

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ARISTÓTELES GUIDO RODRIGUES

**CARACTERIZAÇÃO DO DESGASTE DO REBOLO NA
RETIFICAÇÃO DE INSERTOS DE METAL DURO**

SÃO CARLOS - SP
2021

ARISTÓTELES GUIDO RODRIGUES

CARACTERIZAÇÃO DO DESGASTE DO REBOLO NA RETIFICAÇÃO DE
INSERTOS DE METAL DURO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Carlos Eiji Hirata Ventura

São Carlos - SP

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Aristóteles Guido Rodrigues, realizada em 09/03/2021.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura (UFSCar)

Prof. Dr. Vitor Luiz Sordi (UFSCar)

Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi (UNESP)

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

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa, Vanessa Brito Rodrigues, e à minha mãe, Terezinha Amorim da Costa de Oliveira (in memoriam), que deram todo o suporte para que eu pudesse desenvolver este projeto.

AGRADECIMENTO

Agradeço aos meus familiares pelo incentivo constante e por toda a compreensão pelos momentos que me fiz ausente.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento à pesquisa e apoio ao programa.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro para a realização do projeto (Processos nº 2015/15622-2, 2017/12304-5 e 2017/12309-7).

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr.-Ing. Carlos E. H. Ventura, por ser fonte de inspiração e sempre se fazer disponível durante todo o desenvolvimento dessa pesquisa.

Agradeço aos meus colegas e professores de pós-graduação, por todo o apoio e conhecimento disseminado.

Deixo um agradecimento especial à “Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe”, de São Carlos, e à “Escola SENAI Santos Dumont”, de São José dos Campos, que tornaram possível minha presença nas aulas e o desenvolvimento da pesquisa durante esses dois anos, além do desenvolvimento do dispositivo de análise do rebolo.

“Neste mundo, a terra não está no centro e nenhum saber é saber completo.”

(Galileu Galilei)

RESUMO

A indústria de fabricação de ferramentas de corte busca de maneira incessante o aprimoramento de seus produtos, devido à alta concorrência do setor, cada vez mais acirrada. Nesse cenário, os insertos de metal duro se destacam por sua vasta utilização, em função do excelente custo-benefício oferecido na usinagem dos mais diversos tipos de metais. Desse modo, faz-se necessário o domínio cada vez maior das variáveis de seu processo de fabricação e seus efeitos, sendo a retificação etapa fundamental na busca pela alta eficiência de insertos de corte, pois é responsável por conferir dimensões finais e uma integridade superficial e de aresta adequada. O presente projeto busca caracterizar o desgaste do rebolo diamantado no processo de retificação de insertos de metal duro e avaliar seus efeitos sobre as características superficiais do inserto, conforme se aumenta o volume total de material removido. Para isso, foi utilizado um rebolo com grãos de diamante D46 e ligante resinoide e foram medidas as componentes normal e tangencial da força de retificação durante o processo. Além disso, foram avaliados os valores da protrusão de grão na camada abrasiva do rebolo, assim como a rugosidade na aresta e na superfície de folga dos insertos. A partir dos resultados obtidos, foi possível constatar uma redução inicial na protrusão de grão e o consequente aumento das forças de retificação com o aumento do volume de material removido, porém, com a retificação de maiores volumes, notou-se também a ocorrência de autoafiação, que levou ao aumento da protrusão de grão e redução das forças de retificação. Este fenômeno contribuiu com o aumento do número de arestas na camada abrasiva e causou redução da rugosidade na superfície de folga do inserto. Pouca ou nenhuma variação da rugosidade de aresta foi identificada.

Palavras-chave: Retificação. Rebolo de diamante. Desgaste. Metal duro. Integridade superficial.

ABSTRACT

The cutting tool manufacturing industry constantly seeks to improve its products, due to the high competition in this sector. In this scenario, cemented tungsten carbide cutting inserts stand out for their wide application, related to their excellent cost-benefit ratio in the machining of diverse types of metals. Thus, an increasing knowledge of their manufacturing process variables and their effects is required, being the grinding operation a fundamental step in the search for high efficiency of cutting inserts, as it is responsible for providing the final dimensions as well as appropriate surface and edge quality. Within this context, the present work aims to characterize the wear of a diamond grinding wheel during grinding of cemented tungsten carbide inserts and to assess its effects on the insert surface characteristics with the increase in total material removal volume. For this, a resin bonded wheel with diamond grains D46 was applied and the normal and tangential force components were measured during the process. In addition, the grain protrusion in the abrasive grinding layer, the insert surface and edge roughness were analyzed. The obtained results revealed an initial reduction in the grain protrusion and the consequent increase in the grinding forces with the increase in the volume of removed material. With the grinding of larger volumes, however, the occurrence of self-sharpening was also observed, which led to increased grain protrusion and reduced forces. This phenomenon contributed to the increase in the number of active edges in the abrasive layer and caused a reduction in the insert surface roughness. Little or no variation in edge roughness was identified.

Keywords: Grinding. Diamond grinding wheel. Wear. Cemented tungsten carbide. Surface Integrity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamento frágil e dúctil da formação de cavaco em materiais frágeis	18
Figura 2. Tipos principais de desgaste sofrido pelo grão abrasivo do rebolo na retificação de materiais superduros	22
Figura 3. Fenômenos presentes no desgaste do rebolo.....	23
Figura 4. Exemplo de curva de proporção de material (Abbot-Firestone).....	27
Figura 5. Esquema das forças e velocidades na retificação plana transversal de mergulho.....	30
Figura 6. Componentes do processo de retificação plana transversal de mergulho.	31
Figura 7. Inseto de metal duro utilizado para os experimentos de retificação	32
Figura 8. Microscópio confocal Alicona Infinite Focus SL.....	33
Figura 9. Processo de medição do parâmetro Spk.....	36
Figura 10. Medição do parâmetro Spk na camada abrasiva através de suporte posicionador de rebolo para o microscópio utilizado	37
Figura 11. Perfis para medição de rugosidade de (a) superfície Rz e de (b) aresta Δr	38
Figura 12. Esquema de identificação de força normal.....	39
Figura 13. Variação do valor de Spk com o aumento do volume de material removido na retificação de metal duro com diferentes espessuras de cavaco por grão.....	42
Figura 14. Camada abrasiva do rebolo após (a) dressagem e retificação de um volume aproximado de 30 mm^3 , com espessura (b) mínima e (c) máxima de cavaco por grão	43
Figura 15. Camada abrasiva do rebolo após retificação de um volume aproximado de 300 mm^3 , com espessura (a) mínima e (b) máxima de cavaco por grão.....	44
Figura 16. Camada abrasiva do rebolo após retificação de um volume de material de 452 mm^3 com espessura mínima de cavaco por grão	45
Figura 17. Camada abrasiva do rebolo após retificação de um volume aproximado de 1050 mm^3 , com espessura (a) mínima e (b) máxima de cavaco por grão	46
Figura 18. Variação do valor de Smr1 com o aumento do volume de material removido na retificação de metal duro com diferentes espessuras de cavaco por grão.....	47
Figura 19. Variação da força específica com o aumento do volume de material removido na retificação de metal duro com diferentes espessuras de cavaco por grão.....	49
Figura 20. Variação da rugosidade de aresta Δr com o aumento do volume de material removido na retificação de metal duro com diferentes espessuras de cavaco por grão	51
Figura 21. Variação da rugosidade de superfície Rz com o aumento do volume de material removido na retificação de metal duro com diferentes espessuras de cavaco por grão	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Volume de material removido para medição dos parâmetros de análise do rebolo e do inserto.....	34
Tabela 2. Valores de espessura do cavaco por grão, velocidade de corte e de avanço para cada teste	35

LISTA DE SIGLAS

2D	Representação em duas dimensões
3D	Representação em três dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNC	Comando numérico computadorizado
DEMec	Departamento de Engenharia Mecânica
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MQNL	Mínima quantidade de nano lubrificante
PCBN	<i>Polycrystalline cubic boron nitride</i>
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

LISTA DE SÍMBOLOS

F_n	Força normal de retificação	N
F_t	Força tangencial de retificação	N
h_{cu}	Espessura de cavaco por grão	μm
h_{max}	Espessura máxima de cavaco por grão	μm
h_{min}	Espessura mínima de cavaco por grão	μm
R_a	Rugosidade média aritmética	μm
R_k	Rugosidade do núcleo no perfil	μm
R_{pk}	Altura reduzida de pico no perfil	μm
R_{vk}	Profundidade reduzida de vale	μm
R_z	Rugosidade máxima	μm
S_{mr1}	Percentual de material acima do núcleo	%
S_{pk}	Altura reduzida de pico na superfície	μm
t_d	Tempo de dressagem	s
v_c	Velocidade de corte	m/s
v_{cd}	Velocidade de corte do dressador durante a dressagem	m/s
v_{fa}	Velocidade de avanço axial do rebolo	mm/min
v_{fad}	Velocidade de avanço axial do dressador	$\mu\text{m/s}$

SUMÁRIO

RESUMO	10
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE SIGLAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS	15
SUMÁRIO	16
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1. RETIFICAÇÃO DO METAL DURO	15
2.1.1. Integridade do Inserto de Corte	19
2.1.2. Desgaste do Rebolo	21
2.2. CARACTERIZAÇÃO DO REBOLO	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1. RETIFICADORA E REBOLO	29
3.2. INSERTOS DE METAL DURO	31
3.3. MICROSCÓPIO CONFOCAL	32
3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	33
3.4.1. Avaliação da Camada Abrasiva	36
3.4.2. Avaliação do Inserto	38
3.4.3. Medição das Forças	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1. DESGASTE DO REBOLO	41
4.2. FORÇA ESPECÍFICA	48
4.3. QUALIDADE DO INSERTO	50
5. CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS	57
APÊNDICE A - SUPORTE POSICIONADOR	61

1. INTRODUÇÃO

Considerado o mais importante material para ferramentas de corte, o metal duro é conhecido por exibir excelentes propriedades mecânicas a temperatura ambiente e a altas temperaturas, podendo ser utilizado para cortar inúmeras ligas metálicas conhecidas, nas mais diversas operações de usinagem (Bonny *et al.*, 2010; Ferraresi, 1977). Composto em sua maioria por carboneto de tungstênio (WC) e cobalto (Co), o metal duro apresenta uma combinação de elevada dureza, resistência ao desgaste, tenacidade, resistência a quente e resistência à corrosão, não comum a outros materiais e muito exigida em ferramentas de usinagem (Diniz, Marcondes e Coppini, 2013; Wirtz *et al.*, 2018).

As ferramentas de metal duro podem ser inteiramente fabricadas com o mesmo material, conhecidas por ferramentas inteiriças, mais comum no caso das brocas e fresas. Porém, são largamente empregadas na forma de insertos intercambiáveis (pastilhas) fixados em suportes, sendo este último tipo o escolhido para o desenvolvimento deste trabalho (Diniz, Marcondes e Coppini, 2013).

Os insertos de metal duro são produzidos principalmente através da metalurgia do pó, sendo os pós metálicos de WC e Co (e, eventualmente, outros carbonetos, como TiC e TaC) moídos, para se atingir o tamanho de grão desejado, e misturados em determinada proporção. Em seguida, é realizado o processo de prensagem, no qual o inserto é moldado de acordo com a geometria da matriz da prensa, mas ainda não atinge resistência mecânica adequada devido à porosidade presente em sua estrutura. Para isso, o inserto passa por processo de sinterização, realizado em um forno com atmosfera de hidrogênio e pressão negativa, a temperaturas entre 1425°C e 1480°C. A sinterização faz com que as dimensões do inserto sejam reduzidas em até 18%, devido à redução da porosidade, que pode chegar a 0,01% após esta operação. Nesta etapa, é conferida a resistência mecânica necessária para que o inserto suporte os esforços de corte durante sua aplicação em processo de usinagem (Chiaverini, 1986; Machado *et al.*, 2011).

A contração do material durante a sinterização pode provocar defeitos, como empenamento, e dificulta a obtenção de tolerâncias mais estreitas. Para garantir a intercambialidade e tolerância do processo de usinagem, é necessário que o inserto passe por um processo de acabamento. Sendo o metal duro extremamente

resistente ao desgaste, utiliza-se para isso o processo de retificação com grãos abrasivos de diamante. A retificação pode conferir também ângulos e raios aos insertos, necessários para o corte de diferentes materiais e reforço das arestas (Ferraresi, 1977; Machado *et al.*, 2011).

A retificação como processo de acabamento é responsável pela qualidade superficial e dimensional dos insertos, que tem influência direta nas tolerâncias do processo de usinagem nos quais serão utilizados. Denkena, Köhler e Ventura (2013) afirmam que a estratégia de retificação do inserto possui influência no comportamento e conseqüente tempo de vida do mesmo em trabalho. Com o aumento da velocidade de corte na retificação de 15 m/s para 45 m/s, por exemplo, Weinert e Schneider (2000) verificaram uma mudança estrutural no inserto, que levou ao aumento do desgaste de cratera durante o torneamento, devido às trincas térmicas geradas durante a retificação.

Além da estratégia de retificação, outro fator com forte influência na qualidade do inserto é o desgaste do rebolo durante o processo, cuja evolução, gerada pelo achatamento, quebra ou perda dos grãos abrasivos, pode causar aumento de carga mecânica e térmica (Luo *et al.*, 2001; Zhan *et al.*, 2009). Essas características podem gerar danos térmicos e de outras naturezas, como aumento da rugosidade e crateras na superfície do inserto (Yu, Lu e Wang, 2016).

Com os conceitos apresentados, é possível deduzir a importância do domínio do processo de retificação de insertos de metal duro, no qual o comportamento do rebolo e a qualidade da peça são parâmetros necessários para medir a eficácia do processo, além de apontar ações para melhorias.

Neste contexto, o principal objetivo dessa pesquisa é a caracterização do desgaste da superfície de corte do rebolo diamantado durante o processo de retificação de insertos de metal duro. Além disso, pretendeu-se determinar o efeito do desgaste da superfície de corte do rebolo sobre a qualidade da superfície retificada. Para dar suporte às análises e justificar os resultados obtidos, o comportamento das forças normal e tangencial de retificação também foi avaliado.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados conceitos sobre o processo de retificação, com foco em suas especificidades quando aplicado ao metal duro, além da integridade de insertos de corte.

2.1. RETIFICAÇÃO DO METAL DURO

A retificação pertence ao grupo de processos de usinagem com aplicação de rebolos que possuem arestas de geometria não definida. Isso indica que não é possível determinar com exatidão os ângulos e dimensões das arestas de corte, responsáveis pela retirada do material da peça que está sendo fabricada. Além disso, é importante levar em consideração que várias arestas de corte são simultaneamente responsáveis pela remoção do cavaco na superfície do material, trazendo desafios para a investigação deste tipo de processo. Por haver várias arestas de dimensões reduzidas trabalhando ao mesmo tempo, o cavaco é formado em escala micrométrica, permitindo melhor grau de acabamento da superfície, usinagem de materiais com dureza elevada e aplicação como método de usinagem de precisão, quando comparado a outros processos convencionais (Klocke, 2009).

O metal duro, produzido pela metalurgia do pó, é composto de grãos duros (carboneto de tungstênio, WC) distribuídos em uma matriz dúctil (em sua composição mais simples, normalmente o cobalto, Co) e, devido às suas características, como elevada dureza, resistência à flexão, tenacidade e módulo de elasticidade (Biermann e Würz, 2009), a retificação é adequada para conferir dimensões finais e retrabalhar ferramentas compostas deste material (Malkin e Hwang, 1996; Weinert e Schneider, 2000). Sendo normalmente aplicada na produção de insertos, a retificação plana transversal de mergulho é apropriada para conferir geometrias complexas, além de permitir alta remoção de material (Denkena *et al.*, 2014).

Neste contexto, a determinação do rebolo apropriado é importante para a obtenção das características desejadas do material retificado, além da garantia de eficiência do processo. Desse modo, faz-se necessária a especificação do tipo e

tamanho do grão abrasivo, do ligante, do material do corpo e da concentração ou porosidade do rebolo. Rebolos com grãos abrasivos de diamante, classificados como superabrasivos, são utilizados com eficiência para retificar materiais duros e quebradiços como o metal duro, pois têm resistência mecânica capaz de suportar os elevados esforços inerentes ao processo de retificação deste tipo de material (Kopac e Krajnik, 2006; Wirtz *et al.*, 2018).

Já o ligante do rebolo é parâmetro decisivo para os resultados de acabamento e força durante o processo de retificação. Estudos indicam que, na retificação de metal duro, o ligante vitrificado leva a menores cargas mecânica e térmica, porém, os melhores acabamentos superficiais são adquiridos com o uso do ligante resinoide (Biermann e Würz, 2009), normalmente aplicado na retificação de diversas composições de metal duro (Luo *et al.*, 2001).

O ligante tem como papel a fixação e permanência dos grãos abrasivos do rebolo, levando em consideração as forças e temperaturas presentes no processo de retificação. Destaca-se também a importância de sua porosidade, necessária para permitir o transporte de fluido lubrificante, bem como do cavaco durante o processo, aspecto no qual alguns ligantes são deficientes por produzirem camadas densas. Através dessa perspectiva, novos estudos têm mostrado que o NiTi é promissor como material de ligação na fabricação de ferramentas abrasivas (Denkena *et al.*, 2020).

Atrelado ao ligante, outro fator decisivo para a retificação, descrito por Biermann e Würz (2009), é o tipo de fluido utilizado para lubrificação do processo. Eles indicam que o fluido à base de água traz melhores acabamentos superficiais para a retificação quando combinado ao uso do ligante vitrificado, enquanto esses mesmos resultados são obtidos para o ligante resinoide com aplicação de óleo integral. Nesta última situação, obtêm-se também menores valores de desgaste do rebolo e forças do processo.

O método de MQNL (mínima quantidade de nano lubrificante) pode ser utilizado para melhorar a eficiência do processo de retificação do metal duro se comparado à aplicação de fluido abundante. A aplicação de nanopartículas de MoS₂ e Al₂O₃, dispersas em bases de óleo mineral e vegetal, através dessa técnica reduziu as forças de corte e a rugosidade superficial, sendo o óleo mineral a base mais eficaz. Nanopartículas de grafite também foram utilizadas, reduzindo o atrito e

a rugosidade, porém foram responsáveis pelo aumento das forças (Hosseini, Emami e Sadeghi, 2018).

O diâmetro médio do grão abrasivo do rebolo tem relação com o acabamento da superfície retificada, pois interfere diretamente na formação de cavaco. Quanto menor o tamanho do grão abrasivo, para uma mesma concentração, maior será a quantidade de grãos ativos atuando no corte, sendo esperado um melhor acabamento e maiores esforços totais. Em contrapartida, com maior tamanho de grão, as arestas podem ser consideradas mais afiadas, mas há um menor número de arestas ativas simultaneamente, o que gera superfícies com menor grau de acabamento e menores esforços durante o processo (Klocke, 2009).

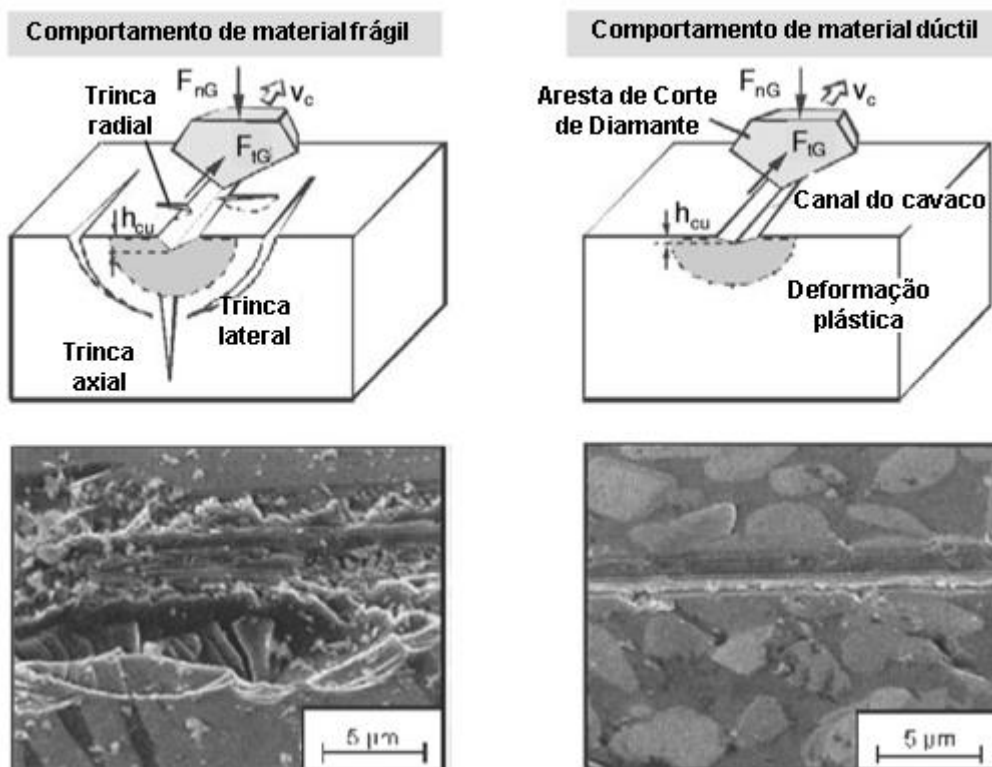
De acordo com Hegeman, Hosson e With (2001), o comportamento da remoção de material pode ser determinado pela razão entre o tamanho de grão do abrasivo do rebolo e o tamanho de grão de WC do metal duro, o que permite afirmar que a microestrutura do metal duro influencia diretamente o resultado da retificação (Wirtz *et al.*, 2018). Após a retificação do metal duro com tamanho de grão de WC 20 μm , Hegeman, Hosson e With (2001) observaram grãos de WC quebrados e esmagados, enquanto na retificação de uma amostra com menor granulometria (3 μm), notou-se arrancamento dos grãos de WC, além da formação de trincas em alguns deles. De modo geral, maior rugosidade foi verificada no segundo caso.

Outro fator de influência na retificação desse material é a porcentagem de Co presente na composição do metal duro. Com o aumento da concentração de Co, percebeu-se uma queda na qualidade da rugosidade, aumento da presença de micro picos na superfície e aumento do lascamento nas arestas de amostras retificadas. Esses efeitos estão atrelados ao menor efeito de suporte do Co em relação aos grãos de WC (Zhang *et al.*, 2019).

Durante a retificação, o corte de materiais frágeis, como o metal duro, pode apresentar dois tipos de comportamentos predominantes, que influenciam nos resultados da superfície. Como mostra a Figura 1, o comportamento frágil corresponde à remoção do material principalmente por meio da formação e propagação de trincas laterais e radiais, enquanto trincas axiais apenas causam danos à integridade superficial da peça. Já o comportamento dúctil, possível de ser obtido em materiais considerados frágeis a partir da aplicação de espessuras de corte menores que determinada espessura crítica, apresenta deformação plástica

inicial, causando menores danos à superfície, mas exigindo maior quantidade de energia (Klocke, 2009; Wirtz et al., 2018). A espessura crítica do cavaco, a partir da qual passa a se ter remoção frágil, é determinada pelas características do material, como tenacidade à fratura, dureza e módulo de elasticidade (Klocke, 2009; Klocke et al., 2016). Através de testes de riscamento com grão único em metal duro e cerâmica, ambos materiais bifásicos com ligante macio, Mueller *et al.* (2018) identificaram o comportamento de remoção de material dúctil de forma predominante em baixas profundidades e com o aumento da espessura de corte o comportamento se tornou predominantemente frágil, apresentando trincas e rompimentos.

Figura 1. Comportamento frágil e dúctil da formação de cavaco em materiais frágeis



Fonte: adaptado de Klocke (2009).

As componentes normal e tangencial da força de retificação são fortemente dependentes do estado de afiação dos grãos abrasivos de diamante do rebolo (Zhan *et al.*, 2009), além de sofrerem influência de parâmetros como a espessura de

corde, a microestrutura do material retificado, a velocidade de corte e a velocidade de avanço. Na retificação de metal duro, Zhan et al. (2009) perceberam que as forças e as temperaturas aumentaram com a diminuição da protrusão dos grãos de diamante.

Se mantidos constantes os outros parâmetros do processo, o aumento da velocidade de corte leva a uma diminuição da espessura de corte na retificação e aumento da temperatura (Aurich *et al.*, 2008; Klocke *et al.*, 1997). A temperatura também se eleva ao aumentar a profundidade de corte, podendo chegar a 1000°C na zona de retificação. Para este caso, foram encontradas menores forças de retificação (Zhan e Xu, 2012). Em contrapartida, ao se elevar o avanço da peça, percebe-se uma diminuição da temperatura (Inasaki, 1996; Klocke *et al.*, 1997; Zhan e Xu, 2012).

Diminuição das forças de retificação e melhora da qualidade superficial foram notadas na retificação do metal duro realizada com a aplicação de um fuso rotativo de usinagem ultrassônico (Hsue e Zheng, 2018). Menores forças de retificação também foram medidas com o aumento da quantidade de Co na composição do metal duro e aumento da temperatura em algumas faixas de velocidade de corte utilizadas por Wirtz et al., (2017).

2.1.1. INTEGRIDADE DO INSERTO DE CORTE

A eficiência do inserto de metal duro durante a usinagem depende, entre outros fatores, de sua qualidade superficial. Efeitos como trincas térmicas, irregularidades na superfície e aresta irregular podem comprometer a resistência do inserto ou influenciar o resultado do corte. Por isso, são parâmetros que devem ser controlados no processo de retificação.

Grande parte da energia utilizada na retificação é transformada em calor, que pode provocar danos, como a formação de trincas na superfície. Para minimizá-los, é possível diminuir a temperatura da zona de retificação com a redução do comprimento de contato, combinado a uma lubrificação eficiente (Kopac e Krajnik, 2006). Outra possibilidade corresponde à redução da velocidade de corte, que tem impacto direto sobre as cargas térmicas geradas no processo.

As variáveis de entrada do processo também têm efeito significativo sobre a rugosidade, a qual aumenta com o crescimento do avanço e a diminuição da velocidade de corte (Abdullah *et al.*, 2007; Klocke *et al.*, 1997). Nesse sentido, (Zhang *et al.*, 1995) sugerem a utilização de baixos avanços para se atingir o regime dúctil e reduzir danos superficiais na retificação de materiais frágeis. Na retificação de discos de silício, Zhang *et al.* (2011) notaram uma melhora na rugosidade ao elevar a velocidade de corte de 29,3 para 40,3 m/s.

Outro fator de influência relevante corresponde à topografia do rebolo (protrusão de grão e quantidade de arestas ativas). O achatamento (formação de fase plana no topo do grão devido ao desgaste) dos grãos permite um maior número de arestas ativas, além de aumentar os raios de ponta dessas arestas, podendo levar a um comportamento dúctil do material da peça se combinado com parâmetros adequados. Xie e Lu (2011) perceberam que o efeito de achatamento levou a uma melhora da rugosidade superficial na retificação longitudinal, enquanto (Zhang *et al.*, 1995) notaram que maiores taxas de desgaste do rebolo tenderam a produzir maiores valores de rugosidade, resultado que deve estar associado a um outro tipo de desgaste do grão. Concordando com os primeiros autores, (Koshy, Iwasaki e Elbestawi, 2003) mostraram que uma menor protrusão dos grãos pode melhorar a rugosidade. Na retificação de metal duro, Lu, Xie e Si (2014) conseguiram reduzir a rugosidade em 46% e a temperatura em 37% com a utilização de um processo de dressagem auxiliado por descarga elétrica para produção de uma camada abrasiva com grãos de baixa protrusão. Já que o tamanho do grão abrasivo tem efeito direto sobre sua protrusão, este também apresenta influência no acabamento da superfície e dano na subsuperfície, sendo possível a obtenção de rugosidades extremamente baixas com rebolos de grãos superfinos aliados a maiores velocidades de corte (Zhang *et al.*, 2011).

Ao comparar os resultados de rebolos diamantados com ligantes resinoide e vitrificado na retificação plana transversal de mergulho de insertos de metal duro, Cruz, Sordi e Ventura (2020) observaram que o vitrificado levou a uma maior rugosidade, devido ao número reduzido de arestas ativas (em torno de 70% em relação ao resinoide). Constatou-se que o rebolo vitrificado gera maior temperatura que o resinoide, causando maior rugosidade superficial e lascamento na aresta do inserto. Além disso, os autores destacaram que o aumento da espessura do cavaco

causa danos à superfície, pois causa remoção do material de forma frágil.

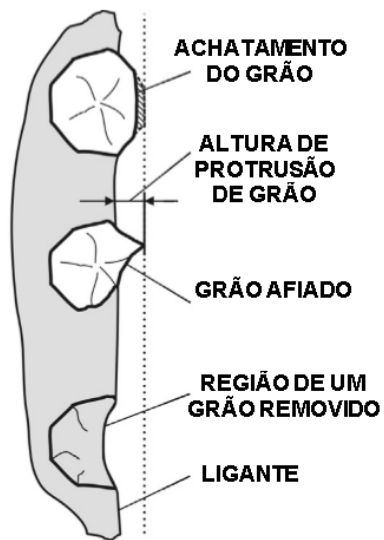
O lascamento da aresta do inserto também deve ser considerado na avaliação de sua qualidade, pois está diretamente ligado à redução de sua vida durante o uso. Na realização de chanfros por retificação nos raios de ponta de insertos de PCBN, Ventura, Köhler e Denkena (2014) constataram que o aumento da rotação do inserto faz o lascamento aumentar consideravelmente. Esse lascamento é impactado diretamente pelo aumento da espessura de cavaco por grão em alguns pontos da aresta. Em outro trabalho, Ventura, Köhler e Denkena (2013) propuseram um novo método de preparação de arestas em insertos de metal duro, demonstrando que é possível reduzir o lascamento em comparação a uma aresta afiada.

O tamanho de grão médio do rebolo também oferece relação direta com a qualidade da aresta do inserto. Denkena, Köhler e Ventura (2014a e 2014b) analisaram o comportamento do lascamento de aresta na retificação de insertos de PCBN com diferentes parâmetros e rebolos. Observou-se um aumento significativo do lascamento com o uso de uma maior granulometria do rebolo, além de um aumento suave no lascamento quando se eleva a velocidade de avanço da peça.

2.1.2. DESGASTE DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO

No caso do processo abrasivo, o rebolo sofre tipos distintos de desgaste, os quais estão diretamente associados às cargas termomecânicas durante o processo. Quanto maior o valor dessas cargas, maior será o desgaste do rebolo (Klocke, 2009; Zhan *et al.*, 2009). Os grãos abrasivos do rebolo estão sujeitos a três principais fenômenos de desgaste: achatamento, ruptura e remoção do grão, que influenciam diretamente sua protrusão, que, por sua vez, pode ser tomada como indicativo da agressividade do rebolo (capacidade de remover material durante a retificação). No corte de materiais superduros, Mamalis, Horvath e Grabchenko (2000) demonstraram que o principal mecanismo de desgaste corresponde ao achatamento dos grãos (Figura 2).

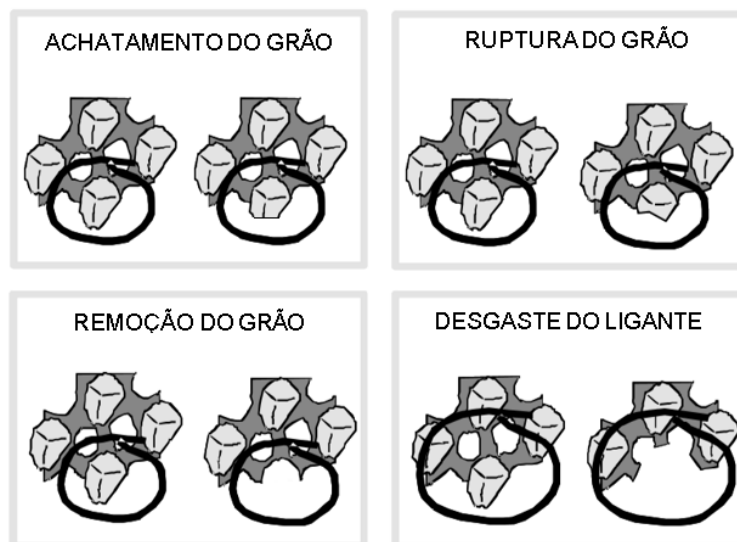
Figura 2. Tipos principais de desgaste sofrido pelo grão abrasivo do rebolo na retificação de materiais superduros



Fonte: adaptado de Denkena, Köhler e Ventura (2014a).

O ligante corresponde a outra parte do rebolo suscetível ao desgaste e, assim, a redução da protrusão de grão pode, na verdade, ter quatro causas principais, conforme mostrado na Figura 3: achatamento; ruptura; remoção do grão abrasivo; e desgaste do ligante, que, no limite, também acaba por causar perda do grão.

Figura 3. Fenômenos presentes no desgaste do rebolo



Fonte: adaptado de (Klocke, 2009).

O achatamento é a forma inicial de desgaste dos grãos em rebolos diamantados. Zhan et al. (2009) afirmam que as principais causas de desgaste são a forma irregular dos grãos de diamante, protruções em excesso e a tensão de impactos alternados. Mecanismos de desgaste, como adesão, microfratura, abrasão e reações químicas foram apontados em outros trabalhos (Klocke, 2009; Wirtz et al., 2018)

Na retificação do metal duro, um aumento significativo do desgaste da superfície de corte do rebolo ocorre com o aumento das forças de retificação e com maiores tamanhos de grão de WC (Wirtz et al., 2018). Abdullah et al. (2007) afirmam que o aumento da velocidade de avanço também eleva o desgaste no rebolo, enquanto o aumento da velocidade de corte o reduz. Com maiores valores de velocidade de corte, obtêm-se menores espessuras de cavaco, além de menores taxas de remoção de material, o que reduz os valores de desgaste (Klocke et al., 1997; Winter et al., 2015).

Para se obter menores taxas de desgaste do rebolo, (Kumar e Choudhury, 2007) sugeriram combinar menores tamanhos de grãos abrasivos com menores velocidades de corte. Diferentemente, conforme Biermann e Würz (2009), maiores tamanhos de grão combinados com ligante resinoide apresentaram menores taxas

de desgaste na retificação de metal duro e de cerâmica.

A disposição dos grãos de diamante também influencia o desgaste do rebolo. Ao comparar o comportamento de um rebolo com disposição aleatória e outro com disposição de grãos ordenados, percebeu-se que estes últimos sofreram menos os efeitos do desgaste. Uma correta disposição dos grãos permite seu uso de forma mais eficiente, evitando-se sobrecortes e atrito excessivo. No entanto, deve-se destacar que rebolos com essas configurações não têm sido produzidos comercialmente, em função da complexidade de sua fabricação e elevado custo (Yu, Lu e Wang, 2016).

A autoafiação do rebolo também é uma possibilidade quando se analisa a evolução de sua topografia durante a retificação, sendo possível por intermédio da quebra parcial dos grãos de diamante, que gera arestas afiadas, ou desgaste do ligante, que faz com que arestas de outras camadas apareçam na superfície do rebolo. Esse fenômeno foi percebido durante o processo de retificação de metal duro com a utilização de um rebolo de diamante e ligante vitrificado (Staniewicz-Brudnik *et al.*, 2018).

O desgaste da superfície de corte do rebolo é um importante parâmetro a ser analisado para que se possa determinar seu fim de vida. Altos valores de desgaste podem causar danos permanentes às superfícies retificadas (Jiang *et al.*, 2013), devido à elevação de cargas térmicas e mecânicas produzidas por possível aumento do atrito e da deformação do material antes do cisalhamento.

A topografia do rebolo pode ser corrigida por meio da operação de dressagem (perfilamento combinado à afiação), que tem por objetivo uniformizar a superfície abrasiva através da remoção/afiação de grãos abrasivos desgastados, do ligante e de partículas aderidas durante a retificação (Doman, Warkentin e Bauer, 2006; Machado *et al.*, 2011). Além do material do dressador, seu formato e tamanho de grão são escolhidos em consonância com as características do rebolo.

De acordo com (Denkena *et al.*, 2014), a dressagem é realizada comumente antes da retificação ou, quando o material a ser retificado leva a um desgaste acelerado da superfície de corte do rebolo, simultaneamente ao processo. Os mesmos autores esclarecem que, na retificação plana transversal de mergulho de materiais de ferramenta, a dressagem do rebolo diamantado, do tipo copo, é feita

por um rolo dressador de óxido de alumínio, também do tipo copo, o qual tem a função de remover o ligante, liberando grãos desgastados e limpando os poros do rebolo.

Além da dressagem convencional, realizada em rebolos superabrasivos por meio de discos diamantados ou rebolos de tipo copo, outros métodos podem ser utilizados. Um que se mostrou eficiente correspondeu à aplicação de um dressador estacionário assistido por ultrassom, responsável por fraturar os grãos de diamante, gerar novas arestas afiadas e nivelar a protrusão dos grãos da superfície. Com os grãos de diamante fraturados, foi possível atingir valores de rugosidade mais baixos, mesmo com a utilização de rebolo com tamanho de grão bastante elevado (D251) (Kitzig, Tawakoli e Azarhoushang, 2016). A microestruturação a laser também provou ser um método promissor para condicionamento de rebolos diamantados, determinando sulcos estruturados e com ângulos precisos, o que facilitou o transporte de fluido e cavaco durante o processo. Amostras de metal duro retificadas por rebolos microestruturados a laser apresentaram rugosidades Ra até 41% menores que as amostras retificadas com rebolos que não passaram por este tipo de condicionamento (Deng e He, 2017).

2.2. CARACTERIZAÇÃO DO REBOLO

A caracterização do rebolo visa identificar o estado da superfície de corte do rebolo e a evolução das transformações sofridas por grãos e ligante com o decorrer do tempo de retificação. Dos trabalhos analisados, a maioria possui foco no comportamento dos grãos abrasivos, pois são os responsáveis pelo cisalhamento do material da peça, possuem forma irregular e posicionamento aleatório na superfície. Porém, atenção também tem sido dada ao ligante, por ser fundamental para a manutenção dos grãos na camada abrasiva.

Nakai *et al.* (2015) propuseram um método não invasivo de avaliação, por meio da aquisição de sinais de emissão acústica. O método permitiu a avaliação do desgaste e rugosidade média aritmética da superfície de corte do rebolo em diferentes condições de trabalho. Luo *et al.* (2001) analisaram o desgaste do rebolo

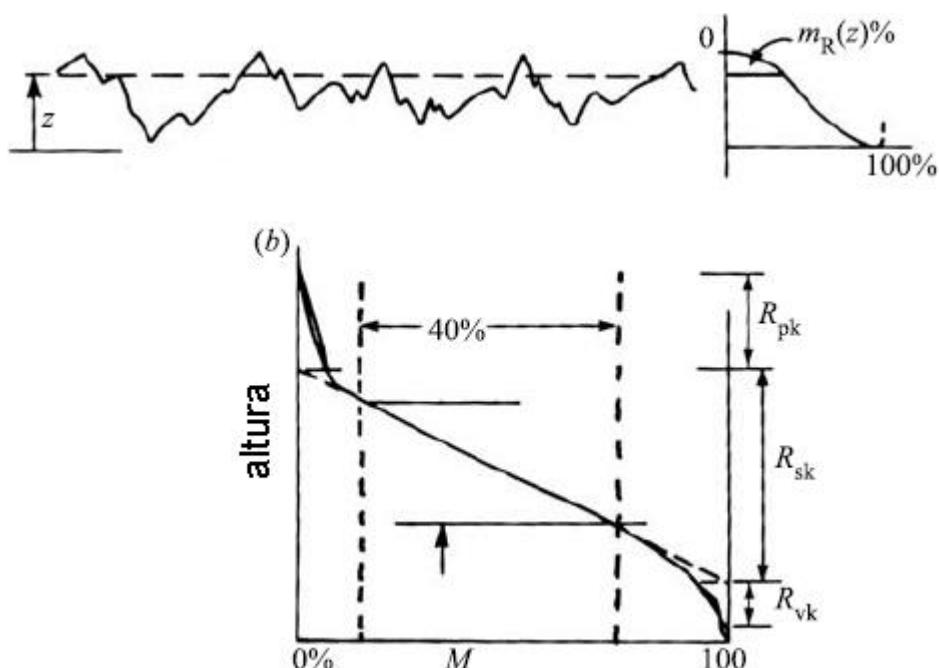
através da observação de sua camada abrasiva com o uso de um estereomicroscópio após a retificação do metal duro classe P10 sem uso de fluido de corte, a fim de avaliar a influência de elementos presentes no ligante resinoide de rebolos de diamante nos resultados do processo. Segundo (Inasaki, 1996), uma alternativa possível para caracterização da superfície abrasiva do rebolo é através da utilização de um perfilômetro óptico, a partir do qual se pode calcular a densidade das arestas de corte em regiões distintas da superfície, tornando possível estimar o desgaste e os resultados da retificação.

Através de um perfilômetro, porém de contato, Xie et al. (2008) analisaram a protrusão dos grãos de diamante (180 #) de um rebolo com ligante resinoide. Por meio de um software, os grãos foram projetados em três dimensões, possibilitando a medição dos ângulos de saída, obtidos na faixa de $-89,1^\circ$ a -45° ; dos ângulos de folga, entre $1,2^\circ$ e $-73,1^\circ$; dos ângulos de ponta do grão, variando de $61,9^\circ$ a $-177,7^\circ$; e das protrusões, com valores entre 0 e $22,5 \mu\text{m}$. A alteração desses valores com a dressagem e com a evolução do processo de retificação pôde, assim, ser acompanhado.

Um microscópio confocal foi utilizado por Denkena, Köhler e Ventura (2014a e 2014b) para avaliação da topografia de um rebolo de diamante após a retificação de insertos de PCBN. A superfície de corte do rebolo foi moldada por meio de uma resina polimerizável e seu negativo foi analisado no microscópio mencionado, evitando, assim, a retirada do rebolo da máquina. Os autores optaram por avaliar o desgaste dos grãos por meio do parâmetro de perfil de rugosidade R_{pk} (altura reduzida de pico), que possui relação com a protrusão de grão e é obtido a partir da curva de Abbott-Firestone.

Os parâmetros da curva de Abbott-Firestone, também conhecida como curva de proporção de material, são largamente empregados em processos como retificação e brunimento, pois permitem estratificar a proporção de picos e vales presentes no perfil ou na superfície avaliada (Whitehouse, 2003). Como pode ser visto na Figura 4, a porção de material é dividida em três partes, sendo R_k correspondente ao núcleo e R_{pk} e R_{vk} relacionados à altura dos picos e à profundidade dos vales, respectivamente.

Figura 4. Exemplo de curva de proporção de material (Abbot-Firestone)



Fonte: adaptado de Whitehouse (2003).

Cruz, Sordi e Ventura (2020) também utilizaram um microscópio confocal, mas para avaliação direta da superfície do rebolo, utilizando para isso os parâmetros de superfície Sp_k (altura reduzida de pico) e $Smr1$ (fração da superfície que consiste em picos sobre o núcleo do material). O primeiro parâmetro foi utilizado para caracterizar a protrusão de grão, enquanto o segundo serviu para avaliar a quantidade de arestas ativas.

Ao comparar o desgaste de rebolos com grãos dispostos aleatoriamente e rebolos com grãos regularmente alocados na superfície abrasiva, Yu, Lu e Wang (2016) propuseram um sistema de imagem auxiliado por computador para avaliar a fratura e o achatamento dos grãos. O rebolo, retirado da máquina, foi medido por uma câmera colocada em posição perpendicular e mantida a uma distância constante. Por meio desse método, foi possível obter imagens nítidas de desgaste e de achatamento dos grãos, de maneira econômica, porém com tempo demasiado de medição.

Breidenstein et al. (2016) fizeram um comparativo entre três outros métodos para análise da superfície do rebolo: uso de sensor laser de triangulação,

microscópio eletrônico de varredura (MEV) e perfilômetro tátil. Em todos os métodos de avaliação foi possível determinar o estado de desgaste dos grãos, além do tamanho do grão. O método de triangulação se mostrou mais rápido (tempo de varredura de 0,008 s/mm²) e permite a extração de superfícies tridimensionais. O MEV, mais lento (tempo de varredura de 46 s/mm²), fornece uma análise real da superfície, mas bidimensional. Já o método com perfilômetro tátil possui resolução próxima ao sensor laser, porém, possui um tempo de varredura excessivo (537 s/mm²).

Com base nas informações apresentadas, verifica-se a importância que tem sido dada à análise da topografia do rebolo para caracterização do processo e obtenção de explicações para os fenômenos envolvidos. Os métodos utilizados não são foco direto das pesquisas, mas nota-se que técnicas mais flexíveis e de menor custo tem sido procuradas para aplicação.

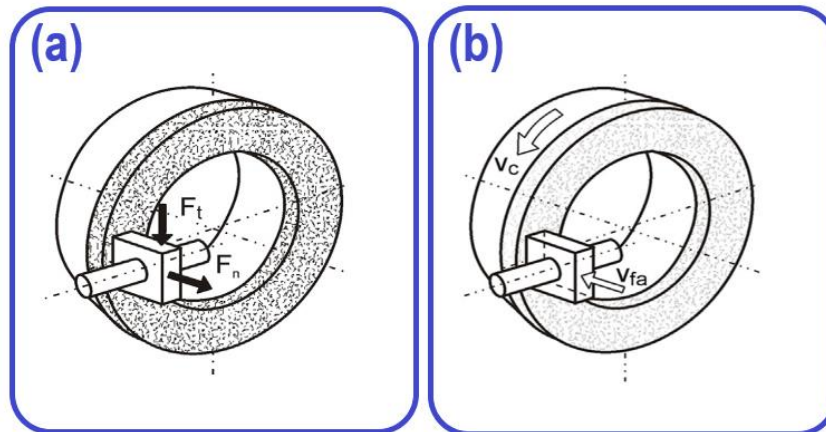
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para caracterização do desgaste da superfície de corte do rebolo, foi analisada a camada abrasiva do rebolo após a retificação dos insertos, de modo a se avaliar a afiação dos grãos; foram adquiridas as forças durante o processo de retificação; e medidas as rugosidades de superfície e aresta dos insertos para determinação dos efeitos do desgaste do rebolo. Neste contexto, são descritos neste capítulo os equipamentos, materiais e procedimentos utilizados para determinação dos fenômenos causados pela evolução do desgaste do rebolo durante a retificação.

3.1. RETIFICADORA E REBOLO

Para a realização dos testes de retificação, foi utilizada uma retificadora CNC com 4 eixos para preparação de insertos de corte Agathon Dom Plus, alocada no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos (DEMec/UFSCar). O modelo oferece rotação máxima de 3400 rpm, potência máxima de 16 kW e é equipado com sistema próprio de medição das forças normal F_n e tangencial F_t , conforme a Figura 5(a). O sistema, integrado à máquina, adquire e armazena dados de corrente dos motores da máquina a uma taxa de 50 Hz. Maiores detalhes, por serem confidenciais, não são fornecidos pelo fabricante. As velocidades de corte v_c e de avanço v_{fa} envolvidas no processo, caracterizado como retificação plana transversal de mergulho, são observadas na Figura 5(b).

Figura 5. Esquema das forças de retificação e velocidades na retificação plana transversal de mergulho



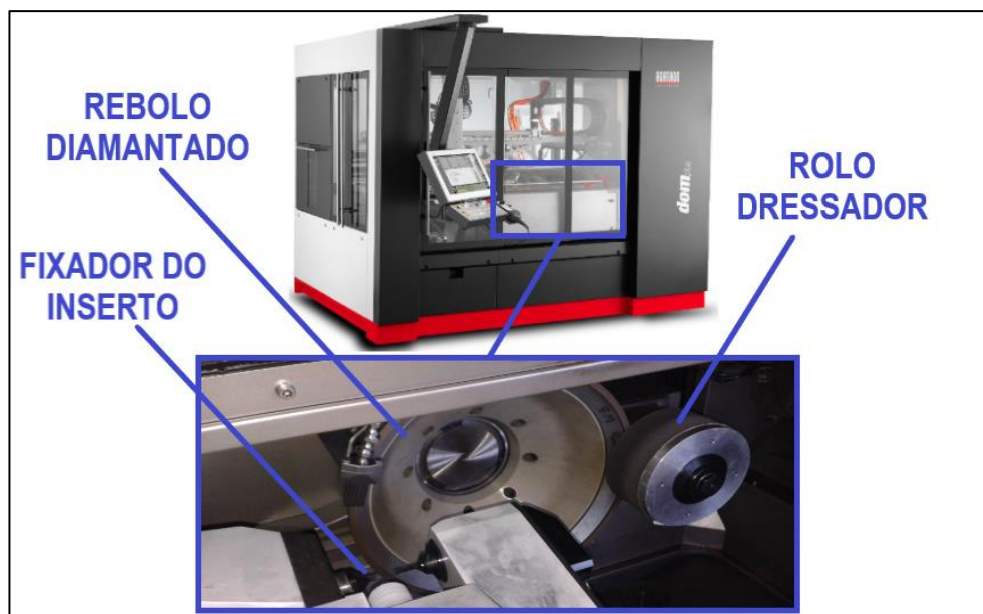
Fonte: adaptado de Denkena, Köhler e Ventura (2014a).

O rebole utilizado para a retificação (Figura 6), cuja especificação é B.K-2A2T-350-10-4-27-300-D46-C100, é fabricado pela empresa Norton Winter, possui o formato copo, com diâmetro externo de 350 mm, camada abrasiva com aproximadamente 10 mm de largura e 5 mm de altura. Esta possui concentração C100 (= 4,4 kt/cm³), sendo composta por grãos de diamante com tamanho médio de 46 μ m (D46) e ligante resinoide. O corpo do rebole é fabricado em alumínio.

Mostrado na Figura 6, o rolo dressador utilizado também possui formato copo (diâmetro externo de 150 mm e interno de 125 mm), seus grãos abrasivos são de óxido de alumínio com tamanho médio de 180#, recomendado para dressagem do rebole D46. A dressagem, neste caso utilizada para avivamento dos grãos abrasivos, é necessária para remover tanto o material aderido na superfície abrasiva do rebole quanto grãos de diamante desgastados.

Durante todo o processo de retificação foi utilizado fluido de corte abundante. O fluido Blasogrind HC5, da fabricante Blaser Swissslube, é considerado integral por ser utilizado sem diluição e foi aplicado diretamente na região de contato entre rebole e inserto.

Figura 6. Componentes do processo de retificação plana transversal de mergulho

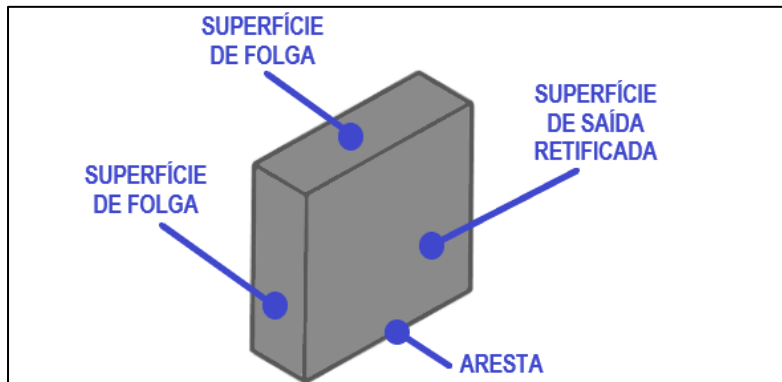


Fonte: o autor.

3.2. INSERTOS DE METAL DURO

Os insertos utilizados para retificação são de metal duro classe K10, de acordo com a norma ABNT ISO 513:2013, compostos por 95% de WC (carbeto de tungstênio) e 5% de Co (cobalto), com tamanho médio de grão igual a $1,28 \pm 0,12$ μm , sendo classificado como de granulometria fina. Fabricados pela empresa Sumitomo, possuem geometria SNMN1204- (formato quadrado, sem raio de ponta), como mostra a Figura 7.

Figura 7. Inseto de metal duro utilizado para os experimentos de retificação



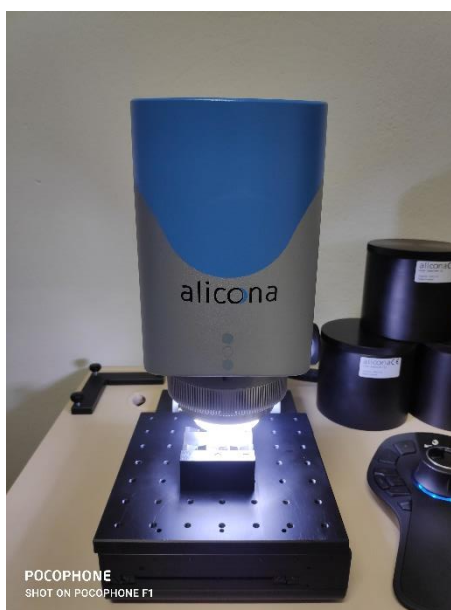
Fonte: o autor.

Devido às tolerâncias de sinterização, o comprimento das arestas variou entre 12,563 mm e 12,611 mm, enquanto a espessura ficou na faixa de 4,534 mm a 4,813 mm. As duas superfícies de saída dos insertos foram retificadas previamente com condições constantes e possuem rugosidade $R_z \cong 1,33 \mu\text{m}$. Dessa maneira, os testes de retificação foram realizados nas quatro superfícies de folga de cada inserto.

3.3. MICROSCÓPIO CONFOCAL

Para a avaliação da topografia do rebolo, rugosidade da superfície de folga e de aresta dos insertos, foi utilizado o microscópio para análise de imagens tridimensionais Alicona Infinite Focus SL (Figura 8), que permite aumento máximo de 500x com as lentes disponíveis. O equipamento também está alocado no DEMec/UFSCar.

Figura 8. Microscópio confocal Alicona Infinite Focus SL



Fonte: o autor.

O microscópio é equipado com lentes objetivas de 10x, 20x e 50x e está conectado a um computador, onde se encontra instalado o software Alicona Metrology Measurement, capaz de gerar as imagens utilizadas neste trabalho e os modelos matemáticos para cálculo dos parâmetros de rugosidade.

3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com foco na observação dos fenômenos envolvidos durante o desgaste da superfície de corte do rebolo, considerando a quantidade de material removida pelo mesmo, a retificação foi interrompida para análise da camada abrasiva e do inserto após a remoção de diferentes volumes de material, que se iniciou em 0 mm³ (rebolo recém-dressado) e atingiu o valor aproximado de 2150 mm³, como pode ser observado na Tabela 1. Devido à variação das dimensões iniciais e finais do inserto, estas da ordem de décimos de micrometro, os valores reais de volume obtidos foram aproximados e calculados com maior exatidão após o término da retificação, sendo as medidas dos insertos tomadas por um micrômetro externo digital milesimal de dois contatos.

Tabela 1. Volume de material removido para medição dos parâmetros de análise do rebolo e do inserto

Volume de remoção planejado (mm ³)	Volume de material removido real (mm ³)	
	Mínima espessura de corte (hmin)	Máxima espessura de corte (hmax)
0	-	-
15	14,92	23,12
30	30,41	41,57
60	73,98	78,26
120	115,75	117,15
150	156,77	158,72
300	307,88	306,23
450	466,27	463,98
600	628,27	621,74
750	795,45	781,93
900	959,57	942,53
1050	1122,19	1102,35
1250	1272,85	1250,78
1400	1422,97	1401,28
1550	1573,62	1550,21
1700	1723,64	1700,56
1850	1873,78	1850,97
2000	2023,87	2000,86
2150	2173,71	2151,17

Fonte: o autor.

A fim de se analisar o comportamento do desgaste em situações extremas, os testes com variação do volume de material retificado foram realizados em duas condições: espessura mínima e máxima de cavaco por grão h_{cu} . Assim, os parâmetros de corte foram escolhidos para a obtenção dessas duas espessuras, tendo como base os limites de velocidade permitidos pela máquina, sendo que o tipo de rebolo não foi alterado. A espessura média de cavaco por grão foi calculada

com base no modelo desenvolvido por Friemuth (1999), Eq. 1, para retificação transversal de mergulho e leva em conta, além das velocidades de corte v_c e avanço v_{fa} , o tamanho do grão abrasivo e sua concentração na superfície de corte do rebolo. Vale ressaltar que, para esse modelo, fora considerado que os grãos abrasivos possuem formato esférico.

$$h_{cu} = \left(\frac{1}{C_2 + 1} \right)^{\frac{1}{C_2}} \cdot \left[\frac{(C_2 + 1) \cdot v_{fa}}{N_k \cdot C_1 \cdot v_c} \right]^{\frac{1}{C_2 + 1}} \quad (1)$$

Na equação, $C_1 = 4/3 \times (d_G)^{1/2}$, $C_2 = 1,5$, d_G = diâmetro médio de grão, v_{fa} = velocidade de avanço, v_c = velocidade de corte e N_k = número de arestas/volume.

Os valores de velocidade e as respectivas espessuras de cavaco são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de espessura do cavaco por grão, velocidade de corte e de avanço para cada teste

	h_{cu} (μm)	v_c (m/s)	v_{fa} (mm/min)
Espessura mínima de cavaco por grão (h_{\min})	0,18	40	2
Espessura máxima de cavaco por grão (h_{\max})	0,55	12	10

Fonte: o autor.

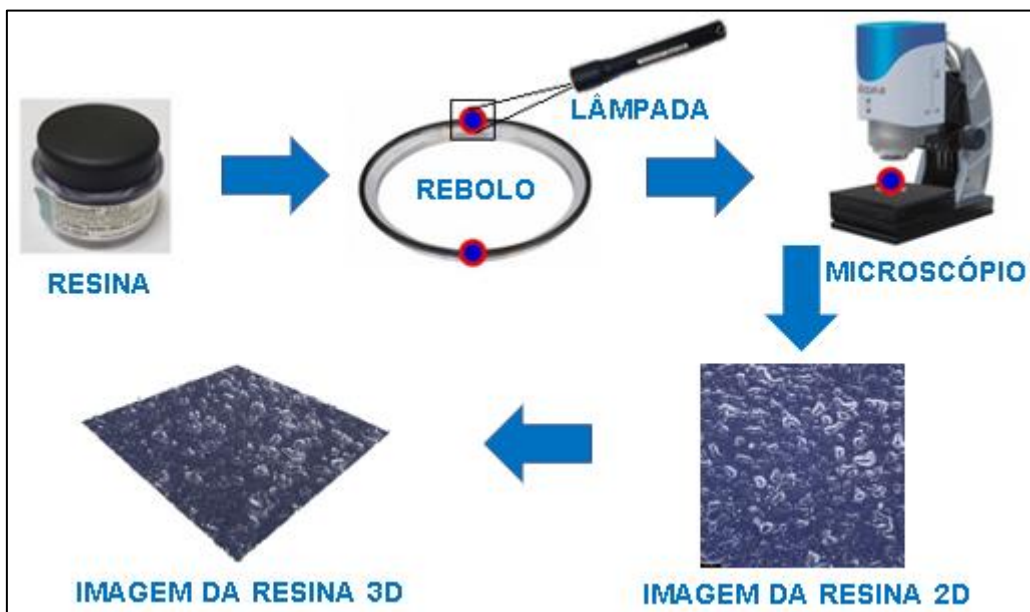
No começo de cada teste (volume removido de 0 mm^3), o rebolo foi dressado com parâmetros constantes, de modo a se garantir uma camada abrasiva uniforme antes do início do desgaste. Foram aplicados os seguintes valores: velocidade de corte do rebolo durante a dressagem $v_{cd} = 20$ m/s, velocidade de corte do dressador $v_d = 10$ m/s, velocidade de avanço axial do dressador $v_{fad} = 3$ $\mu\text{m/s}$ e tempo de dressagem $t_d = 5$ s.

3.4.1. AVALIAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO

Para avaliação da superfície de corte do rebolo, foi utilizado o parâmetro Spk, obtido a partir da curva de Abbott-Firestone (Figura 4) e correspondente à altura reduzida de pico na superfície analisada. Tal parâmetro fornece um indicativo da protrusão de grão, ou seja, da altura do grão abrasivo para fora do ligante. Uma redução dos valores de Spk se refere ao desgaste do grão abrasivo.

De modo a se evitar a retirada do rebolo da máquina, a topografia de sua camada abrasiva foi avaliada a partir de um molde feito por meio de uma resina polimerizável Kulzer Technovit 2220, conforme o método proposto por Denkena, Köhler e Ventura (2014b). Nesse método, com o auxílio de um filme plástico transparente, a resina em estado líquido é colocada na superfície do rebolo e uma luz ultravioleta é aplicada sobre ela por aproximadamente 1 minuto, até que ela se solidifique. O molde de resina é, então, levado ao microscópio confocal, sua imagem é filtrada de modo a torná-la plana, invertida e o parâmetro Spk é medido (Figura 9).

Figura 9. Processo de medição do parâmetro Spk



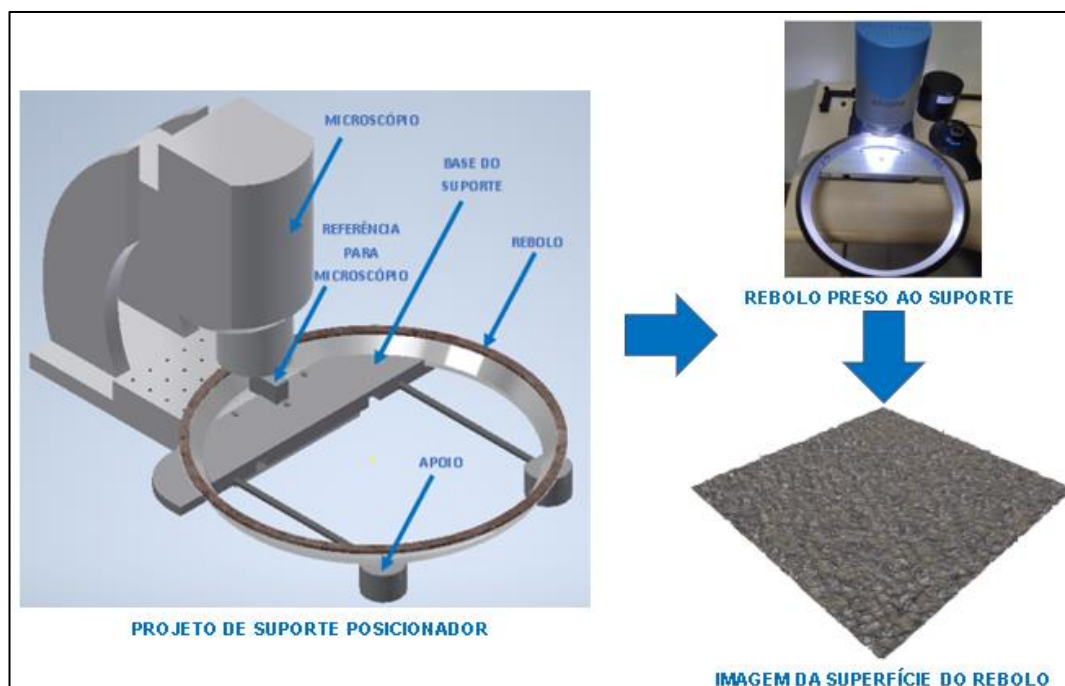
Fonte: o autor.

Para cada volume de remoção de material foram tirados moldes de dois pontos

da superfície do rebolo, espaçados aproximadamente em 180° e, para cada molde de resina, foram analisadas duas regiões de 4 mm^2 . Assim, para cada volume de material removido, foram realizadas quatro medições de Spk, cuja média e desvio-padrão foram utilizados para análise.

Além do método descrito nos parágrafos anteriores, foram realizadas medições diretamente na superfície de corte do rebolo em momentos específicos. Para tal, fora confeccionado um suporte posicionador do rebolo no microscópio, verificado na Figura 10 (desenhos técnicos das peças constituintes apresentadas no Apêndice A), a fim de analisar a mesma região da superfície entre as paradas de medição. Devido à complexidade de desmontagem do equipamento para remoção do rebolo, foram realizadas réplicas de apenas 10 pontos dos volumes descritos na Tabela 1, considerados críticos devido aos resultados preliminares de Spk observados durante o desenvolvimento do trabalho: 0, 30, 300, 450 e 1050 mm^3 para o parâmetro de mínima espessura de corte e 0, 30, 300, 750 e 1050 mm^3 para o parâmetro de máxima espessura de corte.

Figura 10. Medição do parâmetro Spk na camada abrasiva através de suporte posicionador de rebolo para o microscópio utilizado



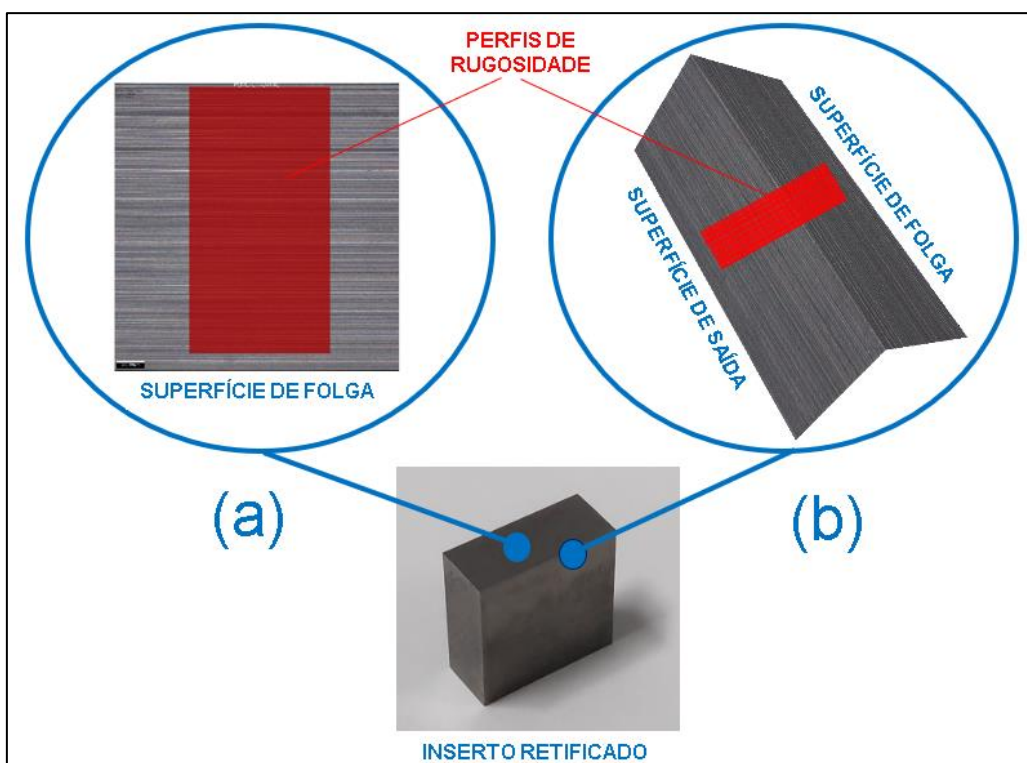
Fonte: o autor.

3.4.2. AVALIAÇÃO DO INSERTO

As medições de rugosidade da superfície de folga e de aresta dos inserts retificados após se alcançar determinado volume de material removido foram feitas no microscópio confocal, sempre na última face retificada antes da interrupção do teste.

Para cada superfície de folga analisada, foram realizadas duas medições do parâmetro de rugosidade R_z (média das maiores distâncias de pico a vale de cinco trechos dentro do comprimento de amostragem) em regiões diferentes, com *cut-off* de $800\ \mu\text{m}$ (R_a na faixa de $0,1\ \mu\text{m}$ a $2\ \mu\text{m}$, conforme indicado pela norma ABNT ISO 4288:2008). Para cada medição, foram traçados 1000 perfis perpendicularmente à direção de retificação, como mostra a Figura 11a. Assim, para análise, foram utilizados os valores médios e os respectivos desvios-padrão de 2000 medições.

Figura 11. Perfis para medição de rugosidade de (a) superfície R_z e de (b) aresta Δr



Fonte: o autor.

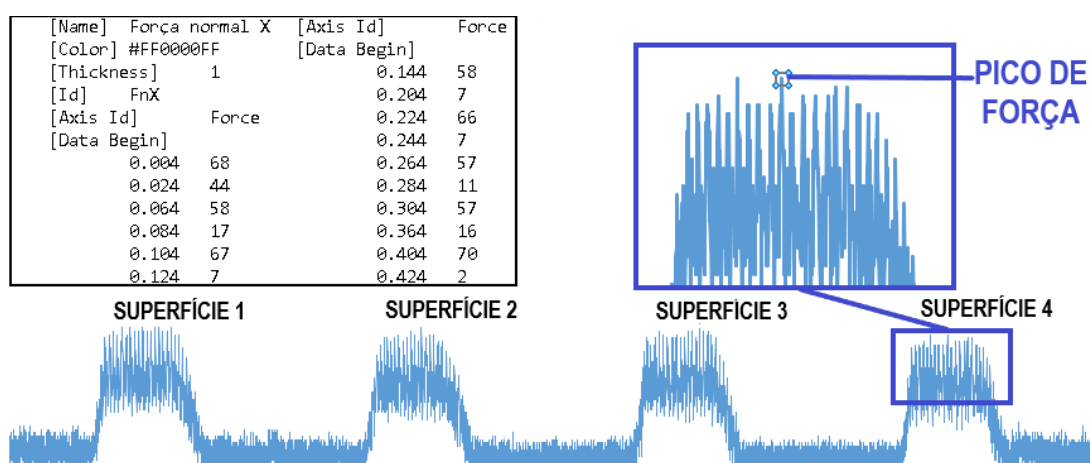
A medição da rugosidade de aresta Δr (menor distância entre perfil real e ideal

da aresta em determina seção) para cada inserto foi feita nas duas arestas principais, formadas pelo encontro da última superfície de folga retificada com as duas superfícies de saída. Em cada aresta foram realizadas três medições, duas próximas às extremidades e uma centralizada, totalizando seis medições, sendo que para cada uma foram utilizados 100 perfis (Figura 11b). Dessa forma, para análise, considerou-se o valor médio e o desvio-padrão de 600 medições.

3.4.3. MEDIÇÃO DAS FORÇAS DE RETIFICAÇÃO

Os valores de força normal e tangencial foram adquiridos pelo sistema integrado à retificadora e o maior valor do trecho do sinal correspondente à retificação da última superfície de folga foi utilizado para cada caso (Figura 12). Este procedimento foi escolhido devido ao fato de não se obter um patamar de força estável no caso da aplicação da maior velocidade de avanço (menor tempo de retificação), prejudicando o cálculo do valor médio. Além disso, deve-se considerar que ocorrem oscilações no sinal e a taxa de aquisição é baixa.

Figura 12. Esquema de identificação de força de retificação



Fonte: o autor.

Devido à variação dimensional entre os diferentes insertos, os valores de força normal e tangencial extraídos dos gráficos (forças totais) foram divididos pelo valor

40

da área da última superfície de folga do inserto, de maneira a se obter a força específica, a qual pôde ser comparada para as diferentes condições.

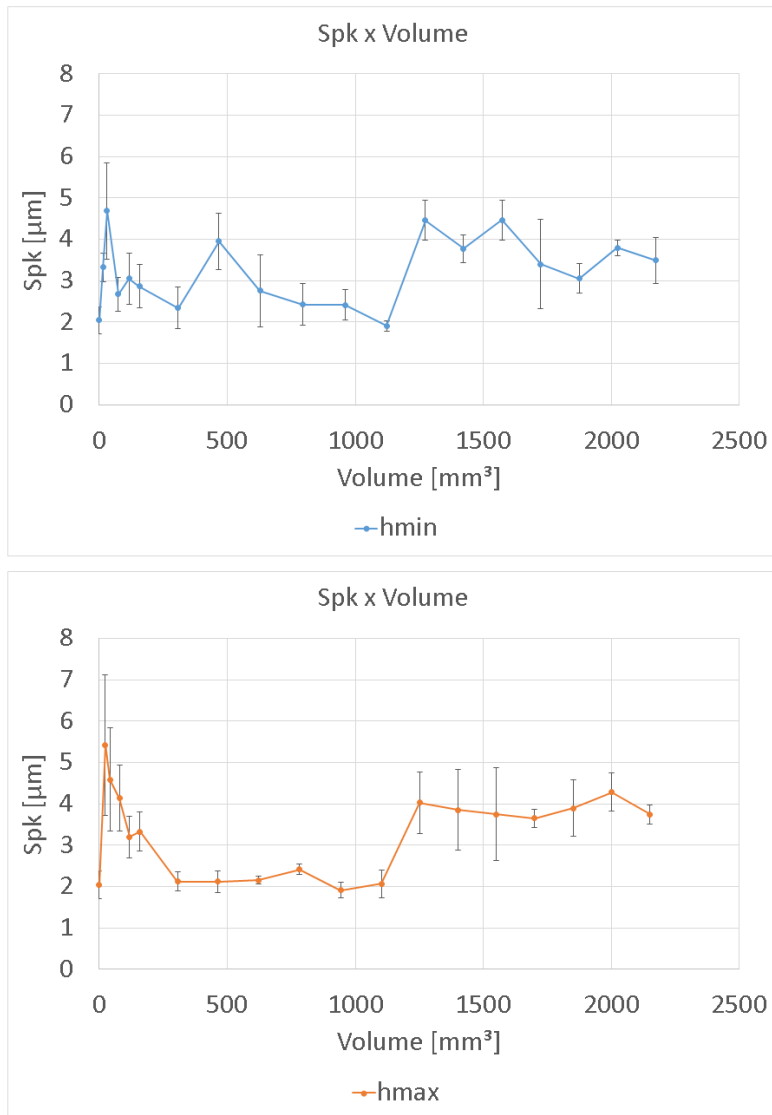
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para o desgaste da superfície de corte do rebolo, as forças específicas, a rugosidade da superfície de folga e da aresta do inserto, com o objetivo de esclarecer o comportamento desses parâmetros em relação ao aumento do volume total de material removido na retificação.

4.1. DESGASTE DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO

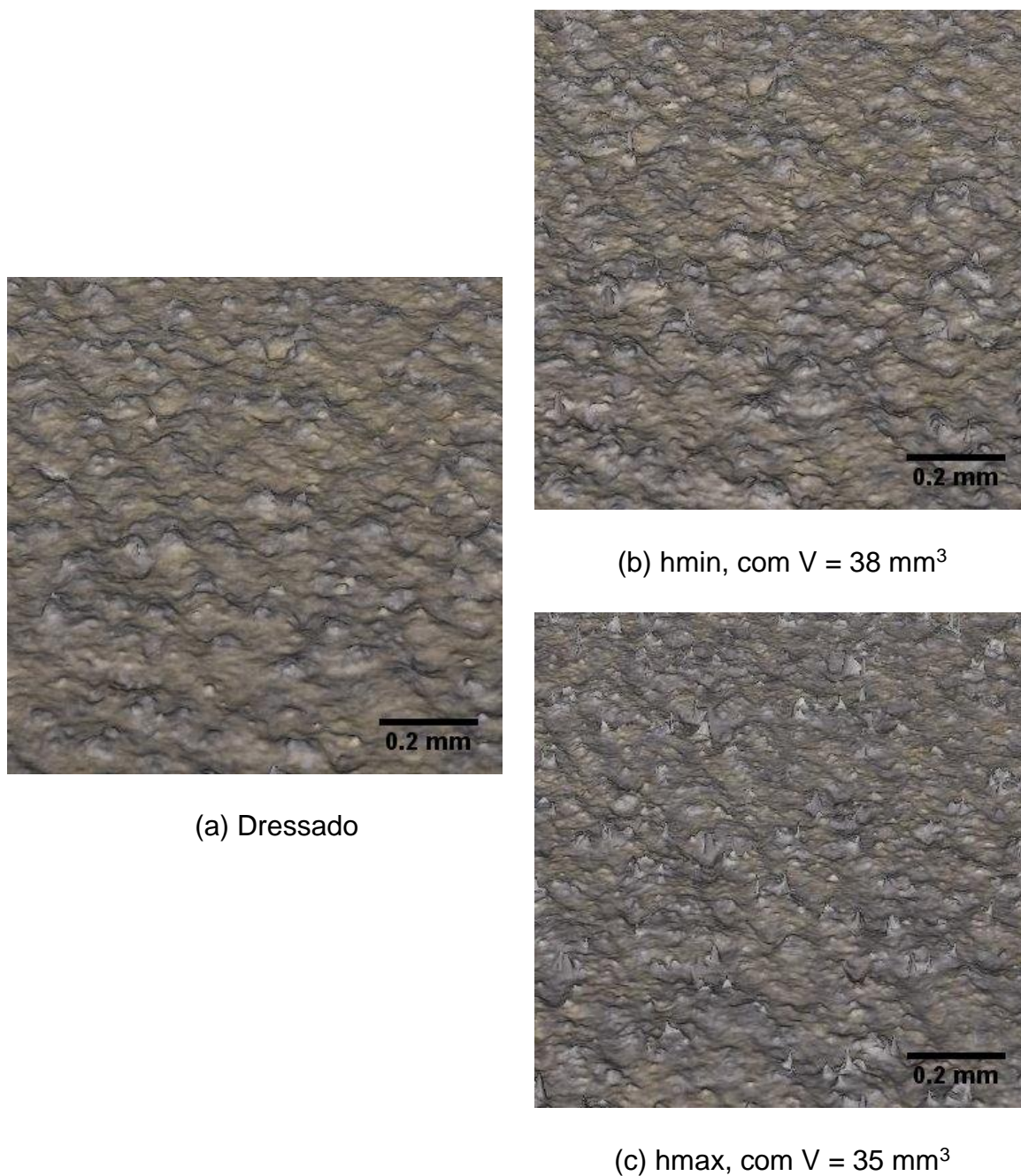
A protrusão dos grãos abrasivos é expressa na Figura 13 pelo parâmetro Sp_k e pode ser considerada como o grau de afiação do rebolo. O aumento inicial de Sp_k em relação ao valor medido logo após a dressagem (entre 0 e 40mm³) para os dois casos (espessura do cavaco por grão mínima e máxima) indica um aumento da protrusão de grão e, portanto, desgaste do ligante (Figura 14).

Figura 13. Variação do valor de Spk com o aumento do volume de material removido na retificação de metal duro com diferentes espessuras de cavaco por grão



Fonte: o autor.

Figura 14. Superfície de corte do rebolo após (a) dressagem e retificação de um volume aproximado de 30 mm^3 , com espessura (b) mínima e (c) máxima de cavaco por grão

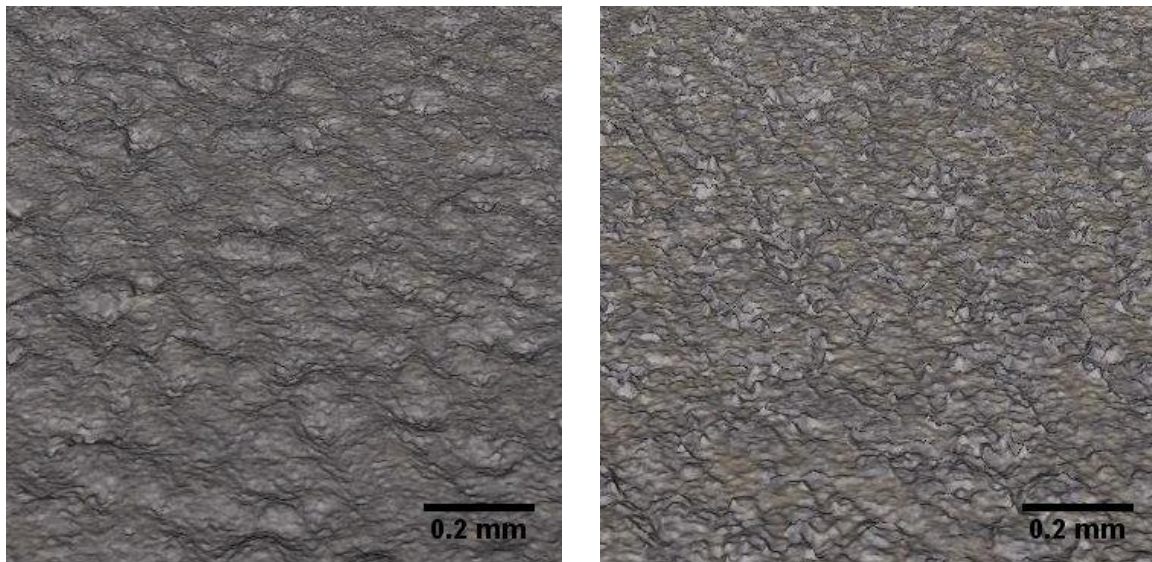


Fonte: o autor.

Após o primeiro pico, percebe-se uma queda brusca de Sp_k em ambos os casos, indicando desgaste dos grãos. Com o parâmetro de mínima espessura de corte (h_{\min}), o desgaste é mais acelerado se comparado ao parâmetro de máxima

espessura de corte (h_{max}). Enquanto o Spk obtido com h_{min} fica abaixo de $3 \mu\text{m}$ no volume de 156 mm^3 , com h_{max} é necessário praticamente o dobro do volume (306 mm^3) para se atingir o mesmo patamar. Esse desgaste precoce com h_{min} ocorre devido à elevada temperatura, causada pela alta velocidade de corte, que gera desgaste por achatamento (topo dos grãos mais arredondados, conforme Figura 15a). Com a utilização do parâmetro h_{max} , o mecanismo de desgaste presente deve ser a quebra dos grãos (topo dos grãos mais irregulares, conforme Figura 15b), devido à maior carga mecânica e à menor temperatura, como consequência da maior velocidade de avanço e menor velocidade de corte.

Figura 15. Superfície de corte do rebolo após retificação de um volume aproximado de 300 mm^3 , com espessura (a) mínima e (b) máxima de cavaco por grão



(a) h_{min} , com $V = 309 \text{ mm}^3$

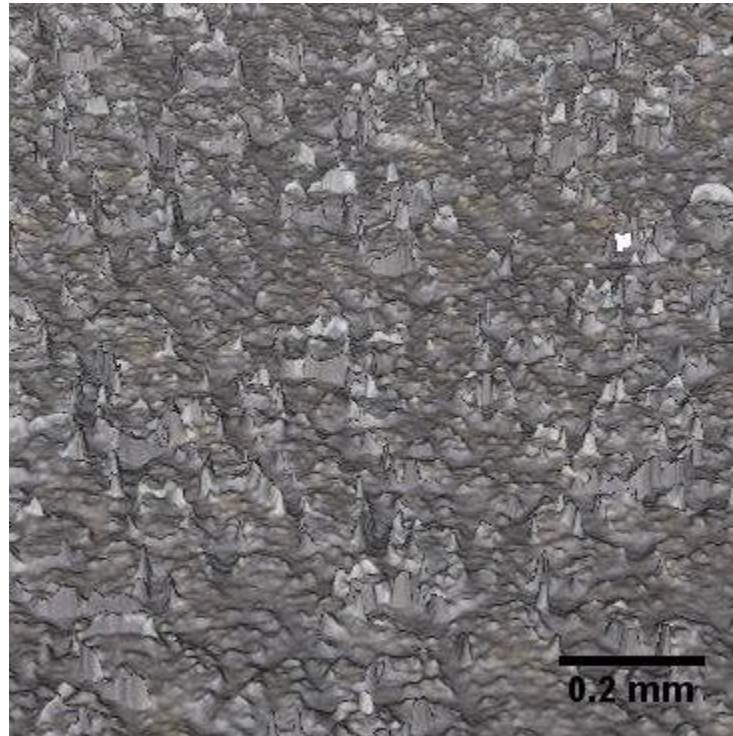
(b) h_{max} , com $V = 301 \text{ mm}^3$

Fonte: o autor.

Para h_{min} , verifica-se ainda um segundo pico, próximo ao volume de 466 mm^3 de material removido, correspondente a uma autoafiação do rebolo. Isso aconteceu devido ao desgaste ocorrido no estágio anterior observado para esse parâmetro, quando os grãos sofreram desgaste por achatamento, o que levou a um aumento da carga mecânica sobre cada grão, causando, em seguida, sua quebra, combinada ao recuo do ligante. Desse modo, arestas novas apareceram, conforme mostrado na

Figura 16, aumentando o valor de Spk.

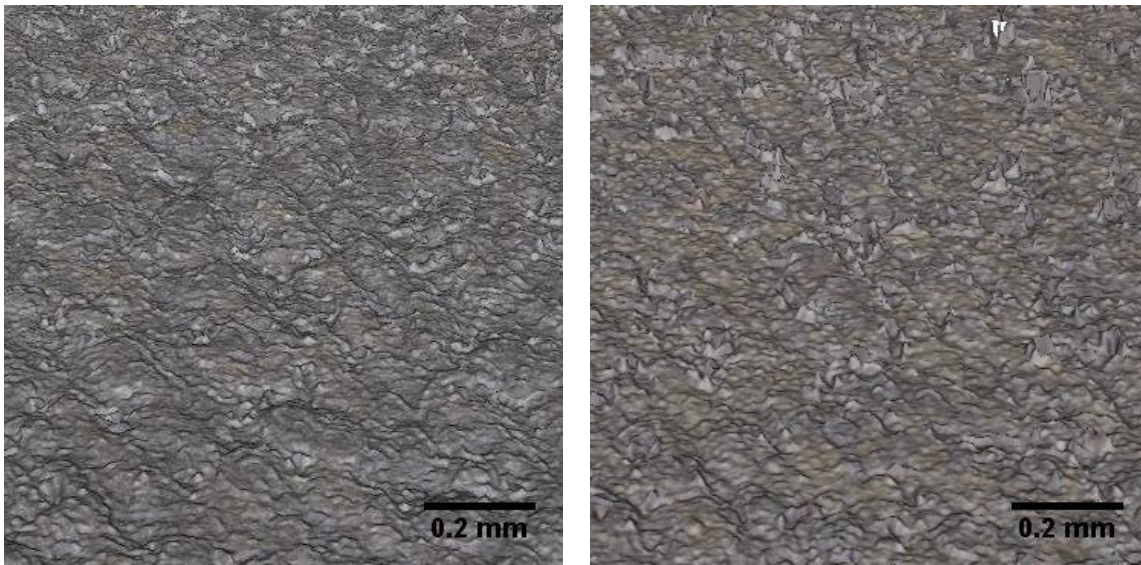
Figura 16. Superfície de corte do rebolo após retificação de um volume de material de 452 mm^3 com espessura mínima de cavaco por grão



Fonte: o autor.

No caso de h_{max} , um pico de reafiação próximo ao volume de 450 mm^3 de material removido não ocorre. Esse fenômeno pode ser compreendido pela análise do estágio anterior de desgaste da camada abrasiva ($V \cong 300 \text{ mm}^3$), no qual os picos se mostram mais irregulares / afiados (Figura 15b) do que aqueles resultantes da retificação com h_{min} . Assim, os grãos em h_{max} entram em um estágio de estabilidade do desgaste da superfície de corte do rebolo até o volume de aproximadamente 1100 mm^3 . Já no volume de aproximadamente 1050 mm^3 , ambas as camadas abrasivas (para h_{min} e h_{max}) apresentam poucos picos sobressalentes, conforme aponta a Figura 17.

Figura 17. Superfície de corte do rebolo após retificação de um volume aproximado de 1050 mm^3 , com espessura (a) mínima e (b) máxima de cavaco por grão



(a) h_{\min} , $V = 1056 \text{ mm}^3$

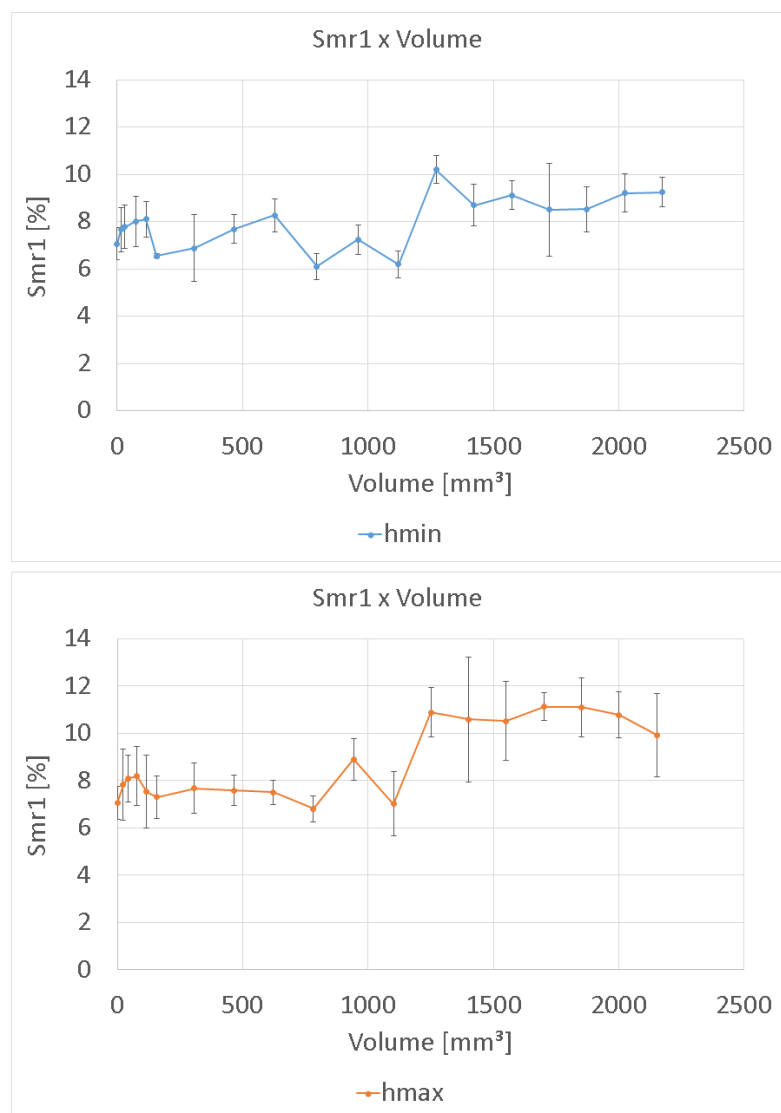
(b) h_{\max} , $V = 1052 \text{ mm}^3$

Fonte: o autor.

Na sequência, ainda na Figura 13, para ambas as espessuras de cavaco, observa-se outro pico de Sp_k no volume próximo a 1250 mm^3 . O processo de autoafiação e os fenômenos envolvidos são os mesmos apresentados anteriormente. Após esse pico, o comportamento também é similar, com queda de Sp_k , representando desgaste dos grãos. Devido ao maior valor de Sp_k atingido no processo de ruptura dos grãos e recuo do ligante, o patamar de desgaste também apresentou valores superiores, sendo a redução para o caso de h_{\max} pouco expressiva, provavelmente pelo tipo de desgaste sofrido pelos grãos neste caso, correspondente à sua ruptura e não achatamento, o que permite maior capacidade de corte e menores esforços por mais tempo.

Adicionalmente, analisou-se o parâmetro Smr_1 , que, de acordo com a curva de Abbott-Firestone, caracteriza o percentual de material associado aos picos e, no caso estudado, fornece um indicativo da quantidade de arestas na camada abrasiva. A Figura 18 apresenta a evolução desse parâmetro com o aumento do volume de material retificado.

Figura 18. Variação do valor de Smr1 com o aumento do volume de material removido na retificação de metal duro com diferentes espessuras de cavaco por grão



Fonte: o autor.

Nota-se uma pequena variação do parâmetro, que oscila entre 6% e 8% até o volume de aproximadamente 1250 mm³, quando se verifica um aumento para valores entre 9% e 12% nos dois casos analisados (hmin e hmax). Não foram encontradas relações diretas entre o comportamento de Smr1 e Spk neste primeiro trecho da figura. Notou-se apenas que pequenos picos isolados ocorrem logo após de quedas mais bruscas de Spk. Isso indica que, em um primeiro momento, ambos os parâmetros estão correlacionados, como aponta a literatura, mas, em seguida,

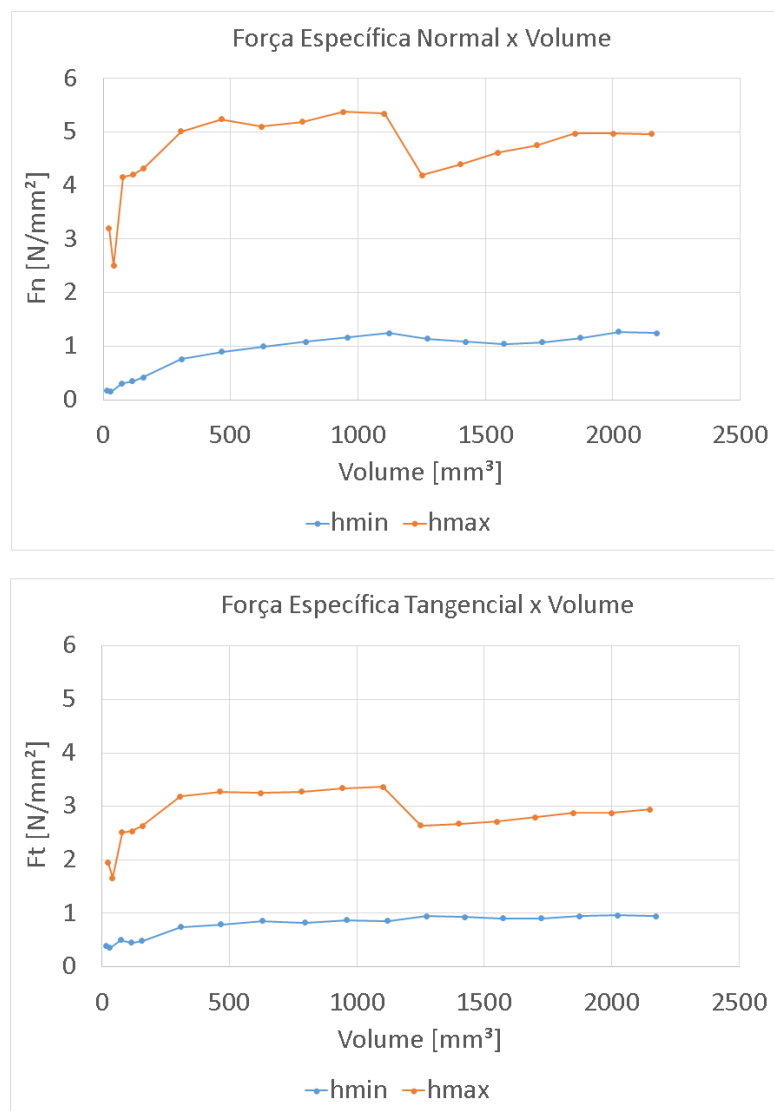
mesmo se mantendo baixas as protruções de grão, a quantidade de arestas diminui, o que pode estar relacionado ao desgaste do ligante, que entra em contato com a peça justamente devido às baixas protruções e acaba causando perda de grãos.

Na segunda parte da figura, Smr1 acompanha o comportamento de Spk, tendo um aumento inicial seguido de queda leve. Tal fenômeno mostra que protruções maiores estão associadas não apenas à ruptura de grãos desgastados, mas também a um maior recuo do ligante, o que contribui com o aparecimento de novas arestas e aumenta o tempo necessário para redução da quantidade de arestas ativas.

4.2. FORÇA ESPECÍFICA

A Figura 19 mostra o comportamento similar das forças específicas normal e tangencial de retificação, sendo perceptível os maiores valores relacionados à força normal, o que é justificado pelo fato do processo de retificação apresentar baixa eficiência em termos de cisalhamento do material, havendo predominância de esmagamento e atrito. Maiores amplitudes (cerca de cinco vezes maior) também são verificadas para o processo em que foi aplicada maior espessura de cavaco por grão, devido à maior penetração do grão abrasivo no inserto e à maior taxa de remoção de material. Menores esforços para o caso da aplicação de menor espessura de cavaco por grão podem ser também relacionados à maior velocidade de corte, que aumenta a temperatura e reduz a dificuldade para o cisalhamento do material.

Figura 19. Variação das forças específicas com o aumento do volume de material removido na retificação de metal duro com diferentes espessuras de cavaco por grão



Fonte: o autor.

O comportamento das curvas em ambas as situações (hmin e hmax) está relacionada à combinação dos efeitos gerados pela protrusão de grão (Figura 13) e quantidade de arestas ativas (Figura 18). Tendo em vista a pequena variação inicial de Smr1, verifica-se a predominância da influência da protrusão sobre o comportamento dos esforços. No início do processo, maiores protrusões, associadas a uma maior afiação do rebolo e, conseqüentemente, maior facilidade de cisalhamento do material, geram menores forças. Em seguida, menores valores

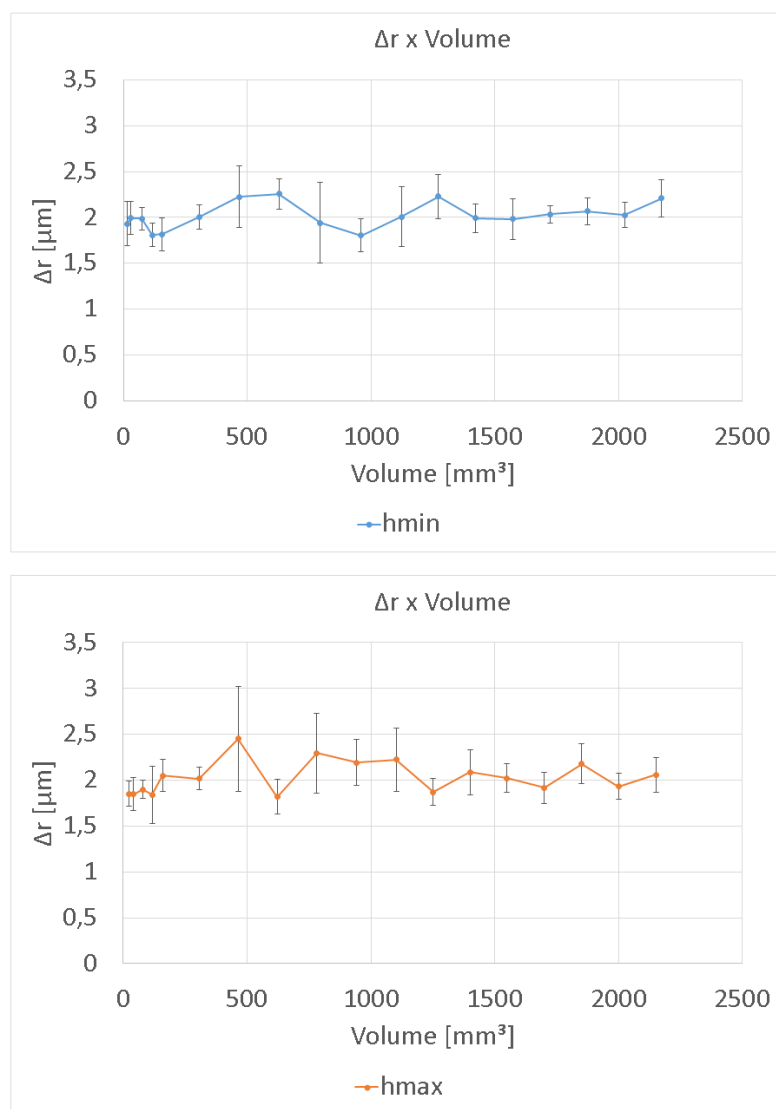
de Spk, mesmo que não vinculados constantemente a um maior número de arestas ativas, causam aumento dos esforços.

Nota-se, no entanto, que os aumentos de Spk na operação com hmin, nos volumes aproximados de 450 mm³ e de 1250 mm³, não foram suficientes para causar alterações perceptíveis nos esforços, o que ocorreu devido à baixa amplitude da força medida neste caso. Diferentemente, após a retificação do volume de 1250 mm³ na operação com hmax, o aumento de Spk levou a uma redução dos esforços de 22%. Neste caso, deve-se destacar que a quantidade de arestas, representada pelo parâmetro Smr1, também cresceu, o que demonstra que o aumento da quantidade de arestas foi compensado por uma maior afiação dos grãos, reforçando a hipótese apresentada de que a protrusão de grão possui efeito predominante sobre os esforços. A diminuição de Spk com a continuidade do teste provocou novo aumento nas forças.

4.3. QUALIDADE DO INSERTO

Analisando-se a rugosidade de aresta Δr (Figura 20), percebe-se grande oscilação e dispersão dos resultados, não sendo verificada uma tendência clara para os diferentes volumes de material removido ou espessura de cavaco por grão. Na região tratada, o efeito de suporte gerado pelo Co é reduzido e grupos de grãos de WC são removidos, provocando lascamentos, mesmo com uma retificação menos agressiva. Com isso, nota-se menor sensibilidade da aresta à variação das condições de processo, fazendo com que Δr fique dentro da faixa de valores apresentada.

Figura 20. Variação da rugosidade de aresta Δr com o aumento do volume de material removido na retificação de metal duro com diferentes espessuras de cavaco por grão



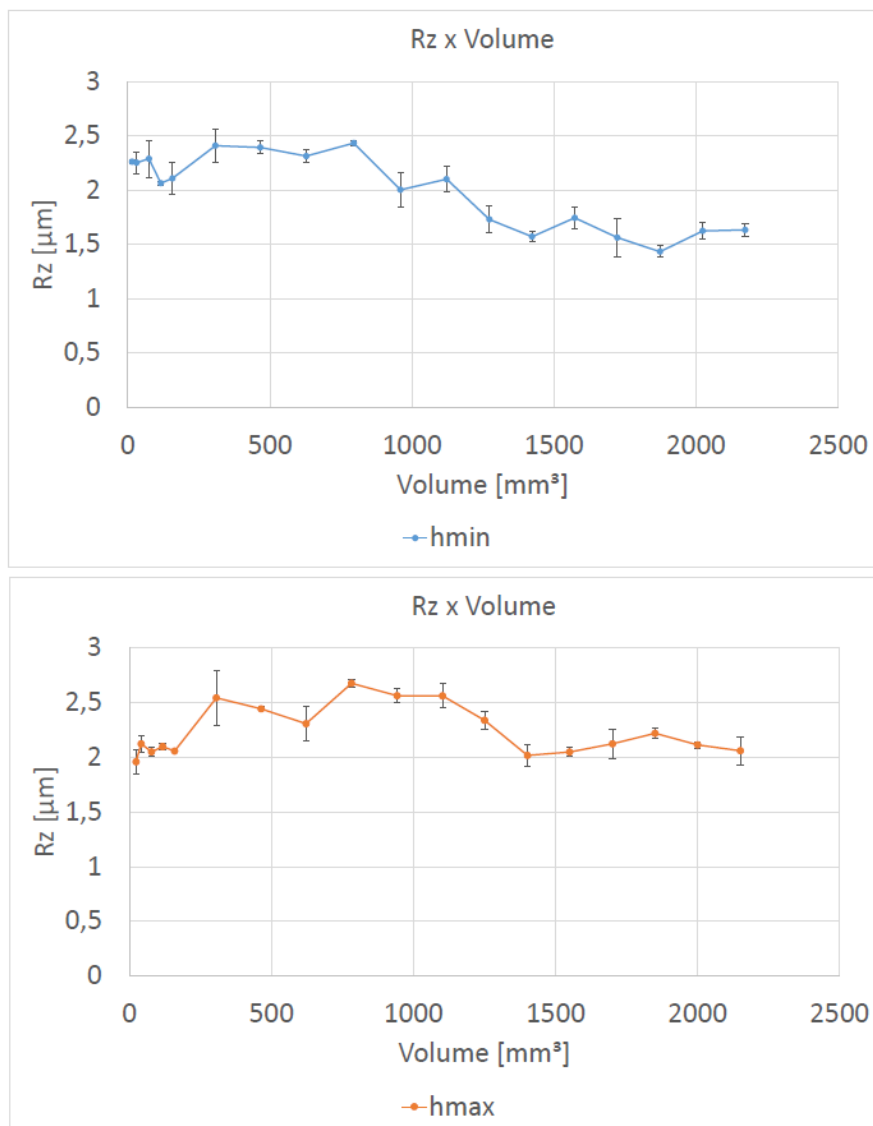
Fonte: o autor.

Assim como as forças normais e tangenciais, os valores de rugosidade também dependem das características topográficas do rebolo e podem ser analisados com base nas figuras de S_{pk} (Figura 13) e S_{mr1} (Figura 18). De maneira geral, maiores protrusões de grão provocam maiores sulcos de retificação na peça, assim como uma menor quantidade de grãos ativos aumenta o volume de material removido por grão, ambos prejudicando a rugosidade. Porém, como já observado para as forças, os efeitos podem ser conflitantes.

Observa-se na Figura 21 que a rugosidade superficial Rz da superfície de folga retificada não possui padrão definido para os primeiros volumes removidos, apresentando valores próximos a $2,5 \mu\text{m}$, tanto para a menor quanto para a maior espessura de cavaco por grão. Logo após a remoção de aproximadamente 1250 mm^3 de material, porém, nota-se um novo patamar, mais baixo, para os valores de Rz, principalmente na operação com h_{max} . Com isso, pode-se afirmar que, de forma aproximada, há um efeito predominante da quantidade de arestas na camada abrasiva (indicado por $\text{Smr}1$) sobre a rugosidade. Uma redução maior, no entanto, é verificada para a menor espessura de cavaco por grão, provavelmente devido à característica de desgaste do grão abrasivo nesse caso, que sofre achatamento.

Com base nos resultados obtidos e considerando-se a faixa de parâmetros utilizada, não se percebeu influência direta dos parâmetros de processo (velocidade de corte ou de avanço) sobre as características finais do inserto retificado, sendo variações observadas principalmente devido a alterações na camada abrasiva.

Figura 21. Variação da rugosidade de superfície Rz com o aumento do volume de material removido na retificação de metal duro com diferentes espessuras de cavaco por grão



Fonte: o autor.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos por meio dos testes de retificação de insertos de metal duro com o aumento do volume total de material removido pelo rebolo, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

-A utilização de mínima espessura de cavaco por grão leva a um desgaste por achatamento, devido às maiores cargas térmicas associadas ao processo. Diferentemente, a aplicação da maior espessura de cavaco provoca ruptura dos grãos, em função da maior carga mecânica.

-O mecanismo de autoafiação foi verificado em ambas as situações, tendo ocorrido com maior frequência no caso da menor espessura de cavaco, já que o achatamento dos grãos pode ter levado ao aumento da força por grão e sua consequente ruptura. No caso da maior espessura de cavaco, o aumento do desgaste do grão passa a provocar desgaste do ligante e exposição de novas arestas.

-Quanto à relação entre a quantidade de arestas na camada abrasiva (medida por Smr1) e a protrusão de grão (avaliada por Spk), verificou-se que, em um primeiro momento, a redução de Spk está relacionada ao aumento de Smr1, mas, em seguida, mesmo se mantendo baixas as protrusões de grão, a quantidade de arestas diminui, o que pode estar relacionado ao desgaste do ligante e remoção dos grãos abrasivos.

-A protrusão de grão possui efeito predominante sobre o comportamento dos esforços de retificação para uma mesma espessura de cavaco, sendo que maiores valores de Spk se relacionam com menores valores da força.

-Devido à elevada dispersão dos resultados, a rugosidade na aresta não demonstrou tendência em relação ao volume de material removido ou à espessura de cavaco por grão.

-A rugosidade da superfície de folga do inserto apresentou relação principalmente com o número de arestas na superfície de corte do rebolo, sendo menores rugosidades observadas para maiores valores de Smr1, medidos com o aumento do desgaste do rebolo.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, A.; PAK, A.; FARAHI, M.; BARZEGARI, M. Profile wear of resin-bonded nickel-coated diamond wheel and roughness in creep-feed grinding of cemented tungsten carbide. **Materials Processing Technology**, v. 183, p. 165–168, 2007.
- ABNT. ABNT NBR ISO 4288:2008 Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e Procedimentos para avaliação de rugosidade. , 2008.
- ABNT. ABNT NBR ISO 513:2013 Classificação e aplicação de metais duros para a usinagem com arestas de corte definidas — Designação dos grupos principais e grupos de aplicação. , 2013. Disponível em: <www.abnt.org.br>. .
- AURICH, J. C.; HERZENSTIEL, P.; SUDERMANN, H.; MAGG, T. High-performance dry grinding using a grinding wheel with a defined grain pattern. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, p. 357–362, 2008.
- BIERMANN, D.; WÜRZ, E. A study of grinding silicon nitride and cemented carbide materials with diamond grinding wheels. **Production Engineering**, v. 3, n. 4–5, p. 411–416, 2009.
- BONNY, K.; BAETS, P. DE; PEREZ, Y.; VLEUGELS, J.; LAUWERS, B. Friction and wear characteristics of WC – Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact. **Wear**, v. 268, n. 11–12, p. 1504–1517, 2010. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.02.029>>.
- BREIDENSTEIN, B.; DENKENA, B.; GROVE, T.; HOCKAUF, R. Enabling of Component Identification by High Speed Measuring of Grinding Wheel Topography. **Procedia Technology**, v. 26, n. 1, p. 252–258, 2016.
- CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica - Vol. 2. Processos de Fabricação e Tratamento. (McGraw-Hills Ltda & ABDR, Eds.), 1986. São Paulo.
- CRUZ, D. C.; SORDI, V. L.; VENTURA, C. E. H. Surface Analysis of WC-5%Co cemented tungsten carbide cutting insert after plunge-face grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 323–330, 2020.
- DENG, H.; HE, J. A study of the grinding performance of laser micro-structured coarse-grained diamond grinding wheels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 93, n. 5–8, p. 1989–1997, 2017.
- DENKENA, B.; KÖHLER, J.; BREIDENSTEIN, B.; ABRÃO, A. M.; VENTURA, C. E. H. Influence of the cutting edge preparation method on characteristics and performance of PVD coated carbide inserts in hard turning. **Surface and Coatings Technology**, v. 254, p. 447–454, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.07.003>>.
- DENKENA, B.; KÖHLER, J.; VENTURA, C. E. H. Customized cutting edge preparation by means of grinding. **Precision Engineering**, v. 37, n. 3, p. 590–598, 2013. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.01.004>>.
- DENKENA, B.; KÖHLER, J.; VENTURA, C. E. H. Influence of grinding parameters on the quality of high content PCBN cutting inserts. **Journal of Materials**

Processing Technology, v. 214, n. 2, p. 276–284, 2014a. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.013>>.

DENKENA, B.; KÖHLER, J.; VENTURA, C. E. H. Grinding of PCBN cutting inserts. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 42, p. 91–96, 2014b. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.08.007>>. .

DENKENA, B.; KRÖDEL, A.; HARMES, J.; et al. Additive manufacturing of metal-bonded grinding tools. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 5–6, p. 2387–2395, 2020.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8th ed. São Paulo: Artliber, 2013.

DOMAN, D. A.; WARKENTIN, A.; BAUER, R. A survey of recent grinding wheel topography models. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 46, p. 343–352, 2006.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 1st ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

FRIEMUTH, F. Schleifen hartstoffverstärkter keramischer Werkzeuge. , 1999. Hannover: Fachbereich Maschinenbau.

HEGEMAN, J. B. J. W.; HOSSON, J. T. M. DE; WITH, G. DE. Grinding of WC – Co hardmetals. **Wear**, v. 248, p. 187–196, 2001. Disponível em: <[https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1016/S0043-1648\(00\)00561-5](https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1016/S0043-1648(00)00561-5)>.

HOSSEINI, S. F.; EMAMI, M.; SADEGHI, M. H. An experimental investigation on the effects of minimum quantity nano lubricant application in grinding process of Tungsten carbide. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 35, n. August 2017, p. 244–253, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.007>>.

HSUE, A. W. J.; ZHENG, Y. Z. A novel flexible tool with rotary ultrasonic spindle for fine grinding of tungsten carbide. **MATEC Web of Conferences**, v. 185, 2018.

INASAKI, I. Grinding Process Simulation Based on the Wheel Topography Measurement. **CIRP Annals**, v. 45, p. 347–350, 1996.

JIANG, J. L.; GE, P. Q.; BI, W. B.; et al. 2D/3D ground surface topography modeling considering dressing and wear effects in grinding process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 74, p. 29–40, 2013.

KITZIG, H.; TAWAKOLI, T.; AZARHOUSHANG, B. A novel ultrasonic-assisted dressing method of electroplated grinding wheels via stationary diamond dresser. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 1–4, p. 487–494, 2016.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2 - Grinding, Honig, Lapping**. Berlin: Springer, 2009.

KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; EVANS, C.; et al. High-Speed Grinding - fundamental and state of art in Europe, Japan and USA.pdf. **CIRP Annals**, v. 46, n. 2, p. 715–724, 1997. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)91100-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)91100-2)>.

- KLOCKE, F.; WIRTZ, C.; MUELLER, S.; MATTFELD, P. Analysis of the Material Behavior of Cemented Carbides (WC-Co) in Grinding by Single Grain Cutting Tests. **Procedia CIRP**, v. 46, p. 209–213, 2016. Elsevier B.V.
- KOPAC, J.; KRAJNIK, P. High-performance grinding-A review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 175, n. 1–3, p. 278–284, 2006.
- KOSHY, P.; IWASAKI, A.; ELBESTAWI, M. A. Surface Generation with Engineered Diamond Grinding Wheels : Insights from Simulation. **CIRP Annals**, p. 271–274, 2003.
- KUMAR, S.; CHOUDHURY, S. K. Prediction of wear and surface roughness in electro-discharge diamond grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 191, p. 206–209, 2007.
- LU, Y. J.; XIE, J.; SI, X. H. Study on micro-topographical removals of diamond grain and metal bond in dry electro-contact discharge dressing of coarse diamond grinding wheel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 88, p. 118–139, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.09.008>>.
- LUO, S. Y.; LIU, Y. C.; CHOU, C. C.; CHEN, T. C. Performance of powder filled resin-bonded diamond wheels in the zvertical dry grinding of tungsten carbide. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 118, n. 1–3, p. 329–336, 2001.
- MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. Teoria da usinagem dos materiais. (Blucher, Ed.), 2011. São Paulo.
- MALKIN, S.; HWANG, T. W. Grinding Mechanisms for Ceramics. **CIRP Annals**, 1996.
- MAMALIS, A. G.; HORVATH, M.; GRABCHENKO, A. I. Diamond grinding of super-hard materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 97, n. 1–3, p. 120–125, 2000.
- MUELLER, S.; WIRTZ, C.; TRAUTH, D.; MATTFELD, P.; KLOCKE, F. Material removal mechanisms in grinding of two-phase brittle materials. **International Journal of Manufacturing Technology**, v. 95, p. 287–298, 2018.
- NAKAI, M. E.; AGUIAR, P. R.; GUILLARDI JR., H.; et al. Evaluation of neural models applied to the estimation of tool wear in the grinding of advanced ceramics. **EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS**, v. 42, n. 20, p. 7026–7035, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2015.05.008>>.
- STANIEWICZ-BRUDNIK, B.; KAROLUS, M.; BĄCZEK, E.; SKRABALAK, G.; LASZKIEWICZ-ŁUKASIK, J. The influence of the diamond wheel grinding process on the selected properties of boron nitride dispersion in cemented carbide (BNDCC) composites. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 1–4, p. 1437–1450, 2018.
- VENTURA, C. E. H.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. Cutting edge preparation of PCBN inserts by means of grinding and its application in hard turning. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 6, n. 4, p. 246–253, 2013.
- VENTURA, C. E. H.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. Strategies for grinding of chamfers in cutting inserts. **Precision Engineering**, v. 38, n. 4, p. 749–758, 2014. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.04.002>>. .

WEINERT, K.; SCHNEIDER, M. Simulation of tool-grinding with finite element method. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 49, n. 1, p. 253–256, 2000.

WHITEHOUSE, D. J. **Handbook of surface and nanometrology, second edition**. London: Institute of Physics Publishing, 2003.

WINTER, M.; IBBOTSON, S.; KARA, S.; HERRMANN, C. Life cycle assessment of cubic boron nitride grinding wheels. **Journal of Cleaner Production**, v. 107, p. 707–721, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.088>>.

WIRTZ, C.; DEHMER, A.; TRAUTH, D.; MATTFELD, P.; KLOCKE, F. Analysis of the grinding wheel wear in dependency of the cemented carbide specification. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 99, n. 1–4, p. 747–754, 2018. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.

WIRTZ, C.; MUELLER, S.; TRAUTH, D.; MATTFELD, P.; KLOCKE, F. Influence of the cemented carbide specification on the process force and the process temperature in grinding. **Production Engineering**, v. 11, n. 6, p. 633–641, 2017. Springer Berlin Heidelberg. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11740-017-0766-z>>. .

XIE, J.; LU, Y. X. Study on axial-feed mirror finish grinding of hard and brittle materials in relation to micron-scale grain protrusion parameters. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 51, p. 84–93, 2011.

XIE, J.; XU, J.; TANG, Y.; TAMAKI, J. 3D graphical evaluation of micron-scale protrusion topography of diamond grinding wheel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, n. 11, p. 1254–1260, 2008.

YU, H.; LU, Y.; WANG, J. Study on wear of the grinding wheel with an abrasive phylloctactic pattern. **Wear**, v. 358–359, p. 89–96, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2015.06.023>>.

ZHAN, Y. J.; XU, X. P. An experimental investigation of temperatures and energy partition in grinding of cemented carbide with a brazed diamond wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 117–125, 2012.

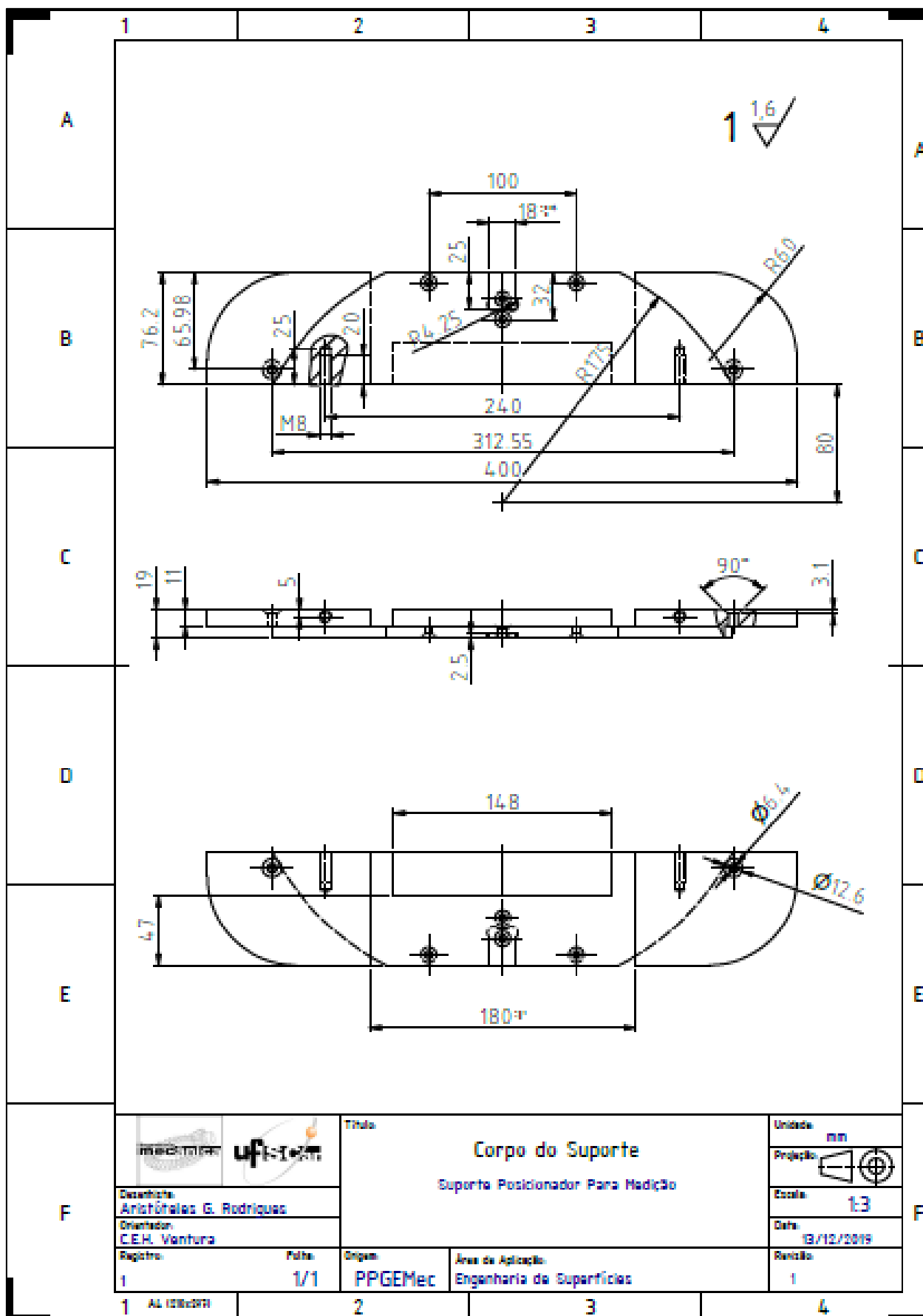
ZHAN, Y.; LI, Y.; HUANG, H.; XU, X. Wear of brazed diamond wheel in grinding of cemented carbide. **Key Engineering Materials**, v. 416, p. 198–204, 2009.

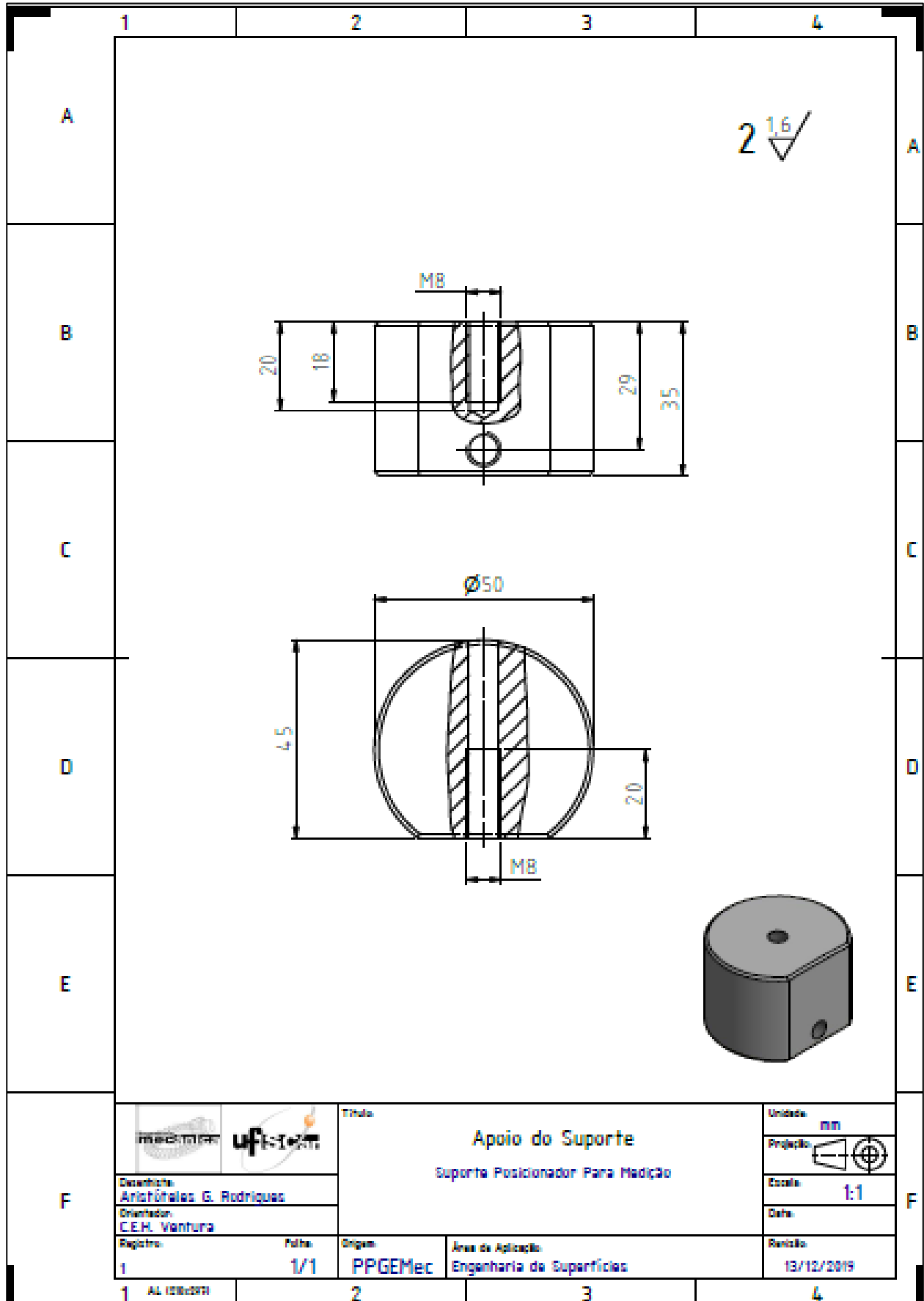
ZHANG, L. C.; SUTO, T.; NOGUCHI, H.; WAIDA, T. A Study of Creep-Feed Grinding of Metallic and Ceramic Materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 48, n. 1995, p. 8, 1995.

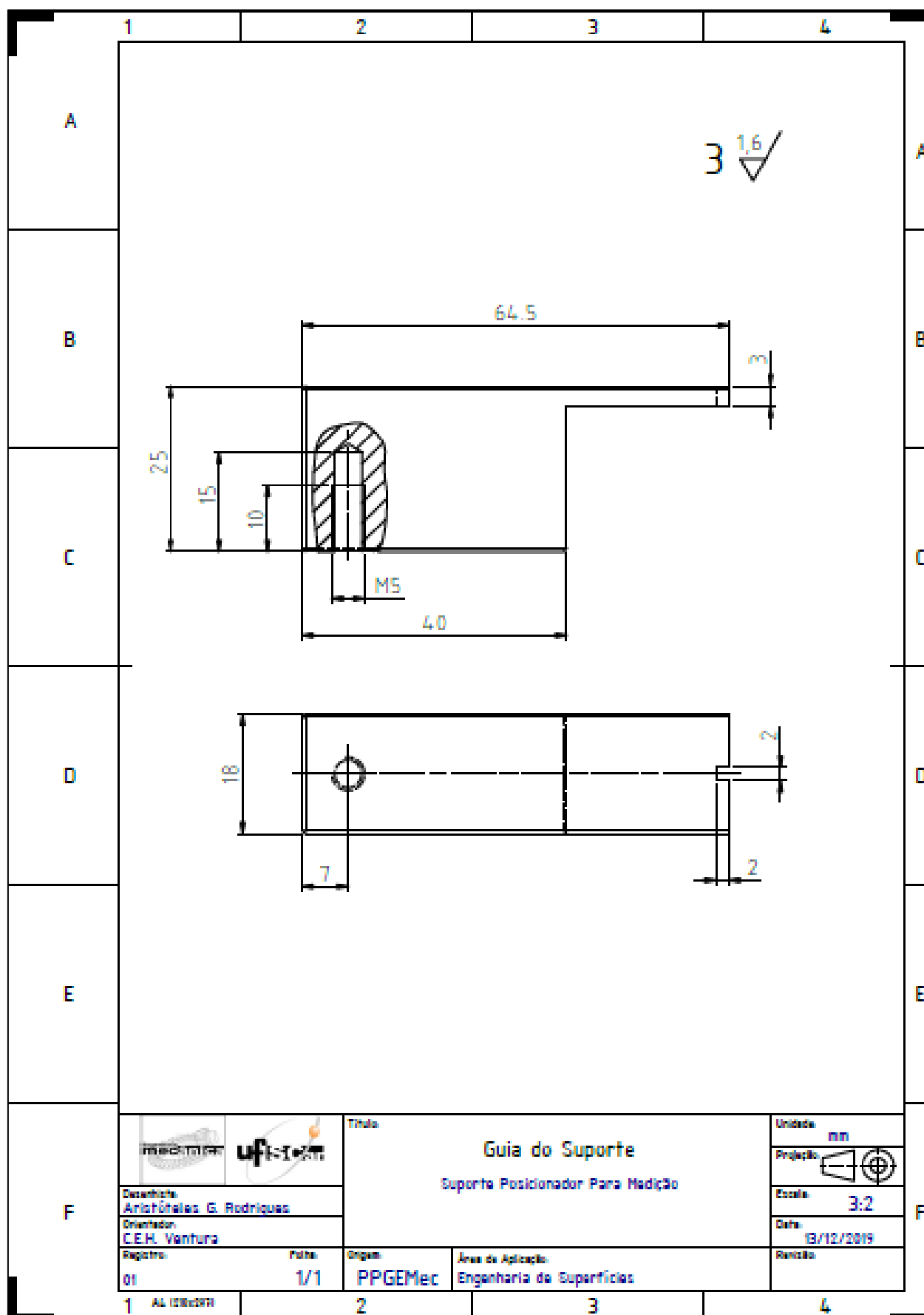
ZHANG, Q.; GUO, N.; CHEN, Y.; TO, S. Effects of binder concentration on the nanometric surface characteristics of WC-Co materials in ultra-precision grinding. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 85, n. August, p. 105048, 2019. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105048>>.

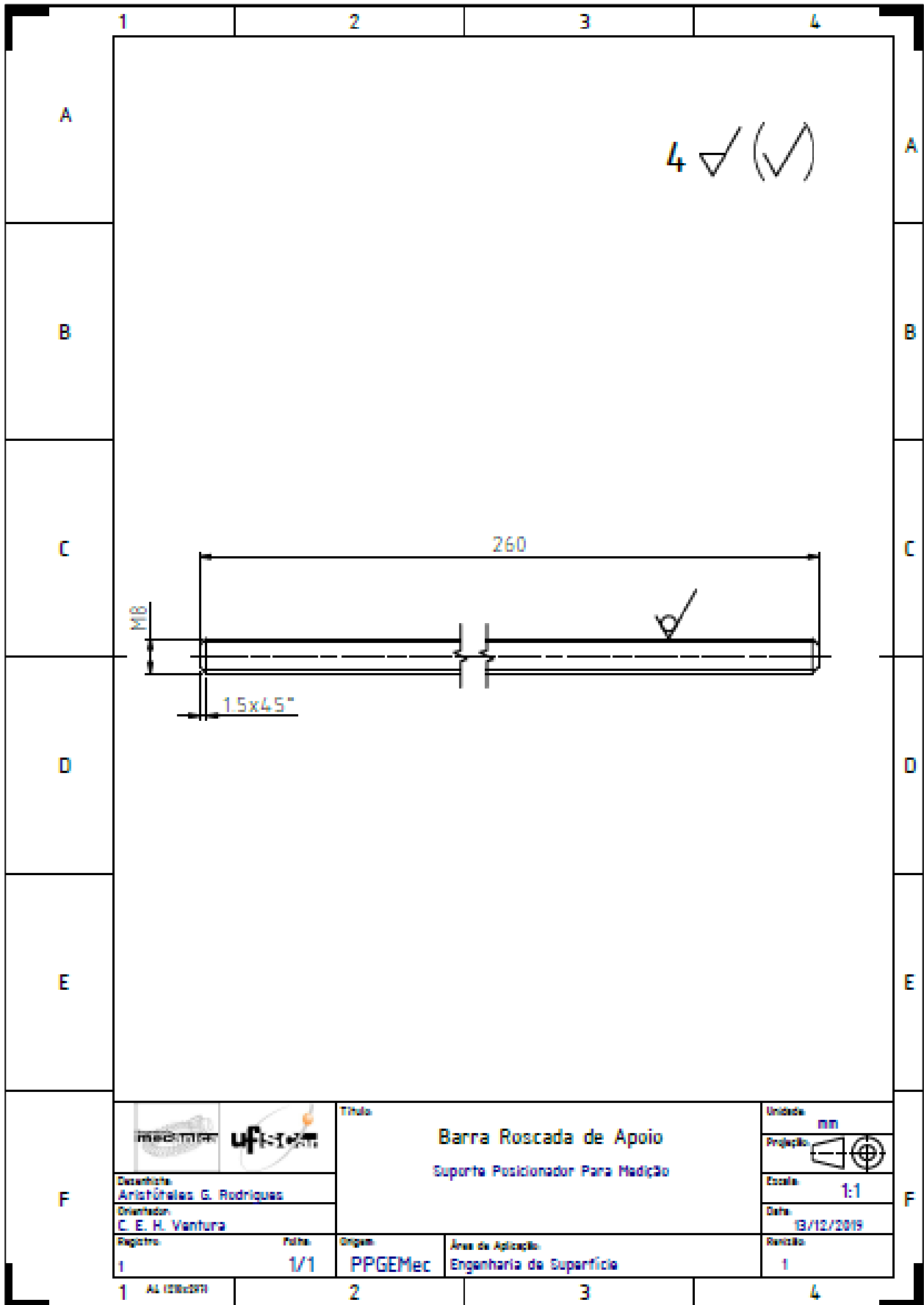
ZHANG, Z.; HUO, F.; WU, Y.; HUANG, H. Grinding of silicon wafers using an ultrafine diamond wheel of a hybrid bond material. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 1, p. 18–24, 2011. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.10.006>>.

APÊNDICE A - SUPORTE POSICIONADOR









F			Título Barra Roscada de Apoio Suporte Posicionador Para Medição		Unidade mm
	Desenhista Aristóteles G. Rodrigues		Projeção		Escala 1:1
	Orientador C. E. H. Ventura				Data 13/12/2019
	Registro 1	Folha 1/1	Origem PPGEMec	Área de Aplicação Engenharia de Superfície	Revisão 1

