



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DAS FORÇAS E DO DESGASTE DE FLANCO EM**  
**FERRAMENTAS DE METAL DURO MODIFICADAS NO**  
**TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 1045**

**DOUGLAS MACIEL D'AURIOL SOUZA**

**BELO HORIZONTE, 10 DE MARÇO DE 2020**

Douglas Maciel d'Auriol Souza

**ANÁLISE DAS FORÇAS E DO DESGASTE DE FLANCO EM  
FERRAMENTAS DE METAL DURO MODIFICADAS NO  
TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 1045**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção de título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara

Coorientador: Prof. Dr. Paulo César de Matos Rodrigues  
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

2020

S729a

Souza, Douglas Maciel d'Auriol.

Análise das forças e do desgaste de flanco em ferramentas de metal duro modificadas no torneamento do aço ABNT 1045 [recurso eletrônico] / Douglas Maciel d'Auriol Souza. - 2020.

1 recurso online (142 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Marcelo Araújo Câmara.

Coorientador: Paulo César de Matos Rodrigues.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 122-142.

Bibliografia: f. 114-121.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Desgaste mecânico - Teses. 3. Oxidação - Teses. 4. Usinagem - Teses. I. Câmara, Marcelo Araújo. II. Rodrigues, Paulo César de Matos. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621 (043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário  
31270-901 - Belo Horizonte - MG  
Tel.: +55 31 3409.5145  
E-mail: [cpgmec@demec.ufmg.br](mailto:cpgmec@demec.ufmg.br)

**"ANÁLISE DAS FORÇAS E DO DESGASTE DE FLANCO EM  
FERRAMENTAS DE METAL DURO MODIFICADAS NO  
TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 1045"**

**DOUGLAS MACIEL D'AURIOL SOUZA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Engenharia de Manufatura e Materiais**".

Dissertação aprovada no dia 10 de março de 2020.

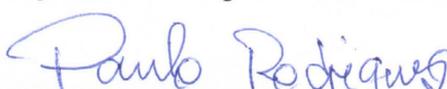
Por:



---

**Prof. Marcelo Araújo Câmara**

Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG



---

**Prof. Paulo Cesar de Matos Rodrigues**

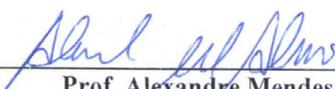
Coorientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG



---

**Prof. Sandro Cardoso dos Santos**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



---

**Prof. Alexandre Mendes Abrão**

Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

À minha filha Elisa e à minha esposa Priscila, pelo amor e o  
aprendizado durante esta jornada.

## AGRADECIMENTOS

À minha querida esposa Priscila, por todos os dias em que conversamos sobre nossos sonhos, por ter me ajudado a seguir este caminho e por sempre demonstrar que o amor está nas coisas que fazemos.

À minha família pelo apoio incondicional durante todo o processo, por acreditar em mim independentemente da situação. Em especial à minha irmã Mirna, por sempre ter sido um exemplo para mim na busca de conhecimento e no amor às pessoas.

Ao professor Marcelo Araújo Câmara, pela orientação e pelos conselhos, mas principalmente pela amizade e pelo convite para fazermos este trabalho.

Ao professor Alexandre Mendes Abrão, que me aceitou e orientou no início do meu retorno à UFMG.

Aos demais professores ligados ao Laboratório de Usinagem e Automação da UFMG.

Aos alunos ligados ao Laboratório de Usinagem e Automação da UFMG, especialmente aos Sr. Anderson Júnior dos Santos, Sr. Augusto Moura Martins, Sra. Bárbara Cristina Mendanha Reis, Sra. Natália Fernanda Santos Pereira, Sr. Diogo Azevedo de Oliveira e Sr. Vinícius Melo Cangussu, por terem compartilhado o seu tempo e conhecimento.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Meus sinceros agradecimentos.



“Presentemente eu posso me considerar um  
sujeito de sorte

Porque apesar de muito moço, me sinto são e  
salvo e forte

E tenho comigo pensado, Deus é brasileiro e  
anda do meu lado

E assim já não posso sofrer no ano passado”

BELCHIOR

## RESUMO

Trabalhar com altas taxas de remoção de material em uma usinagem normalmente corresponde a menores tempos de produção e ganhos econômicos. Entretanto, o aumento de consumo energético e o desgaste prematuro de ferramentas podem comprometer esta relação. Conhecer a quantidade de calor gerada durante o corte do material, e seu consequente fluxo, é essencial para controlar os fenômenos envolvidos durante o torneamento. A alteração do fluxo de calor da ferramenta é uma alternativa para aumento de vida. Para tal, modificações geométricas são introduzidas, como, por exemplo, microtexturas na face de saída ou de folga. Diante deste cenário, estudou-se o comportamento de um inserto de metal duro revestido com uma camada composta de TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiCN com a superfície de folga modificada, usinando aço ABNT 1045 com dureza de 83 HRB. Um projeto para alteração do inserto foi desenvolvido, no qual se considerou a criação de uma geometria que limitasse fisicamente o comprimento máximo do desgaste de flanco e entalhe, e que fosse de fácil repetibilidade e baixo custo. O aço foi torneado à seco na velocidade de corte de 350 m/min, avanço 0,2 mm/rev e profundidade de usinagem de 1 e 2,5 mm. Os valores de força foram coletados durante os ensaios, além da avaliação da microdureza do cavaco e do acompanhamento da evolução dos desgastes de flanco, cratera e entalhe. A integridade superficial foi analisada com perfis de microdureza e medição da rugosidade. Considerando que a presença do desgaste de entalhe na usinagem de aço carbono não é comum, procedeu-se a uma análise localizada, a qual indicou que a formação do desgaste estava relacionada com a alteração do fluxo de calor na ferramenta, proveniente da fricção do cavaco com a superfície de folga e sua propagação relacionada ao mecanismo de oxidação. A modificação se apresentou altamente eficiente no consumo energético, reduzindo a força resultante de usinagem em 58% em relação ao inserto convencional. A redução na componente força de corte chegou a 70%. Quanto à integridade superficial, a modificação promoveu uma redução da microdureza logo abaixo da superfície usinada em 16%, entretanto a rugosidade superficial, aumentou de  $R_a = 1,36\mu\text{m}$  para  $R_a = 1,78\mu\text{m}$ . Os mesmos mecanismos de desgaste presentes no inserto comercial foram detectados no modificado, e atuaram na mesma proporção, porém indícios mostraram que a modificação elevou ainda mais as temperaturas durante a usinagem, o que limitou o aumento das forças relacionadas ao desgaste.

Palavras-chave: Desgaste de Entalhe. Força de Usinagem. Fluxo de calor na usinagem. Oxidação.

## ABSTRACT

Working with high material removal rates in machining, usually corresponds to less time of production and economic gains. However, an increase in energy consumption or a premature tool wear may affect this relationship. Knowing the amount of heat generated during cutting of the material and its consequent flow, it is essential to control the phenomena involved during turning. Changing the heat flow of the tool is an alternative to increase service life. For this, geometric modifications can be introduced, for example, microtextures in the rake face or in flank face. In this scenario, we studied the behavior of a cemented carbide insert coated with a layer composed of TiN, TiCN and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with the modified flank face, turning steel with hardness 1045 ABNT 83HRB. A project to change the insert was developed, which was considered the creation of a geometry that physically limit the maximum length of the flank wear and notch, and it was easy repeatability and low cost. The steel was turned on cutting speed 350 m / min and depth of cut of 1 and 2.5 mm. The force values were collected during the tests, in addition to assessing the chip microhardness and monitoring the evolution of flank, crater and notch wear. The surface integrity was analyzed with microhardness profiles and roughness measurement. Considering that the presence of notch wear in the machining of carbon steel is not common, a analysis was carried out, which indicated that the wear formation was related to the variation in the heat flow in the tool, from the friction of the chip with the flank face and their propagation related to the oxidation mechanism. The modification proved to be highly efficient in energy consumption, reducing the resulting machining force in 58% compared to conventional insert. The reduction in cutting force component and reached 70%. Regarding the surface integrity, the modification promoted a decrease of the hardness after the machined surface in 16%, and the surface roughness worsened going from 1.36 Ra to 1.78 Ra. The same wear mechanisms present in the normal insert were detected in the modified one, and acted in the same proportion, but evidence showed that the modification raised the temperatures even further during machining, which limited the increase in the forces related to wear.

Keywords: Notch wear. Machining Force. Heat flow in machining. Oxidation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Processo de torneamento externo. ....	4
Figura 1-2 - Elementos da cunha de corte. ....	6
Figura 1-3 - Planos do sistema de referência da ferramenta. ....	7
figura 1-4 - (a) Ângulo de posição principal da ferramenta   (b) Ângulo de inclinação da ferramenta   (c) Ângulos de cunha ( $\beta_n$ ), folga ( $\alpha_n$ ) e saída da ferramenta ( $\gamma_n$ ).....	8
Figura 1-5 - Efeitos das variações da porcentagem de Co, TiC, TaC e do tamanho de grão de WC e seus efeitos sobre as propriedades mecânicas.....	10
Figura 1-6 - Vida de ferramentas revestidas em contato com aço SAE 1040. ....	12
Figura 1-7 - Formação do cavaco - (a) Mecanismo de formação, (b) Corte ortogonal. Imagem adaptada. ....	13
Figura 1-8 - Regime de atrito sólido (a) Regime I, (b) Regime II e (c) Regime III. ....	15
Figura 1-9 - Representação das zonas de aderência (a e b) e de escorregamento e técnica para determinar a distribuição de tensão (c). ....	16
Figura 1-10 - Contato da superfície de saída da ferramenta com a peça: (a) Modelo ideal, aresta afiada (b) o contato real. ....	17
Figura 1-11- Força com a progressão do desgaste de flanco. (a) Força de corte tangencial e (b) força de corte axial. Os dados experimentais são marcados por círculos e as previsões do modelo em linhas. ....	19
Figura 1-12 –(a) Distribuição de temperatura na peça, cavaco e ferramenta no processo de corte de aço a uma velocidade de corte de 60m/min, (b) fluxo de calor na usinagem de aço.....	20
Figura 1-13 - Força de usinagem ( $F_u$ ) e suas componentes no processo de torneamento. ....	21
Figura 1-14 - Segmentação de energia eficaz no processo de corte. ....	23
Figura 1-15 – Representação gráfica de um perfil de rugosidade e os parâmetros de medição $R_a$ e $R_t$ . ....	27
Figura 1-16 - A profundidade teórica da rugosidade $R_t$ derivada a partir das especificações de engate avanço ( $f$ ) e o raio de ponta da ferramenta ( $r_e$ ).....	28
Figura 1-17 – (a) Distribuição da microdureza de uma subcamada deformada. (b) Efeito de geometria da aresta na geração de tensões residuais . ....	30
Figura 1-18 – (a) Imagem (MEV) do desgaste para $f = 0.05$ mm/rev (b) Rugosidade x Desgaste de flanco para $v_c = 170$ m/min; $f = 0.05$ mm/ver. ....	31

Figura 1-19 - (a) ferramenta com desgaste de cratera e flanco. (b) critério de quantificação dos desgastes. ....	33
Figura 1-20 - (a) Ferramenta com desgaste de entalhe. (b) Ilustração esquemática de motivos que causam desgaste entalhe na aresta principal. ....	34
Figura 1-21 - (a) mecanismo de desgaste em usinagem contínua. (b) Ilustração esquemática dos pontos de geração dos desgastes de cratera e flanco. ....	36
Figura 1-22 - Desgaste de entalhe em ferramenta de metal duro. ....	37
Figura 1-23- (a) Vida do revestimento PVD TiN, TiCN, e TiAlN torneando aço SAE 1045 (0.15 mm/rev; (b) Máximo desgaste de flanco em relação ao tempo de corte (SAE 1045, 305 m/min). ....	38
Figura 1-24 - (a) Geometria da ferramenta modificada; (b) efeito da modificação na face de folga. ....	39
Figura 1-25 - Micrografias da camada de óxido formadas em WC-6% oxidadas ao ar a 700 °C durante 10 minutos. ....	41
Figura 1-26 – O resultado do TGA mostra a alteração no ganho de peso do WC-Co com o aumento da temperatura numa atmosfera rica em oxigênio. ....	41
Figura 1-27 - Cinemática de oxidação do WC. ....	42
Figura 2-1 - Fluxograma com etapas da metodologia. ....	44
Figura 2-2 – Características técnicas do inserto CNMG 120408-MP MC6025. ....	45
Figura 2-3 - Modelo esquemático da obtenção das componentes da força de usinagem. ....	46
Figura 2-4 - Projeto preliminar do inserto com nova geometria para a superfície de folga: a) Inserto comercial; b) Inserto modificado. ....	48
Figura 2-5 - Passos do rebolo na geração da nova superfície de folga. ....	48
Figura 2-6 – Simulação preliminar do fluxo do fluido de corte durante a usinagem. ....	49
Figura 2-7 - (a) Processo de fabricação do inserto protótipo. (b) Inserto segundos após contato com a peça a ser usinada. ....	49
Figura 2-8 - (a) Novo projeto. (b) Inserto com novo projeto logo após teste de quebra. ....	50
Figura 2-9 - (a) Corte dos corpos de prova para ensaio preliminar de dureza. (b) Mapa de medição de dureza. ....	51
Figura 2-10 - (a) Corpo de prova antes da usinagem (b) Indicação da superfície final do inserto comercial (c) Indicação da superfície final do inserto modificado. ....	52
Figura 2-11 - (a) Inserto I7 antes da limpeza ácida. (b) Inserto I7 após limpeza ácida. ....	54
Figura 2-12 - Apalpador TKU instalado no perfilômetro Hommel Etamic T8000, coletando o perfil do desgaste de flanco de um inserto modificado. ....	55

Figura 2-13 - (a) Tarugos com corte transversal após retirada das amostras. (b) Endentação intercalada durante a medição de dureza.....	56
Figura 3-1 – Planos de referência da ferramenta modificada.....	60
Figura 3-2 – Insertos modificados após 4000mm de comprimento usinado e limpos com banho químico códigos: (a) I2-M, (b) I3-M (c) I6-M e (d) I9-M.....	61
Figura 3-3 - Detalhe do desgaste de cratera e integridade da aresta de corte do Inseto I2-M.	62
Figura 3-4 - (a) Inseto comercial I4-N apresentando trinca o revestimento. (b) Inseto modificado I2-M apresentando trinca o revestimento.....	64
Figura 3-5– Insertos comerciais após 4000mm de comprimento usinado e limpos com banho químico códigos: (a) I4-N, (b) I5-N (c) I7-N e (d) I10-N. ....	65
Figura 3-6 -Detalhe do desgaste de cratera e integridade da aresta de corte do Inseto I4-N. .	66
Figura 3-7 – Imagem gerada com microscopia eletrônica de varredura. (a) inseto comercial após 4000 mm de contato e com indicação de medida para desgaste de flanco e abrasivo/adesivo. (b) inseto modificado após 4000 mm de contato e com indicação de medida para desgaste de flanco e abrasivo/adesivo.....	66
Figura 3-8 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da aresta de corte. Vista da projeção do plano $P_s'$ a) Inseto modificado, a) Inseto comercial, c) Inseto modificado, d) Inseto comercial. ....	68
Figura 3-9 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da aresta de corte. Vista da projeção do plano $P_s$ . a) Inseto modificado, a) Inseto comercial, c) Inseto modificado, d) Inseto comercial. ....	69
Figura 3-10 – Sobreposição de imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura....	71
Figura 3-11 – Perfilometria dos insertos comerciais códigos I10-N, I7-N e I4N e um inseto comercial novo código I3-P.....	72
Figura 3-12 - Perfilometria dos insertos modificados códigos I2-M, I6-M e I9-M e um inseto comercial novo código I3-P.....	73
Figura 3-13 – Desgaste tipo abrasivo/adesivo dos insertos (a) comercial (b) modificado. Vista do plano $P_r$ . ....	77
Figura 3-14 – Sequência de imagens no intervalo de tempo de 0,08 segundos, retiradas da filmagem com câmera de 120fps.....	77
Figura 3-15 – Propagação de trincas no substrato na transição do desgaste de abrasivo/adesivo para flanco (Inseto modificado). ....	78
Figura 3-16 - Trincas se propagando sobre a superfície de saída da ferramenta (Inseto comercial). ....	79

Figura 3-17 - Parte do material da ferramenta em processo de desprendimento (Inserito modificado).....	79
Figura 3-18 - Insetos após usinagem com profundidade de usinagem 2,5mm e limpos com banho químico: (a) I8-M e (b) I8-N.....	80
Figura 3-19 - Medição de microdureza HV com carga de 50kgf por 15 segundos e 20gf por 15 segundos. ....	83
Figura 3-20 - Cavaco no formato de fita durante a usinagem. ....	87
Figura 3-21 - Desgaste das ferramentas I2-M, I3-M, I4-N e I5-N com 2000mm de contato. .	88
Figura 3-22 - (a) Inserito modificado com raio de ponta quebrado. (b) Inserito modificado com raio de ponta inteiro. (c) Inserito comercial com raio de ponta quebrado. (d) Inserito comercial com raio de ponta inteiro. ....	90
Figura 3-23 - (a) Equilíbrio térmico na formação do cavaco- $v_{\Sigma}$ – Temperatura total da superfície, $v_0$ - Temperatura na camada externa da superfície, $v_w$ - Temperatura do corpo da ferramenta (b) Temperatura na usinagem em corte contínuo e interrompido. ....	96
Figura 3-24 - Fontes de geradoras de fluxo de calor. ....	105
Figura 3-25 – Revestimento de TiCN, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e TiN para os insetos estudados. ....	106
Figura 3-26 - Espessura total do revestimento de TiCN e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . ....	107
Figura 3-27 - Possível presença de trióxido de tungstênio. ....	108
Figura 3-28 - Curva do ganho de peso em relação ao tempo para as temperaturas de 600, 700 e 800°C em uma atmosfera de 90% de ar. ....	109

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3-1 - Valores da medição de dureza HRB do material em bruto. ....	59
Gráfico 3-2 – Valor médio do desgaste de flanco conforme a norma NBR ISO 3685:2017...67	
Gráfico 3-3- Valor máximo atribuído ao desgaste de flanco conforme a norma NBR ISO 3685:2017.....	67
Gráfico 3-4 – Valores médios para o desgaste de abrasivo/adesivo.....	70
Gráfico 3-5 - Perfil do desgaste tipo abrasivo/adesivo em 0,25mm da aresta de corte - Inseto comercial. ....	72
Gráfico 3-6 - Perfil do desgaste tipo abrasivo/adesivo em 0,25mm da aresta de corte - Inseto Modificado. ....	74
Gráfico 3-7 – Interpolação do volume do desgaste de flanco. Inseto Modificado.....	74
Gráfico 3-8 – Interpolação do volume do desgaste de flanco. Inseto comercial. ....	75
Gráfico 3-9 – Resultado da interpolação do volume desgastado para o inseto comercial e modificado. (a) distância de 1,1mm (b) distância de 0,45mm .....	76
Gráfico 3-10 – Desgaste de Flanco para insertos que usinagem com profundidade de usinagem (ap) de 2,5mm.....	81
Gráfico 3-11 - Perfil de microdureza na subcamada da peça – Usinagem com uma profundidade de usinagem (ap) de 1mm. Carga de 20gf. ....	82
Gráfico 3-12 - Perfil de microdureza na subcamada da peça – Usinagem com ap de 1mm. Carga de 5gf.....	83
Gráfico 3-13 - Perfil de microdureza na subcamada da peça – Usinagem com ap de 2,5mm. ....	84
Gráfico 3-14 - Valores médios de microdureza dos cavacos em diferentes profundidades de corte. ....	85
Gráfico 3-15 - Valores médios de rugosidade em Ra no comprimento de contato de 2000mm. ....	86
Gráfico 3-16 - Valores médios de rugosidade em Rt no comprimento de contato de 2000mm. ....	87
Gráfico 3-17 - Valores médios de rugosidade em Rz no comprimento de contato de 2000mm. ....	88
Gráfico 3-18 - Valores médios de rugosidade em Ra no comprimento de contato de 4000mm, sem filtro.....	89

Gráfico 3-19 - Valores médios de rugosidade em Rt no comprimento de contato de 4000mm, sem filtro.....	89
Gráfico 3-20 - Valores médios de rugosidade em Rz no comprimento de contato de 4000mm, sem filtro.....	89
Gráfico 3-21 - Valores médios de rugosidade em Ra no comprimento de contato de 4000mm, com filtro. ....	91
Gráfico 3-22 - Valores médios de rugosidade em Rt no comprimento de contato de 4000mm, com filtro. ....	91
Gráfico 3-23 - Valores médios de rugosidade em Rz no comprimento de contato de 4000mm, com filtro. ....	91
Gráfico 3-24- Perfil de rugosidade simulada para o inserto modificado e normal.....	92
Gráfico 3-25 - Desvio padrão da força passiva ao longo do tempo. ....	93
Gráfico 3-26 - Forças coletadas durante a usinagem com os insertos comerciais e modificados, incluindo ensaios com interrupção. ....	94
Gráfico 3-27 – Força de usinagem dos insertos comerciais e modificados, incluindo ensaios com interrupção. ....	95
Gráfico 3-28 - Forças coletadas durante a usinagem com os insertos comerciais e modificados, excluindo os ensaios com interrupção. ....	95
Gráfico 3-29 - Força de usinagem dos insertos comerciais e modificados, excluindo ensaios com interrupção. ....	97
Gráfico 3-30 - Teste de hipótese das médias em cada intervalo de tempo (Modificado < Normal).....	98
Gráfico 3-31- Teste de hipótese da variância em cada intervalo de tempo (Modificado < Normal).....	99
Gráfico 3-32 - Força de corte dos insertos comerciais e modificados, excluindo ensaios com interrupção. ....	99
Gráfico 3-33 - Força de avanço dos insertos comerciais e modificados, excluindo ensaios com interrupção. ....	100
Gráfico 3-34 - Força passiva dos insertos comerciais e modificados, excluindo ensaios com interrupção. ....	101
Gráfico 3-35 - Forças coletadas durante a usinagem com os insertos comerciais e modificados. Profundidade de usinagem (ap) 2.5 mm.....	102
Gráfico 3-36 - Força de usinagem e temperatura estimada nos estágios do desgaste da ferramenta comercial. ....	109

Gráfico 3-37 - Força de usinagem e temperatura estimada nos estágios do desgaste da ferramenta modificada.....	110
--	-----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 -Melhora de desempenho de ferramentas usando revestimento.....	36
Tabela 1-2 – Mecanismos comuns de desgaste da ferramenta e da falha. ....	37
Tabela 3-1 - Rastreabilidade da peça, inserto, condição dos insertos e parâmetros de dos testes .....	57
Tabela 3-2 - Valores obtidos por meio da simulação do perfil de rugosidade. ....	92

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNC - Controlo numérico computadorizado

HSS - Aço rápido

MD - Metal duro

$v_c$  - Velocidade de corte

$f$  - Avanço

$a_p$  - Profundidade de usinagem

S - Aresta principal de corte

S' - Aresta secundária de corte

$A_\gamma$  - Superfície de saída

$A_\alpha$  - Superfície principal de folga

$A'_\alpha$  - Superfície secundária de folga

$P_r$  - Plano de referência da ferramenta

$P_s$  - Plano principal de corte

$P'_s$  - Plano secundário de corte

$P_o$  - Plano ortogonal

$P_f$  - Plano admitido de trabalho

$P_p$  - Plano dorsal da ferramenta

$P_n$  - Plano normal a aresta de corte

WC - Carbonetos de tungstênio

TiC - Carboneto de titânio

TaC - Carboneto de tântalo

NbC - Carboneto de nióbio

PVD - Deposição física por vapor (Physical vapour deposition)

CVD - Deposição química por vapor (Chemical vapour deposition)

TiAlN - Nitreto de Alumínio e Titânio

TiCN - Carbonitreto de titânio

$Al_2O_3$  - Oxido de alumínio

TiN - Nitreto de titânio

AISI - American Iron and Steel Institute

SAE - Society of Automotive Engineers

DIN - Deutsches Institut für Normung

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ISO - International Organization for Standardization

$A_R$  - Área real

$F_T$  - Força de corte radial

$F_f$  - Força de avanço

$F_a$  - Força de atrito

$h_f$  - Largura do contato na superfície de folga

$T_b$  - Temperatura da massa

$F_p$  - Força passiva

$F_a$  - Força de avanço

$F_c$  - Força de corte

$F_u$  - Força de usinagem

$F_{TR}$  - Força ativa

$W_{\text{elsat.}}$  - O trabalho das forças que produzem deformação elástica na ferramenta, na peça, no cavaco e na máquina.

$W_{\text{dispers.}}$  - O trabalho das forças de dispersão responsáveis pela superação das energias superficiais da peça.

$W_{\text{estr.}}$  - O trabalho das forças para modificar a estrutura cristalina do metal sob pressão e aquecimento.

$W_{\text{plast.}}$  - O trabalho das forças que produzem deformação plástica.

$W_{\text{cisalh.}}$  - O trabalho das forças que produzem cisalhamento e os consequentes deslizamentos no cavaco e sobre a superfície usinada.

$W_{\text{atrito}}$  - O trabalho das forças de atrito nas superfícies de saída

$VB_B$  - Desgaste de flanco médio

$VB_{B_{\text{max}}}$  - Desgaste de flanco máximo

$K_T$  - Profundidade da cratera

$R_t$  - Altura total do perfil

$R_a$  - Desvio aritmético médio

$\chi_r$  - Ângulo de posição da ferramenta

$\lambda_s$  - Ângulo de inclinação da ferramenta

$\alpha_n$  - Ângulo folga da ferramenta

$\gamma_n$  - Ângulo de saída da ferramenta

$\mu$  - Coeficiente de atrito

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	1
OBJETIVOS.....	3
Objetivo geral.....	3
Objetivos específicos.....	3
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
1.1 Operação de torneamento.....	4
1.2 Geometria de ferramentas de corte e seus materiais.....	5
1.3 As forças e o trabalho na usinagem.....	13
1.4 Integridade superficial das peças torneadas.....	26
1.5 Desgaste e avarias em ferramentas de corte e seus mecanismos.....	31
2. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	43
2.1 Materiais.....	45
2.2 Equipamentos.....	45
2.3 Desenvolvimento do inserto.....	47
2.4 Medição de dureza dos corpos de prova.....	50
2.5 Torneamento dos corpos de prova.....	51
2.6 Obtenção da força de usinagem.....	52
2.7 Medição da rugosidade.....	53
2.8 Coleta de dados de desgaste da ferramenta de corte.....	53
2.9 Medição de microdureza.....	55
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
3.1 Dureza do material em bruto.....	58
3.2 Desgaste da ferramenta de corte.....	59
3.3 Microdureza.....	81
3.4 Rugosidade.....	85

3.5 Força de usinagem e suas componentes .....	94
3.6 Discussão geral .....	103
4. CONCLUSÕES .....	112
5. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	113
6. REFERÊNCIAS .....	114
7. APÊNDICE .....	122
APÊNDICE A – Dados do teste de dureza HRB .....	122
APÊNDICE B – Resultados da Microdureza da peça torneada .....	124
APÊNDICE C – Resultados da Microdureza dos cavacos.....	126
APÊNDICE D – Resultados dos valores de rugosidade .....	127
APÊNDICE E – Resultados dos valores de desgaste.....	130
APÊNDICE F – Programa em Python para tratamento dos dados de força. ....	131
APÊNDICE G – Estatística para cálculo de volume do perfil desgastado.....	134
APÊNDICE H – Estatística descritiva para as forças (Vibração). ....	135
APÊNDICE I – Programa em Python para cálculo de área e volume do perfil desgastado. .	137
APÊNDICE J – Programa CNC .....	141

## INTRODUÇÃO

O Fórum Econômico Mundial elabora desde 1997 o ranking das economias mais produtivas. A classificação leva em consideração 12 pilares, sendo a inovação um deles. É importante lembrar que a busca por inovação não se limita somente a segmentos novos, mas também a alguns consagrados há décadas, como é o caso do torneamento de aços carbonos não ligados. O torneamento é um processo de conformação, onde o material gira em torno do seu eixo e sua forma é definida removendo-se o material com auxílio de uma ferramenta com aresta de corte afiada e com uma geometria definida. As inovações para a indústria nestes seguimentos normalmente estão relacionadas a ganhos no custo produtivo, seja por redução de tempo de usinagem, gastos energéticos ou aumento da vida da ferramenta.

Para atender às diversas necessidades do torneamento de aço carbono não ligados, os fabricantes de ferramentas possuem uma vasta lista de geometrias e materiais variando conforme a aplicação. Os materiais mais comuns para este tipo de operação são: o aço rápido (HSS, do inglês *high speed steel*), o metal duro (MD), o Cermet (do inglês: *ceramic (cer) and metal (met)*) e a cerâmica. As geometrias estão diretamente relacionadas às características da peça e à quantidade de material a ser removido. Algumas das características macrogeométricas de uma ferramenta são: o tamanho do círculo inscrito, o raio de ponta, o tipo de quebra cavaco o seu ângulo de posição. Já há algum tempo microcamadas com alta dureza, são depositadas sobre o substrato da ferramenta, proporcionando assim um ganho significativo em seu desempenho final. Estes revestimentos normalmente são carbonetos ou nitretos. A geometria da ferramenta de corte e os parâmetros usados na usinagem também possuem grande importância nos mecanismos de desgaste, principalmente nos termicamente ativados. A velocidade de corte possui influência direta na temperatura da zona terciária de cisalhamento e é nesta região que ocorre o desgaste de flanco.

A operação de torneamento pode ser genericamente dividida entre desbaste e acabamento. No desbaste normalmente uma grande quantidade de material é removida e não se tem uma preocupação elevada com a geometria final ou a integridade superficial. No acabamento, ao contrário do desbaste e a geometria e integridade são as características principais. Por causa disso, a geometria da ferramenta tende a acompanhar esta tendência, utilizando inserto de dimensão menor e raio de ponta pequeno para acabamento. Como as

características finais da peça são obtidas no processo de acabamento, tende-se a se valorizar mais esta etapa e não observar fatores cruciais, como deformações subsuperficiais, proveniente do desbaste.

Quando são avaliados os aspectos econômicos em uma produção, a operação de desbaste pode representar o maior custo, uma vez que seu consumo energético é maior, assim como o seu tempo de máquina e, em algumas vezes, o custo de ferramenta, já que o principal elemento que determina o preço de um inserto é seu tamanho e seu material. Além disso, a operação de acabamento é, de certa forma subordinada a operação de desbaste. Estudos relacionados à alteração na macrogeometria em uma ferramenta quase sempre são direcionados para a etapa de acabamento, buscando, por exemplo, uma melhoria na integridade superficial ou redução do tempo de usinagem. Entretanto, alteração na geometria de insertos de desbaste também podem promover ganhos expressivos para a indústria.

No processo de usinagem, cerca de 30 a 50% da energia total é usada para produzir e separar o cavaco, sendo que o restante é despendido nas interfaces entre ferramenta e peça. Diante deste valores, o estudo da interface entre a ferramenta e a peça usinada é essencial para compreensão da usinabilidade e desempenho das ferramentas de corte e formação do cavaco (TRENT e WRIGHT, 2000) e (ASTAKHOV, 2004). Alterações nas superfícies das ferramentas, como aplicação de microtexturas, são técnicas que atualmente tem apresentado os melhores resultados no ganho de desempenho na usinagem (FANG e OBIKAWA, 2017). Exemplos desta aplicação de texturas obtiveram êxito quanto a redução das forças de corte, com redução de até 7% sobre a ferramenta não texturizada (GRGURAS e PUSAVEC, 2019).

Diante deste cenário, este estudo foi realizado com o intuito de avaliar o desempenho de ferramentas de metal duro revestidas com TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiCN, com ou sem alteração na sua superfície de folga. Os experimentos foram realizados durante o torneamento do aço ABNT 1045 e teve como objetivo avaliar os impactos da modificação sobre o desgaste da ferramenta e as forças envolvidas no processo.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo geral**

Esta dissertação tem objetivo de estudar o efeito da alteração geométrica realizada na superfície de folga de uma ferramenta de metal duro e do parâmetro profundidade de usinagem sobre a força de usinagem e suas componentes, rugosidade da peça, microdureza do cavaco e da subcamada usinada e desgaste da ferramenta. Os dados foram coletados durante a operação de torneamento de desbaste do aço ABNT 1045 e comparados estatisticamente.

### **Objetivos específicos**

Compreender a influência da modificação da geometria da superfície de folga da ferramenta sobre a força de corte, força passiva e força avanço.

Compreender a influência da modificação da geometria da superfície de folga da ferramenta sobre a rugosidade e microdureza da superfície;

Descrever os desgastes da ferramenta e seus mecanismos em relação à modificação da geometria da superfície de folga da ferramenta;

Compreender a influência da modificação da geometria da superfície de folga da ferramenta sobre a microdureza do cavaco;

## 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados aspectos e conceitos referentes à operação de torneamento, geometria de ferramentas e seus materiais. São tratados também os temas da força de usinagem e suas componentes, e da integridade superficial da peça torneada. Por fim, apresenta-se uma abordagem sobre o desgaste e avarias em ferramentas de corte e seus mecanismos.

### 1.1 Operação de torneamento

Segundo Ferraresi (1970), a operação de usinagem se caracteriza por produzir *cavaco* ao conferir a uma peça a forma ou as dimensões ou o acabamento de forma ou ainda alguma combinação qualquer destes itens. O cavaco é a porção de material removido, o qual contém uma forma geométrica irregular. No torneamento, uma ferramenta com geometria definida é inserida em uma peça em rotação para gerar uma superfície, externa ou interna, concêntrica com o virabrequim (STEPHENSON, 2016), (Figura 1-1). A máquina na qual o processo descrito é realizado se chama torno.

Os métodos de torneamento podem ser classificados, por exemplo, entre torneamento de desbaste e de acabamento. Klocke (2011) destaca que no caso de desbaste, uma alta taxa de remoção de material é alcançada e que no caso do acabamento, o objetivo é obter um alto nível de precisão dimensional e qualidade superficial. O processo de torneamento é altamente flexível, o que permite sua aplicação tanto em protótipos quanto em produções seriadas. O torneamento utilizando máquinas com controle numérico computadorizado (CNC), permitem um aumento da taxa de remoção e redução do tempo ciclo da operação.

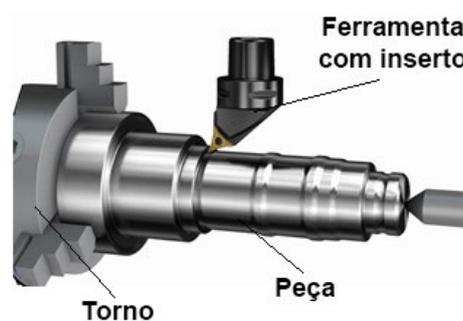


Figura 1-1 - Processo de torneamento externo.  
Fonte: [www.mmsonline.com](http://www.mmsonline.com)

A operação básica de torneamento, também conhecida como corte semi-ortogonal, é a mais comumente empregada em trabalhos experimentais em usinagem (TRENT e WRIGHT, 2000). O deslocamento longitudinal da ferramenta sobre a peça, denominado movimento de corte, irá promover uma única retirada de material. O deslocamento axial da ferramenta, após um movimento de corte, acaba por promover a remoção contínua de material e a este deslocamento se dá o nome de movimento de avanço. Há ainda um terceiro movimento chamado de movimento efetivo que é a resultante entre o movimento de avanço e de corte simultaneamente (ABNT, 1989). Para cada um dos tipos de movimentos citados, existe uma direção, sendo está definida pela norma NBR 6162 como a direção instantânea do movimento de corte, avanço ou efetiva.

As variáveis ajustáveis pelo operador do torno são a velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f$ ) e a profundidade de usinagem ( $a_p$ ). A velocidade de corte é definida como a velocidade instantânea do ponto de referência, segundo a direção e o sentido de corte (ABNT, 1989) e sendo calculada por meio da equação (Eq. 1):

$$v_c = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad \text{[m/min]} \quad \text{(Eq. 1)}$$

Onde:

$d$  = Diâmetro da peça a ser tornada [mm]

$n$  = Número de rotações por minuto [rpm]

Quando se fala em torneamento, a grandeza do avanço ( $f$ ) é o resultado do percurso da ferramenta em relação à rotação da peça e é medida em milímetro por revolução [mm/rev] (ABNT, 1989). A profundidade de usinagem ( $a_p$ ) é a profundidade de penetração da ferramenta sobre a peça e é medida em [mm]. Com o produto da profundidade de usinagem ( $a_p$ ) pelo avanço ( $f$ ) e pela velocidade de corte ( $v_c$ ) é possível calcular a taxa de remoção de material.

## 1.2 Geometria de ferramentas de corte e seus materiais

A usinagem é um processo que, por definição utiliza uma aresta de corte com geometria definida para gerar forma. Sendo assim, é necessário conhecer as suas características geométricas e sua posição em relação à peça de trabalho. A norma NBR ISO 3002-1 *Grandezas básicas em usinagem e retificação* (ABNT, 2015) trata especificamente da geometria da parte cortante das ferramentas de corte. A seguir, serão apresentadas algumas definições conforme a norma (Figura 1-2).

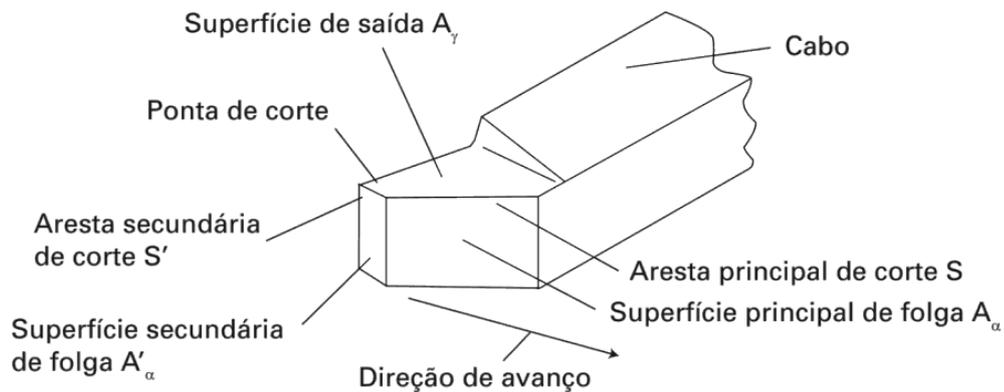


Figura 1-2 - Elementos da cunha de corte.  
Fonte: MACHADO et al., 2011 - Imagem adaptada.

A superfície em que o cavaco se move sobre a cunha da ferramenta é denominada superfície de saída ( $A_\gamma$ ). As superfícies que determinam a folga entre a peça e a ferramenta são denominadas superfícies de folga, sendo a superfície principal de folga ( $A_\alpha$ ) distinta da secundária de folga ( $A'_\alpha$ ). As arestas de corte resultam da intercessão das superfícies de saída e de folga, são duas, uma formada com plano principal de corte ( $S$ ) e outra formada com o plano secundária de corte ( $S'$ ) (Figura 1-2).

Durante a fabricação da ferramenta, ou no seu posicionamento na máquina, ou ainda na efetiva operação de usinar, faz-se necessário conhecer o posicionamento da ferramenta no espaço. Existem dois sistemas de referências distintos, o sistema de referência da ferramenta e o sistema de referência efetivo. Com estes sistemas é possível identificar os planos e os ângulos de uma ferramenta (MACHADO et al., 2011). A Figura 1-3 exhibe os planos de referência da ferramenta, sendo eles:

- Plano de referência da ferramenta ( $P_r$ ) – Perpendicular à direção admitida de corte e paralelo ao plano de apoio da ferramenta (somente no torneamento).

- Plano principal de corte ( $P_s$ ) – Tangencial à aresta principal de corte e perpendicular ao  $P_r$ .
- Plano secundário de corte ( $P'_s$ ) – Tangencial à aresta secundária de corte e perpendicular ao  $P_r$ .
- Plano ortogonal ( $P_o$ ) - Ortogonal aos planos  $P_s$  e  $P_r$ .
- Plano admitido de trabalho ( $P_f$ ) – Perpendicular à  $P_r$  e paralelo a direção admitida de avanço.
- Plano dorsal da ferramenta ( $P_p$ ) – Perpendicular ao  $P_r$  e  $P_f$
- Plano normal a aresta de corte ( $P_n$ ) – Perpendicular à aresta de corte.

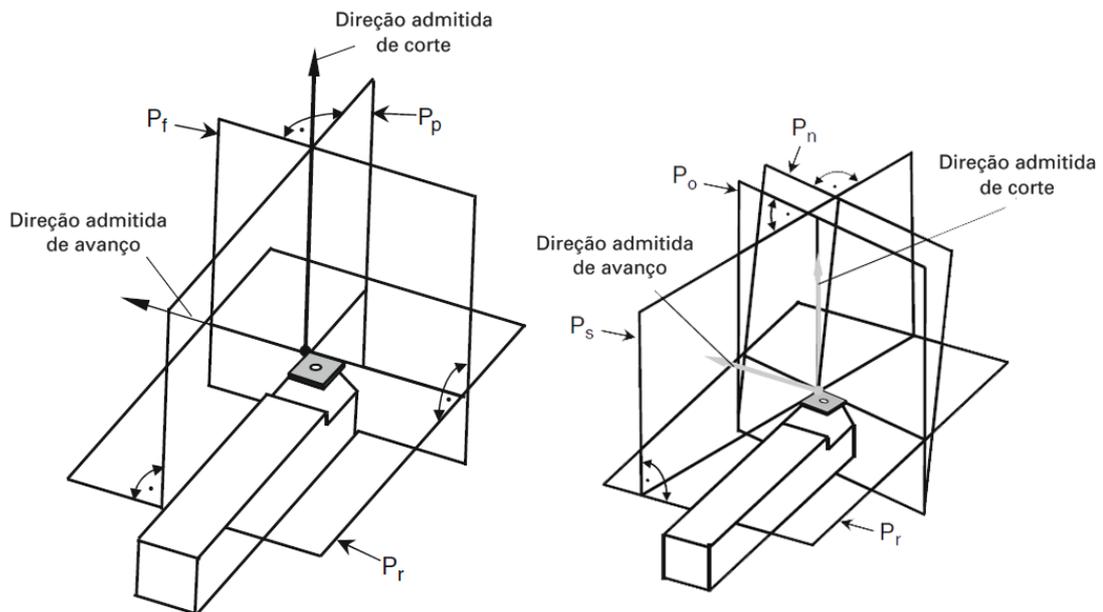


Figura 1-3 - Planos do sistema de referência da ferramenta.  
 Fonte: Klocke, 2011 - Imagem adaptada.

Para facilitar a identificação dos ângulos, os índices atribuídos a eles representam o plano no qual estes ângulos são medidos. Por exemplo, o ângulo de cunha com o índice “n” ( $\beta_n$ ) significa que foi medido no plano normal ( $P_n$ ). A figura 1-4 representa os ângulos que serão descritos a seguir. O ângulo de posição da ferramenta ( $\chi_r$ ) é definido pelo plano de corte da ferramenta ( $P_s$ ) e admitido de trabalho ( $P_f$ ). O ângulo de inclinação da ferramenta ( $\lambda_s$ ) é medido entre a aresta de corte (S) e o plano de referência ( $P_r$ ). Outros dois ângulos importantes são o de folga da ferramenta ( $\alpha_n$ ) e de saída ( $\gamma_n$ ). O primeiro está situado entre a superfície de folga ( $A_\alpha$ ) e o plano de corte ( $P_s$ ) e o segundo é formado pela superfície de saída ( $A_\gamma$ ) e de folga ( $A_\alpha$ ).

Existem outros ângulos que são formados entre as intercessões entre planos e/ou arestas, mas que não serão relacionados aqui. Klocke (2011) alerta que em processo de cortes reais, os ângulos efetivos se desviam dos ângulos nominais da ferramenta, o que se deve, em parte, à cinemática do processo.

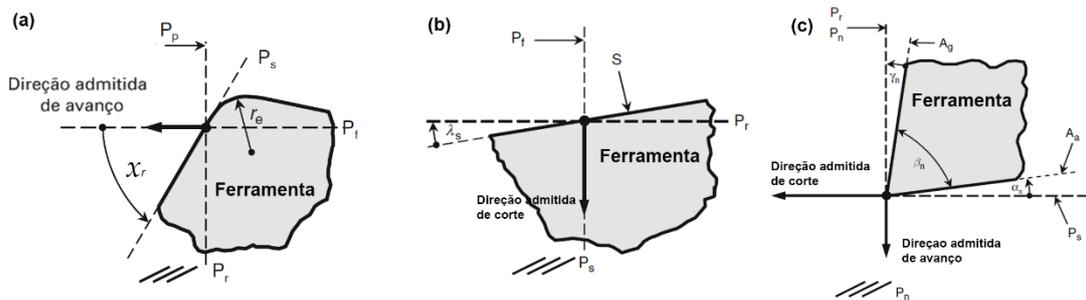


figura 1-4 - (a) Ângulo de posição principal da ferramenta | (b) Ângulo de inclinação da ferramenta | (c) Ângulos de cunha ( $\beta_n$ ), folga ( $\alpha_n$ ) e saída da ferramenta ( $\gamma_n$ ).  
Fonte: Klocke, 2011 - Imagem adaptada.

A definição dos valores aplicados nos ângulos de uma ferramenta apresenta influência direta na usinagem, como, por exemplo, nas forças de corte, na integridade superficial da peça e no formato do cavaco. Machado (2009) afirma que o ângulo de folga ( $\alpha_o$ ) normalmente varia de  $5^\circ$  a  $20^\circ$  e sua principal função é evitar atrito entre a superfície de folga da ferramenta e a peça. Ângulos de folga ( $\alpha_n$ ) muito pequenos promovem a geração de mais calor devido a maior área de contato entre a peça e ferramenta e este fenômeno acaba por acelerar o processo de perda de afiação da ferramenta. Entretanto, se o valor for muito elevado, a aresta se torna frágil. Outros fatores também influenciam a definição deste valor, como a resistência mecânica do material a ser usinado, onde quanto maior for, menor o ângulo. De acordo com Astakhov (2007), uma das hipóteses geralmente aceita é que o contato entre a superfície de folga da ferramenta e a superfície usinada da peça ocorre devido à uma recuperação elástica causada pela deformação plástica dessa superfície durante a usinagem.

A dimensão espacial de uma ferramenta de corte é denominada macrogeometria, essa descreve detalhes geométricos da parte ativa da ferramenta. Alguns de seus elementos são: o raio de cunha ( $\gamma_h$ ), o quebra cavaco e o raio de ponta ( $\gamma_e$ ). Este último possui grande influência na integridade superficial da peça e mais a frente iremos detalhar este fenômeno. Por conseguinte, a microgeometria define o formato da aresta de corte (DENKENA e BIERMANN, 2014).

A indústria de manufatura possui inúmeras combinações de geometrias de ferramentas e materiais a sua disposição. Klocke (2011) lista as principais características esperadas para um material de ferramenta para usinagem:

- Alta dureza;
- Tenacidade;
- Inercia química;
- Força de ligação interna;
- Resistência a altas temperaturas;
- Resistência à oxidação;
- Pequena disposição à difusão e adesão;
- Resistência à abrasão;
- Comportamento de desgaste reproduzível.

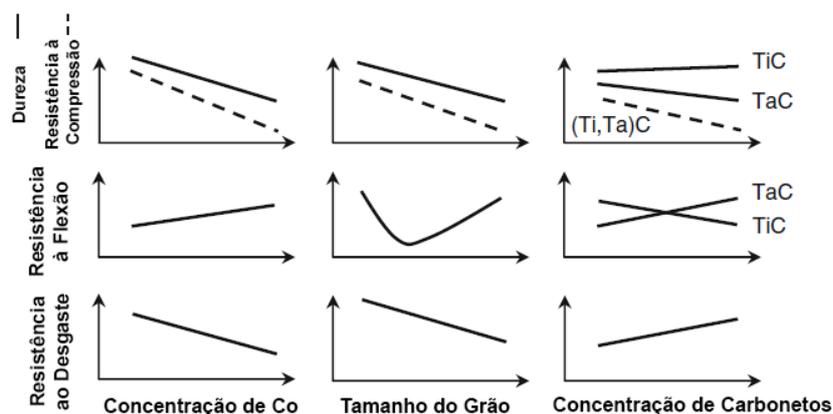
Não existe um material de ferramenta de corte que unifique todas as propriedades necessárias, porém algumas características são priorizadas dependendo do tipo de usinagem a ser efetuada. Os carbonetos de tungstênio (WC) sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, cobalto ou níquel) é denominado metal duro (MD). Eles são produzidos utilizando metalurgia do pó, o que permite uma grande variedade de forma e composição. Além disso eles possuem uma excelente combinação de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade em altos níveis. A norma ABNT NBR ISO 513:2013 define que metais duros que possuem carboneto de titânio (TiC), carboneto de tântalo (TaC) ou carboneto de nióbio (NbC) em sua composição são normalmente destinados à usinagem de aço e pertencentes a classe “P”, conforme sua tabela de classificação. Santos define a fabricação do metal duro da seguinte forma:

*“O tungstênio na sua forma original encontrada na natureza é transformado após uma série de reações químicas em tungstênio puro, este é então misturado em carbono puro e levado a um forno a altas temperaturas para formar o WC. Os carbonetos são então moídos e secados com spray, esta moagem pode ocorrer depois da mistura com o cobalto, na proporção ideal de cada classe, ou opcionalmente pode-se misturar o cobalto após a moagem. A mistura é comprimida a frio em matrizes .. Após a prensagem, o produto já ganha formato final desejado.. A sinterização segue imediatamente esta etapa. É realizada a vácuo, em temperaturas da ordem de 1500 °C, com a porosidade sendo reduzida para menos de 0,01 %. Esta baixa porosidade é possível de ser obtida devido a fase líquida do metal ligante presente.. Antes de ser*

*comercializado, normalmente, o produto é retificado, para formatar as arestas.” (Santos e Sales, 2007)*

A introdução do metal duro no mercado de ferramentas promoveu um enorme ganho de produtividade nas fábricas, além de permitir a produção de peças com melhores acabamentos superficiais sem a necessidade de processos posteriores. Estes ganhos de produtividade se devem principalmente, ao aumento da velocidade de corte, entretanto, o aumento da velocidade trouxe como consequência o aumento das temperaturas geradas no contato entre ferramenta e peça.

As propriedades do substrato de metal duro possuem importante influência sobre a resistência ao desgaste e a eficiência das ferramentas com ou sem revestimento (KLOCKE, 2011) <sup>1</sup>. A fim de evitar a deformação plástica da aresta de corte, as ferramentas de metal duro devem apresentar alta resistência à compressão e elevada dureza a quente. Em contrapartida, devem apresentar também elevada resistência a flexão, fissuração, desintegração e fratura. A composição e a microestrutura são influenciadoras das propriedades mecânicas do metal duro. Assim, por exemplo, o aumento do teor de cobalto e do tamanho médio dos grãos tendem a aumentar a resistência à fratura; entretanto, tendem a diminuir a dureza e resistência a pressão. A Figura 1-5 exibe alguns dos efeitos das variações da porcentagem de Co, TiC, TaC e do tamanho de grão de WC e seus efeitos sobre as propriedades mecânicas



*Figura 1-5 - Efeitos das variações da porcentagem de Co, TiC, TaC e do tamanho de grão de WC e seus efeitos sobre as propriedades mecânicas.*

*Fonte: Adaptado Klocke (2011)*

<sup>1</sup> O tema dos revestimentos, inclusive, será objeto de discussão em seção posterior.

Ao escolher uma ferramenta para o torneamento longitudinal, recomenda-se primeiro escolher o sistema de fixação da pastilha no porta-ferramentas (COROMANT, 1994). Somente as pastilhas, também conhecidas como insertos, são produzidas utilizando materiais nobres, como por exemplo o metal duro (MD) ou o Cermet. Os suportes ou porta-ferramentas são produzidos normalmente em aço.

Atualmente é difícil adquirir ferramentas que não possuam uma camada de revestimento cerâmico, como carbonetos e nitretos, sobre o metal duro. Estes revestimentos de camada micrométrica foram introduzidos nas ferramentas para protegê-las de mecanismos específicos de desgaste, como barreiras térmicas e químicas. O revestimento de ferramenta mais utilizado atualmente é o nitreto de titânio (TiN), porém existem outros com o nitreto de alumínio e titânio (TiAlN), carbo-nitreto de titânio (TiCN) ou óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) (KLOCKE, 2011). A deposição dos filmes pode ser efetuada tanto pelo processo de PVD - *Physical Vapour Deposition* (Deposição física por vapor) ou CVD - *Chemical Vapour Deposition* (Deposição química por vapor). A tecnologia permite que estas camadas possam ser aplicadas isoladamente sobre a ferramenta ou acompanhado de outro material, formando multicamadas. Esta aplicação de várias camadas de cobertura permite aproveitar algumas características individuais de cada revestimento, sem a necessidade de geração de novos compostos.

O processo de deposição por CVD consiste na aplicação de uma camada final de material sólido a partir de um gás, por meio de reação química que ocorre em ou próximo do substrato aquecido a aproximadamente 1000 °C, a fim de formar uma dura película fina com alta densidade e boa aderência. Normalmente as camadas são limitadas a espessura de 10µm, pois valores superiores a este podem acumular tensões inaceitáveis e delaminações (KAJDAS, HARVEY e WILUSZ, 1990). Algumas de suas vantagens são a possibilidade de depositar camadas não condutoras de eletricidade e o não arredondamento de arestas, sendo assim aplicado em insertos com geometrias complexas. Uma ampla paleta de revestimentos pode ser sinterizados usando o processo CVD, tais como o TiC, TiN,  $Al_2O_3$  (KLOCKE, 2011).

O processo de PVD consiste na atomização do material de uma fonte sólida e na deposição desse material sobre o substrato (HOLMBERG, 1994). A grande vantagem deste processo sobre o CVD está no fato que a deposição ocorre a uma temperatura de aproximadamente 700 °C, para se formar uma dura película fina com alta densidade e boa aderência. O revestimento pelo método PVD apresenta tensão residual de compressão, o que atualmente limita a camada depositada a uma espessura de 3 a 6µm. Este limite é usado para

reduzir o risco de fratura por choque ou térmicas. Por outro lado, o processo permite a deposição de camadas de revestimentos metaestáveis como (Ti,Al)N.

Jindal et al (1999) comparou o desempenho dos revestimentos TiN, TiCN e (Ti,Al)N depositados pelo processo de PVD, na operação de usinagem do aço SAE 1045 em duas velocidades de corte diferentes, sendo elas 305 e 396 m/min. O substrato utilizado foi WC±6wt%Co e a espessura da cada foi de 3 a 3,5 µm. Como critério de fim de teste, ele considerou um desgaste de flanco 0,4 mm ou entalhe  $V_n$  0,75 mm. Ele concluiu que a vida dos insertos revestidos aumentou progressivamente do TiN para TiCN até o (Ti,Al)N. A Figura 1-6 exibe a vida de ferramentas revestidas em contato com aço SAE 1040 (FOX-RABINOVICH e TOTTEN, 2006). A base de comparação utilizada pelos pesquisadores foi o inserto sem revestimento (WC±6wt%Co), onde observou-se que a melhora na vida relativa chegou a 9,6 vezes.

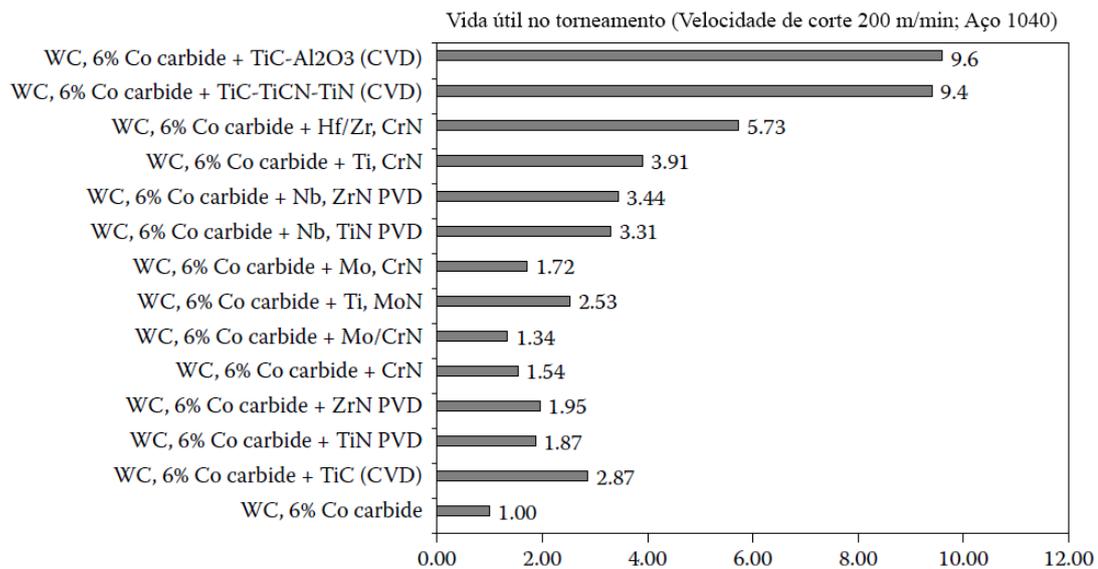


Figura 1-6 - Vida de ferramentas revestidas em contato com aço SAE 1040.  
Fonte: traduzida Fox-Rabinovich e Totten, 2006.

O revestimento TiCN possui uma excelente aderência, tanto entre o substrato de metal duro quanto da próxima camada sobre ele (MACHADO, ABRAO, *et al.*, 2009). Além disso, tem a característica de interromper a propagação de trincas (SANTOS e SALES, 2007). O Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> apresenta uma excelente inércia química e uma elevada dureza, o que, conseqüentemente, promove a ele uma maior resistência ao desgaste. Outras características importantes é a redução da sua condutividade térmica, com o aumento da temperatura e o baixo coeficiente de atrito em usinagem de aços (NARASIMHA, 2014).

Shaw (1982) afirma que as ferramentas revestidas são inerentemente mais frágeis que as não revestidas. O aumento da fragilidade da ferramenta está associado, em parte, a diferença das propriedades mecânicas entre o substrato e a camada aplicada, e uma transição gradual entre os dois materiais seria o ideal. Alguns fabricantes utilizam da tecnologia de múltiplas camadas para minimizar este efeito.

### 1.3 As forças e o trabalho na usinagem.

A formação do cavaco envolve uma grande quantidade de cisalhamento concentrado ao longo de um plano bem definido, o que fica evidente na figura 7-b. Esta deformação acontece em altíssima velocidade seguida da ruptura do material usinado. Este fenômeno é dividido em quatro etapas, sendo elas: recalque inicial, deformação e ruptura, deslizamento das lamelas e, por fim, saída do cavaco ( (MACHADO, ABRAO, *et al.*, 2009).

Ao se iniciar o processo de torneamento, a ferramenta entra em contato com a peça promovendo uma pequena deformação do material. A este fenômeno se dá o nome de recalque inicial. Após esta etapa do recalque inicial, o material é continuamente pressionado sobre a superfície de saída da ferramenta, sofrendo deformações elásticas (inicialmente) e plásticas até o que o estado de tensões alcançado leva à ruptura do material. Grande parte desta ruptura se dá por cisalhamento. Após a ruptura ocorre a formação de uma trinca que irá se propagar diferentemente para cada material. Esta etapa descrita acima é denominada deformação e ruptura, e ela acontece em uma região entre o cavaco e a peça conhecida como “zona de cisalhamento primário” (Figura 1-7-a).

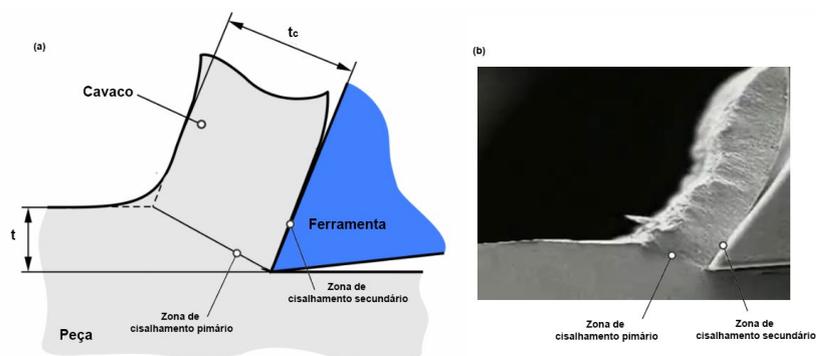


Figura 1-7 - Formação do cavaco - (a) Mecanismo de formação, (b) Corte ortogonal. Imagem adaptada. Fonte: Antoniadis *et al.* 2014.

Ao se usinar aço, é preciso lembrar que o comportamento frágil só ocorre em baixas temperaturas, ao contrário do ferro fundido, por exemplo, que devido a sua estrutura interna, possui um comportamento quebradiço mesmo em temperaturas elevadas (KLOCKE, 2011). Quando se usina materiais frágeis, a menor deformação no plano de cisalhamento já pode levar à separação do material, diferentemente de materiais que possuem uma maior capacidade de deformação, na qual poderá haverá somente uma ruptura parcial, o que por consequência promove um “deslizamento das lamelas” sobre a superfície de saída da ferramenta, como pode ser identificado na Figura 1-7-b.

A etapa da “saída do cavaco” acontece quando o movimento relativo da ferramenta sobre a peça, desloca a porção de material deformado ou rompido sobre a superfície de saída da ferramenta (MACHADO, ABRAO, *et al.*, 2009).

Os cavacos podem ser classificados por sua morfologia em contínuos, descontínuos e segmentados (MARTELLOTTI e ERNST, 1942). A formação de cavaco tipo contínuo é caracterizada por uma deformação contínua do material na zona de cisalhamento primária, mas sem a fragmentação do mesmo e uma condição de atrito uniforme na zona de cisalhamento secundária. Materiais dúcteis, como os aços de baixa liga, produzem este tipo de cavaco, porém os parâmetros de corte também possuem influência sobre o tipo de cavaco formado. Bing et al. (2012) demonstraram que, em torneamento de aço 1045, que é um aço dúctil, com velocidade de corte superiores a 600 m/min, o cavaco passa a ser classificado como segmentado.

Dentro das zonas de cisalhamento, o material da peça de trabalho é deformado em um intervalo de tempo muito curto, promovendo, assim, um grande aumento de temperatura. Por exemplo, Maranhão (2009) verificou, que durante a usinagem do aço AISI 1045 utilizando uma velocidade de corte ( $v_c$ ) de 300m/min, a taxa de deformação atinge a magnitude de  $10^5 \text{ s}^{-1}$ .

Trent e Wright (2000) afirmam que o estudo da interface entre a ferramenta e a peça usinada é essencial para compreensão da usinabilidade e desempenho das ferramentas de corte e formação do cavaco. Estudos demonstram que apenas de 30 a 50% da energia requerida no processo de usinagem é gasta como trabalho útil, ou seja, na separação do cavaco da peça. O restante é despendida nas interfaces entre ferramenta e peça (ASTAKHOV, 2006). Sabe-se que a temperatura desenvolvida nas regiões onde ocorrem deformação plástica e cisalhamento está na faixa de 80°C a 250°C, enquanto na interface cavaco-ferramenta podem ser alcançados valores acima de 1000° C.

Utilizando o conceito de coeficiente de atrito derivado do trabalho de Amontons e Coulomb, tem-se que a força de atrito tende a restringir o movimento ao longo da superfície de saída da ferramenta e o seu cálculo considera o coeficiente de atrito ( $\mu$ ), porém esta abordagem é inadequada para a maioria da usinagem de metais (TRENT e WRIGHT, 2000). Neste conceito, a força ( $F$ ) necessária para iniciar ou continuar o deslizamento entre duas superfícies sólidas é diretamente proporcional a força normal ( $N$ ) aplicada entre elas, e o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) não depende da área entre as superfícies ( $F = \mu \cdot N$ ). Quando se fala de área de contato entre duas superfícies, considera-se que a área de contato real é muito menor que a área de contato verdadeiro, devido as irregularidades das superfícies. O contato é estabelecido pelas cristas destas irregularidades, (Regime I, Figura 1-8-a). Quando a tensão média que atua sobre a área de contato verdadeira é dobrada, os contatos reais que suportam a carga são plasticamente deformados até o dobro da área, fazendo com que a tensão média se permaneça constante, (Regime II, Figura 1-8-b). Com base na lei de atrito de Coulomb, para a situação descrita anteriormente, a força de atrito também irá dobrar, uma vez que somente a força normal possui influência sobre ela e o coeficiente de atrito se manterá inalterável, já que está relacionado somente com o par de material em contato. Quando a força normal é aumentada indefinidamente, fazendo com que os picos das superfícies sofram deformação, de tal modo que a área real seja uma grande proporção da área de contato aparente e já não é mais possível que a área de contato real possa aumentar proporcionalmente à carga, temos uma condição em que a lei de Coulomb não é mais aceita. A partir deste ponto, a força de atrito passa a ser a força necessária para romper o material em toda sua interface (SHAW, 2005).

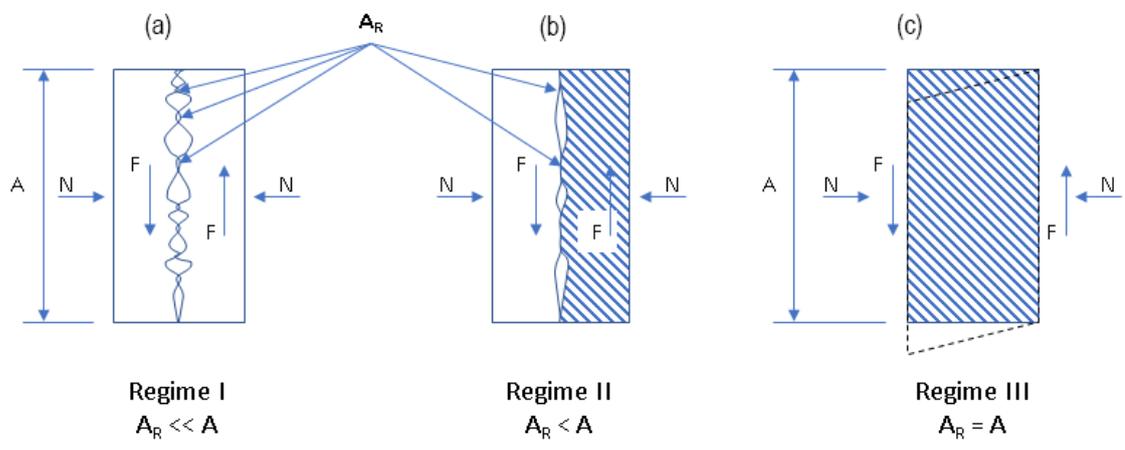


Figura 1-8 - Regime de atrito sólido (a) Regime I, (b) Regime II e (c) Regime III.  
Fonte: SHAW, 2005 – Figura adaptada

No processo de usinagem, o contato entre a ferramenta e a peça de trabalho ao longo do plano de saída da ferramenta é, em grande parte, dominado pelo regime III (figura 8c), ou seja, a área aparente de contato se aproxima muito da área areal. Nestas condições, a força necessária para o que o cavaco flua sobre o plano de saída é igual a força necessária para o cisalhamento do material que está sendo usinado. Trent (2000) identificou e definiu uma região que inicia na aresta de corte e se estende para dentro da superfície de saída como “zona de aderência” e a região ao longo de sua periferia como “zona de escorregamento”. A Figura 1-9 exhibe estas regiões. Devido as enormes forças que o material é submetido durante o corte, observou-se que na zona de aderência o contato obedece ao regime III, entretanto, a tensão normal se reduz exponencialmente, à medida em que se afasta da aresta de corte, promovendo a mudança do regime de contato para o modelo I, isso acontece na zona de escorregamento.

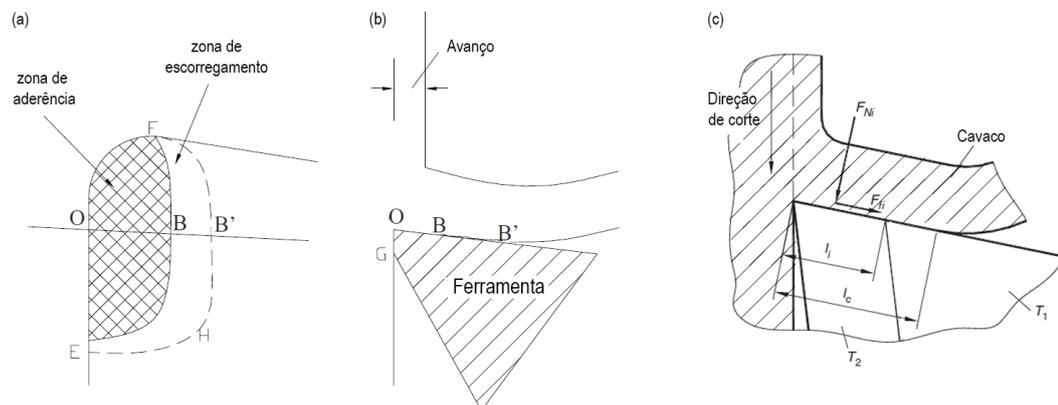


Figura 1-9 - Representação das zonas de aderência (a e b) e de escorregamento e técnica para determinar a distribuição de tensão (c).

Fonte: TRENT E WRIGHT, 2001 e Astakhov, 2006 - Figura adaptada

Astakhov (2006) exhibe o seguinte questionamento sobre a interface de contato entre a ferramenta e a peça de trabalho:

*“Uma representação irreal do contato da ferramenta e peça de trabalho: a aresta de corte é perfeitamente definida e não ocorre nenhum contato com a superfície de folga da ferramenta. Isto está em contradição óbvia, já que na prática de usinagem o desgaste de flanco (devido ao contato da superfície de folga da ferramenta com a peça de trabalho) é um critério mais comum para determinar a vida da ferramenta”*

*Tradução livre. Astakhov, (2006)*

O contato entre a superfície de folga da ferramenta e a superfície usinada da peça ocorre devido à recuperação elástica (ou efeito mola), causada pela deformação plástica dessa superfície durante o corte. A Figura 1-10 exibe o efeito causado pela força de corte radial ( $F_T$ ), que causa deformação plástica na superfície usinada e, conseqüentemente, o contato da peça com a superfície de folga da ferramenta (ASTAKHOV, 2004). A recuperação elástica está diretamente relacionada com a força e corte radial ( $F_T$ ) que, por sua vez, é altamente dependente da espessura do cavaco não cortado.

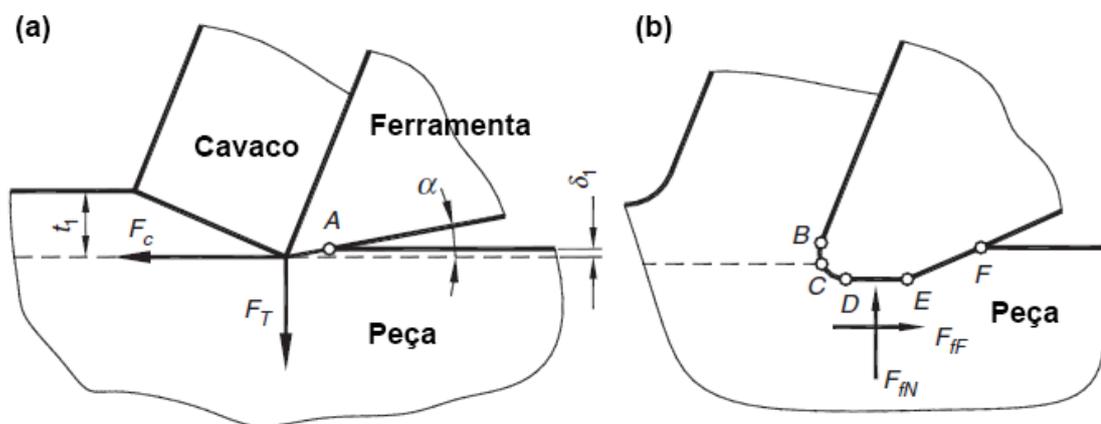


Figura 1-10 - Contato da superfície de saída da ferramenta com a peça: (a) Modelo ideal, aresta afiada (b) o contato real.

Fonte: Astakhov, 2006 – Figura adaptada

Devido às irregularidades geométricas que existem na aresta de corte, a figura 10b exibe o modelo de contato real da aresta com a superfície da peça usinada. Neste modelo uma curva de transição BD é formada e esta se inicia na aresta e termina na superfície de folga. O ponto C é o local onde o cavaco sofre ruptura e se separa da peça e a posição deste ponto é incerta. A curva DE é a área de desgaste, sendo formada após o primeiro contato da ferramenta na peça. Por fim a curva EF representa o contato da superfície de saída com a peça. O aumento do raio da aresta de corte, acaba promovendo o aumento da pressão específica de corte, aumentando também a força de avanço ( $F_f$ ) e, por conseqüência, a força de atrito ( $F_a$ ) na superfície de folga da ferramenta.

Zorev (1996) apresentou a seguinte equação (Eq. 2) para cálculo da força de atrito ( $F_a$ ) na superfície de folga da ferramenta:

$$F_a \approx 0.2HB * \left( \frac{a_p}{\text{sen}(\chi_r)} + f \right) \quad [\text{N}] \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

$a_p$  = Profundidade de usinagem [mm]

$\chi_r$  = Ângulo de posição principal da ferramenta [°]

$HB$  = Dureza Brinell do material [kg / mm<sup>2</sup>]

$f$  = Avanço [mm/rev]

Para a força normal sobre a superfície de folga da ferramenta, a equação sofre uma alteração conforme a geometria da aresta, mais especificamente o raio da aresta de corte. Quando o raio da aresta é grande, deve usar a equação 3:

$$N_f \approx \frac{HB}{3} * \frac{a_p}{\text{sen}(\chi_r)} h_f \quad [\text{N}] \quad (\text{Eq. 3})$$

E quando o raio da aresta for pequeno deve ser utilizado a equação 4

$$N_f \approx \frac{HB}{3} f h_{f1} \quad [\text{N}] \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde  $h_f$  e  $h_{f1}$  são a largura do contato na superfície de folga para raios de aresta grandes e pequenos, respectivamente.

Huang e Liang (2005) modelaram as forças de usinagem, levando em consideração o desgaste na superfície de folga e chegaram a conclusão que as forças de corte tangenciais e axiais aumentam proporcionalmente com o desgaste de flanco (Figura 1-11).

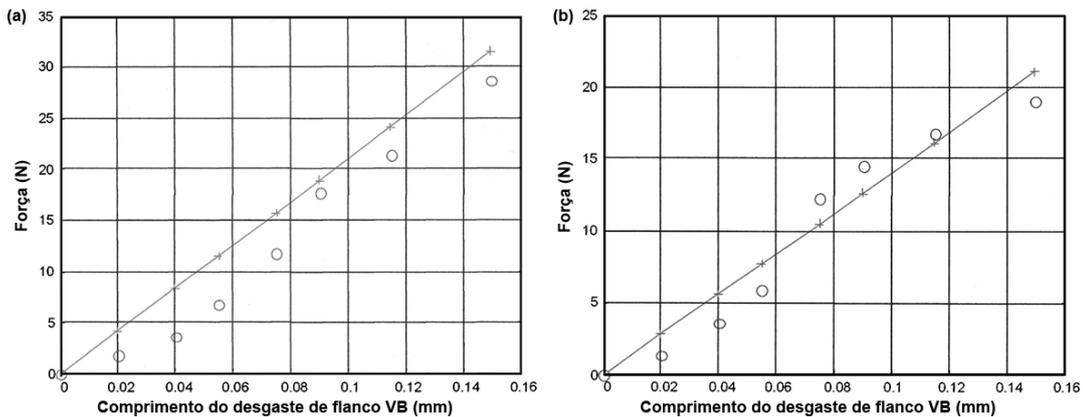


Figura 1-11- Força com a progressão do desgaste de flanco. (a) Força de corte tangencial e (b) força de corte axial. Os dados experimentais são marcados por círculos e as previsões do modelo em linhas.

Fonte: Huang e Liang; 2005. Figura adaptada.

Denkena e Biermann (2014) realizaram um estudo sobre a influência da preparação das arestas de corte sobre o processo de usinagem. Eles utilizaram variadas técnicas, como jateamento e retificação, com a finalidade de alcançarem várias microgeometrias de arestas. Como resultado, obtiveram aumentos consideráveis de vida das ferramentas, entretanto, devido ao maior contato na região de folga da ferramenta, as forças de processo e a temperatura subiram.

Durante o atrito entre duas superfícies, quase todo trabalho de fricção aparece em forma de calor. Próximo a estas superfícies, o aumento da temperatura influencia no coeficiente de atrito e na taxa de desgaste (ASHBY e LIM, 1990).

Alguns parâmetros, tais como coeficiente de atrito, tempo de contato, área de contato real, são cruciais para o entendimento da variação de temperatura nas superfícies. Se todo calor de fricção fluísse uniformemente na área de contato entre duas superfícies em deslizamento, a temperatura que apareceria nestas superfícies poderia ser chamada de temperatura da massa ( $T_b$ ), independentemente da geometria dos corpos. Entretanto, em razão das asperezas superficiais, as superfícies em fricção possuem uma área de contato real muito menor que a aparente, o que explica a extrema elevação da temperatura na interface (COMMITTEE *et al*, 2001).

É importante conhecer e entender quais fatores influenciam na geração de calor e seu fluxo entre ferramenta, peça e cavaco (MACHADO, ABRAO, *et al.*, 2009). As componentes da força de usinagem, que geram a deformação do material associadas ao atrito decorrente do

deslizamento entre a ferramenta e a peça, geram diversas fontes de calor ao longo da ferramenta. Este calor é percebido em três regiões distintas na área de formação do cavaco, sendo elas:

- Zona primária de cisalhamento (Região A – Figura 12a)
- Zona secundária de cisalhamento (Regiões B e C – Figura 12a)
- Zona terciária de cisalhamento (Região D – Figura 12a)

O trabalho mecânico usado para efetuar o corte é quase completamente convertido em energia térmica. Porém a maior parte do calor gerado na zona primária é dissipada no cavaco. O aumento da velocidade de corte não possui muita influência sobre a temperatura nesta região, o que não se pode afirmar na zona terciária, onde as altas temperaturas aceleram o desgaste de mecanismos termicamente ativos (MACHADO, ABRAO, *et al.*, 2009).

A Figura 1-12 exhibe informações do fluxo de calor, que é absorvido e dissipado entre ferramenta, a peça de trabalho, o cavaco e o ambiente. O aumento do desgaste na superfície de folga da ferramenta (desgaste de flanco - VB) ocasiona o aumento do contato entre a peça e a ferramenta, que, por consequência, aumenta a temperatura na região D. Esta elevação de temperatura, além de favorecer os mecanismos de desgaste termicamente ativados, alteram o limite de escoamento do material (MACHADO, ABRAO, *et al.*, 2009).

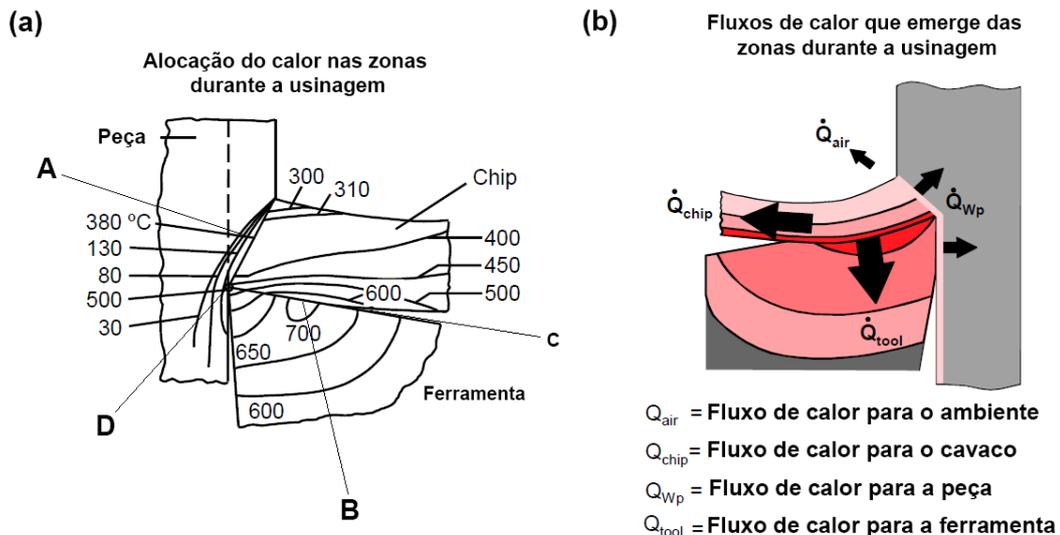


Figura 1-12 –(a) Distribuição de temperatura na peça, cavaco e ferramenta no processo de corte de aço a uma velocidade de corte de 60m/min, (b) fluxo de calor na usinagem de aço.

Fonte: Kronenberg e Vieregge; Figura adaptada.

As variações de processo, como na temperatura ou no desgaste da ferramenta, alteram a força de usinagem. A força de usinagem ( $F_u$ ) pode ser decomposta em três componentes básicos, que atuam diretamente na aresta de corte: Força de avanço ( $F_a$ ), força de corte ( $F_c$ ) e força passiva ( $F_p$ ) (FERRARESI, 1970). A força de corte ( $F_c$ ) é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada velocidade de corte ( $V_c$ ). A força de avanço ( $F_f$ ) é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço da ferramenta, dada pela velocidade de avanço ( $V_f$ ). Por fim, a força passiva ( $F_p$ ) é a projeção da força de usinagem ( $F_u$ ) sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho. A Figura 1-13 exibe a força de usinagem ( $F_u$ ) e suas componentes no processo de torneamento. A equação 5 permite o cálculo da força de usinagem ( $F_u$ ) utilizando suas principais componentes:

$$F_U = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [\text{N}] \quad (\text{Eq. 5})$$

Além das componentes descritas acima, outras três possuem elevada relevância para o processo de usinagem. São elas: força ativa ( $F_{TR}$ ), força de compressão ( $F_n$ ) e a força de apoio ( $F_{ap}$ ). Como já foi apresentado anteriormente, a força de atrito na superfície de folga ( $F_a$ ) tem influência sobre a força de avanço ( $F_f$ ).

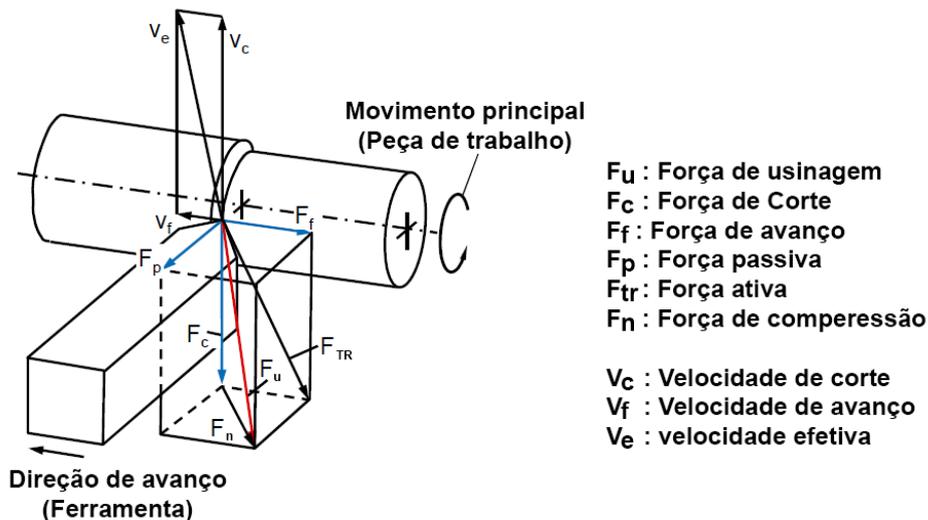


Figura 1-13 - Força de usinagem ( $F_u$ ) e suas componentes no processo de torneamento.

Fonte: Klocke, 2011 - Imagem adaptada.

Alterações nos parâmetros de usinagem afetam diretamente as forças no torneamento, uma vez que tais variações estão diretamente relacionadas com a quantidade de material a ser cisalhado ou deformado, ou com as propriedades mecânicas da peça de trabalho ou da ferramenta. O aumento do avanço ( $f$ ) ou da profundidade de usinagem ( $a_p$ ) causam, por sua vez, o aumento da largura do cavaco, o que fica demonstrado no aumento na força de corte ( $F_c$ ), força passiva ( $F_p$ ) e a força de avanço ( $F_f$ ). Já o aumento da velocidade de corte tende a reduzir as forças, uma vez que ocorre o aumento da temperatura nas interfaces, reduzindo assim os limites de resistência do material (KLOCKE, 2011). Os ângulos de posição ( $\gamma_f$ ) possui um efeito direto sobre a força passiva ( $F_p$ ). Das et al. (2016) afirmaram que revestimentos aplicados sobre a ferramenta alteraram o fluxo de calor, podendo favorecer ou prejudicar as forças de corte, dependendo da sua aplicação.

Observou-se, por experimentação, que o aumento no desgaste de flanco promove a elevação da força de corte na faixa de 7% a 12% para cada 0,1mm de desgaste, de 18% a 26% para a força de avanço e de 20% a 32% para a força passiva (MACHADO, ABRAO, *et al.*, 2009).

O trabalho destas diversas forças, até o momento citadas, promovem deformações plásticas e elásticas, além de gerar calor por atrito. Pankine (1965) e Ferraresi (1970) fizeram a decomposição do trabalho total no processo de usinagem em:

$$W_{\text{corte}} = W_{\text{elsat.}} + W_{\text{dispers.}} + W_{\text{estr.}} + W_{\text{plast.}} + W_{\text{cisalh.}} + W_{\text{atrito}} \quad [W] \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

- $W_{\text{elsat.}}$ : Trabalho das forças que produzem deformação elástica na ferramenta, na peça, no cavaco e na máquina.
- $W_{\text{dispers.}}$ : Trabalho das forças de dispersão responsáveis pela superação das energias superficiais da peça.
- $W_{\text{estr.}}$ : Trabalho das forças para modificar a estrutura cristalina do metal sob pressão e aquecimento.
- $W_{\text{plast.}}$ : Trabalho das forças que produzem deformação plástica.
- $W_{\text{cisalh.}}$ : Trabalho das forças que produzem cisalhamento e os consequentes deslizamentos no cavaco e sobre a superfície usinada.
- $W_{\text{atrito}}$ : Trabalho das forças de atrito nas superfícies de saída e de folga.

O trabalho realizado pelas parcelas  $W_{\text{elast.}}$ ,  $W_{\text{dispers.}}$  e  $W_{\text{estr}}$  são muito pequenas se comparadas com as outras, sendo assim a equação pode ser simplificada para:

$$W_{\text{corte}} = W_{\text{plast.}} + W_{\text{cisalh.}} + W_{\text{atrito}} \quad [W] \quad (\text{Eq. 7})$$

Experimentalmente Pankine (1965) estabeleceu a proporcionalidade de cada um destes trabalhos na usinagem do aço, verificou que o trabalho das deformações plásticas ( $W_{\text{plast.}}$ ) variou entre 60 e 85%, o trabalho de cisalhamento ( $W_{\text{cisalh.}}$ ) ficou entre 10 e 25% e o trabalho de atrito ( $W_{\text{atrito}}$ ) entre 10 e 15%. Percebe-se que na usinagem do aço, o trabalho de deformação plástica é o que possui maior importância quanto a proporcionalidade. É importante salientar que o trabalho de atrito se torna mais relevante à medida que ocorre o desgaste da ferramenta.

A norma alemã DIN 6584 define o trabalho realizado, baseando-se nas componentes principais da força de usinagem, definindo que, a força de corte ( $F_c$ ) realiza o trabalho da componente força principal ( $W_{\text{princ.}}$ ), que a força de avanço ( $F_a$ ) realiza o trabalho da componente força avanço ( $W_{\text{avanço}}$ ) e que a força passiva ( $F_p$ ) realiza o trabalho da componente força passiva ( $W_{\text{passiva}}$ ) (Eq. 8.).

$$W_{\text{total}} = W_{\text{princ.}} + W_{\text{avanço}} + W_{\text{passiva}} \quad [W] \quad (\text{Eq. 8})$$

Praticamente todo o trabalho mecânico na usinagem, cerca de 90%, é convertido em calor. A Figura 1-14 mostra o fluxo de calor na ferramenta, também exibindo a segmentação de energia útil no processo de corte.



Figura 1-14 - Segmentação de energia eficaz no processo de corte.

Fonte: Klocke, 2011 - Imagem adaptada.

Orra e Chounhudry (2018) investigaram o efeito de três diferentes microtexturas sobre a superfície de saída da ferramenta de corte. Os resultados dos experimentos realizados com e sem microtexturas foram comparados, obtendo resultados que apontaram uma redução da força de usinagem devido a redução do coeficiente de atrito entre o cavaco e a peça.

Técnicas de preparação de arestas são usadas para modificar sua micro-geometria e melhorar seu desempenho. Wang et al. (2020) utilizaram técnica de “usinagem por jato de ar pressurizado com abrasivo” (PAWAJM, do inglês *pressurized air wet abrasive jet machining*) para alterar a aresta de corte da ferramenta no torneamento ortogonal do aço AISI 4140. Eles definiram um padrão assimétrico para a preparação da aresta, onde alteravam o comprimento de contato da superfície de saída e de folga. Dentre os resultados, observaram o aumento da força de corte com o aumento do comprimento de contato, em contra partida, houve um aumento da vida da ferramenta.

Venkatesan et al. (2019) avaliou o revestimento de TiAlN depositado por PVD e o revestimento multicamadas de (TiN-TiCN- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) depositado por CVD, variando também a velocidade de corte em quatro níveis. Observaram que o revestimento em PVD apresentou uma força de corte ligeiramente mais elevada que a com revestimento multicamadas. Este comportamento se deu pela diferença do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco, principalmente nas velocidades de corte mais elevadas.

Grguras e Pusavec (2019) estudaram a aplicação de oito tipos de textura na superfície de saída da ferramenta. Avaliaram a força de corte, formato do cavaco e a rugosidade final da peça. Algumas das texturas obtiveram êxito quanto a redução das forças de corte, com redução de 7% comparada a ferramenta não texturizada, porém algumas texturas chegaram a aumentar a força em 2%.

Ainda sobre a aplicação de texturas na superfície de saída da ferramenta, Kumar e Patel (2018) estudaram os efeitos de padrões de textura e estilos de microranhuras paralelas em corte ortogonal do aço SAE 4340. Resultados de forças específicas, coeficiente de atrito e o desgaste da ferramenta foram coletados usando variações de parâmetros dimensionais microtextura, tais como a largura, o espaçamento e profundidade, correlacionados com diferentes velocidades de corte e avanço. O aumento da ranhura na largura e no espaçamento causou uma redução do

comprimento de contato do cavaco, além de aumenta a aderência de material nas micro-ranhuradas.

Estudando a formação de aresta postiça durante a usinagem de aço ABNT 1045 pelo processo de torneamento a seco, nas velocidades de corte de 50 m/min e 150 m/min. KUMMEL *et al.* (2015) aplicaram padrões de texturas, geradas à laser, na superfície de saída da ferramenta, e comparam com ferramentas não texturizadas. A textura do tipo *dimple* (do inglês sulco) apresentou uma redução e um maior controle da aresta postiça, além de uma redução no desgaste de flanco. Entretanto os padrões tipo canal, sejam ele paralelos ou perpendiculares a aresta principal de corte, promoveram o aumento da quantidade de material aderido e do desgaste de flanco.

MA *et al* (2015) e LIAN *et al.* (2019) estudaram o comportamento de microtexturas no comportamento das foças de usinagem utilizando elementos finitos. MA *et al* (2015) aplicou micro ranhuradas em ferramentas de metal duro na usinagem ortogonal e a seco de aço carbono ABNT 1045. Puderam concluir que este padrão de textura gera uma menor força de corte e, conseqüentemente, diminuem a energia necessária para a usinagem. LIAN *et al.* (2019) apresentaram um estudo fatorial, o qual levou em consideração: dureza do substrato, espessura da camada do revestimento, aplicação ou não de revestimento, perfil de microtextura e aplicação ou não de microtexturas. Os resultados indicaram um proporcionalidade ideal (teórica) entre os parâmetros estudados, além de demonstrarem uma redução significativa da força de corte.

A texturização de superfície é um método promissor para alterar as propriedades tribológicas das superfícies em contato (SHARMA e PANDEY, 2017). Alterações nos parâmetros do projeto das texturas (distância da aresta de corte, largura, altura, diâmetro e profundidade dos sulcos) resultam na redução na área de contato entre o cavaco e a ferramenta, e conseqüentemente uma redução da força de usinagem. SHARMA e PANDEY (2017) avaliaram a variação de alguns destes parâmetros na força de usinagem durante o torneamento do aço 4340 com dureza de 55HRC a uma  $v_c$  50 m/min,  $f$  0,2 mm/rev e profundidade de 0,2 mm. A análise utilizando ANOVA, apresentou o parâmetro distância da aresta de corte, como o mais influente sobre as forças de usinagem, seguido da largura dos canais.

OLIVEIRA (2017) apresentou uma melhora no acabamento superficial no torneamento do aço inoxidável supermartensítico Super Cromo 13, com a aplicação de fluido de corte sob alta pressão através de canais produzido na superfície de saída do inserto. Esta alteração de

geometria possibilitou ainda um menor comprimento de contato na interface cavaco-ferramenta.

#### 1.4 Integridade superficial das peças torneadas

O termo integridade superficial representa a qualidade de uma superfície, mas neste contexto, nos interessa mais especificamente, a qualidade da superfície da peça que passou pelo processo de torneamento. Esta condição final da superfície está diretamente ligada as condições da usinagem, como, por exemplo, nas componentes da força de usinagem, a geometria da ferramenta ou seu o nível de desgaste, as temperaturas nas interfaces e outros. Segundo Hudson (1998), uma superfície pode ser definida como:

*“Uma superfície ou interface existe em um sistema em qualquer caso que houver uma mudança abrupta nas propriedades do sistema com a distância”*

Deve-se ressaltar que, neste conceito, existem diferentes níveis de descontinuidades. Na usinagem, por exemplo, o termo integridade superficial engloba não só a superfície visível mas também a camada logo abaixo desta. Dentro das alterações que o torneamento pode promover na superfície, podemos classificar em interferências no acabamento, por meio de alterações na rugosidade, ondulações ou falhas, e alterações subsuperficiais como deformações plásticas, alteração de microdurezas, tensões ou até mesmo transformações metalúrgicas (MACHADO, ABRAO, *et al.*, 2009).

A rugosidade são imperfeições micro geométricas derivada do processo de fabricação, e neste caso especificamente, o torneamento (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017). Avaliar e controlar a rugosidade é muito importante para resolver muitos problemas fundamentais como o atrito, interferências de montagens, geração de calor e outros. Por causa disso, a rugosidade é utilizada muitas vezes como parâmetro de saída de um processo de usinagem, sendo um dos critérios de qualidade da peça. O parâmetro de rugosidade pode ser calculado em duas dimensões (2D) ou três dimensões (3D).

A amplitude é o parâmetro mais importante para caracterizar a topografia de uma superfície, sendo usada para medir os desvios verticais entre o pico e o vale da irregularidade. A quantificação dos valores de rugosidade é realizada por técnicas prevista por normas, o desvio

aritmético médio ( $R_a$ ) e o altura total do perfil ( $R_t$ ) são os mais usados na indústria metal mecânica. A Figura 1-15 exhibe, de forma gráfica, a medição destes dois parâmetros.

O parâmetro desvio aritmético médio ( $R_a$ ), também conhecido como a linha central média (CLA do inglês, *centre line average*), é o parâmetro de rugosidade mais universalmente utilizado para o controle de qualidade superficial (Eq. 9) (GADELMAWLA, KOURA, *et al.*, 2002). Consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem (ABNT, 2002) (Figura 1-15). Este parâmetro é fácil de medir e dá uma boa descrição geral das variações de altura. Matematicamente pode ser expresso por:

$$R_a = \int_0^l |Y_x| dx \quad (\text{Eq. 9})$$

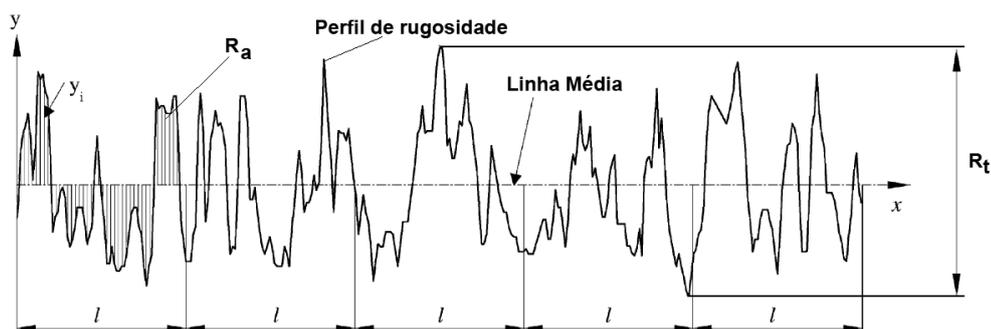


Figura 1-15 – Representação gráfica de um perfil de rugosidade e os parâmetros de medição  $R_a$  e  $R_t$ .  
Fonte ABNT NBR ISO 4287 (2002). Figura adaptada

O parâmetro de altura total do perfil ( $R_t$ ) é a soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação. Este parâmetro é muito sensível aos altos picos ou arranhões profundos.

Quando se relaciona a cinemática do processo de torneamento e a qualidade superficial, a rugosidade, as características geométricas da ferramenta e os parâmetros de usinagem são determinantes. A Figura 1-16 exhibe a teoria da formação da rugosidade, no parâmetro de altura total do perfil ( $R_t$ ), obtida em um processo de torneamento.

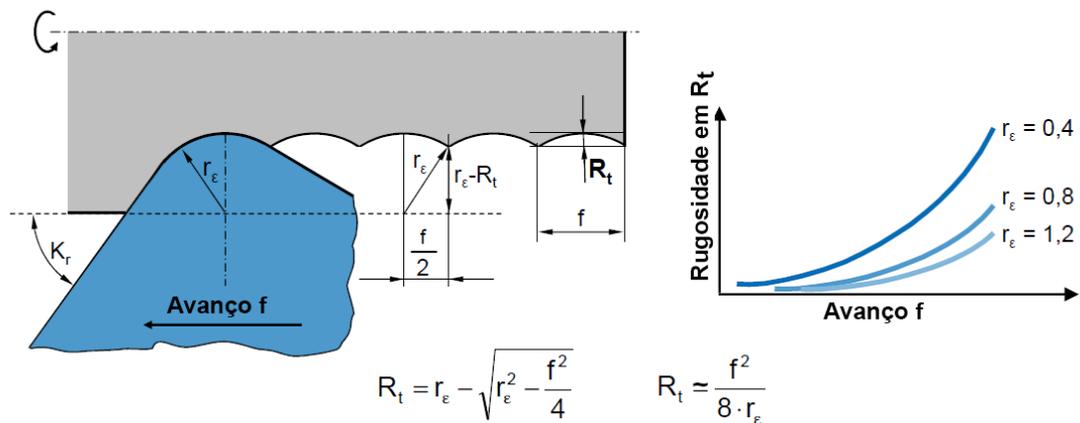


Figura 1-16 - A profundidade teórica da rugosidade  $R_t$  derivada a partir das especificações de engate avanço ( $f$ ) e o raio de ponta da ferramenta ( $r_\epsilon$ ).

Fonte: Klocke, 2011 - Imagem adaptada.

Mesmo podendo relacionar teoricamente a rugosidade com o avanço e o raio de ponta, a relação entre estes fatores não é simples nem linear, pois existe um limite de influência sobre a qualidade superficial (RECH e MOISAN, 2003). Valores muito pequenos de avanço fazem com que não se atinja a espessura mínima para a formação do cavaco, promovendo sulcamento de material e levando a um fluxo lateral de material que prejudica a rugosidade. Uma profundidade de usinagem mínima deve ser alcançada, a fim garantir a formação de cavacos, caso contrário, o material só é deformado elasticamente pelo aresta de corte (BRAMMERTZ, 1961). O aumento do raio de ponta promove elevação nas forças de corte, o que favorece o aparecimento de vibrações. Neste contexto, vários autores estudaram a influência das condições de corte sobre a rugosidade da superfície de peças obtidas pelo processo de torneamento. Kimakh et al, (2018) estudaram um modelo de regressão múltipla com o objetivo de definir os parâmetros ideais para a usinagem do aço SAE 1045, objetivando uma rugosidade de  $R_a=0,5 \mu\text{m}$ . De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que a rugosidade aumenta com o aumento da velocidade de corte e diminuição com o avanço. Outro estudo de regressão, relacionou o ângulo da superfície de saída da ferramenta e o avanço, tendo como resposta a rugosidade. Observou-se que, novamente, o avanço é o fator de maior relevância para a qualidade superficial (NOORDIN, VENKATESH, *et al.*, 2004).

Doung (2015) avaliou a influência da aplicação de microtexturas na superfície de saída da ferramenta no processo de torneamento a seco do aço SAE 1045. Concluiu-se que a aplicação de texturas específicas reduziu o desgaste da ferramenta e melhorou o acabamento. A aplicação de textura, na superfície de saída, direcionadas paralelamente à aresta de corte e perpendicular

à direção do fluxo do cavaco, reduziu a força de usinagem e melhora o acabamento quanto a altura máxima dos picos (DHAGE, JAYAL e SARKAR, 2019).

O desgaste da ferramenta também é um fator que influencia na qualidade superficial da peça. Grzesik (2008) observou uma tendência semelhante no aumento dos parâmetros de rugosidade  $R_a$  e  $R_z$  com o aumento do desgaste de flanco ( $V_B$ ), independente da geometria de ferramenta utilizada. Este estudo reafirmou o estudo de Fofane e Jawahir (2003), onde afirmaram que há um estreito relacionamento entre a rugosidade da superfície com o desgaste nas aresta de corte.

A alteração da microdureza subsuperficial pode ocorrer devido às cargas de compressão presentes no processo de torneamento. Estas cargas resultam em encruamento<sup>2</sup> do material da peça. O ângulo de inclinação da ferramenta, a geometria da aresta de corte e o desgaste da ferramenta favorecem o aumento destas cargas compressivas. Coelho et al. (2004) observaram que, durante o torneamento do aço *INCONEL 718*, a combinação de um ângulo de inclinação negativo com o desgaste da ferramenta, produziu uma elevação na compressão mecânica sobre a superfície usinada. O perfil de microdureza resultante da deformação plástica (encruamento) se caracteriza por uma redução dos valores de microdureza à medida que se afasta da borda, ao contrário do perfil de subsuperfície afetada termicamente, onde a menor dureza se encontra mais próximo da superfície (Figura 1-17). A profundidade total da deformação aumenta com o aumento do desgaste da ferramenta, da velocidade de corte ( $V_c$ ), do comprimento de contato de cavaco com a ferramenta e da profundidade de usinagem ( $a_p$ ). No torneamento, ela diminui com o aumento ângulos de inclinação da ferramenta (GRIFFITHS, 2001).

---

<sup>2</sup> Encruamento é o aumento do limite elástico do material (resistência a tração) por deformação plástica.

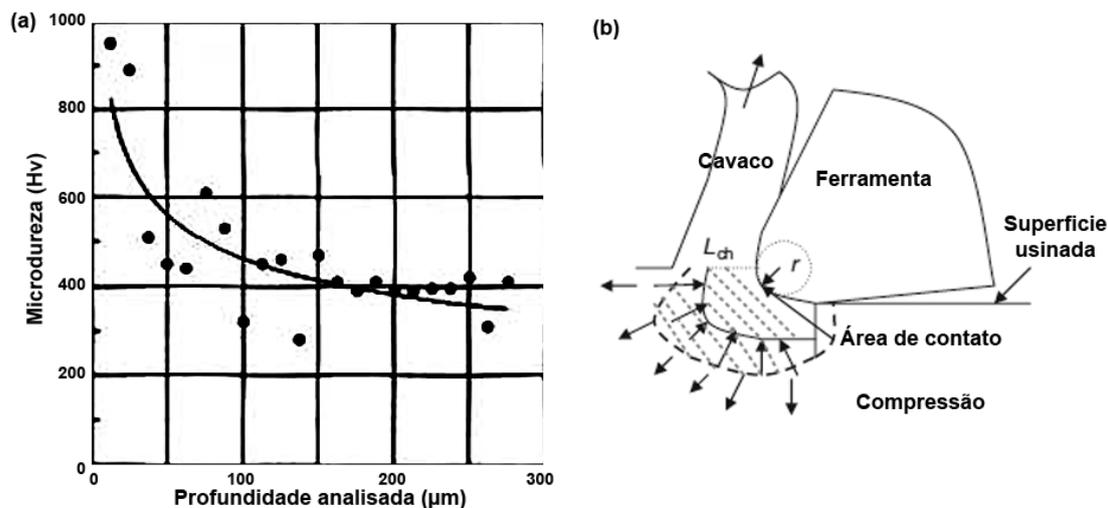


Figura 1-17 – (a) Distribuição da microdureza de uma subcamada deformada. (b) Efeito de geometria da aresta na geração de tensões residuais.

Fonte: Griffiths, 2001 e Pawade 2008 – Figura adaptada.

Durante um de seus experimentos, Griffiths (2001) alterou uma ferramenta, introduzindo nela um desgaste artificial na superfície de folga, para que a formação de cavacos fosse tão eficiente quanto o de uma ferramenta nova e afiada, porém o desgaste artificial ficaria friccionado sobre a superfície. Verificou-se que o desgaste produziu cargas compressivas de deformação, aumentando a dureza logo abaixo da camada. O arredondamento da aresta de corte, promovido pelo desgaste, fez com que ocorresse um acúmulo de material logo à frente do aresta de corte, causando, por sua vez, maiores deformações mecânicas na superfície. (PAWADE, JOSHI e BRAHMANKAR, 2008). A usinagem com uma ferramenta desgastada no final da sua vida (usinagem abusiva) significa alta deformação plástica.

Dhupla, Das e Kumar (2015) avaliaram a rugosidade da superficial e o desgaste de flanco em torneamento do aço AISI 4140 utilizando uma ferramenta com um revestimento de  $TiN Al_2O_3 + TiCN$  depositado por PVD. Por meio de um estudo de variância (ANOVA<sup>3</sup>), concluíram que o avanço foi o principal parâmetro que influenciou na rugosidade superficial, seguido de velocidade de corte ( $V_c$ ). Perceberam também que o desgaste de flanco foi afetado pela velocidade de corte ( $V_c$ ) e a interação do avanço ( $f$ ) e a profundidade de usinagem ( $a_p$ ). O efeito do desgaste da ferramenta na rugosidade também foi estudado, chegando aos dados da Figura 1-18.

<sup>3</sup> Anova ou Análise de variância é a técnica estatística que permite avaliar afirmações sobre as médias de populações.

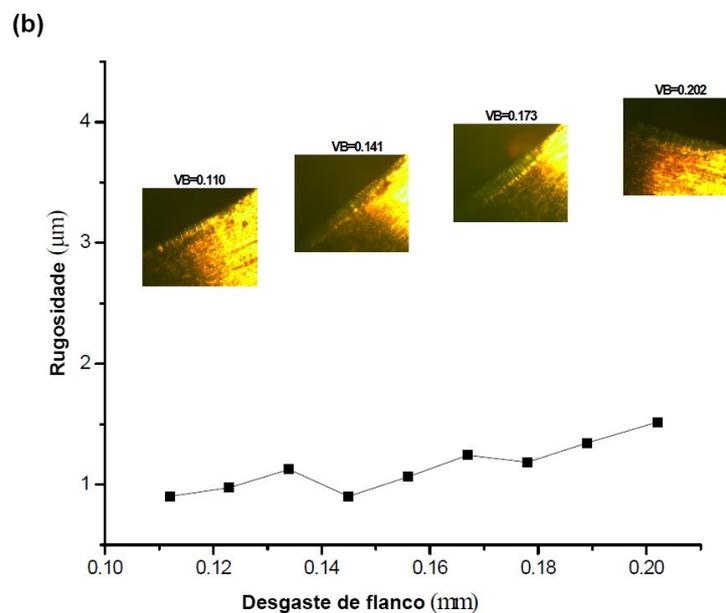
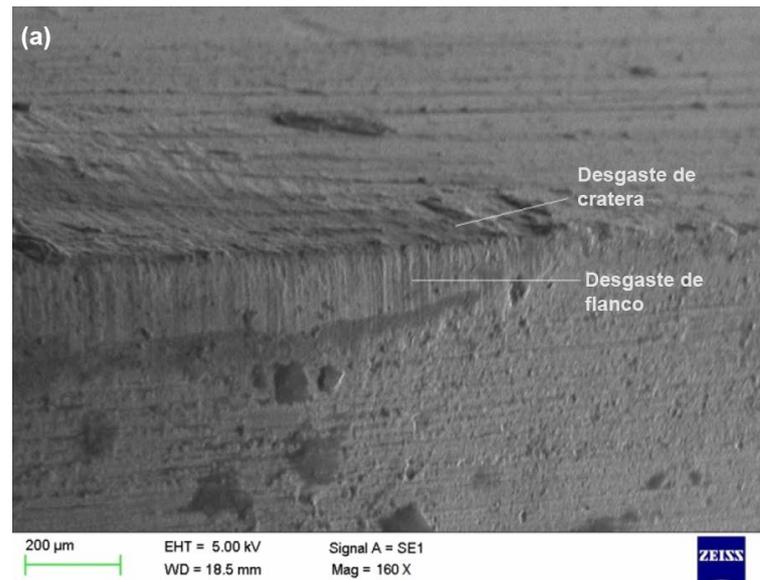


Figura 1-18 – (a) Imagem (MEV) do desgaste para  $f = 0.05$  mm/rev (b) Rugosidade x Desgaste de flanco para  $v_c = 170$  m/min;  $f = 0.05$  mm/ver.

Fonte: Dhupla, Das e Kumar, 2015. Imagem adaptada

## 1.5 Desgaste e avarias em ferramentas de corte e seus mecanismos

Durante o processo de usinagem, a ferramenta de corte se atrita com a peça em condições de elevadas pressões e altas temperaturas, e tal situação leva ao desgaste da ferramenta. Estudar os mecanismos de desgaste e falhas da ferramenta são de grande importância porque afetam os custos de usinagem e qualidade. Em termos gerais, as condições de corte podem resultar em desgaste, na deformação plástica, ou na fratura da ferramenta. A natureza do desgaste da ferramenta, infelizmente, não é suficiente clara ainda, apesar de numerosas investigações realizadas nos últimos 50 anos (ASTAKHOV, 2007).

O desgaste da ferramenta pode ser classificado pela região da ferramenta afetada ou pelos mecanismos físicos que produzem (STEPHENSON, 2016). Observações mostram que a geometria da ferramenta pode ser modificada pela deformação plástica, avaria e o desgaste. A diferença básica entre os processos é que o desgaste envolve sempre alguma perda de material a partir da superfície da ferramenta (TRENT e WRIGHT, 2000). A seguir será apresentada os modos de falha detalhadamente (MACHADO, ABRAO, *et al.*, 2009).

- Avaria: a ferramenta perde repentinamente uma considerável quantidade de material devido a uma quebra, um lascamento ou propagação de trincas.
- Desgaste: mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material (ISO 3685, 1993). Hutchings (2017) ressalta que o desgaste adesivo (detalhado mais a frente) é normalmente usado para descrever desgaste por deslizamento, mas é apenas um dos vários processos físicos e químicos que podem ser envolvidos.
- Deformação plástica: a ferramenta modifica sua geometria devido ao deslocamento de material. Trent (2000) afirma que por si mesma, a deformação não é um processo de desgaste, pois nenhum material é removido da ferramenta, mas as forças e a temperatura nas superfícies de contato durante a usinagem, promovem alteração do fluxo do material da ferramenta.

Devido ao contato entre a superfície de saída da ferramenta com o cavaco e a superfície de folga peça, o desgaste aparece nestas superfícies e no raio de ponta ( $R_e$ ). A norma NBR ISO 3685:2017 (Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento) identifica e determina os critérios para quantificar esses desgastes. Os principais são:

- Desgaste de cratera: localizado na superfície de saída da ferramenta, é formado pelo fluxo de material que desliza sobre ferramenta combinado com as elevadas temperaturas e velocidades localizadas, possui uma forma de cratera, de onde se deriva o nome (TRENT e WRIGHT, 2000). O desgaste cratera moderada geralmente não determina o fim de vida da ferramenta. De fato, a formação de uma cratera aumenta o ângulo de inclinação efetivo da ferramenta e, portanto, pode reduzir as forças de corte (STEPHENSON, 2016). O desgaste excessivo da ferramenta pode levar a mesma ao colapso (avaria). A norma NBR ISO 3685:2017, Figura 1-19-b, quantifica este desgaste por meio de sua profundidade

(KT). Os principais mecanismos de desgaste que promovem a formação da cratera são: difusão, abrasão, oxidação e adesão (tratados mais a frente).

- Desgaste de flanco: localizado nas superfícies principal de folga e lateral de folga, passando pelo raio de ponta. O desgaste de flanco geralmente é resultado da abrasão da aresta de corte com a peça (STEPHENSON, 2016). É usado como o principal critério de fim de vida uma vez que, altos valores de desgaste de flanco aumenta o contato entre as superfícies prejudicando a integridade superficial da peça, além de aumentar as forças de corte e temperatura de trabalho. A norma NBR ISO 3685:2017, Figura 1-19-b, quantifica este desgaste pela sua altura média, desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ), e pela sua altura total, desgaste de flanco máximo ( $VB_{Bmax}$ ). Os principais mecanismos que promovem o desgaste de flanco são: abrasão, tensão, formação de trinca e fratura (tratados mais a frente).
- Desgaste de entalhe: assim como o desgaste de flanco, se localiza na superfície de folga da ferramenta e é formado pelo fluxo de material do cavaco fluindo lateralmente pela borda da peça, Figura 1-20 (KLOCKE, 2011). A norma NBR ISO 3685:2017, Figura 1-19-b, quantifica o desgaste peça sua altura máxima e localização na aresta principal de corte, desgaste de entalhe ( $VB_N$ ). Os principais mecanismos que promovem o desgaste de flanco são: abrasão, adesão, fadiga e trincas (tratados mais a frente).

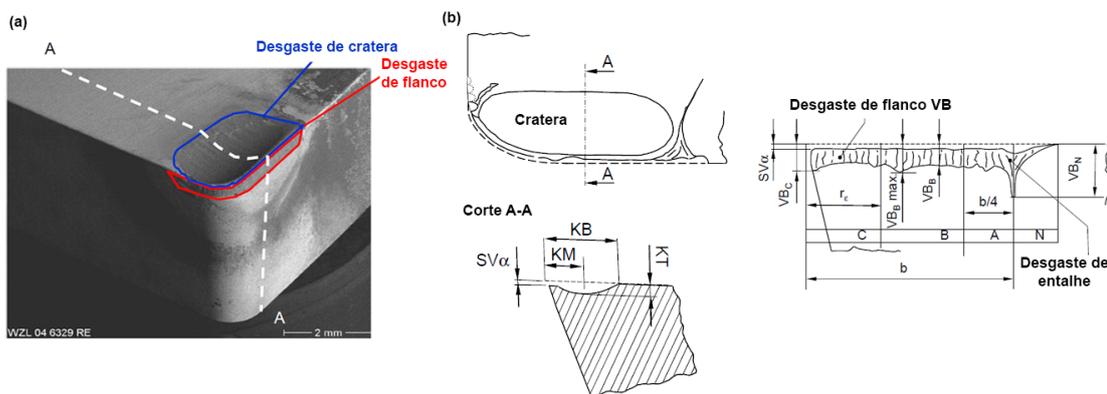


Figura 1-19 - (a) ferramenta com desgaste de cratera e flanco. (b) critério de quantificação dos desgastes.  
 Fonte: Klocke, 2011 - Imagem adaptada e NBR ISO 3685:2017 - Imagem adaptada

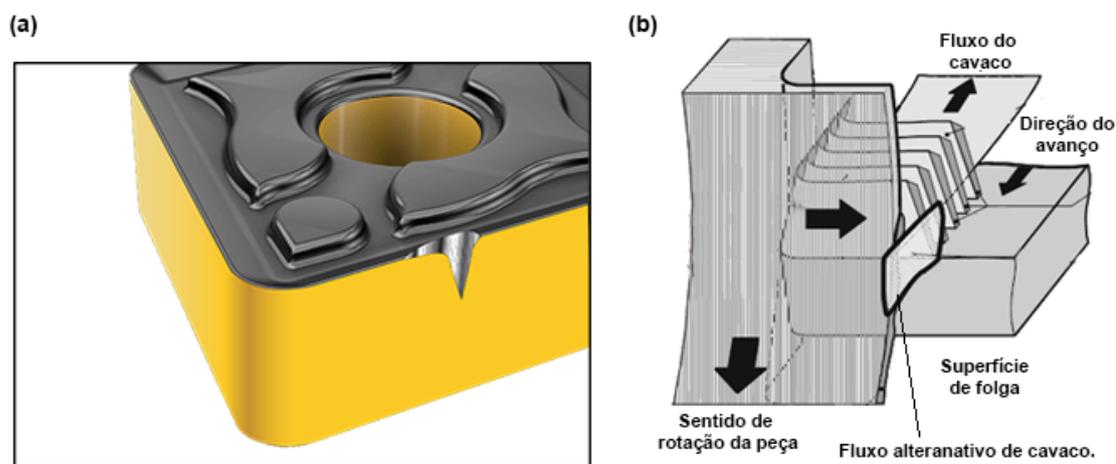


Figura 1-20 - (a) Ferramenta com desgaste de entalhe. (b) Ilustração esquemática de motivos que causam desgaste entalhe na aresta principal.

Fonte: [iscardobrasil.com.br](http://iscardobrasil.com.br), 2019 e Klocke, 2011 - Imagem adaptada

Sendo o desgaste algo inevitável e contínuo, se faz necessário determinar um critério para o fim de vida de uma ferramenta, com o objetivo de manter a qualidade das peças produzidas. Atualmente uma das metas principais de pesquisa em usinagem dos metais tem sido desenvolver métodos de predição vida a partir de considerações de mecanismos de falha da ferramenta (STEPHENSON, 2016).

Os mecanismos que produzem os vários tipos de desgastes, descritos anteriormente, dependem da geometria da ferramenta, dos materiais envolvidos na fabricação da ferramenta e da peça, além das condições de corte (STEPHENSON, 2016). Os principais mecanismos de desgastes presentes no torneamento são: adesão, difusão, abrasão e perturbações superficiais (KLOCKE, 2011).

No desgaste abrasivo, o material é removido ou deslocado da superfície por partículas duras. As partículas duras podem ser protuberâncias de uma das superfícies, que pela ação do movimento relativo entre os corpos, são forçados a deslizar ao longo da outra superfície, promovendo o desgaste conhecido como “desgaste de dois corpos”. Quando estes picos se desprendem, existe um terceiro material entre as superfícies e o desgaste acontece por estas partículas soltas, que rolam e deslizam entre as duas superfícies. Quando existe a presença de partículas soltas, o desgaste é chamado de “três corpos”. (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017). As taxas de desgaste devido a abrasão três corpos são geralmente menores do que aqueles devido à abrasão de dois corpos. Na usinagem, o desgaste abrasivo é causado por partículas duras de carbonetos, nitretos ou óxidos que se desprenderam da própria ferramenta (FOX-

RABINOVICH e TOTTEN, 2006). O desgaste abrasivo também é conhecido como “desgaste de ranhuras”, devido as ranhuras características formadas pelo mecanismo dominante da remoção de material, o microcorte (KLOCKE, 2011) e (KAJDAS, HARVEY e WILUSZ, 1990).

O desgaste por adesão é caracterizado por uma transferência de material, de uma superfície para outra durante o movimento relativo, devido a um processo de soldadura em fase sólida (KAJDAS, HARVEY e WILUSZ, 1990). A perda de material é provocada pela soldadura das asperezas das superfícies em contato e o desgaste é causado pelo material mais fraco que sofre fratura perto das junções soldadas. Fox-Rabinovich (2006) destaca que, na usinagem o desgaste adesivo é causado pela formação de junções soldadas entre o cavaco ou peça de trabalho com a face de ferramenta. A fratura subsequente das junções gera fragmentos microscópicos do material da ferramenta que serão levadas pelo cavaco ou pela peça.

A difusão é o deslocamento espontâneo de átomos ou moléculas para novos locais no interior de um material. Este fenômeno é ativado termicamente. Quando duas superfícies estão em contato e em movimento relativo e ocorre a difusão, uma superfície perde material para a outra (KAJDAS, HARVEY e WILUSZ, 1990). No processo de usinagem, as elevadas pressões e temperaturas durante o corte proporcionam um ambiente ideal para os processos de difusão entre o material da ferramenta, cavaco e a peça.

Loffler (1994) realizou um abordagem sistemática para melhorar o desempenho de revestimentos PVD para aplicações em ferramentas, onde desenvolveu um gráfico que correlaciona a velocidade de corte ( $V_c$ ) com a contribuição dos mecanismos de desgaste (Figura 1-21-a). Sabe-se que o aumento da velocidade de corte ( $V_c$ ) promove o aumento da temperatura de corte, sendo assim, o aumento da velocidade de corte ativa os mecanismos de desgaste termicamente ativados.

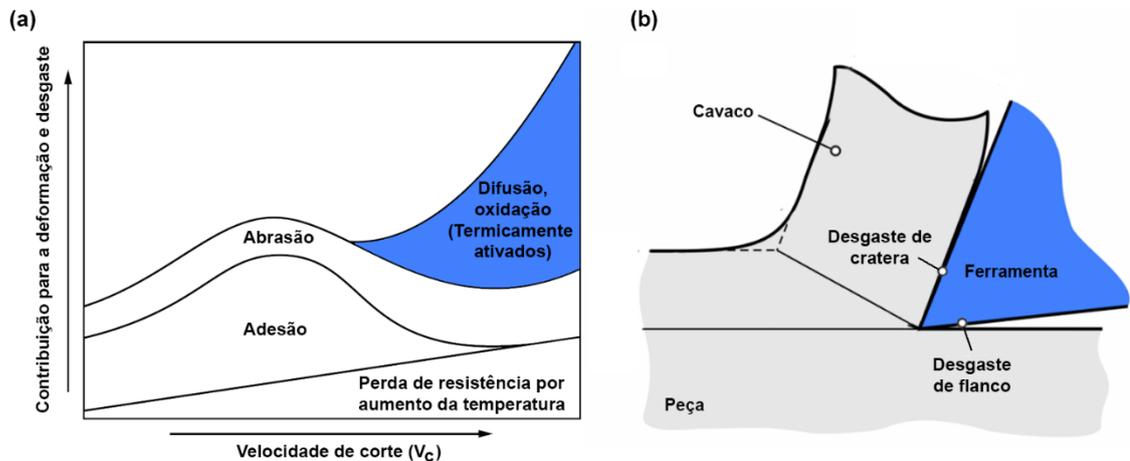


Figura 1-21 - (a) mecanismo de desgaste em usinagem contínua. (b) Ilustração esquemática dos pontos de geração dos desgastes de cratera e flanco.

Fonte: Loffler, 1994 e Klocke, 2011 - Imagem adaptada

No subitem “*Geometria de ferramentas de corte e seus materiais*” será comentado sobre a aplicação de revestimentos para controlar os mecanismos de desgaste sobre a ferramenta. A Tabela 1-1 - a seguir faz parte do trabalho de Holleck (1986), que estudou a aplicação do titânio, na forma de nitretos e carbonetos, em revestimentos duros.

Tabela 1-2 -Melhora de desempenho de ferramentas usando revestimento.  
Fonte: Holleck, 1986

Efeito favorável	Melhora esperada na ferramenta	Vantagem práticas
Aumento da dureza, especialmente em temperaturas elevadas	Redução de deformações nas superfícies de contato	Aumento da vida
Barreira de difusão melhorada e estabilidade química	Redução da difusão e a dissolução do material de ferramentas durante a usinagem	Aumento da vida e produtividade.
Diminuição da aderência	Menos transferência de material da ferramenta	Aumento de produtividade.
Melhora na adaptabilidade	Forças de atrito mais baixas	Aumento da vida e qualidade superficial.

A próxima tabela (Tabela 1-2) foi apresentada por Stephnson (2016) e traz uma correlação do tipo de desgaste com seu mecanismo e características.

Tabela 1-3 – Mecanismos comuns de desgaste da ferramenta e da falha.  
Fonte: Stephnson, 2016

Tipo de desgaste	Mecanismo / Causa
Desgaste de flanco	Abrasivo, amaciamento térmico, aresta deformada, baixo avanço
Desgaste de cratera	Difusão, abrasão, compatibilidade química
Desgaste de entalhe	Abrasão, oxidação ( Figura 1-22 )

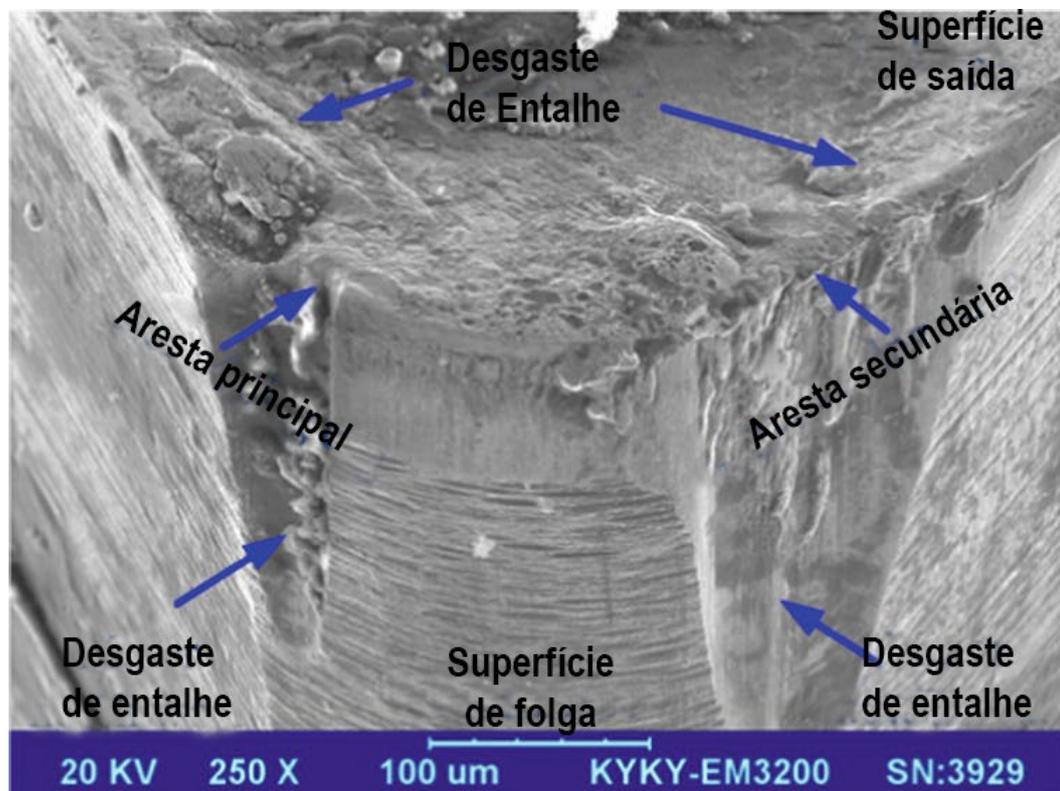


Figura 1-22 - Desgaste de entalhe em ferramenta de metal duro.  
Fonte: Kong et al., 2016

Algumas das características tribológicas dos revestimentos podem ser associadas ao tipo de ligação atômica presente neles. A presença de ligações metálicas irá favorecer a adesão da cobertura ao substrato, as ligações covalentes aumentam a dureza, e as iônicas alteram a inércia química e térmica (KHADEM, PENKOV, et al., 2017)

Rech (2015) avaliou o desempenho de ferramenta não revestida comparada com os revestimentos TiN, (Ti,Al)N e (Ti,Al)N+MoS<sub>2</sub>. Foram coletados valores de temperatura na

interface, força de corte, coeficiente de atrito e comprimento de contato entre o cavaco e a ferramenta. Concluiu-se que as ferramentas revestidas obtiveram menores valores de força, coeficiente de atrito e comprimento de contato. Já o revestimento (Ti,Al)N apresentou valores mais elevados de temperatura quando comparado com o TiN.

Em um estudo que comparou o desempenho dos revestimentos TiN, TiCN e (Ti,Al)N, em duas velocidades de corte, Jindal et al (1999) perceberam o efeito da velocidade de corte sobre os mecanismos de desgaste termicamente ativos, onde houve a redução até 4 vezes a vida da ferramenta com um aumento de 1,3 vezes na velocidade de corte (Figura 1-23).

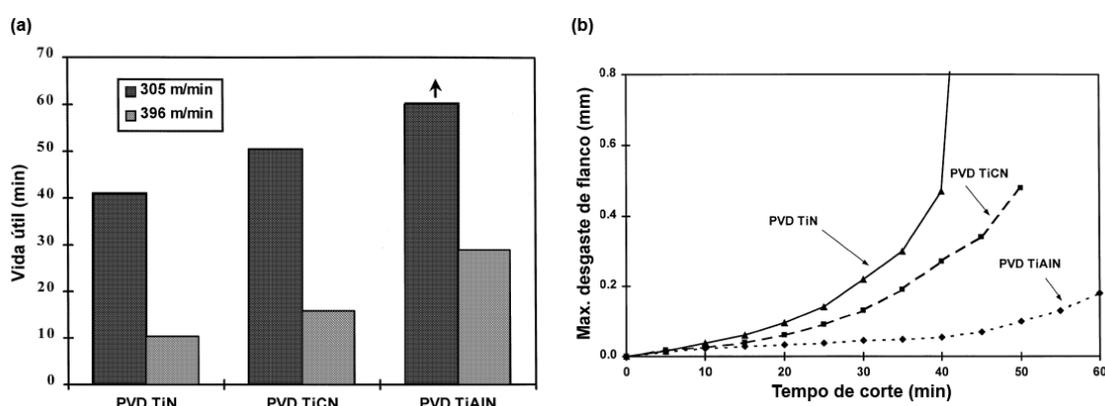


Figura 1-23- (a) Vida do revestimento PVD TiN, TiCN, e TiAlN torneando aço SAE 1045 (0.15 mm/rev); (b) Máximo desgaste de flanco em relação ao tempo de corte (SAE 1045, 305 m/min).  
Fonte: Jindal et al. 1999

Pesquisas voltadas para avaliar aplicações de revestimentos multicamadas com o objetivo utilizar as melhores características dos revestimentos é essencial para a evolução da usinagem. Vereschaka et al. (2019) estudaram os revestimentos Cr-CrN-(Ti,Cr,Al,Si)N e (Ti,Al)N em comparação com uma ferramenta sem revestimento durante o torneamento do aço SAE 1045 na velocidade de corte de 300 m/min. Usando o critério de desgaste de flanco, a ferramenta revestida com (Ti,Al)N obteve um ganho de 42% no tempo total de corte em comparação com a ferramenta sem revestimento, e a ferramenta com a multicamada de Cr-CrN-(Ti,Cr,Al,Si)N alcançou 128% de melhora.

Em outro estudo Vereschaka et al. (2018) estudaram o desgaste por difusão em um revestimento multicamadas de Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N no torneamento de aço ASE 1045. Não foi utilizado fluido de corte e os parâmetros de corte utilizados foram: velocidade de corte ( $V_c$ ) de 250 m/min, avanço ( $f$ ) de 0.25 mm/rev, e profundidade de usinagem ( $a_p$ ) de 1.0 mm. Como critério de fim de vida, foi adotado o desgaste de flanco de 0,4 mm máximo. Os resultados

apresentaram uma difusão insignificante de titânio para o material usinado, mas em contrapartida a aderência sobre a ferramenta aumentou.

Denkena et al. (2017) apresentam um estudo no qual, foi proposto a alteração da superfície de folga, criando um pequeno ressalto na região onde o desgaste de flanco se apresenta. Este ressalto teria como objetivo principal, aumentar a vida da ferramenta mantendo o desgaste de flanco dentro de limites aceitáveis de trabalho (Figura 1-24). Desta forma obtiveram um aumento de vida de até 75% nos ensaios, torneando o material Ti-6Al-4V e Aluminato de titânio, materiais de difícil usinagem. Vale ressaltar que o ganho foi avaliado somente no critério do comprimento do desgaste de flanco, uma vez que outros desgastes acabaram se tornando mais representativos, devido ao aumento do tempo de usinagem.

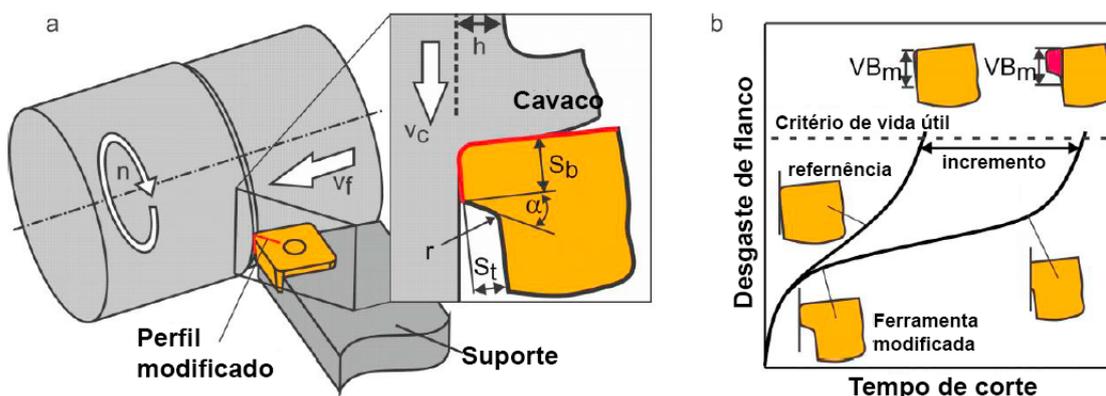


Figura 1-24 - (a) Geometria da ferramenta modificada; (b) efeito da modificação na face de folga.  
Fonte: Denkena et al., 2007. Imagem adaptada.

Estudando a relação da evolução da taxa de crescimento do desgaste de flanco em relação ao raio de ponta e o arredondamento da aresta de corte, Endres e Kountanya (2002) tornearam o aço AISI 1040 e perceberam que a taxa de desgaste aumenta com o aumento do raio de ponta. Além disso, verificaram que a ferramenta que possui um pré-desgaste na aresta de corte, reduz a taxa da evolução do desgaste de flanco. Entretanto, quando se avaliou os raios de ponta entre 0,2 e 0,8 mm, perceberam que o comportamento se invertia.

Alterar o fluxo de calor da ferramenta é uma alternativa para aumentar a sua vida. As maiores fontes geradoras de calor se encontram nas regiões de contato da ferramenta com o cavaco e a peça, as quais são de difícil acesso. Alterações geométricas nas ferramentas são alternativas para minimizar esta situação. Microtexturas na face de saída ou de folga da

ferramenta é uma técnica de estado da arte (do inglês *state-of-the-art*<sup>4</sup>) para melhorar o desempenho de corte (FANG e OBIKAWA, 2017). Fang estudou a aplicação de texturas na face de folga da ferramenta para melhorar o acesso do fluido de corte e alterar o seu fluxo de calor. Como resultado, as ferramentas microtexturizadas sempre apresentaram um desgaste de flanco e de cratera reduzidos em comparação com a ferramenta não texturizada. A taxa de desgaste da ferramenta foi influenciada pela posição e altura das texturas aplicadas.

A texturização de uma superfície é um método que permite alterar suas propriedades tribológicas devido à mudança nas características de superfície. Rajbongshi e Sarma (2019) compararam a aplicação de variados tipos de texturas e ferramentas não texturizadas na usinagem do aço AISI D2. As texturas foram aplicadas na superfície de folga. Avaliaram o comportamento do desgaste de flanco e da rugosidade superficial da peça, comparando as variações de textura da ferramenta. Em todas as condições, o desgaste de flanco medido para as ferramentas texturizadas foi menor que a da ferramenta não texturizadas. Por fim, verificaram que na maioria dos casos, a rugosidade superficial foi menor para ambos os tipos de ferramenta texturizadas do que a ferramenta não texturizada.

Park e Kwon, (2011) fizeram uma análise de desgaste de flanco de uma ferramenta revestida com um revestimento multicamadas de TiCN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiCN, durante a usinagem do aço AISI 1045. Utilizando técnicas avançadas de microscopia e de processamento de imagem, obtiveram os perfis de desgaste do flanco e analisaram a rugosidade e o tamanho dos sulcos formados na superfície desgastada. O mecanismo de desgaste dominante na face de folga foi a abrasão causada pela fase cementita da peça. Após a remoção das camadas de revestimento e a exposição do substrato, a adesão se tornou mais significativa. Concluiu-se que a dureza do revestimento foi o requisito mais importante para se resistir ao desgaste de flanco.

Casas et al (2001) estudaram as propriedades mecânicas do carboneto de tungstênio (WC) oxidado. A cinemática da oxidação foi obtida através de análise termogravimétrica (do inglês: TGA - *Thermogravimetric analysis*), os resultados apresentaram uma relação linear entre a oxidação e o ganho de peso. O material foi submetido a três tempos de oxidação diferentes, sendo eles 10 min, 1 h e 6 h. As alterações na resistência mecânica e na resistência à fratura das amostras oxidadas foram medidas à temperatura ambiente, sob quatro pontos de flexão e comparadas com as amostras não oxidadas. Em todos os casos, foi observada uma

---

<sup>4</sup> O estado da arte é o nível mais alto de desenvolvimento, seja de um aparelho, de uma técnica ou de uma área científica.

degradação acentuada na força após a oxidação. Gu et al (2012) avaliaram a taxa de ganho de peso do carboneto de tungstênio (WC) durante a oxidação. O processo de oxidação resultou em um ganho de peso de 20% por ter transformado completamente o composto de WC-Co em  $WO_3$  e  $CoWO_4$ . A Figura 1-25 exibe a camada de óxido formada após a exposição da amostra por 10 min, na temperatura de  $700^\circ C$ . A Figura 1-26 exibe o resultado do teste de TGA realizado por Gu et al (2012), que expõem a alteração do ganho de peso do WC-Co com o aumento da temperatura, em uma atmosfera rica em oxigênio.

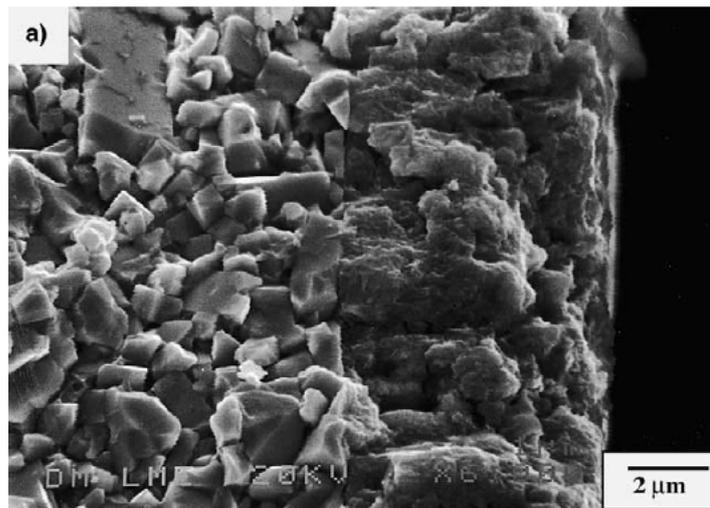


Figura 1-25 - Micrografias da camada de óxido formadas em WC-6% oxidadas ao ar a  $700^\circ C$  durante 10 minutos.

Fonte: Casas et al, 2001. Imagem adaptada.

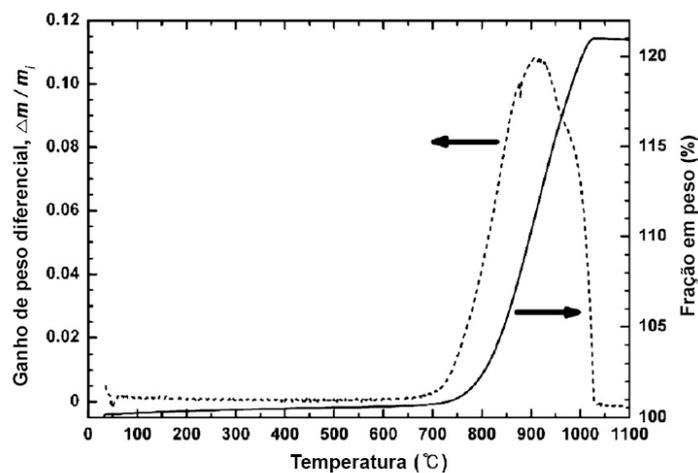


Figura 1-26 – O resultado do TGA mostra a alteração no ganho de peso do WC-Co com o aumento da temperatura numa atmosfera rica em oxigênio.

Fonte: Gu et al, 2012. Imagem adaptada.

O comportamento da oxidação de WC-Co sinterizado com carbonetos com tamanho de grãos 3-5  $\mu\text{m}$  de WC e com 6-15% em volume de cobalto ao ar e temperatura entre 650-800  $^{\circ}\text{C}$  foram estudados por Lofaj e Kaganovskii (1995). Os grãos de WC da superfície entram em contato com a atmosfera e esta fina camada se transforma em trióxido de tungstênio ( $\text{WO}_3$ ). O cobalto cobrindo os grãos de WC poderia limitar a quantidade de admissão de oxigênio para WC e do escape de  $\text{CO}_2$ , após a primeira reação. No entanto, por causa da rápida difusão de oxigênio através da fase com o cobalto, iniciou-se a formação de gases na interface entre o  $\text{WO}_3$  e a camada subjacente de WC. A fase ligante do material sinterizado pode então deformar-se, os grãos de óxido de reorganizam e cavidades puderam crescer até a formação de porosidade aberta. Como resultado, o expansão pode ser observado numa escala macroscópica. A Figura 1-27 exibe de forma esquemática a cinemática da oxidação do WC.

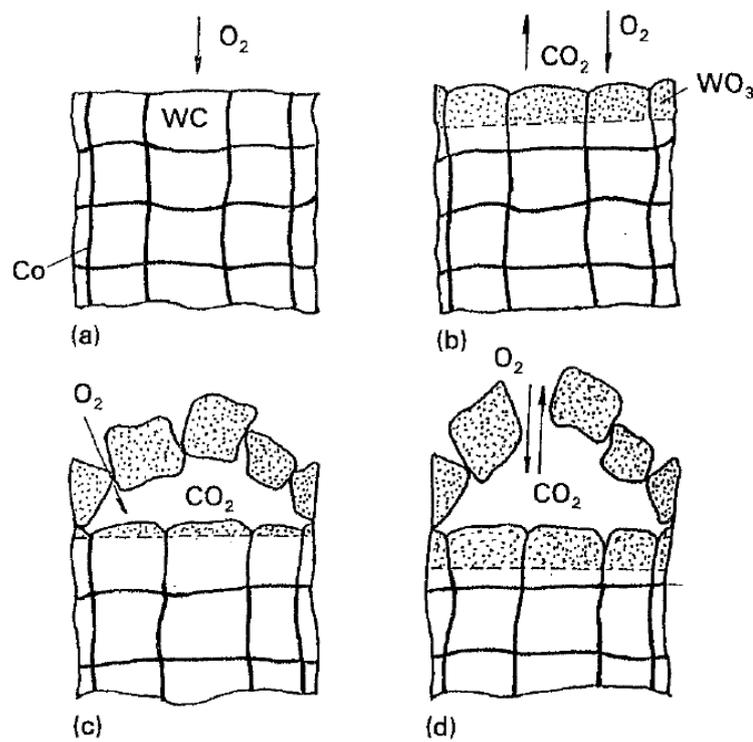


Figura 1-27 - Cinemática de oxidação do WC.  
Fonte: Lofaj e Kaganovskii, 1995. Imagem adaptada.

## 2. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A experimentação é uma parte vital do método científico (MONTGOMERY, 2008). Um processo é a transformação de entradas em saídas. No contexto de manufatura, as variáveis de processo como a matéria prima e as ferramentas, são caracterizadas como entradas, e as características das peças, qualidade ou desempenho como saídas (ANTONY, 2014). O planejamento de um experimento é essencial para descobrir as variáveis chave que influenciam as características estudadas. Durante a realização de um experimento planejado, alterações intencionais são realizadas nas entradas e as respostas nas saídas são observadas e suportadas por análises estatísticas. Estes tipos de experimentos são particularmente úteis em solução de problemas, melhorias de produtos, identificação de fenômenos novos ou melhorias de processos existentes (MONTGOMERY, 2010).

Os três princípios do planejamento experimental são aleatorização, replicação e bloqueio (ANTONY, 2003). A aleatorização tem o objetivo de reduzir o efeito da tendência nos experimentos, além de favorecer a percepção de ruídos. A réplica permite estimar-se um erro experimental e proporciona maior precisão na estimativa do fator de interação. O bloqueio tem como objetivo eliminar efeitos de variações extremas causadas por ruídos (ANTONY, 2014). Usar o planejamento de experimentos proporciona economia e eficiência na execução dos experimentos, e o uso de métodos estatísticos na análise dos resultados permite objetividade nas conclusões (MONTGOMERY, 2010).

Ao longo deste capítulo, será apresentada a metodologia utilizada para o planejamento experimental, dividida em quatro grandes grupos. O primeiro é o material utilizado, apresentando critérios de escolha e preparação das amostras. O segundo grupo é dos equipamentos, com a lista dos equipamentos e suas principais características e funcionalidades. Logo em seguida virão a seção do projeto e, por fim, a parte execução e coleta dos dados.

A Figura 2-1, exibe o fluxograma utilizado como referência para a pesquisa, que foi realizada no Laboratório de Usinagem e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica, no Centro de Microscopia (CM-UFGM) e no laboratório de Ensaios Tribológicos, todos na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

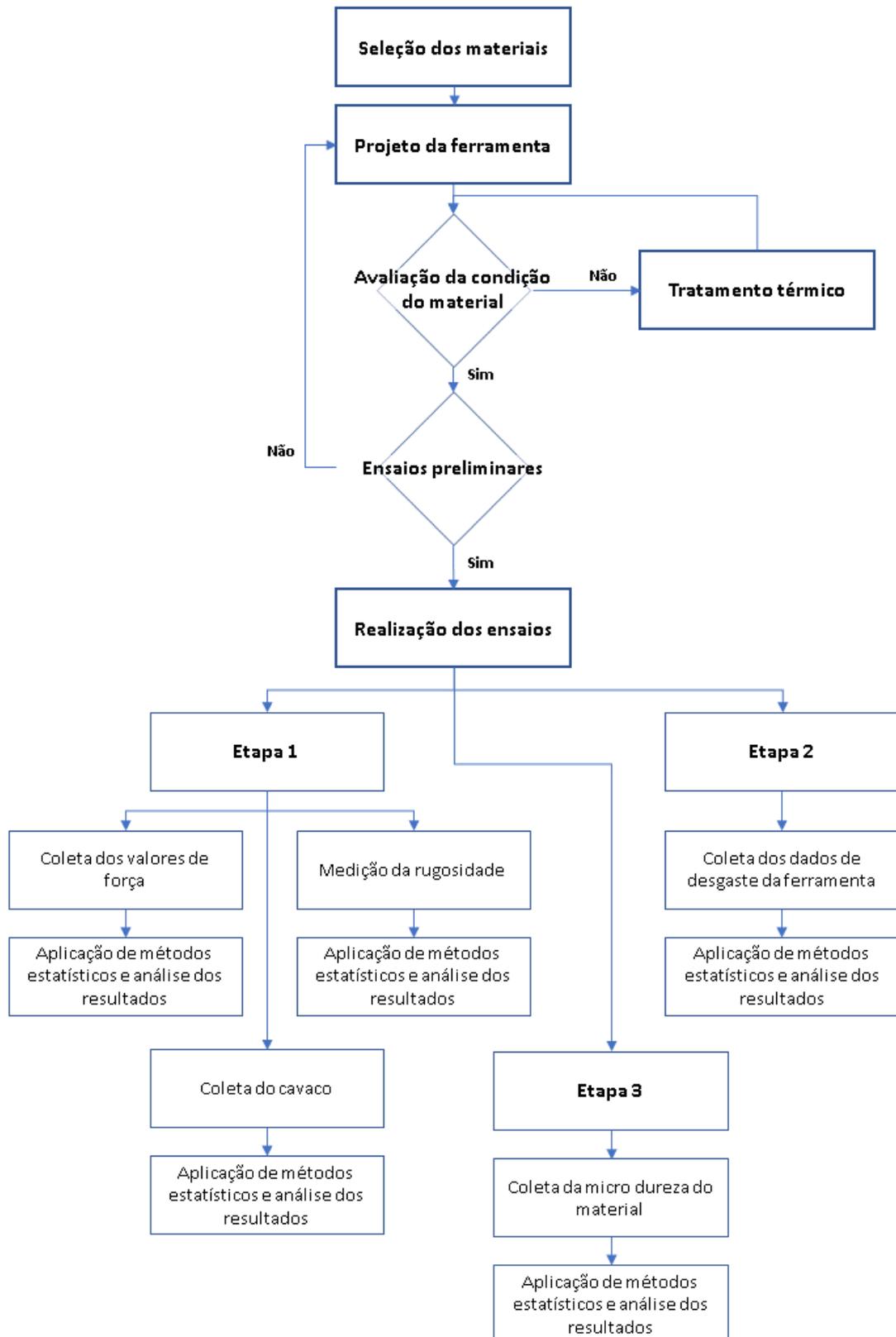


Figura 2-1 - Fluxograma com etapas da metodologia.

Fonte: Resultado da pesquisa.

## 2.1 Materiais

Os corpos de prova foram confeccionados com aço carbono ABNT 1045 ( $C=0.45\%$ ,  $Mn=0.75\%$ ,  $P=0.04\%$  max,  $S=0.05\%$  max), amplamente utilizados na indústria metal mecânica. Ele foi adquirido em barras de  $\varnothing 82,55 \times 365$  mm e passou pelo processo de preparação, onde foram torneados com auxílio de contraponto e terminaram com a medida de  $\varnothing 78 \times 350$  mm. Antes da preparação final, amostras de  $\varnothing 82,55 \times 10$  mm foram retiradas a fim de realizar mediação de dureza e avaliação das condições metalúrgicas.

O torneamento foi realizado com o suporte PCLNR 2020K-12 fabricado pela Mitsubishi juntamente com os insertos CNMG 120408-MP MC6025 (classe ISO P10-P30) sem modificação e com modificação. A nomenclatura “CNMG 120408” diz respeito às características geométricas do inserto, com o “MP” corresponde ao formato de quebra cavaco e a descrição “MC6025” corresponde ao material da ferramenta e seus revestimentos. Devido a combinação da inclinação do suporte e a geometria de quebra cavaco, o ângulo de saída da ferramenta foi de  $9^\circ$  positivos. A Figura 2-2 exhibe o substrato da ferramenta e as camadas do revestimento, assim como e a geometria de quebra cavaco e sua faixa de aplicação. Esta classe de inserto possui uma fina camada de TiN sobre a superfície de saída da ferramenta.

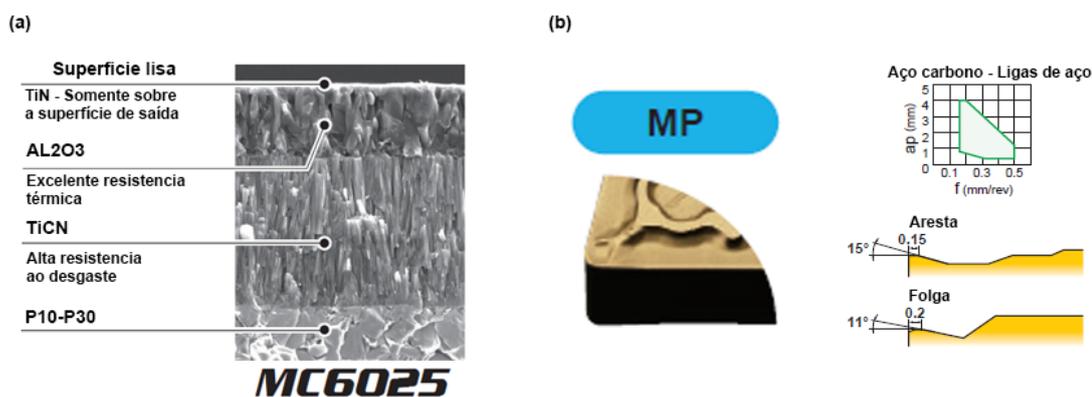


Figura 2-2 – Características técnicas do inserto CNMG 120408-MP MC6025.

Fonte: Mitsubishi, 2015. Imagem adaptada

## 2.2 Equipamentos

O torneamento foi realizado no torno Romi modelo Centur 30S (5,5 kW de potência e rotação máxima de 3500 rpm). Foi montado no local da porta ferramenta original do

equipamento um dinamômetro da *Kistler* modelo 9272 com um novo porta ferramenta. O dinamômetro foi conectado a um amplificador *Kistler* modelo 5037A e a um computador com os softwares *ManuWare* e *NI LabView SignalExpress 2013*. Foram utilizados quatro canais para a coleta das forças de avanço, corte, passiva e momento (Figura 2-3). A taxa de aquisição utilizada foi de 240Hz. Posteriormente, os dados foram tratados utilizando o software *Excel* e *Jupyter Notebook*, usando a linguagem de programação *Python*<sup>5</sup>.

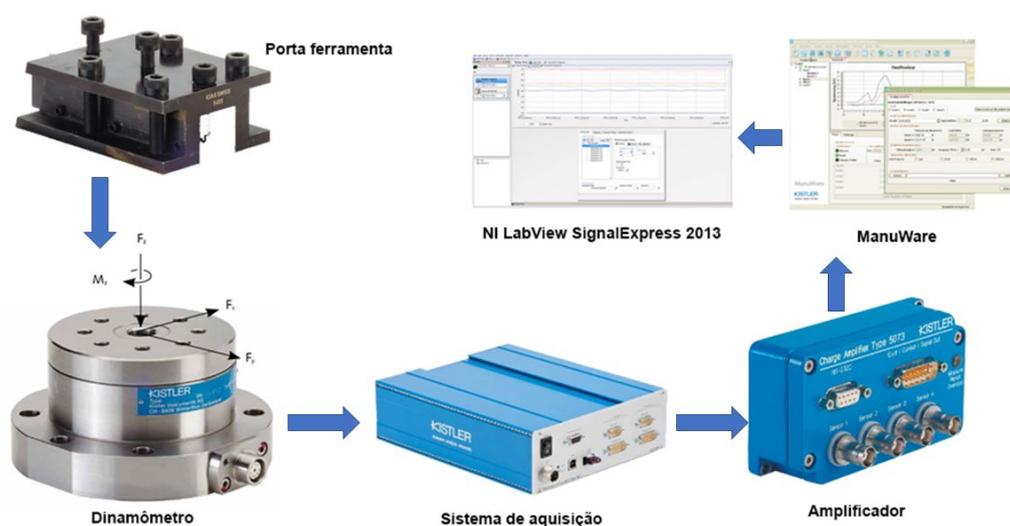


Figura 2-3 - Modelo esquemático da obtenção das componentes da força de usinagem  
Fonte: kistler. Imagem adaptada.

Para a obtenção da dureza do material, foi utilizado um durômetro de bancada analógico *Starrett* modelo “N3814” (tabela de calibração e erro se encontram no Anexo I). A preparação das amostras para a medição de dureza necessitou de um corte transversal no material e, para isso, foi utilizada uma serra de fita horizontal, com avanço gravitacional modelo “S3120” da *Starrett*.

A microdureza foi avaliada utilizando um microdurômetro *Future-Tech* modelo FM1, disponível no Laboratório de Tribologia. Neste mesmo laboratório localiza-se o perfilômetro *Hommelwerke* modelo Hommel Etamic T8000 que foi utilizado para coletar o perfil 3D do desgaste de flanco das ferramentas. Os acessórios utilizados foram o apalpador TKU 300/600, juntamente com a ponta de diamante cônica de 90° e Ø5 µm. A coleta dos dados foi realizada

<sup>5</sup> Python é uma linguagem de programação de alto nível, interpretada, de script, imperativa, orientada a objetos, funcional, de tipagem dinâmica e forte.

pelo software *TurboWave* e os valores tratados com os softwares *MountainsMap 7*, *Gwyddion* e *Jupyter Notebook*, usando a linguagem de programação *Python*.

A preparação das amostras foi realizada na politriz e lixadeira metalográfica Aropol 2V-PU da *Arotec*.

A rugosidade foi avaliada utilizando o rugosímetro *Taylor-hobson Surtronic 25*. A configuração para coleta dos dados seguiu o especificado na norma ABNT NBR ISO 4287:2002.

Para obtenção dos dados de desgaste da ferramenta, foi utilizado um microscópio estereoscópico *Olympus SZ61*, juntamente com os softwares *Photoshop* e *Autocad*. Por fim, um microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM - 6360LV, localizado no Centro de Microscópica da UFMG, foi utilizado para geração de imagens dos insertos desgastados em elevadas ampliações e alta resolução.

### **2.3 Desenvolvimento do inserto**

A ideia central envolvida no projeto do inserto foi o controle do desgaste de flanco máximo, seguido pela melhoria do acesso do fluido de corte para alterar o fluxo de calor nesta região, sem interferir no fluxo do cavaco na superfície de saída e mantendo o acabamento final da peça. A facilidade de fabricação e alta repetibilidade também foram fatores considerados, por isso, inicialmente, o processo de alteração do inserto foi desenhado para usinagem por retificação. A indústria define usualmente uma vida de entre 0,4 a 0,5 mm de desgaste de flanco, o que não é muito diferente do que as normas sugerem. Por isso, o valor de  $V_{Bmax} = 0,5$  mm foi considerado no projeto.

Com os requisitos anteriores conhecidos, o projeto de desenvolvimento do inserto foi realizado e uma nova superfície de folga foi criada, com dois planos, sendo que um deles recuado em 0,5mm em relação ao principal (Figura 2-4). Além disso, uma endentação auxiliar foi inserida, com a função de redirecionar o fluido de corte.

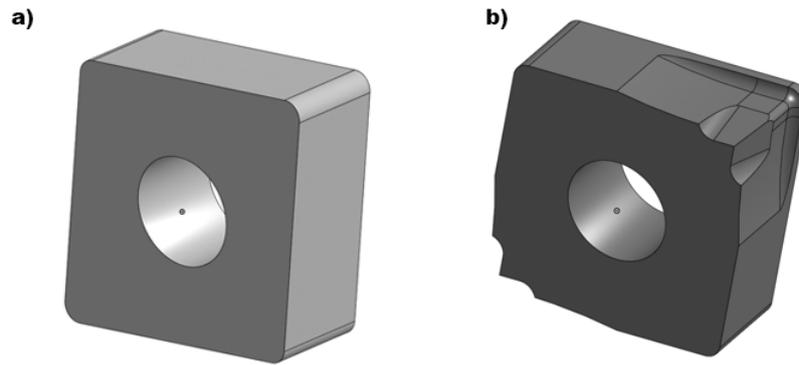


Figura 2-4 - Projeto preliminar do inserto com nova geometria para a superfície de folga: a) Inserto comercial; b) Inserto modificado.  
Fonte: Dados da pesquisa.

O processo de retificação também foi definido, onde um rebolo de  $\text{Ø}50$  mm com raio de aresta de 0,2mm foi utilizado no processo (Figura 2-5).

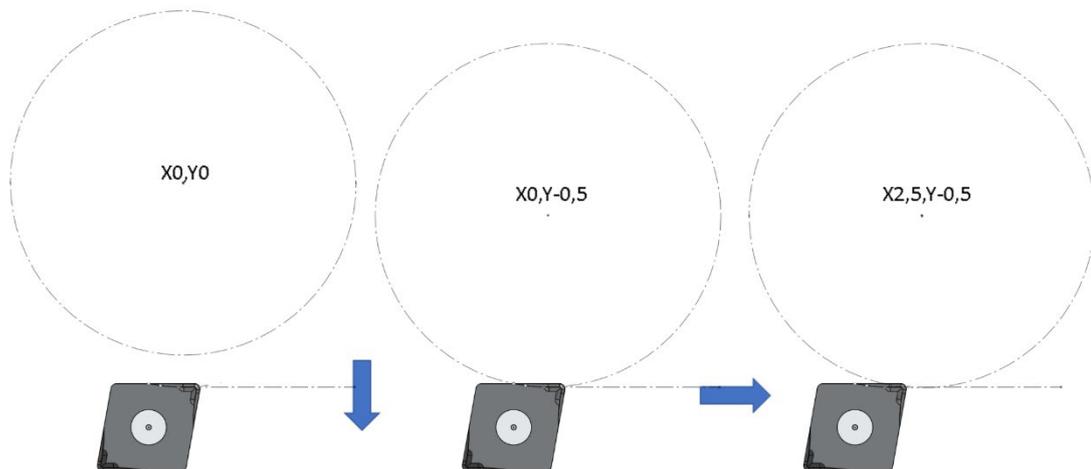


Figura 2-5 - Passos do rebolo na geração da nova superfície de folga.  
Fonte: Dados da pesquisa.

A indentação auxiliar para direcionar o fluido de corte foi avaliada com uma simulação de elementos finitos, utilizando *Solidworks Flow Simulation*.

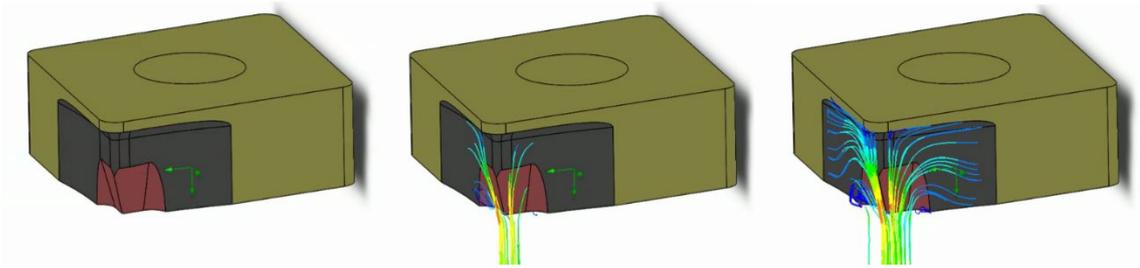


Figura 2-6 – Simulação preliminar do fluxo do fluido de corte durante a usinagem.  
Fonte: Dados da pesquisa.

O grande questionamento do projeto foi sobre a resistência mecânica do inserto, ou seja, se iria resistir as altas tensões durante a usinagem. Foi produzido um protótipo, seguindo este projeto, e a empresa *WM Afiação* (Betim, MG) realizou a retificação. A Figura 28-a exibe o inserto montado na retificação e o resultado final. Este protótipo foi submetido a um teste de usinagem, com os seguintes parâmetros: velocidade de corte ( $v_c$ ) de 350 m/min, profundidade de usinagem ( $a_p$ ) de 1mm e avanço ( $f$ ) de 0,2 mm/rev. O material usinado foi o aço ABNT 1045. O resultado foi que a aresta de corte se fragmenta com poucos segundos de contato (Figura 2-7-b).

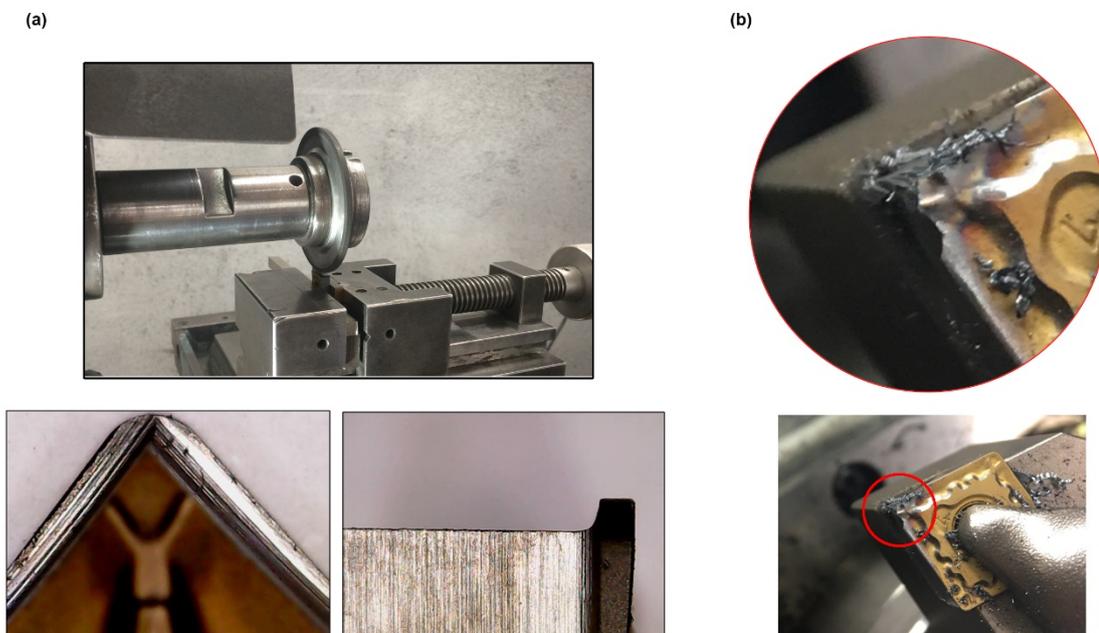


Figura 2-7 - (a) Processo de fabricação do inserto protótipo. (b) Inserto segundos após contato com a peça a ser usinada.

Fonte: Dados da pesquisa.

Após o resultado negativa do primeiro teste, o projeto foi reavaliado de forma a identificar os pontos de falha e, após uma análise detalhada do inserto fraturado, ele serviu como retroalimentação. Identificou-se que o raio de canto do rebolo definido no projeto foi de 0,2mm e o entalhe de 0,5mm, o que aumentou a fragilidade da aresta. Além disso, o entalhe possuía um ângulo de inclinação  $0^\circ$  e um segundo entalhe para direcionar o fluido de corte, o que promovia uma grande retirada de material logo abaixo do raio de ponta. Como correção, o segundo entalhe foi removido e uma inclinação de  $5^\circ$  foi inserida no primeiro, foi realizado também um arredondamento na aresta formada pelos novos planos de folga. A Figura 2-8 exhibe o novo projeto e uma imagem do após sua alteração. Novamente o inserto foi submetido a um pré-teste, nas mesmas condições do anterior, e obteve-se êxito na usinagem.

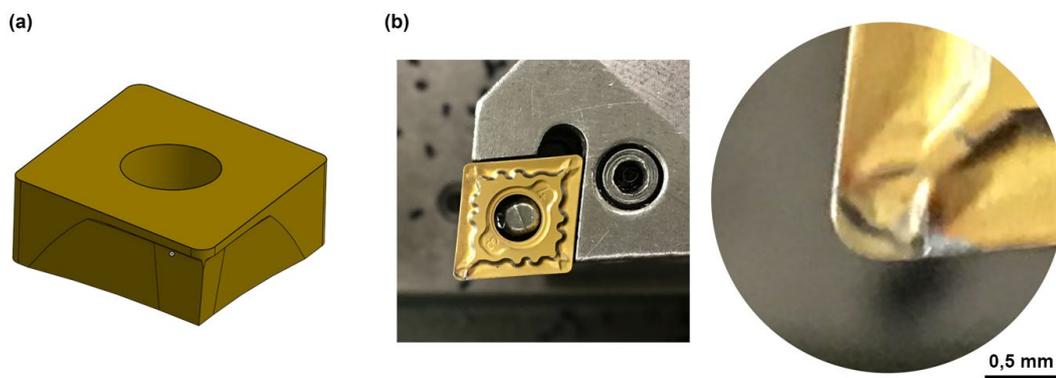


Figura 2-8 - (a) Novo projeto. (b) Inserto com novo projeto logo após teste de quebra.  
Fonte: Dados da pesquisa.

Após a validação do inserto, o projeto suporte foi desenvolvido de modo a permitir o acesso do fluido de corte na região modificada da ferramenta, ser facilmente ajustado; e usar componentes comerciais. O projeto chegou a ser executado, porém, devido a necessidade de se aumentar o número de teste a seco, esta condição descartada.

## 2.4 Medição de dureza dos corpos de prova

Em um experimento, é necessário saber se todos os materiais utilizados estão dentro de uma mesma faixa de características mecânicas e se esta faixa atende as necessidades propostas. Ensaios preliminares foram utilizados para classificar estes materiais. A elaboração de um mapa de dureza foi definido para certificar a homogeneidade do material ABNT 1045 adquirido e se

haveria a necessidade de um tratamento térmico. Corpos de prova de  $\varnothing 82,5 \times 10$  mm foram retirados do material ainda bruto (Figura 2-9-a). Foi utilizado o durômetro do laboratório de usinagem para os ensaios, estes testes seguiram a norma NBR NM-ISSO 6508 (Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell). Como o objetivo foi avaliar a homogeneidade do material, o ensaio seguiu um perfil específico (Figura 2-9-b), onde, afastados do centro por um diâmetro específico, 4 (quatro) pontos foram coletados equidistantes entre si e comparados. Logo em seguida, um novo diâmetro era definido e novos 4 pontos foram coletados. Este processo foi repetido mais 3 vezes. Ao final da coleta, uma análise estatística, no Apêndice A, foi realizada para validar os dados.

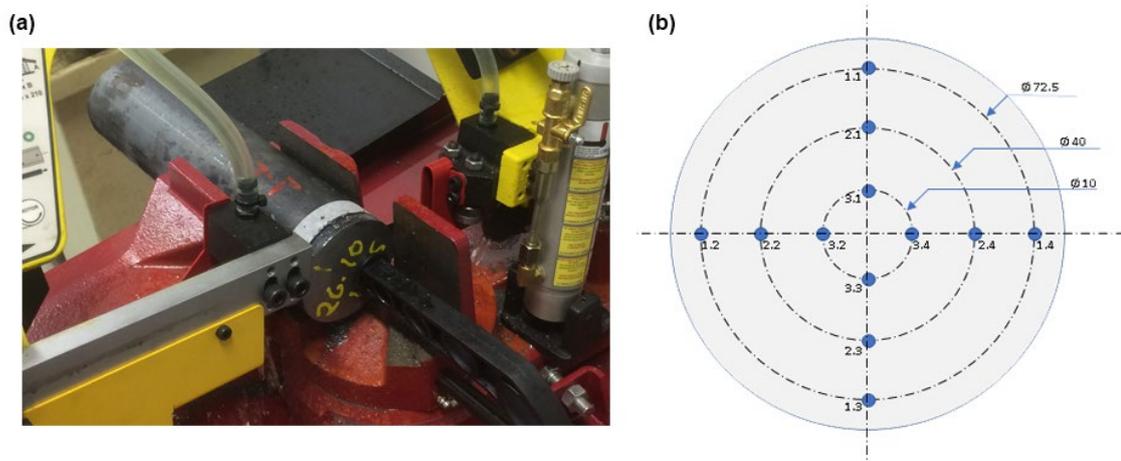


Figura 2-9 - (a) Corte dos corpos de prova para ensaio preliminar de dureza. (b) Mapa de medição de dureza.  
Fonte: Dados da pesquisa.

## 2.5 Torneamento dos corpos de prova

O torneamento dos corpos de prova foi realizado em um torno CNC ROMI, do laboratório de automação e usinagem da UFMG, preparado com o programa CNC (em apêndice J) de forma que a velocidade de corte se mantivesse constante. Inicialmente o planejamento experimental contemplava dois níveis para refrigeração, sendo uma usinagem a seco e outra com fluido de corte direcionado. Após os primeiros ensaios e a coleta das forças, verificou-se que seria necessário aumentar o número de réplicas, de modo a melhorar a acuracidade dos dados e torná-los estatisticamente válidos. Outro fator que influenciou na modificação do planejamento inicial, foi que a ferramenta não quebrava o cavaco se a profundidade de usinagem ( $a_p$ ) fosse menor que 1mm. Sendo assim, o planejamento experimental que foi executado é apresentado a seguir.

Os parâmetros de corte foram fixados em:

- Velocidade de corte ( $v_c$ ): 350 m/min
- Avanço (f): 0,2 mm/rev
- Profundidade de usinagem ( $a_p$ ): 1 mm
- Comprimento usinado: 4181.46 mm
- Tempo de corte: 12 min
- Ensaio: Três vezes por tipo de inserto.

Em uma segunda etapa, a profundidade de usinagem foi alterada para 2,5 mm, de modo a avaliar o efeito sobre a força de corte. O comprimento usinado passou para 487 mm, devido a quantidade de matéria prima disponível. Para que manter a integridade da superfície usinada pela última passada da ferramenta, o corpo de prova foi subdividido, levando-se em consideração o tempo total de contato e o comprimento usinado. A Figura 2-10 exibe a forma de subdivisão dos corpos de prova.

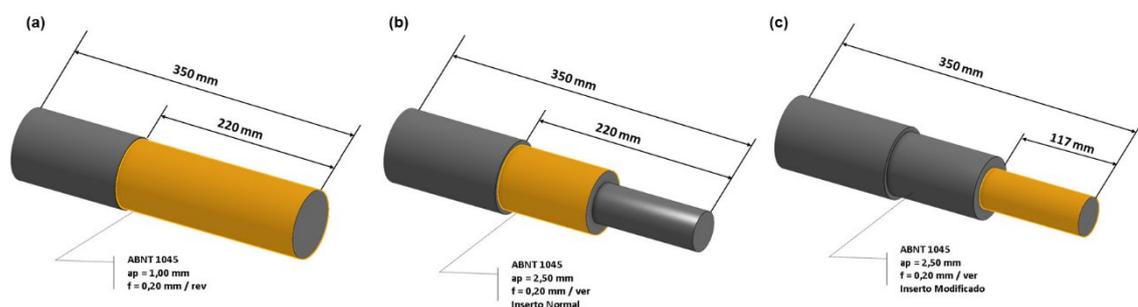


Figura 2-10 - (a) Corpo de prova antes da usinagem (b) Indicação da superfície final do inserto comercial (c) Indicação da superfície final do inserto modificado.

Fonte: Dados da pesquisa.

Finalizando o experimento, foi usinado um corpo de prova com os parâmetros iniciais, porém com o comprimento de contato de 3000 mm. Este valor foi definido por uma retroalimentação dos dados de força, com o objetivo de avaliar a condição de desgaste do inserto neste ponto da usinagem.

## 2.6 Obtenção da força de usinagem

Durante toda a usinagem dos corpos de prova, o dinamômetro da *Kistler* coletou os dados de força. Por meio dos softwares *ManuWare* e *NI LabView SignalExpress 2013* os históricos (*em inglês logs*) com os valores foram salvos em arquivos de texto. Posteriormente, estes valores foram submetidos a uma filtragem, escala, agrupamento, análise estatística e plotagem.

Como a coleta dos dados foi de forma contínua, o dinamômetro registrou todos os valores, mesmo quando a ferramenta fazia movimentos vazios, ou seja, não estava usinando. O filtro de valor mínimo expurgou estes valores falsos.

Devido à alta taxa de aquisição, 240 Hz, foi necessário agrupar os dados seguindo um critério. Desta forma, foi adotado trabalhar com o tempo de 1 segundo, ou seja, cada valor relacionado a 1 segundo corresponde à média de 240 coletas.

Por último, foram realizadas análises estatísticas de normalidade e, posteriormente teste de hipótese da diferença de médias e igualdade entre as variâncias.

## **2.7 Medição da rugosidade**

Para a medição da rugosidade, os corpos de prova usinados foram levados até o laboratório dimensional, onde foram climatizados por 24 horas, a temperatura ambiente. Após a estabilidade térmica, foi realizada a medição dos parâmetros de altura total do perfil ( $R_t$ ), desvio aritmético médio ( $R_a$ ) e altura máxima do perfil ( $R_z$ ), utilizando um comprimento de amostragem de 0,8 mm e comprimento de avaliação de 4 mm. Cada peça foi medida 4 vezes e os valores foram tratados estatisticamente. Cabe salientar que antes do uso do rugosímetro, o mesmo foi verificado utilizando um padrão com valor conhecido.

Finalizando este ensaio, foram realizados os cálculos de estatística descritiva e teste de hipótese da diferença de médias e igualdade entre as variâncias.

## **2.8 Coleta de dados de desgaste da ferramenta de corte**

Um dos objetivos deste trabalho era comparar o desgaste de flanco da ferramenta modificada contra a ferramenta comercial não modificada. Sabendo disso, inicialmente

imagens por microscopia ótica foram feitas a cada 2000 mm de comprimento usinado. Entretanto, após alguns testes, foi avaliado um efeito colateral na retomada da usinagem: a força de corte era consideravelmente mais baixa do que os valores observados antes da interrupção. Após análise, decidiu-se que os inserts seriam avaliados somente quando chegassem a 4000 mm de contato total, salva a exceção do teste com o comprimento de contato de 3000 mm, que foi inserido a fim de validar uma retroalimentação dos dados de força.

Todos os inserts passaram por uma limpeza ácida (ácido nítrico PA a 10% em água purificada). Estes ficaram submersos nesta solução por 3 min, em banho ultrassônico. Somente os inserts que usinaram a profundidade de usinagem (ap) de 2,5mm foram limpos com um tempo 30 segundos, para evitar ataque químico da ferramenta. A Figura 2-11 exibe um inserto antes e depois da limpeza.

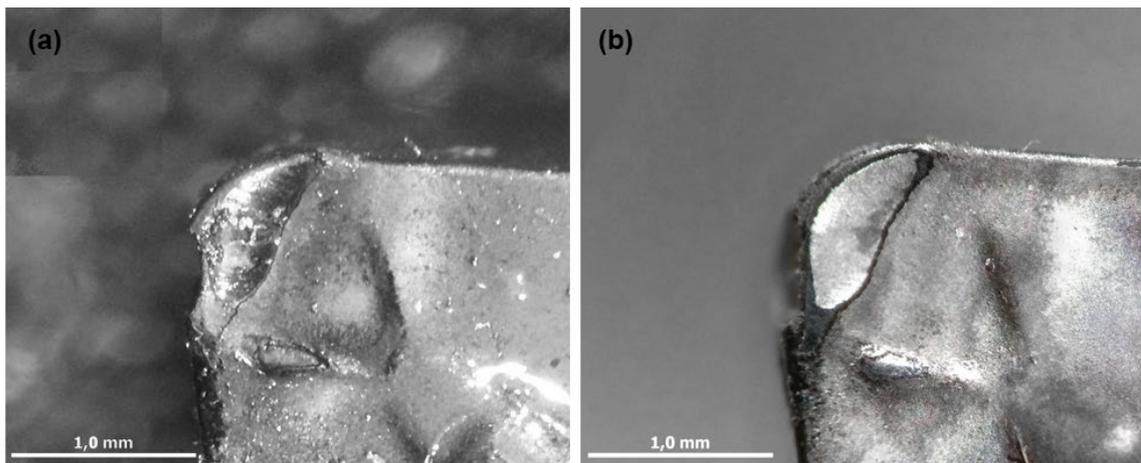


Figura 2-11 - (a) Inserto I7 antes da limpeza ácida. (b) Inserto I7 após limpeza ácida .  
Fonte: Resultado da pesquisa.

Após a limpeza ácida, imagens de topo e laterais dos inserts foram feitas no microscópio estereoscópico do laboratório de usinagem e automação. Estas imagens foram submetidas ao software *Photoshop* para cortes e alinhamento e, em seguida elas foram inseridas no *Autocad 2013*, onde o perfil original do inserto foi reconstruído e os valores desgaste coletados, seguindo a norma NBR ISO 3685:2017.

Imagens de microscopia eletrônica de varredura, disponível no Centro de Microscopia da UFMG, também foram realizadas. Estas são essenciais para avaliação dos mecanismos de desgaste, pois permitem elevadas ampliações, profundidade de campo infinita e alta resolução. Novamente as imagens coletadas foram cortadas e alinhadas utilizando o software *Photoshop*.

Os perfis 3D do desgaste de flanco dos insertos foram adquiridos utilizando a técnica de perfilometria. Para a coleta dos valores, utilizou-se o equipamento *Hommel Etamic T8000* disponível no laboratório de tribologia (Figura 2-12). Devido ao tamanho do perfil a ser medido, uma lupa eletrônica de 500x foi utilizada para auxiliar no posicionamento do apalpador. Os valores de saída foram tratados e avaliados com os softwares *MountainsMap 7*, *Gwyddion* e *Jupyter Notebook*. Este último foi utilizado para cálculos matemáticos de integração e projeção de perfil, para prever os volumes de material perdido.



Figura 2-12 - Apalpador TKU instalado no perfilômetro Hommel Etamic T8000, coletando o perfil do desgaste de flanco de um inserto modificado.

Fonte: Dados da pesquisa.

## 2.9 Medição de microdureza

O perfil de microdureza tem como objetivo avaliar a subcamada da superfície torneada. Sendo assim, os corpos de prova torneados foram seccionados em tarugos de 10mm de espessura. Estes, por sua vez, foram novamente cortados, agora no sentido transversal, reduzindo a amostra ao tamanho de aproximadamente 10 mm x 10 mm (Figura 2-13-a). Antes de levar a amostra para a preparação da superfície, ela foi embutida a frio. Em seguida, a amostra foi lixada na politriz utilizando granulometria de 200, 400, 800 e 1000, posteriormente polida com pasta de diamante de 10 $\mu$ m.

Após a preparação da superfície, a medição da microdureza foi realizada no Laboratório de Tribologia. A norma utilizada como referência foi a ISO 6507-2018 (*Metallic materials - Vickers hardness test*). Segundo esta norma um espaçamento mínimo deveria ser obedecido,

afim de evitar falsos valores provenientes da deformação do material causada pela medição anterior. Sabendo disso, para aumentar a precisão da medição, com o aumentando o número de pontos coletados, a endentação foi feita de forma intercalada, como e visto na Figura 2-13-b.

Os cavacos provenientes do torneamento, foram coletados, separados e, posteriormente, embutidos a frio. Em seguida, a amostra foi lixada na politriz utilizando granulometria de 200, 400, 800 e 1000, posteriormente polida com pasta de diamante de 10 $\mu$ m. Após a preparação da superfície, a medição da microdureza foi realizada seguindo os mesmos critérios que a da amostra de peça torneada, salva a diferença que os valores não seguiram um perfil específico, mas sim uma coleta aleatória de pontos. Por último, foi realizado os cálculos de estatística descritiva e teste de hipótese da diferença de médias e igualdade entre as variâncias.

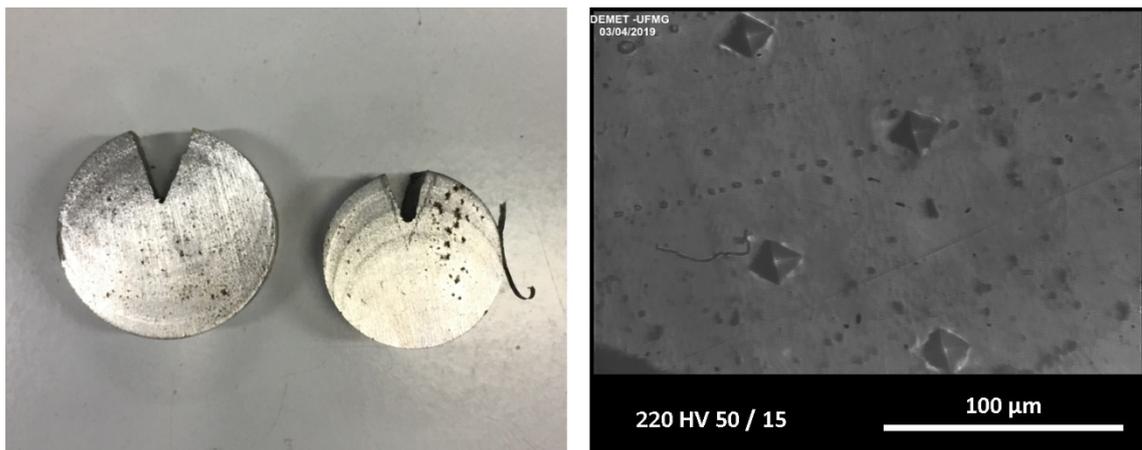


Figura 2-13 - (a) Tarugos com corte transversal após retirada das amostras. (b) Endentação intercalada durante a medição de dureza.

Fonte: Dados da pesquisa.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados do trabalho experimental, iniciando pela dureza do material em bruto, seguindo para o desgaste da ferramenta e seus mecanismos, microdureza e rugosidade. A discussão será finalizada com a análise dos dados de força de usinagem.

Antes de iniciar com os resultados, um breve alinhamento de informações é necessário para facilitar o entendimento do texto a seguir.

A Tabela 3-1 exibe a rastreabilidade dos experimentos, iniciando pela ordem dos ensaios, identificação do material bruto e pré-processado, número do inserto e sua condição. Logo em seguida vem a identificação lógica do inserto e esta será amplamente utilizada em todo o texto. Por fim os parâmetros de usinagem que os ensaios foram realizados.

*Tabela 3-2 - Rastreabilidade da peça, inserto, condição dos insertos e parâmetros de dos testes*

Ensaio	Rastreabilidade da peça	Inserto	Condição do inserto	Abreviatura	Velocidade de corte (Vc) [m/min]	Avanço (f) [mm/rev]	Profundidade de corte (ap) [mm]	Comprimento de Corte [mm]
1	4e	2	Modificado	I2-M	350	0.2	1.0	4000
2	4R	3	Modificado	I3-M	350	0.2	1.0	4000
3	2e	4	Comercial	I4-C	350	0.2	1.0	4000
4	2R	5	Comercial	I5-C	350	0.2	1.0	4000
5	3R	6	Modificado	I6-M	350	0.2	1.0	4000
6	1R	7	Comercial	I7-C	350	0.2	1.0	400
7	3E	9	Modificado	I9-M	350	0.2	1.0	4000
8	5R	10	Comercial	I10-C	350	0.2	1.0	4000
9	1E	8	Comercial	I8-C	350	0.2	2.5	487
10	1E	8	Modificado	I8-M	350	0.2	2.5	487
11	5E	2	Comercial	I2-C	350	0.2	1.0	3200

Os termos indicação, erro e resultado de medição são empregados na compilação dos valores obtidos nos ensaios e eles seguem a definição do Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM 2012):

- Indicação: Valor fornecido por um instrumento de medição ou por um sistema de medição.
- Erros:

- Erro aleatório - Componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível.
- Erro sistemático - Componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível.
- Erro de medição - Diferença entre o valor medido duma grandeza e um valor de referência. Não se deve confundir erro de medição com erro de produção ou erro humano.
- Resultado de medição: Conjunto de valores atribuídos a um mensurando, juntamente com toda outra informação pertinente disponível.

Além das terminologias de metrologia, é necessário apresentar os termos referentes a estatística utilizada neste estudo. Um teste de hipótese é um procedimento para se determinar se a evidência que uma amostra fornece é suficiente para concluirmos se o parâmetro populacional está num intervalo específico (MONTGOMERY, 2010). Teste de Hipótese para comparação de duas médias é uma metodologia para comparação das médias de duas populações independentes, baseada em assumir uma hipótese verdade e uma hipótese nula. Como saída do teste de hipótese um valor denominado *P-valor* é calculado. Ele é uma medida de quanta evidência se tem contra a hipótese nula. Quanto menor o *P-valor*, maior evidência se tem. Isso quer dizer que quanto menor o *P-valor* mais fortemente pode-se rejeitar a hipótese nula.

Em seguida serão apresentadas:

- Microdureza segundo a norma ISO 6507-2018:  
200HV0.05/30 – Valor da indicação de 200HV medido com a carga de 50kgf e um tempo de aplicação de 30 segundos.

### 3.1 Dureza do material em bruto

O Gráfico 3-1, exibe os resultados de medição para a dureza HRB realizada, na seção transversal, dos corpos de prova ainda brutos. Os valores associados à barra de erro correspondem à incerteza do equipamento, ou seja, erro de medição. O fabricante define que este erro é de  $\pm 1,5$  HRB na faixa de valores medidos.

Avaliando separadamente os valores de cada amostra, percebe-se que a variação entre os valores obtidos no interior ( $\text{Ø}10$  mm) material e próximo à sua borda ( $\text{Ø}72,5$  mm) está na faixa de 3HRB. Sabe-se que o erro de medição do equipamento contempla esta faixa, e que o aço é heterogêneo. Pode-se então considerar que, individualmente, os materiais possuem a mesma dureza.

Considerando que cada corpo de prova possui uma dureza média única, formada por todos os valores coletados neste corpo de prova, um teste de hipótese de diferença de média foi realizado entre as amostras 3-E e 4-R. Estas foram escolhidas por possuírem a maior amplitude entre as médias. O resultado do teste estatístico foi um P-valor de 0,083, em um nível de confiança de 95%. Isso significa que não há evidências suficientes para não assumir que as médias são iguais. Sendo assim, os experimentos foram continuados considerando que os materiais possuíam durezas HRB dentro de uma mesma faixa e suas variações não eram relevantes ao processo.

Os valores das medições e resultado do teste de hipótese estão em apêndice.

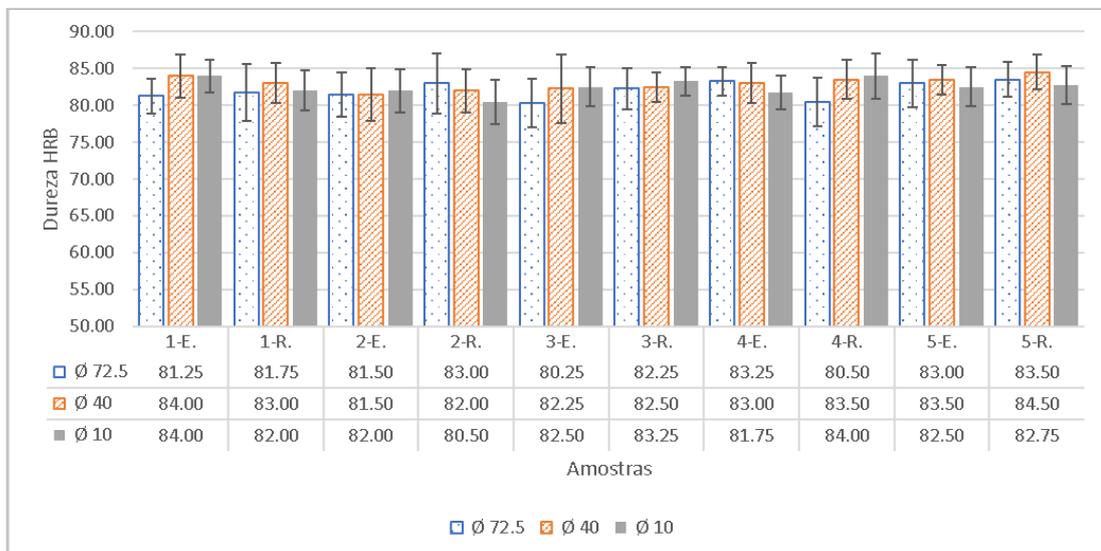


Gráfico 3-1 - Valores da medição de dureza HRB do material em bruto.

Fonte: Resultado da pesquisa.

### 3.2 Desgaste da ferramenta de corte

A Figura 3-1 exibe a representação dos planos de referência da ferramenta modificada. Nela permite-se visualizar, por exemplo, os ângulos de inclinação e posição da ferramenta

durante o corte. O ponto de referência escolhido está localizado na distância de 1mm na aresta principal de corte.

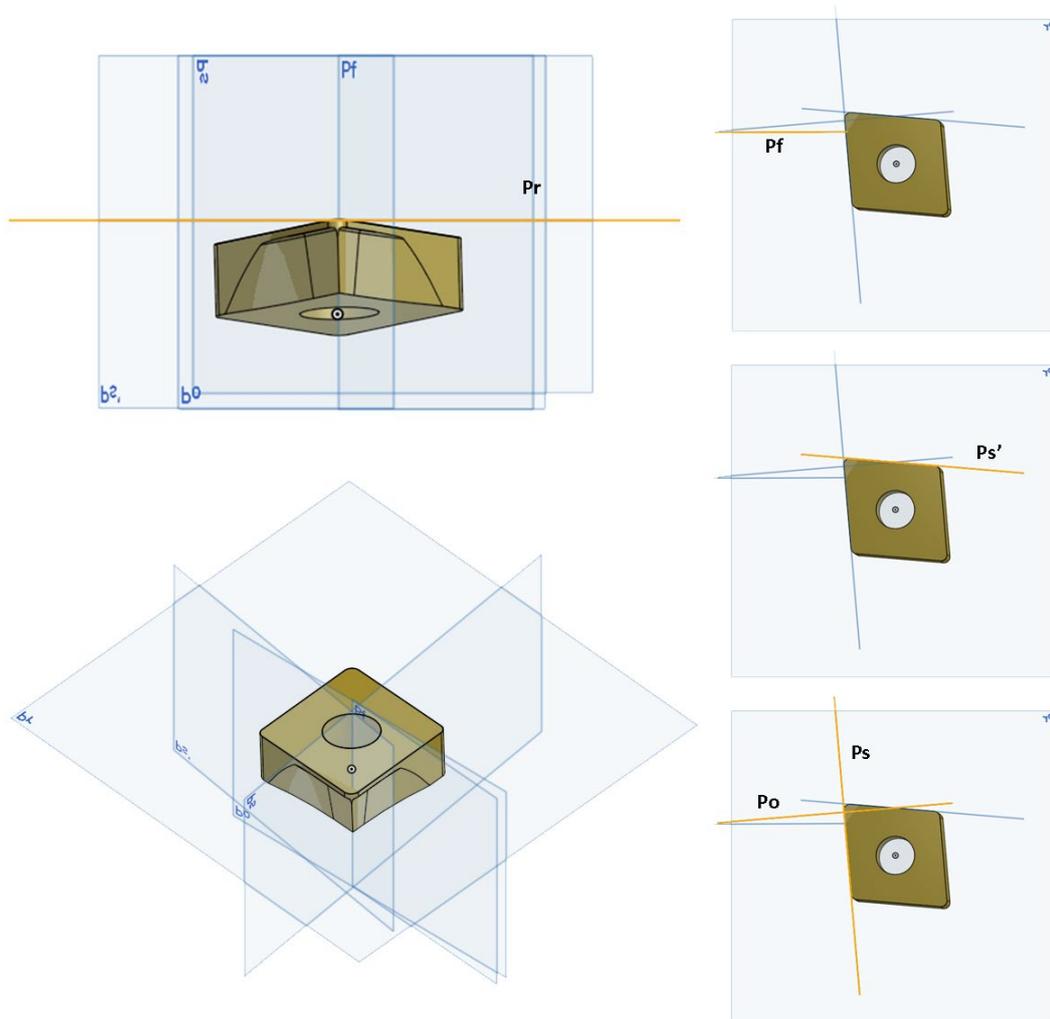


Figura 3-1 – Planos de referência da ferramenta modificada.  
Fonte: Dados da pesquisa.

A Figura 3-2 exibe imagem de microscopia ótica dos insertos modificados logo após a limpeza química em banho ácido e um comprimento de contato de 4000 mm. Uma máscara foi inserida na figura para facilitar a visualização do perfil original dos insertos. Além disso, as dimensões do raio de ponta, profundidade de usinagem e altura do perfil geométrico modificado também foram inseridos. O desgaste de cratera, flanco e um desgaste abrasivo/adesivo com alta taxa de remoção localizado na região final do desgaste de flanco, foram identificados em todos os insertos. A perda da integridade do raio de ponta foi identificada nos insertos I3-M (Figura 3-2-b) e I6-M (Figura 3-2-d). O desgaste de abrasivo/adesivo se localizou a 1 mm da aresta de corte, na interseção do plano  $P_s$  e  $P_o$ .

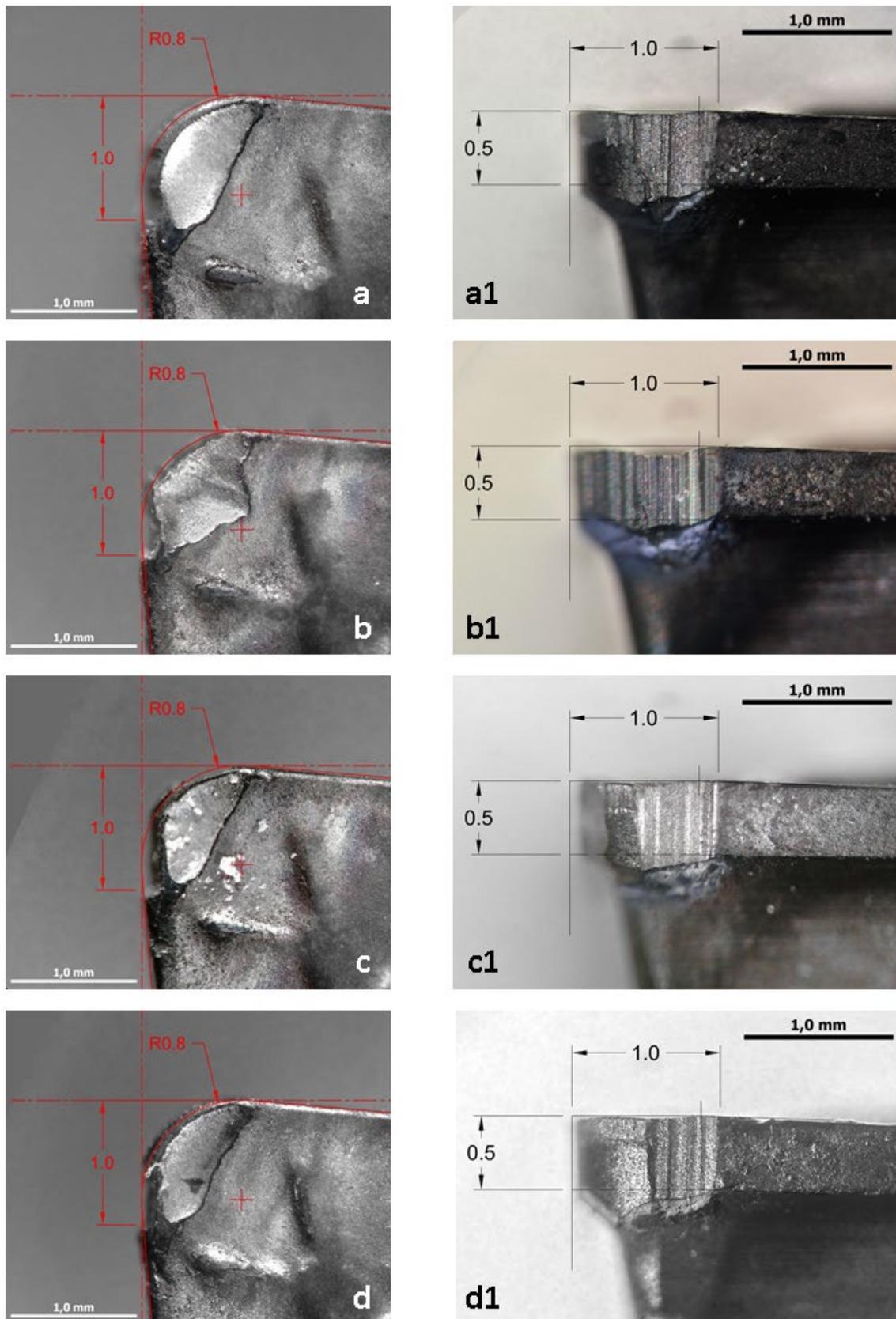
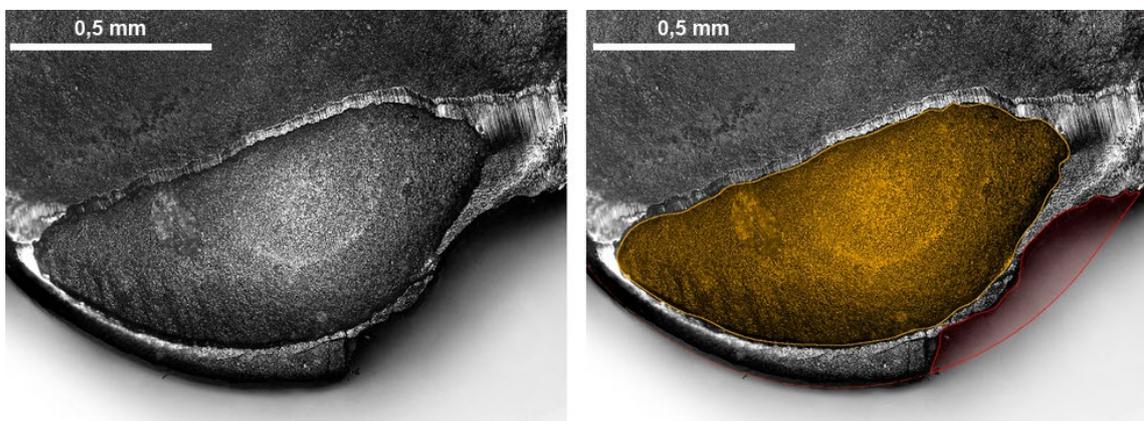


Figura 3-2 – Inserts modificados após 4000mm de comprimento usinado e limpos com banho químico códigos: (a) I2-M, (b) I3-M (c) I6-M e (d) I9-M.

*Fonte: dados da pesquisa.*

O desgaste de cratera se apresentou constante quanto à forma, posição e acabamento superficial em todos os insertos. Uma leve diferença de perfil pode ser observada no inserto I3-M (Figura 3-2-b), e tal alteração está relacionada com a perda do raio de ponta, pois o material da peça usinada aderiu no local do material perdido pela ferramenta. Este material formou um tipo de cunha, modificando o fluxo do cavaco sobre a superfície de saída. A Figura 3-3 foi obtida por microscopia ótica, utilizando uma técnica de mesclar imagens de diferentes focos, aumentando assim sua profundidade de campo. Por meio desta imagem, foi possível identificar os mecanismos de desgaste que causaram a cratera. No fundo da cratera percebe-se uma superfície lisa e uniforme, característico de desgaste por difusão, diferentemente da borda mais afastada do raio de ponta, onde ranhuras caracterizam o desgaste por abrasão. Além disso, foi possível verificar que a maior profundidade da cratera se encontra na região de maior temperatura presente na interface ferramenta-cavaco, ou seja, um pouco afastada da aresta de corte.

O desgaste abrasivo presente na borda da cratera foi provocado pelo atrito do cavaco com a ferramenta. Este atrito ocorreu na região conhecida por zona de escorregamento. As tensões normais que atuam sobre o cavaco foram reduzidas à medida que se afastavam da aresta de corte e esta redução promoveu a modificação do regime de atrito. As tensões continuaram a ser reduzidas até que não houvesse mais contato entre o cavaco e a ferramenta. Como resultado, obteve-se uma faixa desgastada caracterizada pelos os mecanismos de desgaste de adesão e abrasão.



*Figura 3-3 - Detalhe do desgaste de cratera e integridade da aresta de corte do Inserto I2-M.  
Fonte: Dados da Pesquisa.*

A Figura 3-5 exibe imagem de microscopia ótica dos insertos comerciais logo após a limpeza química em solução ácida e um comprimento de contato de 4000 mm. A mesma máscara utilizada na Figura 3-2 (insertos modificados) foi inserida na figura para facilitar a visualização e comparação. O desgaste de cratera, flanco e um desgaste abrasivo/adesivo com alta taxa de remoção localizado na região final do desgaste de flanco, foram identificados novamente em todos os insertos. A perda da integridade do raio de ponta foi identificada nos insertos I4-N (Figura 3-5-a) e I10-N (Figura 3-5 -d). O desgaste de abrasivo/adesivo novamente se localizou a 1 mm da aresta de corte, na interseção do plano Ps e Po. O desgaste de abrasivo/adesivo da ferramenta comercial se propagou além do valor de 0,5 mm.

A presença de insertos com a perda da integridade do raio de ponta demonstrou que a causa desta falha não estaria relacionada com o aumento da fragilidade do inserto modificado. Indícios apontam que esta perda foi causada por trincas do revestimento, que, após se propagarem, desprendiam parte do revestimento e do substrato. Estas partículas eram comprimidas entre a ferramenta e a peça, causando o desgaste acelerado do raio de ponta (Figura 3-4).

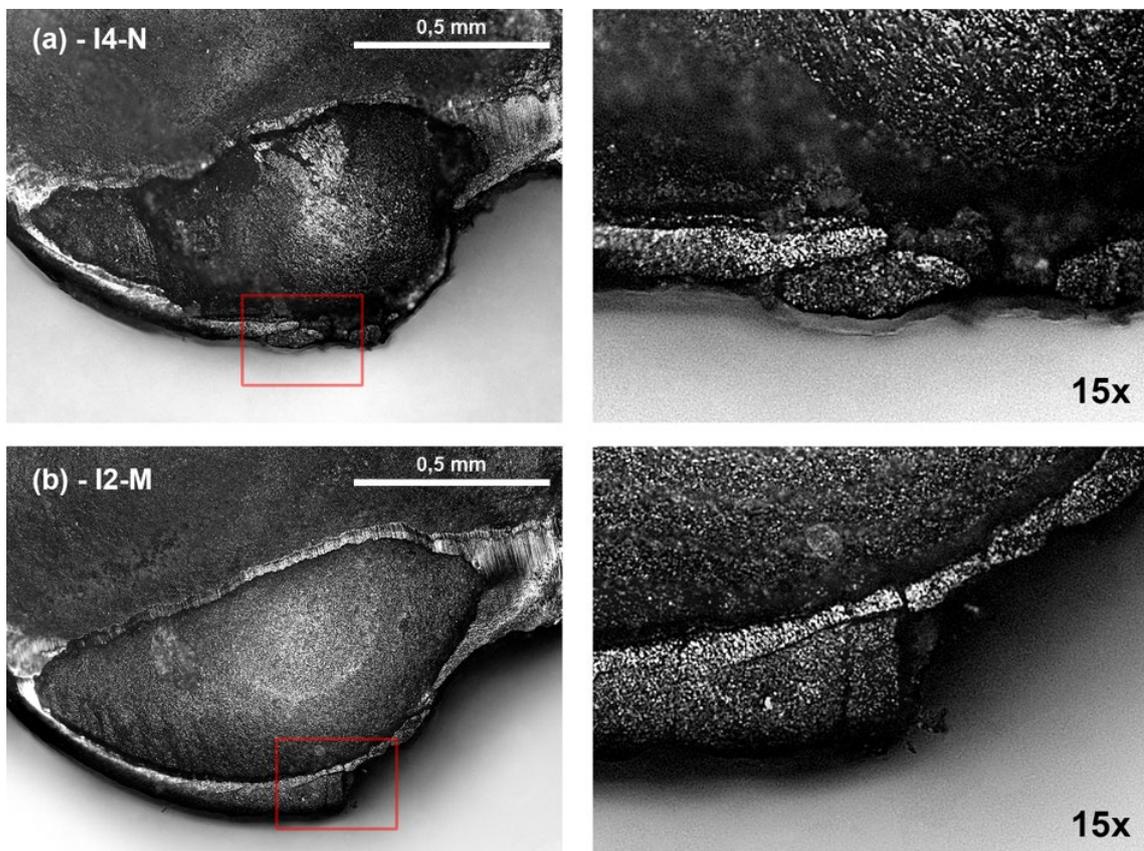
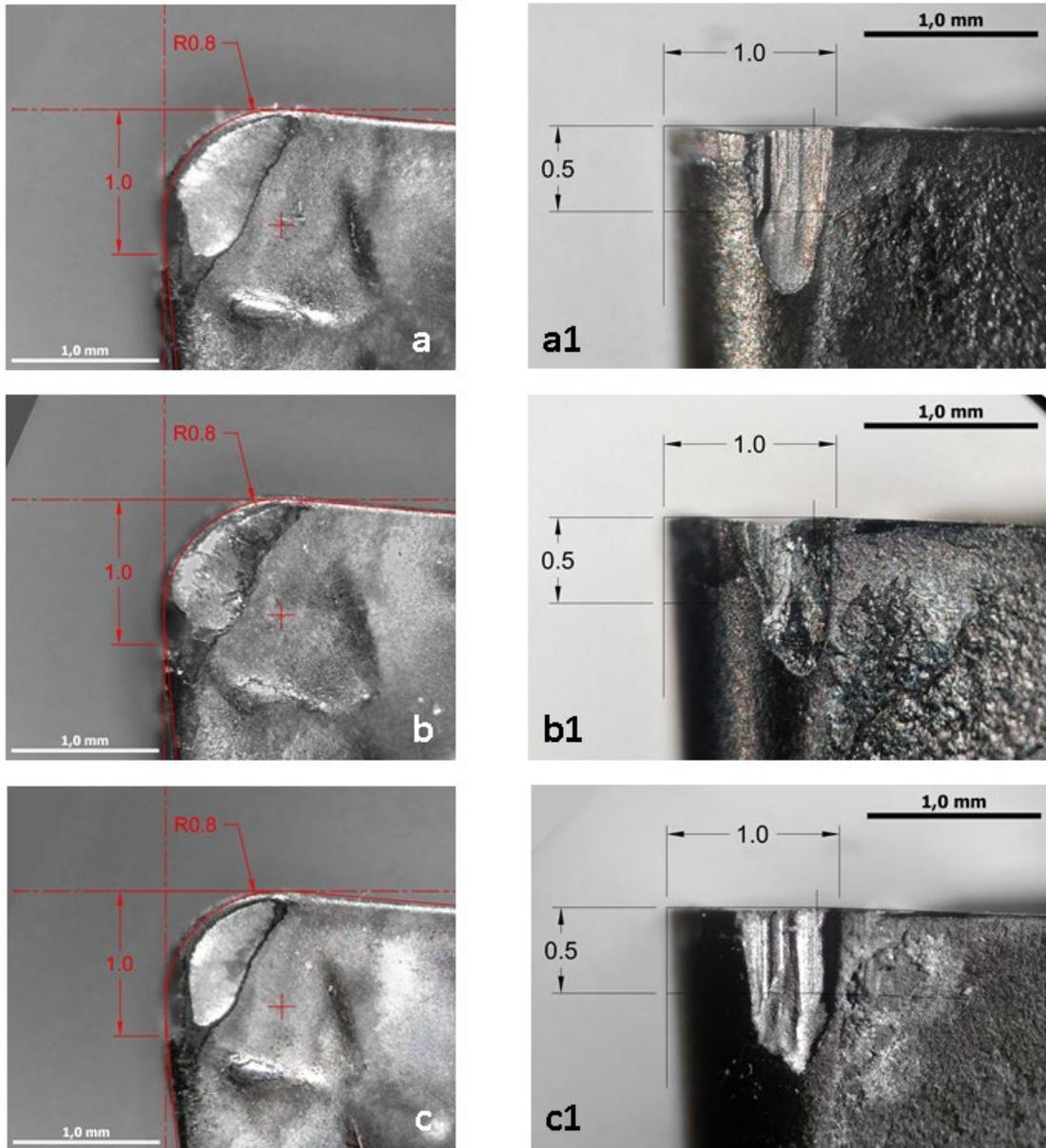


Figura 3-4 - (a) Inseto comercial I4-N apresentando trinca o revestimento. (b) Inseto modificado I2-M apresentando trinca o revestimento.  
Fonte: Dados da pesquisa



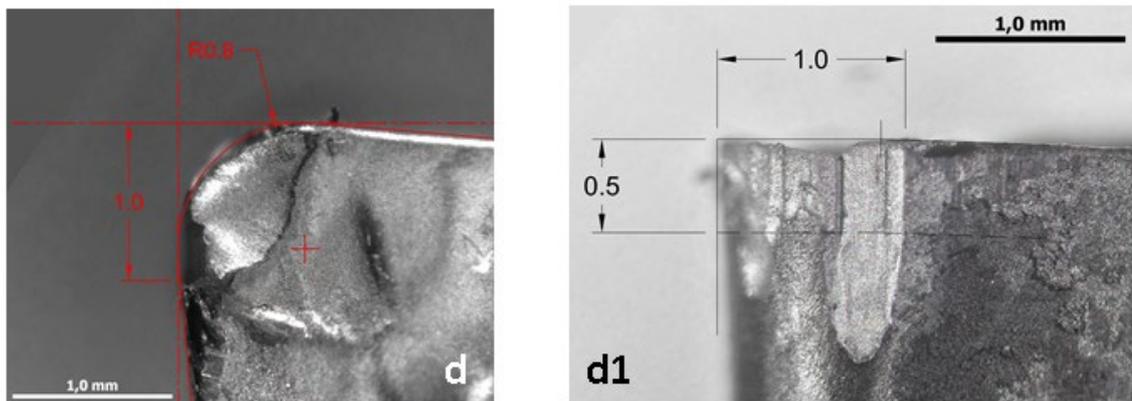


Figura 3-5– Insertos comerciais após 4000mm de comprimento usinado e limpos com banho químico códigos: (a) I4-N, (b) I5-N (c) I7-N e (d) I10-N.  
Fonte: dados da pesquisa.

Novamente o desgaste de cratera apresentou-se constante quanto à forma, posição e acabamento superficial em todos os inserts comerciais, e uma leve diferença de perfil pode ser observada no inserto I5-N (Figura 3-5-b). Tal alteração está relacionada com a perda do raio de ponta. A Figura 3-6 também foi obtida utilizando microscopia ótica com a mesma técnica da Figura 3-3. No fundo da cratera, percebe-se uma superfície lisa e uniforme, causada por difusão, e ranhuras na extremidade da cratera causadas por abrasão.

Os mecanismos que causaram o desgaste de cratera presentes no inserto comercial foram os mesmos encontrados no inserto modificado, atuando no mesmo nível nos dois modelos de ferramenta. As dimensões das áreas das crateras foram calculadas e a diferença encontrada foi estatisticamente nula. Os valores de microdureza do cavaco, que serão apresentados mais a frente, também indicam que a influência do desgaste de cratera sobre a deformação plástica do cavaco se apresentaram no mesmo nível.

Os inserts comerciais também apresentaram ao longo da borda superior da cratera o desgaste abrasivo característico do atrito do cavaco na região de escorregamento.

Como indicado na Figura 3-4-a, a perda da integridade da aresta de corte também foi provocada por trincas do revestimento assim como no inserto modificado.

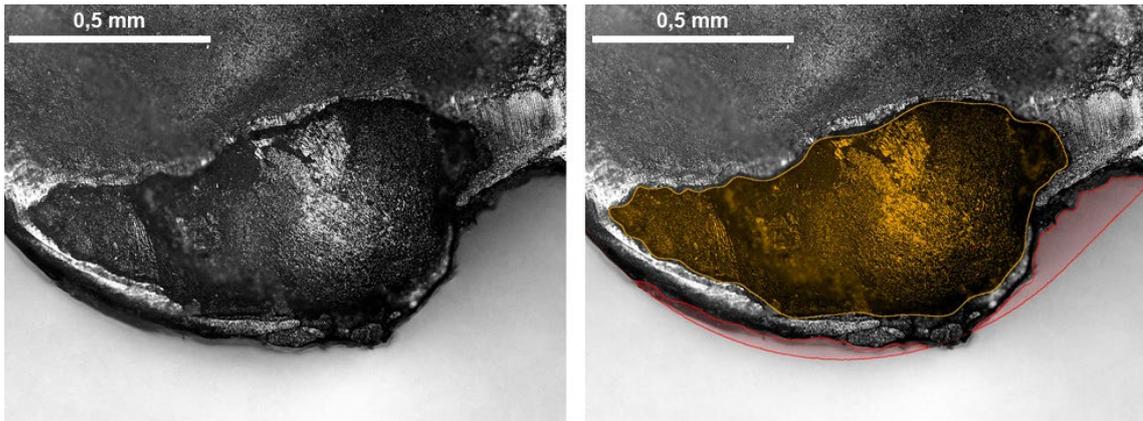


Figura 3-6 -Detalhe do desgaste de cratera e integridade da aresta de corte do Inserto I4-N.  
Fonte: Dados da Pesquisa.

A Figura 3-7 foi obtida por microscopia eletrônica de varredura e exibe o desgaste de flanco e abrasivo/adetivo para os inserts comerciais e comercial, na ampliação de 50x e 70x respectivamente. Os valores médios do desgaste de flanco foram coletados utilizando o software *Autocad* e os resultados de medição e seus erros associados foram representados nos Gráfico 3-2 e Gráfico 3-3. O Gráfico 3-2 exibe os valores médios e o Gráfico 3-3 o valor máximo, ambos conforme a norma NBR ISO 3685:2017.

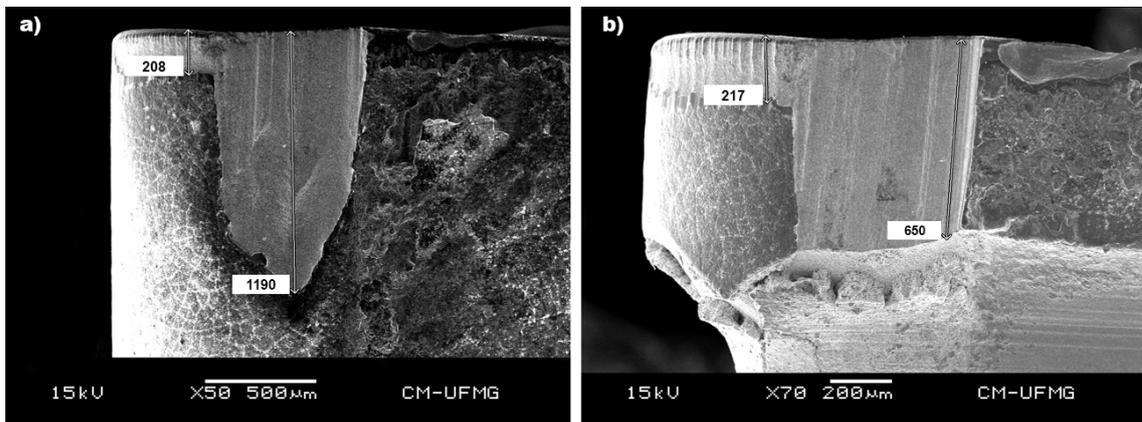


Figura 3-7 – Imagem gerada com microscopia eletrônica de varredura. (a) inserto comercial após 4000 mm de contato e com indicação de medida para desgaste de flanco e abrasivo/adetivo. (b) inserto modificado após 4000 mm de contato e com indicação de medida para desgaste de flanco e abrasivo/adetivo.

Os valores médios para o desgaste de flanco do inserto modificado ficou levemente acima dos valores médios do inserto comercial. O teste de hipótese apresentou um *P-valor* igual a 0,012. Este valor permitiu assumir que existe uma diferença significativa entre as médias. A

mesma ligeira diferença foi percebida no desgaste de flanco máximo. Os valores coletados e os cálculos estatísticos se encontram em Apêndice E.

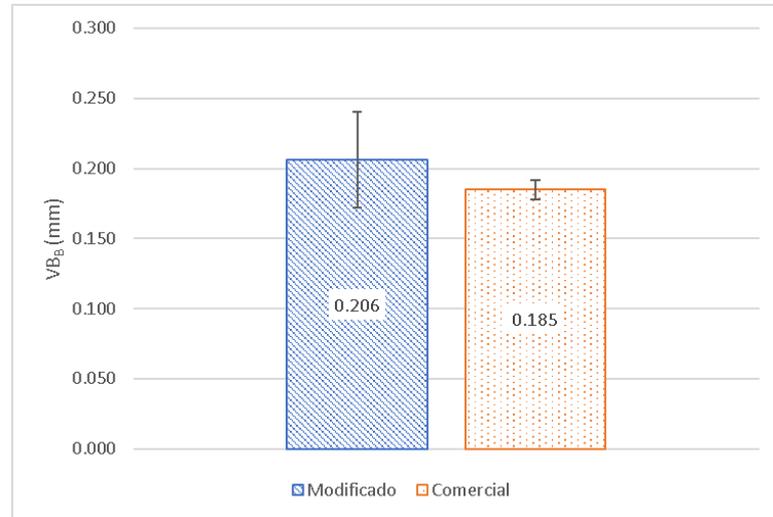


Gráfico 3-2 – Valor médio do desgaste de flanco conforme a norma NBR ISO 3685:2017.  
Fonte: Dados da pesquisa

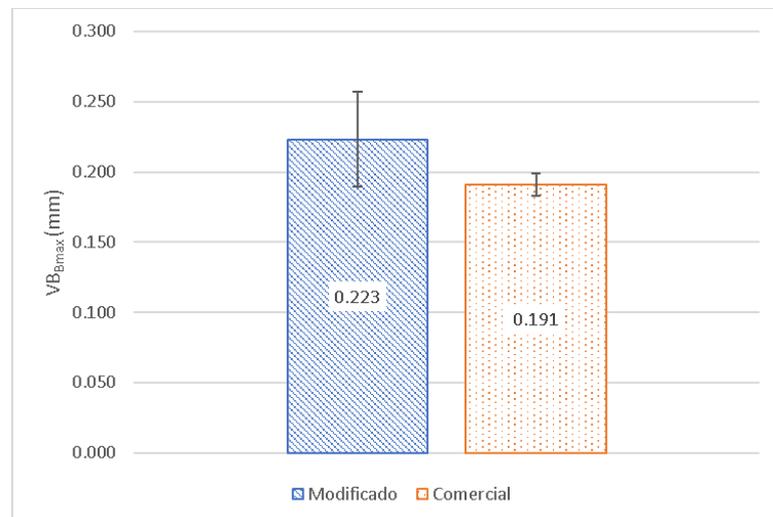


Gráfico 3-3- Valor máximo atribuído ao desgaste de flanco conforme a norma NBR ISO 3685:2017.  
Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 3-8 foi obtida por microscopia eletrônica de varredura e exibe a visão projetada do plano Ps' dos insertos comerciais e modificados. Um padrão de ranhuras se formou nos dois tipos de insertos, ranhuras características do desgaste abrasivo. Foi possível também perceber a presença de uma marca ao final do desgaste, do lado esquerdo. A marca corresponde ao fim

do contato da ferramenta com a peça e, ao contrário das imagens projetadas pelo plano  $P_s$ , estas não apresentaram a formação do desgaste tipo abrasivo/adesivo.

O substrato foi totalmente exposto na região de contato da ferramenta com a peça, o que significou a redução das características tribológicas ao final da vida da ferramenta.

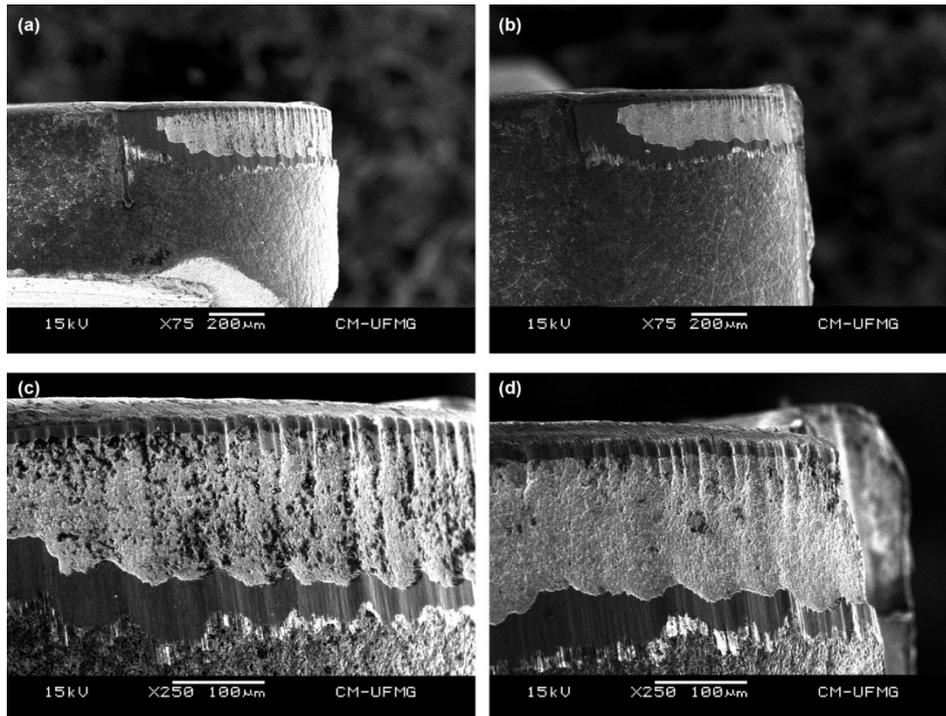


Figura 3-8 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da aresta de corte. Vista da projeção do plano  $P_s$ : a) Inseto modificado, b) Inseto comercial, c) Inseto modificado, d) Inseto comercial.  
Fonte: Dados da pesquisa.

A Figura 3-9 também foi obtida por microscopia eletrônica de varredura e exibe a visão projetada do plano  $P_s$ . O padrão de ranhuras relacionados ao desgaste abrasivo foram observados novamente. Eles se estenderam pela aresta de corte até encontrar o desgaste tipo abrasivo/adesivo. Para Fox-Rabinovich (2006) e Klocke (2011), o desgaste abrasivo é causado por partículas duras de carbonetos, nitretos ou óxidos que se desprenderam da própria ferramenta, onde estas partículas promovem microcortes, formando um padrão de ranhuras. A presença do substrato em toda a extensão do desgaste de flanco, mais os padrões de ranhura e o revestimento exposto nas extremidades, indicam um forte desgaste abrasivo. Este tipo de desgaste já era esperado. Além da pequena diferença do  $VB_b$  e o  $VB_{max}$ , o desgaste da ferramenta modificada e a comercial foram muito similares.

A diferença dimensional entre os desgastes dos dois tipos de ferramentas analisadas ficou em 0,021 mm para o  $VB_b$  e 0,031 mm para o  $VB_{max}$ . Quando convertido para porcentagem, a diferença correspondeu a um aumento de 11% e 16%, respectivamente.

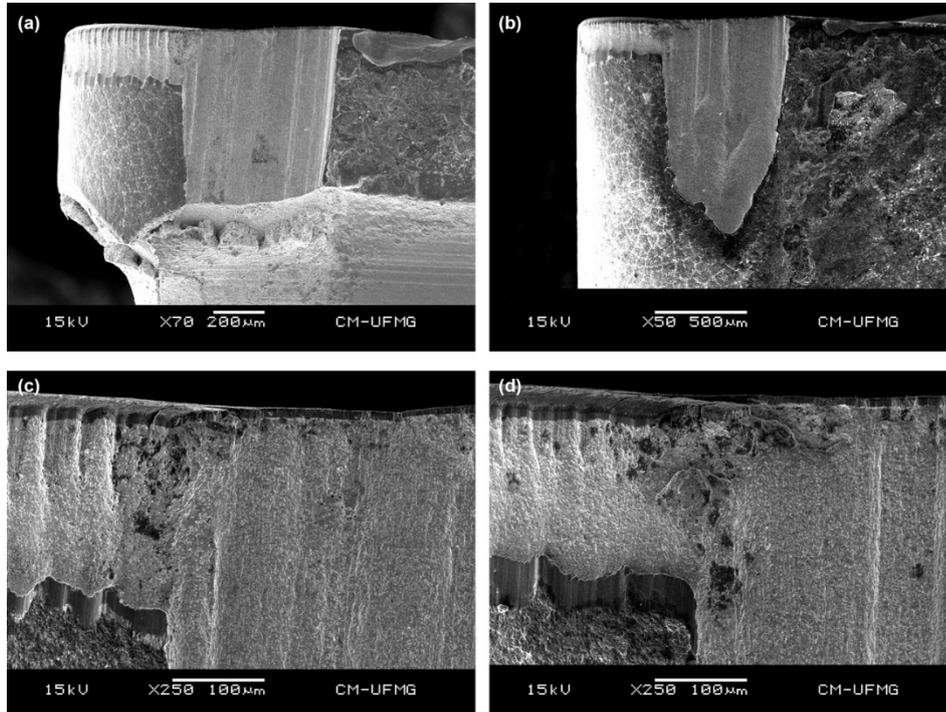


Figura 3-9 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da aresta de corte. Vista da projeção do plano  $P_s$ . a) Inseto modificado, a) Inseto comercial, c) Inseto modificado, d) Inseto comercial.

Fonte: Dados da pesquisa.

A presença do desgaste tipo abrasivo/adesivo nos dois modelos de inserto indicou que a causa deste desgaste atípico estava presente durante a usinagem, e não era uma particularidade causada pela modificação da face de folga. Os valores médios e seus respectivos erros foram representados no Gráfico 3-4. O desgaste de abrasivo/adesivo se propagou por toda superfície de folga alterada do inserto modificado, ficando limitada a distância desta. No inserto comercial, ela chegou a um comprimento de 1,1 mm.

A borda do desgaste de abrasivo/adesivo não apresentou ranhuras similares as encontradas no desgaste de flanco, o que indica um mecanismo principal de desgaste diferente.

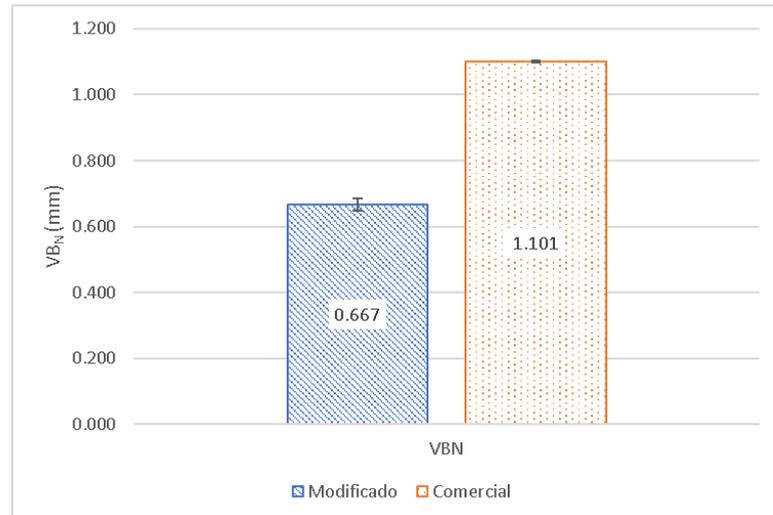
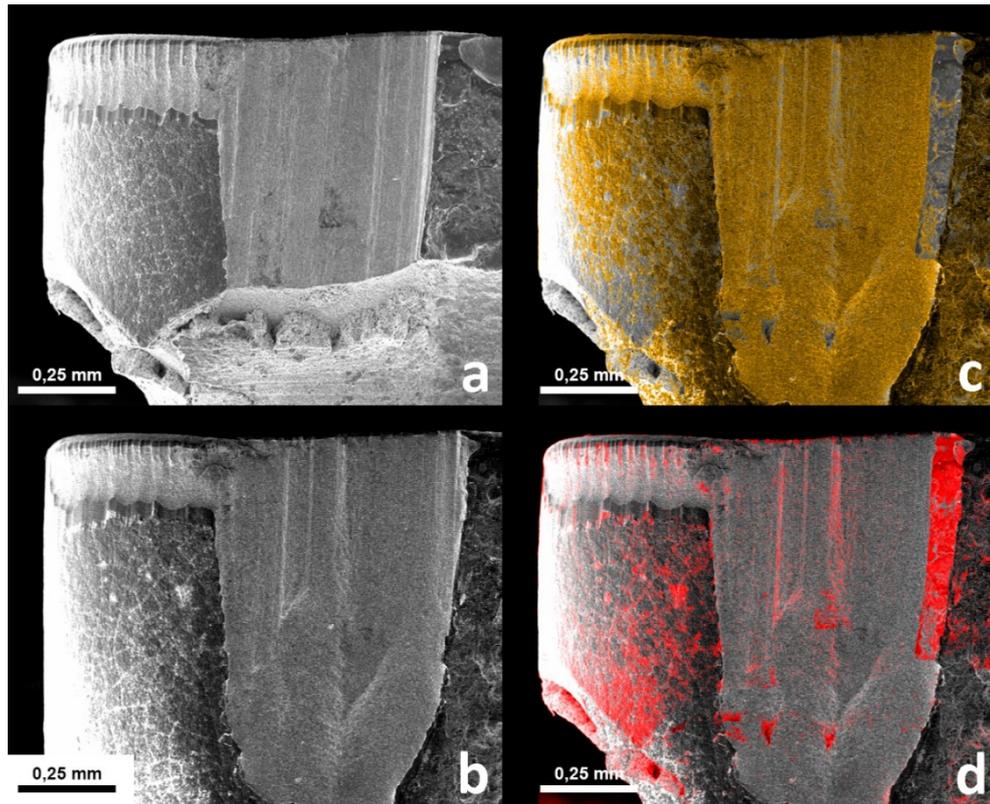


Gráfico 3-4 – Valores médios para o desgaste de abrasivo/adesivo.  
Fonte: Dados da pesquisa.

Como as imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura possui uma profundidade de campo infinita e a técnica de sobrepor imagens foi utilizada para identificar diferença de altura entre os tipos de inserto. A Figura 3-10 exibe o resultado da sobreposição. A imagem Figura 3-10-c corresponde a sobreposição de “b” sobre “a”, ou seja, o inserto comercial sobre o modificado. A região demarcada em amarelo representa os locais onde o inserto comercial está mais elevado em relação ao inserto modificado. Desta forma, pode-se identificar que a profundidade do abrasivo/adesivo do inserto comercial foi menor que o do inserto modificado. Entretanto esta técnica não permite mensurar o valor da diferença, é somente indicativa.

A imagem Figura 3-10-d foi formada pela sobreposição de “a” sobre “b”. Nesta nova imagem gerada, a demarcação em vermelho indica as regiões mais elevadas do inserto modificado em comparação ao normal. Foi possível identificar que a largura total do abrasivo/adesivo presente no inserto comercial era maior do que no inserto modificado, e que o desgaste de abrasivo/adesivo do inserto comercial ultrapassou a marca do plano  $P_0$ .

Com a diferença visual de área de contato presente entre os dois modelos de ferramenta, uma perfilometria do desgaste de abrasivo/adesivo foi realizada, de modo a verificar a taxa de desgaste e o volume perdido.



*Figura 3-10 – Sobreposição de imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura.  
Fonte: Dados da pesquisa.*

O resultado da perfilometria dos insertos comerciais foram agrupados e apresentado na Figura 3-11. De forma a permitir um comparativo da proporção do desgaste, a perfilometria do inserto sem desgaste foi inserida. As geometrias dos desgastes foram semelhantes, apresentando um formato de cunha, onde a maior profundidade se encontra próxima a aresta de corte. Tal característica foi devido ao ângulo de folga da ferramenta. Um perfil 2D foi removido do perfil 3D gerado, a extração foi realizada a 0,25mm de distância da aresta de corte e seus valores foram representados no Gráfico 3-5.

Observa-se que a largura do abrasivo/adesivo em 0,25 mm de distância da aresta de corte ficou entre 0,5 e 0,6 mm e sua profundidade máxima entre 0,20 e 0,25 mm. A propagação do abrasivo/adesivo na direção do raio de ponta pode ter promovido aumento das forças de corte.

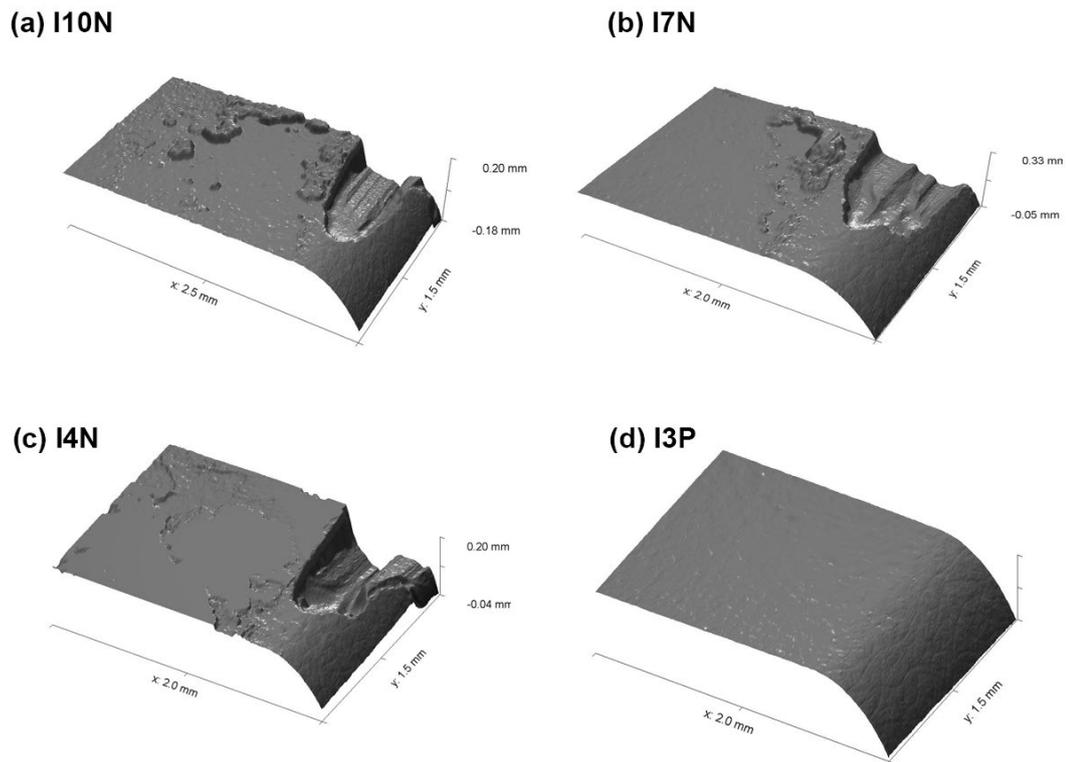


Figura 3-11 – Perfilometria dos insertos comerciais códigos I10-N, I7-N e I4N e um inserto comercial novo código I3-P.  
Fonte: Dados da pesquisa.

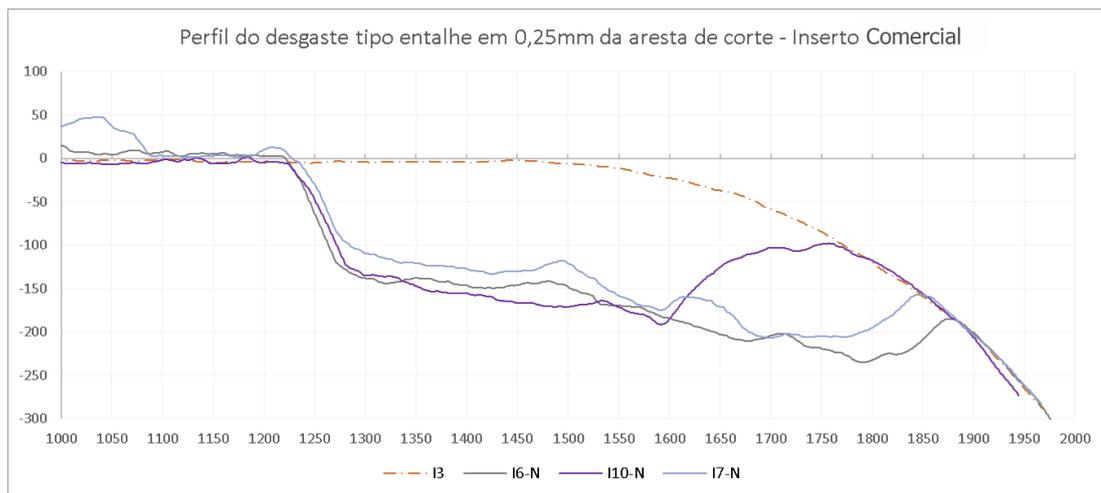


Gráfico 3-5 - Perfil do desgaste tipo abrasivo/adesivo em 0,25mm da aresta de corte - Inserto comercial.  
Fonte: Dados da pesquisa

O resultado da perfilometria dos insertos modificados foram agrupados e apresentado na Figura 3-12. Novamente uma perfilometria do inserto sem desgaste foi inserida. As geometrias

dos desgastes foram semelhantes, apresentando um formato de cunha, onde a maior profundidade se encontra próxima a aresta de corte. Tal característica foi devido ao ângulo de folga da ferramenta. Um perfil 2D foi removido do perfil 3D gerado, a extração foi realizada a 0,25mm de distância da aresta de corte e seus valores foram representados no Gráfico 3-6.

Observa-se que a largura do abrasivo/adesivo em 0,25 mm de distância da aresta de corte ficou entre 0,5 e 0,7 mm e sua profundidade máxima entre 0,20 e 0,25 mm. As dimensões de largura e profundidade para o inserto comercial e modificado foram semelhantes na seção analisada, indicando novamente um mecanismo similar de desgaste.

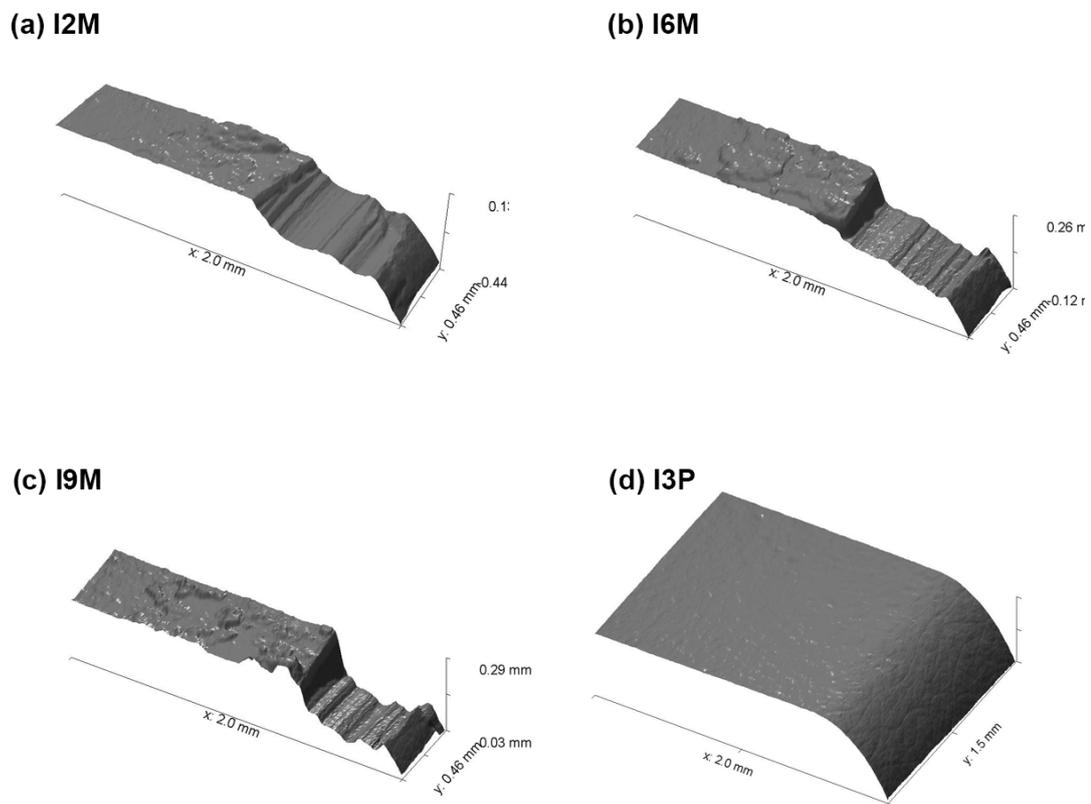


Figura 3-12 - Perfilometria dos insertos modificados códigos I2-M, I6-M e I9-M e um inserto comercial novo código I3-P.

Fonte: Dados da pesquisa.

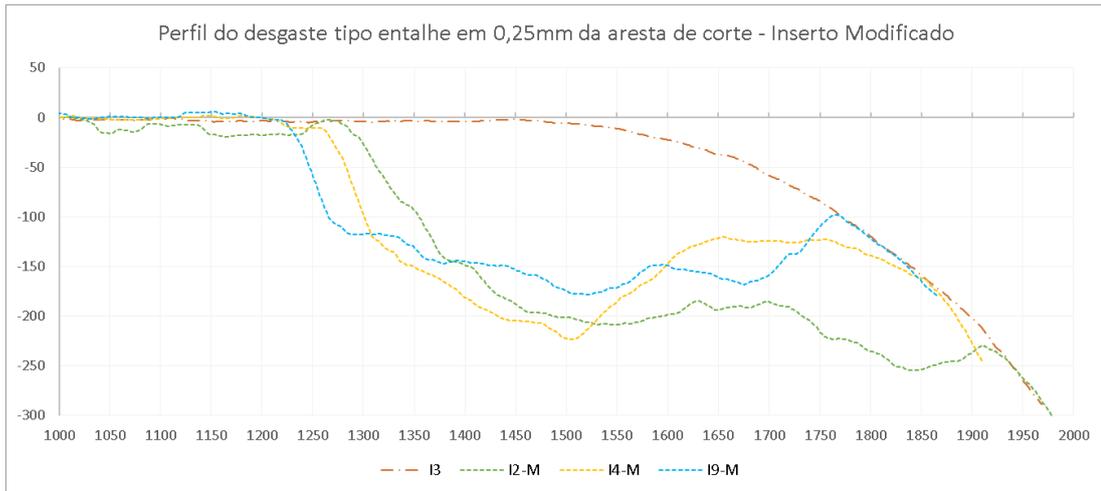


Gráfico 3-6 - Perfil do desgaste tipo abrasivo/adesivo em 0,25mm da aresta de corte - Inseto Modificado.  
Fonte: Dados da pesquisa

De forma a avaliar a taxa de desgaste utilizando o volume perdido, uma programação matemática foi criada, de forma a interpolar a área entre o perfil do inserto novo e o inserto desgastado. As interações foram feitas a cada 0,005 mm. Para o inserto comercial, a integração foi feita de 0 a 0,45 mm e, para o inserto comercial ela foi de 0 a 1,1 mm. O Gráfico 3-7 e Gráfico 3-8 apresentam a imagem representativa do perfil desgastado em comparação a ferramenta nova. As seções representadas foram: 0,005 mm e 0,025 mm para o inserto modificado; 0,005 mm, 0,255 mm, 0,505 e 1,005 mm para o inserto comercial.

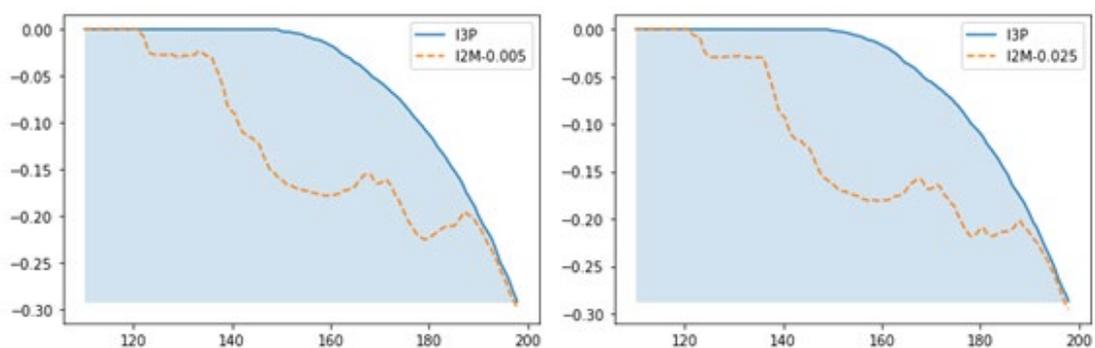


Gráfico 3-7 – Interpolação do volume do desgaste de flanco. Inseto Modificado.  
Fonte: Dados da pesquisa.

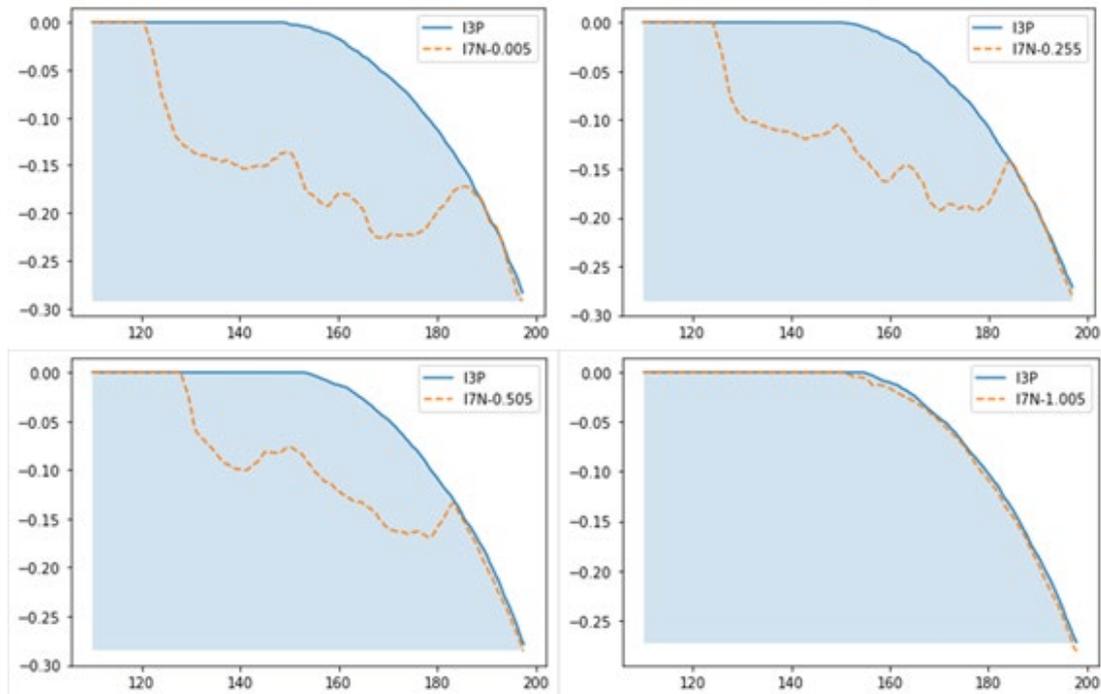


Gráfico 3-8 – Interpolação do volume do desgaste de flanco. Inseto comercial.  
Fonte: Dados da pesquisa.

O Gráfico 3-9 exibe os volumes desgastados dos insertos modificados e normais, onde o Gráfico 3-9-a exibe os resultados de medição e seus erros associados para o volume total (1,1 mm). A divisão do volume médio total pelo tempo de contato representou a taxa de desgaste para cada modelo. O inserto modificado apresentou  $2,92 \mu\text{m}^3/\text{min}$  e o comercial  $3,80 \mu\text{m}^3/\text{min}$ . Quando foi comparado os do desgaste até o limite de 0,45mm (parcial), as taxas de desgaste foram  $2,92 \mu\text{m}^3/\text{min}$  para o inserto modificado e o de  $2,39 \mu\text{m}^3/\text{min}$  para o inserto comercial. A análise estatística apresentou um valor de *P-valor* igual a 0,24 e 0,25 para o volume desgastado total e parcial respectivamente. Estes valores permitem assumir que as médias eram diferentes. A diferença na taxa de desgaste era esperada, uma vez que a área de contato entre os modelos de inserto eram diferentes.

Mesmo identificando a diferença na taxa de desgaste e comparando o perfil, fenômeno causador do abrasivo/adesivo não havia sido identificado. De forma a analisar o comportamento do inserto, uma sequência de imagens foi extraída de uma gravação realizada a 120fps. Nesta taxa de captura, cada 1 segundo possui 120 imagens, o que permitiu uma análise detalhada da trajetória do cavaco. A compilação de 0,08 segundos está na Figura 3-14.

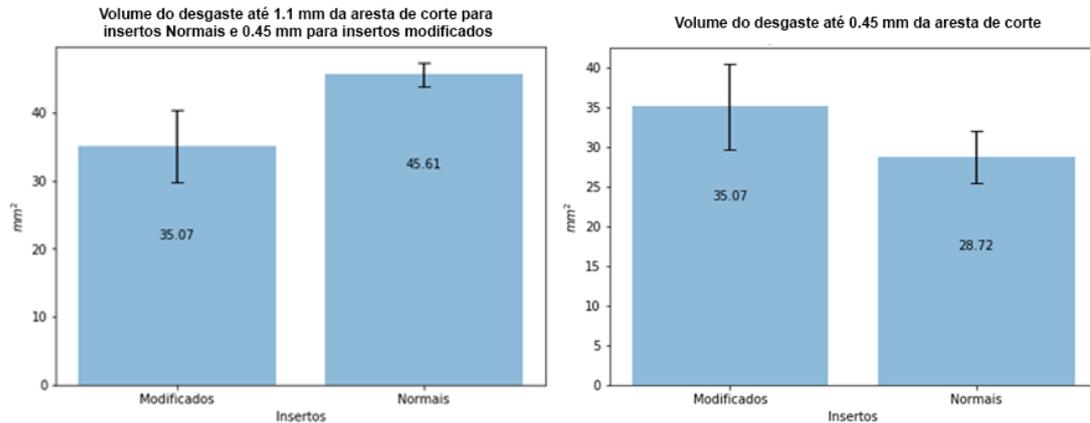


Gráfico 3-9 – Resultado da interpolação do volume desgastado para o inserto comercial e modificado. (a) distância de 1,1mm (b) distância de 0,45mm

Foi possível avaliar que a quebra do cavaco não ocorria após o mesmo passar pelo quebra-cavaco na superfície de saída. O formato do cavaco helicoidal longo se projetava para a lateral da ferramenta, entrando em contato com a peça ainda em bruto e a superfície de folga. Esta fricção de modo contínuo promoveu aquecimento da superfície, favorecendo ainda mais o desgaste. O desgaste de abrasivo/adesivo surgiu da mesma forma que o desgaste de flanco na aresta principal de corte, devido ao atrito constante e as temperaturas submetidas. Um possível influenciador seria a elevação da temperatura. Uma vez que o cavaco recebe a maior parte do calor gerado na zona primária de deformação e a temperatura na interface do cavaco e a lateral de folga da ferramenta tenderam a se elevar, favorecendo ainda mais o mecanismo termicamente ativado. A Figura 1-20-b auxilia o entendimento da Figura 3-14.

A Figura 3-13 foi gerada por microscopia eletrônica de varredura e exibe o desgaste de abrasivo/adesivo visualizada pelo plano  $P_r$ .

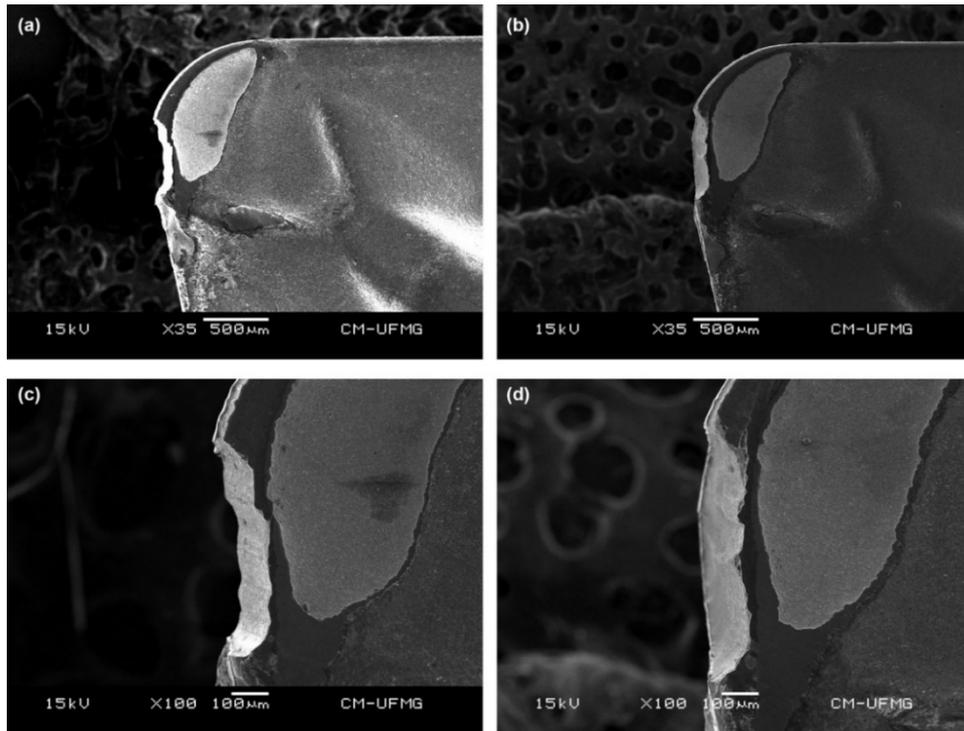


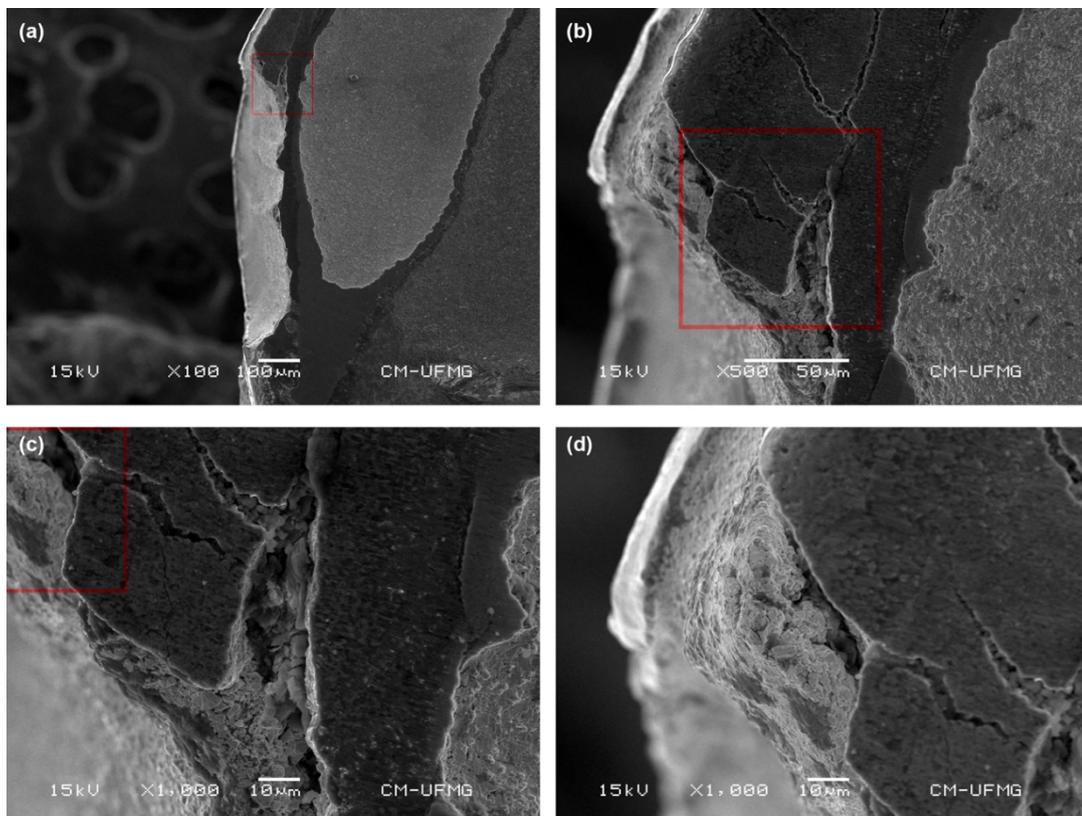
Figura 3-13 – Desgaste tipo abrasivo/adesivo dos inserts (a) comercial (b) modificado. Vista do plano  $P_r$ .  
Fonte: Dados de pesquisa.



Figura 3-14 – Sequência de imagens no intervalo de tempo de 0,08 segundos, retiradas da filmagem com câmera de 120fps.  
Fonte: Dados da pesquisa

Após análise da Figura 3-13-c e da Figura 3-13-d, juntamente com os gráficos do perfil 2D (Gráfico 3-5 e Gráfico 3-6), foi possível identificar outro mecanismo de desgaste na superfície de saída. O desgaste de abrasivo/adesivo criado pelo atrito do cavaco não foi responsável pela perda de material em toda a extensão do desgaste. Os gráficos do perfil 2D mostraram uma tendência de elevação dos valores após 0,35mm, indicando que o desgaste de abrasivo/adesivo terminava neste ponto. Foi possível observar melhor esta tendência nos gráficos gerados na integração do volume (Gráfico 3-7 e Gráfico 3-8). Na representação gráfica da perfilometria em 3D também foi possível observar o fenômeno, principalmente nas Figura 3-11-b e Figura 3-12-a.

A Figura 3-15 exibe um conjunto de imagens geradas em microscopia eletrônica de varredura, geradas em uma sequência de ampliações que iniciaram em 100x até 1000x. As imagens corresponderam a região de transição entre o desgaste de abrasivo/adesivo e de flanco. Foi possível identificar a presença de trincas já propagadas pelo revestimento e atingindo o substrato da ferramenta.

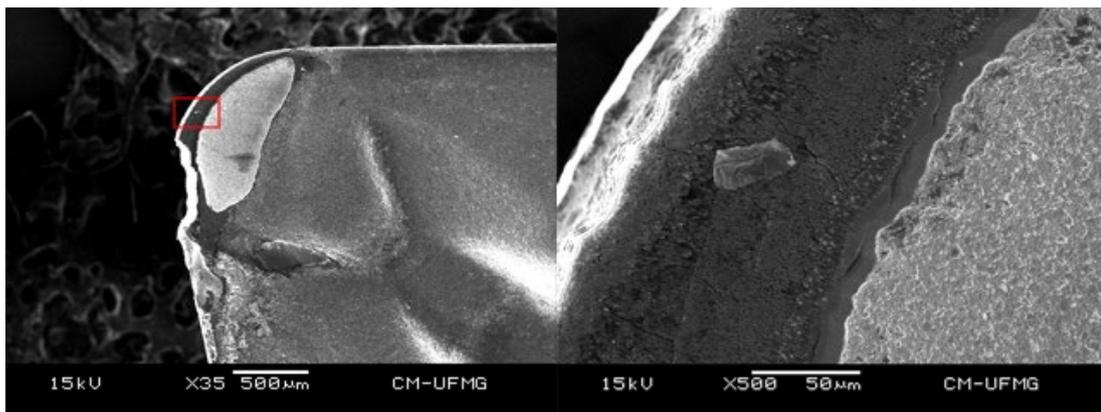


*Figura 3-15 – Propagação de trincas no substrato na transição do desgaste de abrasivo/adesivo para flanco (Insero modificado).*

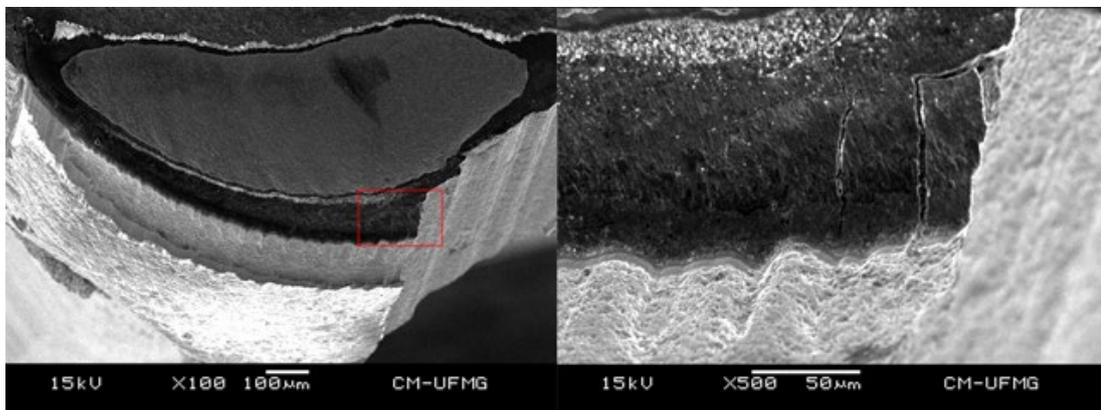
*Fonte: Dados da pesquisa.*

Foi constatado que um processo cíclico de perda da integridade da aresta ocorreu e se iniciou no limite do desgaste de abrasivo/adesivo. Uma trinca, aparentemente térmica, foi formada e as cargas aplicadas sobre a ferramenta promoviam a propagação destas. Quando duas trincas se encontravam, parte do material da ferramenta era fragilizado e arrastado entre a peça e a ferramenta, promovendo um desgaste com alta taxa de remoção. Após a perda de parte do seu material, novas trincas eram formadas na nova superfície que entrou em contato com a peça, e esta área passou a receber mais pressão, reiniciando o ciclo de desgaste.

A Figura 3-16 exibe as trincas na superfície de saída da ferramenta. Elas foram identificadas nos dois modelos de inserto. A Figura 3-17 exibe uma seção grande de material no final do ciclo, antes de se desprender totalmente do substrato, identificada no inserto modificado.



*Figura 3-16 - Trincas se propagando sobre a superfície de saída da ferramenta (Inserto comercial).  
Fonte: Dados da pesquisa*



*Figura 3-17 - Parte do material da ferramenta em processo de desprendimento (Inserto modificado).  
Fonte: Dados da pesquisa*

A Figura 3-18 exibe uma imagem de microscopia ótica dos insertos que usinaram com a profundidade de usinagem (ap) igual a 2,5mm, logo após a limpeza química em solução de ácido e um comprimento de contato de 487 mm. Uma máscara foi inserida na figura para facilitar a visualização do perfil original dos insertos. Além disso, as dimensões do raio de ponta, profundidade de usinagem e altura do perfil geométrico modificado também foram inseridas. O desgaste de cratera e de flanco foram identificados.

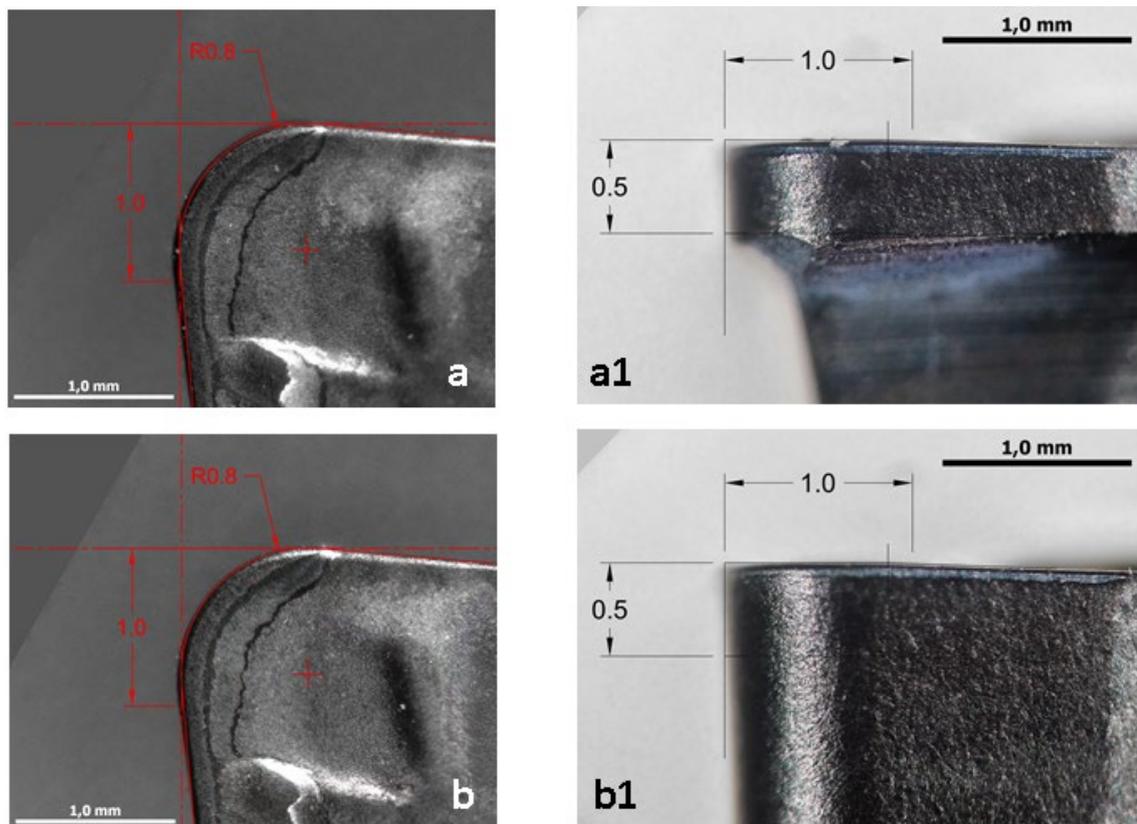


Figura 3-18 - Insertos após usinagem com profundidade de usinagem 2,5mm e limpos com banho químico: (a) I8-M e (b) I8-N.

Fonte: Dados da pesquisa.

A presença do desgaste de cratera indica que os parâmetros de corte, principalmente a velocidade de corte, eram extremamente elevadas. O aumento da profundidade de usinagem, promoveu mais geração de calor devido a maior taxa de deformação, aliada a velocidade de corte de 350 m/min, causaram o aumento da temperatura na interface cavado ferramenta, favorecendo o desgaste de difusão e a formação da cratera, conseqüentemente.

No canto esquerdo da Figura 3-18-a1 e na Figura 3-18-b1 é possível observar uma tonalidade mais clara do revestimento. Esta região coincidiu com o final da profundidade de

usinagem, local onde normalmente o desgaste de abrasivo/adesivo se apresenta. Esta diferença de tom pode ter sido causada pela fricção do cavaco sobre a superfície de folga da ferramenta.

O desgaste de flanco foi medido e seus respectivos resultados de medição e erros foram representados no Gráfico 3-10. Estatisticamente não apresentaram diferença representativa entre as médias.

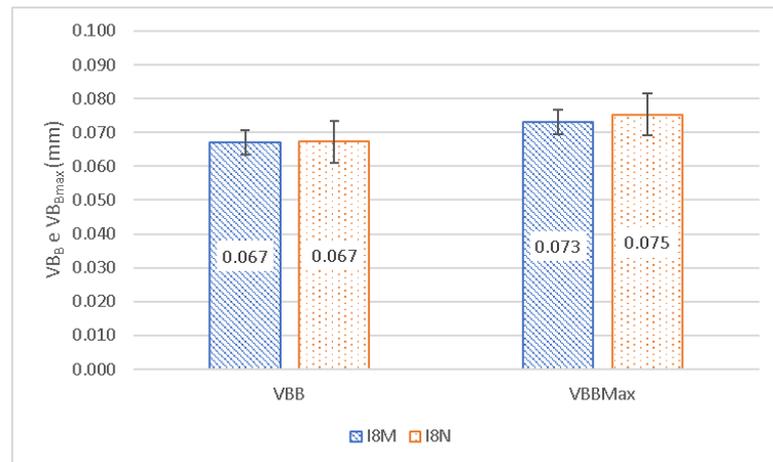


Gráfico 3-10 – Desgaste de Flanco para insertos que usinagem com profundidade de usinagem ( $ap$ ) de 2,5mm.  
Fonte: Dados da pesquisa.

### 3.3 Microdureza

Para avaliar os efeitos dos parâmetros profundidade de usinagem e da alteração na superfície de folga da ferramenta, um perfil de microdureza da subsuperfície da peça torneada foi coletado. Este perfil pode apresentar indícios sobre as cargas que atuaram sobre a peça, pois as cargas produzem encruamento do material, aumentando a dureza (GRIFFITHS, 2001). No desgaste da ferramenta de corte, a variação do ângulo de inclinação altera a carga sobre a aresta de corte (COELHO, SILVA, *et al.*, 2004). Outro fator que pode ser avaliado com a análise dos dados de microdureza é a temperatura na região. A elevação da temperatura na região de contato do flanco promove a redução dos limites de deformação dos materiais, fenômeno que se caracteriza por valores de dureza menores na área próxima à borda da superfície.

A medição foi realizada utilizando penetrador tipo Vickers, com aplicação inicial de uma carga de 20 gf em um tempo de aplicação de 15 segundos. Um espaçamento de 0,1mm foi aplicado entre as endentações. O Gráfico 3-11 exibe os resultados médios de medição, com seus respectivos erros. Observa-se que a curva referente ao inserto modificado possibilita uma previsão de seus valores, isso devido ao valor de  $R^2 = 0,9149$ . Em outras palavras, o erro de

uma regressão pode ser expressada pelo valor de  $R^2$ , valores próximos de 1, significa que possui uma alta correlação e pode ser usada para prever valores dentro de uma população. A curva projetada do inserto comercial, apresentou um  $R^2= 0,6138$ , o que a torna não representativa.

Além disso, pode-se notar que, logo após um pequeno distanciamento da borda, os valores se aproximam, tornando a variação entre eles irrelevante, ficando mais evidente após a marca de 0,6 mm. Este comportamento sugere que o substrato do material foi atingido e a zona mecanicamente afetada se encontra até este marco.

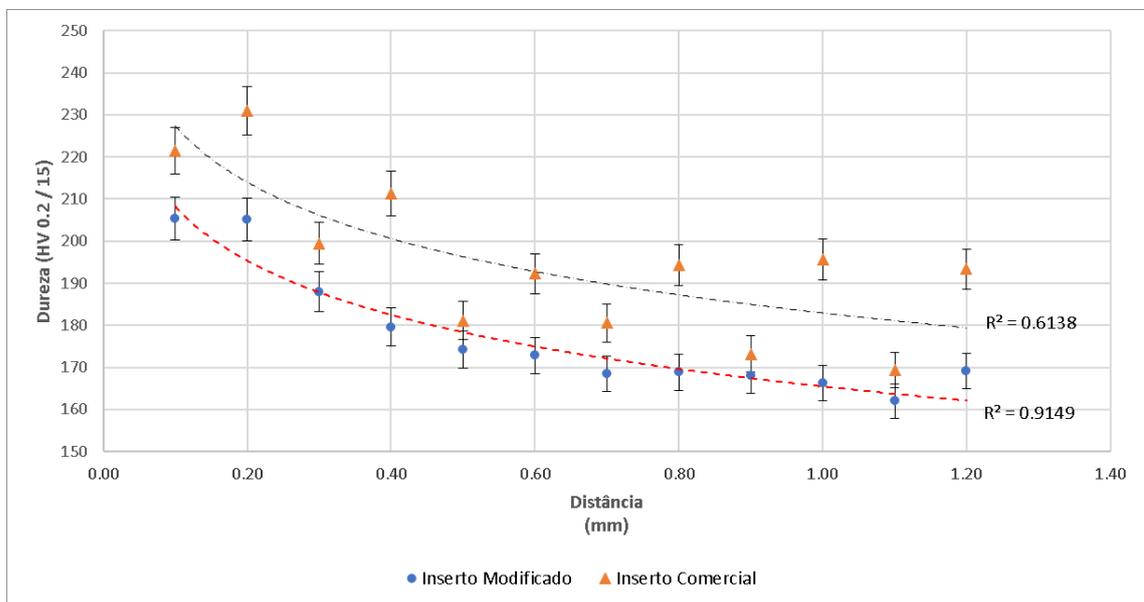


Gráfico 3-11 - Perfil de microdureza na subcamada da peça – Usinagem com uma profundidade de usinagem (ap) de 1mm. Carga de 20gf. .  
Fonte: Resultado da pesquisa.

De forma a identificar melhor os efeitos sobre a subcamada, um novo perfil de microdureza foi coletado em um comprimento total de 0,75mm e espaçamento de 0,05mm. A carga aplicada foi de 5gf com 15 segundos de permanência (cargas menores permitem maior aproximação entre a endentação e maior resolução dos dados). O Gráfico 3-12 exhibe os resultados de medição com seus respectivos erros associados. Observa-se que os níveis de aproximação das curvas projetadas estão acima de 84%. Este valor não é o ideal, mas pode ser considerado para análises iniciais. É notório que os valores de microdureza se convertem para o valor de 170HV0.05/15, o que indica o fim da região mecanicamente afetada e início do substrato do material. Como o comportamento das duas cursam são similares, pode-se assumir que as dimensões da área afetada pelas cargas são aproximadamente iguais.

Quando se avalia a dureza logo após a superfície, especificamente à 0,05mm de distância, observa-se que os valores apresentam uma diferença significativa, de aproximadamente 40 HV0.05/15. Tal discrepância poderia ser justificada pelos níveis de desgaste das ferramentas e pelo fluxo de calor na região. Com a finalidade de determinar se existe diferença significativa entre os perfis, um teste estatístico que avalia as médias foi realizado. Ele apresentou um *P-valor* de 0,238, o que significa que não é possível assumir que existe uma diferença entre os valores médios das curvas, mesmo existindo uma diferença nos valores iniciais.

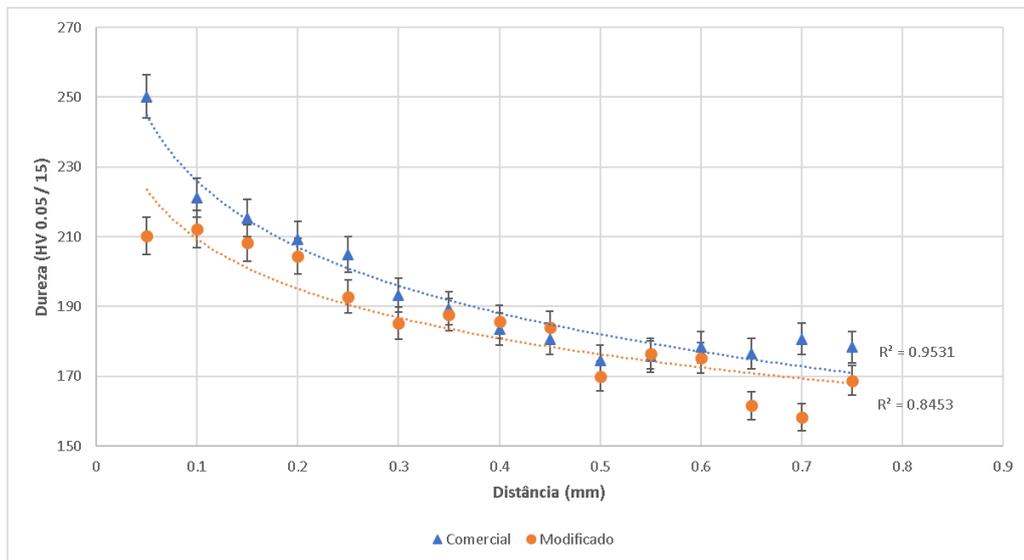


Gráfico 3-12 - Perfil de microdureza na subcamada da peça – Usinagem com ap de 1mm. Carga de 5gf.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

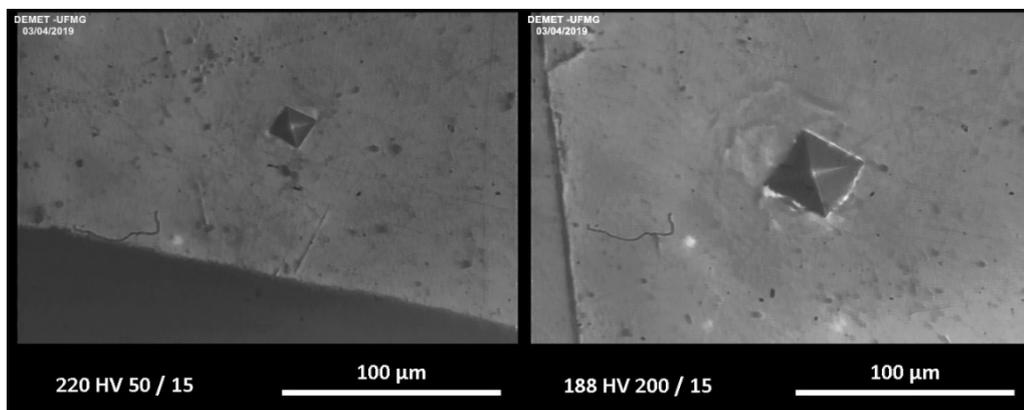


Figura 3-19 - Medição de microdureza HV com carga de 50kgf por 15 segundos e 20gf por 15 segundos.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

Um terceiro perfil de microdureza foi produzido, agora utilizando corpos de prova que foram torneados com a profundidade de usinagem de 2,5mm. O Gráfico 3-13 exibe os resultados de medição com seus respectivos erros e os valores de  $R^2$  para as regressões. Ambas as curvas apresentaram valores acima de 0,93 para  $R^2$ , podendo assim ser consideráveis representativas quanto à previsão de valores. Novamente, o teste de hipótese apresentou um valor de  $P$ -valor que não permite assumir a diferença entre as médias das curvas. Uma consideração relevante sobre este perfil é o fato que as ferramentas I8-M e I8-N, que usinaram com a profundidade de usinagem de 2,5mm, não apresentaram desgaste.

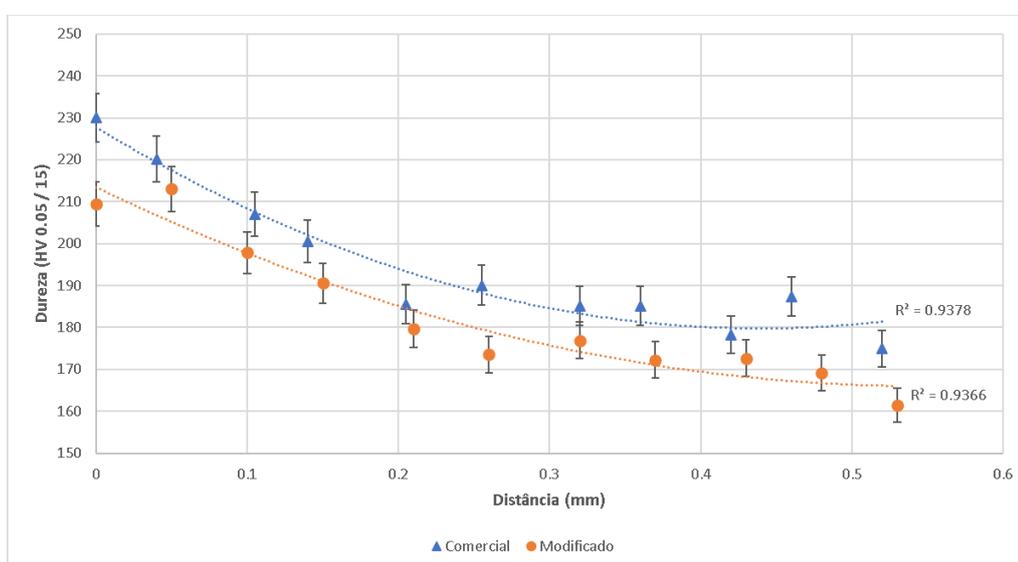


Gráfico 3-13 - Perfil de microdureza na subcamada da peça – Usinagem com ap de 2,5mm.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

Para auxiliar no entendimento da deformação subsuperficial deste experimento, a microdureza do cavaco foi avaliada. Desta forma, pode-se verificar a existência de algum fator proveniente da superfície de saída, principal responsável pelas taxas de deformação dos cavacos e suas temperaturas. O Gráfico 3-14 exibe os resultados de medição, com seus respectivos erros. Estatisticamente, a microdureza verificada entre os cavacos é a mesma, pois o  $P$ -valor obtido foi de 0,713. Vale reforçar que a usinagem com  $ap=2,5mm$  foi realizada com inserto novos, ao contrário do  $ap=1mm$ , onde os insertos estavam no final de vida.

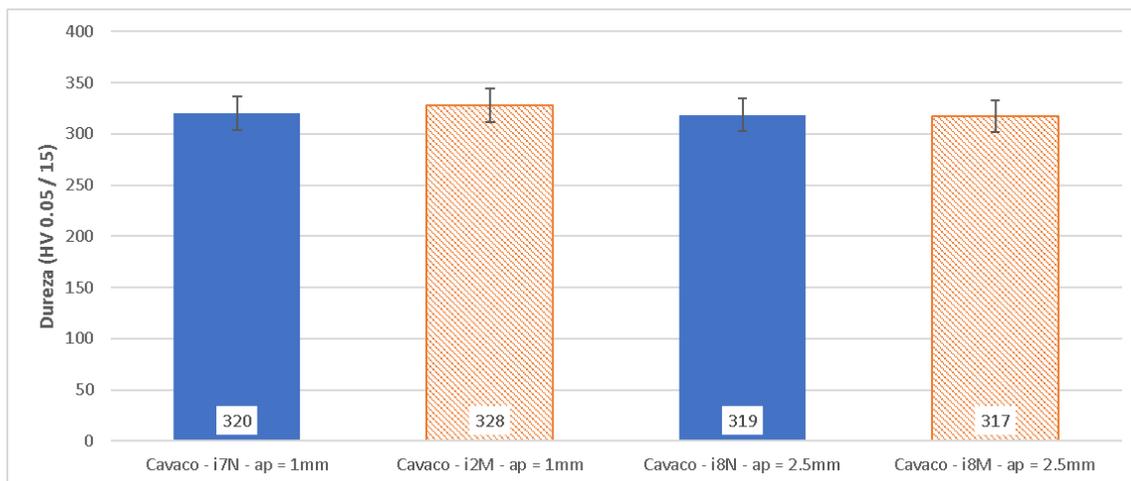


Gráfico 3-14 - Valores médios de microdureza dos cavacos em diferentes profundidades de corte.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

Baseado nos resultados até aqui apresentados, observou-se a existência de uma diferença pontual na microdureza logo abaixo da superfície, tanto para a profundidade de usinagem de 1 quanto de 2,5 mm. Esta variação estava presente tanto para insertos novos e para insertos desgastados. Quanto ao desgaste, os insertos comerciais e modificados possuíram o mesmo nível de desgaste de flanco médio e isso significa que a área de contato entre eles e a superfície da peça torneada eram aproximadamente iguais.

A grande diferença geométrica entre os insertos modificados e os normais foi o rebaixamento da superfície de folga da ferramenta, criando um dente na lateral do inserto. Este dente teve a função de limitar o avanço do desgaste de flanco e abrasivo/adesivo, e permitir o acesso do fluido de corte. A redução de material, alterou também o fluxo de calor da ferramenta, o que poderia ter promovido o aumento das temperaturas na interface peça ferramenta, que por sua vez, reduziu a microdureza logo abaixo da subcamada torneada.

### 3.4 Rugosidade

A integridade superficial pode ser afetada de vários modos, como pela dimensão do raio de ponta da ferramenta (RECH e MOISAN, 2003), desgaste da ferramenta (KIMAKH, AGHZER, *et al.*, 2018) e (DAS, DHUPAL e KUMAR, 2015) e (GRZESIK, 2008), ou pelos parâmetros de corte (KLOCKE, 2011) e (NOORDIN, VENKATESH, *et al.*, 2004). Os resultados que serão apresentados a seguir correspondem os valores de rugosidade superficial

coletados durante os ensaios. Dois períodos de coleta foram definidos, o primeiro após 2000 mm de contato e o segundo a 4000 mm, sendo este último corresponde ao final do teste.

Os Gráfico 3-15, Gráfico 3-16 e Gráfico 3-17 apresentam os valores médios e seus respectivos erros para as rugosidades medidas em Ra, Rt e Rz, respectivamente. O Gráfico 3-15 exhibe resultados de medição muito próximos entre o inserto modificado e o normal, mesmo o inserto modificado possuindo um nível de desgaste de abrasivo/adesivo mais acentuado. O desgaste de abrasivo/adesivo se localizou na face de folga do inserto, logo após a distância correspondente a uma profundidade de usinagem (ap) (Figura 3-21). Devido ao seu posicionamento, este desgaste não afetou a qualidade superficial.

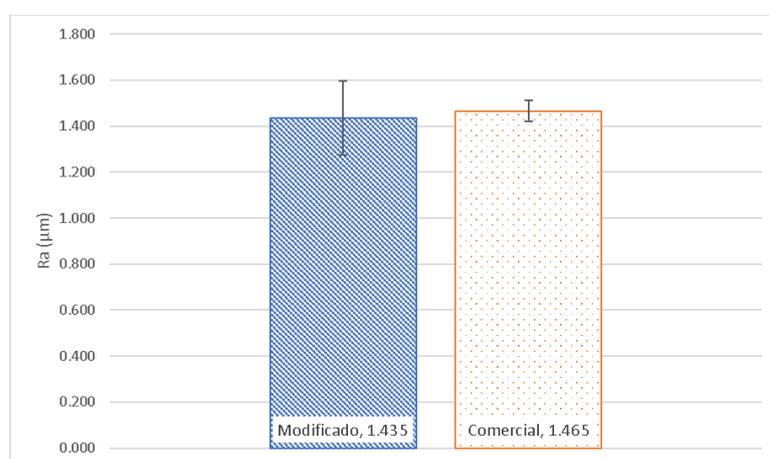
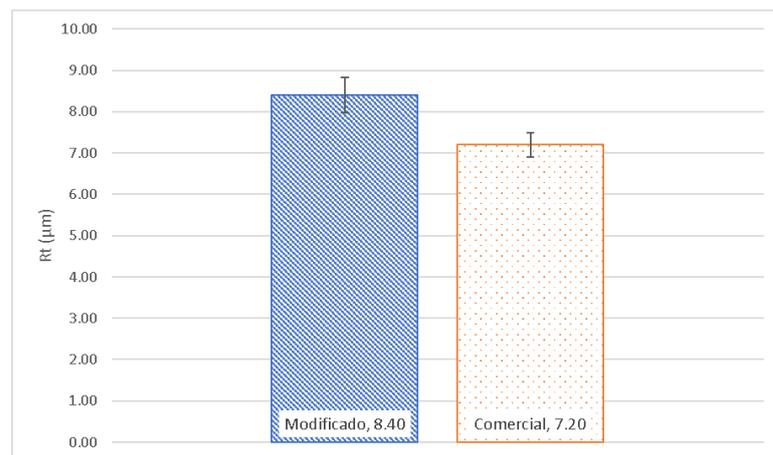


Gráfico 3-15 - Valores médios de rugosidade em Ra no comprimento de contato de 2000mm.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

A rugosidade avaliada em Rt foi altamente afetada por sulcos, ranhuras presentes na superfície avaliada. No Gráfico 3-16, pode-se perceber diferença entre os valores do inserto modificado e o normal, e esta diferença não estava presente nos outros parâmetros de rugosidade avaliada. Tal fenômeno pode ser explicado por marcas localizadas sobre a superfície, geradas pelo cavaco no formato de fita, que aparecia intermitentemente durante a usinagem (Figura 3-20). O cavado se enrolava sobre a peça, que, por sua vez promovia a fricção e alteração no acabamento superficial. Perfil gerado pelo parâmetro Rt, é excelente para detectar interações deste tipo, já que corresponde a soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.



*Figura 3-20 - Cavaco no formato de fita durante a usinagem.  
Fonte: Dados da pesquisa.*



*Gráfico 3-16 - Valores médios de rugosidade em Rt no comprimento de contato de 2000mm.  
Fonte: Resultado da pesquisa.*

O perfil Rz, mesmo correspondendo a valores de amplitude entre picos e vales, apresentou um comportamento similar ao Ra. Isso é explicado pela forma de cálculo, uma vez que a amplitude não é referente ao máximo e o mínimo de todo comprimento de avaliação. Desta forma, riscos ou sulcos pontuais não possuem um peso tão elevado, se comparado com o perfil Rt. O Gráfico 3-17 novamente demonstra que o desgaste de abrasivo/adesivo não afetou a rugosidade nesta distância de 2000 mm de contato. A Figura 3-21 exhibe o desgaste de cratera, flanco e abrasivo/adesivo dos insertos I2-M, I3-M, I4-N e I5-N com 2000mm de contato.

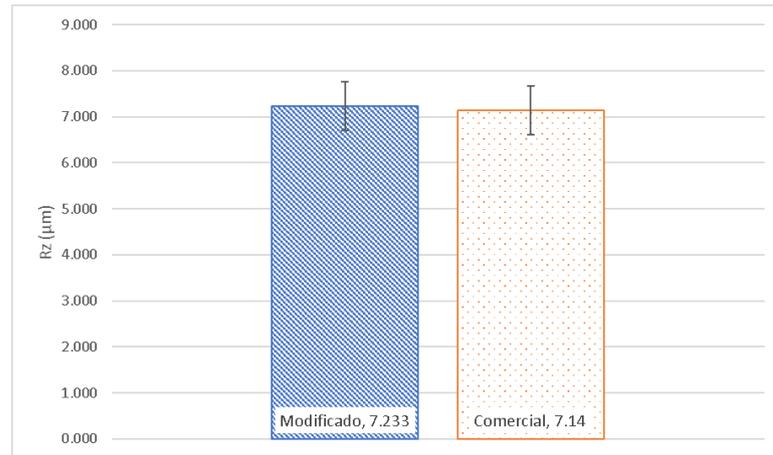


Gráfico 3-17 - Valores médios de rugosidade em Rz no comprimento de contato de 2000mm.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

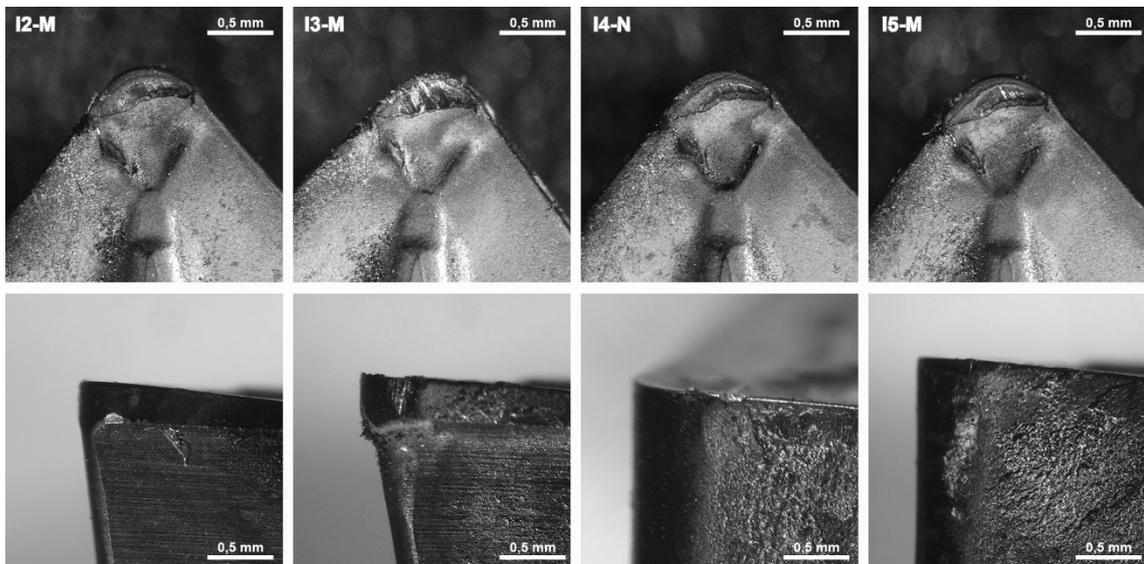


Figura 3-21 - Desgaste das ferramentas I2-M, I3-M, I4-N e I5-N com 2000mm de contato.  
Fonte: Dados a pesquisa.

Após o fim dos ensaios para o contato de 4000 mm, os perfis de rugosidade foram novamente coletados. Os valores e seus respectivos erros foram representados nos seguintes gráficos: Gráfico 3-18, Gráfico 3-19 e Gráfico 3-20. É notória a diferença dos valores entre o inserto modificado e o normal. Este comportamento foi percebido em todos os perfis avaliados. Isso se deu devido a presença de valores relativos dos insertos que fraturaram durante a usinagem. A perda da integridade da ferramenta afetou o acabamento da peça em mais de 200%. A Figura 3-22 exhibe os raios de ponta fraturados após o fim dos ensaios. Tanto os insertos comerciais quanto os modificados apresentaram perda da integridade, porém o grupo de valores

dos insertos modificados foram mais afetados, por possuírem maior número de insertos fraturados.

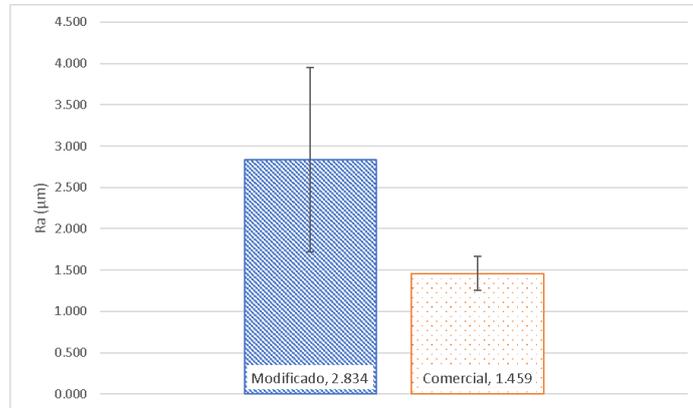


Gráfico 3-18 - Valores médios de rugosidade em Ra no comprimento de contato de 4000mm, sem filtro.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

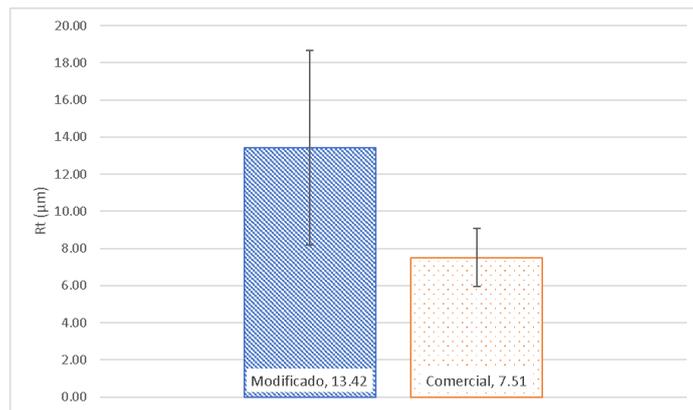


Gráfico 3-19 - Valores médios de rugosidade em Rt no comprimento de contato de 4000mm, sem filtro.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

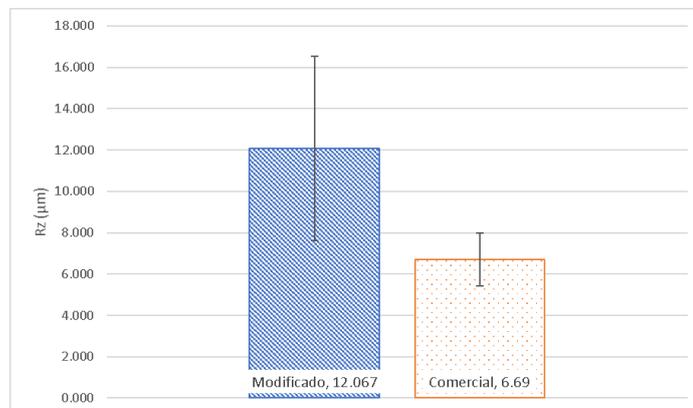


Gráfico 3-20 - Valores médios de rugosidade em Rz no comprimento de contato de 4000mm, sem filtro.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

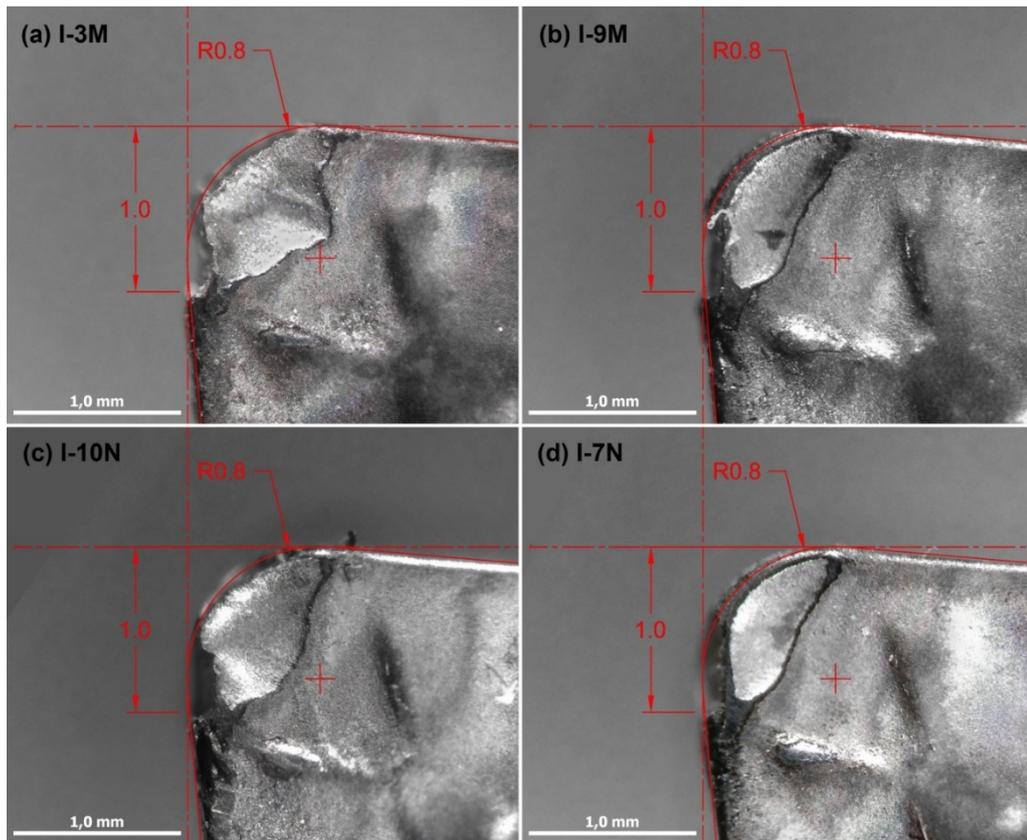


Figura 3-22 - (a) Inserto modificado com raio de ponta quebrado. (b) Inserto modificado com raio de ponta inteiro. (c) Inserto comercial com raio de ponta quebrado. (d) Inserto comercial com raio de ponta inteiro.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

Para uma comparação mais coerente entre os resultados de rugosidade, os valores referentes aos inserts fraturados foram removidos, formando um novo grupo de dados. Os resultados de medição e seus erros foram representados nos gráficos: Gráfico 3-21, Gráfico 3-22 e Gráfico 3-23, sendo que os parâmetros de rugosidade medidos foram o Ra, Rt e Rz respectivamente.

Os valores de rugosidade Ra relacionados ao inserto na condição normal, se mantiveram na mesma faixa de valores se comparados com o tempo de contato de 2000mm, demonstrando que o aumento do desgaste de flanco e de abrasivo/adesivo não afetou a qualidade superficial. Este comportamento se repetiu para a medição em Rt e Rz. Entretanto, o inserto modificado apresentou um aumento dos valores médios em todos os parâmetros avaliados. Levando em consideração o que foi descrito no subitem “Desgaste da ferramenta de corte”, temos que a piora na qualidade superficial não se relaciona com o desgaste da ferramenta.

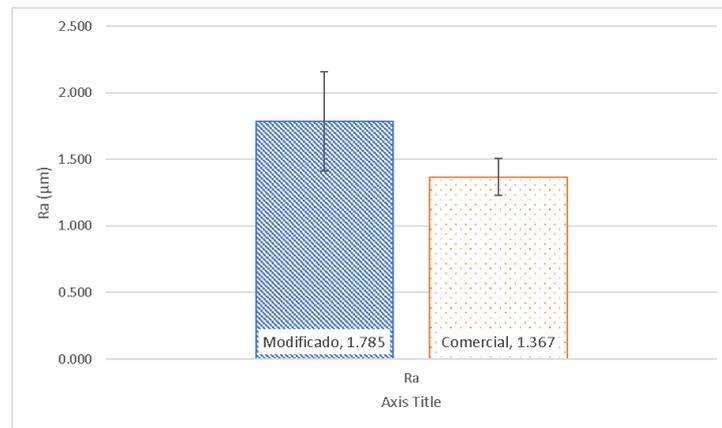


Gráfico 3-21 - Valores médios de rugosidade em Ra no comprimento de contato de 4000mm, com filtro.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

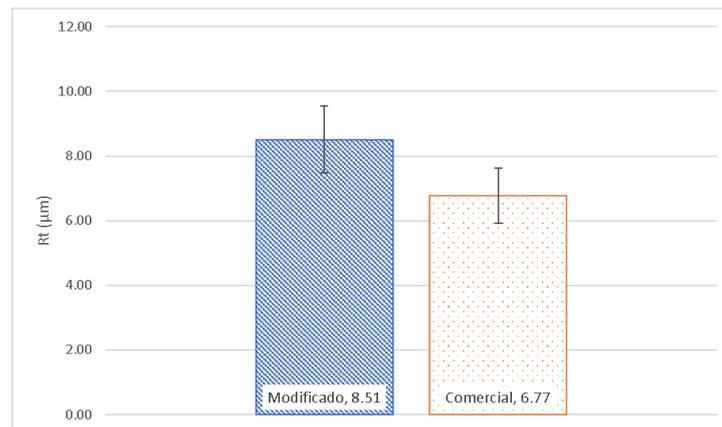


Gráfico 3-22 - Valores médios de rugosidade em Rt no comprimento de contato de 4000mm, com filtro.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

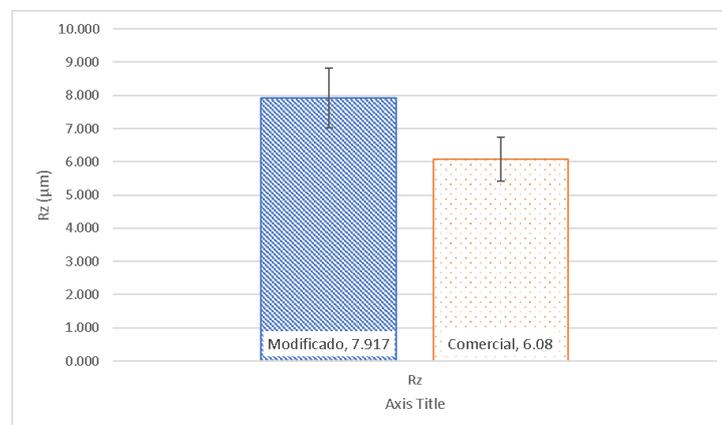


Gráfico 3-23 - Valores médios de rugosidade em Rz no comprimento de contato de 4000mm, com filtro.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

Uma simulação do perfil de rugosidade foi construída utilizando a equação 9, sendo um perfil correspondente ao inserto modificado e outro ao normal. Esta simulação permitiu entender as diferenças matemáticas existentes entre os valores. O Gráfico 3-24 exibe a representação desta simulação e a Tabela 3-2 contém os valores calculados para os devidos parâmetros de rugosidade. Os valores simulados de aproximaram dos resultados medidos nas amostras.

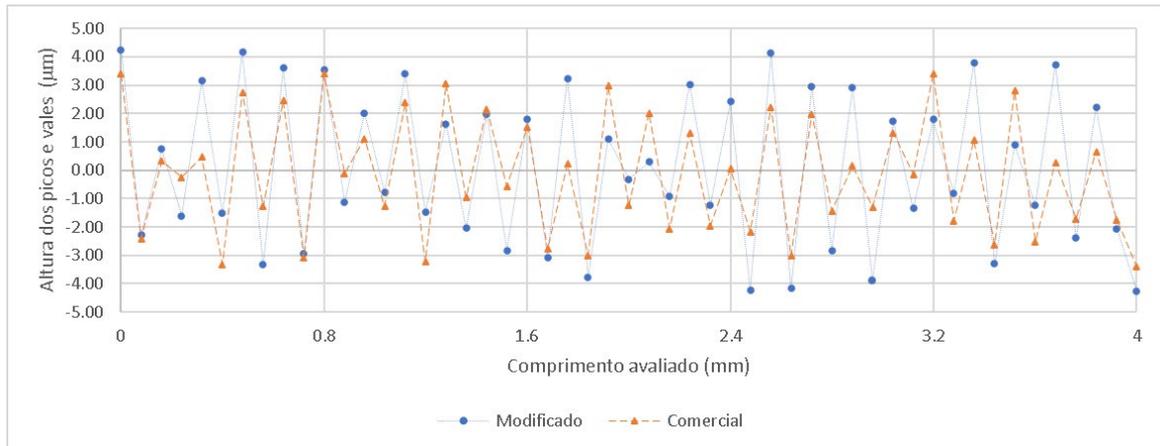


Gráfico 3-24- Perfil de rugosidade simulada para o inserto modificado e normal.  
Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 3-3 - Valores obtidos por meio da simulação do perfil de rugosidade.  
Fonte: Dados da pesquisa.

	Comercial	Modificado
<b>Ra</b>	<b>1.45</b>	<b>1.78</b>
<b>Rt</b>	<b>6.16</b>	<b>8.50</b>
<b>Rz</b>	<b>6.72</b>	<b>8.12</b>

Por meio da simulação, foi possível verificar que a diferença entre os resultados obtidos estava localizada na amplitude entre os picos e os vales, com uma diferença na casa de 2 µm.

Rajabonghi e Sarma (2019) relataram em seu experimento de aplicação de microtexturas na superfície de folga da ferramenta, que o fluxo de calor, entre peça e ferramenta, foi alterado devido a mudança na área total para dissipação do calor. Eles apresentaram dados que demonstraram que a ferramenta com a textura tipo ponto (do inglês *Dot*) possuía uma maior área de contato e suas temperaturas eram menores em comparação com a ferramenta sem texturização. Além disso, relataram também que a rugosidade da peça piorava com o aumento da temperatura.

A modificação geométrica da ferramenta alterou a área de dissipação de calor externo, além de concentrar mais calor em uma pequena massa. Baseado nestes fatos, pode-se inferir que as temperaturas na interface peça-ferramenta foram mais elevadas no inserto modificado. Sabe-se que o desgaste por adesão também ocorre na superfície de folga da ferramenta, ocorrendo na região adjacente à aresta de corte ao mesmo tempo do atrito. (ASTAKHOV, 2007). Além disso, no processo de perda de material por adesão, a resistência à ruptura das microssoldas depende principalmente das propriedades mecânicas do material de trabalho e a temperatura de contacto.

A combinação das seguintes condições pode ter afetado os resultados da rugosidade superficial: a presença de material preso ao inserto; a alteração do fluxo de calor na interface entre peça; a maiores forças de adesão no contato entre materiais similares (aço com aço). O material aderido à ferramenta entrava em contato com material da peça, as pressões de corte promoviam microssoldas, estas eram rompidas com mais facilidade devido as temperaturas elevadas na região, formando um perfil de rugosidade diferente ao da ferramenta comercial, que por sua vez, possuía uma temperatura na região de contato menor.

Uma segunda hipótese é que a alteração geométrica da ferramenta, diminuiu a sua estabilidade durante a usinagem e tal redução de massa promoveu uma pequena elevação na vibração. A estabilidade durante o corte é um dos principais influenciadores da rugosidade superficial. Sabe-se que a força passiva pode indicar a vibrações do sistema, sendo um meio que pode ser utilizado para validar a teoria do aumento da vibração no inserto modificado. Os dados da força passiva foram tratados e calculados nas seguintes condições: o desvio padrão correspondente a 1 segundo (240 valores). O Gráfico 3-25 exhibe os valores obtidos representados ao longo do tempo de usinagem.

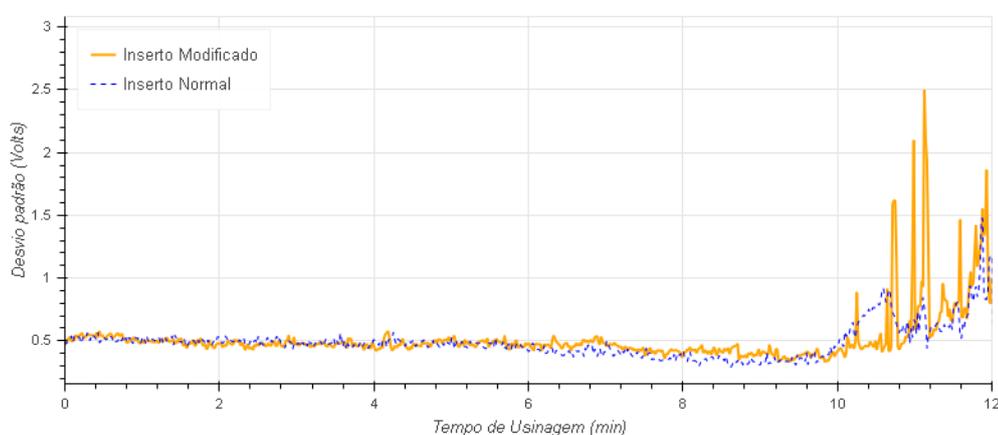


Gráfico 3-25 - Desvio padrão da força passiva ao longo do tempo.  
Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se que ao final da vida da ferramenta, após a marca de 10 min de contato, os valores do desvio padrão para cada segundo se altera drasticamente, o que significa que o dinamômetro coletou valores com amplitude muito elevada no intervalo de tempo de 1 segundo. Variações deste tipo podem indicar vibração do sistema, por exemplo, por perda da integridade da aresta de corte.

### 3.5 Força de usinagem e suas componentes

Após tratamento dos dados, os resultados de medição foram representados no Gráfico 3-26, onde são apresentadas as seguintes forças: de usinagem, de corte, passiva e de avanço, tanto para o inserto comercial quanto para o modificado. Este gráfico permite uma visão geral do comportamento das forças, entretanto, devido a quantidade de informações, não permite uma análise detalhada. Por isso, logo em seguida, as forças foram representadas separadamente.

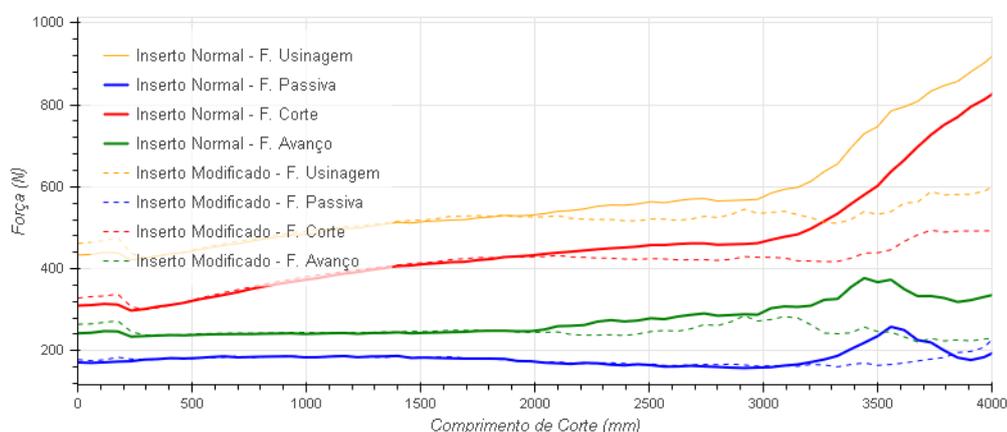


Gráfico 3-26 - Forças coletadas durante a usinagem com os insertos comerciais e modificados, incluindo ensaios com interrupção.

Fonte: Resultado da pesquisa.

O Gráfico 3-27 apresenta o comportamento da força de usinagem, resultante das forças de corte, passiva e avanço. Percebe-se que no tempo de contato, aproximadamente 7 min, a força de corte sofreu uma redução drástica, de mais de 50 N. Esta redução foi relacionada a interrupção do torneamento para a medição de rugosidade e de desgaste parcial da ferramenta. Ao retornar a usinagem, os valores de força se apresentaram inferiores aos valores antes da

parada. Uma diferença nos valores de força era esperada, porém no sentido contrário, uma vez que a peça estaria com uma temperatura menor do que antes da interrupção. O aumento da temperatura reduz a força de corte. Esta alteração de força não foi percebida quando a usinagem foi realizada sem interrupção, sendo assim, novos ensaios foram realizados e os valores de força foram calculados somente por usinagem ininterruptas. Devido a necessidade de aumentar a quantidade de ensaios, decidiu-se utilizar o material que estava destinado a usinagem com uso de refrigeração, e eliminar esta variável.

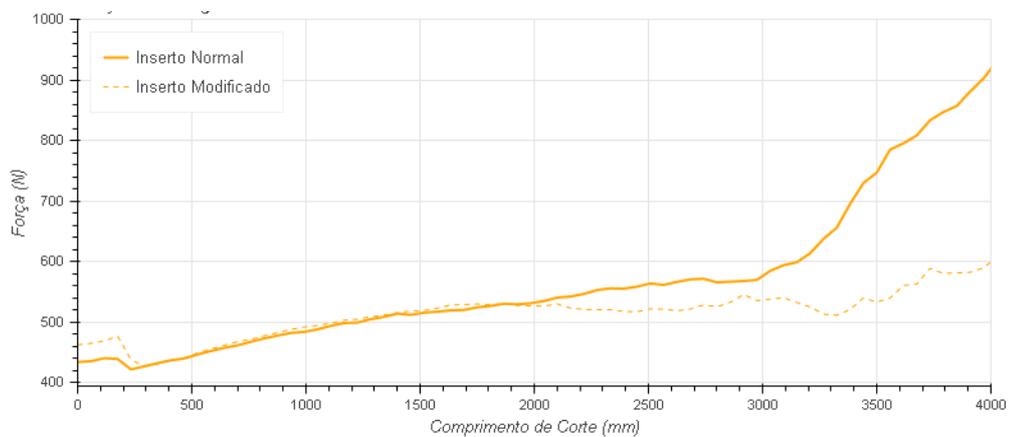


Gráfico 3-27 – Força de usinagem dos inserts comerciais e modificados, incluindo ensaios com interrupção.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

O Gráfico 3-28 exibe novamente todas as componentes da força de usinagem e sua resultante em um único gráfico, porém somente com os valores coletados durante a usinagem ininterrupta foram utilizados.

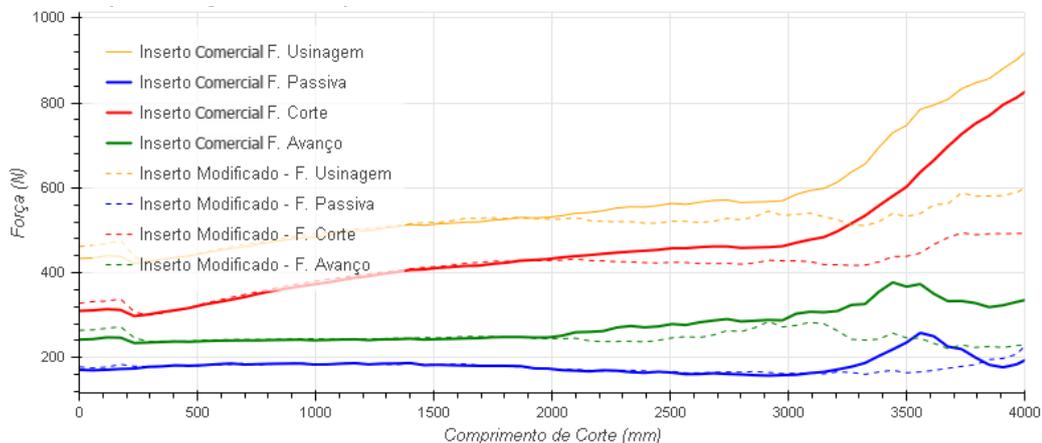


Gráfico 3-28 - Forças coletadas durante a usinagem com os inserts comerciais e modificados, excluindo os ensaios com interrupção.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

O Gráfico 3-29 exibe a força de usinagem média para o inserto modificado e para o normal. Percebe-se três períodos distintos nos dados do inserto comercial, sendo eles: 0 a 300 mm, de 300 a 3200 mm e de 3200 a 4000 mm. No primeiro estágio, a força de usinagem iniciou-se ligeiramente mais elevada, este fenômeno poderia estar relacionado com a temperatura da peça. À medida que o tempo de contato aumentou, o fluxo contínuo de calor gerado pelas interfaces peça-ferramenta e cavaco-ferramenta promoveram o aumento gradativo da temperatura da peça, com uma redução na força de corte. Este fenômeno já era esperado por se tratar de uma usinagem a seco.

Palmai (1987) e Machado et al. (2009) relatam que a temperatura da aresta de corte, durante uma usinagem contínua e a seco, tende a se estabilizar em uma temperatura constante, equilibrando a geração de calor do corte com as perdas por condução para o cavaco, ferramenta e peça, e ainda as perdas por convecção para o ambiente. A Figura 3-23-a exibe o comportamento térmico na interface cavaco-ferramenta. A figura também exibe o comportamento da temperatura ao longo do tempo durante uma usinagem contínua (curva “a” da Figura 3-23-b).

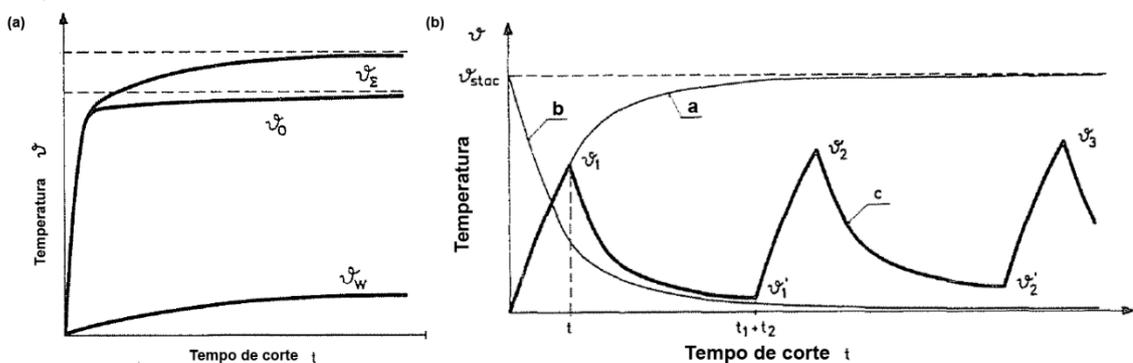


Figura 3-23 - (a) Equilíbrio térmico na formação do cavaco- $v_{\Sigma}$  - Temperatura total da superfície,  $v_0$  - Temperatura na camada externa da superfície,  $v_w$  - Temperatura do corpo da ferramenta (b) Temperatura na usinagem em corte contínuo e interrompido.

Fonte: Palmai, 1987. Imagem adaptada.

O segundo estágio se iniciou em 300 e se estendeu-se até 3200 mm, sendo o de maior duração entre os três estágios. Ele correspondeu ao período em que a ferramenta se manteve íntegra e com o desgaste dentro do aceitável. Com uma temperatura de corte estável, o principal fator influenciador do aumento gradual da força foi a propagação do desgaste. O contato contínuo nas interfaces fez com que os mecanismos de desgaste fossem ativados, promovendo

uma perda gradual de material. Machado et al. (2009) afirmaram que o aumento no desgaste de flanco promove a elevação da força de corte na faixa de 7% a 12% para cada 0,1mm de desgaste. O valor do desgaste de flanco aos 6 min de tempo de usinagem era conhecido, o que permitiu verificar a relação entre o aumento da força e o desgaste. O resultado obtido foi de um aumento de 11% para cada 0,1mm de desgaste, um valor dentro dos limites relatados na literatura.

O terceiro estágio do inserto comercial iniciou-se em 9 min e se estendeu até o fim da usinagem. A taxa de crescimento da força de usinagem se alterou drasticamente, chegando a duplicar os valores iniciais e em menos de um minuto. Este comportamento é característico da perda da integridade da ferramenta ou elevados níveis de desgaste.

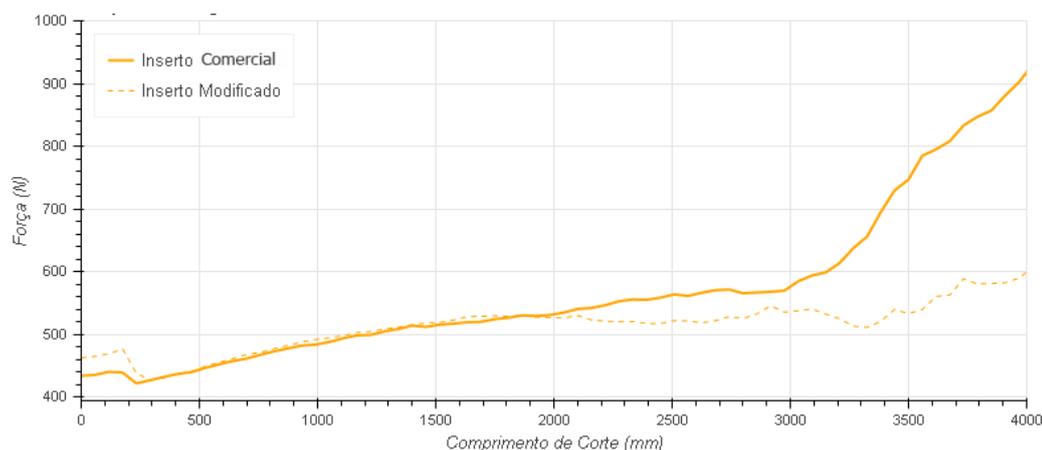


Gráfico 3-29 - Força de usinagem dos insertos comerciais e modificados, excluindo ensaios com interrupção.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

Já a curva referente ao inserto modificado não apresentou os mesmos 3 estágios que a ferramenta não modificada. Após a representação das forças de corte (Gráfico 3-32), passiva (Gráfico 3-34) e de avanço (Gráfico 3-33), foi possível identificar 4 intervalos de tempo, onde o comportamento da força apresentou alterações. Os intervalos foram: 0 a 1 min, de 1 a 6 min, de 6 a 10 min e de 10 a 12 min. O primeiro intervalo correspondeu ao início da usinagem, com o mesmo perfil de comportamento do inserto comercial.

O segundo intervalo correspondeu período de vida da ferramenta, onde a ferramenta se manteve com a aresta de corte afiada e seu o desgaste dentro do aceitável. Este segundo intervalo foi equivalente ao mesmo segundo intervalo da ferramenta comercial. Entretanto seu

intervalo de tempo foi menor e sua transição não se deu para uma fase de aumento drástico da força.

Logo após os 200 mm, as forças de corte se estabilizaram e tal mudança de comportamento correspondeu ao início do terceiro estágio. Esta estabilidade se manteve até os 10 min, quando novamente a força de usinagem voltou a subir. Entretanto seu aumento não foi contínuo e rapidamente voltou a se estabilizar.

De modo a determinar o momento de divergência entre as curvas do inserto modificado e o inserto comercial, um teste de hipótese de comparação entre as médias foi realizado utilizando o conjunto de dados correspondente a um intervalo de tempo. Em outras palavras, o conjunto dos dados que corresponde a força de usinagem em um determinado tempo, teve sua média e seu desvio padrão comparado com outro conjunto de dados. Esta comparação foi feita entre os dados do inserto comercial contra o modificado. Como no teste de hipótese, o *P-valor* determina o quanto é possível rejeitar ou aceitar uma hipótese, estes valores foram representados em relação ao tempo para que pudéssemos determinar o momento em que houve a divergências entre as curvas. O Gráfico 3-30 exibe os valores de *P-valor* para a comparação das médias, já o Gráfico 3-31 o *P-valor* para a comparação dos desvios padrões.

Os dois gráficos exibem os valores de P-valor consideráveis próximo de 6 min, mantendo-se em 1 até o final do tempo de corte. Estes valores permitem assumir que as força de usinagem do inserto comercial e o modificado se tornaram, representativamente, distintas em 6 min de tempo de corte.

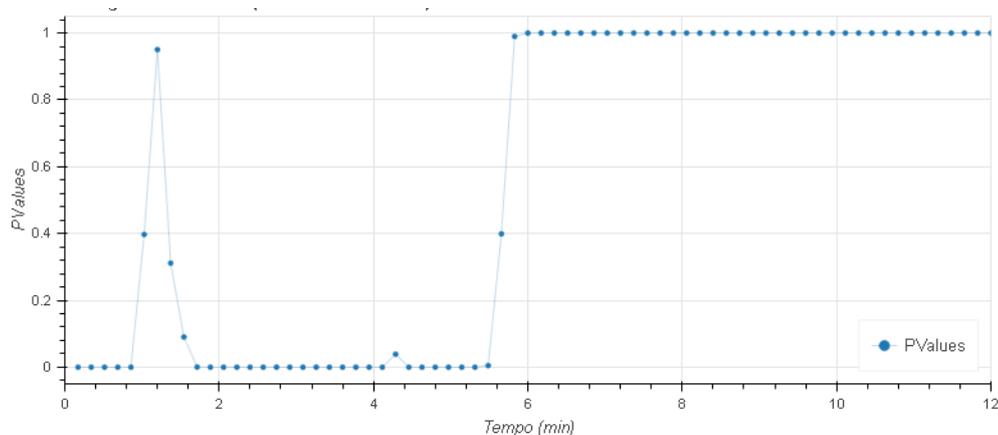


Gráfico 3-30 - Teste de hipótese das médias em cada intervalo de tempo (Modificado < Normal).

Fonte: Dados da pesquisa

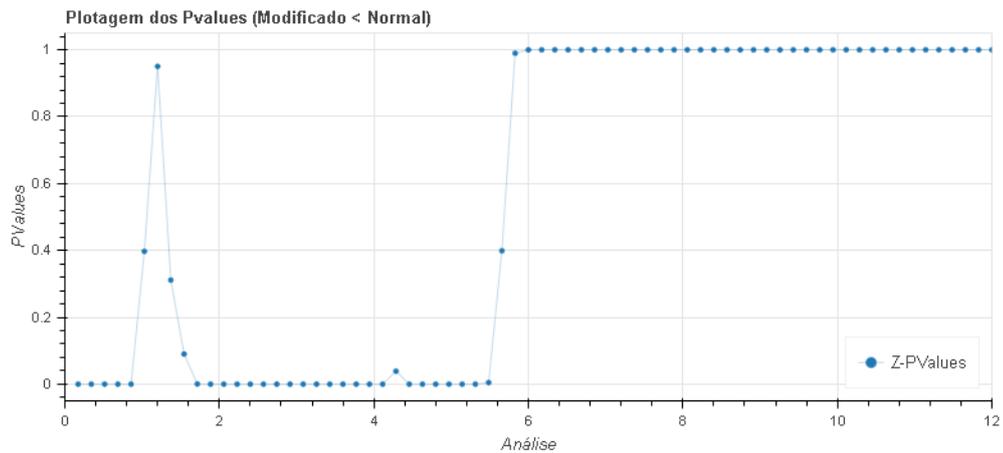


Gráfico 3-31- Teste de hipótese da variância em cada intervalo de tempo (Modificado < Normal).  
Fonte: Dados da pesquisa

Para melhorar o entendimento dos dois últimos estágios da curva de força do inserto modificado, a avaliação das forças separadas foi realizada. O Gráfico 3-34 exhibe a força de corte, que possui o maior peso em módulo sobre a força de usinagem. O comportamento do perfil correspondente a força de corte apresentou-se com os mesmos estágios e respostas da força de usinagem.

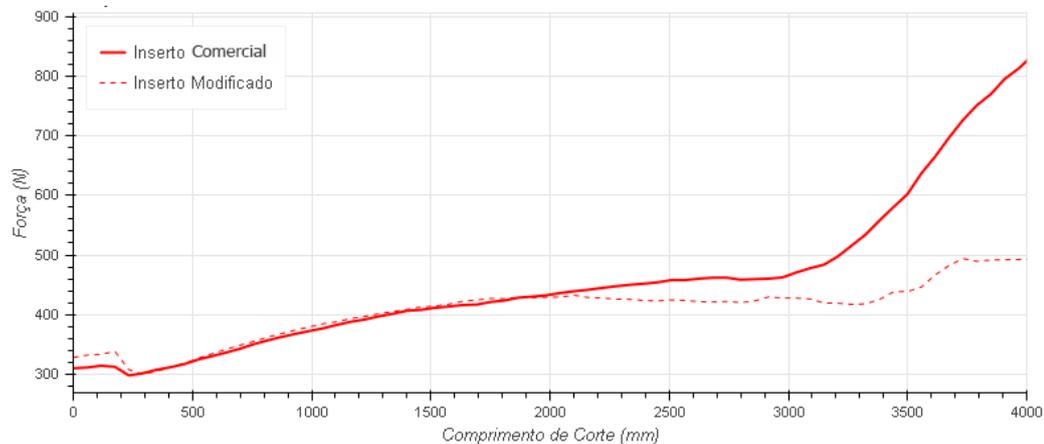


Gráfico 3-32 - Força de corte dos insertos comerciais e modificados, excluindo ensaios com interrupção.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

Os perfis da força de avanço foram representados no Gráfico 3-33, onde foi possível identificar que a força de avanço do inserto comercial aumentou entre 6 e 10 min e em seguida inicia uma redução. Este aumento da força de avanço pode ser associado ao aumento do

desgaste de flanco. Um desgaste de flanco de 0,5mm pode aumentar a força de avanço em cerca de 100% (KLOCKE, 2011).

Contudo, o perfil referente ao inserto modificado, também apresentou um aumento das forças de avanço, porém este aumento se interrompeu em 9 min e, logo em seguida, iniciou uma redução elevada da força, chegando a valores menores que os iniciais. As componentes da força de usinagem estão diretamente relacionadas com a resistência mecânica do material da peça, e tais limites por sua vez, estão ligados à composição do material e à temperatura que são submetidos (TRENT e WRIGHT, 2000). O comportamento similar de aumento da força de avanço no intervalo de 6 a 9 min do inserto comercial e o modificado, indica que este aumento estaria relacionado com a evolução do desgaste. Após 9 min de contato, a camada de revestimento do inserto foi rompida, aumentando a taxa de desgaste. Este fenômeno explica a evolução da curva relacionada ao inserto comercial. Ao mesmo tempo, o substrato da ferramenta foi exposto, acarretando uma alteração do fluxo de calor, uma vez que os revestimentos também possuíam a função de barreira térmica. Além disso, existe mais uma fonte geradora de calor, a do cavaco na lateral de folga da ferramenta, caracterizada pelo desgaste de abrasivo/adesivo encontrado nas ferramentas. A fricção do cavaco na lateral do inserto em altíssima velocidade elevou ainda mais as temperaturas. O inserto comercial, por possuir mais massa para dissipar do calor adicional não foi diretamente afetado, o que não aconteceu com o inserto modificado. A nova geometria aumentou o fluxo de calor para a peça, reduzindo assim sua resistência mecânica e as forças de avanço e de corte. Um dos indícios do aumento da temperatura foi o perfil de microdureza, que apresentou valores menores logo após a superfície.

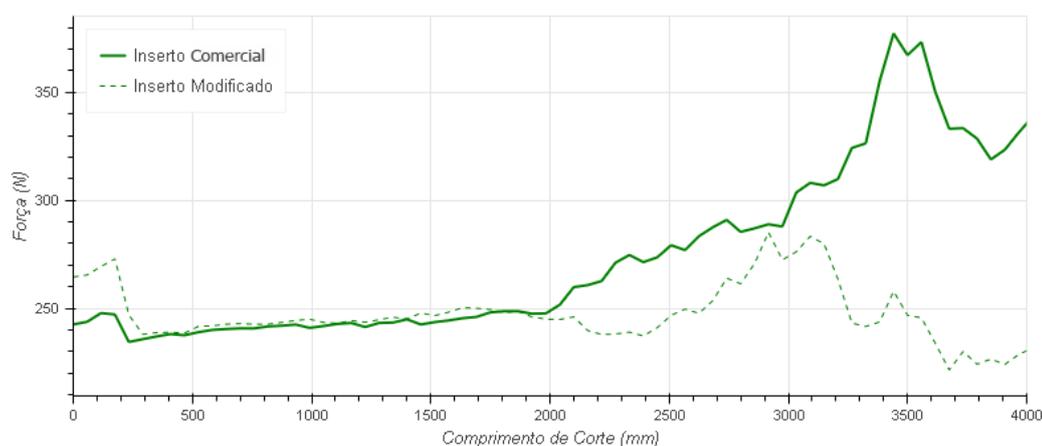
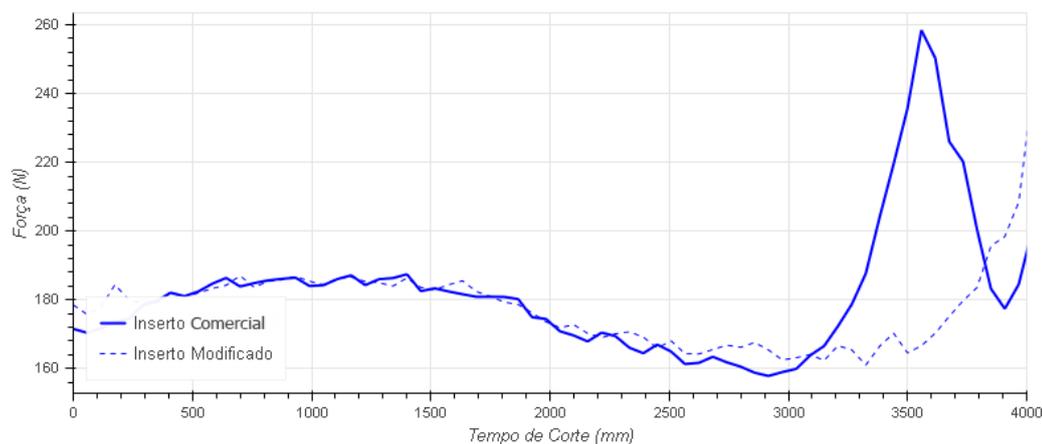


Gráfico 3-33 - Força de avanço dos insertos comerciais e modificados, excluindo ensaios com interrupção.

*Fonte: Resultado da pesquisa.*

O comportamento da força passiva do inserto comercial e o modificado foram similares, apresentando um crescimento ao final de vida da ferramenta. A força passiva é influenciada pela área de contato do raio de ponta da ferramenta (KLOCKE, 2011). O aumento do contato na região da aresta de corte promoveu o aumento da força passiva.



*Gráfico 3-34 - Força passiva dos insertos comerciais e modificados, excluindo ensaios com interrupção.  
Fonte: Resultado da pesquisa.*

Os dados de força foram coletados durante a usinagem com a profundidade de usinagem (ap) de 2,5mm. Após tratamento, seus valores médios foram representados no Gráfico 3-35. O primeiro exibe todas as forças que compõem a força de usinagem, seguido do gráfico correspondente a força de corte, avanço e passiva. Este torneamento foi realizado com ferramentas novas.

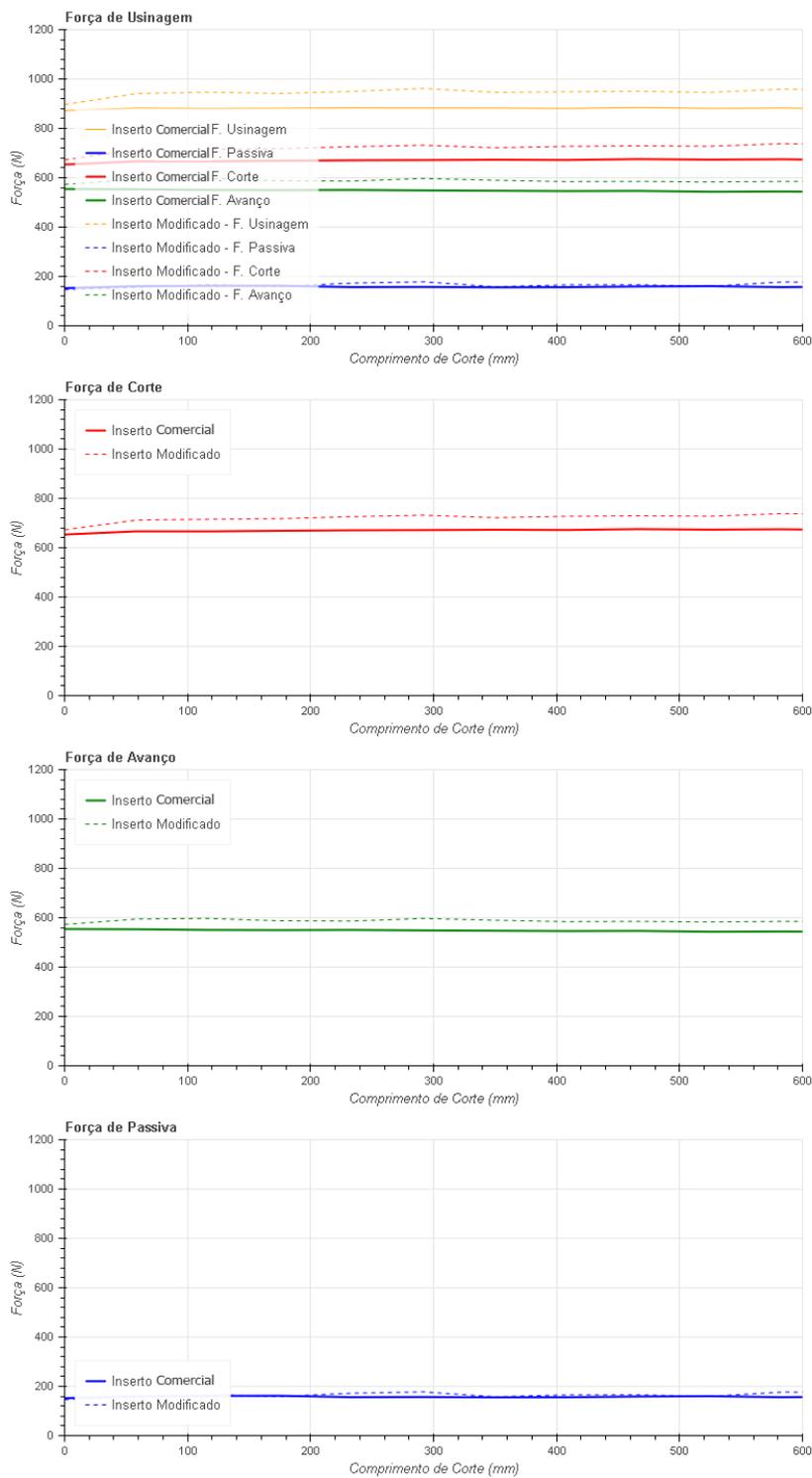


Gráfico 3-35 - Forças coletadas durante a usinagem com os insertos comerciais e modificados. Profundidade de usinagem (ap) 2.5 mm.  
Fonte: Dados da pesquisa.

Os dados da força de corte, passiva e de avanço exibiram o mesmo comportamento para o inserto comercial e modificado. O ligeiro aumento das forças é característico do início de

usinagem, onde ocorre um leve arredondamento da aresta de corte, que, por sua vez, ocasiona um ligeiro aumento nestas forças.

### 3.6 Discussão geral

Esta breve discussão foi elaborada considerando o efeito da temperatura sobre o processo, mesmo não tendo sido realizada a aquisição das temperaturas. As hipóteses foram construídas levando em consideração os resultados coletados e analisados, juntamente com fontes teóricas.

Durante o atrito entre duas superfícies, quase todo trabalho de fricção aparece em forma de calor. Próximo as estas superfícies, o aumento da temperatura influencia tanto no coeficiente de atrito quanto na taxa de desgaste (ASHBY, ABULAWI e KONG, 1991).

Alguns parâmetros, tais como coeficiente de atrito, tempo de contato, área de contato real, são cruciais para o entendimento da variação de temperatura nas superfícies. Se todo calor de fricção fluísse uniformemente na área de contato entre duas superfícies em deslizamento, a temperatura que apareceria nestas superfícies poderia ser chamada de temperatura da massa ( $T_b$ ), independentemente da geometria dos corpos. Entretanto, em razão das asperezas superficiais, as superfícies em fricção possuem uma área de contato real muito menor que a aparente, o que explica a extrema elevação da temperatura na interface (COMMITTEE e OTHERS, 2001).

O fluxo de calor total médio,  $q_{av}$ , gerado pelo atrito entre as duas superfícies carregadas pode ser expresso como (Eq. 10) (ASHBY, ABULAWI e KONG, 1991):

$$q_{av} = \mu * P_{av} * V_r \quad [W/m^2] \quad (Eq. 10)$$

Onde:

$\mu$  - Coeficiente de atrito entre as superfícies

$P_{av}$  - Pressão média

$V_r$  - Velocidade relativa.

Blau (2008) apresentou a equação a seguir (Eq. 11) como um desmembramento da apresentada por Ashby, levando em consideração a geometria e características térmicas do material.

$$T_f = T_b + \frac{\mu P v}{A_n} \left[ \frac{1}{(k_1/l_1) + (k_2/l_2)} \right] \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

$T_f$  – Temperatura flash

$T_b$  - Temperatura do calor dissipado

$A_n$  – Área de contato nominal

$\mu$  - Coeficiente de atrito entre os materiais

$P$  – Carga normal

$v$  – Velocidade

$k$  – Coeficiente térmico do material

$l$  – Distância eficaz de difusão térmica

A hipótese apresentada que o principal formador do desgaste de abrasivo/adensivo presente nos insertos comerciais e modificados, foi o atrito entre o cavaco e a lateral de folga da ferramenta. Esta fricção constante e em alta velocidade acrescentou mais uma fonte de fluxo de calor na ferramenta. A Figura 3-24 exhibe as possíveis fontes geradoras de fluxo de calor para a ferramenta, sendo que “a” corresponde a fonte localizada na superfície de saída da ferramenta, o “b” a superfície de folga que sofre atrito com a peça durante a usinagem e “c” é a região de contato do cavaco na superfície de folga.

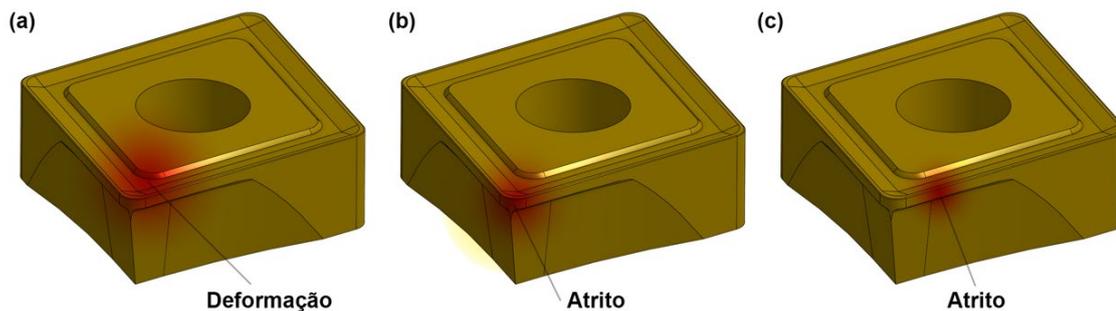


Figura 3-24 - Fontes de geradoras de fluxo de calor.  
Fonte: Dados da pesquisa.

Baseando na equação 11, o fluxo de calor na fricção entre dois corpos relaciona-se com a geometria, o material, coeficiente de atrito, pressão e a velocidade, com exceção da geometria, os demais fatores não variaram. A diferença geométrica entre o inserto comercial e o modificado, apresenta indícios que houve um aumento diferenciado da temperatura entre os dois modelos, sendo que o modificado teve uma elevação maior que o inserto comercial.

O coeficiente de atrito ( $\mu$ ) é uma característica única de um par tribológico, no caso do desgaste de abrasivo/adesivo, o par foi o aço ABNT 1045 na forma de cavaco e o revestimento da ferramenta. A condutividade térmica também é uma característica única de cada material. A carga normal e velocidade relativa foram as aplicadas pelo cavaco sobre o revestimento. Desta forma a expressão pode ser simplificada em:

$$T_f = T_b + \frac{\text{Constante}}{A_n} \quad [\text{K}] \quad (\text{Eq. 12})$$

A presença da área no divisor da equação, indica que quanto menor a área maior a elevação da temperatura.

O desgaste de flanco foi maior no inserto modificado, comparado com o inserto comercial o que indica uma diferença entre a temperatura das ferramentas.

Os revestimentos das ferramentas eram compostos de uma camada múltipla de TiN, TiCN e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, sendo que a aplicação do TiN se deu somente na superfície de saída. Muitas vezes, TiCN são revestimentos multicamadas, isto é, depositada com o aumento do teor de carbono no sentido da superfície do revestimento. Esta técnica promove considerável aumento

na dureza, o que é positivo para a resistência ao desgaste, mas também aumenta a fragilidade (BERGMANN, KAUFMANN, *et al.*, 1990). A resistência excepcional de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tanto contra a abrasão e desgaste de difusão quanto a sua estabilidade química, faz  $\text{Al}_2\text{O}_3$  um candidato óbvio como um material duro para revestimento. Por ser muito quebradiço,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  não é geralmente usado na forma de monocamada, mas somente em combinação com outros materiais duros em revestimentos de camadas múltiplas (SCHEDLER, 1988). Devido à sua elevada estabilidade química como um material de revestimento, óxido de alumínio, têm uma excelente resistência contra o desgaste cratera, mas possui apenas uma pequena resistência ao choque térmico e baixa tenacidade (KLOCKE, 2011). A Figura 3-25 foi obtida por meio de microscopia eletrônica de varredura e exibe as camadas do revestimento.

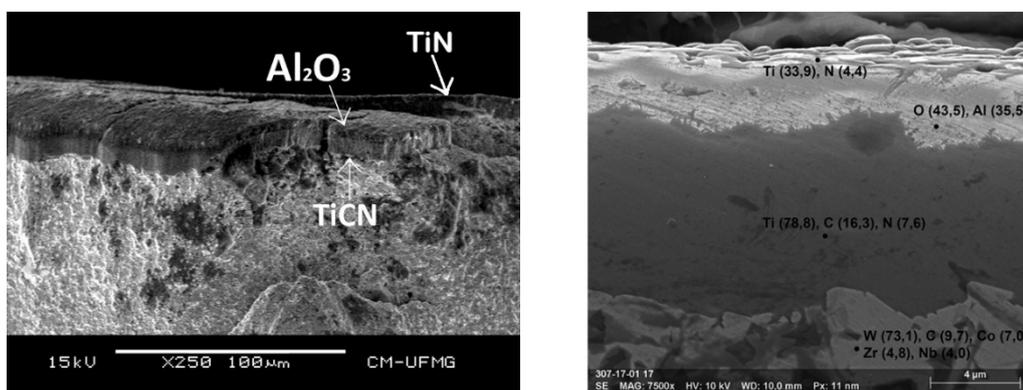


Figura 3-25 – Revestimento de  $\text{TiCN}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiN}$  para os insertos estudados.  
Fonte: (a) Dados da pesquisa. (b) Reis, Pereira, Santos *et al.*

O óxido de alumínio possui um coeficiente térmico ( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) 5 vezes menor quando comparado com  $\text{TiCN}$  e 13 vezes contra o metal duro. Como consequência, ele transfere menos calor para o interior da ferramenta. Entretanto, quando a camada de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é removida, as taxas de transferência se elevam drasticamente, principalmente quando o desgaste atinge o substrato.

Após a marca de 6min de contato de usinagem, o revestimento da ferramenta foi removido, o que promoveu o contato do substrato com a peça e o cavaco. A condutividade térmica do substrato foi muito superior à do revestimento perdido, o que causou uma elevação de temperatura considerável na ferramenta. Devido a geometria do inserto modificado, esta temperatura se concentrou na aresta de corte e na superfície de folga modificada. Por meio do contato da ferramenta com a peça e o processo de condutividade térmica, a temperatura da peça se elevou ao ponto de reduzir suas resistências mecânicas. Tal hipótese pode ser verificada com

a redução das forças de corte após 6 min, principalmente da força de avanço após 9 min de contato. Outro fator que indica a elevação de temperatura para o inserto modificado, foi o perfil de microdureza, principalmente os pontos mais próximos da superfície, onde estes apresentaram valores de dureza menores, o que normalmente é relacionado com aumento de temperaturas.

A elevada fragilidade do revestimento e a diferença entre os coeficientes de dilatação térmica favoreceram o aparecimento e propagação das trincas do material. Após o desgaste chegar ao substrato, o mesmo sofreu dilatação diferenciada no revestimento e, conseqüentemente, apresentou trincas superficiais. Tal fenômeno, aliado as altas pressões durante o corte, propagaram as trincas e causaram o desprendimento de material em uma taxa elevada. Tal hipótese é fortalecida pela presença de trincas nos inserts e o tipo de desgaste encontrado na região entre o abrasivo/adesivo e o desgaste de flanco.

A Figura 3-26 exibe a espessura total do revestimento e a presença de trincas propagadas na região entre o desgaste de abrasivo/adesivo e de flanco.

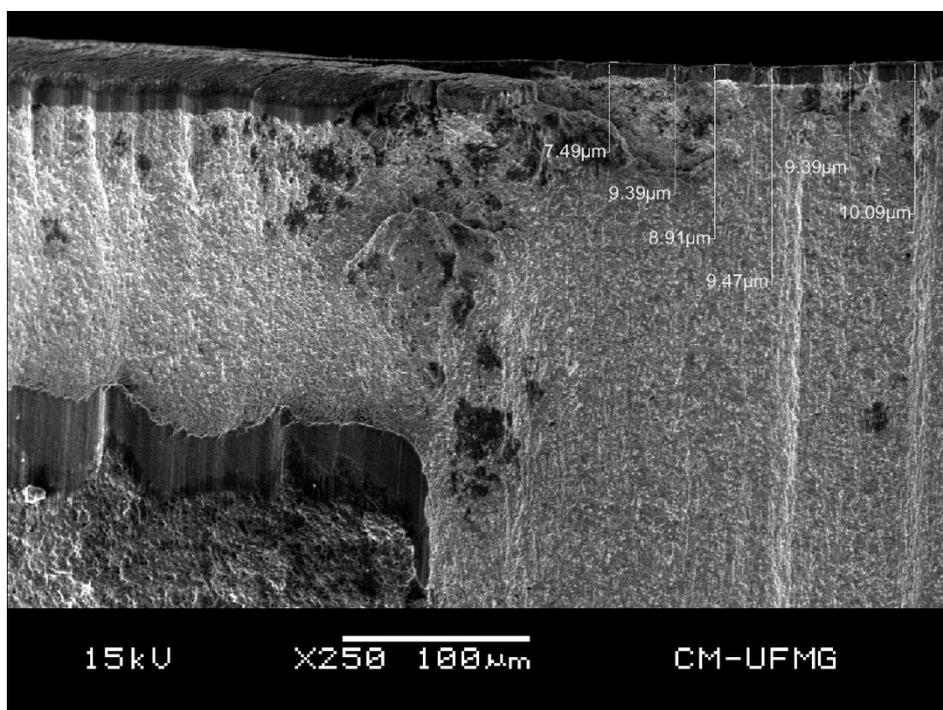


Figura 3-26 - Espessura total do revestimento de TiCN e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.  
Fonte: Dados da pesquisa.

As partículas extremamente duras de TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiCN desprendidas promoveram microcortes, formando um padrão de ranhuras visualizado no desgaste de flanco. A presença do substrato em toda a extensão do desgaste de flanco, mais os padrões de ranhura e o revestimento exposto nas extremidades, indicam um forte desgaste abrasivo.

No processo de oxidação do metal duro (WC), o material pode chegar a um aumento de peso de 20% (CASAS, RAMIS, *et al.*, 2001). Uma das formas de identificar este processo é a presença de porosidades macroscópicas na superfície, proveniente da expansão de gases resultantes da reação química (GU, JEONG, *et al.*, 2012). A presença de uma coloração atípica na superfície logo abaixo da aresta de corte do inserto modificado, indica uma reação química localizada (Figura 3-27-a). Após a limpeza da ferramenta, o metal aderido na ferramenta foi totalmente removido. Por afinidade química e estabilidade dos átomos/moléculas presentes, o ácido nítrico inicialmente irá reagir com os metais e não com os óxidos e materiais cerâmicos. A hipótese é que o aparente material aderido que foi percebido na Figura 3-27-b seja trióxido de tungstênio. A presença de ranhuras de retificação de uma forma contínua, inclusive na parte mais elevada do material, permite supor que a superfície foi manufaturada por inteiro e que houve uma expansão do material mais próximo da ponta. A característica de um material esponjoso, ou seja, com grandes poros, também é um indício que houve oxidação.

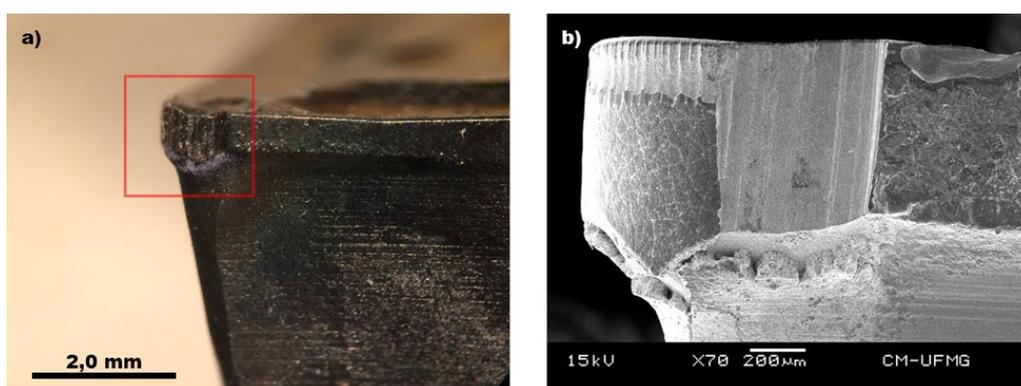


Figura 3-27 - Possível presença de trióxido de tungstênio.  
Fonte: Dados da pesquisa

O aumento da temperatura promove o aumento da taxa de oxidação e, conseqüentemente, do peso do material oxidado (BASU e SARIN, 1996). O Figura 3-28 exibe o perfil do ganho de peso em relação ao tempo para três temperaturas. A possível formação de

trióxido de tungstênio no inserto modificado e sua geometria, sugere que as temperaturas nesta região foram próximas de 800 °C.

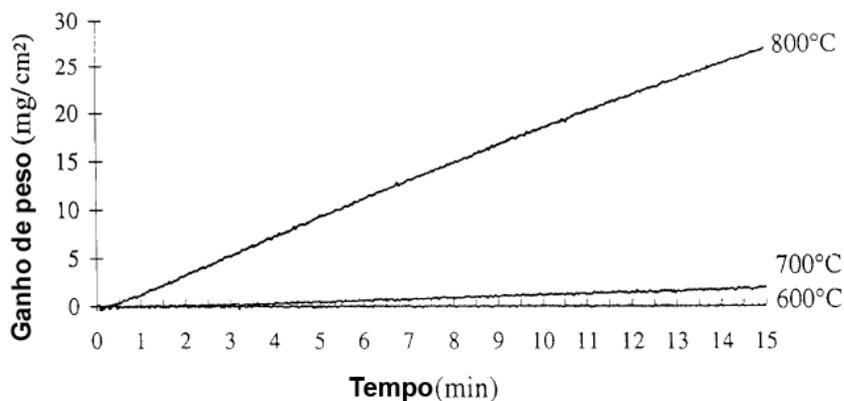


Figura 3-28 - Curva do ganho de peso em relação ao tempo para as temperaturas de 600, 700 e 800°C em uma atmosfera de 90% de ar.

Fonte: Basu e Sarin, 1996 Figura adaptada

Os Gráfico 3-36 e Gráfico 3-37 exibem uma representação da elevação de temperatura na ferramenta e, conseqüentemente, da peça torneada em relação ao comportamento da força de usinagem. Uma tabela logo abaixo do gráfico indica os mecanismos e os efeitos do desgaste e temperatura sobre o processo. O Gráfico 3-36 representa o processo do inserto comercial e foi dividido em 3 partes, similar a curva que representa a vida padrão de uma ferramenta.

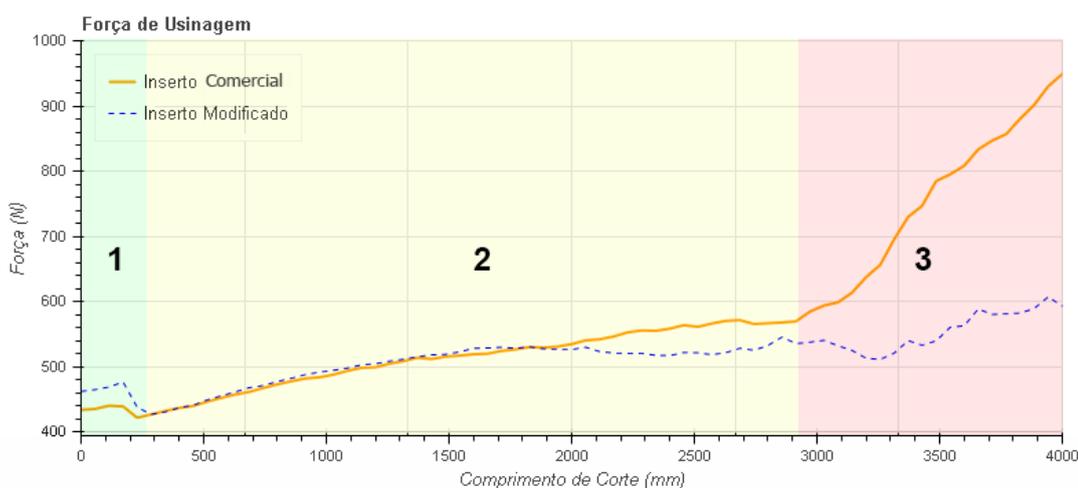


Gráfico 3-36 - Força de usinagem e temperatura estimada nos estágios do desgaste da ferramenta comercial.

Fonte: Dados da pesquisa

Estágio	Desgaste	Efeito
1	Desgaste leve, Arredondamento da aresta de corte.	<b>Força</b> – Leve elevação <b>Temperatura</b> – Alta elevação <b>Rugosidade</b> – Sem efeito <b>Microdureza</b> – Sem efeito
2	Existência de um desgaste de flanco, presença da camada de revestimento, início do desgaste de abrasivo/adesivo.	<b>Força</b> – Leve elevação <b>Temperatura</b> – Estável <b>Rugosidade</b> – Sem efeito <b>Microdureza</b> – Sem efeito
3	Existência de um desgaste de flanco em crescimento acelerado, falta da camada de revestimento, desgaste de abrasivo/adesivo elevado, taxa de desgaste elevada entre o abrasivo/adesivo e o flanco.	<b>Força</b> – Elevação acentuada. <b>Temperatura</b> – Elevação <b>Rugosidade</b> – Aumento <b>Microdureza</b> – Aumento

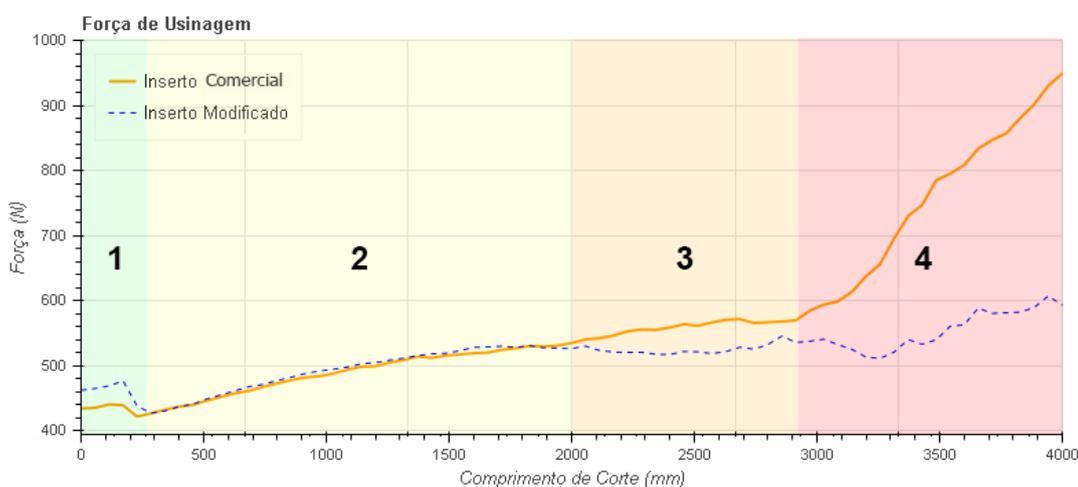


Gráfico 3-37 - Força de usinagem e temperatura estimada nos estágios do desgaste da ferramenta modificada.  
Fonte: Dados da pesquisa

Estágio	Desgaste	Efeito
1	Desgaste leve, Arredondamento da aresta de corte.	<b>Força</b> – Leve elevação <b>Temperatura</b> – Alta elevação <b>Rugosidade</b> – Sem efeito <b>Microdureza</b> – Sem efeito

- 2 Existência de um desgaste de flanco, presença da camada de revestimento, início do desgaste de abrasivo/adesivo. **Força** – Leve elevação  
**Temperatura** – Estável  
**Rugosidade** – Sem efeito  
**Microdureza** – Sem efeito
- 3 Existência de um desgaste de flanco, presença da camada de revestimento, início do desgaste de abrasivo/adesivo. **Força** – Estabilização.  
**Temperatura** – Elevação  
**Rugosidade** – Sem efeito  
**Microdureza** – Redução
- 4 Existência de um desgaste de flanco em crescimento acelerado, falta da camada de revestimento, desgaste de abrasivo/adesivo elevado, taxa de desgaste elevada entre o abrasivo/adesivo e o flanco. **Força** – Leve elevação.  
**Temperatura** – Elevação  
**Rugosidade** – Aumento  
**Microdureza** – Redução

#### 4. CONCLUSÕES

Por meio da análise dos resultados da força de usinagem e suas componentes, rugosidade superficial e microdureza da subcamada da peça torneada e da investigação dos mecanismos de desgaste predominantes no desgaste da ferramenta, pode-se concluir que:

- A modificação geométrica na face de folga da ferramenta promoveu redução média de 58% em relação ao inserto comercial na força de usinagem, de 70% para a força de corte, de 54% para a força de avanço e um aumento de 15% na força passiva.
- A modificação geométrica tendeu a aumentar a vibração do sistema, influenciando na força passiva e a amplitude dos seus valores.
- A modificação geométrica na face de folga da ferramenta promoveu redução média de 16% em relação ao inserto comercial na microdureza subsuperficial.
- O inserto modificado apresentou influência negativa sobre a qualidade superficial das peças torneadas, promovendo um aumento nos parâmetros Ra de 28%, Rt de 25% e Rz de 30%.
- Os mesmos mecanismos de desgaste presentes no inserto comercial foram detectados no modificado, e atuaram na mesma proporção.
- A força de usinagem aumentou na mesma proporção do aumento da profundidade de usinagem (2,5x de aumento).
- Não houve alteração na microdureza dos cavacos gerados pelo inserto comercial e modificado, nem mesmo com o aumento da profundidade de usinagem de 1 para 2.5 mm. A modificação da ferramenta não promoveu alterações na de formação do cavaco.

## 5. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Realizar os ensaios com aplicação de fluido de corte, analisando o comportamento das forças de corte e a vida.
- Realizar ensaios em materiais de difícil usinagem, como aço inoxidável, pois é amplamente empregado na indústria de petróleo e possui um comportamento térmico diferente do aço carbono.
- Realizar ensaios utilizando profundidade de usinagem (ap) com objetivo de avaliar a formação do cavaco e o desgaste de abrasivo/adensivo.
- Realizar ensaios utilizando realizando medição de vibração com objetivo de avaliar a alteração deste parâmetro.

## 6. REFERÊNCIAS

ABNT. ISO 3002-1:1982 - Grandezas básicas em usinagem e retificação Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte — Termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos. **ABNT**, 1982.

ABNT. ABNT NBR 6162:1989 - Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais. **ABNT**, 1989.

ABNT. ISO 513:2012 - Classificação e aplicação de metais duros para a usinagem com arestas de corte definidas — Designação dos grupos principais e grupos de aplicação. **ABNT**, 2015.

ANTONY, J. **Design of Experiments for Engineers and Scientists (Elsevier Insights)**. [S.l.]: Elsevier, 2014. Disponível em: <<https://www.xarg.org/ref/a/B00ISSTWO6/>>.

ASHBY, M. F.; ABULAWI, J.; KONG, H. S. Temperature maps for frictional heating in dry sliding. **Tribology Transactions**, v. 34, p. 577–587, 1991.

ASHBY, M. F.; LIM, S. C. Wear-mechanism maps. **Scripta Metallurgica et Materialia**, v. 24, p. 805–810, 1990.

ASTAKHOV, V. P. The assessment of cutting tool wear. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, p. 637–647, 2004. ISSN: 08906955.

ASTAKHOV, V. P. **Tribology of Metal Cutting**. revised. ed. [S.l.]: Elsevier, 2006. 392 p. ISBN: 9780080466859.

ASTAKHOV, V. P. Editorial: tribology at the forefront of study and research on metal cutting. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, v. 2, p. 309, 2007. ISSN: 1748-5711.

BASU, S. N.; SARIN, V. K. Oxidation behavior of WC-Co. **Materials Science and Engineering: A**, v. 209, p. 206–212, 1996.

BERGMANN, E. et al. Ion-plated titanium carbonitride films. **Surface and Coatings Technology**, v. 42, p. 237–251, 1990.

BHUSHAN, B. **Introduction To Tribology**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. 744 p. ISBN: 9781118403228.

BLAU, P. J. **Friction Science and Technology: From Concepts to Applications** (Mechanical Engineering). [S.l.]: [s.n.], 2008. 432 p. ISBN ISBN: 9780874216561.

BLAU, P. J. **Tribosystem Analysis: A Practical Approach to the Diagnosis of Wear Problems**. [S.l.]: [s.n.], v. 1, 2017. 194 p. ISBN ISSN: 978-1-4987-0051-1.

BRAMMERTZ, P.-H. **Die Entstehung der Oberflächenrauheit beim Feindrehen**. [S.l.]: [s.n.], 1961.

CASAS, B. et al. Oxidation-induced strength degradation of WC–Co hardmetals. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 19, p. 303–309, 2001.

COELHO, R. T. et al. Some effects of cutting edge preparation and geometric modifications when turning INCONEL 718™ at high cutting speeds. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 148, p. 147–153, maio 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.001>>.

COMMITTEE, A. S. M. I. H.; OTHERS. The Materials Information Company. **Technology**, v. 2, p. 90166–8, 2001.

COROMANT, S. **Modern metal cutting: a practical handbook**. [S.l.]: Sandvik Coromant, 1994. ISBN ISBN: 9789197229906. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=aOISAAAAMAAJ>>.

DAS, A. et al. Comparative Assessment on Machinability Aspects of AISI 4340 Alloy Steel Using Uncoated Carbide and Coated Cermet Inserts During Hard Turning. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 41, p. 4531–4552, 2016. ISSN ISBN: 1336901621600 ISSN: 21914281.

DAS, S. R.; DHUPAL, D.; KUMAR, A. Study of surface roughness and flank wear in hard turning of AISI 4140 steel with coated ceramic inserts. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 29, p. 4329–4340, 2015. ISSN ISSN: 1738494X.

DAVIM, J. P.; MARANHÃO, C. A study of plastic strain and plastic strain rate in machining of steel AISI 1045 using FEM analysis. **Materials & Design**, v. 30, p. 160–165, 2009.

DENKENA, B. et al. Increasing productivity in turning of hard-to-cut materials by means of modified flank faces. **Procedia Manufacturing**, v. 14, p. 97–104, 2017. ISSN ISSN: 23519789. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.11.011>>.

DENKENA, B.; BIERMANN, D. Cutting edge geometries. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 63, p. 631–653, 2014. ISSN ISSN: 17260604. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.009>>.

DHAGE, S.; JAYAL, A. D.; SARKAR, P. Effects of surface texture parameters of cutting tools on friction conditions at tool-chip interface during dry machining of AISI 1045 steel. **Procedia Manufacturing**, v. 33, p. 794–801, 2019. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.100>>.

DIN. DIN 6584 : 1982 - TERMS OF THE CUTTING TECHNIQUE; FORCES, ENERGY, WORK, POWER, 1982.

ENDRES, W. J.; KOUNTANYA, R. K. The effects of corner radius and edge radius on tool flank wear. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 4, p. 89–96, 2002. ISSN ISSN: 15266125.

FANG, Z.; OBIKAWA, T. Cooling performance of micro-texture at the tool flank face under high pressure jet coolant assistance. **Precision Engineering**, v. 49, p. 41–51, 2017. ISSN ISSN: 01416359. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.008>>.

FERRARESI, D. **Fundamentos Da Usinagem Dos Metais**. [S.l.]: EDGARD BLUCHER, 1970. ISBN ISBN: 9788521208594. Disponivel em: <<https://books.google.com.br/books?id=qHdFswEACAAJ>>.

FOFANA, M. S.; EE, K. C.; JAWAHIR, I. S. Machining stability in turning operation when cutting with a progressively worn tool insert. **Wear**, v. 255, p. 1395–1403, 2003. ISSN ISSN: 00431648.

FOX-RABINOVICH, G.; TOTTEN, G. E. **Self-Organization During Friction: Advanced Surface-Engineered Materials and Systems Design**. [S.l.]: CRC Press, 2006. 459 p. ISBN ISBN: 9781420017861.

FRITZ KLOCKE. **Manufacturing Processes 1**. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. ISBN ISBN: 9783642119781,9783642119798. Disponivel em: <[https://openlibrary.org/books/OL25571836M/Manufacturing\\_Processes\\_1](https://openlibrary.org/books/OL25571836M/Manufacturing_Processes_1)>.

GADELMAWLA, E. S. et al. Roughness parameters. **Journal of materials processing Technology**, v. 123, p. 133–145, 2002.

GRGURAS, D.; PUSAVEC, F. Influence of rake face texturing on machining performance of carbide tools. **Procedia CIRP**, v. 81, p. 904–907, 2019. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.224>>.

GRIFFITHS, B. **Manufacturing Surface Technology: Surface Integrity and Functional Performance (Manufacturing Engineering Modular)**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN ISBN: 1857180291. Disponivel em: <<https://www.xarg.org/ref/a/1857180291/>>.

GRZESIK, W. Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools. **Wear**, v. 265, p. 327–335, jul. 2008. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.11.001>>.

GU, W.-H. et al. Thermal oxidation behavior of WC–Co hard metal machining tool tip scraps. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, p. 1250–1256, 2012.

HOLLECK, H. W. Properties of titanium based hard coatings. **J. Vac. Sci. Technol**, 1986.

HUANG, Y.; LIANG, S. Y. Modeling of Cutting Forces Under Hard Turning Conditions Considering Tool Wear Effect. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 127, p. 262, 2005. ISSN ISSN: 10871357.

HUDSON, J. B. **Surface Science: An Introduction**. [S.l.]: Wiley, 1998. ISBN ISBN: 9780471252399LCCN: lc91021912. Disponivel em: <<https://books.google.com.br/books?id=TTPMbOGqF-YC>>.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2017. 412 p. ISBN ISBN: 9780081009512.

JINDAL, P. C. et al. Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN coated cemented carbide tools in turning. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 17, p. 163–170, 1999. ISSN ISSN: 02634368.

JONES, A. C. **Chemical Vapor Deposition: Precursors, Processes and Applications**. [S.l.]: [s.n.], 2009. 582 p. ISBN ISBN: 9780854044658.

K. HOLMBERG, A. M. **Coatings Tribology: Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering**. [S.l.]: [s.n.], v. 28, 1994. 441 p. ISBN ISBN: 9780080875927.

KAJDAS, C.; HARVEY, S. S. K.; WILUSZ, E. **Encyclopedia of Tribology**. [S.l.]: Elsevier, 1990. 478 p. ISBN ISBN: 9780444884015.

KHADEM, M. et al. Tribology of multilayer coatings for wear reduction: a review. **Friction**, v. 5, p. 248–262, 2017.

KIMAKH, K. et al. Analytical Model for Predicting Surface Roughness As a Function of Aisi 1045 Steel Machining Parameters, v. X, 2018.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009. 11–12 p. ISBN ISBN: 978-3-540-92258-2. Disponivel em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-92259-9>>.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011. ISBN ISBN: 978-3-642-11978-1. Disponivel em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-11979-8>>.

KUMAR, C. S.; PATEL, S. K. Application of surface modification techniques during hard turning: Present work and future prospects. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 76, p. 112–127, nov. 2018. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.06.003>>.

LOFAJ, F.; KAGANOVSKII, Y. S. Kinetics of WC-Co oxidation accompanied by swelling. **Journal of materials science**, v. 30, p. 1811–1817, 1995.

LOFFLER, F. H. W. Systematic approach to improve the performance of PVD coatings for tool applications. **Surface and Coatings Technology**, v. 68, p. 729–740, 1994.

M. NARASIMHA, S. R. Coating Performance on Carbide Inserts. **International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)**, 2014.

MA, J.; DUONG, N. H.; LEI, S. Numerical investigation of the performance of microbump textured cutting tool in dry machining of AISI 1045 steel. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 19, p. 194–204, ago. 2015. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.10.001>>.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem Dos Materiais**. EDGARD BLU. ed. [S.l.]: [s.n.], 2009. 312 p. ISBN ISBN: 9788521204527.

MARTELLOTTI, E. M.; ERNST, H. **Physics of Metal Cutting**. [S.l.]: American Gear Manufacturers Association, 1942. ISBN ISBN: 9781555892142. Disponivel em: <<https://books.google.com.br/books?id=aA2VAAAACAAJ>>.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. [S.l.]: Wiley, 2008. ISBN ISBN: 0470128666. Disponivel em: <<https://www.xarg.org/ref/a/0470128666/>>.

MONTGOMERY, D. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. [S.l.]: Wiley, 2010. ISBN ISBN: 0470053046. Disponivel em: <<https://www.xarg.org/ref/a/0470053046/>>.

NOORDIN, M. Y. et al. Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 145, p. 46–58, 2004. ISSN ISSN: 09240136.

ORRA, K.; CHOUDHURY, S. K. Tribological aspects of various geometrically shaped micro-textures on cutting insert to improve tool life in hard turning process. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 31, p. 502–513, 2018. ISSN ISSN: 15266125. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.12.005>>.

PALMAI, Z. Cutting temperature in intermittent cutting. **Periodica Polytechnica Mechanical Engineering**, v. 31, p. 61–78, 1987.

PANKINE, A. V. Usinage des metaux par la coupe. **Editions Ecola Superieure**, 1965.

PARK, K. H.; KWON, P. Y. Flank wear of multi-layer coated tool. **Wear**, v. 270, p. 771–780, 2011. ISSN ISSN: 00431648. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.030>>.

PAWADE, R. S.; JOSHI, S. S.; BRAHMANKAR, P. K. Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, p. 15–28, 2008. ISSN ISSN: 08906955.

RAJBONGSHI, S. K.; SARMA, D. K. Performance parameters studies in machining of AISI D2 steel with dot-textured, groove-textured & non-textured cutting tool at the flank face. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 83, p. 104970, 2019. ISSN ISSN: 22133917. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.104970>>.

RECH, J. A multiview approach to the tribological characterisation of cutting tool coatings for steels in high-speed dry turning. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, v. 1, p. 27, 2015. ISSN ISBN: 3347743849 ISSN: 1748-5711.

RECH, J.; MOISAN, A. Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, p. 543–550, 2003.

REIS, B. C. M. et al. Influencia do material da ferramenta de corte sobre a usinabilidade do aço ABNT 4340 no torneamento. **Materia (Rio de Janeiro)**, v. 24, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1517-707620190001.0647>>.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **ASPECTOS TRIBOLOGICOS DA USINAGEM DOS MATERIAIS**. [S.l.]: ARTLIBER, 2007. ISBN ISBN: 9788588098381. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=J8vOygAACAAJ>>.

SCHEDLER, W. Hartmetall für den Praktiker. Aufbau, Herstellung, Eigenschaften und industrielle Anwendung einer modernen Werkstoffgruppe. **Duesseldorf: VDI (Verein Deutscher Elektriker) Verlag, 1988**, 1988.

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. New York: Oxford University Press, v. 7, 2005. 759 p. ISBN ISBN: 9780195142068 ISSN: 01232665.

STEPHENSON, D. A. J. S. A. **Metal Cutting Theory and Practice**. [S.l.]: [s.n.], v. 3, 2016. 956 p. ISBN ISBN: 9781466587540.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Coolants and lubricants BT - Metal Cutting (Fourth Edition)**. [S.l.]: [s.n.], 2000. 311–337 p. ISBN ISBN: 978-0-75-067069-2. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750670692500127>>.

VENKATESAN, K. et al. Investigation of machinability characteristics and comparative analysis under different machining conditions for sustainable manufacturing. **Measurement**, p. 107425, dez. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107425>>.

VERESCHAKA, A. et al. Investigation of wear and diffusion processes on rake faces of carbide inserts with Ti-TiN-(Ti, Al, Si)N composite nanostructured coating. **Wear**, v. 416-417, p. 72–80, dez. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.10.004>>.

VERESCHAKA, A. et al. Investigation of wear mechanisms for the rake face of a cutting tool with a multilayer composite nanostructured Cr–CrN-(Ti, Cr, Al, Si)N coating in high-speed steel turning. **Wear**, v. 438-439, p. 203069, nov. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203069>>.

WANG, W. et al. Effects on tool performance of cutting edge prepared by pressurized air wet abrasive jet machining (PAWAJM). **Journal of Materials Processing Technology**, v. 277, p. 116456, mar. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116456>>.

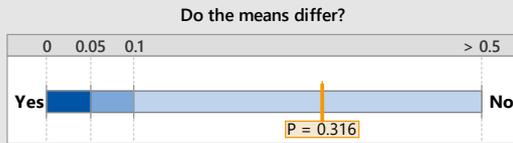
ZOREV, N. N. **Metal Cutting Mechanics**. [S.l.]: Pergamon Press, 1996. Disponível em:  
<<https://books.google.com.br/books?id=0NKNoAEACAAJ>>.

## 7. APÊNDICE

## APÊNDICE A – Dados do teste de dureza HRB

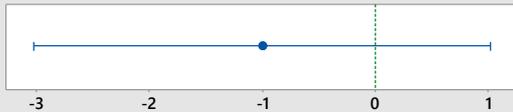
<b>Análise da dureza ao longo da seção transversal do material</b>					
<b>Ø 72.5</b>					
<b>ID</b>	<b>Média da indicação</b>	<b>Desvio padrão da indicação</b>	<b>Erro do equipamento</b>	<b>Erro total</b>	<b>Resultado da Medição</b>
1-E.	81.25	0.83	1.50	2.33	81.25 ± 2.33
1-R.	81.75	2.38	1.50	3.88	81.75 ± 3.88
2-E.	81.50	1.50	1.50	3.00	81.5 ± 3
2-R.	83.00	2.55	1.50	4.05	83 ± 4.05
3-E.	80.25	1.79	1.50	3.29	80.25 ± 3.29
3-R.	82.25	1.30	1.50	2.80	82.25 ± 2.8
4-E.	83.25	0.43	1.50	1.93	83.25 ± 1.93
4-R.	80.50	1.80	1.50	3.30	80.5 ± 3.3
5-E.	83.00	1.73	1.50	3.23	83 ± 3.23
5-R.	83.50	0.87	1.50	2.37	83.5 ± 2.37
<b>Ø 40</b>					
<b>ID</b>	<b>Média da indicação</b>	<b>Desvio padrão da indicação</b>	<b>Erro do equipamento</b>	<b>Erro total</b>	<b>Resultado da Medição</b>
1-E.	84.00	1.41	1.50	2.91	84 ± 2.91
1-R.	83.00	1.22	1.50	2.72	83 ± 2.72
2-E.	81.50	2.06	1.50	3.56	81.5 ± 3.56
2-R.	82.00	1.41	1.50	2.91	82 ± 2.91
3-E.	82.25	3.11	1.50	4.61	82.25 ± 4.61
3-R.	82.50	0.50	1.50	2.00	82.5 ± 2
4-E.	83.00	1.22	1.50	2.72	83 ± 2.72
4-R.	83.50	1.12	1.50	2.62	83.5 ± 2.62
5-E.	83.50	0.50	1.50	2.00	83.5 ± 2
5-R.	84.50	0.87	1.50	2.37	84.5 ± 2.37
<b>Ø 10</b>					
<b>ID</b>	<b>Média da indicação</b>	<b>Desvio padrão da indicação</b>	<b>Erro do equipamento</b>	<b>Erro total</b>	<b>Resultado da Medição</b>
1-E.	84.00	0.71	1.50	2.21	84 ± 2.21
1-R.	82.00	1.22	1.50	2.72	82 ± 2.72
2-E.	82.00	1.41	1.50	2.91	82 ± 2.91
2-R.	80.50	1.50	1.50	3.00	80.5 ± 3
3-E.	82.50	1.12	1.50	2.62	82.5 ± 2.62
3-R.	83.25	0.43	1.50	1.93	83.25 ± 1.93
4-E.	81.75	0.83	1.50	2.33	81.75 ± 2.33
4-R.	84.00	1.58	1.50	3.08	84 ± 3.08
5-E.	82.50	1.12	1.50	2.62	82.5 ± 2.62
5-R.	82.75	1.09	1.50	2.59	82.75 ± 2.59

### 2-Sample t Test for Dureza by Peça Summary Report

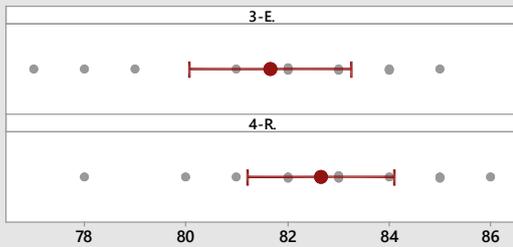


The mean of 3-E. is not significantly different from the mean of 4-R. ( $p > 0.05$ ).

95% CI for the Difference  
Is the entire interval above or below zero?



Distribution of Data  
Compare the data and means of the samples.



		Individual Samples	
Statistics		3-E.	4-R.
Sample size		12	12
Mean		81.667	82.667
95% CI		(80.08, 83.25)	(81.225, 84.109)
Standard deviation		2.4985	2.2697

#### Difference Between Samples

Statistics	*Difference
Difference	-1
95% CI	(-3.0264, 1.0264)

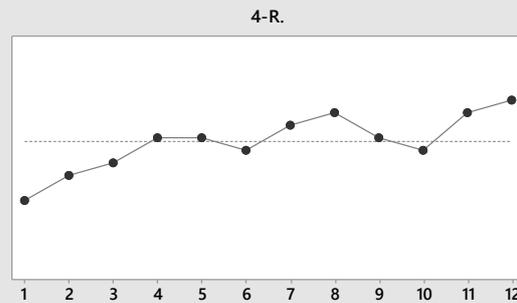
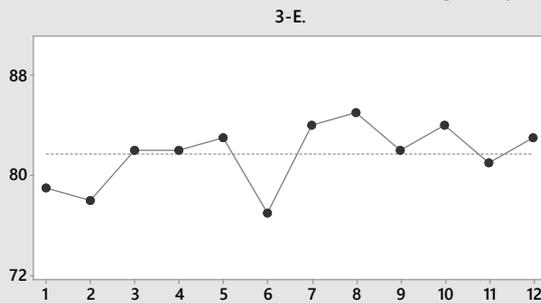
\*Difference = 3-E. - 4-R.

#### Comments

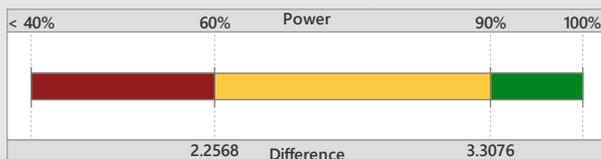
- Test: There is not enough evidence to conclude that the means differ at the 0.05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between -3.0264 and 1.0264.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.

### 2-Sample t Test for Dureza by Peça Diagnostic Report

Data in Worksheet Order  
Investigate any outliers (marked in red).



What is the chance of detecting a difference?



For  $\alpha = 0.05$  and sample sizes = 12:  
If the true means differed by 2.2568, you would have a 60% chance of detecting the difference. If they differed by 3.3076, you would have a 90% chance.

What difference can you detect with your sample sizes of 12?

Difference	Power
2.2568	60%
2.5337	70%
2.8578	80%
3.3076	90%

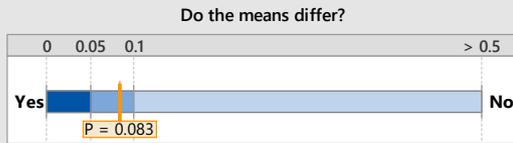
Observed difference = -1

Power is a function of the sample sizes and the standard deviations. To detect smaller differences, consider increasing the sample sizes.

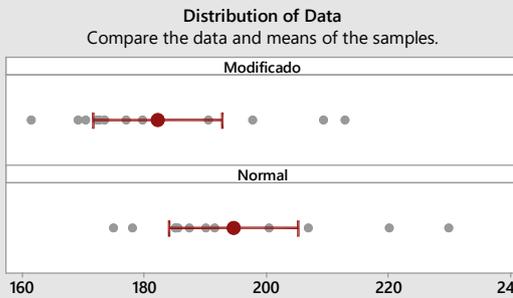
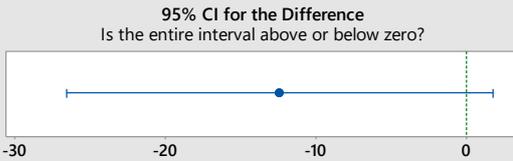
## APÊNDICE B – Resultados da Microdureza da peça torneada

Medições de Microdureza						
Profundidade de Corte (ap) 1mm						
Inserto	Distância (mm)	Indicação Média	Desvio	Erro do equipamento	Erro Total	Resultado de Medição
Comercial	0.05	250	15	6	21	250 ± 21
Comercial	0.1	221	12	6	18	221 ± 18
Comercial	0.15	215	18	5	24	215 ± 24
Comercial	0.2	209	10	5	15	209 ± 15
Comercial	0.25	205	14	5	19	205 ± 19
Comercial	0.3	193	15	5	20	193 ± 20
Comercial	0.35	189	21	5	26	189 ± 26
Comercial	0.4	184	6	5	11	184 ± 11
Comercial	0.45	181	13	5	18	181 ± 18
Comercial	0.5	175	13	4	18	175 ± 18
Comercial	0.55	176	14	4	18	176 ± 18
Comercial	0.6	178	18	4	23	178 ± 23
Comercial	0.65	176	11	4	15	176 ± 15
Comercial	0.7	181	5	5	10	181 ± 10
Comercial	0.75	178	7	4	12	178 ± 12
Modificado	0.05	210	9	5	14	210 ± 14
Modificado	0.1	212	21	5	26	212 ± 26
Modificado	0.15	208	6	5	11	208 ± 11
Modificado	0.2	204	23	5	28	204 ± 28
Modificado	0.25	193	17	5	22	193 ± 22
Modificado	0.3	185	12	5	16	185 ± 16
Modificado	0.35	188	14	5	19	188 ± 19
Modificado	0.4	186	13	5	18	186 ± 18
Modificado	0.45	184	15	5	20	184 ± 20
Modificado	0.5	170	16	4	20	170 ± 20
Modificado	0.55	176	11	4	15	176 ± 15
Modificado	0.6	175	14	4	19	175 ± 19
Modificado	0.65	162	16	4	20	162 ± 20
Modificado	0.7	158	12	4	16	158 ± 16
Modificado	0.75	169	7	4	11	169 ± 11
Comercial	0	230	1	6	6	230 ± 6
Comercial	0.04	220	1	6	7	220 ± 7
Comercial	0.105	207	5	5	10	207 ± 10
Comercial	0.14	201	8	5	13	201 ± 13
Comercial	0.205	186	3	5	8	186 ± 8
Comercial	0.255	190	12	5	17	190 ± 17
Comercial	0.32	185	0	5	5	185 ± 5
Comercial	0.36	185	2	5	7	185 ± 7
Comercial	0.42	178	3	4	7	178 ± 7
Comercial	0.46	187	8	5	13	187 ± 13
Comercial	0.52	175	5	4	9	175 ± 9
Comercial	4.295	192	1	5	5	192 ± 5
Modificado	0	209	5	5	10	209 ± 10
Modificado	0.05	213	7	5	12	213 ± 12
Modificado	0.1	198	8	5	13	198 ± 13
Modificado	0.15	191	4	5	9	191 ± 9
Modificado	0.21	180	7	4	12	180 ± 12
Modificado	0.26	174	1	4	6	174 ± 6
Modificado	0.32	177	6	4	10	177 ± 10
Modificado	0.37	172	6	4	11	172 ± 11
Modificado	0.43	173	3	4	7	173 ± 7
Modificado	0.48	169	0	4	4	169 ± 4
Modificado	0.53	161	0	4	4	161 ± 4
Modificado	4.24	170	1	4	5	170 ± 5

### 2-Sample t Test for Indicação Média - ap=2.5 by Inseto - ap=2.5 Summary Report



The mean of Modificado is not significantly different from the mean of Normal ( $p > 0.05$ ).



Individual Samples		
Statistics	Modificado	Normal
Sample size	12	12
Mean	182.27	194.66
95% CI	(171.7, 192.8)	(184.01, 205.31)
Standard deviation	16.640	16.763

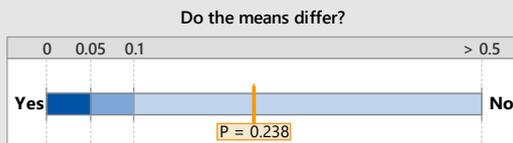
Difference Between Samples	
Statistics	*Difference
Difference	-12.390
95% CI	(-26.569, 1.7898)

\*Difference = Modificado - Normal

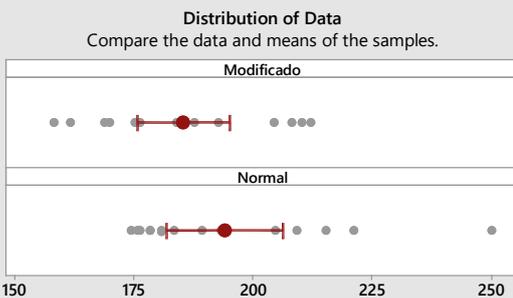
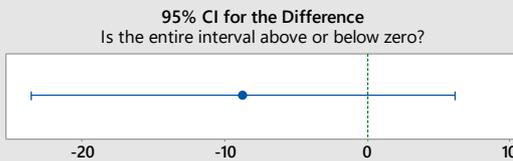
#### Comments

- Test: There is not enough evidence to conclude that the means differ at the 0.05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between -26.569 and 1.7898.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.

### 2-Sample t Test for Indicação Média by Inseto Summary Report



The mean of Modificado is not significantly different from the mean of Normal ( $p > 0.05$ ).



Individual Samples		
Statistics	Modificado	Normal
Sample size	15	15
Mean	185.41	194.13
95% CI	(175.7, 195.1)	(182.02, 206.25)
Standard deviation	17.479	21.878

Difference Between Samples	
Statistics	*Difference
Difference	-8.7246
95% CI	(-23.587, 6.1375)

\*Difference = Modificado - Normal

#### Comments

- Test: There is not enough evidence to conclude that the means differ at the 0.05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between -23.587 and 6.1375.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.

## APÊNDICE C – Resultados da Microdureza dos cavacos

### Medições de Microdureza

#### Cavaco - i7N - ap = 1mm

Inserto	Distância (mm)	Indicação Média	Desvio	Erro do equipamento	Erro Total	Resultado de Medição
Comercial	-	303	7	8	15	303 ± 15
Comercial	-	326	37	8	45	326 ± 45
Comercial	-	332	23	8	31	332 ± 31

#### Cavaco - i2M - ap = 1mm

Inserto	Distância (mm)	Indicação Média	Desvio	Erro do equipamento	Erro Total	Resultado de Medição
Modificado	-	321	39	8	47	321 ± 47
Modificado	-	335	48	8	56	335 ± 56
Modificado	-	329	47	8	55	329 ± 55

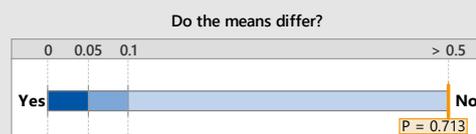
#### Cavaco - i8N - ap = 2.5mm

Inserto	Distância (mm)	Indicação Média	Desvio	Erro do equipamento	Erro Total	Resultado de Medição
Comercial	-	309	44	8	52	309 ± 52
Comercial	-	313	48	8	56	313 ± 56
Comercial	-	334	8	8	16	334 ± 16

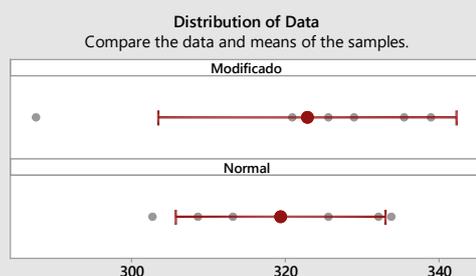
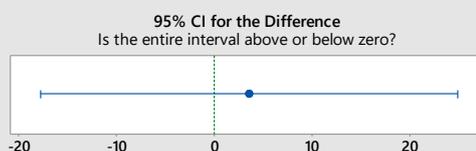
#### Cavaco - i8M - ap = 2.5mm

Inserto	Distância (mm)	Indicação Média	Desvio	Erro do equipamento	Erro Total	Resultado de Medição
Modificado	-	288	2	7	10	288 ± 10
Modificado	-	326	27	8	35	326 ± 35
Modificado	-	339	18	8	26	339 ± 26

### 2-Sample t Test for HV0.05/15 by Inserto - cavaco Summary Report



The mean of Modificado is not significantly different from the mean of Normal ( $p > 0.05$ ).



Statistics	Modificado	Normal
Sample size	6	6
Mean	322.85	319.34
95% CI	(303.4, 342.3)	(305.73, 332.95)
Standard deviation	18.506	12.966

Statistics	*Difference
Difference	3.5144
95% CI	(-17.758, 24.787)

\*Difference = Modificado - Normal

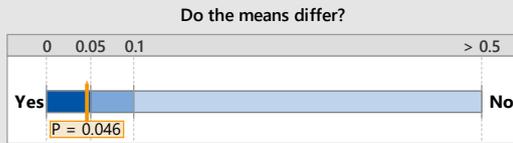
#### Comments

- Test: There is not enough evidence to conclude that the means differ at the 0.05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between -17.758 and 24.787.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.

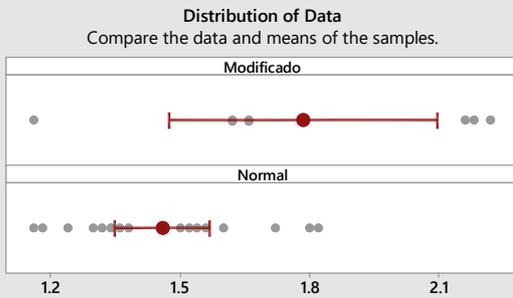
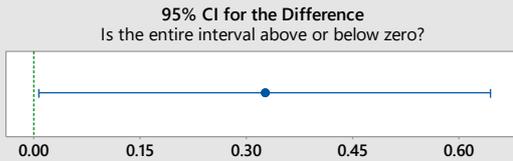
## APÊNDICE D – Resultados dos valores de rugosidade

Dados de Rugosidade									
Comprimento de contato 2000mm									
Ensaio	Peça	Inserto	Condição	Rt					
				Média	Desvio	1	2	3	4
1	4e	2	Modificado	8.13	0.472	7.8	8.1	7.8	8.8
2	4r	3	Modificado	8.68	0.050	8.7	8.7	8.6	8.7
3	2e	4	Comercial	7.30	0.346	7.8	7.2	7	7.2
4	2r	5	Comercial	7.10	0.245	7.4	7.1	7.1	6.8
Ensaio	Peça	Inserto	Condição	Ra					
				Média	Desvio	1	2	3	4
1	4e	2	Modificado	1.575	0.03	1.54	1.58	1.58	1.6
2	4r	3	Modificado	1.295	0.08	1.18	1.3	1.36	1.34
3	2e	4	Comercial	1.425	0.02	1.44	1.44	1.42	1.4
4	2r	5	Comercial	1.505	0.02	1.52	1.48	1.5	1.52
Ensaio	Peça	Inserto	Condição	Rz					
				Média	Desvio	1	2	3	4
1	4e	2	Modificado	7.35	0.238	7.1	7.2	7.5	7.6
2	4r	3	Modificado	6.93	0.287	6.6	6.9	7.3	6.9
3	2e	4	Comercial	7.30	0.346	7.8	7.2	7	7.2
4	2r	5	Comercial	6.45	0.252	6.8	6.4	6.4	6.2
Comprimento de contato 4000mm									
Ensaio	Peça	Inserto	Condição	Rt					
				Média	Desvio	1	2	3	4
1	4e	2	Modificado	7.58	0.263	7.6	7.7	7.8	7.2
2	4r	3	Modificado	19.63	1.109	21.2	19.4	19.3	18.6
5	3r	6	Modificado	17.03	0.250	16.9	17.4	16.9	16.9
7	3E	9	Modificado	9.45	0.29	9.2	9.7	9.7	9.2
3	2e	4	Comercial	5.88	0.171	5.9	6.1	5.7	5.8
4	2r	5	Comercial	7.38	0.263	7.1	7.6	7.2	7.6
6	1r	7	Comercial	7.05	0.933	6.6	8.4	6.3	6.9
8	5r	10	Comercial	9.75	0.70	8.7	10.200	10.1	10
Ensaio	Peça	Inserto	Condição	Ra					
				Média	Desvio	1	2	3	4
1	4e	2	Modificado	1.640	0.02	1.66	1.62	1.66	1.62
2	4r	3	Modificado	3.925	0.01	3.94	3.92	3.92	3.92
5	3r	6	Modificado	3.84	0.046	3.8	3.8	3.88	3.88
7	3E	9	Modificado	1.93	0.51	2.16	2.22	2.18	1.16
3	2e	4	Comercial	1.350	0.03	1.38	1.36	1.32	1.34
4	2r	5	Comercial	1.530	0.03	1.52	1.56	1.54	1.5
6	1r	7	Comercial	1.22	0.063	1.24	1.3	1.18	1.16
8	5r	10	Comercial	1.735	0.10	1.6	1.72	1.8	1.82
Ensaio	Peça	Inserto	Condição	Rz					
				Média	Desvio	1	2	3	4
1	4e	2	Modificado	7.08	0.096	7.2	7	7.1	7
2	4r	3	Modificado	17.13	0.714	18.1	17.1	16.4	16.9
5	3r	6	Modificado	15.55	0.289	15.3	15.8	15.8	15.3
7	3E	9	Modificado	8.73	0.222	8.5	8.8	8.6	9
3	2e	4	Comercial	5.35	0.100	5.4	5.4	5.4	5.2
4	2r	5	Comercial	6.80	0.183	6.7	6.9	6.6	7
6	1r	7	Comercial	6.08	0.435	6	6.7	5.7	5.9
8	5r	10	Comercial	8.55	0.705	7.5	8.8	9	8.9

### 2-Sample t Test for Ra-F by Tipo-F Summary Report



The mean of Modificado is significantly different from the mean of Normal ( $p < 0.05$ ).



		Individual Samples	
Statistics		Modificado	Normal
Sample size		8	16
Mean		1.785	1.4588
95% CI		(1.475, 2.095)	(1.3481, 1.5694)
Standard deviation		0.37075	0.20765

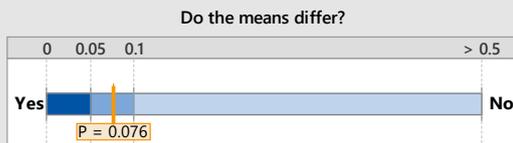
		Difference Between Samples
Statistics		*Difference
Difference		0.32625
95% CI		(0.0073176, 0.64518)

\*Difference = Modificado - Normal

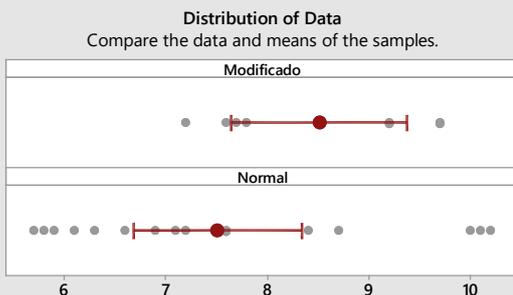
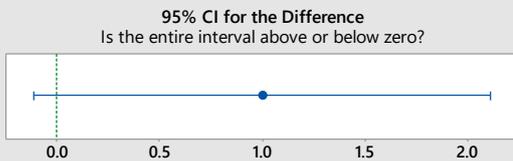
#### Comments

- Test: You can conclude that the means differ at the 0.05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between 0.0073176 and 0.64518.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.

### 2-Sample t Test for Rt-F by Tipo-F Summary Report



The mean of Modificado is not significantly different from the mean of Normal ( $p > 0.05$ ).



		Individual Samples	
Statistics		Modificado	Normal
Sample size		8	16
Mean		8.5125	7.5125
95% CI		(7.648, 9.377)	(6.6861, 8.3389)
Standard deviation		1.0343	1.5509

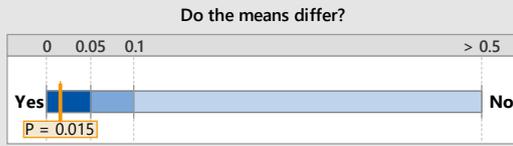
		Difference Between Samples
Statistics		*Difference
Difference		1
95% CI		(-0.11551, 2.1155)

\*Difference = Modificado - Normal

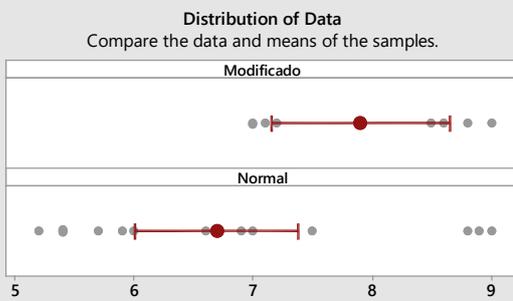
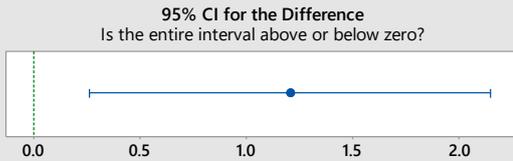
#### Comments

- Test: There is not enough evidence to conclude that the means differ at the 0.05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between -0.11551 and 2.1155.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.

### 2-Sample t Test for Rz-F by Tipo-F Summary Report



The mean of Modificado is significantly different from the mean of Normal ( $p < 0.05$ ).



Statistics	Individual Samples	
	Modificado	Normal
Sample size	8	16
Mean	7.9	6.6938
95% CI	(7.151, 8.649)	(6.0090, 7.3785)
Standard deviation	0.89602	1.2850

Statistics	*Difference
Difference	1.2062
95% CI	(0.26192, 2.1506)

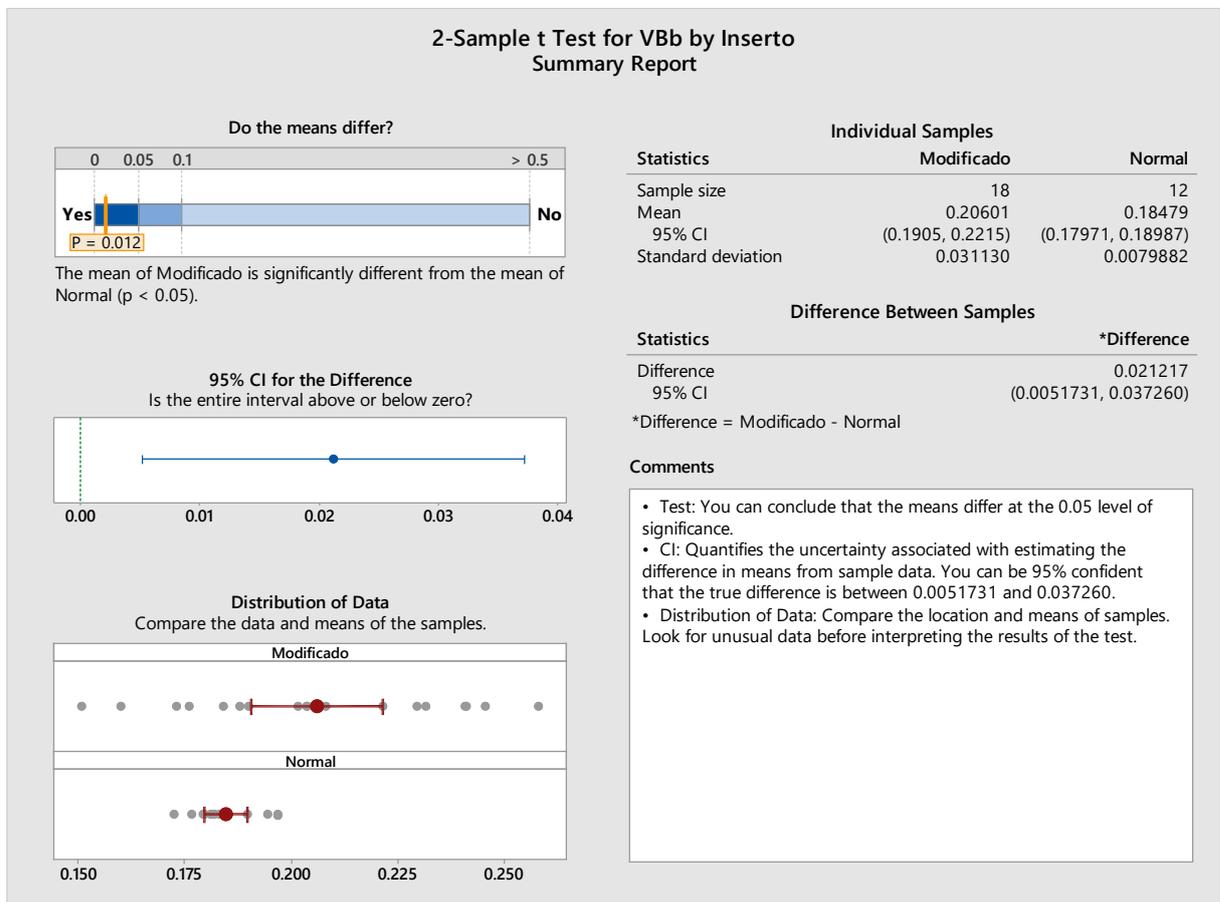
\*Difference = Modificado - Normal

**Comments**

- Test: You can conclude that the means differ at the 0.05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between 0.26192 and 2.1506.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.

## APÊNDICE E – Resultados dos valores de desgaste

Inserto	I2	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I8	I9	I10
Tipo	M	N	M	N	N	M	N	M	N	M	N
VB <sub>B</sub> 1	0.246	0.204	-	0.398	0.194	0.221	0.183	0.066	0.066	0.190	0.471
VB <sub>B</sub> 2	0.241	0.169	-	0.439	0.179	0.204	0.185	0.068	0.075	0.160	0.380
VB <sub>B</sub> 3	0.232	0.153	-	0.407	0.197	0.184	0.177	0.066	0.066	0.151	0.479
VB <sub>B</sub> 4	0.258	0.151	-	0.427	0.197	0.208	0.173	0.064	0.059	0.188	0.340
VB <sub>B</sub> 5	0.230	0.160	-	0.361	0.182	0.202	0.181	0.073	0.071	0.176	0.463
VB <sub>B</sub>	0.241	0.168	-	0.406	0.190	0.204	0.180	0.067	0.067	0.173	0.427
VB <sub>B</sub> (sdt)	0.012	0.021	-	0.030	0.009	0.013	0.005	0.004	0.006	0.017	0.063
VB <sub>B</sub> Max	0.258	0.204	-	0.439	0.197	0.221	0.185	0.073	0.075	0.190	0.479
VB <sub>N</sub>	0.677	0.362	0.572	1.034	1.099	0.679	1.103	-	-	0.647	1.357



## APÊNDICE F – Programa em Python para tratamento dos dados de força.

```

# Importando as bibliotecas
# PANDAS - Importação e Tratamento dos dados
import pandas as pd

# NUMPY - Importação e Tratamento dos dados
import numpy as np

# StatsModels - Estatísticas descritivas e Analíticas
from statsmodels.stats.weightstats import ttest_ind, ztest

# Stats
from scipy import stats

# Bokeh - Geração de Graficos
from bokeh.io import show, output_notebook
from bokeh.plotting import figure
from bokeh.layouts import column
from bokeh.models import ColumnDataSource, RangeTool
output_notebook()
# Filtro dos valores minimos
# Elimina valores menores que o definido na variavel
filterMin = 1.5

# Filtro dos valores Maximos
# Elimina valores maiores que o definido na variavel
filterMax = 1000

# Fator de multiplicacao
# Fator de correção entre a tensão liva (v) para a força equivalente (N)
cofMult = 110

# Tamanho do Grupo
# Quantidades de elementos que irá formar o os grupos, sendo que 1s é equivalente
à 240 medições
sizeGroup = (240*1)

# Definindo a pasta com os dados
# Pasta que possui os arquivos CSV de importação
folder = './srcMath'
# Importar a biblioteca de sistema
import os
from os import walk

# Função que lista os arquivos existentes na pasta específica
def readFilesInFolder(folder):
    f = []
    for (dirpath, dirnames, filenames) in walk(folder):
        f.extend(filenames)
        break
    return f

# Função que consulta a pasta e verifica a existencia do arquivo solicitado
def checkFileExists(folder,filesList):
    filesList = filesList.split(";")
    filesListChecked = []
    for fileName in filesList:
        if os.path.exists(folder+'/'+fileName) == True:
            filesListChecked.append(fileName)
    return filesListChecked
def importCSVFile(filterMin,filterMax,cofMult,sizeGroup, folder, fileList):
    # Variaveis Globais
    # Filtro dos valores minimos
    filterMin = float(filterMin)

    # Filtro dos valores Maximos
    filterMax = float(filterMax)

```

```

# Fator de multiplicacao
cofMult = float(cofMult)

# Tamanho do Grupo
sizeGroup = float(sizeGroup)

# Lendo o arquivo com os dados
fileCSVImport = folder + '/' + fileList
separadorCSV = '\t'
decimalCSV = ','

data = pd.read_csv(fileCSVImport, sep=separadorCSV, decimal=decimalCSV)
df = pd.DataFrame(data)

# Removendo colunas indesejadas
dropColumns = ['PASSIVA_Time', 'CORTE_Time', 'MOMENTO_Time']
for dropColumn in dropColumns:
    df = df.drop(dropColumn, axis=1)

# Renomeando colunas
df = df.rename(columns={'AVANCO_Time': 'Time'})

# filtrando valores por Minimo
dfFilter = df.loc[(df['AVANCO'] > filterMin) & (df['CORTE'] > filterMin)]

# Conertendo os Valores
dfFilter = dfFilter * cofMult

# Criando forca de usinagem
dfFilter['USINAGEM'] = (dfFilter['AVANCO']**2 + dfFilter['CORTE']**2 +
dfFilter['PASSIVA']**2)**0.5

# Reset index
dfFilter = dfFilter.reset_index(drop = True)

# Definindo a origem
dfFilter['fileBase'] = fileList

# Criando os grupos
dfFilter['Group'] = 0
i = 0
j = 1
while i < dfFilter['Time'].count():
    limitGroup = i + sizeGroup
    dfFilter.loc[(dfFilter.index < limitGroup) & (dfFilter.index >=
i), ['Group']] = j
    j = j + 1
    i = i + sizeGroup

# Converte o resultado em um DataFrame
dfGrouped = dfFilter.groupby('Group').apply(lambda x: round(x, 1))
resultSend = pd.DataFrame(dfGrouped)

# Retorna o resultado
return resultSend
def groupDataFrames(filterMin, filterMax, cofMult, sizeGroup, folder, groupType,
FileExists):

# Lista que irá receber os dataFrames que serão agrupados
frames = []
for fileList in FileExists:
    print(fileList)
    dfTemp = pd.DataFrame(
importCSVFile(filterMin, filterMax, cofMult, sizeGroup, folder, fileList) )
    frames.append(dfTemp)

# Verificação se os dados serão agrupados como referencia ou comparação.

```

```

if groupType == 'ref':
    dfGroupedRef = pd.concat(frames, sort=False)
    # Reset index
    dfGrouped = dfGroupedRef.reset_index(drop = True)
else:
    dfGroupedComp = pd.concat(frames, sort=False)
    # Reset index
    dfGrouped = dfGroupedComp.reset_index(drop = True)

#Preparação dos dados para saída
# Grupo de dados contendo a média dos dados agrupados
dfGroupedMean = dfGrouped.groupby(['Group']).mean().reset_index()
# Grupo de dados contendo o desvio padrão dos dados agrupados
dfGroupedStd = dfGrouped.groupby(['Group']).std().reset_index()

#Retorno dos dados
return (dfGroupedMean, dfGroupedStd, dfGrouped)

# Lista de arquivos a serem agrupados
FilesGroupRecive = 'I8-N-FULL.csv'

# Verifica a lista de arquivos recebidos
RefFileExists = checkFileExists(folder,FilesGroupRecive)

# Importando os dados
dfGroupedMeanRef, dfGroupedStdRef, dfGroupedRef = groupDataFrames(filterMin,
filterMax, cofMult, sizeGroup, folder, 'ref', RefFileExists)
dfGroupedStdRef.head(10)

#Definições Gerais
p = figure(
    title='Força de Usinagem',
    x_axis_label='Tempo de Usinagem (min)',
    y_axis_label='Força (N)',
    plot_width=800,
    plot_height=360,
    x_range=[0,1.6],
    y_range=[0,1200]
)

#Grafico de Referencia - Inseto comercial
p.line(
    (dfGroupedMeanRef.index/350)*60,
    dfGroupedMeanRef['USINAGEM'],
    legend='Inseto comercial',
    line_width=2,
    color='orange')

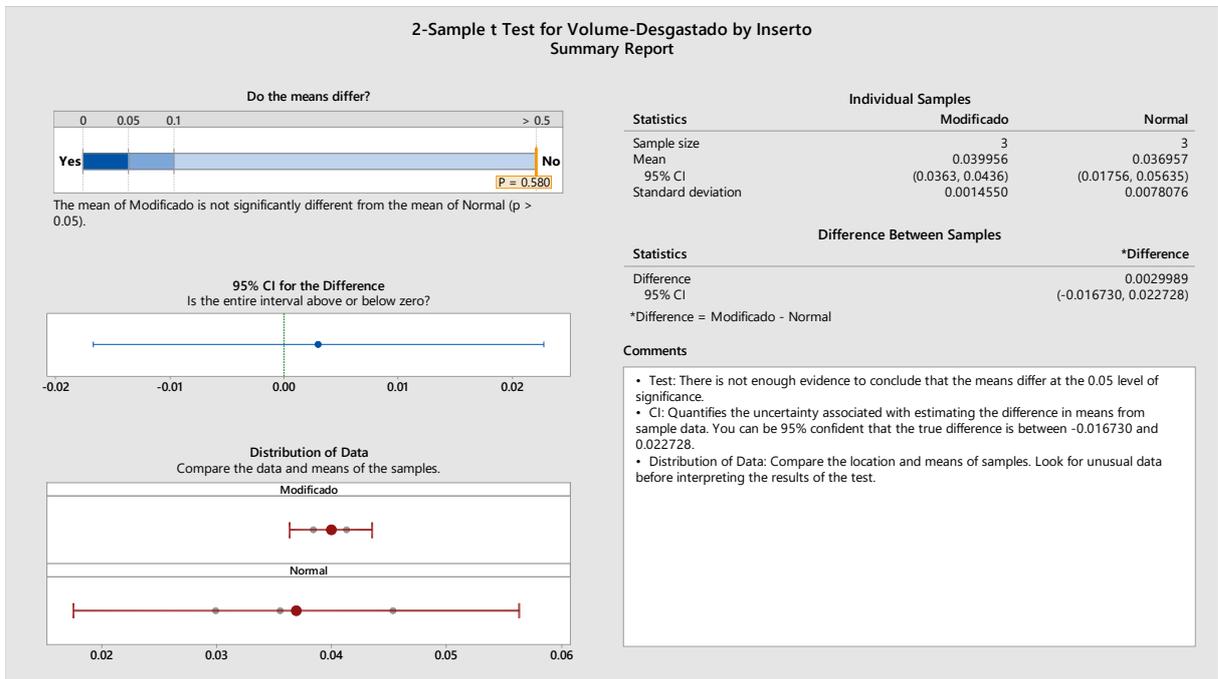
#Grafico de Comparação - Inseto Modificado
p.line(
    (dfGroupedMeanComp.index/350)*60,
    dfGroupedMeanComp['USINAGEM'],
    legend='Inseto Modificado',
    line_width=1,
    line_color="blue",
    line_dash="4 4")

p.legend.location = "top_left"

show(p)

```

## APÊNDICE G – Estatística para cálculo de volume do perfil desgastado.



## APÊNDICE H – Estatística descritiva para as forças (Vibração).

Estatística descritiva para os valores dos desvios padrões para cada segundo  
 Inseto normal - Primeiros 200 Segundos

	<b>Group</b>	<b>Time</b>	<b>AVANCO</b>	<b>PASSIVA</b>	<b>CORTE</b>	<b>MOMENTO</b>	<b>USINAGEM</b>
count	200.000000	200.000000	200.000000	200.000000	200.000000	200.000000	200.000000
mean	100.500000	455.573891	25.957515	55.067052	36.013207	2.864093	42.182386
std	57.879185	40.219998	4.395128	2.593214	4.601289	0.302085	5.515159
min	1.000000	324.098700	21.011994	47.700546	26.876111	2.453722	33.156052
25%	50.750000	459.179381	23.418529	53.235343	33.097150	2.684763	38.806004
50%	100.500000	469.981548	24.252598	54.765648	35.125112	2.777959	40.606183
75%	150.250000	479.593043	25.310584	57.037787	36.914874	2.891388	43.259712
max	200.000000	491.820848	39.977285	62.358669	51.258096	3.954718	62.256574

Estatística descritiva para os valores dos desvios padrões para cada segundo  
 Inseto modificado - Primeiros 200 Segundos

	<b>Group</b>	<b>Time</b>	<b>AVANCO</b>	<b>PASSIVA</b>	<b>CORTE</b>	<b>MOMENTO</b>	<b>USINAGEM</b>
count	200.000000	200.000000	200.000000	200.000000	200.000000	200.000000	200.000000
mean	100.500000	349.438174	23.750586	54.222018	35.955323	2.621043	40.962701
std	57.879185	89.171736	2.707348	3.501262	3.751345	0.224162	3.699648
min	1.000000	145.583711	20.476747	46.792997	29.622344	2.294080	34.654541
25%	50.750000	371.209140	22.118280	51.557876	33.382292	2.491476	38.502894
50%	100.500000	396.999527	23.018930	53.514590	35.207127	2.588972	40.488269
75%	150.250000	399.791584	24.414272	56.544003	38.001477	2.691104	42.760230
max	200.000000	404.546096	43.559740	63.907043	51.788698	4.563758	62.379924

Estatística descritiva para os valores dos desvios padrões para cada segundo  
 Inseto normal - Últimos 150 segundos

	<b>Group</b>	<b>Time</b>	<b>AVANCO</b>	<b>PASSIVA</b>	<b>CORTE</b>	<b>MOMENTO</b>	<b>USINAGEM</b>
count	146.000000	146.000000	146.000000	146.000000	146.000000	146.000000	146.000000
mean	673.500000	278.137032	39.287229	111.560500	111.135839	3.935241	118.579258
std	42.290661	71.208949	10.809186	59.001351	32.559064	1.033086	35.760309
min	601.000000	24.807453	24.769007	48.237603	36.161515	1.767458	36.820663
25%	637.250000	238.160621	30.673766	69.459733	87.265636	3.302839	91.337134
50%	673.500000	305.848346	37.889967	85.608490	116.714911	3.968959	119.421617
75%	709.750000	321.887382	43.759211	143.228051	127.636676	4.358648	141.214841
max	746.000000	333.925349	74.351422	324.608322	213.903063	8.598380	233.201083

Estatística descritiva para os valores dos desvios padrões para cada segundo  
 Inseto modificado - Últimos 150 segundos

	<b>Group</b>	<b>Time</b>	<b>AVANCO</b>	<b>PASSIVA</b>	<b>CORTE</b>	<b>MOMENTO</b>	<b>USINAGEM</b>
count	146.000000	146.000000	146.000000	146.000000	146.000000	146.000000	146.000000
mean	673.500000	4118.712140	31.375210	110.510952	75.931156	2.023444	95.663677
std	42.290661	1447.460017	10.415269	57.221364	33.685304	0.953761	47.451674
min	601.000000	10.130529	17.108246	44.902861	24.785891	1.251631	30.297573
25%	637.250000	4238.489761	26.085079	61.965869	53.735955	1.548391	58.975478
50%	673.500000	4314.863853	30.325043	89.944602	70.025262	1.751670	85.629141
75%	709.750000	4333.590431	35.398367	152.365782	100.771084	2.237067	131.749829
max	746.000000	6798.490758	131.460652	275.326717	165.975140	10.829461	209.558541

## APÊNDICE I – Programa em Python para cálculo de área e volume do perfil desgastado.

```

import pandas as pd
import numpy as np
import math
from scipy import stats
import matplotlib as mpl
import matplotlib.pyplot as plt
%matplotlib inline
# Pasta com os arquivos fontes da perfilometria
folderSource = "./Source/Nivelados/"
print('Pasta com as superfícies a serem importados: ', folderSource)
extensaoArquivo = '.xyz'
print('\n Extensão dos arquivos:', extensaoArquivo)
valorMinimoX = 0
print('\n Valor inicial de X:', valorMinimoX)
perfilRef = 'I3P'
perfilRefList = ['I3P']
print('\n Perfil de Referência:', perfilRef)
insertosModificados = ['I2M', 'I6M', 'I9M']
print('\n Lista de Insertos Modificados: ', insertosModificados)
insertosNormais = ['I4N', 'I10N', 'I7N']
insertosNormaisValidos = ['I10N', 'I7N']
print('\n Lista de Insertos comerciais:', insertosNormais)
# Importar a biblioteca de sistema
import os
from os import walk

print("Comando:\n")

# Função que lista os arquivos existentes na pasta específica
print("- readFilesInFolder(folder)\n")
def readFilesInFolder(folder):
    f = []
    for (dirpath, dirnames, filenames) in walk(folder):
        f.extend(filenames)
        break
    return f

# Função que consulta a pasta e verifica a existencia do arquivo solicitado
print("- checkFileExists(folder,filesList)\n")
def checkFileExists(folder,filesList):
    filesList = filesList.split(";")
    filesListChecked = []
    for fileName in filesList:
        if os.path.exists(folder+'/'+fileName) == True:
            filesListChecked.append(fileName)
    return filesListChecked

# Redefine a lista conforme Extensão
print("- filtrarListaExtensao(listaArquivos)\n")
def filtrarListaExtensao(listaArquivos):
    f = []
    for arquivo in listaArquivos:
        if arquivo[-4:] == extensaoArquivo:
            f.append(arquivo)
    return f

# Transformando Arquivos em verotes - Pandas Lib
print("- importSurface( fileList, folder='./' , separadorCSV=';', decimalCSV='.')\n")
def importSurface( fileList, folder='./' , separadorCSV='\t', decimalCSV='.'):
    for file in fileList:
        fileSurfaceImport = folder + file

```

```

data =
pd.read_csv(fileSurfaceImport, sep=separadorCSV, decimal=decimalCSV, header=None,
names= ['x', 'y', 'z'], encoding='utf-8')
globals()['df_%s' % file[: -4]] = pd.DataFrame(data)
globals()['df_%s' % file[: -4]] = globals()['df_%s' % file[: -4]]*1000
globals()['df_%s' % file[: -4]]['x'] = globals()['df_%s' % file[: -4]]['x']*100
# Função para calcular o perimetro
print("perimetroPerfil(perfil,posicaoY=0.005,plotarGraf=0)")
def perimetroPerfil(perfil,posicaoY=0.005,plotarGraf=0):
dfPerimetro = pd.DataFrame()
dfRecebido = globals()['df_%s' % perfil].loc[round(globals()['df_%s' %
perfil]['y'],3) == posicaoY].loc[round(globals()['df_%s' % perfil]['x'],3) >
120].loc[round(globals()['df_%s' % perfil]['z'],3) < -0.01]
dfOrig = dfRecebido.reset_index()

x_ZmaxOrig = dfOrig['x'].iloc[-300:].loc[(dfOrig['z'].iloc[-300:] ==
dfOrig['z'].iloc[-300:].max())]

dfOrig = dfOrig.loc[(dfOrig['x'] < x_ZmaxOrig.values[0])]

dfComp = dfOrig.drop([0])
dfComp = dfComp.reset_index()

dfOrig = dfOrig.drop([len(dfOrig)-1])
dfOrig = dfOrig.reset_index()

dfPerimetro['Perimetro'] = ( (dfComp['x'] - dfOrig['x'])**2 + (dfComp['z'] -
dfOrig['z'])**2 )**0.5
# print(dfPerimetro.sum().values[0])

if plotarGraf == 1:
plt.plot(dfOrig['x'],dfOrig['z'], label=perfilRef)
GraphReturn = plt
return dfPerimetro.sum().values[0], GraphReturn
else:
return dfPerimetro.sum().values[0]
print("- integrarAreaCurva(perfilRef, perfilComp, plotarGraficos=1)\n")
def integrarAreaCurva(perfilRef, perfilComp, posicaoY=0.005 ,plotarGraf=1):

dfRef = globals()['df_%s' % perfilRef].loc[round(globals()['df_%s' %
perfilRef]['y'],3) == posicaoY].loc[round(globals()['df_%s' % perfilRef]['x'],3) >
90]
dfComp = globals()['df_%s' % perfilComp].loc[round(globals()['df_%s' %
perfilComp]['y'],3) == posicaoY].loc[round(globals()['df_%s' % perfilComp]['x'],3)
> 90]

xMax = dfRef['x'].max()
if xMax > dfComp['x'].max():
xMax = dfComp['x'].max()

if perfilComp == 'I9M':
moveXZ = round(dfRef.loc[(dfRef['x'] < (xMax-12)) & (dfRef['x'] > (xMax-
12.5))]['z'].mean(),2)
else:
if perfilComp == 'I7N':
moveXZ = round(dfRef.loc[(dfRef['x'] < (xMax-2)) & (dfRef['x'] > (xMax-
2.5))]['z'].mean(),2)
else:
if perfilComp == 'I10N':
moveXZ = round(dfRef.loc[(dfRef['x'] < (xMax-5)) & (dfRef['x'] >
(xMax-5.5))]['z'].mean(),2)
else:
if perfilComp == 'I4N':
moveXZ = round(dfRef.loc[(dfRef['x'] < (xMax-9)) & (dfRef['x']
> (xMax-9.5))]['z'].mean(),2)
else:

```

```

        moveXZ = round(dfRef.loc[(dfRef['x'] < (xMax-0)) & (dfRef['x']
> (xMax-0.5))]['z'].mean(),2)

#     print(dfComp['z'])
moveXRef = round(dfRef.loc[(round(dfRef['z'],2) == moveXZ)]['x'].min(),2)
moveXComp = round(dfComp.loc[(round(dfComp['z'],2) == moveXZ)]['x'].max(),2)
moveInX = (moveXRef - moveXComp)

dfComp['x'] = dfComp['x']+moveInX

xMax = dfRef['x'].max()
if xMax > dfComp['x'].max():
    xMax = dfComp['x'].max()

zMin = dfRef['z'].min()

if perfilRef:
    xRef = dfRef.loc[(dfRef['x'] < xMax)].loc[round(dfRef['x'],3) > 110]['x']
    zRef = dfRef.loc[(dfRef['x'] < xMax)].loc[round(dfRef['x'],3) > 110]['z']

    zRef[zRef>0] = 0

if perfilComp:
    xComp = dfComp.loc[(dfComp['x'] < xMax)].loc[round(dfComp['x'],3) >
110]['x']
    zComp = dfComp.loc[(dfComp['x'] < xMax)].loc[round(dfComp['x'],3) >
110]['z']

    zComp[zComp>0] = 0

if plotarGraf == 1:
    plt.plot(xRef,zRef, label=perfilRef)
    plt.fill_between(xRef, zMin, zRef, alpha=0.2)
    plt.legend()
    plt.plot(xComp,zComp, label=(perfilComp+'-' + str(posicaoY) ), linestyle='-
-')
    plt.legend()
    GraphReturn = plt

if plotarGraf == 1:
    return (zRef.sum() - zComp.sum()), GraphReturn
else:
    return (zRef.sum() - zComp.sum()),0
print("- analiseSurface(df)\n")
def analiseSurface(df):

# Avalia o numero de pontos por varredura
nPontosY = globals()['df_%s' % df]['y'].loc[globals()['df_%s' % df]['y'] ==
0.005].count()
# Avalia a quantidade de Varreduras
nLinhas = (globals()['df_%s' % df]['y'].count() / nPontosY)-1
# Tamanho do passo entre as linhas
passoLinhas = globals()['df_%s' % df]['y'].max()/nLinhas
passoY = globals()['df_%s' % df]['y'].iloc[nPontosY+1] - globals()['df_%s' %
df]['y'].iloc[0]

    return nPontosY, nLinhas, round(passoLinhas,3)
print("- moveInZ(df, y, xStart, xEnd)\n")
def moveInZ(df, y=0, xStart=0.02, xEnd=0.5):
    dfTemp = globals()['df_%s' % df].loc[(round(globals()['df_%s' % df]['y'],3) >
y)]
    dfTemp = dfTemp.loc[(dfTemp['x'] > xStart) & (dfTemp['x'] < xEnd)]
    moveZ = dfTemp['z'].mean()
    return moveZ

print("- posicionarAresta(lista, y, xStart, xEnd)\n")
def posicionarAresta(lista, y=0.02, xStart=0.02, xEnd=0.5):
    # Superficie Insertos Modificados

```

```

    moveZ = {}
    for Surface in lista:
        moveZ[Surface] = moveInZ(Surface, y, xStart, xEnd)
        globals()['df_%s' % Surface]['z'] = globals()['df_%s' % Surface]['z'] -
moveZ[Surface]
        print(Surface, ':')
        print(globals()['df_%s' % Surface].head(2),'\n')
# Variavel com dados
infoSurface = {}
print('Informações - (Décimos de mm):')

# Superficie de Referencia
tempInfos = []
tempInfos.append(analiseSurface(perfilRef))
infoSurface[perfilRef] = tempInfos
print(perfilRef,':')
print( 'Comprimento em X:', infoSurface[perfilRef][0][0])
print( 'Comprimento em Y:',infoSurface[perfilRef][0][1])
print( 'Passo em Y:',infoSurface[perfilRef][0][2])
print('\n')

# Superficie Insertos Modificados
for Surface in insertosModificados:
    tempInfos = []
    tempInfos.append(analiseSurface(Surface))
    infoSurface[Surface] = tempInfos

for Surface in insertosModificados:
    print(Surface,':')
    print( 'Comprimento em X:', infoSurface[Surface][0][0])
    print( 'Comprimento em y:',infoSurface[Surface][0][1])
    print( 'Passo em Y:',infoSurface[Surface][0][2])
    print('\n')

# Superficie Insertos comerciais
for Surface in insertosNormais:
    tempInfos = []
    tempInfos.append(analiseSurface(Surface))
    infoSurface[Surface] = tempInfos

for Surface in insertosNormais:
    print(Surface,':')
    print( 'Comprimento em X:', infoSurface[Surface][0][0])
    print( 'Comprimento em y:',infoSurface[Surface][0][1])
    print( 'Passo em Y:',infoSurface[Surface][0][2])
    print('\n')
for perfil in insertosModificados:

    posicaoY = 0.005
    areaTemp = []
    while posicaoY <= globals()['df_%s' % perfil]['y'].max():

        if perfil != perfilRef:
            surfaceCalc = perimetroPerfil(perfil, round(posicaoY,3))
#            graphOut.show()
            areaTemp.append(surfaceCalc*infoSurface[perfil][0][2])
        posicaoY += infoSurface[perfil][0][2]

globals()['sr_%s' % perfil] = pd.Series(areaTemp)

```

**APÊNDICE J – Programa CNC****DESBASTE**

```
!TOOL_DEF#
T1 X-26.0691 z125.2674#
!END#
;DOUGLAS M D SOUZA
;DESBASTE DIA 80
G54#
G99#
G90#
T0#
G54#
T0101#
G0 X85 Z2#
M12#
G96#
S200 M3#
G1 X80 Z2 F0.16#
G1 Z-220#
G0 X85 Z2#
T0#
M30#
#
```

**Ensaio PARTE\_01**

```
!TOOL_DEF#
T1 X-26.0691 z125.2674#
!END#
;DOUGLAS M D SOUZA
;USI DIAM 78 A 58
G54#
G99#
G90#
T0#
G54#
T0101#
G0 X85 Z2#
M12#
G96#
S350 M3#
G92 S3100#
G1 X78 Z2 F0.16#
G74 X58 Z-220 I2 U1 F0.2
G0 X85 Z2#
T0#
M30#
#
```

**Ensaio PARTE\_02**

```
!TOOL_DEF#
T1 X-26.0691 z125.2674#
!END#
;DOUGLAS M D SOUZA
;USI DIAM 58 A 36
G54#
G99#
G90#
T0#
G54#
T0101#
G0 X85 Z2#
M12#
G96#
S350 M3#
G92 S3100#
G1 X58 Z2 F0.20#
```

```
G74 X36 Z-220 I2 U1 F0.20  
G0 X85 Z2#  
T0#  
M30#  
#
```