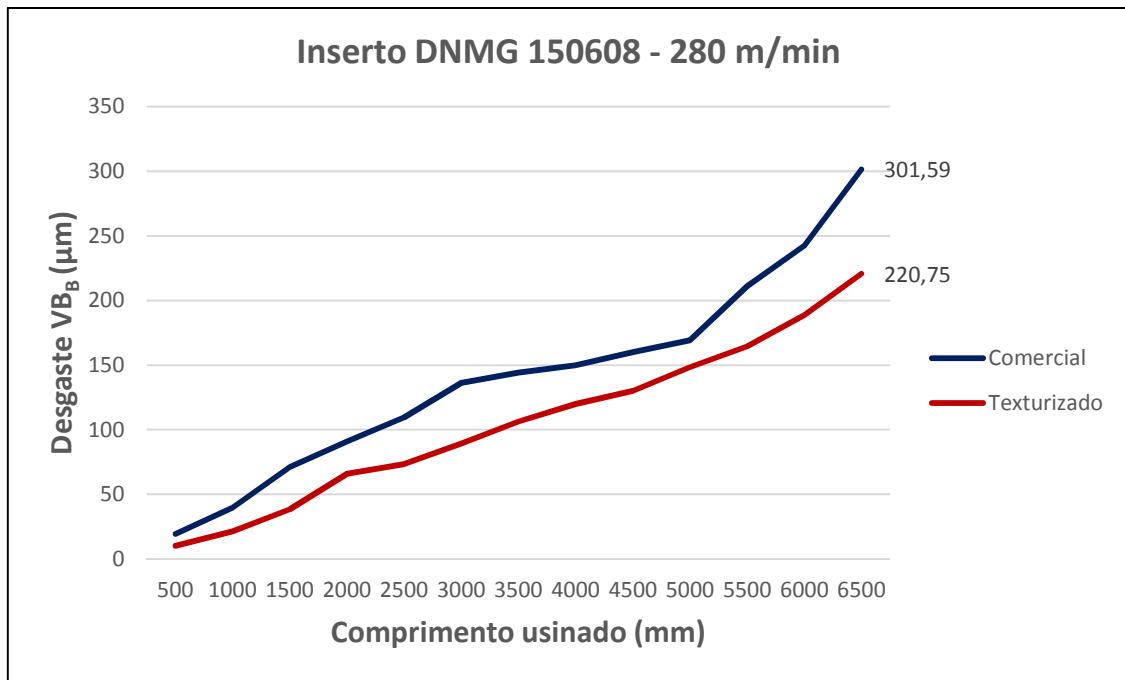


Figura 5-13 - Desgaste  $VB_B$  por comprimento usado para o 1º ensaio

A Figura 5-14 mostra o desgaste da ferramenta após 6.500 mm usinados para o inserto comercial e também para o inserto texturizado. O desgaste predominante é o de abrasão para ambos os insertos.

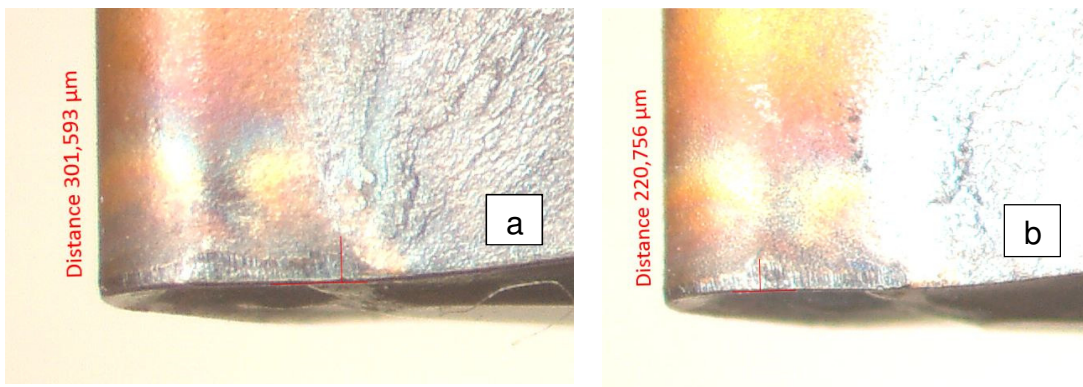


Figura 5-14 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 1º ensaio

A Figura 5-15 mostra o desgaste de flanco da ferramenta para o 2º ensaio de torneamento da ferramenta DNMG 150608, realizado com  $v_c = 280$  m/min,  $a_p = 1,6$  mm, e  $f = 0,25$  mm/rot. Para o 2º ensaio o desgaste  $VB_B$  para o inserto texturizado foi ainda menor. Após a usinagem de 6.500 mm, o desgaste do inserto texturizado foi 33,11% menor em relação ao comercial.

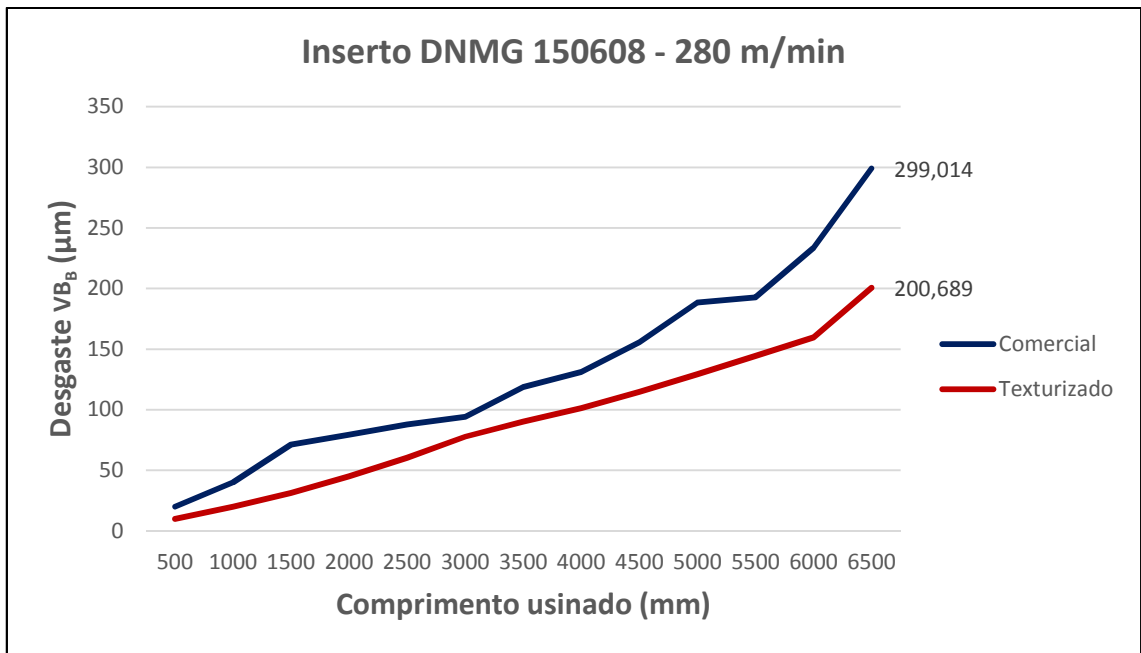


Figura 5-15 - Desgaste  $VB_B$  por comprimento usinado para o 2º ensaio

A Figura 5-16 mostra o desgaste da ferramenta após 6500 mm usinados para o 2º ensaio com o inserto comercial e também para o inserto texturizado. O desgaste predominante é o de abrasão para ambos os inserts.

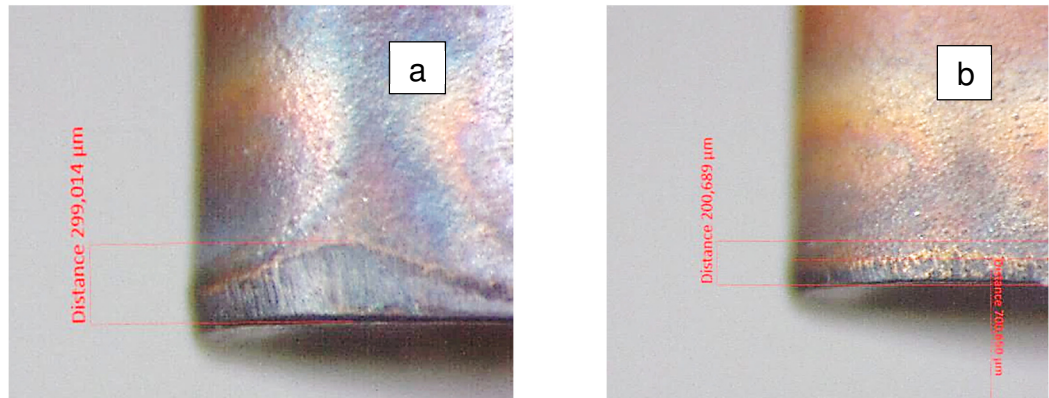


Figura 5-16 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 2º ensaio

A fim de comparar o erro padrão para os dois ensaios, foi utilizado o software Excel® para a construção da Tabela 5-9. Utilizou-se a média dos dois ensaios para o inserto comercial e para o texturizado para os cálculos do desvio padrão e para o erro padrão.

Tabela 5-5 - Tabela de erro padrão para a média dos dois ensaios

mm	MédiaC.	MédiaT.	Desv. PadC.	Desv. PadT.	Tamanho	Erro PadrãoC.	Erro PadrãoT.
500	19,625	10,045	0,530330	0,063640	2	0,3750	0,04500
1000	39,835	20,615	0,233345	0,869741	2	0,1650	0,61500
1500	71,096	34,898	0,050912	5,165415	2	0,0360	3,65250
2000	85,169	55,527	8,218702	14,811766	2	5,8115	10,47350
2500	98,746	66,821	15,265728	9,191681	2	10,7945	6,49950
3000	115,330	83,568	29,755053	7,978993	2	21,0400	5,64200
3500	131,548	98,270	18,063043	11,341993	2	12,7725	8,02000
4000	140,531	110,663	13,391188	13,205219	2	9,4690	9,33750
4500	157,818	122,377	3,085814	10,781257	2	2,1820	7,62350
5000	178,858	138,844	13,559480	13,556651	2	9,5880	9,58600
5500	201,821	154,475	13,123195	14,291335	2	9,2795	10,10550
6000	238,051	174,286	6,448107	20,582464	2	4,5595	14,55400
6500	300,302	210,720	1,821507	14,185269	2	1,2880	10,03050

A Figura 5-17 mostra a evolução do desgaste da ferramenta ao longo do comprimento usinado, com o respectivo erro padrão para a média do inserto comercial e também para o inserto texturizado. O maior erro em destaque é o da usinagem de 3.000 mm para o inserto comercial, onde houve a maior variação de desgaste para um mesmo comprimento usinado.

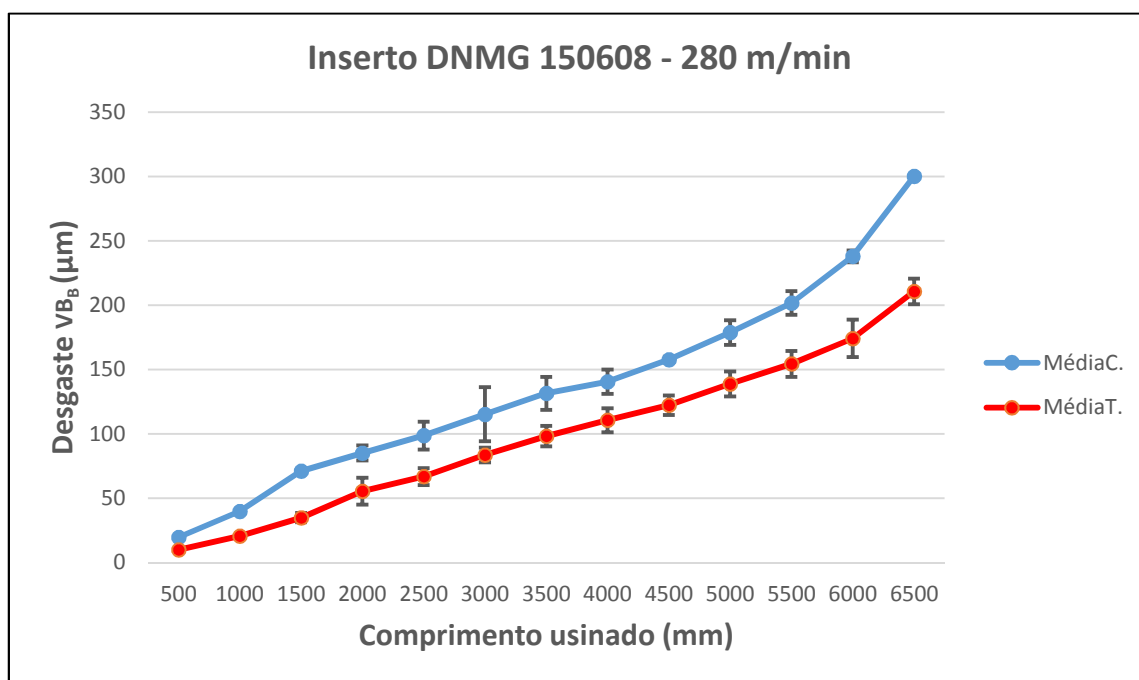


Figura 5-17 - Erro padrão para todos os ensaios com  $v_c$  de 280 m/min



### 5.1.2.2 Velocidade de corte de 315 m/min

A Figura 5-18 mostra o crescimento do desgaste de flanco da ferramenta no 1º ensaio de torneamento da ferramenta DNMG 150608, realizado com  $v_c = 315$  m/min,  $a_p = 1,6$  mm, e  $f = 0,25$  mm/rot. Após a usinagem de 5.500 mm, o desgaste final do inserto texturizado foi 33,15% menor em relação ao comercial.

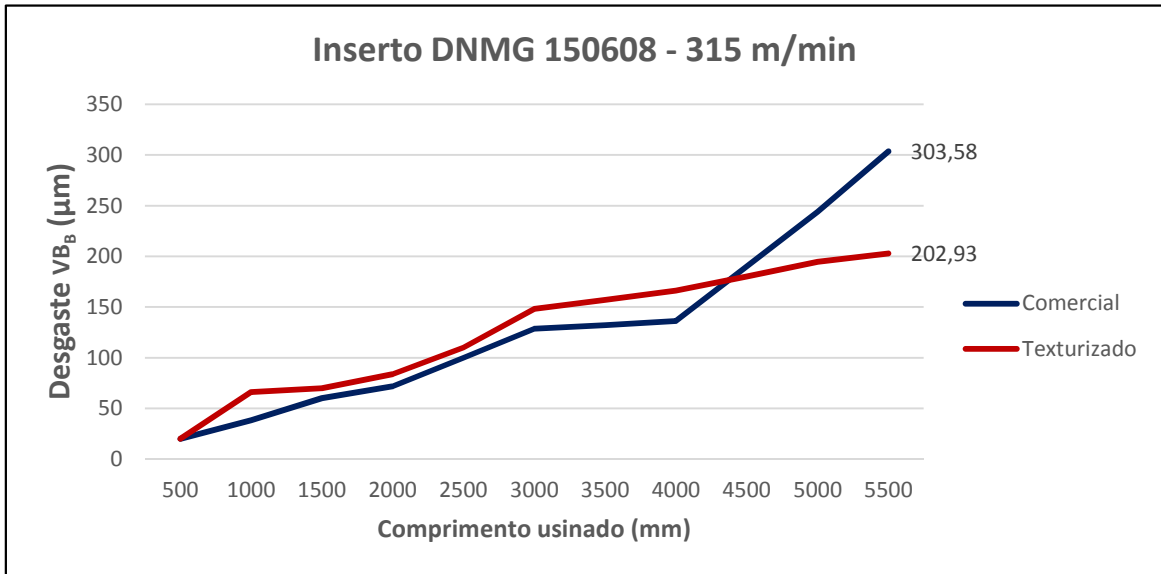


Figura 5-18 - Desgaste  $VB_B$  por comprimento usinado para o 1º ensaio

Observa-se na Figura 5-18 que o inserto comercial teve um desgaste menor até 4.500 mm usinado. A partir deste ponto, o inserto texturizado teve um desgaste menor em relação ao comercial.

A Figura 5-19 mostra o desgaste da ferramenta após 5.500 mm usinados para o inserto comercial e também para o inserto texturizado. O desgaste predominante é o de abrasão para ambos os insertos.

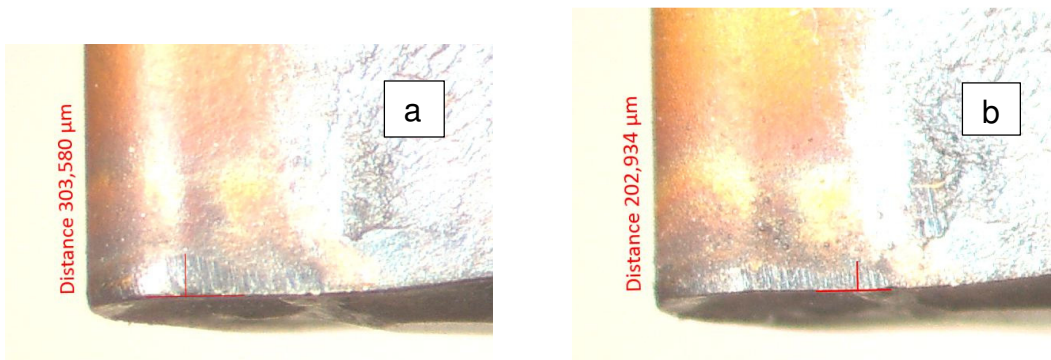


Figura 5-19 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 1º ensaio

A Figura 5-20 mostra o desgaste de flanco da ferramenta para o 2º ensaio de torneamento da ferramenta DNMG 150608, realizado com  $v_c = 315$  m/min,  $a_p = 1,6$  mm, e  $f = 0,25$  mm/rot. Para o 2º ensaio, o desgaste  $VB_B$  para o inserto texturizado foi 23,44% menor do que o inserto comercial. Os desgastes dos insertos foram muito semelhantes até 4.500 mm usinado. A partir deste ponto, o inserto texturizado teve um desgaste menor em relação ao comercial.

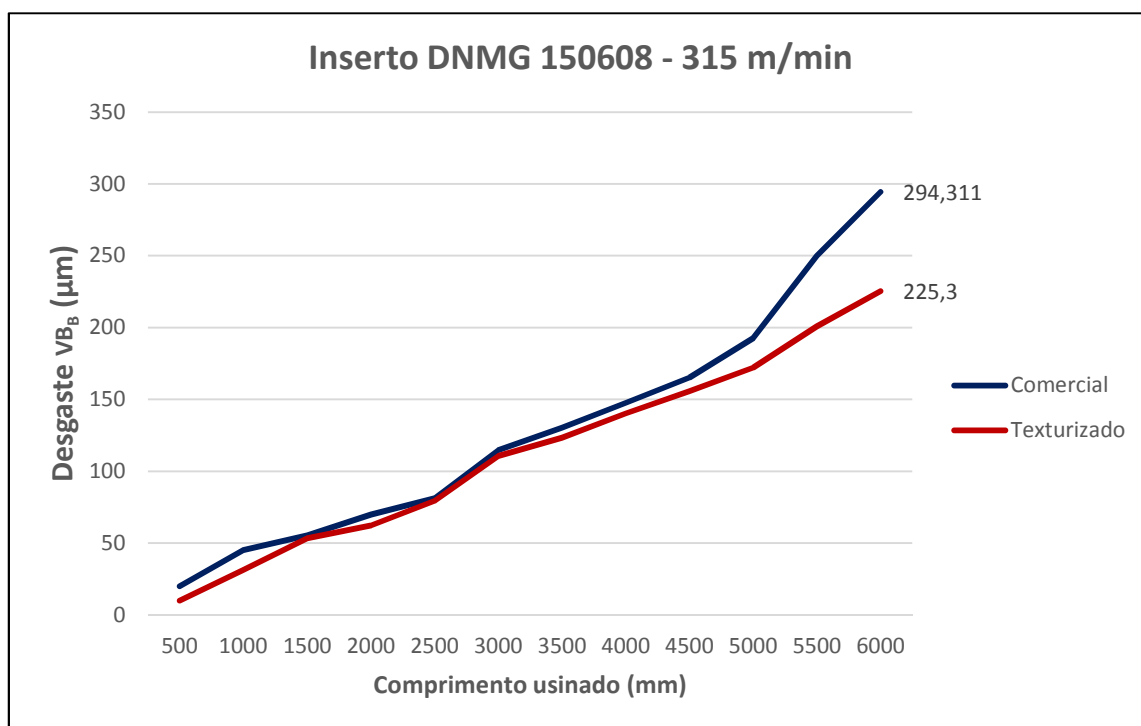


Figura 5-20 - Desgaste  $VB_B$  por comprimento usinado para o 2º ensaio

Para o 2º ensaio com velocidade de corte de 315 m/min houve a necessidade de usinar o material até 6000 mm, para atingir o desgaste  $VB_B$  de 300µm, enquanto no 1º, somente até 5.500 mm.

A Figura 5-21 mostra o desgaste da ferramenta após 6.000 mm usinado para o 2º ensaio com o inserto comercial e também para o inserto texturizado. O desgaste predominante é o de abrasão para ambos os insertos.

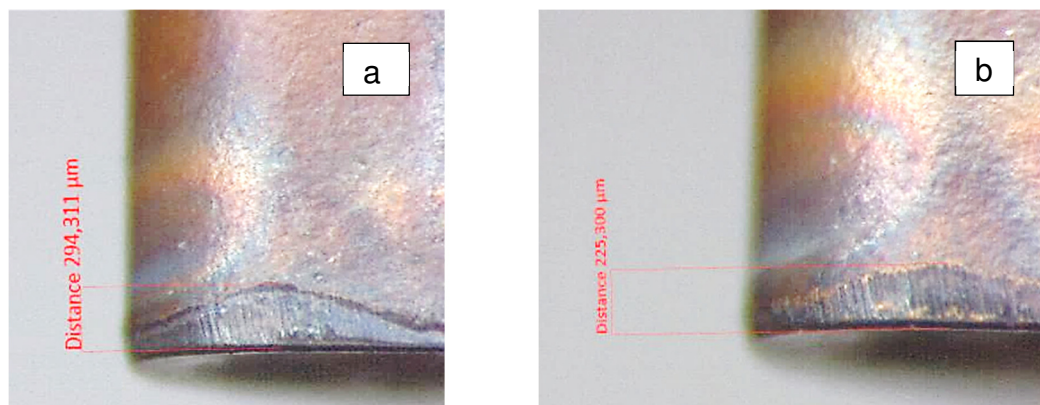


Figura 5-21 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 2º ensaio

A fim de comparar o erro padrão para os dois ensaios, foi utilizado o software Excel® para a construção da Tabela 5-10. Para comparação, utilizou-se até o comprimento usinado de 5.500 mm, pois no 1º ensaio não foi usinado até o comprimento de 6.000 mm. Utilizou-se a média dos dois ensaios para o inserto comercial e para o texturizado para os cálculos do desvio padrão e para o erro padrão.

Tabela 5-6 - Tabela de erro padrão para a média dos dois ensaios

mm	MédiaC.	MédiaT.	Desv. PadC.	Desv. PadT.	Tamanho	Erro PadrãoC.	Erro PadrãoT.
500	20,000	15,000	0,000000	7,071068	2	0,0000	5,0000
1000	41,777	48,679	4,633671	24,651864	2	3,2765	17,4315
1500	57,662	61,622	3,306431	11,848281	2	2,3380	8,3780
2000	70,834	73,102	1,536543	15,199967	2	1,0865	10,7480
2500	90,623	94,678	13,261788	21,668580	2	9,3775	15,3220
3000	121,650	129,465	9,857776	26,594286	2	6,9705	18,8050
3500	131,129	140,105	1,231780	23,893138	2	0,8710	16,8950
4000	141,871	153,336	7,963437	18,405282	2	5,6310	13,0145
4500	177,607	167,818	17,526349	17,227950	2	12,3930	12,1820
5000	218,269	183,319	36,445698	15,911317	2	25,7710	11,2510
5500	276,725	201,831	37,978705	1,554928	2	26,8550	1,0995

A Figura 5-22 mostra a evolução do desgaste da ferramenta ao longo do comprimento usinado, com o respectivo erro padrão para a média do inserto comercial e também para o inserto texturizado. Os maiores erros em destaque são para usinagem de 5.000 mm e 5.500 mm para o inserto comercial, onde houve a maior variação de desgaste para um mesmo comprimento usinado.

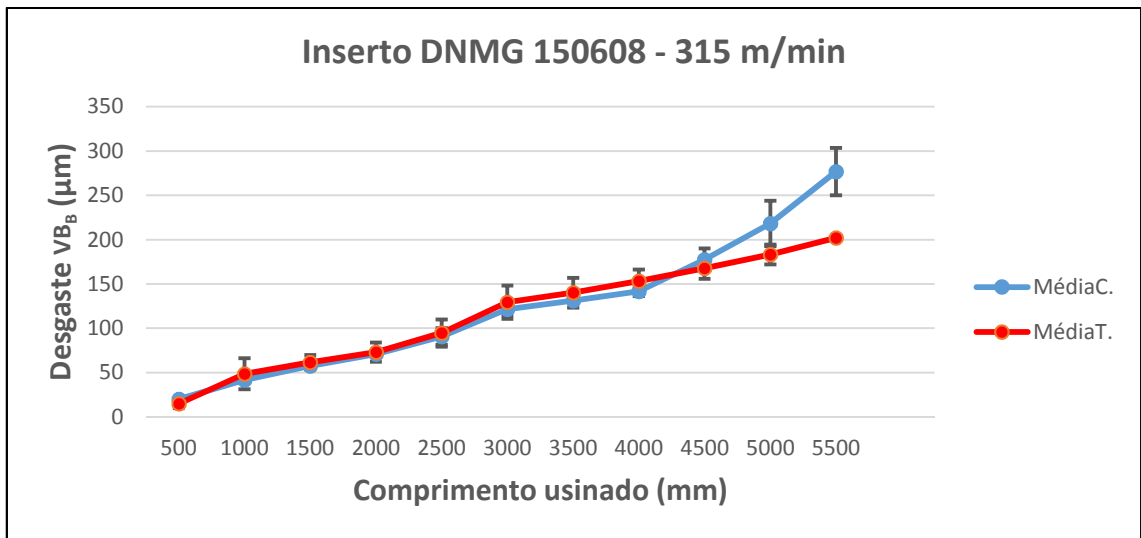


Figura 5-22 - Erro padrão para todos os ensaios com  $v_c$  de 315 m/min

### 5.1.2.3 Velocidade de corte de 350 m/min

A Figura 5-23 mostra o crescimento do desgaste de flanco da ferramenta no 1º ensaio de torneamento da ferramenta DNMG 150608, realizado com  $v_c = 350$  m/min,  $a_p = 1,6$  mm, e  $f = 0,25$  mm/rot. Após a usinagem de 4000 mm, o desgaste do inserto texturizado foi 28,83% menor em relação ao comercial.

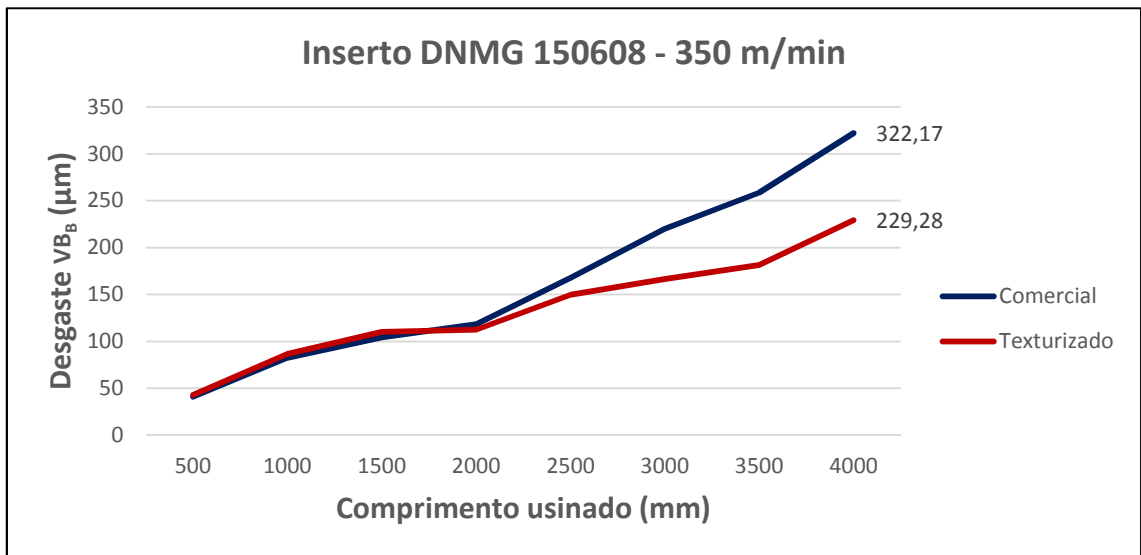


Figura 5-23 - Desgaste  $VB_B$  por comprimento usinado para o 1º ensaio

Observa-se na Figura 5-23 que o inserto comercial teve um desgaste igual até 2.000 mm usinado. A partir deste ponto, o inserto texturizado teve um desgaste menor em relação ao comercial.

A Figura 5-24 mostra o desgaste da ferramenta após 4.000 mm usinados para o inserto comercial e também para o inserto texturizado. O desgaste predominante é o de abrasão para ambos os insertos.

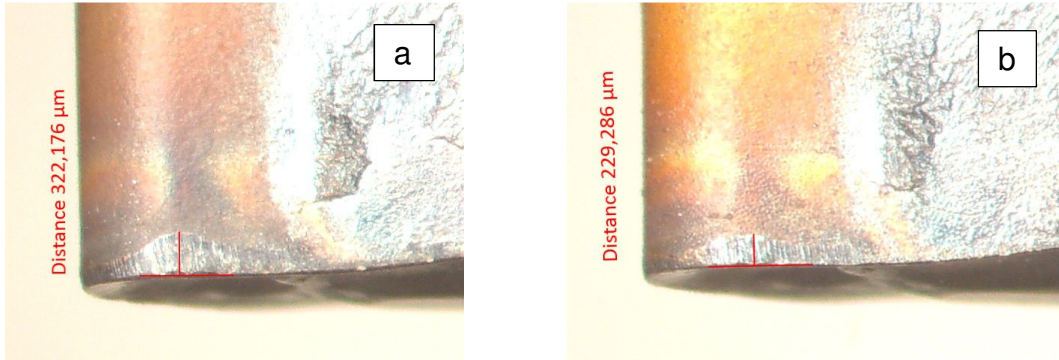


Figura 5-24 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 1º ensaio

A Figura 5-25 mostra o desgaste de flanco da ferramenta para o 2º ensaio de torneamento da ferramenta DNMG 150608, realizado com  $v_c = 350$  m/min,  $a_p = 1,6$  mm, e  $f = 0,25$  mm/rot. Para o 2º ensaio, o desgaste  $VB_B$  para o inserto texturizado foi 54,65% menor do que o inserto comercial. Os desgastes dos insertos foram muito diferentes desde o começo da usinagem, com predominância de desgaste sempre maior para o inserto comercial.

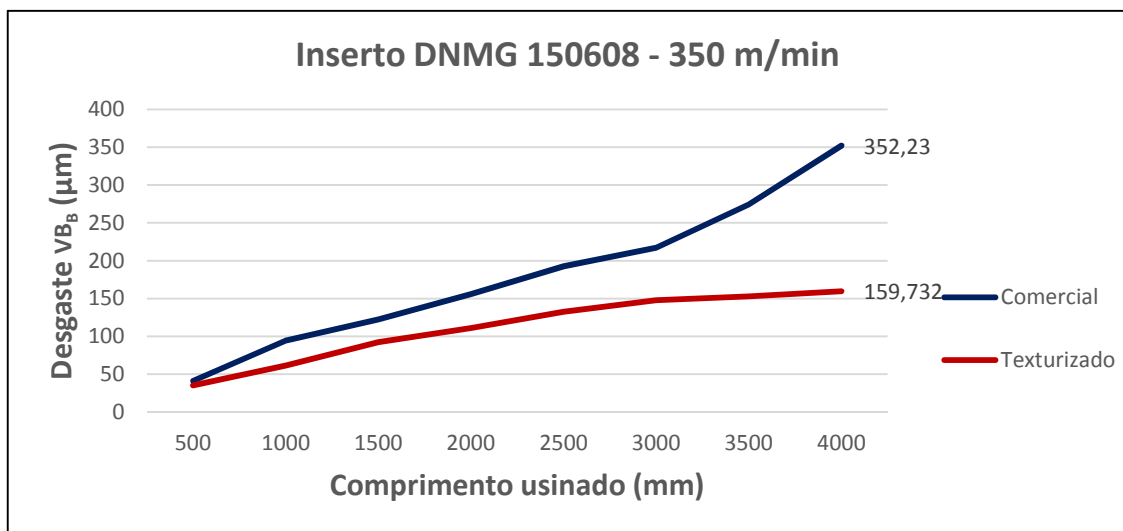


Figura 5-25 - Desgaste  $VB_B$  por comprimento usinado para o 2º ensaio

A Figura 5-26 mostra o desgaste da ferramenta após 4.000 mm usinado para o 2º ensaio com o inserto comercial e também para o inserto texturizado.

Observa-se que o inserto texturizado teve um desgaste menor em relação a outras velocidades de corte, com valor de desgaste de apenas 159  $\mu\text{m}$ . O desgaste predominante é o de abrasão para ambos os insertos.

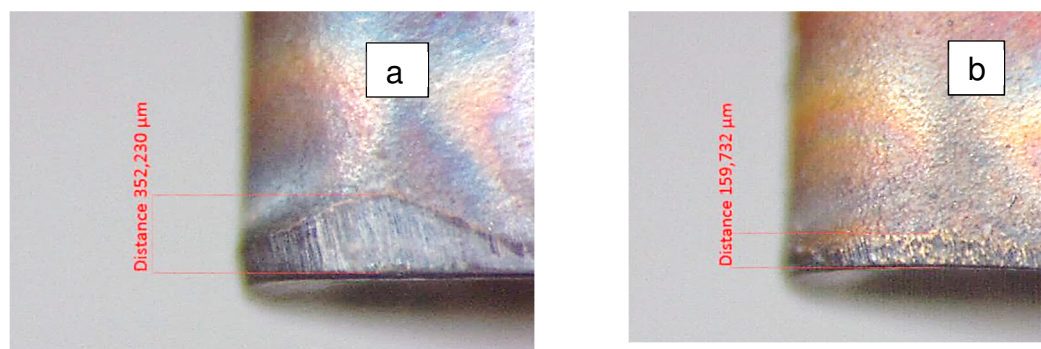


Figura 5-26 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 2º ensaio

A fim de comparar o erro padrão para os dois ensaios, foi utilizado o software Excel para a construção da Tabela 5-11. Utilizou-se a média dos dois ensaios para o inserto comercial e para o texturizado para os cálculos do desvio padrão e para o erro padrão.

Tabela 5-7 - Tabela de erro padrão para a média dos dois ensaios

mm	MédiaC.	MédiaT.	Desv. PadC.	Desv. PadT.	Tamanho	Erro PadrãoC.	Erro PadrãoT.
500	41,0000	39,0000	0,000000	5,656854	2	0,0000	4,0000
1000	88,3505	74,0825	8,273856	17,886266	2	5,8505	12,6475
1500	113,3740	101,2375	12,563873	12,547610	2	8,8840	8,8725
2000	137,0700	111,6400	26,332657	1,385929	2	18,6200	0,9800
2500	180,1555	141,2460	17,515742	12,153751	2	12,3855	8,5940
3000	218,5360	157,0610	2,070409	13,278051	2	1,4640	9,3890
3500	266,5170	167,0675	11,337750	20,410637	2	8,0170	14,4325
4000	337,2000	194,5060	21,255630	49,177862	2	15,0300	34,7740

A Figura 5-27 mostra a evolução do desgaste da ferramenta ao longo do comprimento usinado, com o respectivo erro padrão para a média do inserto comercial e também para o inserto texturizado. Os maiores erros em destaque são para usinagem de 2.000 mm no inserto comercial e 4.000 mm para o inserto texturizado, onde houve a maior variação de desgaste para um mesmo comprimento usinado.

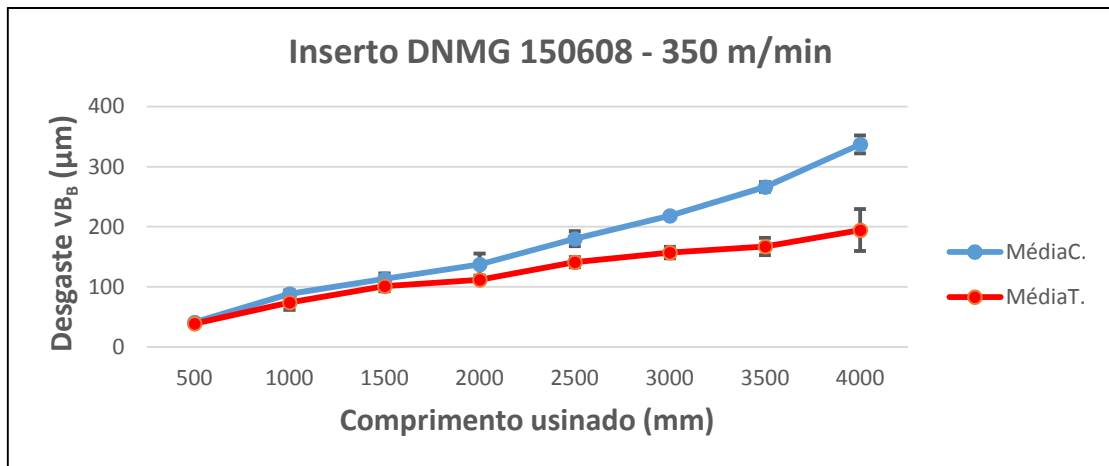


Figura 5-27 - Erro padrão para todos os ensaios com  $v_c$  de 350 m/min

#### 5.1.2.4 Velocidade de corte de 390 m/min

A Figura 5-28 mostra o crescimento do desgaste de flanco da ferramenta no 1º ensaio de torneamento da ferramenta DNMG 150608, realizado com  $v_c = 390$  m/min,  $a_p = 1,6$  mm, e  $f = 0,25$  mm/rot. Após a usinagem de 3.300 mm, o desgaste do inserto texturizado foi 25,19% menor em relação ao comercial.

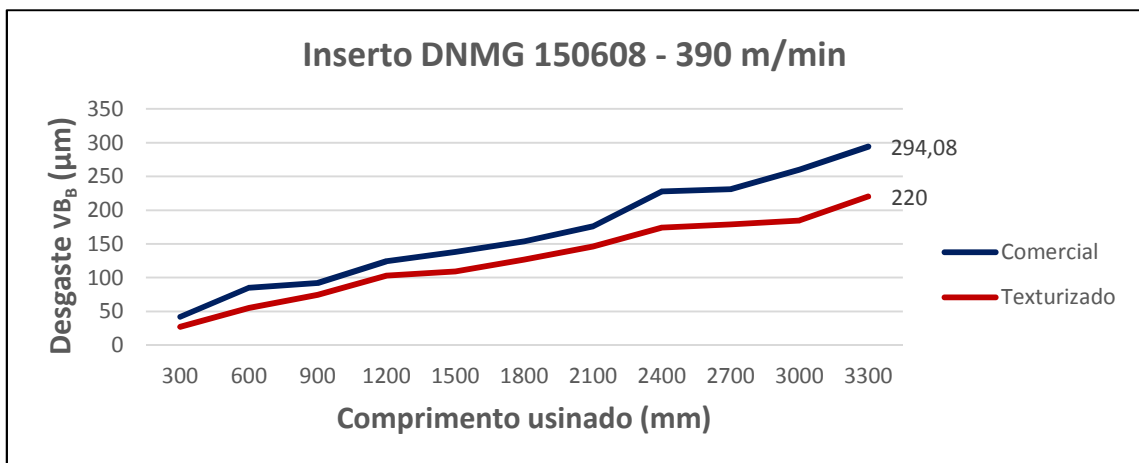


Figura 5-28 - Desgaste  $VB_B$  por comprimento usado para o 1º ensaio

Observa-se na Figura 5-28 que para a  $v_c$  de 390m/min, o inserto comercial sempre obteve um desgaste maior em relação ao inserto texturizado para todas as faixas do comprimento usado.

A Figura 5-29 mostra o desgaste da ferramenta após 3.300 mm usados para o inserto comercial e também para o inserto texturizado. O desgaste predominante é o de abrasão para ambos os inserts.



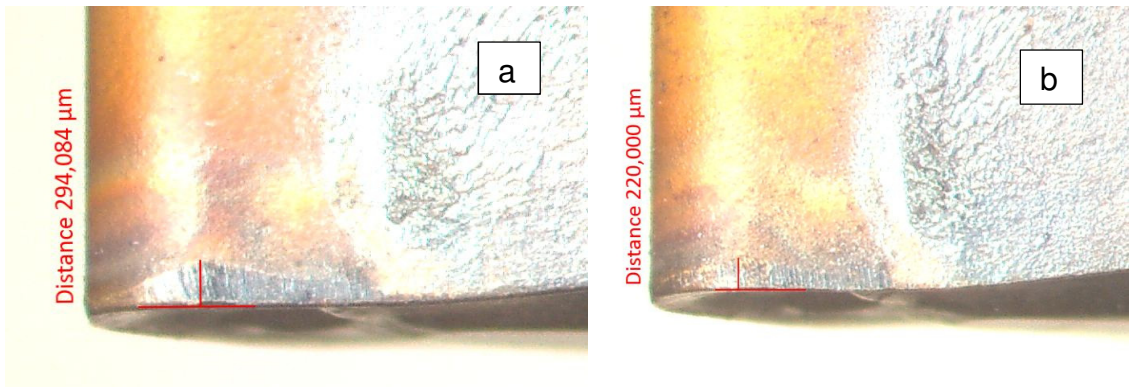


Figura 5-29 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 1º ensaio

A Figura 5-30 mostra o desgaste de flanco da ferramenta para o 2º ensaio de torneamento da ferramenta DNMG 150608, realizado com  $v_c = 390$  m/min,  $a_p = 1,6$  mm, e  $f = 0,25$  mm/rot. Para o 2º ensaio, o desgaste  $VB_B$  para o inserto texturizado foi 32,93% menor do que o inserto comercial. Observa-se na figura que o inserto comercial teve um desgaste menor até 1.800 mm usinado. A partir deste ponto, o inserto texturizado teve um desgaste menor em relação ao comercial.

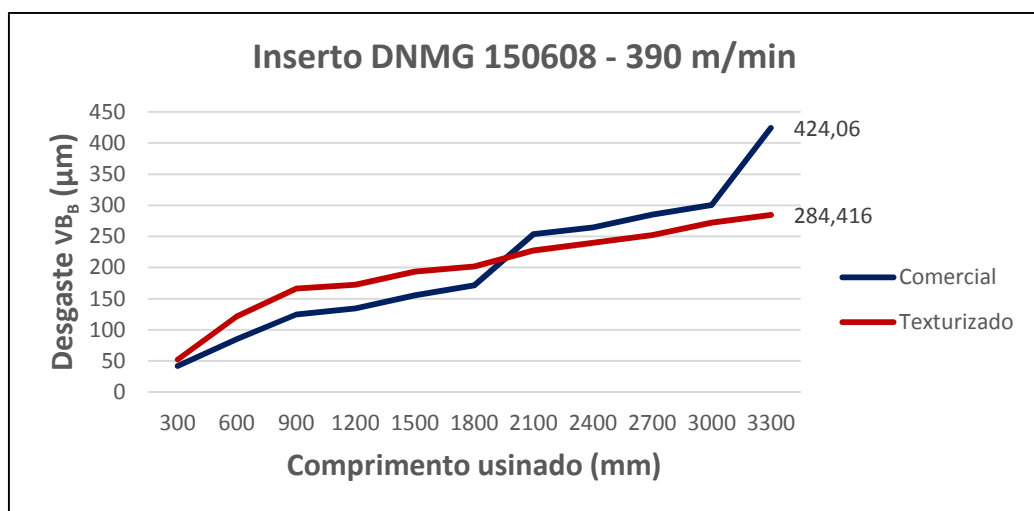


Figura 5-30 - Desgaste  $VB_B$  por comprimento usinado para o 2º ensaio

Observa-se na Figura 5-30 uma discrepância muito grande da medida do inserto comercial em relação ao texturizado, fato este, devido ao desgaste excessivo da ponta de ferramenta na usinagem da distância de 3.300 mm.



A Figura 5-31 mostra o desgaste da ferramenta após 3.300 mm usinado para o 2º ensaio com o inserto comercial e também para o inserto texturizado. O desgaste predominante é o de abrasão para ambos os inserts.

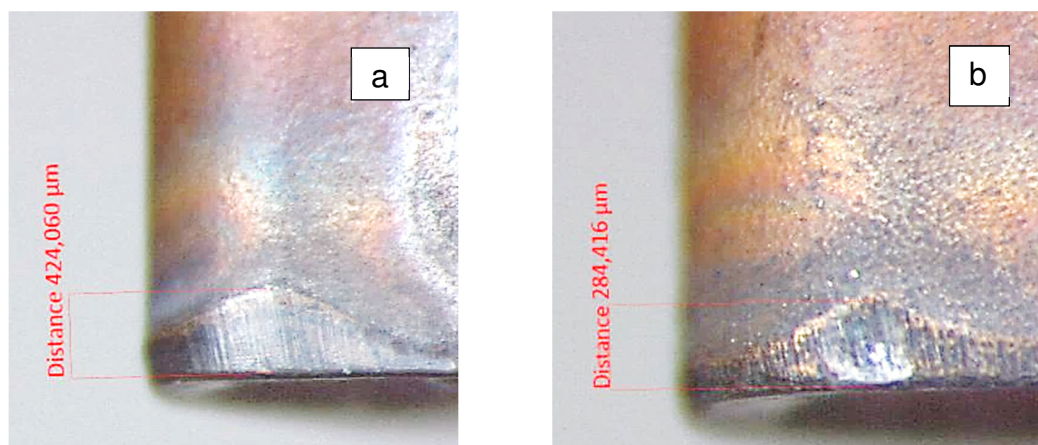


Figura 5-31 - Desgaste final para o inserto comercial (a) e texturizado (b), 2º ensaio

A fim de comparar o erro padrão para os dois ensaios, foi utilizado o software Excel para a construção da Tabela 5-12. Utilizou-se a média dos dois ensaios para o inserto comercial e para o texturizado para os cálculos do desvio padrão e para o erro padrão.

Tabela 5-8 - Tabela de erro padrão para a média dos dois ensaios

mm	MédiaC.	MédiaT.	Desv. PadC.	Desv. PadT.	Tamanho	Erro PadrãoC.	Erro PadrãoT.
300	42,000000	39,684500	0,0000	17,9386	2	0,0000	12,6845
600	85,070000	88,284000	0,0000	47,0707	2	0,0000	33,2840
900	108,324500	120,609500	22,7328	64,8976	2	16,0745	45,8895
1200	129,366500	137,823500	6,9247	48,8377	2	4,8965	34,5335
1500	146,865000	151,541500	12,1410	59,5405	2	8,5850	42,1015
1800	162,606500	164,256500	12,1714	52,9291	2	8,6065	37,4265
2100	214,880000	186,998000	54,9846	57,3435	2	38,8800	40,5480
2400	245,945500	207,137500	25,9869	46,2412	2	18,3755	32,6975
2700	257,940000	215,412500	38,0989	51,5799	2	26,9400	36,4725
3000	280,174500	228,439500	28,5593	61,9277	2	20,1945	43,7895
3300	359,070000	252,208000	91,9097	45,5490	2	64,9900	32,2080

A Figura 5-32 mostra a evolução do desgaste da ferramenta ao longo do comprimento usinado, com o respectivo erro padrão para a média do inserto comercial e também para o inserto texturizado. Os desgastes de ambos os

insertos foram maiores no segundo ensaio, gerando uma barra de erro para todos os pontos do inserto texturizado e para a maioria dos pontos do inserto comercial.

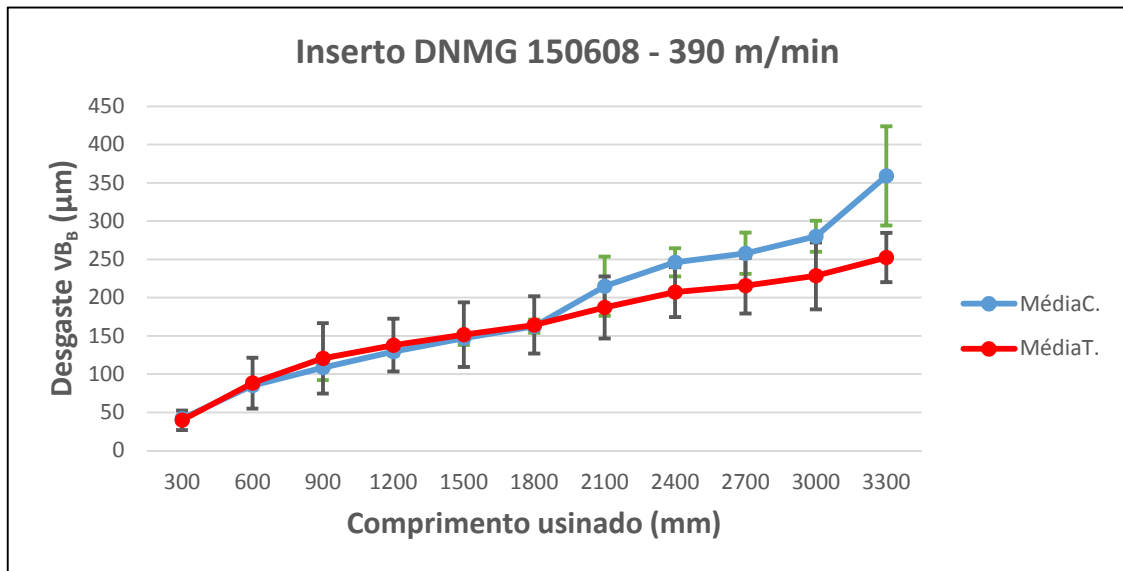


Figura 5-32 - Erro padrão para todos os ensaios com  $v_c$  de 390 m/min

Todos os ensaios realizados mostraram que o inserto texturizado por eletroerosão teve um desgaste menor em relação ao inserto comercial. O coeficiente de atrito teve um papel preponderante para este resultado, visto que os testes da força de usinagem corroboram com os resultados obtidos nos testes de desgaste do inserto.

Outro ponto que deve ser levado em conta, é a aderência do revestimento do inserto texturizado ser maior do que a do inserto comercial, provocado pela forma particular de fragmentação dos revestimentos nos substratos, demonstrando que a modificação prévia do substrato pela texturização por EDM, cria uma textura que propicia um ancoramento mecânico mais efetivo dos revestimentos em relação à textura obtida pelo escovamento, resultando em uma maior durabilidade do inserto.

#### 5.1.2.5 Análise do desgaste $VB_B$ da aresta de corte

Para cada ensaio realizado em uma determinada velocidade de corte, as diferenças de desgaste foram analisadas e colocadas em um gráfico do Excel para melhor visualização. Em todos os ensaios, o inserto texturizado teve um

desgaste menor em relação ao inserto comercial. A Figura 5-33 mostra estas diferenças de acordo com a velocidade de corte utilizada e o número do ensaio. Para os ensaios de torneamento, o inserto texturizado por eletroerosão teve um desgaste menor de 28% para o primeiro ensaio e 36% para o segundo em relação ao inserto comercial nas médias de todas as velocidades de corte.

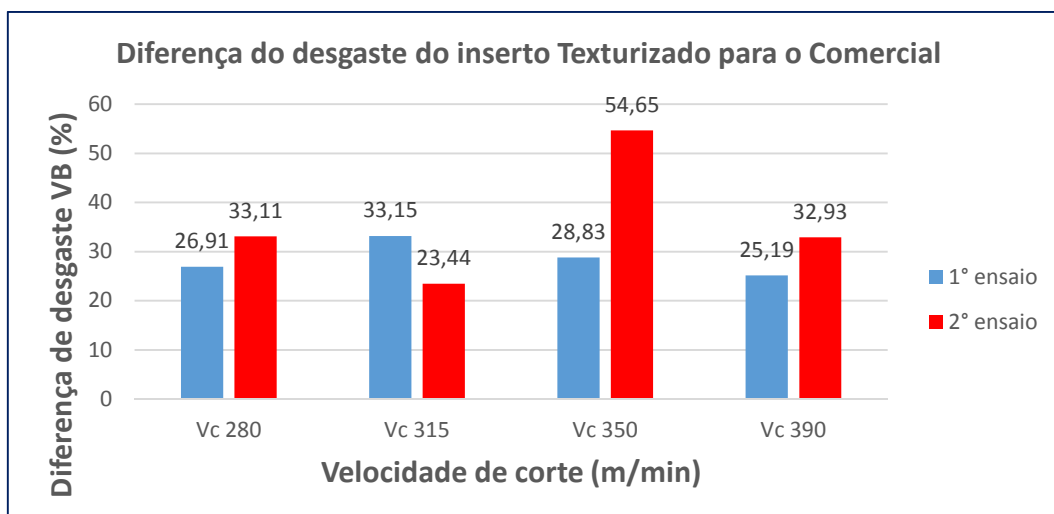


Figura 5-33 - Valores da diferença de desgaste em função da velocidade de corte

### 5.1.3 Ensaio de indentação Rockwell

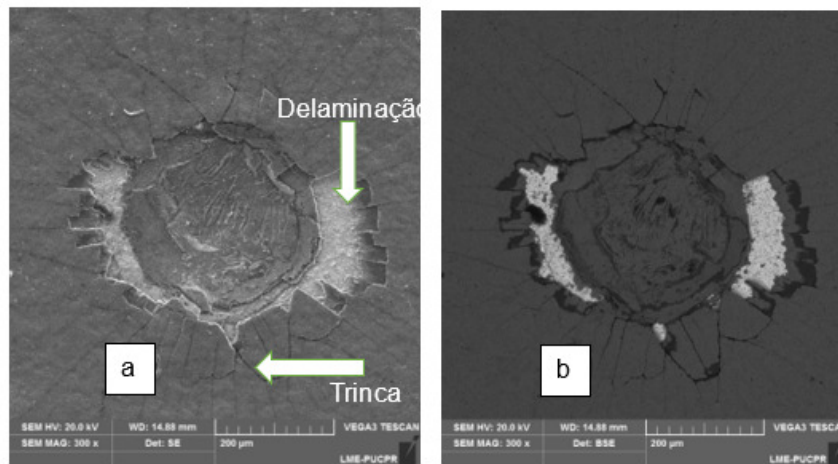
Para realizar as análises de adesão pelos testes de indentação e riscamento, primeiramente foi medida a espessura dos revestimentos e a dureza do substrato, pois estas medidas são requisitos para que o teste seja realizado de acordo com suas normas, sendo as medidas mostradas no item 4.5.

As imagens das indentações possibilitaram a comparação da aderência do inserto comercial com o texturizado. Todas as imagens reais das indentações foram classificadas comparando-as com o padrão HF da Figura 2-27.

As durezas dos insertos foram medidas e a média de duas medições resultou na dureza de 70 HRC para o inserto texturizado e 72 HRC para o inserto comercial.

Foram executados dois ensaios de indentação para o inserto texturizado e para o comercial. Posteriormente as imagens foram analisadas via microscopia eletrônica (MEV) e análise EDS. Na Figura 5-34 verifica-se o 1º ensaio de

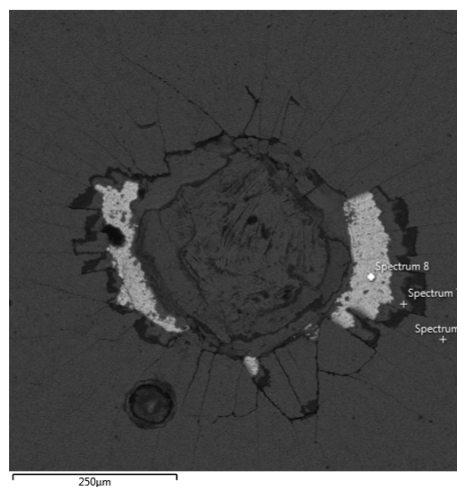
indentação para o inserto comercial. A imagem (a) mostra as delaminações e as trincas que ocorreram após a indentação. A imagem (b) é uma cópia da (a), mas com o BSE (backscattering – retro espalhamento de elétrons) ativo. Esta imagem é útil para a aplicação do EDS e para à análise da cobertura e do substrato que aparece na figura após a delaminação.



*Figura 5-34 - Ensaio de indentação para o inserto comercial (1º ensaio)*

De acordo com a Norma VDI 3198 pode-se comparar as delaminações com o padrão HF4 da norma.

A Figura 5-35 mostra as três áreas que apareceram após a indentação da amostra. Com o BSE ativo, foi possível identificar os elementos químicos das áreas via EDS.



*Figura 5-35 - Detalhe das áreas analisadas pelo EDS*

A Figura 5-36 mostra os elementos químicos presentes no ponto Spectrum 6 da amostra analisada. Este ponto está na superfície, onde o nitreto de titânio (TiN) é a última camada de cobertura do inserto. Os elementos químicos que aparecem em maior quantidade são justamente o titânio (Ti) com 54,9% e o nitrogênio (N) com 19,2%. Observa-se ainda porcentagens menores de oxigênio e alumínio, que são responsáveis pela camada intermediária da cobertura, o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

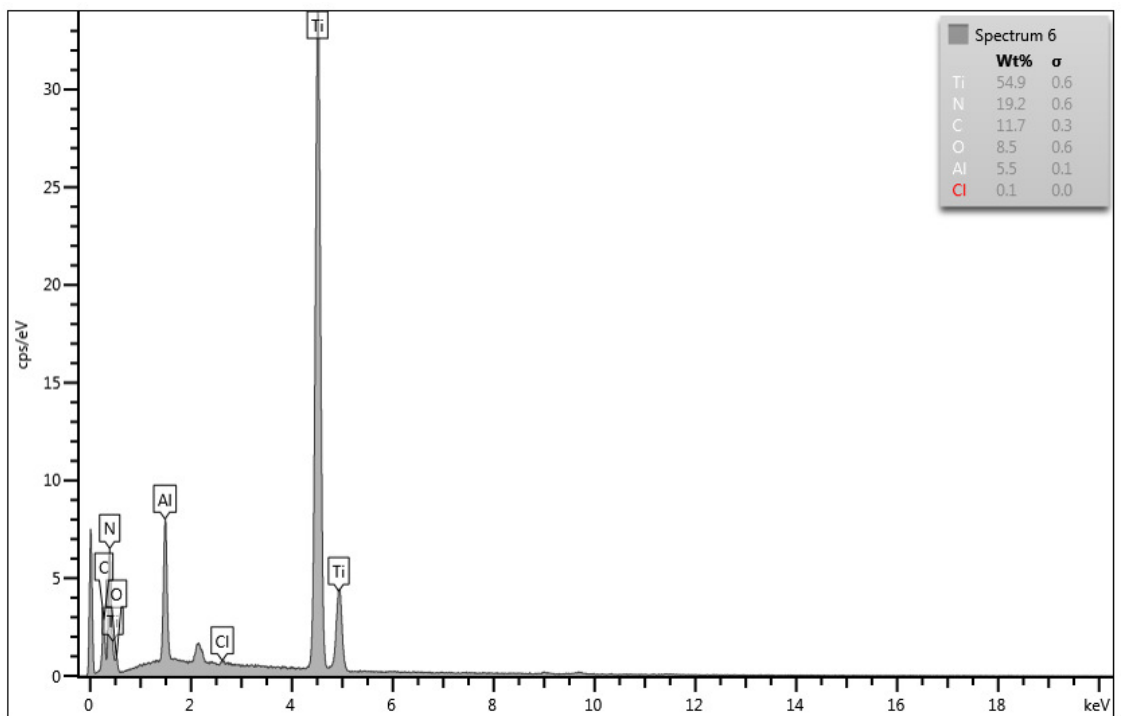


Figura 5-36 - Mapa dos componentes químicos no spectrum 6 da amostra

A Figura 5-37 mostra os elementos químicos presentes no ponto Spectrum7 da amostra analisada. Este ponto está sob o substrato, no qual o carbonitreto de titânio (TiCN) é a primeira cobertura colocada pelo processo de CVD no metal duro. Os elementos químicos que aparecem em maior quantidade são justamente o titânio (Ti) com 82,8% e o carbono (C) com 17,2%. O nitrogênio (N) não apareceu em quantidade suficiente para ter um destaque no mapa de componentes químicos.

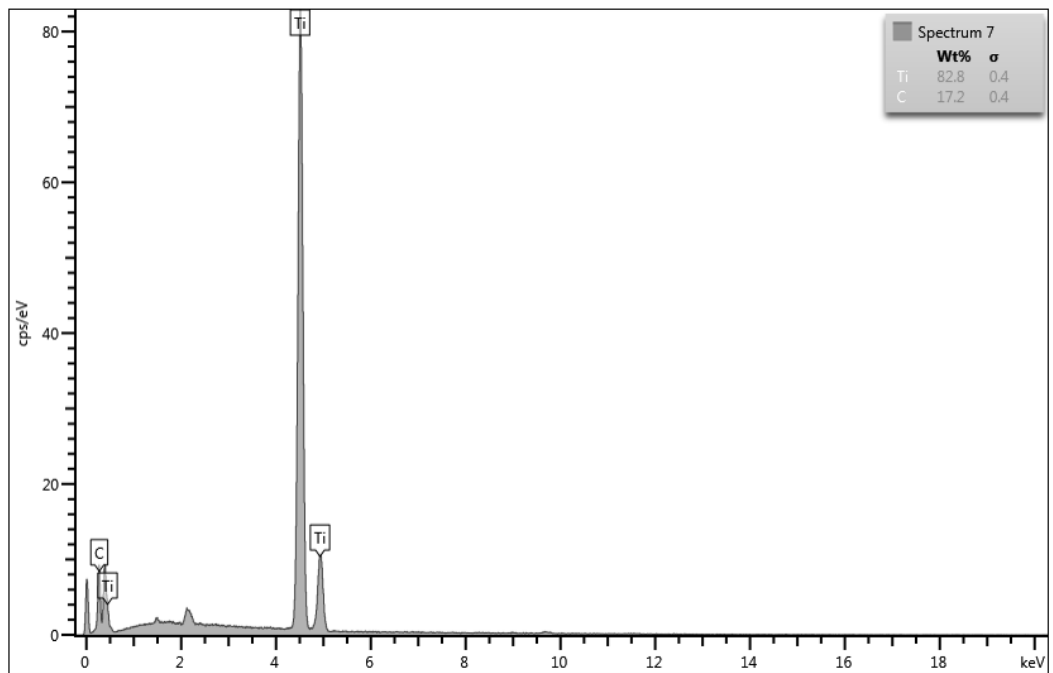


Figura 5-37 - Mapa dos componentes químicos no spectrum 7 da amostra

A Figura 5-38 mostra os elementos químicos presentes no ponto Spectrum8 da amostra analisada. Este ponto é o substrato (metal duro), que é composto do tungstênio (W) com 54,1% e do cobalto (Co) com 27,8%.

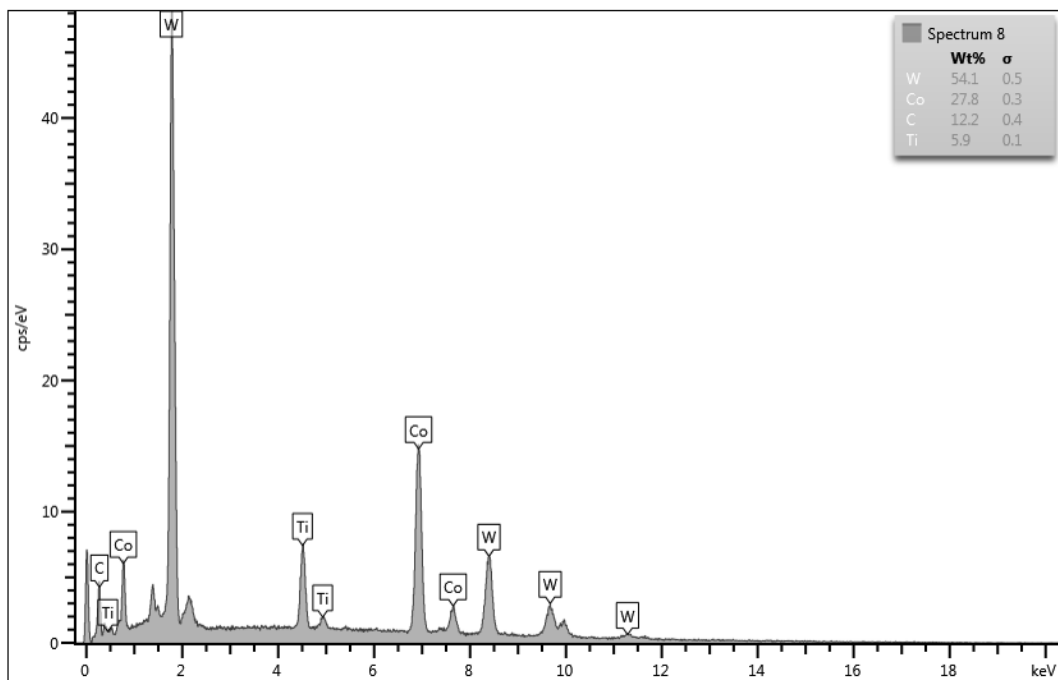
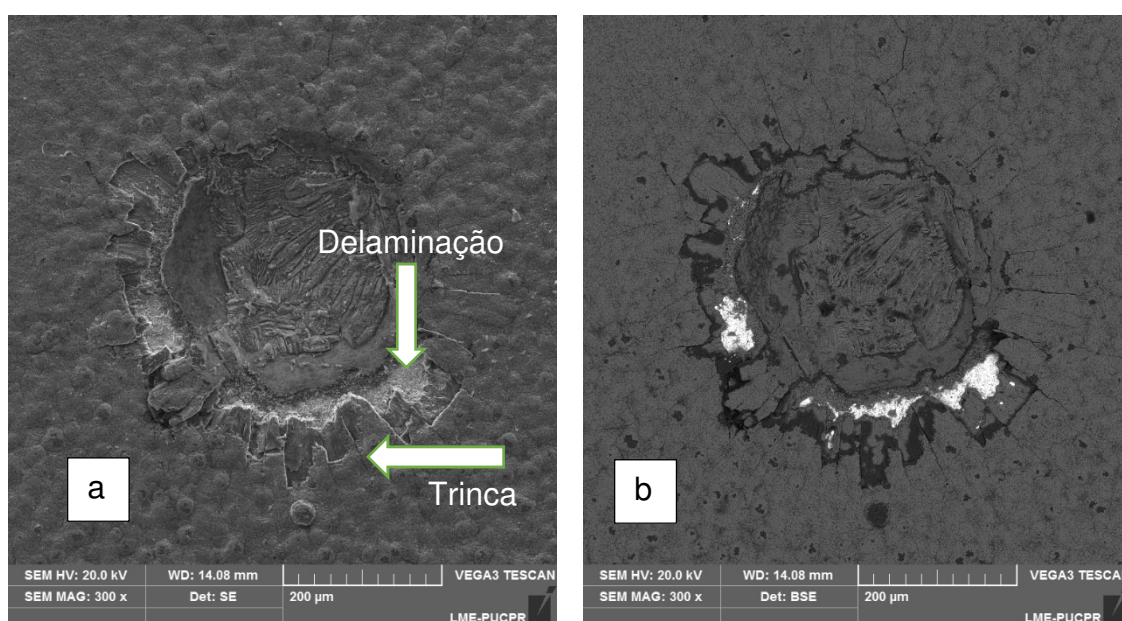


Figura 5-38 - Mapa dos componentes químicos no spectrum 8 da amostra

Para a comparação com o ensaio de indentação realizado no inserto comercial, foi feito o mesmo ensaio no inserto texturizado, sendo obedecido a mesma norma.

A Figura 5-39 mostra o 1º ensaio de indentação para o inserto texturizado. A imagem (a) mostra as delaminações e as trincas que ocorreram após a indentação. A imagem (b) é uma cópia da (a), mas com o BSE (backscattering – retro espalhamento de elétrons) ativo. Assim como no ensaio do inserto comercial, houve a aplicação do EDS para à análise da cobertura e do substrato que aparece na figura após a delaminação.



*Figura 5-39 - Ensaio de indentação para o inserto texturizado (1º ensaio)*

De acordo com a Norma VDI 3198 pode-se comparar as delaminações com o padrão HF3 da norma.

As comparações entre os ensaios do inserto comercial e do inserto texturizado são mostradas no final deste subcapítulo.

A Figura 5-40 mostra as três áreas que apareceram após a indentação da amostra. Com o BSE ativo, foi possível identificar os elementos químicos das áreas via análise por EDS.



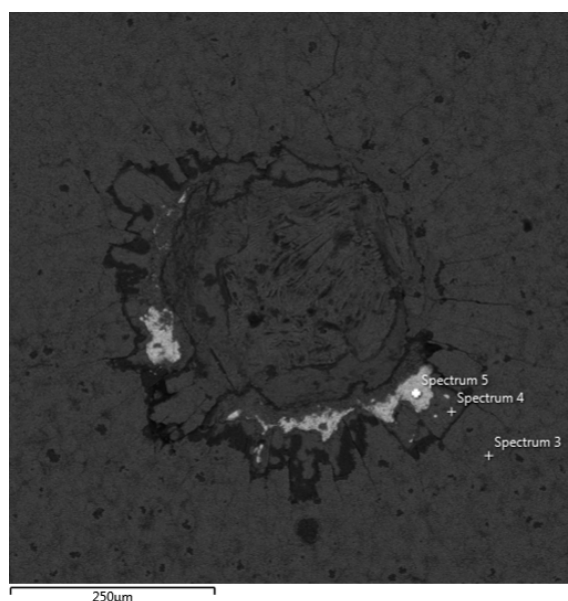


Figura 5-40 - Detalhe das áreas analisadas pelo EDS

A Figura 5-41 mostra os elementos químicos presentes no ponto Spectrum3 da amostra analisada. Este ponto está na superfície, onde o nitreto de titânio (TiN) é a última camada de cobertura do inserto. Os elementos químicos que aparecem são o titânio (Ti) com 57,1% e o nitrogênio (N) com 9,7%. Observa-se ainda porcentagens de oxigênio com 13,6% e pequena de alumínio, que são responsáveis pela camada intermediária da cobertura, o  $Al_2O_3$ .

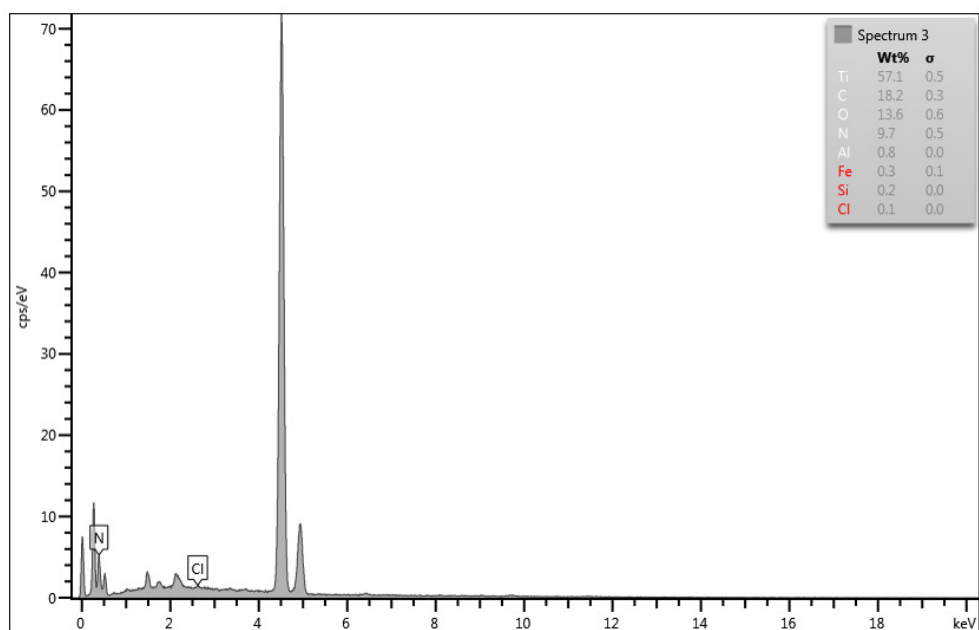


Figura 5-41 - Mapa dos componentes químicos no spectrum 3 da amostra



A Figura 5-42 mostra os elementos químicos presentes no ponto Spectrum4 da amostra analisada. Este ponto está sob o substrato, no qual o carbonitreto de titânio (TiCN) é a primeira cobertura colocada pelo processo de CVD no metal duro. Os elementos químicos que aparecem em maior quantidade são justamente o titânio (Ti) com 66,6% e o carbono (C) com 16,5%. Observa-se ainda porcentagens de oxigênio com 15,7% e pequena de alumínio, que são responsáveis pela camada intermediária da cobertura, o  $Al_2O_3$ . Diferente da análise do inserto comercial, nesta, a alumina ( $Al_2O_3$ ) apareceu sob o carbonitreto de titânio e abaixo do nitreto de titânio. O nitrogênio (N) não apareceu em quantidade suficiente para ter um destaque no mapa de componentes químicos.

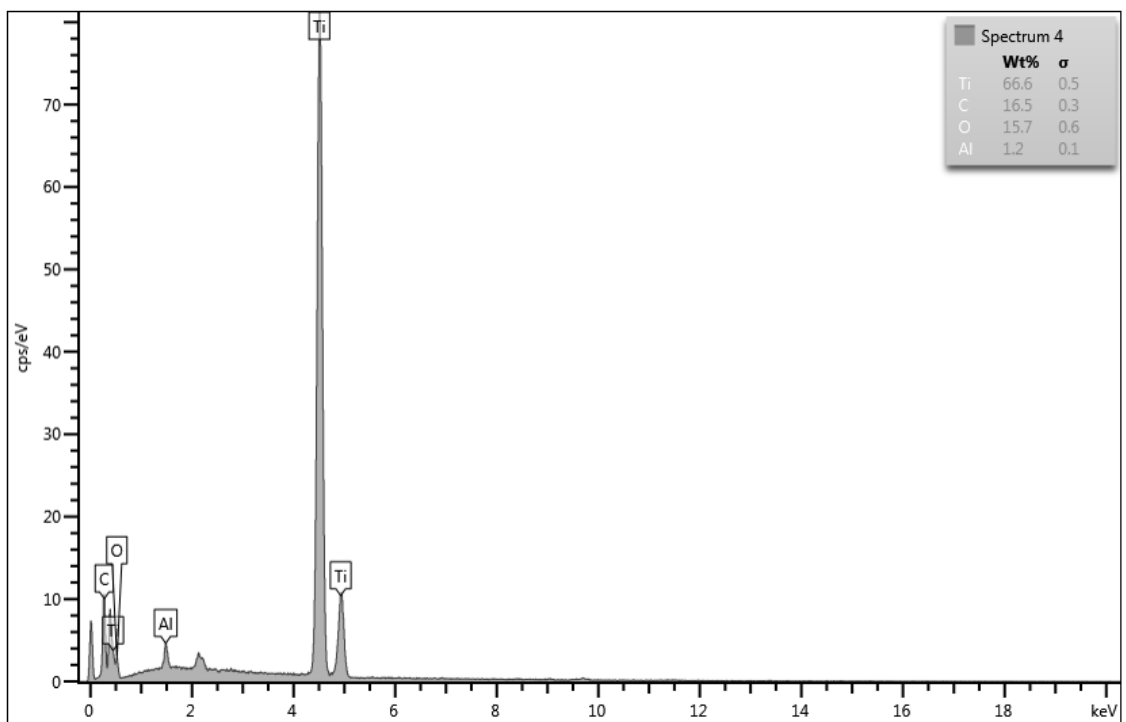


Figura 5-42 - Mapa dos componentes químicos no spectrum 4 da amostra

A Figura 5-43 mostra os elementos químicos presentes no ponto Spectrum5 da amostra analisada. Este ponto é o substrato (metal duro), que é composto do tungstênio (W) com 74,2% e do cobalto (Co) com 10,3%. O carbono (C) também aparece com 11% na amostra analisada.

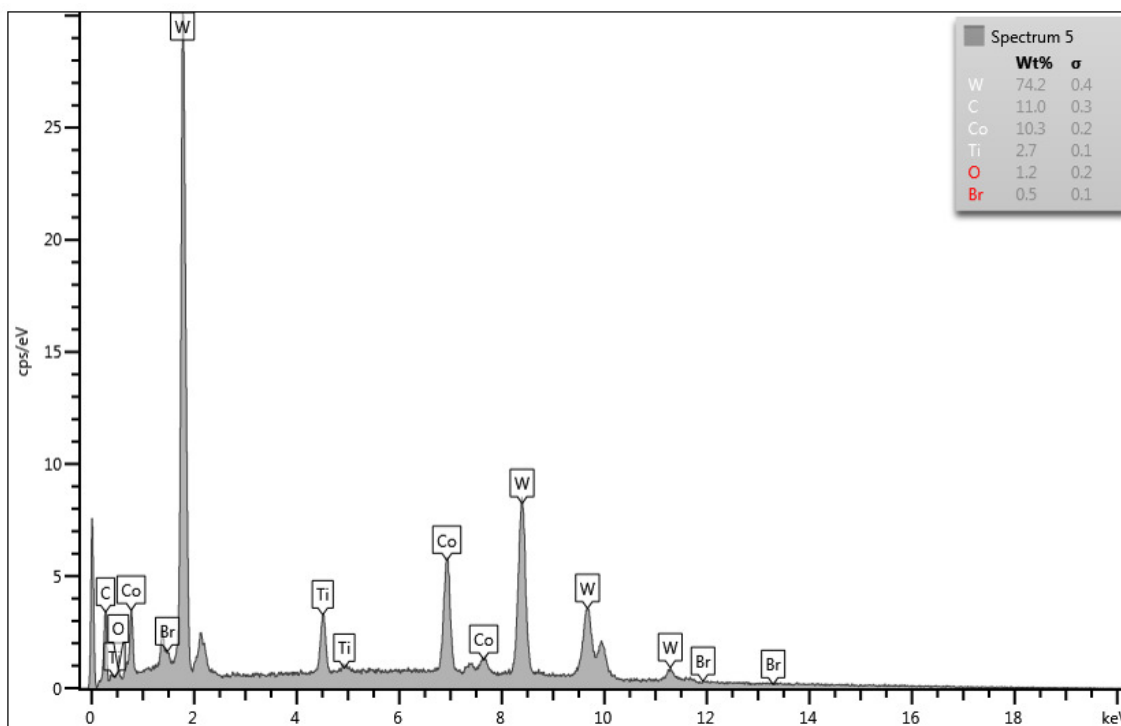


Figura 5-43 - Mapa dos componentes químicos no spectrum 5 da amostra

Breidenstein e Denkena [90] avaliaram cinco superfícies revestidas pelo processo PVD (quatro tratadas a laser e uma sem tratamento) de acordo com a norma VDI 3198. Mostraram que superfícies produzidas por remoção de feixe laser com entrada de calor elevado, que são mais rugosas e consistem em material fundido e poros profundos, exibiram boas propriedades de adesão. Dentre as superfícies tratadas a laser, a superfície mais rugosa ofereceu a melhor adesão.

Para a ratificação dos resultados, foi realizado o segundo ensaio de indentação para o inserto comercial e também para o inserto texturizado.

A Figura 5-44 mostra o 2º ensaio de indentação realizado para o inserto comercial. A imagem (a) mostra as delaminações e as trincas que ocorreram após a indentação. Na imagem (b) é possível ver o substrato em evidência.

De acordo com a Norma VDI 3198 pode-se comparar as delaminações com o padrão HF5 da norma. Houve uma delaminação maior da aresta do inserto em relação ao 1º ensaio.

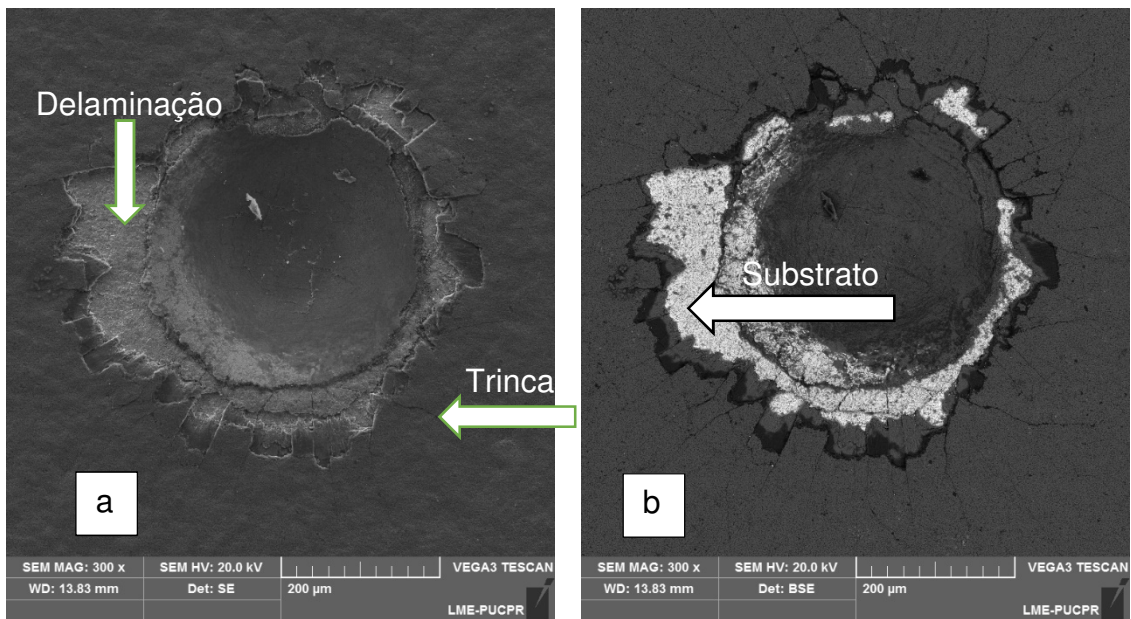


Figura 5-44 - Ensaio de indentação para o inserto comercial (2º ensaio)

No 2º ensaio de indentação realizado para o inserto texturizado (Figura 5-45), as delaminações também foram maiores em relação ao 1º ensaio (imagem a). Na imagem (b) é possível ver o substrato em evidência.

De acordo com a Norma VDI 3198 pode-se comparar as delaminações com o padrão HF4 da norma. Houve também uma delaminação maior da aresta do inserto em relação ao 1º ensaio.

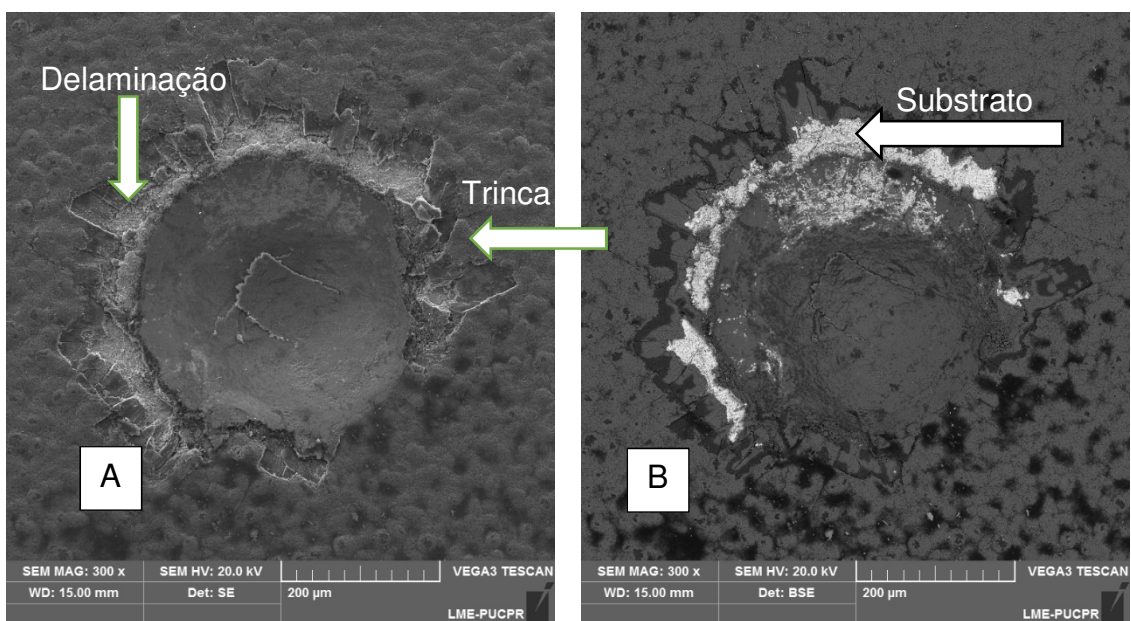
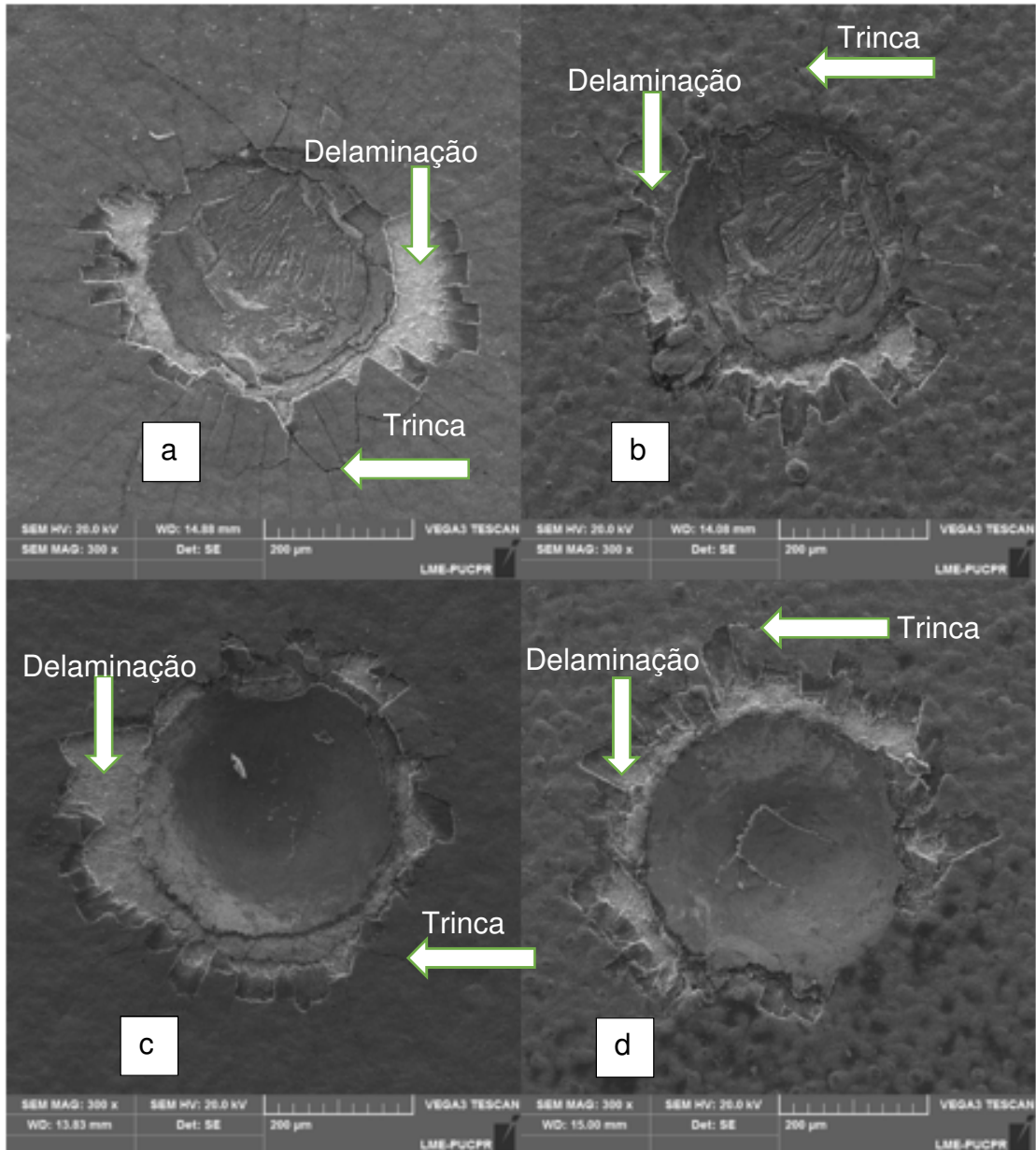


Figura 5-45 - Ensaio de indentação para o inserto texturizado (2º ensaio)

A Figura 5-46 mostra a comparação das quatro imagens feita pelo MEV, sendo (a e b) para o 1º ensaio e (c e d) para o 2º ensaio.



*Figura 5-46 - Comparação das delaminações entre o inserto comercial (a) e o inserto texturizado (b) para o 1º ensaio; inserto comercial (c) e o inserto texturizado (b) para o 2º ensaio*

A menor área de delaminação do inserto texturizado (b e d) em relação ao inserto comercial (a e c), demonstra haver uma maior aderência sobre os substratos de metal duro, e sua maior capacidade em suportar o carregamento.

Analisando o aspecto da fragmentação dos revestimentos depositados sobre os substratos do inserto comercial e do texturizado, distinguiram-se formas diferentes de delaminação dos revestimentos. Para o substrato com texturização ocorre uma delaminação descontínua dos revestimentos, ao passo que para o substrato comercial, a delaminação dos revestimentos na periferia das indentações ocorre de maneira contínua, com grandes áreas de destacamento.

A forma particular de fragmentação dos revestimentos nos substratos ensaiados demonstra que a modificação prévia do substrato pela texturização por EDM, cria uma textura que propicia um ancoramento mecânico mais efetivo dos revestimentos em relação à textura obtida pelo escovamento.

As concavidades mostradas na Figura 5-47 podem servir de ancoramento ao revestimento posteriormente depositado. As tensões aplicadas pelo indentador, possivelmente, romperiam o revestimento depositado nas regiões mais elevadas da superfície, ao passo que o revestimento depositado nas regiões formadas por concavidades sofreria uma menor perturbação da tensão aplicada pelo indentador, com isso o destacamento do revestimento ocorreria em pontos isolados, causando menos trincas e delaminações.

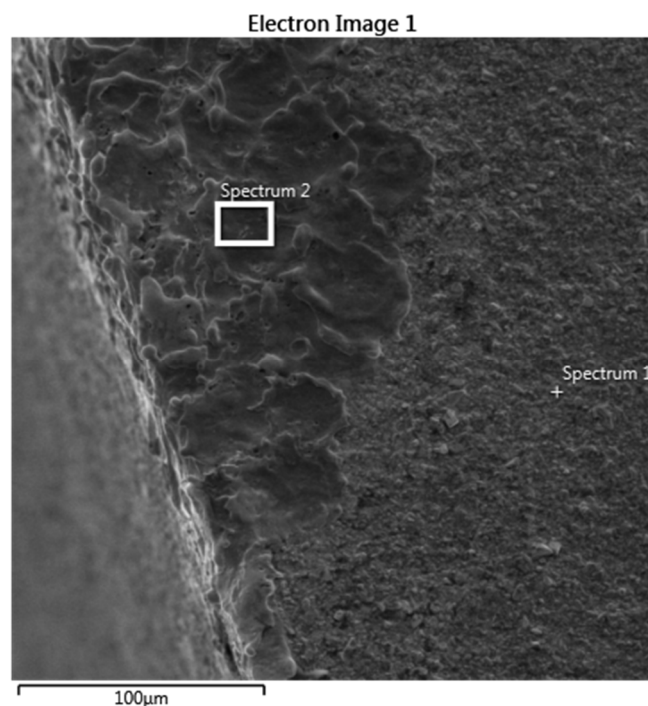


Figura 5-47 - Concavidades feitas pela eletroerosão na aresta de corte



#### 5.1.4 Ensaio de risco com carga progressiva

Para melhor entendimento da resposta tribológica destes revestimentos, neste estudo decidiu-se também realizar o ensaio de riscamento para avaliar as superfícies de saída do inserto comercial e do texturizado.

As camadas dos insertos foram submetidos à mesma variação linear crescente em módulo de carga (1 a 120N), representado pela força normal ( $F_z$ ). A força lateral ( $F_x$ ) está relacionada com a força de atrito e durante o trajeto do indentador ela poderá sofrer variações, dependendo dos tipos de falhas experimentados pelo filme.

O ensaio de riscamento foi realizado em dois insertos, um comercial e outro texturizado por EDM, sendo que em cada inserto foram realizados dois riscos (ensaios) de 6 mm, conforme Figura 5-48. A velocidade do riscamento foi de 0,5 mm/s.

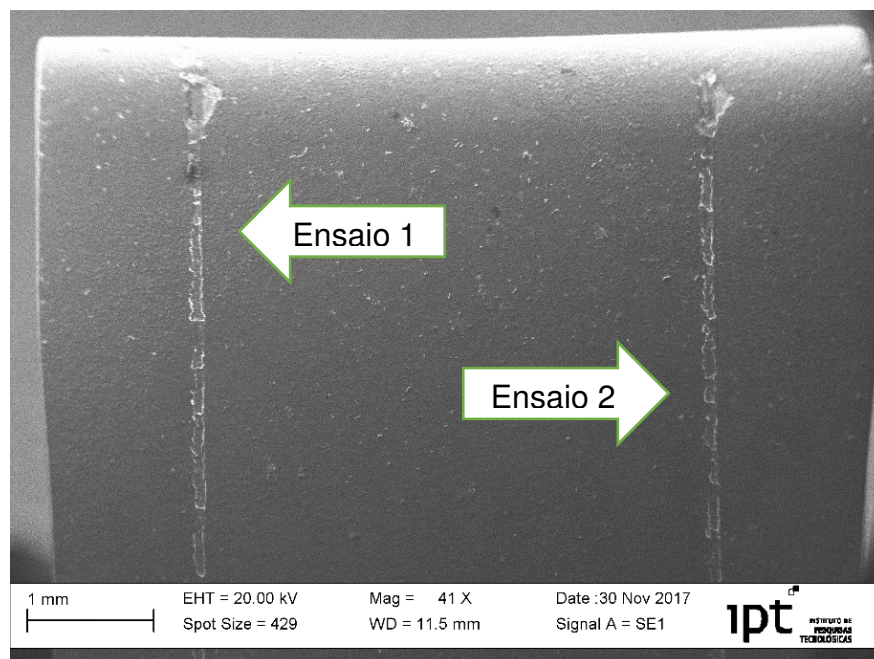


Figura 5-48 - Ensaio de risco no inserto DNMG 150608

A Figura 5-49 mostra o ensaio de risco executado no inserto DNMG 150608 comercial, sendo ampliada 50X através do MEV e a Figura 5-50 mostra o ensaio de risco executado no inserto texturizado por eletroerosão

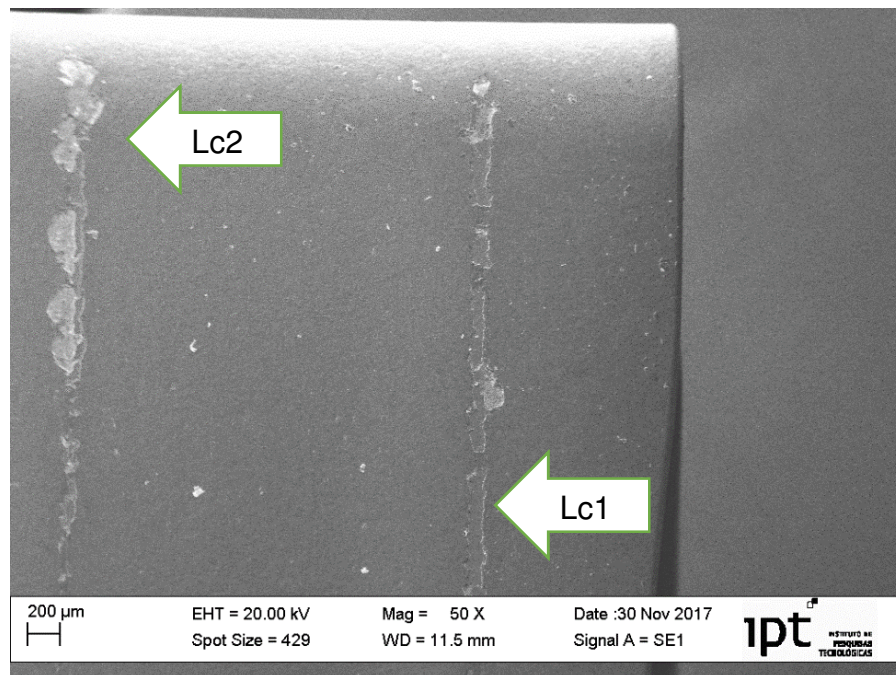


Figura 5-49 - Trilha do risco no ensaio do inserto DNMG 150608 comercial

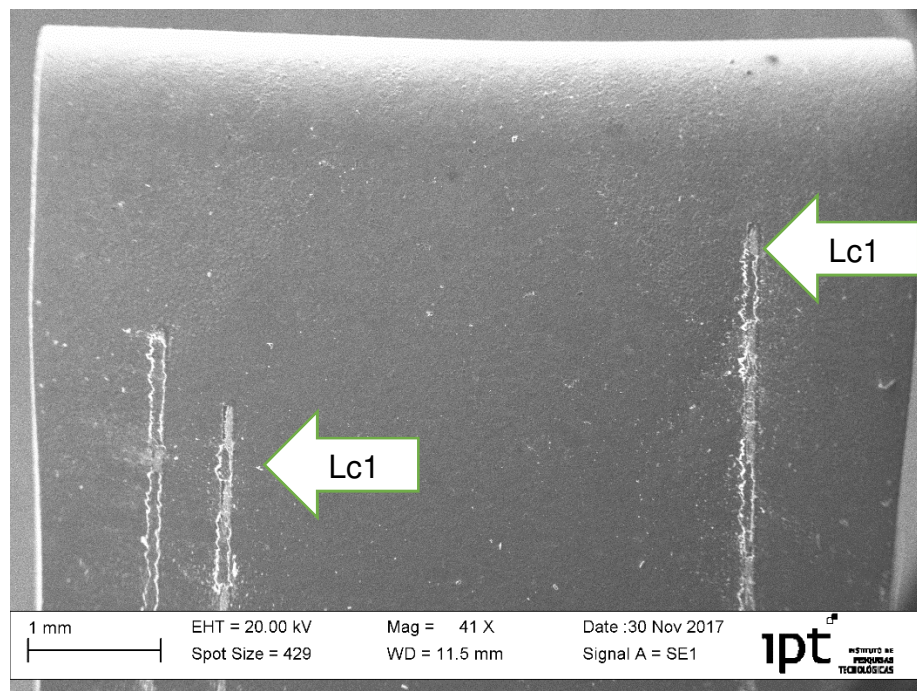


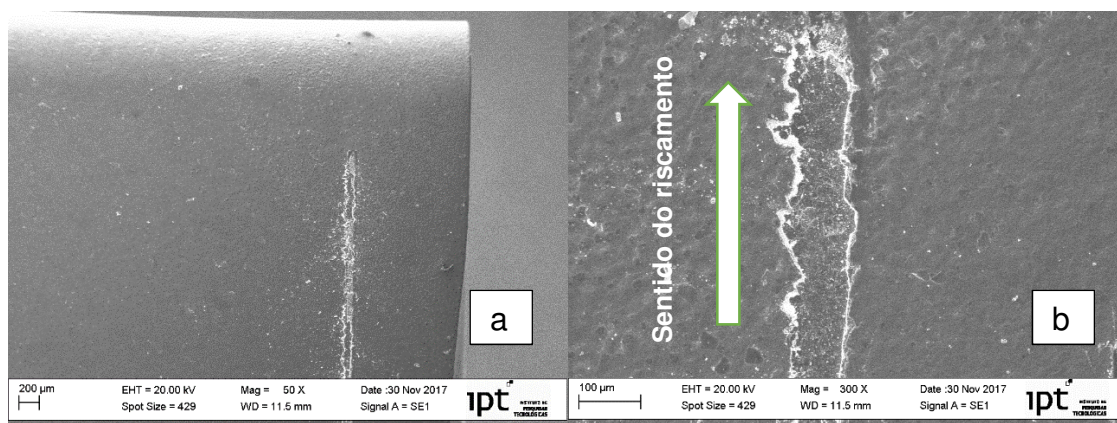
Figura 5-50 - Trilha do risco no ensaio do inserto DNMG 150608 texturizado

Nas figuras acima estão representadas setas indicativas dos locais onde surgem as falhas associadas à quebra de adesão coesiva (Lc1) e adesiva (Lc2).

As falhas coesivas, associadas à primeira carga crítica (Lc1) são muito difíceis de identificar na figura em função do comprimento do teste. Recorre-se a um microscópio óptico de modo a identificar a zona do teste onde estes sinais de falha coesiva surgem. Normalmente os sinais indicativos desta falha são da forma de pequenas partículas de revestimento, que são levantadas do revestimento pela ação do indentador deslizante e subsequentemente depositadas na parte lateral do trilho.

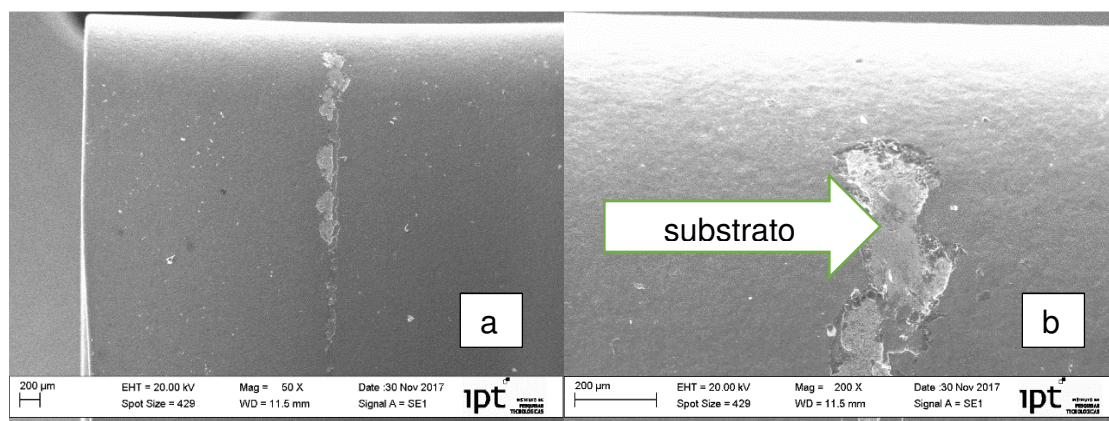
A identificação da segunda carga crítica (Lc2) já é mais fácil, pois há dois métodos de visualizar. Primeiro, o comportamento linear da força transversal em função do comprimento do risco é alterado, ocorrendo um ponto de inflexão associado a uma subida vertiginosa da força de atrito transversal. Finalmente, através do microscópio óptico identifica-se muito bem esta segunda carga crítica, dado que a falha adesiva do revestimento geralmente está associada a um mecanismo bem identificável (delaminação).

A delaminação na trilha no inserto DNMG 150608 texturizado não ocorreu, como é possível observar na Figura 5-51, figura (a), aparecendo apenas a trilha deixada pelo indentador de diamante e a parte ampliada da trilha mostrada na figura (b).





Para o inserto comercial, a delaminação aconteceu a partir de 50% do ensaio de risco executado, conforme mostrada na Figura 5-52, parte (a) e na parte (b) é mostrada a ampliação da delaminação no ensaio de risco.



*Figura 5-52 - (a) Trilha do risco no ensaio do inserto DNMG 150608 comercial e (b) ampliação da delaminação*

Os valores da carga crítica ( $L_c$ ) foram determinados a partir dos dados experimentais, analisando as curvas da força tangencial (Força de atrito), e a delaminação do revestimento, complementada com a análise das pistas por microscopia óptica.

A Figura 5-53 mostra a evolução da força de atrito em função do tempo de indentação. A curva da força tangencial no inserto comercial progride até 48,69N e 5,8 s, depois mantém-se estável até 10,5 s, onde se dá o  $L_{c2}$ , que é o ponto onde começa o início da falha.

Para o inserto texturizado, a curva da força tangencial desloca-se até 44,09N, mas com um tempo maior de indentação, na casa dos 6,3 s e mantém-se constante até o término do ensaio.

O gráfico evidencia que o coeficiente de atrito se manteve em regime permanente durante o tempo de ensaio para o inserto texturizado por eletroerosão. Assim pode-se concluir que o desgaste não rompeu a camada de revestimento, conforme mostrado na Figura 5-51 e posteriormente elucidado no gráfico da Figura 5-53.

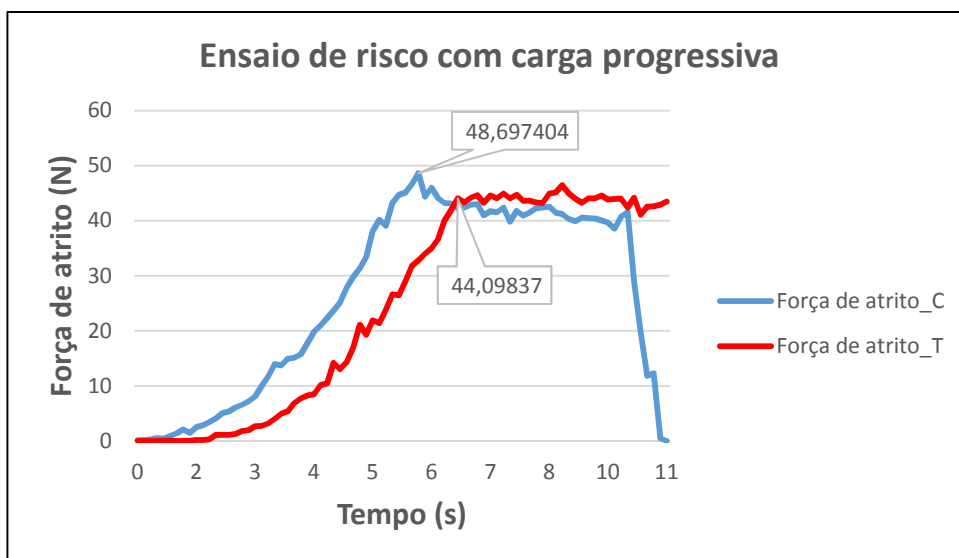


Figura 5-53 - Ensaio de risco (Força de atrito) para o inserto DNMG 150608 comercial e texturizado

O coeficiente de atrito (COF), que representa a resistência ao riscamento da superfície, também gerado pelo software do equipamento, é apresentado como resultado do teste. É importante ressaltar que, o COF adquirido pelo ensaio de riscamento não pode ser interpretado literalmente como o coeficiente de atrito definido em literatura ( $\mu = F_{\text{atrito}}/F_{\text{normal}}$ ). Isto porque, em um ensaio de riscamento com carga crescente como foi o caso dos ensaios desta tese, a resistência ao risco é também afetada pelo aprofundamento do penetrador na amostra, a uma profundidade que pode variar de amostra para amostra. A comparação da resistência ao riscamento, devida somente às diferenças intrínsecas da superfície (material + topografia), seria mais correta se não houvesse esse aprofundamento. Com o aprofundamento, o material formado à frente do indentador gera também uma resistência que é contabilizada pelo sensor.

A Figura 5-54 mostra uma comparação do ensaio de risco (COF) executado com o inserto DNMG 150608 comercial e com o texturizado por EDM, através da distância percorrida pelo indentador.

O ponto de inflexão da curva do coeficiente de atrito para o inserto comercial foi de 2,9 mm e para o inserto texturizado foi de 3,2 mm.

Os valores do coeficiente de atrito (COF) estão muito próximos nos ensaios de risco realizados com os inserts preparados por eletroerosão e para os inserts preparados por escovamento (comercial)

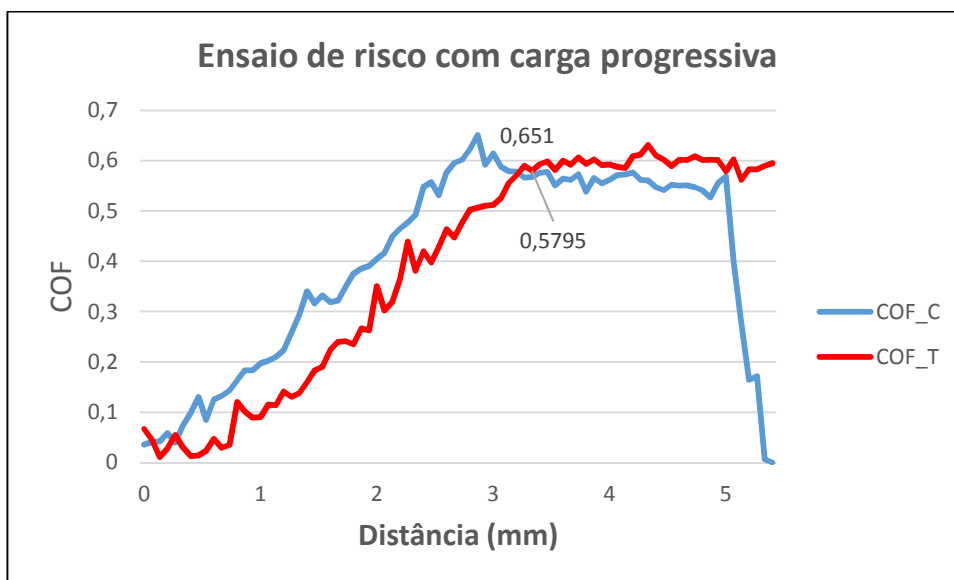


Figura 5-54 - Ensaio de risco (COF) para o inserto DNMG 150608 comercial e texturizado

Pode-se concluir que o inserto texturizado por EDM se caracterizou por um coeficiente de atrito um pouco menor em relação ao inserto comercial (0,579 contra 0,651) o que traz um certo benefício para a ferramenta de corte, porque quanto menor o coeficiente de atrito entre as partes (peça e inserto), maior será a vida útil da aresta da ferramenta.

### 5.1.5 Análise da rugosidade

Como o foco da pesquisa não é o acabamento superficial, utilizou-se como padrão a média Ra. A Figura 5-55 mostra os valores encontrados para a rugosidade média nas operações de torneamento com o inserto comercial e também com o texturizado para velocidade de corte de 280 m/min. Os valores correspondem à média aritmética de 2 medições efetuadas à 180° em cada um dos corpos de prova usinados. Todas as medições foram executadas com cut-off de 2,5 mm.

Neste contexto, observa-se que a medição da rugosidade usinando com o inserto texturizado foi maior em 7 das 13 medidas dos comprimentos usinados, justamente as sete últimas sequências usinadas (3.500 a 6.500 mm).

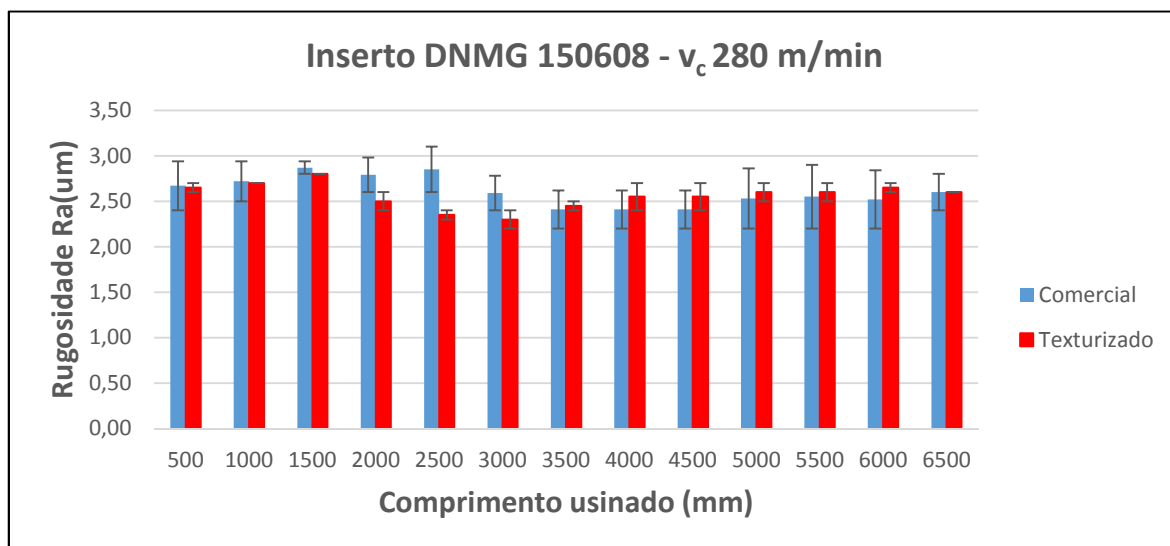


Figura 5-55 - Rugosidade média com  $v_c$  de 280 m/min

A Figura 5-56 mostra os valores encontrados para a rugosidade média nas operações de torneamento com o inserto comercial e também com o texturizado para velocidade de corte de 315 m/min. Nota-se que a medição da rugosidade usinando com o inserto comercial foi maior em toda a extensão do comprimento usinado.

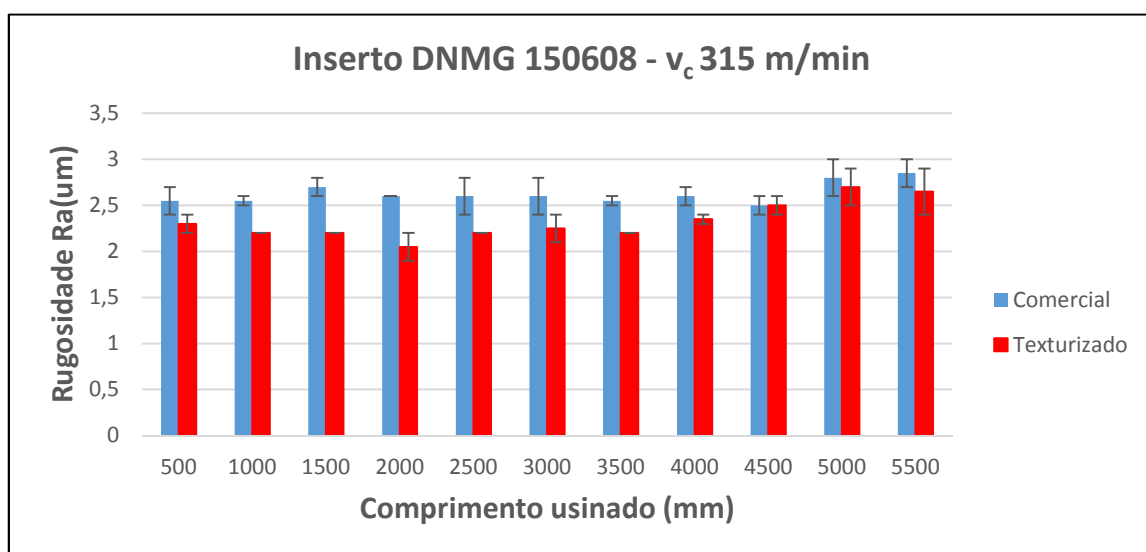


Figura 5-56 - Rugosidade média com  $v_c$  de 315 m/min

Na usinagem com  $v_c$  de 350 m/min, os resultados mostraram que a rugosidade média foi sempre maior com o inserto texturizado, conforme mostrado na Figura 5-57.

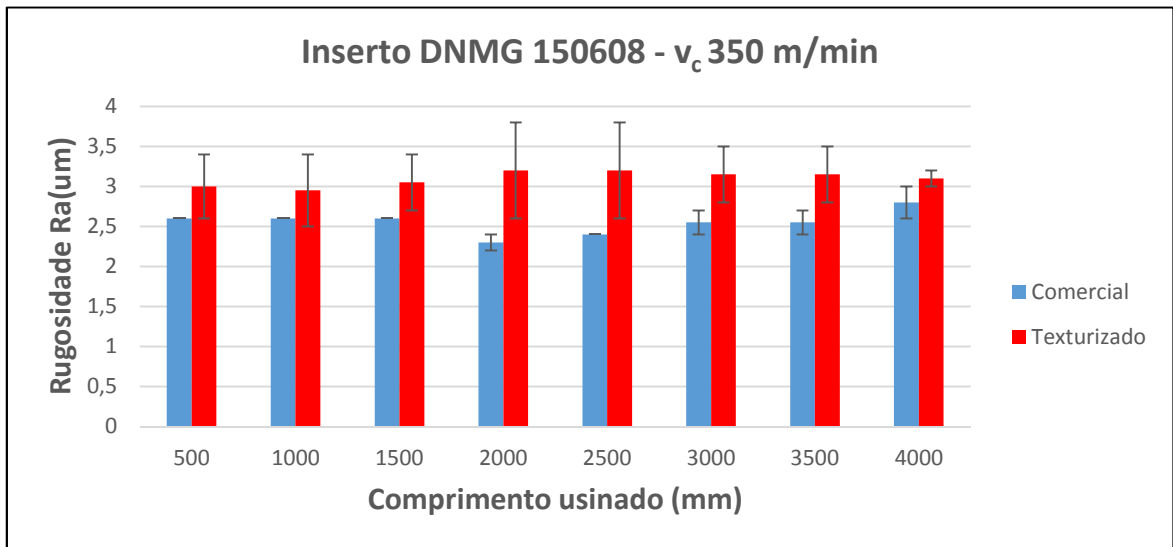


Figura 5-57 - Rugosidade média com  $v_c$  de 350 m/min

Após os 3.300 mm usinados com a  $v_c$  de 390 m/min, a Figura 5-58 mostra que a medição da rugosidade usinando com o inserto texturizado foi maior em (6 em 11) das medidas dos comprimentos usinados, justamente as seis últimas sequências usinadas (1.800 a 3.300 mm), com uma ressalva para os 3300 mm, onde houve um desgaste similar das arestas.

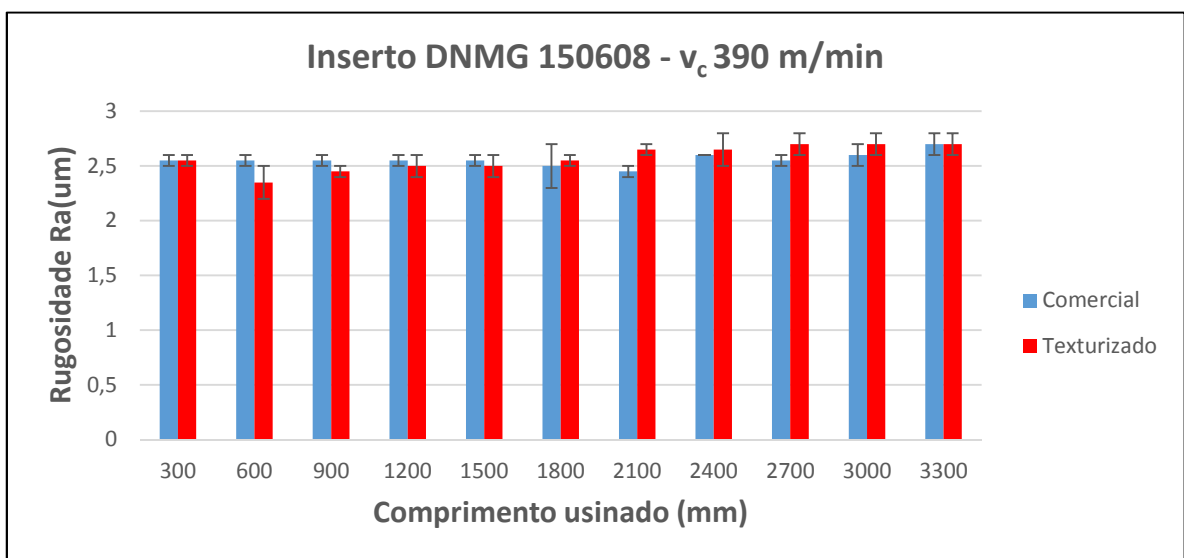


Figura 5-58 - Rugosidade média com  $v_c$  de 390 m/min

De um modo geral, observa-se que a texturização da aresta de corte da ferramenta não produziu o efeito esperado em relação a rugosidade média medida durante os ensaios. Somente com a  $v_c$  de 315 m/min que o inserto texturizado teve um desgaste menor em relação ao inserto comercial, tendo nos demais, sempre um desgaste maior ou igual, como mostrado nas figuras anteriores.

## 6 Conclusões

Conforme o objetivo proposto, os ensaios para a análise comparativa de insertos com as arestas de cortes preparadas por escovamento e eletroerosão foram realizados de acordo com as normas existentes. O material utilizado foi o aço ABNT 1045 e, para os ensaios, se manteve o avanço e a profundidade de corte constantes, alterando apenas a velocidade de corte; a usinagem foi realizada a seco. Os resultados alcançados permitem apresentar as conclusões abaixo.

Com relação aos substratos e coberturas, após a caracterização, observou-se que contém exatamente os mesmos elementos químicos e são exatamente iguais, com isso, eliminando qualquer hipótese de interferência do substrato ou cobertura na vida do inserto.

Ao analisar o desempenho dos revestimentos durante o aumento da velocidade de corte (Figura 5-17, Figura 5-22, Figura 5-27 e Figura 5-32), notou-se que o inserto comercial teve um desgaste mais acentuado da aresta de corte em relação ao texturizado. Quando se compara os dois revestimentos usando como base um comprimento de corte similar, observa-se que o inserto texturizado teve um desgaste menor.

Os ensaios de vida no torneamento mostraram que as ferramentas com textura por EDM apresentaram maiores volumes de material removido.

A velocidade de corte ( $v_c$ ) foi o parâmetro de maior influência na vida das ferramentas, segundo os gráficos referentes ao desgaste de flanco  $VB_B$ . Sendo que a velocidade de corte foi o único parâmetro que apresentou significância estatística para todas as ferramentas ensaiadas.

A forma de desgaste observada na ferramenta foi o de flanco, conforme Figura 5-14, e as outras relacionadas ao mesmo tópico. Já o mecanismo de desgaste atuante foi a abrasão, influenciados principalmente pelas condições de corte utilizadas, material da peça usinada e material da ferramenta.

A força despendida para a usinagem com o inserto texturizado foi significativamente menor em relação ao inserto comercial em todas as distâncias

usinadas e em todas as velocidades de corte analisadas, conforme mostrado nos gráficos de análise de força de usinagem.

Quanto ao acabamento superficial das amostras usinadas, quase todos os insertos tiveram suas medições de Ra próximas a 2,5  $\mu\text{m}$ , isso ocorreu porque todas trabalharam exatamente com as mesmas condições de avanço e com o mesmo raio de ponta, variáveis estas que influenciam diretamente na rugosidade do material usinado.

Os ensaios de indentação realizados sobre os revestimentos mostraram que a texturização por EDM foi capaz de melhorar a adesão do revestimento em todas as condições testadas.

A texturização por EDM pode ser uma alternativa no tratamento do substrato de ferramentas de metal duro antes do processo de deposição do revestimento em substituição ao processo convencional por escovamento.

Nos ensaios de indentação Rockwell, as áreas de delaminação dos revestimentos depositados nas ferramentas texturizadas por EDM foram menores do que para os revestimentos depositados nas ferramentas escovadas.

Nas ferramentas escovadas a delaminação dos revestimentos ocorre de maneira contínua nas bordas das indentações, ao passo que nas ferramentas texturizadas por EDM a delaminação dos revestimentos ocorre em pontos isolados, mostrado na Figura 5-46.

Os ensaios de indentação Rockwell mostraram que a modificação superficial do substrato de metal duro por EDM anterior ao processo de deposição CVD, melhora a aderência dos revestimentos, quando comparado ao processo de escovamento.

Nos ensaios de risco com carga progressiva, as falhas dos revestimentos depositados sobre as ferramentas escovadas foram inteiramente de natureza adesiva, com a delaminação contínua dos filmes nas bordas das trilhas de desgaste, já para as ferramentas texturizadas por EDM as falhas dos revestimentos estão associadas, principalmente, ao lascamento dos revestimentos, ora com exposição do substrato de metal duro, ora apenas com



a descamação do revestimento, levando a conclusão que o inserto texturizado por EDM teve uma melhor aderência do revestimento em relação ao inserto texturizado por escovamento (comercial).

## PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

As propostas para o desenvolvimento de trabalhos futuros são apresentadas a seguir:

- Investigar a aderência de revestimentos por meio de ensaios de risco com carga progressiva utilizando emissão acústica.
- 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 por EDM.
- Estudar o comportamento de ferramentas de metal duro texturizadas por EDM com outros diferentes parâmetros e posteriormente revestidas, em ensaios de usinagem e de caracterização de revestimentos.

## 7 Referências

- /1/ BASSETT, E.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI1045 with coated WC-Co inserts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 5, 2012. 108-126.
- /2/ SANTOS, S. C. Estudo da influência de revestimentos e da aplicação de fluido de corte no desempenho de brocas de aço-rápido e de metal duro integral na usinagem de ferro fundido cinzento. *Tese de Doutorado. UFU*, 2002.
- /3/ VIANA, R.; LIMA, M.S.F.; SALES, W.F.; SILVA JR., W.M.; MACHADO, A.R. Laser texturing of substrate of coated tools — Performance during machining and in adhesion tests. *Surface & Coatings Technology*, 276, 2015. 485-501.
- /4/ NEVES, D.; DINIZ, A. E.; LIMA, M. S. F. Efficiency of the laser texturing on the adhesion of the coated twist. *Journal of Materials Processing Technology*, 179, 2006. 139-145.
- /5/ SUN, Y.; BLOYCE, A.; BELL, T. Finite element analysis of plastic deformation of various tin coating/substrate systems under normal contact with a rigid sphere. *Thin Solid Films*, 271, 1995. 112-131.
- /6/ PARREIRA, J. Texturização superficial eletroquímica sem mascaramento com finalidades tribológicas. *Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia*, 2011. 104.
- /7/ VIANA, R. Estudos da caracterização de ferramentas de corte texturizadas a laser e revestidas utilizadas no fresamento frontal de ferro fundido vermicular. *Tese de Doutorado. UFU*, 2009. 209.
- /8/ YUSSEFIAN, N. Z. Cutting Edge Microgeometry, Modeling and EE-Honing. *Tese de Doutorado. McMaster, Ontario - Canadá*, 2012. 170.
- /9/ DENKENA, B.; KOEHLER, J.; REHE, M. Influence of the honed cutting edge on tool wear and surface integrity in slot milling of 42CrMo4 steel. *Procedia CIRP*, 1, 2012. 190-195.
- /10/ SHAFFER, W. R. Cutting tool edge preparation, Technical Paper. *Society of Manufacturing Engineers*, 1999. 1-8.
- /11/ BOUZAKIS, K. D. et al. Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7, 2014. 264-273.

- /12/ FULEMOVA, J.; JANDA, Z. Influence of the cutting edge radius and the cutting edge preparation on tool life and cutting forces at inserts with wiper geometry. *Procedia Engineering*, 69, 2014. 565-573.
- /13/ DENKENA, B.; BIERMANN, D. Cutting edge geometries. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63, 2014. 631-653.
- /14/ VARELA, P. I.; RAKURTY, C. S.; BALAJI, A. K. Surface Integrity in Hard Machining of 300M Steel: Effect of Cutting-Edge Geometry on Machining Induced Residual Stresses. *Procedia CIRP: 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI)*, 13, 2014. 288-293.
- /15/ RODRIGUEZ, C. J. C. Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing. *Tese de Doutorado. Kassel University, Alemanha*, 2009. 205.
- /16/ VENTURA, C. E. H.; KÖHLERB, J.; DENKENA, B. Influence of cutting edge geometry on tool wear performance in interrupted hard turning. *Journal of Manufacturing Processes*, 19, 2015. 129-134.
- /17/ YUSSEFIAN, N. Z.; KOSHY, P. Parametric characterization of the geometry of honed cutting edges. *Precision Engineering*, 37, 2013. 746-752.
- /18/ DENKENA, B.; LUCAS, A.; BASSET, E. Effects of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermomechanical. *Manufacturing technology*, 60, 2011. 73-76.
- /19/ DENKENA, B.; KÖHLER, J.; VENTURA, C. E. H. Customized cutting edge preparation by means of grinding. *Precision Engineering*, 37, 2013. 590-598.
- /20/ DENKENA, B.; KÖHLER, J.; BREIDENSTEIN, B.; ABRÃO, A.M.; VENTURA, C.E.H. Influence of the cutting edge preparation method on characteristics and performance of PVD coated carbide inserts in hard turning. *Surface & Coatings Technology*, 254, 2014. 447-454.
- /21/ OSBORN INTERNATIONAL. Disponivel em:  
<<http://www.osborn.de/deutsch/frames1.htm>>. Acesso em: 27 janeiro 2015.
- /22/ HUANG, ZHONGWEI; LI, GENSHENG; TIAN, SHOU CENG; SONG, XIANZHI; SHENG, MAO; SHAH, SUBHASH. Abrasive water jet perforation and multi-stage fracturing. [S.l.]: GPP, 2017. p. 1-62.
- /23/ KLOCKE, F. . S. T. . B. E. . K. A. Manipulation of Coating and Subsurface Properties in Reconditioning of WC-Co Carbide Cutting Tools. *Surface & Coatings Technology*, 202, 2007. 1194-1198.

- /24/ DENKENA, B. et al. Cutting edge preparation by means of abrasive brushing. *Key Engineering Materials*, 438, 2010. 1-7.
- /25/ ENDRES, W. J.; KOUNTANYA, R. K. The effects of corner radius and edge radius on tool flank wear. *Journal of Manufacturing Processes*, 4, 2002. 89-96.
- /26/ CHEN, F. L.; SIORES, E. The effect of cutting jet variation on striation formation in abrasive water jet cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003. 1479-1486.
- /27/ SILVEIRA, F. L. Uso de usinagem por jato de água, usinagem por controle numérico computadorizado e corte a laser no design de superfícies tácteis a partir de padrões modulares encaixáveis em ágata e cedro. *Dissertação de mestrado, UFRS*, 2011. 153.
- /28/ JUNKAR, M.; JURISEVIC, B.; FAJDIGA, M.; GRAH, M. Finite element analysis of single-particle impact in abrasive water jet machining. *International Journal of Impact Engineering*, 32, 2006. 1095-1112.
- /29/ BABU, M. K.; CHETTY, O. K. A Study on Recycling of Abrasives in Abrasive Water Jet Machining. *Wear*, 254, 2003. 763-773.
- /30/ BIERMANN, D.; TERWEY, I. Cutting edge preparation to improve drilling tools for HPC processes. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1, 2008. 76-80.
- /31/ GOGAEV, K.A.; NEPOMNYASHCHII, V.V.; MOSINA, T.V.; NESHPOR, I.P.; LEONOWICZ, M. Special features of the magnetic abrasive machining. *Refractories and Industrial Ceramics*, 47, 2006. 492-494.
- /32/ KARPUSCHEWSKI, B.; BYELYAYEV, O.; MAIBORODA, V. S. Magneto-abrasive machining for the mechanical preparation of high-speed steel twist drills. *Manufacturing Technology*, 58, 2009. 295-298.
- /33/ CHAKRABORTY, S.; DEY, V.; GHOSH, S. K. A review on the use of dielectric fluids and their effects in electrical discharge machining characteristics. *Precision Engineering*, 40, 2015. 1-6.
- /34/ SANTOS, R. F. Influência do material da peça e do tratamento térmico na eletroerosão dos aços AISI H13 e AISI D6. *Dissertação de Mestrado. PUCMG*, Belo Horizonte, 2007. 132.
- /35/ KUNIEDA, M.; LAUWERS, B.; RAJURKAR, K.P.; SCHUMACHER, B.M. Advancing EDM through fundamental insight into the process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54, 2005. 64-87.

- /36/ SILVA, N. H. Usinagem de furos de pequenos diâmetros na liga de titânio Ti6Al4V em máquina de eletroerosão por penetração. *Dissertação de Mestrado. PUCPR*, 2006. 109.
- /37/ AMORIM, F. Tecnologia de eletroerosão por penetração da liga de alumínio amp 8000 e da liga de cobre cube para ferramentas de moldagem de materiais plásticos. *Tese de Doutorado. UFSC*, Florianópolis, 2002. 156.
- /38/ ARANTES, L. J. Avaliação de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas. *Dissertação de Mestrado. UFU*, Uberlândia, 2001. 74.
- /39/ MAHARDIKA, M.; TSUJIMOTO, T.; MITSUI, K. A new approach on the determination of ease of machining by EDM processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 2008. 746-760.
- /40/ SIMAO, J.; LEE, H. G.; ASPINWALL, D. K.; DEWES, R. C.; ASPINWALL, E. M. Workpiece surface modification using electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2, 2003. 121-128.
- /41/ HO, K. H.; NEWMAN, S. T. State of the art electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43, 2003. 1287-1300.
- /42/ BLEYS, P.; KRUTH, J-P.; LAUWERS, B.; SCHACHT, B.; BALASUBRAMANIAN, V.; FROYEN, L.; HUMBEECK, J. V. Surface and sub-surface quality of steel after EDM. *Advanced Engineering Materials*, 1-2, 2006. 15-25.
- /43/ WANG, Y. G.; ZHAO, F. L.; WANG, H. A study on the effect of powder on surface quality in EDM finishing. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 29, 2007. 225-228.
- /44/ SINGH, S.; MAHESHWARI, S.; PANDEY, P. C. Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 12, 2004. 272-277.
- /45/ KUMAR, S.; SINGH, R.; SINGH, T. P.; SETHI, B. L. Surface modification by electrical discharge machining: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 2009. 3675-3687.
- /46/ CHARMILLES , T. Disponível em: <<http://www.charmilles.com>>. Acesso em: 24 janeiro 2015.
- /47/ AMORIM, F. Desempenho de eletrodo de grafita e de cobre no acabamento de aço ferramenta. *Revista Máquina e Ferramenta.*, v. 485, n. 42, p. 124-142, junho 2006.

- /48/ SILVA, E. R. Comparação do desempenho do fluido dielétrico vegetal com mineral sintético e querosene na eletroerosão do aço AISI H13. *Dissertação de Mestrado. PUCMG, Belo Horizonte, 2007. 111.*
- /49/ DROZDA, T. J. Tool and manufacturing engineers handbook: machining. *Society of Mechanical Engineers, 5, 1998.*
- /50/ CAMPOS, J. A. Avaliação experimental do desgaste de canto durante o processo de eletroerosão do AISI H13. *Dissertação de Mestrado. UTFPR, Curitiba, 2014. 101.*
- /51/ MCGEOUGH, J. A. *Advanced methods of machining.* Londres: Chapman and Hall, 1988. 128-152 p.
- /52/ SANTOS, R. F. Nitretação por edm do aço AISI 4140. *Tese de Doutorado. UFU, Uberlândia, 2013. 129.*
- /53/ FULLER, J. E. Electrical Discharge Machining. *Metals Handbook: Machining, 16, 1989. 557-564.*
- /54/ ARANTES, L. J. Desenvolvimento e avaliação do processo híbrido de usinagem por descargas elétricas e jato de água abrasivo (AJEDM). *Tese de Doutorado. UFU, Uberlândia, 2007. 125.*
- /55/ LEÃO, F. N.; PASHBY, I. R. A Review on the Use of Environmentally-friendly Dielectric Fluids in Electrical Discharge Machining. *Journal of Materials Processing Technology, 149, 2004. 341-346.*
- /56/ KOSHY, P.; N.Z., Y. Application of foil electrodes for electro-erosion edge honing of complex-shaped carbide inserts. *Journal of Materials Processing Technology, 213, 2013. 434-443.*
- /57/ CASAS, B.; TORRES, Y.; LLANES, L. Fracture and fatigue behavior of electrical discharge machined cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 24, 2006. 162-167.*
- /58/ YUSSEFIAN, N. Z. et al. Electro-erosion edge honing of cutting tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, 59, 2010. 215-218.*
- /59/ SILVA, E.J.S.; OLIVEIRA, J.F.G.; SALLES, B.B; CARDOSO, R.S.; REIS, V.R.A. Strategies for production of parts textured by grinding using patterned wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, 62, 2013. 355-358.*
- /60/ COSTA, H. L. Modification of surface topography: manufacturing methods and applications. *Thesis. Cambridge, 2005. 240.*
- /61/ CLEEVELY, S. T.; GEIM, A. Gecko tape - research to drive you up the wall. *Materials World, 11, 2003. 25-26.*

- /62/ MICHEL, B.; BERNARD, A.; BIETSCHÉ, A.; DELAMARCHE, E.; GEISSLER, M.; JUNCKER, D.; KIND, H.; RENAULT, J. P.; ROTHUIZEN, H.; SCHMID, H.; SCHMIDT-WINKEL, P.; STUTZ, R.; WOLF, H. Printing meets lithography: Soft approaches to high-resolution patterning. *IBM Journal of Research and Development*, 45, 2001. 697.
- /63/ COSTA, H. L.; PARREIRA, J. G.; GONÇALVES, J. L. Alternative methods for surface texturing. *First International Brazilian Conference on Tribology*, Rio de Janeiro, novembro 2010.
- /64/ FU, Y. H.; YE, Y. X.; ZHANG, Y. K.; CAI, L. The technology of laser honing applied in distinctively improving the lubrication of frictional units. *Key Engineering Materials*, 202-203, 2001. 265-270.
- /65/ WAKUDA, M.; YAMAUCHI, Y.; KANZAKI, S.; YASUDA, Y. Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact. *Wear*, 254, 2003. 356-363.
- /66/ CHOI, K. H.; MEIJER, J.; MASUZAWA, T.; KIM, D. Excimer laser machining for 3d microstructure. *Journal of Materials Processing Technology*, 149, 2004. 561-566.
- /67/ SUGIHARA, T.; ENOMOTO, T. Crater and flank wear resistance of cutting tools having micro textured surfaces. *Precision Engineering*, 37, 2013. 888-896.
- /68/ KÜMMEL, J.; BRAUN, D.; GIBMEIER, J.; SCHNEIDER, J.; GREINER, C.; SCHULZE, V.; WANNER, A. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilisation. *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 2015. 62-70.
- /69/ ARROYO OSORIO, J. M. Investigação sobre o uso da texturização a laser na preparação da superfície a ser recoberta em ferramentas de metal duro para fresamento. *Tese de Doutorado. UNICAMP*, Campinas, 2009. 198.
- /70/ ZHANG, K. et al. Effect of microscale texture on cutting performance of WC/Co-based TiAlN coated tools under different lubrication conditions. *Applied Surface Science*, 326, 2015. 107-118.
- /71/ LIMA, M. S. F.; FOLIO, F.; MISCHÉLER, S. Microstructure and surface properties of laser-remelted titanium nitride coatings on titanium. *Surfaces and Coatings Technology*, 199, 2005. 83-91.
- /72/ POLINI, R.; D'ANTONIO, P.; LO CASTO, S. Cutting performance and indentation behaviour of diamond films on co-cemented tungsten carbide. *Surfaces and Coatings Technology*, 123, 2000. 778-783.

- /73/ KOSHY, P.; TOVEY, J. Performance of electrical discharge textured cutting tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60, 2011. 153-156.
- /74/ TAVARES, C. J. Caracterização estrutural e mecânica de multicamadas de TiN/ZrN depositadas por pvd. *Dissertação de mestrado*, 1997. 132.
- /75/ LEYLAND, A.; MATTHEWS, A. On the significance of the h/e ratio in wear control: ananocomposite coating approach to optimized tribological behavior. *Wear*, 246, 2000. 1-11.
- /76/ BUNSHAH, R. F. *Handbook of hard coatings - Deposition technologies, properties and application*. Norwich - New York: Noyes Publications, 2001. 550 p.
- /77/ VIDAKIS, N.; ANTONIADIS, A.; BILALIS, N. The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layred compounds. *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144, 2003. 481-485.
- /78/ TAVARES, C. J. M. Produção e caracterização de revestimentos nanoestruturados em multicamadas de TiAlN/Mo. *Tese de Doutorado - Universidade do Minho*, Braga - Portugal, 2002. 198.
- /79/ ASTM. *ASTM C1624: Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Mdes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing*. United States: [s.n.]. 2010. p. 29.
- /80/ BATISTA, J. C. A. Promising duplex coatings for tribological applications at elevated temperatures. *Tese de doutorado - UFMG*, 2001. 156.
- /81/ ISO, 20502:2005. *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) - Determination of adhesion of ceramics coatings by scratch testing*. Geneva: [s.n.]. 2005. p. 32.
- /82/ BUNSHAH, R. F. *Handbook of Hard Coatings:Deposition Technologies, Properties and Applications. Chemical Vapor Deposition (CVD)*, 2001. 550.
- /83/ BULL, S. J.; BERASETEGUI, E. G. An overview of the potential of quantitative coating adhesion. *Tribology International*, 39, n. 2, 2006. 99-114.
- /84/ SANJUAN, L.A.E.; JIMENEZ, L.B.V.; PINEDO, C.E.; TSCHIPTSCHIN, A.P. Microestruure and scratch test on plasma nitride AISI 410 stainless steel. *ABM*, 68, 2013. 81.
- /85/ BATISTA, J. C. A.; GODOY, C.; MATTHEWS, A. Micro-scale abrasive wear testing of duplex and non-duplex PVD (Ti,Al)N, TiN and Cr-N coatings. *Tribology International*, 6, 2002. 363-372.



- /86/ SANDVIK. *Catálogo eletrônico*. Disponível em:  
<[http://www.SANDVIK.coromant.com/pt-pt/knowledge/general\\_turning/grade\\_information/pages/default.aspx](http://www.SANDVIK.coromant.com/pt-pt/knowledge/general_turning/grade_information/pages/default.aspx)>. Acesso em: 12 março 2015.
- /87/ NBR ISO 4287-2002, 2. *Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade*. ABNT. [S.l.]: [s.n.]. 2002. p. 18.
- /88/ ISO 3685-1993: E., 1. *Tool-Life Testing with Single-Point Turning Tools, International Organization for Standardization*. Geneva: [s.n.]. 1993. p. 56.
- /89/ ELIAN, S. N. *Estatística básica*. São Paulo: LTC, 2006. 239 p.
- /90/ BREIDENSTEIN, B.; DENKINA, B. Significance of residual stress in PVD-coated carbide cutting tools. *CIRP Annals*, 62, 2013. 67-70.
- /91/ NUNES, R. M. Estudos das distorções de barras cilíndricas de aço ABNT 1045 em uma rota de fabricação envolvendo trefilação combinada à têmpera por indução. *Tese de doutorado - UFRGS*, 2012. 219.
- /92/ HAUKE, V. *Structural and residual stress analysis by non-destructive methods*. [S.l.]: Elsevier, 1997. 530 p.
- /93/ FITZPATRICK, M. E.; FRY, A. T. Determination of residual stresses by x-ray diffraction. *Measurement Good Practice Guide No. 52*, 2005. 5.
- /94/ LU, J. *Handbook of measurement of residual stresses*. Lilburn: Fairmont Press, 1995. 238 p.
- /95/ HULTMAN, L.; SUNDGREN, J. E. Structure/property relationships for hard coatings. *Handbook of hard coatings: deposition technologies, properties and applications*, 2001. 108-180.
- /96/ KLOCKE, F.; KRIEG, T. Coated tools for metal cutting. *Manufacturing technology*, 48, 1999. 515-525.
- /97/ RIEDL, A.; DANIEL, R.; TODT, J.; STEFANELLI, M.; D.HOLEC; SARTORY, B.; KRYWKA, C.; M.MÜLLER. A combinatorial X-ray sub-micron diffraction study of microstructure, residual stress and phase stability in TiAlN coatings. *Surface & Coatings Technology*, 257, 2014. 108-113.

## Anexos

### 1. Composição química do material ensaiado

ArcelorMittal Aços Longos		<b>CERTIFICADO DE QUALIDADE</b>		Número: 0005229199/2016		ArcelorMittal	
Sistema de Gestão Integrado - Normas ISO9001, ISO14001, OHSAS18001 e TS 16949				Assinatura			
Cliente:	FUNDTICAO MARTINELLI LTDA	Pedido:	570	Ordem de Venda:	6729036	Nota Fiscal:	000178340
Lista de Lotes:							
Produto	Descrição	Bitola	Corr/Lote	Lotes			
117520	BARRA REDONDA TREFILADA BTR 63,50 1045 6000 FX35 254MI	63,50 mm	A463005	1466130013			
Este documento certifica que o material aqui relacionado foi produzido, ensaiado e aprovado conforme requisitos de norma ou especificação solicitada. Certificamos que todo material relacionado acima foi produzido, testado e aprovado de acordo com a legislação vigente, não contém radiação em níveis prejudiciais ao ser humano. No caso de dúvidas, entre em contato com a nossa <b>Assistência ao Cliente 0800 015 1221</b> - <a href="http://www.arcelormittal.com.br">www.arcelormittal.com.br</a>							
Data: 27.06.2016							
Fernando Moraes Simioni Jr. Engenheiro Metalurgista CREA - 465.13793							
Página: 2/2							

Figura 1 – Certificado de qualidade do aço ABNT 1045.

ArcelorMittal  
Aços Longos

# CERTIFICADO DE QUALIDADE

Numero: 0005229199/2016

ArcelorMittal

Sistema de Gestão Integrado - Normas ISO9001, ISO14001, OHSAS18001 e TS 16949

Cliente: **FUNDICAO MARTINELLI LTDA** Pedido: **570** Material: **117520** Aço: **1045** Corrida: **A463005** Ordem de Venda: **6729036** Nota Fiscal: **000178340**

Produto: **TREFILADO REDONDO** Especificação: **SAE 1045** Bitola: **63,50 mm** Acond.: **6.000 mm** Nº Lotes: **1** Peso (Kg): **1357**

### Análise Química

%	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Sn	Mo	V	Pb	B
0.4500	0.6400	0.1900	0.0210	0.0200	X		0.1800	0.0700	0.0600	0.0090	0.0090	X	X	X

### Complementares

MACROGRAFIA-C	MACROGRAFIA-R	MACROGRAFIA-S
X	X	X

Observações:

Data: 27.06.2016

Este documento certifica que o material aqui relacionado foi produzido, ensaiado e aprovado conforme requisitos de norma ou especificação solicitada. Certificamos que todo material relacionado acima foi produzido, testado e aprovado de acordo com a legislação vigente, não contém radiação em níveis prejudiciais ao ser humano. No caso de dúvidas, entre em contato com a nossa Assistência ao Cliente 0800 015 1221 = [www.arcelormittal.com/br](http://www.arcelormittal.com/br)


  
Fernando Mendes Siqueira  
Engenheiro Metalurgista  
CRA - MG 37935  
Página: 1/2

Figura 2 – Certificado de qualidade do aço ABNT 1045.

## 2. Pré-testes para a escolha da texturização (arredondamento da aresta)

Existem vários parâmetros que podem interferir no processo de texturização, tais como: o distanciamento entre os eletrodos, a tensão e a corrente aplicadas; os tempos de trabalho, pausa e total da usinagem; entre outros.

Para escolha da texturização ideal, foram realizados 13 testes com diversos parâmetros e duas espessuras de folha de alumínio, conforme mostrada na Tabela 1.

Tabela 1- Parâmetros para texturização das ferramentas nos pré-testes para escolha da melhor texturização

Testes	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
V	80	80	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160
P (A)	1	2	1	1	2	3	2	1,5	1,5	1,5	2	1	1
A ( $\mu$ s)	0,8	1,6	0,8	0,8	0,8	0,8	1,6	0,8	1,6	0,4	0,4	0,4	1,6
B ( $\mu$ s)	0,8	1,6	0,8	0,8	0,8	0,8	1,6	0,8	1,6	0,4	0,4	0,4	1,6
Tempo (s)	1075	500	115	150	115	194	140	124	101	203	163	109	141
Folha ( $\mu$ m)	25	25	25	50	50	50	50	25	25	25	50	25	25

O modo de trabalho escolhido foi o gerador isoenergético de relaxação, sendo adotado o regime número 193 da lista de trabalho da máquina de eletroerosão. A Figura 1 mostra o regime de trabalho escolhido (193) e os parâmetros selecionados para o devido funcionamento da máquina Roboform 30. Todos os significados dos parâmetros estão elencados no Anexo 4 do presente trabalho.

KCUAC 11 TABLES EDITOR SETTING

	1	6												
E	M	C	V	P	A	T	R	F	B	R	U	SV	PR	BVIT
191	1	0	+5	3	4	1	47	4	2	4	30	5	12	
192	1	0	+5	2	5	1	47	4	2	4	30	5	11	
193	4	6	+4	1	2	1	46	2	2	4	30	5	11	
180	4	4	-5	1	3	1	50	2	2	3	65	5	11	
181	1	0	+5	2	4	1	47	4	2	3	30	5	11	
182	1	0	+5	1	5	1	46	4	2	3	30	5	11	
140	4	3	-5	0	2	1	50	2	2	3	65	5	12	
120	4	2	-5	0	1	1	50	2	2	3	65	5	11	
110	6	5	-5	1	3	1	50	2	2	3	65	5	11	
100	4	1	-5	0	1	1	50	2	2	3	65	5	12	
080	6	4	-5	1	3	1	50	2	2	3	65	5	11	
040	4	12	-5	0	2	1	50	2	2	3	65	5	12	
000	6	3	-5	1	3	1	50	2	3	3	65	5	11	

Figura 1 - Regime de trabalho escolhido para os testes de texturização.

A Figura 2 mostra o suporte após o término e fixado na máquina de eletroerosão e com o inserto colocado no suporte para o processo de texturização do inserto. A mesma também mostra o suporte utilizado para fixação da folha de alumínio (a folha é fixada com um ímã de neodímio), utilizado no processo de arredondamento da aresta do inserto.

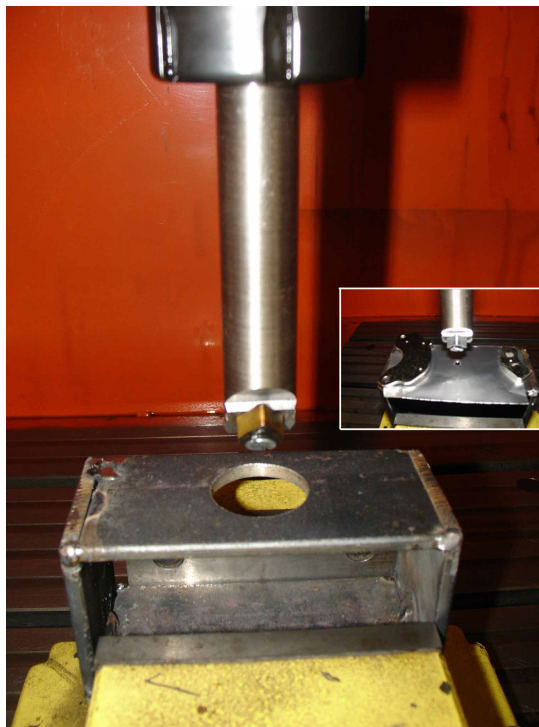
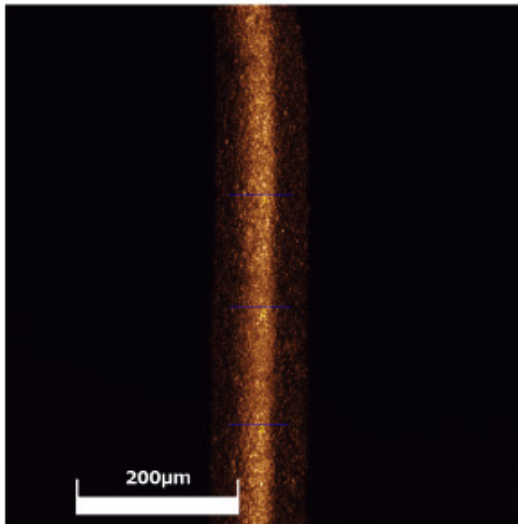


Figura 2 - Suporte para ferramenta DNMG utilizado na eletroerosão e para a folha de alumínio.

### 3. Medição dos raios da aresta de corte do inserto DNMG 150608



## DNMG 150608 - Jateado USA

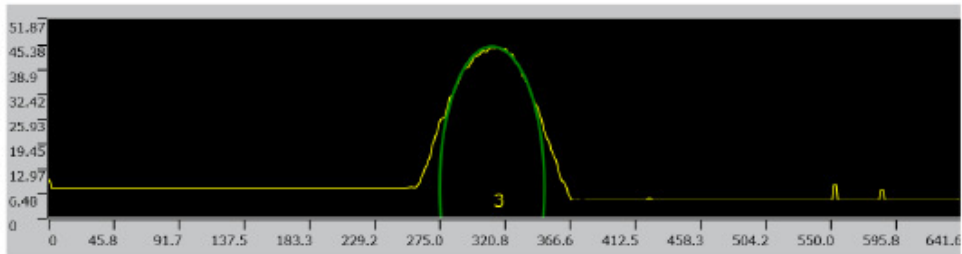


User ID: ADMIN  
 User name: Administrator  
 Description: FIRST ADMINISTRATOR  
 USER

DNMG 150608 - Jateada USA  
 [Acquisition parameters]  
 Scanning mode: XYZ fast scan + Color  
 Image size[pixels]: 1024X1024  
 Image size[µm]: 642x645  
 Objective lens: MPLAPONLEXT20x  
 Zoom: 1x  
 DIC: Off

Comment

No.	Result	Radius[µm]	Curvature[1/µm]	File name	
<input checked="" type="checkbox"/>	1		38.795	0.026	DNMG 150608 - Jateada
<input checked="" type="checkbox"/>	2		37.206	0.027	DNMG 150608 - Jateada
<input checked="" type="checkbox"/>	3		36.810	0.027	DNMG 150608 - Jateada
Count		3	3	3	
Average		37.604	0.027	-	
Min.		36.810	0.026	-	
Max.		38.795	0.027	-	
Range		1.985	0.001	-	
$\sigma$		1.050	7.334E-4	-	
3 $\sigma$		3.151	0.002	-	
Tolerance		Off	Off	Off	
Upper tolerance			0	0	-
Standard			0	0	-
Lower tolerance			0	0	-



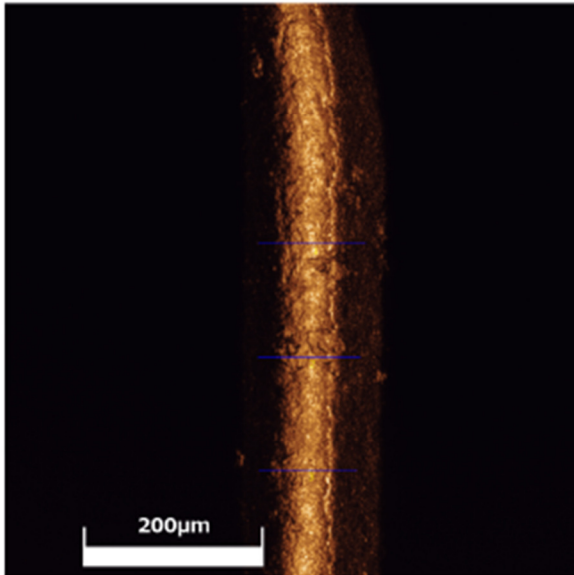
1/1

9/29/2016

Figura 3 - Medição do raio do inserto DNMG 150608 escovado.



**DNMG 150608 - COMERCIAL**



User ID: ADMIN  
 User name: Administrator  
 Description: FIRST ADMINISTRATOR  
 USER

DNMG 150608 - Comercial  
 [Acquisition parameters]  
 Scanning mode: XYZ fast scan + Color  
 Image size[pixels]: 1024X1024  
 Image size[µm]: 642x645  
 Objective lens: MPLAPONLEXT20x  
 Zoom: 1x  
 DIC: Off

Comment

No.	Result	Radius[µm]	Curvature[1/µm]	File name	
<input checked="" type="checkbox"/>	1		59.859	0.017	160929_091755_126
<input checked="" type="checkbox"/>	2		57.107	0.018	160929_091755_126
<input checked="" type="checkbox"/>	3		54.459	0.018	160929_091755_126
Count		3	3	3	
Average		57.141	0.018	-	
Min.		54.459	0.017	-	
Max.		59.859	0.018	-	
Range		5.400	0.002	-	
σ		2.700	8.284E-4	-	
3σ		8.101	0.002	-	
Tolerance		Off	Off	Off	
Upper tolerance			0	0	
Standard			0	0	
Lower tolerance			0	0	

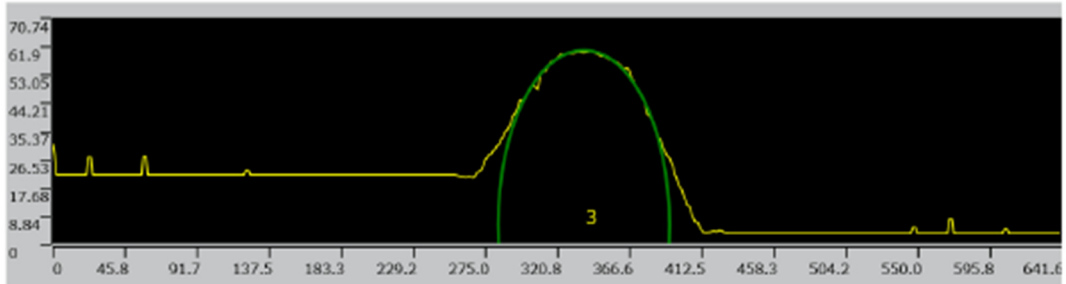
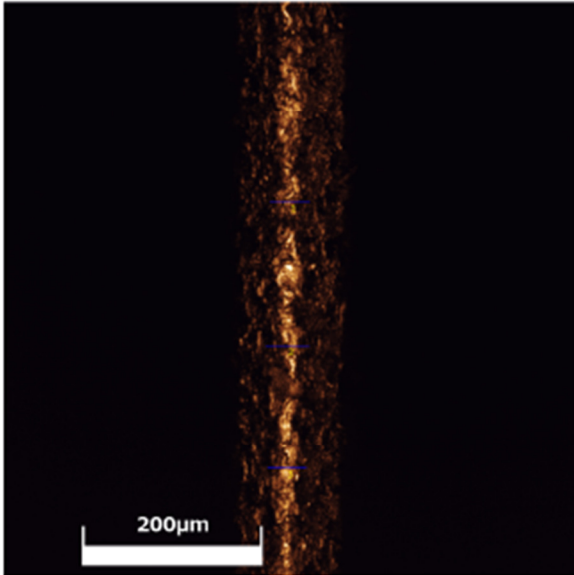


Figura 4 - Medição do raio do inserto DNMG 150608 comercial.

DNMG 150608 - EDM 09



User ID: ADMIN  
 User name: Administrator  
 Description: FIRST ADMINISTRATOR  
 USER

DNMG 150608 - EDM  
 [Acquisition parameters]  
 Scanning mode: XYZ fast scan + Color  
 Image size[pixels]: 1024X1024  
 Image size[µm]: 642x645  
 Objective lens: MPLAPONLEXT20x  
 Zoom: 1x  
 DIC: Off

Comment

No.	Result	Radius[µm]	Curvature[1/µm]	File name	
<input checked="" type="checkbox"/>	1		22.389	0.045	DNMG 150608 -
<input checked="" type="checkbox"/>	2		24.613	0.041	DNMG 150608 -
<input checked="" type="checkbox"/>	3		21.717	0.046	DNMG 150608 -
Count		3	3	3	
Average		22.906	0.044	-	
Min.		21.717	0.041	-	
Max.		24.613	0.046	-	
Range		2.895	0.005	-	
σ		1.515	0.003	-	
3σ		4.548	0.008	-	
Tolerance		Off	Off	Off	
Upper tolerance			0	0	-
Standard			0	0	-
Lower tolerance			0	0	-

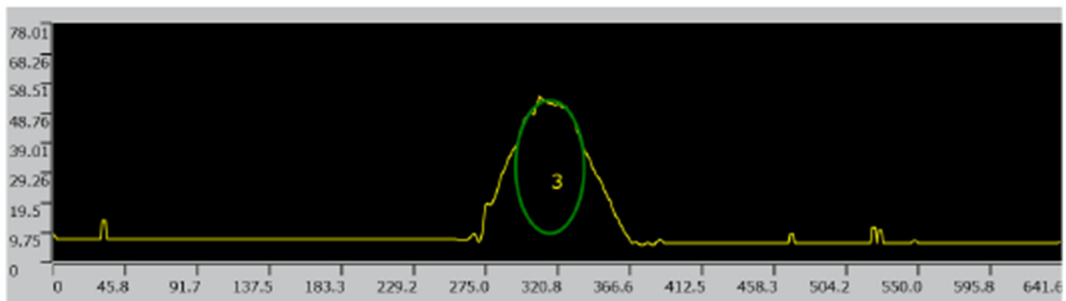
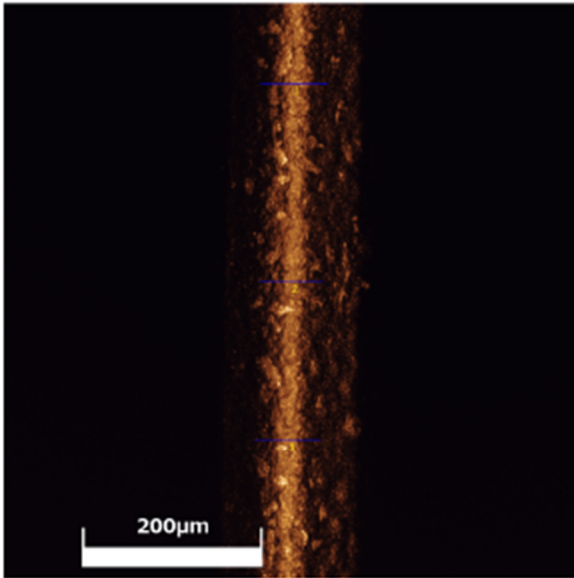


Figura 5 - Medição do raio do inserto DNMG 150608 amostra T9.



DMNG 150608-EDM-FINAL-4



User ID: ADMIN  
 User name: Administrator  
 Description: FIRST ADMINISTRATOR  
 USER

DNMG 150608 EDM-FINAL 4  
 [Acquisition parameters]  
 Scanning mode: XYZ fast scan  
 Image size[pixels]: 1024X1024  
 Image size[µm]: 642x645  
 Objective lens: MPLAPONLEXT20x  
 Zoom: 1x  
 DIC: Off

Comment

No.	Result	Radius[µm]	Curvature[1/µm]	File name
<input checked="" type="checkbox"/>	1	37.817	0.026	DNMG 150608 EDM-FIN.
<input checked="" type="checkbox"/>	2	35.696	0.028	DNMG 150608 EDM-FIN.
<input checked="" type="checkbox"/>	3	36.736	0.027	DNMG 150608 EDM-FIN.
Count		3	3	3
Average		36.750	0.027	-
Min.		35.696	0.028	-
Max.		37.817	0.028	-
Range		2.120	0.002	-
$\sigma$		1.060	7.853E-4	-
$3\sigma$		3.180	0.002	-
Tolerance		Off	Off	Off
Upper tolerance		0	0	-
Standard		0	0	-
Lower tolerance		0	0	-

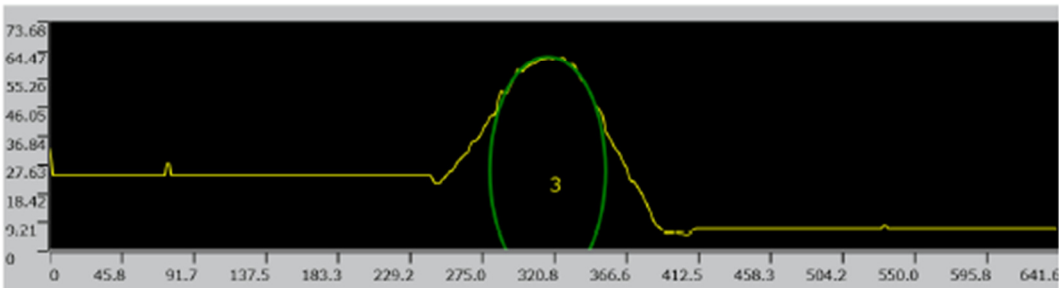


Figura 6 - Medição do raio do inserto DNMG 150608 final.

#### 4. Parâmetros da máquina de eletroerosão Roboform 30

**Definición de los parámetros generador**

- M Modo de mecanizado
  - 1 : Estándar
  - 2 : Poco desgaste
  - 3 : Muy poco desgaste
  - 4 : Microfino
  - 5 : Mecanizado del carburo
  - 6 : Superpulido
  - 7 : Estándar usuario (válido solamente con la tabla USER-TEC)
  - 8 : Poco desgaste con avasallamiento sobre tensión media
  - 9 : Muy poco desgaste con avasallamiento sobre tensión media
- C Condensador de acabado  
 Asociado a los modos 4 y 6. Si se consideran los reglajes que permiten obtener rugosidades cada vez más finas, C variará de la siguiente forma:  
 Modo 4 : C = 6 o C = 1  
           C = 12  
 Modo 6 : C = 6 o C = 3
- V Tensión del mecanizado ( $i_t$ )
 

Valor de V	2	3	4	5
Tensión en vacío (voltios)	80	120	160	200
- P Potencia disponible
 

																			Option 64 A
Amperios Valor de P	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
Corriente punta	0,5	1	1,5	2	3	4	6	8	12	16	24	32	48	64	96	128			

*Nota*  
No editable en ejecución y suspensión.

- A Duración de la impulsión
 

Valor de A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Duración	0,4	0,8	1,6	32	64	128	25	50	100	200	400	800	1600	3200	6400	12800

*Nota*  
No editable en ejecución y suspensión.

- Inv. Inversión de la polaridad entre electrodo y pieza
 

Inv. = 0 La polaridad entre electrodo y pieza es la indicada en el régimen.

Inv. = 1 La polaridad entre electrodo y pieza es la inversa a la indicada en el régimen.

**Modo EXE**

3.14

CHARMILLER TECHNOLOGIES S r.l. s.p.a. - Italia 1985

Figura 9 - Parâmetros da máquina de eletroerosão.

- **EL** Número del material utilizado para el electrodo  
Estos materiales son definidos por los siguientes códigos numéricos:  
1: Cobre  
2: Grafita  
5: Sparkal  
6: Acero  
12: Carburotungsteno

- **T** Selector de los parámetros secundarios  
T = 0 Los parámetros secundarios B, R, U y RF son ignorados. Son los parámetros fijados por el sistema los que se toman en cuenta.  
T = 1 Los parámetros secundarios B, R, U y RF son tomados en cuenta y sustituyen a los parámetros fijados por el sistema.

- **B** Duración de la pausa entre dos impulsiones

Valor de B	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Duración en $\mu s$	Optimización	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25	50	100	200	400	800	1600	3200

*Nota*  
Si B = 0 su valor será automáticamente optimizado en función del desarrollo del mecanizado, cualquiera que sea la tabla utilizada.

- **R** Duración del tiempo de retirada de las pulsaciones

Valor de R	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Duración en segundos	Optimización	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8

- **U** Duración del tiempo de mecanizado entre 2 pulsaciones

Valor de U	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Duración en segundos	Optimización	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8

*Nota*  
- Si R = 0 o U = 0 su valor será automáticamente optimizado en función del desarrollo del mecanizado, cualquiera que sea la tabla utilizada.  
- Si U = 9 se definen las pulsaciones.

- **RF** Tensión de arco de referencia  
Regulable entre 30 (15 voltios) y 80 (40 voltios), por medio voltio.

- **SV** Índice de espera medio de referencias: modos 1, 2 y 3.  
Regulable entre 10 y 50 %  
Tensión media: modos 4, 6 y 7  
Regulable entre 50 y 75 % de la tensión en vacío

- **PR** Protección  
Actualmente fijada a 5 (estándar)

**Modo EXE**

Figura 10 - Parâmetros da máquina de eletroerosão.

- **EL** Número del material utilizado para el electrodo  
Estos materiales son definidos por los siguientes códigos numéricos:
  - 1: Cobre
  - 2: Grafita
  - 3: Sparkal
  - 4: Acero
  - 12: Carburotungsteno

- **T** Selector de los parámetros secundarios
  - T = 0 Los parámetros secundarios B, R, U y RF son ignorados. Son los parámetros fijados por el sistema los que se toman en cuenta.
  - T = 1 Los parámetros secundarios B, R, U y RF son tomados en cuenta y sustituyen a los parámetros fijados por el sistema.

- **B** Duración de la pausa entre dos impulsiones

Valor de B	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Duración en $\mu$ s	Optimización	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25	50	100	200	400	800	1600	3200

*Nota:*  
Si B = 0 su valor será automáticamente optimizado en función del desarrollo del mecanizado, cualquiera que sea la tabla utilizada.

- **R** Duración del tiempo de retirada de las pulsaciones

Valor de R	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Duración en segundos	Optimización	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8

- **U** Duración del tiempo de mecanizado entre 2 pulsaciones

Valor de U	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Duración en segundos	Optimización	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8

*Nota:*  
- Si R = 0 o U = 0 su valor será automáticamente optimizado en función del desarrollo del mecanizado, cualquiera que sea la tabla utilizada.  
- Si U = 9 se detienen las pulsaciones.

- **RF** Tensión de arco de referencia  
Regulable entre 30 (1,5 voltios) y 80 (40 voltios), por medio voltio.

- **SV** Índice de espera medio de referencias: modos 1, 2 y 3.  
Regulable entre 10 y 50 %  
Tensión media: modos 4, 6 y 7  
Regulable entre 50 y 75 % de la tensión en vacío

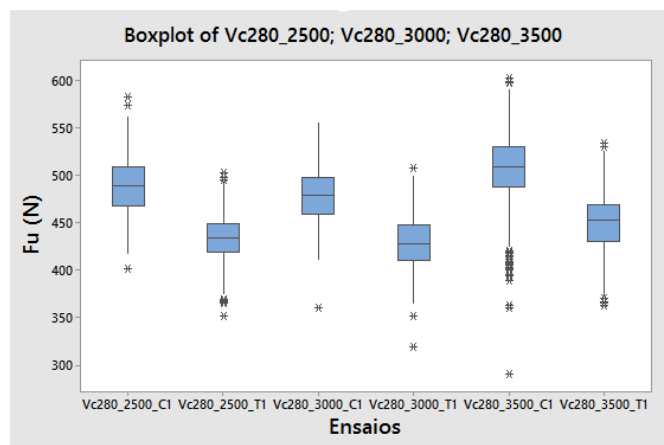
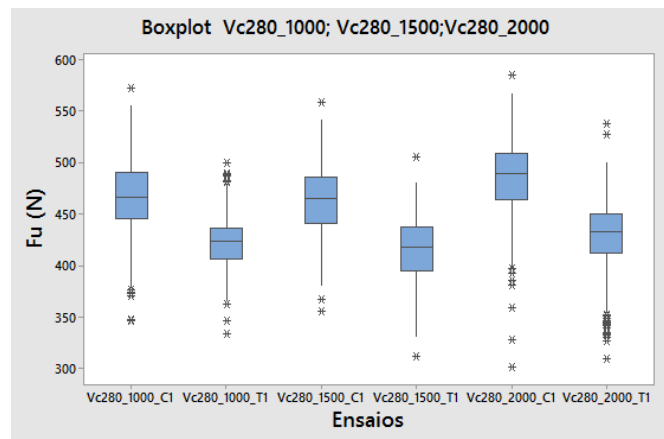
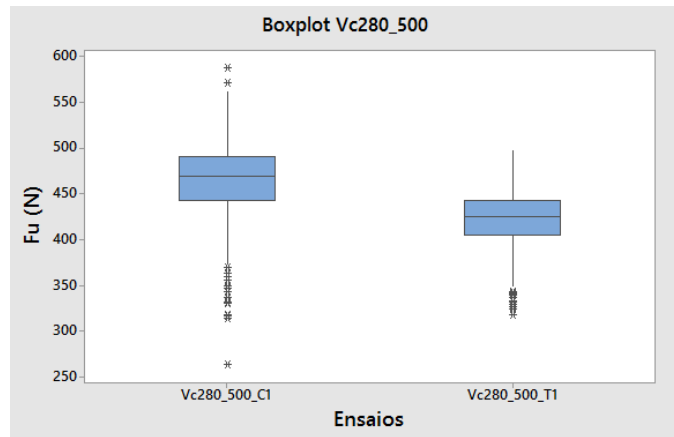
- **PR** Protección  
Actualmente fijada a 5 (estándar)

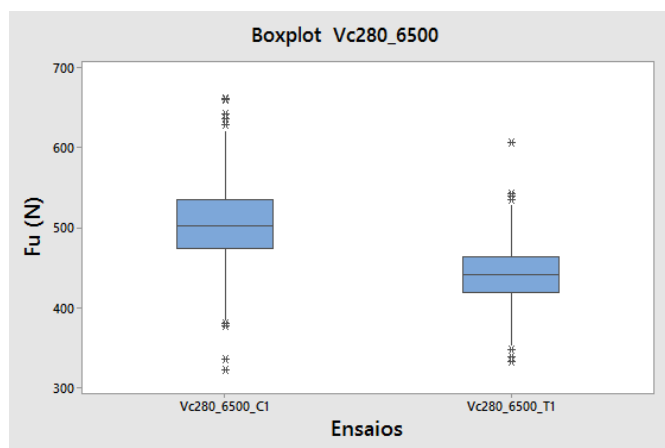
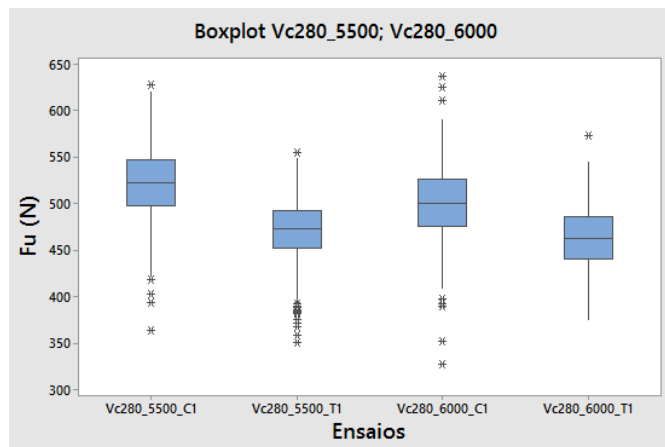
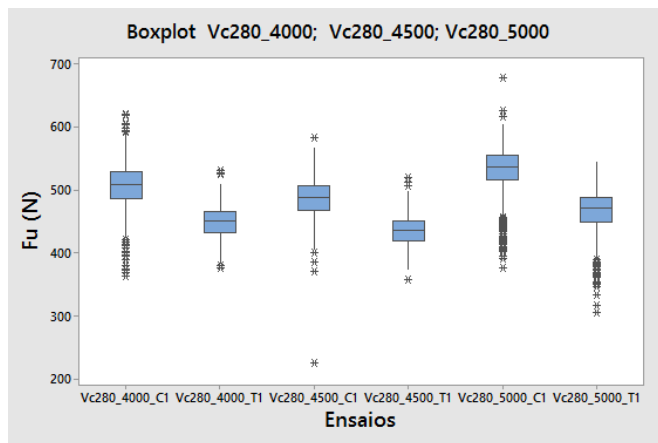
**Modo  
EXE**

Figura 11 - Parâmetros da máquina de eletroerosão.

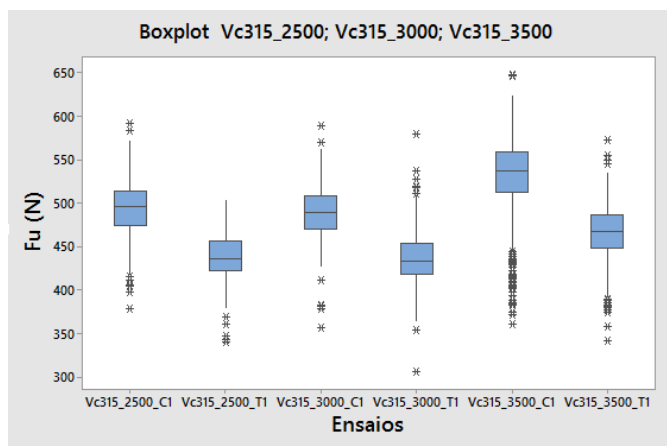
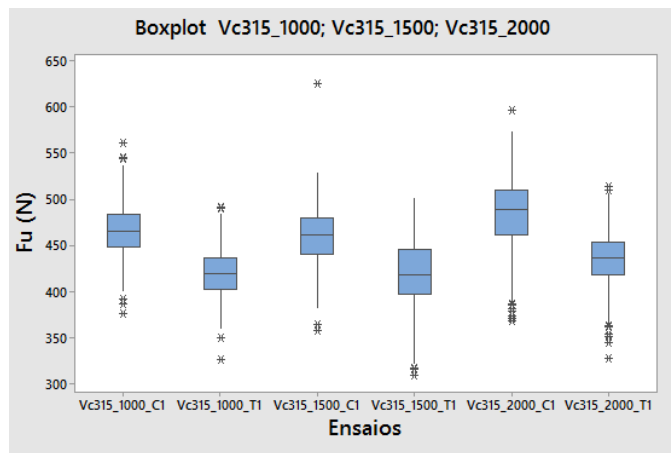
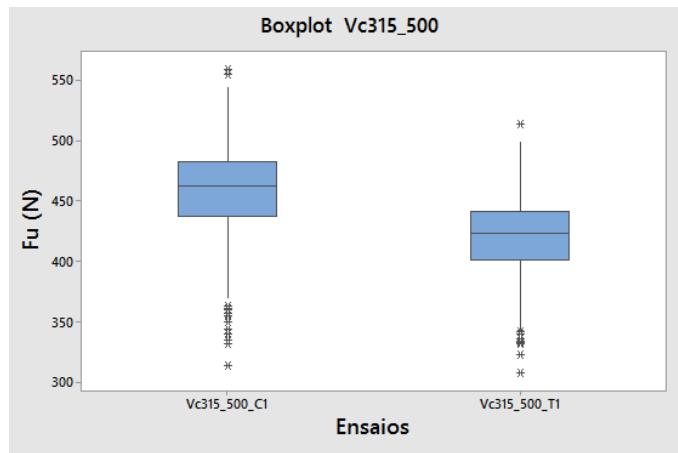
## 5. Figuras da comparação de usinagem (Boxplot)

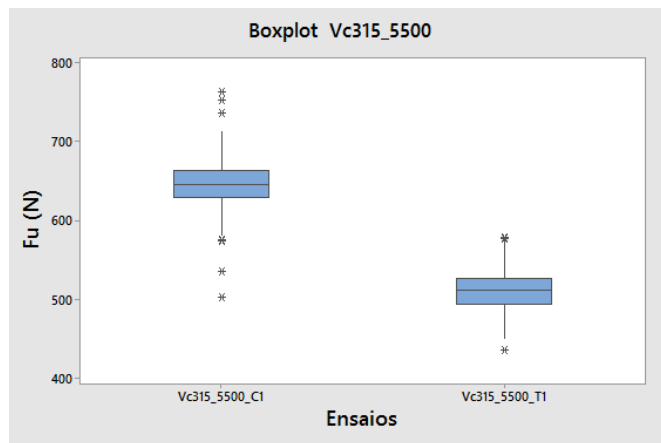
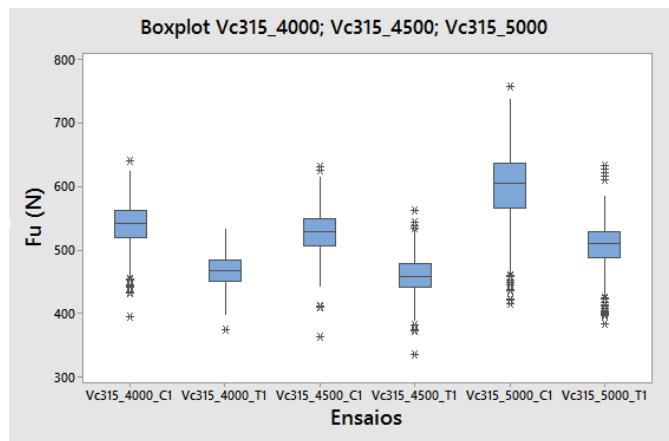
- *Velocidade de corte de 280 m/min*



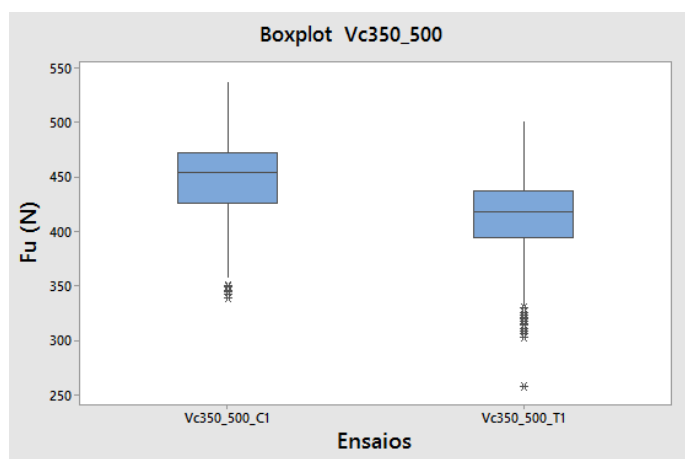


- Velocidade de corte de 315 m/min

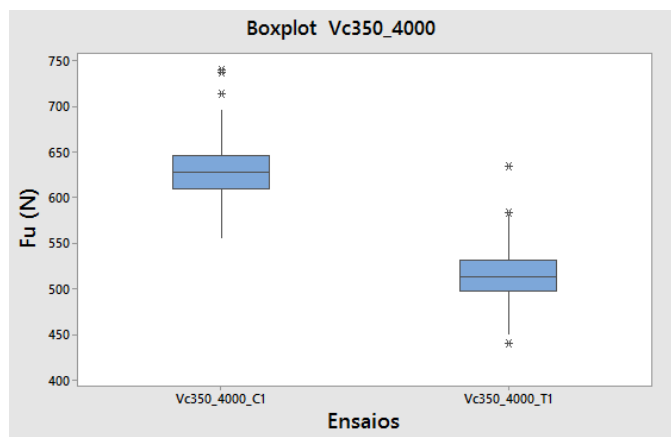
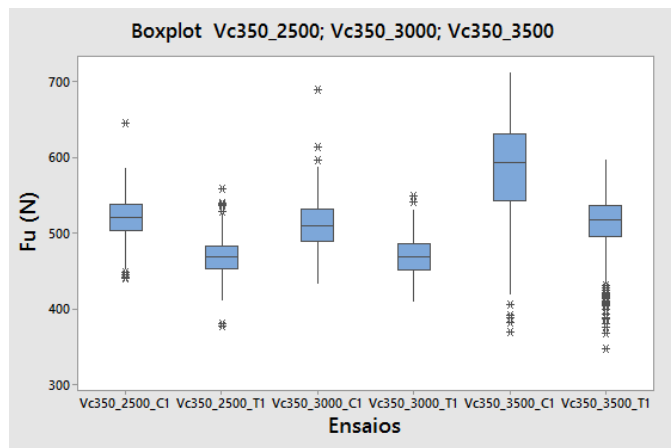
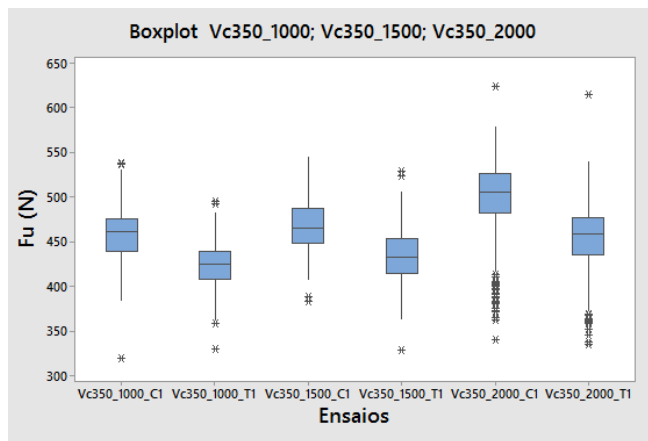




- Velocidade de corte de 350 m/min







- Velocidade de corte de 390 m/min

