

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

HUGO EMANOEL DE ANDRADE COSTA

**MODELAGEM DA RUGOSIDADE DE INSERTOS DE METAL
DURO COM BASE NA TOPOGRAFIA DO REBOLO**

SÃO CARLOS - SP
2023

HUGO EMANOEL DE ANDRADE COSTA

MODELAGEM DA RUGOSIDADE DE INSERTOS DE METAL DURO COM BASE NA
TOPOGRAFIA DO REBOLO

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
2023



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 Hugo Emanuel de Andrade Costa, realizada em 13/02/2023.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura (UFSCar)

Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli (UFSCar)

Prof. Dr. Ivanoé João Rodowanski (UFRB)

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 mãe, Ivete de Andrade Costa,
que deu todo o suporte e acreditou na minha trajetória.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus por ter me dado sabedoria, saúde e força para completar essa jornada.

Expresso meu maior agradecimento e profundo respeito aos meus pais, Ivete de Andrade Costa e João Pereira da Costa, às minhas irmãs, Mara Dalila de Andrade Costa e Silvana Mara de Andrade Costa, e à minha sobrinha, Anna Beatriz de Andrade Costa dos Santos, meus grandes incentivadores, pelo apoio nunca negado nos momentos difíceis, pela confiança depositada e pelo estímulo na conquista do meu objetivo. Amo vocês!

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código de Financiamento 001) pelo fomento à pesquisa e apoio ao Programa.

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

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr.-Ing. Carlos E. H. Ventura, por ser fonte de inspiração, pelos ensinamentos e pelas contribuições durante todo o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço aos meus colegas, professores de pós-graduação e técnicos do departamento, por todo o apoio durante essa jornada.

“Na sua Essência, O TODO é INCOGNOSCÍVEL.” — O CAIBALION:
estudo da filosofia hermética do Antigo Egito e da Grécia.

RESUMO

Após o processo de sinterização, insertos de corte de metal duro são retificados com o intuito de se chegar às dimensões finais e reduzir defeitos superficiais. A fim de se quantificar a qualidade superficial do inserto após o processo de acabamento, diferentes parâmetros de rugosidade são avaliados, os quais dependem das condições do processo e, principalmente, da topografia do rebolo. De maneira a se reduzir a realização de experimentos para a determinação das condições que levem a valores ótimos de rugosidade, o que envolve consumo de tempo e recursos, diversos modelos analíticos e numéricos têm sido aplicados. Neste trabalho, no entanto, é proposta a utilização de um modelo gráfico, elaborado a partir de um *software* de desenho, baseado não apenas na cinemática do processo, mas também nas características da topografia do rebolo e da peça de trabalho, como geometria e distribuição espacial dos grãos abrasivos. Conforme obtido através dos modelos gráficos, a distribuição de Rayleigh utilizada para posicionar o grão em relação à sua protrusão, rebolos com grãos menos protrusos e insertos com menores rugosidades iniciais levaram a menores valores de rugosidades finais. Para as superfícies simuladas com a topografia real do rebolo, de modo geral, foi observado que maiores valores da protrusão de grão e quantidade de arestas ativas implicaram no aumento da rugosidade, pois a superfície foi modificada significativamente.

Palavras-chave: Usinagem. Integridade superficial. Grãos abrasivos. Processo de retificação. Modelo gráfico.

ABSTRACT

After sintering, cemented tungsten carbide cutting inserts are ground so that the final dimensions can be obtained and surface defects can be reduced. To quantify the insert surface quality after the finishing process, different roughness parameters are measured, which depend on the process conditions and, mainly, on the grinding wheel topography. In order to reduce carrying out experiments to determine the conditions that lead to optimal roughness values, which involves consumption of time and resources, several analytical and numerical models have been applied. In this research, however, it is proposed the use of a graphic model, elaborated through CAD software, based not only on the kinematics of the process, but also on the characteristics of the grinding wheel topography and of the workpiece, such as geometry and spatial distribution of the abrasive grits. As obtained through the graphic models, the Rayleigh distribution used to position the grit about to its protrusion, grinding wheels with smaller grain protrusion and inserts with lower initial roughness led to lower values of final roughness. For the surfaces simulated with the real grinding wheel topography, in general, it was observed that higher grain protrusion or number of active cutting edges caused an increase in roughness, as the surface was significantly modified.

Keywords: Machining. Surface integrity. Abrasive grits. Grinding process. Graphic model.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comportamento (a) dúctil e (b) frágil da formação de cavaco em materiais frágeis

Figura 2 - (a) Perfil de rugosidade e obtenção da curva de proporção de material; (b) Parâmetros da curva de Abbott-Firestone

Figura 3 - Perfil de ranhura gerado pelos grãos cônicos

Figura 4 - Perfil teórico gerado por grãos com formato parabólico

Figura 5 - Grão esférico utilizado para construção do modelo que simula o processo de retificação

Figura 6 - Exemplo de faixa do rebolo com alocação dos grãos

Figura 7 - Superfície com perfil de rugosidade inicial triangular

Figura 8 - Gráficos da distribuição (a) aleatória e (b) de Rayleigh

Figura 9 - Exemplo de subtração de “material” da superfície de folga do inserto a partir da passagem dos grãos

Figura 10 - Cinemática do processo de retificação plana transversal de mergulho

Figura 11 - Sentido de movimento da camada abrasiva contra a peça

Figura 12 - Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para diferentes condições iniciais do inserto (distribuição aleatória de grãos em todas as direções, protrusão máxima de $3 \mu\text{m}$)

Figura 13 - Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para diferentes condições iniciais do inserto (distribuição aleatória de grãos em todas as direções, protrusão máxima de $5 \mu\text{m}$)

Figura 14 - Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para diferentes distribuições de protrusão de grão (protrusão máxima de $3 \mu\text{m}$, rugosidade inicial de $2 \mu\text{m}$)

Figura 15 - Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para diferentes distribuições de protrusão de grão (protrusão máxima de $5 \mu\text{m}$, rugosidade inicial de $2 \mu\text{m}$)

Figura 16 - Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para diferentes protrusões máximas de grão (distribuição aleatória, rugosidade inicial de $2 \mu\text{m}$)

Figura 17 - Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para diferentes protrusões máximas de grão (distribuição de Rayleigh, rugosidade inicial de $2 \mu\text{m}$)

Figura 18 - Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para diferentes protrusões máximas de grão (distribuição aleatória, rugosidade inicial de $5 \mu\text{m}$)

Figura 19 - Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para perfis reais do rebolo obtidos após a retificação de diferentes volumes de material e rugosidade inicial do inserto de $2 \mu\text{m}$

Figura 20 – Valores da altura reduzida de pico S_{pk} obtidos após a retificação de diferentes volumes de material

Figura 21 – Valores da proporção de material nos picos acima do núcleo S_{mr1} obtidos após a retificação de diferentes volumes de material

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Experimentos para simulação gráfica da rugosidade de insertos retificados

Tabela 2 – Valores de S_{pk} e S_{mr1} para diferentes volumes de material removido

Tabela 3 – Valores de rugosidades para cada volume de material removido

LISTA DE SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i> , Projeto Assistido por Computador
CNC	Comando Numérico Computadorizado
Co	Cobalto
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
ISO	<i>International Standard Organization</i> , Organização Internacional de Normatização
PCBN	Nitreto Cúbico de Boro Policristalino

LISTA DE SÍMBOLOS

a_e	penetração de trabalho
C	número de grãos por unidade de área
d_e	diâmetro equivalente do rebolo
d_G	tamanho médio do grão
F_n	força normal
F_t	força tangencial
h	variável distribuída
h_{cu}	espessura do cavaco por grão
$h_{crít}$	espessura crítica do cavaco
S_{mr1}	proporção de material na região de picos
r	razão largura/espessura do cavaco
R_{pk} ou S_{pk}	altura reduzida de pico
R_a	rugosidade média
R_z	rugosidade máxima média
R_{sk}	rugosidade do núcleo
R_{vk}	profundidade reduzida de vale
V_w ou V_{fa}	velocidade de avanço da peça
v_c	velocidade de corte
σ	desvio-padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	PROCESSO DE RETIFICAÇÃO PARA ACABAMENTO DE INSERTOS DE CORTE	16
2.1.1	Influência do Rebolo sobre a Qualidade Superficial	18
2.1.2	Influência das Variáveis de Processo sobre a Qualidade Superficial	22
2.2	MODELOS DE RUGOSIDADE NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	24
3	MODELAGEM GRÁFICA DA SUPERFÍCIE RETIFICADA	29
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	36
5	RESULTADOS	38
5.1	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM REBOLOS MODELADOS GRAFICAMENTE	38
5.2	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM APLICAÇÃO DE PERFIS REAIS DO REBOLO	46
5.3	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO COM OS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE	51
6	CONCLUSÕES	52
7	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS	54

1. INTRODUÇÃO

As ferramentas de metal duro têm sido utilizadas em cerca de 70% das aplicações de usinagem nas últimas décadas. Dentre elas, existem os insertos de maior dureza, que geralmente são utilizados nas operações de acabamento, enquanto que os de boa tenacidade, no desbaste. Muitas composições de ferramentas de corte são produzidas para desempenhar as funções necessárias de acordo com suas propriedades e, assim, permitir altos níveis de produtividade nas atividades de torneamento (EDWARDS; EDWARDS, 1993; JIA *et al.*, 1998; DENKENA; KÖHLER; SCHINDLER, 2014d; DENKENA *et al.*, 2018).

A necessidade de se retificar insertos de metal duro surge com o intuito de reduzir a rugosidade superficial e de afiar as arestas da ferramenta. A redução da rugosidade superficial gera diminuição do atrito e do desgaste, melhorando seu desempenho (BERGS *et al.*, 2020; PAN *et al.*, 2020). Modelar o perfil de rugosidade antes de realizar o processo de retificação também é importante para prever a qualidade superficial da peça retificada, avaliar a eficiência do processo de retificação e controlar os parâmetros de processo em tempo real, a fim de reduzir os custos de produção (PAN *et al.*, 2020).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo em *software CAD* (projeto assistido por computador) que simule a geração da superfície, de modo a prever a rugosidade após a retificação transversal de mergulho das superfícies de folga de insertos de corte. A necessidade de modelar a rugosidade do inserto surge com o intuito de se obter uma topografia do rebolo que seja capaz de gerar uma superfície com baixa rugosidade antes de realizar a operação de retificação em si, o que evitaria consumo de tempo e recursos no processo. Além disso, a partir do método de simulação proposto, busca-se ainda maior compreensão acerca da influência da geometria, do tamanho e da protrusão dos grãos abrasivos do rebolo, bem como da distribuição utilizada para posicionamento dos mesmos, sobre a rugosidade das superfícies trabalhadas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, são apresentadas informações sobre o processo de retificação, com foco na influência dos parâmetros de corte e das características da ferramenta abrasiva sobre a rugosidade superficial de insertos de metal duro.

2.1 PROCESSO DE RETIFICAÇÃO PARA ACABAMENTO DE INSERTOS DE CORTE

O metal duro, material composto utilizado para fabricação de ferramentas por metalurgia do pó, é constituído da associação de carbonetos de elevada dureza, tenacidade e resistência ao desgaste (como carbeto de tungstênio, titânio, tântalo ou nióbio) com um metal aglomerante, que geralmente é o cobalto (CHIAVERINI, 1992; FERRARESI, 2018; MACHADO *et al.*, 2015). Inicialmente, os pós-metálicos são obtidos através da moagem em meio líquido para alcançar o tamanho de grão desejado e, em seguida, os grãos são secados e misturados para formar uma classe de metal duro. Posteriormente, matrizes são empregadas ao processo de modo a realizar a compactação da mistura e gerar o formato das pastilhas. Por fim, ocorre a sinterização propriamente dita, que consiste no aquecimento do compactado, a fim de fundir o material e formar uma ligação entre as partículas e conferir resistência mecânica à peça fabricada, que, neste caso, é o inserto de metal duro (CHIAVERINI, 1986, 1992; FERRARESI, 2018; MACHADO *et al.*, 2015).

Após o processo de sinterização, insertos de corte de metal duro são retificados com o intuito de se chegar às dimensões finais e reduzir defeitos superficiais. Isto ocorre, pois a influência da temperatura na sinterização gera contração térmica, que pode causar defeitos superficiais, como o empenamento, trincas térmicas, entre outros. Essa contração dificulta alcançar tolerâncias dimensionais estreitas, sendo necessário retificar a superfície de modo a realizar o acabamento e definir os ângulos, as arestas e os raios do inserto (BERGS *et al.*, 2020; FERRARESI, 2018; MACHADO *et al.*, 2015). Os defeitos superficiais podem

comprometer a vida útil dos insertos, bem como impactar a confiabilidade mecânica dos mesmos. Geralmente, são intensificados pelas condições tribológicas e podem resultar em desgastes, nucleação e propagação de trincas na superfície (PAN *et al.*, 2020).

A retificação é um processo de usinagem por abrasão, cuja ferramenta é conhecida como rebolo, o qual é formado por grãos abrasivos, que possuem características não metálicas, são extremamente duros e a orientação e forma de suas arestas são irregulares, sem geometria definida (MACHADO *et al.*, 2015). A cinemática do processo consiste na movimentação de uma peça contra um rebolo em rotação, cujos grãos penetram em sua superfície, removendo o material que está em seu caminho (CHENG, 2008).

A retificação possibilita o aumento da vida e do desempenho da ferramenta de corte que sofre processo de acabamento, pois sua geometria de aresta e qualidade superficial impactam diretamente a resistência ao desgaste, as condições tribológicas (redução do atrito) e a vida em fadiga (menores possibilidades de nucleação e propagação de trincas), afetando a confiabilidade do processo (BERGS *et al.*, 2020; DENKENA; BIERMANN, 2014c; PAN *et al.*, 2020). De modo a se obter as características requeridas no acabamento de insertos de corte e eficiência no processo, é importante determinar o rebolo a ser utilizado (tipo de ligante, abrasivo e concentração), o fluido e os parâmetros de corte (DITTRICH; DENKENA; WICHMANN, 2021; RODRIGUES, 2021).

Em relação à preparação das arestas de corte, diferentes processos podem ser utilizados, como o jateamento abrasivo e o escovamento, mas, segundo Denkena *et al.* (2012) e Ventura e Denkena (2015), a retificação é vantajosa, pois as superfícies de folga e as arestas podem ser preparadas na mesma máquina, em uma única fixação, reduzindo o tempo gasto. Além disso, pode-se otimizar a qualidade da aresta de corte a partir da modificação do rebolo e das variáveis do processo.

2.1.1 Influência do Rebolo sobre a Qualidade Superficial

Grãos de diamante apresentam elevada dureza e resistência ao desgaste, sendo utilizados para retificação de materiais duros e frágeis, como o metal duro (MACHADO *et al.*, 2015; KOPAC; KRAJNIK, 2006; WIRTZ *et al.*, 2018). Biermann e Würz (2009) utilizaram rebolos diamantados com ligantes distintos para retificar metal duro e nitreto de silício e observaram que o ligante vitrificado gerou menores cargas termomecânicas, mas o ligante resinoide levou aos melhores acabamentos superficiais e menor desgaste radial do rebolo. Segundo Denkena *et al.* (2020), menor densidade e maior porosidade do ligante é importante, pois permite o transporte do fluido de corte e do cavaco durante a retificação. Denkena, Grove e Suntharakumaran (2019) demonstraram que as forças no processo de retificação podem ser reduzidas a partir da utilização de rebolos com ligante metálico poroso e grãos mais friáveis. Além de se aumentar o fator de retificação (relação entre o volume de material removido e o volume de rebolo desgastado), também se reduz a energia consumida no processo (BERGS, 2020; DENKENA; GROVE; SUNTHARAKUMARAN, 2019).

De acordo com Klocke (2009), o tamanho médio do grão abrasivo influencia a qualidade superficial do componente retificado, sendo que quanto menor o tamanho do grão, melhor a qualidade superficial. Isto ocorre, pois, para uma mesma concentração, existem mais grãos ativos participando do processo de corte. Entretanto, os esforços aumentam. Denkena, Köhler e Ventura (2014a e 2014b) investigaram o processo de retificação plana transversal de mergulho de insertos de nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN) e observaram que a redução do tamanho do grão abrasivo de diamante de D36 para D15 leva à redução do lascamento na aresta de corte e a uma melhora significativa na qualidade da superfície de folga. Porém, essa redução aumenta consideravelmente as forças normal e tangencial durante o processo, devido ao grande número de arestas ativas.

Wu *et al.* (2020) desenvolveram um modelo de rugosidade com base na protrusão do grão abrasivo e concluíram que um rebolo de maior diâmetro gera uma superfície menos rugosa quando comparado a um rebolo de menor diâmetro.

Conforme Hecker e Liang (2003), isso pode ser justificado pelo fato de uma ferramenta de maior diâmetro apresentar uma área de contato maior e, conseqüentemente, mais grãos ativos e menor espessura de cavaco por grão. Dittrich, Denkena e Wichmann (2021) desenvolveram um modelo de rebolo paramétrico e investigaram os efeitos do tamanho do grão abrasivo (D33 e D55) e da distribuição (determinística e uniforme discreta) sobre a rugosidade de peças de metal duro retificadas. Foi observado que as amostras retificadas com rebolos de tamanho de grão D33 apresentaram menores rugosidades. Além disso, rebolos com distribuição determinística geraram superfícies com elevada rugosidade quando comparada com rebolos com distribuição estocástica.

Baidakova e Orlova (2017) investigaram a influência das características geométricas dos grãos abrasivos na qualidade superficial da peça retificada. Eles verificaram que o formato do grão exerce uma grande influência no desempenho do rebolo e na qualidade superficial do componente. Assim, observou-se que grãos com formatos não isométricos (apresentam tamanhos e geometrias diferentes) aumentam a capacidade de corte em 30-40%, enquanto grãos com geometrias isométricas garantem uma superfície com melhor qualidade.

Pivotto (2020), Cruz (2021) e Carreira (2022) investigaram a influência do tamanho do grão abrasivo e tipo de ligante do rebolo diamantado sobre a integridade superficial do metal duro. Observou-se, de modo geral, que menores valores de rugosidade máxima foram obtidos com a utilização do rebolo com ligante resinoide e menor tamanho de grão (D15). Isso ocorreu porque o rebolo com ligante resinoide promoveu um corte mais homogêneo e reteve os grãos abrasivos de forma mais estável quando comparado ao rebolo com ligante vitrificado.

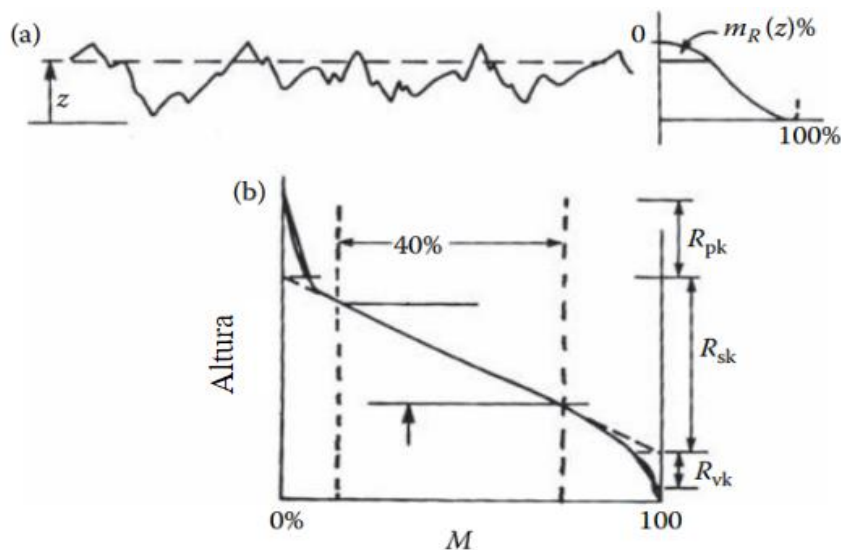
Devido às elevadas temperaturas e pressões na zona de contato rebolo-peça, desgastes microscópicos são ocasionados no grão e no ligante (Klocke, 2009). De acordo com Kopac e Krajnik (2006), danos superficiais e nucleação de trincas na peça podem surgir devido à elevada temperatura na zona de retificação após o uso de rebolos desgastados. A fim de minimizar os danos causados pela energia que é transformada em calor, pode-se reduzir o comprimento de contato rebolo-peça, além de se realizar uma lubrificação eficiente. Já a dressagem do rebolo pode ser utilizado para a afiação das arestas e liberação de espaço no

ligante para armazenamento do cavaco.

Liu *et al.* (2013) estudaram os efeitos das diferentes geometrias dos grãos e da dressagem na qualidade superficial. Foram utilizados rebolos com grãos esféricos, troncos de cone e cones. Eles compararam os perfis de rugosidade das peças retificadas com rebolos sem dressagem e observaram que eles foram distintos para cada geometria de grão estudada, sendo que rebolos com grãos com formato de tronco de cone levaram a uma melhor qualidade superficial em relação aos rebolos de grãos cônicos. Em relação às ferramentas dressadas, os resultados para as três geometrias de grão foram similares, sem variações significativas. Jiang *et al.* (2013) investigaram a influência da dressagem e os efeitos do desgaste do rebolo na qualidade superficial da peça retificada e notaram que, à medida que a operação de retificação ocorre, o rebolo fica menos afiado e suas arestas de corte mais planas. Conseqüentemente, uma maior quantidade de calor é gerada, o que pode causar danos térmicos na superfície. Em relação à qualidade superficial, concluiu-se que os rebolos não dressados (em comparação aos dressados) prejudicaram a rugosidade da peça.

Sendo as características do rebolo relevantes para a compreensão da formação da rugosidade em insertos de metal duro retificados, cabe mencionar uma das formas de análise de sua topografia, que leva em conta a curva de Abbott-Firestone (Figura 1), também conhecida como curva de proporção de material, utilizada principalmente para avaliação da superfície de peças brunidas. Na retificação, os parâmetros associados têm sido usados para avaliar a protrusão de grão e o comportamento de desgaste do rebolo. Estes são: altura reduzida de pico R_{pk} (representativo da protrusão do grão) e profundidade reduzida de vale R_{vk} (representativo do desgaste do ligante e perda de grãos) (WHITEHOUSE, 2003; CÎRSTOIU, 2010; DENKENA; KÖHLER; VENTURA, 2014a e 2014b; SALCEDO; CORAL; OCHOA, 2018; RODRIGUES, 2021).

Figura 1 – (a) Perfil de rugosidade e obtenção da curva de proporção de material;
 (b) Parâmetros da curva de Abbott-Firestone



Fonte: Adaptado de Whitehouse, 2003.

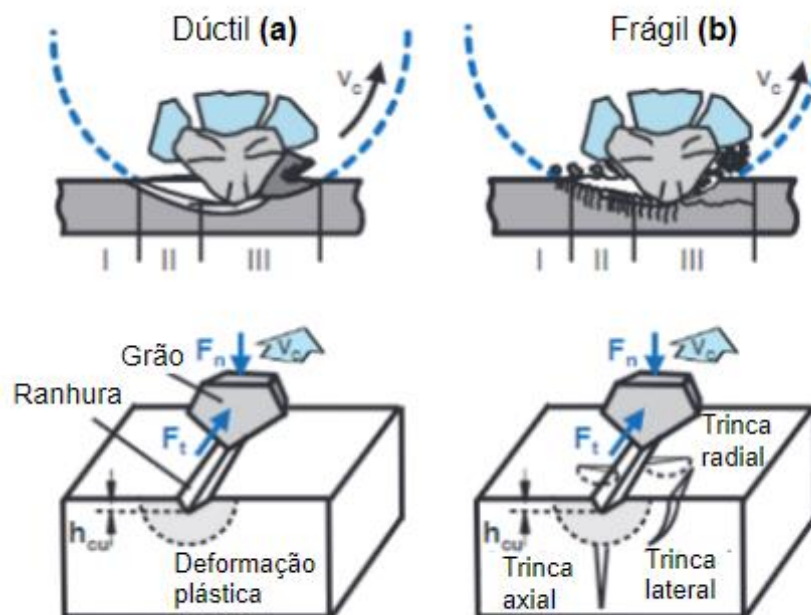
Rodrigues (2021) realizou a caracterização do desgaste de um rebolo diamantado (D46, ligante resinoide) na retificação de insertos de metal duro com parâmetros relacionados a uma mínima e a uma máxima espessura de cavaco por grão e avaliou seus efeitos sobre a rugosidade à medida que um maior volume de material era removido. A protrusão do grão foi avaliada através do parâmetro S_{pk} (altura reduzida de pico em determinada área) e a quantidade de arestas ativas a partir de S_{mr1} (fração de material associada aos picos em determinada área). A altura reduzida de pico cresceu inicialmente (após a dressagem e remoção de um pequeno volume de material) e diminuiu em seguida com o aumento do volume de material removido. O desgaste do rebolo atrelado à espessura mínima de cavaco por grão ocorreu devido à elevada velocidade de corte, que gerou o aumento da temperatura e, conseqüentemente, desgaste por achatamento dos grãos. Já para a espessura máxima, o desgaste, caracterizado pela ruptura dos grãos abrasivos, foi ocasionado pela elevação da carga mecânica e baixa temperatura, já que a velocidade de avanço axial estava alta e a velocidade de corte, baixa. Por fim, notou-se que maiores protrusões de grão reduzem a força de retificação, enquanto o aumento do número de arestas ativas diminui a rugosidade.

2.1.2 Influência das Variáveis de Processo sobre a Qualidade Superficial

Considerando-se as variáveis de entrada, de modo geral, o aumento da velocidade de corte, a redução da velocidade de avanço e a consequente redução da espessura do cavaco por grão contribuem para a melhoria da qualidade superficial da peça retificada (ABDULLAH *et al.*, 2007; DENKENA; BIERMANN, 2014; KLOCKE *et al.* 1997; MACHADO *et al.*, 2015).

Materiais frágeis, como o metal duro, podem apresentar comportamento dúctil ou frágil durante a formação de cavaco na retificação, como mostrado pela Figura 2. No comportamento dúctil (Figura 2a), ocorrem deformação elástica, plástica e formação de cavaco, enquanto no comportamento frágil (Figura 2b) a remoção de material se dá a partir da nucleação e propagação de trincas axiais, laterais e radiais. A remoção de cavaco no modo dúctil, porém, apenas ocorre quando a espessura de cavaco por grão h_{cu} é menor que uma determinada espessura crítica de corte $h_{crít}$, a qual varia de acordo com o tipo de material (HECKER; LIANG, 2003; KLOCKE, 2009; KLOCKE *et al.*, 2016). A Figura 2 mostra ainda algumas variáveis do processo, como a velocidade de corte v_c , que indica o sentido de rotação do rebolo e as forças normais F_n e tangenciais F_t impostas pelo grão à peça, a fim de possibilitar a remoção de material.

Figura 2 – Comportamento (a) dúctil e (b) frágil da formação de cavaco em materiais frágeis



Fonte: Adaptado de Klocke *et al.*, 2016.

Conforme mencionado, deformações plásticas acontecem mesmo em materiais frágeis, como o metal duro. Tönshoff e Denkena (2013) questionaram como estes materiais suportam elevadas deformações sem o risco de se formarem trincas, sendo que apresentam baixa deformabilidade, e encontraram que pequenas espessuras de cavaco não-deformado e ângulos de saída muito negativos geram elevadas tensões compressivas, com uma alta proporção de pressão hidrostática na zona de formação do cavaco, de modo que a tensão de cisalhamento de fluxo crítico é alcançada sem a formação de trincas através do estado de tensões triaxiais. Assim, materiais frágeis podem sofrer fratura frágil, por deslizamento ou deformações plásticas (TÖNSHOFF; SPINTIG, 1993).

O tamanho do grão do material também pode afetar o comportamento de remoção do metal duro. Hegeman, Hosson e With (2001) observaram, após a retificação com rebolos diamantados, grãos de carbeto de tungstênio (WC) fragmentados e esmagados juntamente ao ligante cobalto (Co) no metal duro de maior granulometria, enquanto que arrancamento de grãos de WC e formação de

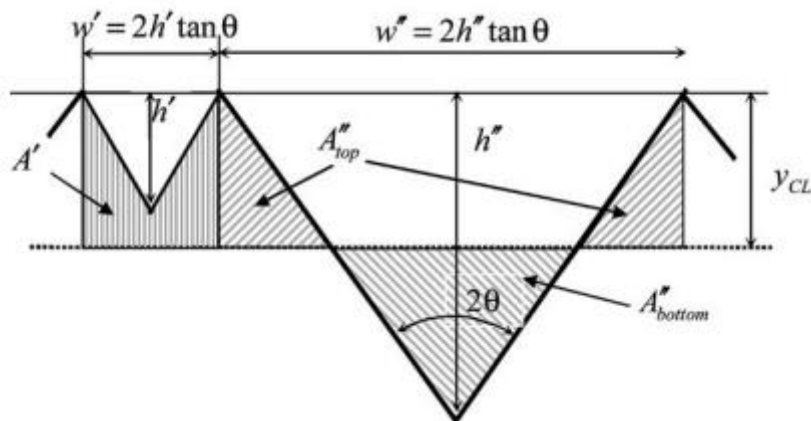
trincas foram verificadas no metal duro de menor granulometria, o que levou a uma pior qualidade superficial. Já Wirtz *et al.* (2018) e Zhang *et al.* (2019) investigaram o desgaste do rebolo na retificação de metal duro e notaram que o aumento das frações de Co e do tamanho de grão de WC levou ao crescimento das forças e temperaturas de retificação, o que gerou maior desgaste radial do rebolo, queda na qualidade superficial e aumento do lascamento nas arestas da peça retificada.

2.2 MODELOS DE RUGOSIDADE NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

A geometria e a topografia do rebolo, o processo de formação do cavaco e a cinemática da operação são fatores fundamentais para a elaboração de modelos e realização de simulações para previsão da rugosidade em peças retificadas. Em relação à topografia, é imprescindível considerar a distribuição, o tamanho e a geometria dos grãos abrasivos, pois estão diretamente relacionados à qualidade superficial da peça retificada (PAN *et al.*, 2021).

Shao *et al.* (2015) propuseram um modelo para prever a rugosidade após a retificação de um material cerâmico. Eles utilizaram a função probabilística de Rayleigh para descrever a distribuição da protrusão das arestas de corte dos grãos cônicos em um rebolo diamantado. Hecker e Liang (2003) modelaram o perfil de rugosidade de uma peça na retificação cilíndrica, tomando como base a espessura do cavaco ou profundidade de penetração dos grãos abrasivos. Eles também utilizaram a distribuição de Rayleigh para a protrusão dos grãos e realizaram uma análise geométrica das ranhuras deixadas na superfície pelos grãos cônicos (formato triangular em 2D), conforme mostrado na Figura 3. Onde, h' e h'' são as variáveis que representam as espessuras do cavaco do perfil produzidas a partir de grãos cônico. y_{CL} é a linha central, A' , A'_{top} e A'_{bottom} são as áreas do perfil de ranhura e θ é o ângulo do perfil. Através de relações trigonométricas, foi possível obter w' e w'' .

Figura 3 – Perfil de ranhura gerado pelos grãos cônicos

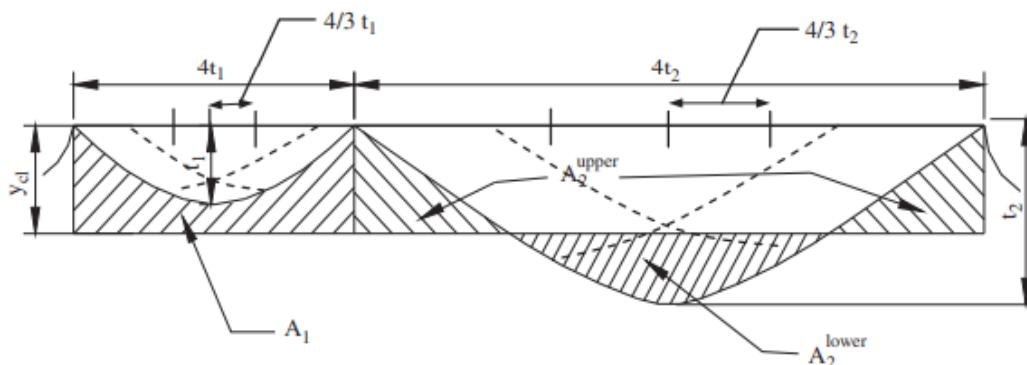


Fonte: Hecker e Liang, 2003.

Wu *et al.* (2017) mencionaram a dificuldade de se prever a rugosidade após a retificação, principalmente para os materiais frágeis, devido à distribuição aleatória dos grãos abrasivos e à natureza frágil do material. Para a simulação da retificação de uma peça de carbetto de silício, eles utilizaram a distribuição de Rayleigh para posicionar os grãos em relação à espessura do cavaco. Agarwal e Rao (2010) realizaram o mesmo procedimento para a previsão de rugosidade na retificação de um material cerâmico, mas, adicionalmente, aplicaram uma distribuição normal para posicionar os grãos ao longo da penetração de trabalho.

Enquanto Hecker e Liang (2003), Shao *et al.* (2015) e Wu *et al.* (2017) utilizaram grãos com vista seccional triangular, Agarwal e Rao (2010) e Agarwal *et al.* (2017) utilizaram grãos com formato parabólico, como mostrado na Figura 4. Outra diferença é que para este último perfil houve a sobreposição de grãos abrasivos no processo de remoção de material, o que não considerado na situação anterior. Onde, t_1 e t_2 são as espessuras do cavaco. y_{CL} é a linha central e A_1 , A_2^{upper} e A_2^{lower} são as áreas do perfil de ranhura.

Figura 4 – Perfil teórico gerado por grãos com formato parabólico



Fonte: Agarwal e Rao, 2010.

Outros trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de modelar e prever o perfil de rugosidade de diferentes materiais nos processos de retificação. Khare e Agarwal (2015) propuseram um modelo com base na distribuição de Rayleigh para protrusão do grão, a fim de modelar a rugosidade na retificação do aço AISI 4340 com rebolo de óxido de alumínio. Zhang *et al.* (2019) desenvolveram um modelo analítico para prever a rugosidade de compósitos de matriz de metal reforçado, também utilizando a distribuição de Rayleigh para profundidade do grão.

Ding *et al.* (2017) realizaram experimentos com rebolos de nitreto cúbico de boro (CBN) monocamadas e observaram que a não uniformidade da topografia do rebolo implica em espessuras de cavaco irregulares, o que afetou o modelo para obtenção da rugosidade, que relaciona a cinemática do processo com as protrusões de grão. Notou-se ainda que espessura de cavaco seguia uma distribuição normal para o rebolo de CBN, enquanto a distribuição de Rayleigh foi mais adequada para um rebolo de óxido de alumínio.

Diferentes geometrias, tamanhos, protrusões e posições dos grãos influenciam diretamente a espessura do cavaco e, por conseguinte, a rugosidade, pois há mudanças estocásticas na interação do abrasivo com a peça (Pan *et al.*, 2020). O modelo mais utilizado para o cálculo da espessura média de cavaco (h_m) na retificação plana (CHAKRABARTI; PAUL, 2007; JIANG; GE; HONG, 2012; JIANG *et al.*, 2013; AGARWAL; RAO, 2010; WU *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2018),

processo mais aplicado para a investigação de fenômenos, corresponde àquele desenvolvido por Malkin e Guo (1989), descrito na Equação 1.

$$h_m = \sqrt{\frac{4}{Cr} \left(\frac{V_w}{v_c} \right) \sqrt{\frac{a_e}{d_e}}} \quad (1)$$

Nesta equação, C = número de grãos por unidade de área, r = razão largura/espessura do cavaco, V_w = velocidade da peça, v_c = velocidade de corte, a_e = penetração de trabalho, d_e = diâmetro equivalente do rebolo.

De modo geral, os modelos aqui descritos apresentaram resultados satisfatórios, conforme mencionado pelos autores. Ding *et al.* (2017) obtiveram um decréscimo na rugosidade R_a de 1,3 μm para 0,51 μm , que ocorreu devido à redução da espessura do cavaco e também ao desgaste do rebolo, que gerou mais arestas ativas. Agarwal *et al.* (2017), por sua vez, desenvolveram um modelo para prever a rugosidade através da espessura do cavaco com maior acurácia, com estimativa de acerto de 20% a 55%, quando comparado aos modelos existentes. Chakrabarti e Paul (2007) observaram que para o rebolo de alumina e com o aumento do avanço, houve aumento da rugosidade R_z de 1 μm para 1,75 μm . Já com o rebolo de CBN, o aumento do avanço não impactou na rugosidade. Wu *et al.* (2017) obtiveram um erro absoluto de 3,27% comparando os resultados obtidos no modelo de retificação de carbeto de silício (SiC) com os resultados experimentais. Em relação à distribuição de Rayleigh para espessura do cavaco, eles encontraram um erro de 3,33% quando comparado aos resultados experimentais no modo de remoção do tipo dúctil. Jiang *et al.* (2013) obtiveram uma redução no erro de 50-70% para 5-10% devido aos parâmetros de dressagem utilizados e os efeitos de desgaste no processo de retificação. Além disso, o modelo 2D apresentou-se com maior precisão e estabilidade que o 3D. Zhang *et al.* (2019) apontaram um erro de 6,2% ao se comparar um novo modelo com os resultados experimentais, enquanto que o modelo tradicional resultou em um erro de 17,9%. Isso se deu devido ao modo de remoção de material frágil e ao aumento da espessura máxima do cavaco. Por fim, alguns autores não relataram estimativas de erros ou desvios dos valores

obtidos através da comparação dos valores teóricos com os experimentais, entretanto, as informações foram apresentadas por meio de figuras e gráficos.

Diferentemente dos modelos analíticos aqui mencionados, o presente trabalho visa contribuir com o desenvolvimento de um modelo gráfico, realizado em *software CAD*, que possibilite a visualização do deslocamento dos grãos abrasivos sobre a superfície da peça durante o processo de retificação plana transversal de mergulho.

As vantagens da utilização de modelos gráficos para simular a geração da superfície no processo de retificação correspondem à possibilidade de se visualizar o processo, bem como verificar, a priori, a quantidade de incrementos de avanço na direção axial para estabilização da superfície. Como limitações, ressalta-se que este é um modelo geométrico, que não leva em conta a deformação plástica ou a formação de trincas, ou seja, não é capaz de prever os efeitos da remoção dúctil e/ou frágil.

3. MODELAGEM GRÁFICA DA SUPERFÍCIE RETIFICADA

Para a construção dos modelos gráficos de simulação do processo de retificação, foi utilizado o *software CAD SolidWorks* 2018, no qual foram desenhados trechos da superfície do inserto com rugosidades R_z e R_a previamente definidas e grãos abrasivos sobre a superfície do rebolo com diferentes posicionamentos e protrusões (conforme distribuições estatísticas e/ou determinísticas estabelecidas). Para o posicionamento dos grãos na direção da protrusão (eixo z), foram testadas as distribuições de Rayleigh e aleatória, sendo utilizada apenas a aleatória para a distribuição dos grãos em determinada área (plano xy). Todas as distribuições foram geradas no *software Matlab* versão 10. Já o *software Excel* foi utilizado para a construção de gráficos dos parâmetros de rugosidade em função do número de passes da série de grãos sobre o trecho correspondente da superfície do inserto e das variáveis do processo.

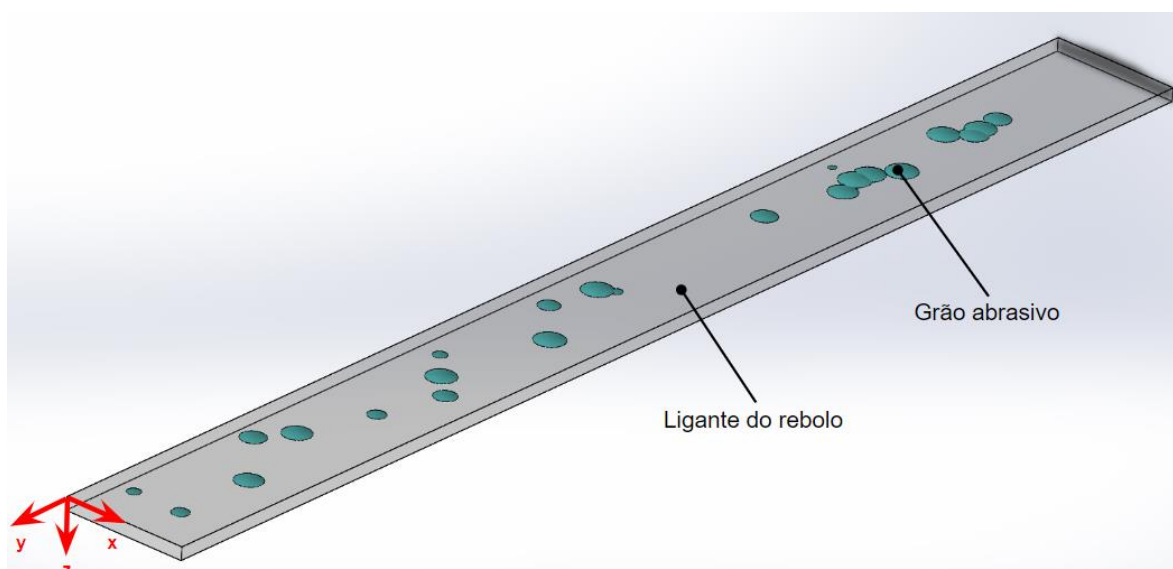
Para as simulações, apenas grãos esféricos foram considerados. Optou-se por utilizar os grãos esféricos, pois além de ser uma geometria simples para representar a realidade, esses formatos de grão foram propostos por Liu *et al.* (2013) e Malkin e Guo (1989), os quais obtiveram resultados representativos. O cálculo da quantidade necessária de grãos em determinada área foi baseado, além do volume, na concentração do rebolo, fixada em C100 (0,88 g/cm³), e na densidade teórica do diamante, igual a 3,52 g/cm³. Assim, para grãos D46 foram obtidos aproximadamente 23 grãos em uma área de 1,0 x 0,1 mm².

Conforme mencionado, duas distribuições foram utilizadas para posicionar os grãos na direção z do sistema cartesiano: aleatória e Rayleigh. Para realizar o posicionamento dos grãos sobre o trecho analisado da superfície de folga do inserto, o ponto de referência foi adotado em um dos vértices superiores do inserto, como ilustrado pela Figura 5. No plano, as distribuições são utilizadas para o posicionamento dos grãos dentro do trecho da superfície a ser simulada, levando em conta a faixa de rebolo utilizada. A distribuição aleatória foi utilizada para posicionamento dos grãos no plano, enquanto que a distribuição de Rayleigh apenas para a protrusão do grão, conforme proposto por Ding *et al.* (2017) e Hecker *et al.* (2003). O principal objetivo de variar a distribuição na direção da protrusão é

aproximar ao máximo as topografias dos rebolos das simulações de um rebolo real.

Visto que a unidade de medida padrão do *SolidWorks* é o milímetro, fez-se necessário fazer um ajuste no fundo de escala para modelar os grãos do rebolo e posicioná-los, já que suas dimensões é na ordem de micrômetros. Entretanto, devido ao número de casas decimais que deveriam ser utilizado para o desenho e, também ao número de parâmetros que deveriam ser ajustados, foi preferível modificar a unidade de medida do *software* para micrômetros para evitar erros de modelagem.

Figura 5 – Exemplo de faixa do rebolo com alocação dos grãos

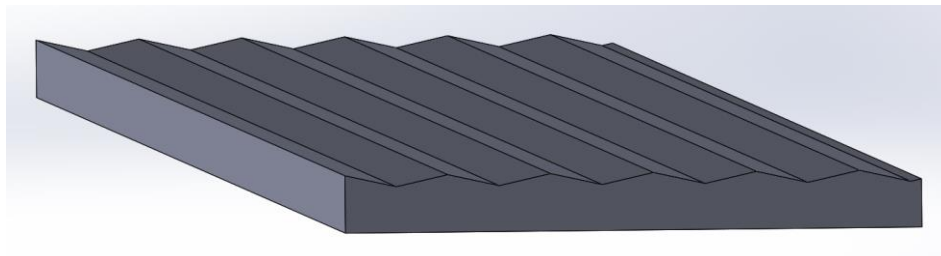


Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo em vista as distribuições adotadas, variou-se a posição dos grãos no eixo z de 0 a 3 μm e de 0 a 5 μm . Esses valores máximos foram escolhidos com base nos trabalhos de Rodrigues (2021) e Pivotto (2020), que mostraram as variações de S_{pk} para o rebolo recém-dressado e à medida que ele se desgasta. Tönshoff e Denkena (2013), por sua vez, afirmam que a protrusão máxima do grão corresponde a um terço de seu tamanho médio, valor esse também utilizado por Carreira (2022).

Visto que, na prática, as peças submetidas à retificação possuem uma rugosidade R_z inicial diferente de zero, que tende a ser reduzida com a operação de acabamento, foi necessário modelar tridimensionalmente a superfície inicial do inserto, a qual, entretanto, foi gerada, de forma arbitrária, com rugosidade R_a igual a zero. Neste trabalho, foram utilizados insertos com rugosidade R_z inicial de $2\ \mu\text{m}$ e $5\ \mu\text{m}$. Estes últimos valores foram escolhidos fora dos limites (extremos) da rugosidade R_z medida em três diferentes *blanks*, a saber: $2,80\ \mu\text{m}$, $3,20\ \mu\text{m}$ e $3,54\ \mu\text{m}$. Além disso, a geometria da superfície inicial modelada foi triangular (Figura 6) devido ao formato dos grãos do blank se aproximar mais de um triângulo quando analisado pelo microscópio. Entretanto, buscou-se simplificar a topografia da superfície a ser retificada, pois além de não se ter encontrado trabalhos que abordam sobre a distribuição de picos e vales na superfície do inserto de modo a aproximar a peça de trabalho da realidade, o objetivo principal do trabalho foi limitado a modelagem da topografia do rebolo.

Figura 6 – Superfície com perfil de rugosidade inicial triangular

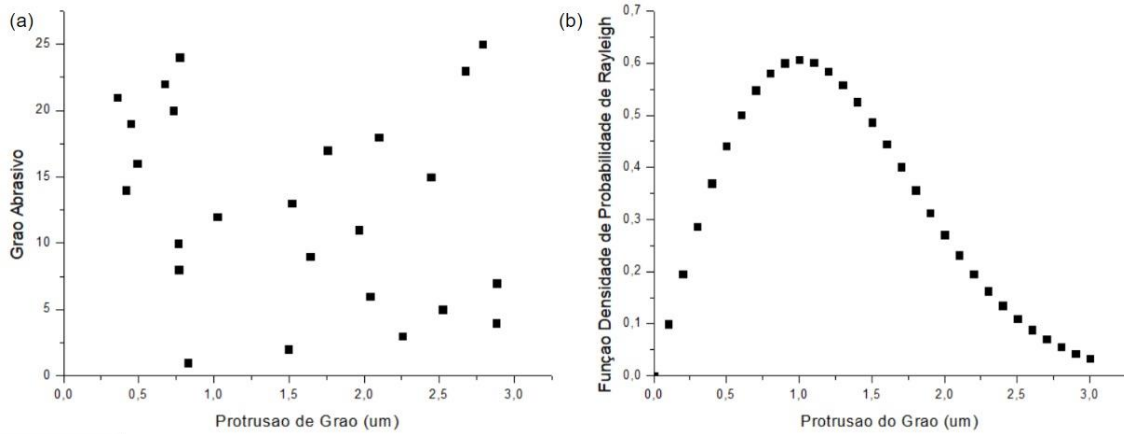


Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição aleatória (Figura 7a) foi gerada através de duas funções, sendo uma responsável por gerar números aleatórios e outra por limitar esses números de acordo com as dimensões do inserto ou protrusão dos grãos. Já a distribuição de Rayleigh (Figura 7b) foi gerada a partir da Equação 2, na qual σ é o desvio padrão da função densidade de probabilidade e h é a variável distribuída.

$$f(h) = \begin{cases} \left(\frac{h}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{h^2}{2\sigma^2}} & h \geq 0 \\ 0 & h < 0 \end{cases} \quad (2)$$

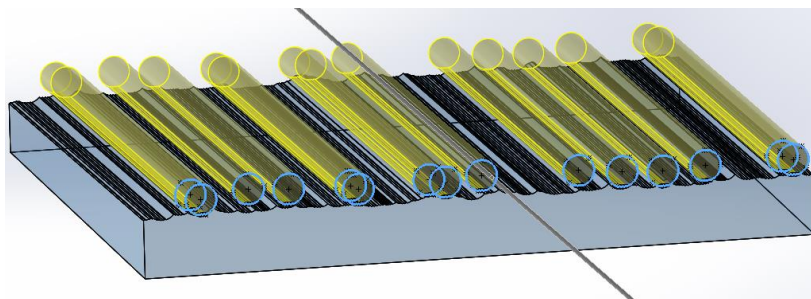
Figura 7 – Gráficos da distribuição (a) aleatória e (b) de Rayleigh



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o posicionamento relativo entre grãos e inserto, sulcos são gerados na superfície através da função subtração, sendo os sólidos formados pelas geometrias dos grãos subtraídos do sólido referente ao inserto. A “retirada” de material do inserto ao longo da superfície é possível por meio do comando de extrusão, como mostrado na Figura 8.

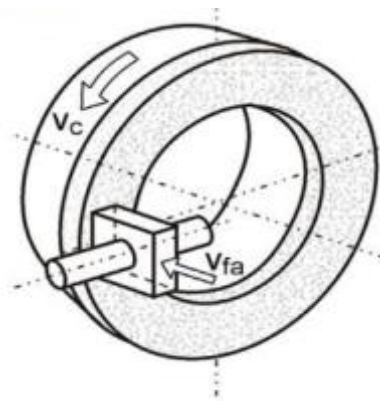
Figura 8 – Exemplo de subtração de “material” da superfície de folga do inserto a partir da passagem dos grãos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o aumento da penetração dos grãos na superfície, leva-se em conta a cinemática do processo de retificação plana transversal de mergulho (Figura 9), na qual o rebolo copo, com velocidade de corte v_c constante, avança sua face plana contra a superfície de folga do inserto a ser retificado (direção de avanço, conforme mostrado através da velocidade de avanço v_{fa} na Figura 9).

Figura 9 – Cinemática do processo de retificação plana transversal de mergulho



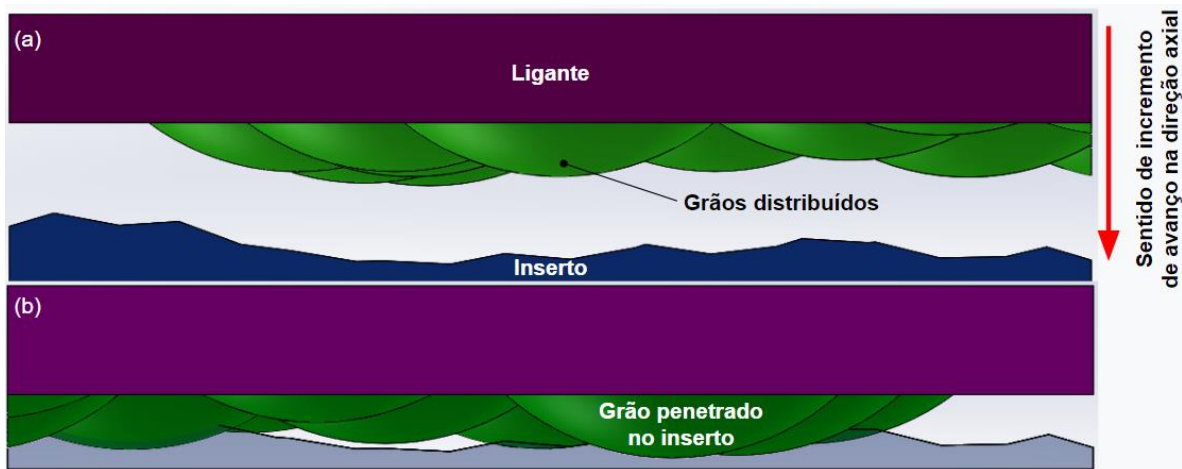
Fonte: adaptado de Denkena, Köhler e Ventura, 2014a.

Na Figura 10a, observa-se o rebolo (conjunto ligante e grãos distribuídos) antes de alcançar a superfície do inserto e na Figura 10b, verifica-se os grãos penetrarem na superfície para remover material. A simulação quanto ao número de passes se dá através do avanço da camada abrasiva contra a peça, conforme indicado pela seta vermelha na Figura 10a. O procedimento utilizado para o avanço do rebolo até a superfície a ser retificada ocorre através da divisão da protrusão do grão pelo número de passes que se pretende realizar, de modo que, em um dado momento, o ligante da camada abrasiva encosta na superfície da peça (ou seja, protrusão igual a zero). Dada a elevada velocidade de corte do rebolo, a mesma série de grãos passa pelo inserto diversas vezes.

Salienta-se que um passe de retificação significa a passagem de um trecho sobre a superfície de folga do inserto. Isso porque para modelagem em *CAD*, o rebolo foi fatiado em trechos de 1,0 mm x 0,1 mm, de modo que considerando um rebolo com 350 mm de diâmetro externo, é como se passasse aproximadamente

1147 trechos para o rebolo completar uma revolução. Entretanto, pela dificuldade de realizar muitos passes no modelo, decidiu-se pela repetição do processo até que sejam completados 80 passes de retificação, de modo que essa quantidade de incrementos de avanço na direção axial fosse o suficiente para compreensão a influência das variáveis do rebolo sobre a rugosidade máxima R_z e também do processo de desgaste da camada abrasiva.

Figura 10 – Sentido de movimento da camada abrasiva contra a peça



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 1 apresenta as combinações que serão simuladas e terão os resultados de rugosidade analisados. Nas simulações, foram variadas a distribuição utilizada para o posicionamento dos grãos em relação à protrusão, podendo ser aleatória ou de Rayleigh, a protrusão máxima dos grãos, de $3 \mu\text{m}$ ou $5 \mu\text{m}$, e a rugosidade inicial da superfície do inserto, de $2 \mu\text{m}$ ou $5 \mu\text{m}$.

Tabela 1 – Experimentos para simulação gráfica da rugosidade de insertos retificados

Experimento	Distribuição da protrusão de grão	Protrusão máxima [μm]	Rugos. Inicial do inserto [μm]
1	Aleatória	3	2
2	Aleatória	3	5
3	Aleatória	5	2
4	Aleatória	5	5
5	Rayleigh	3	2
6	Rayleigh	5	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para validação do modelo, foram realizados testes para medição da rugosidade do inserto após a retificação. Adicionalmente, foram realizadas simulações com o perfil real do rebolo, obtido a partir de imagens tridimensionais para diferentes volumes de material removido. Para isso, as coordenadas referentes ao perfil da superfície de corte do rebolo foram extraídas por meio do microscópio confocal e, em seguida, esses pontos foram importados ao *software CAD*, por meio do comando “curva através de pontos XYZ”. Assim, uma curva foi projetada sobre esses pontos. Com o perfil gerado, foi necessário estabelecer uma superfície para ser possível a transformação em um sólido com o comando “ressalto/base extrudado”. O mesmo processo foi repetido para todos os trechos do rebolo, em todos os volumes de material removido (Figura 11). Por fim, os trechos reais do rebolo importados para o *CAD* foram utilizados para remover material através do comando “corte extrudado” da superfície do inserto, conforme descrito acima.

Figura 11 – Exemplo de superfície do trecho do rebolo (0,1 mm de largura) projetada no *CAD* a partir da curva extraída do microscópio



Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante salientar que foram utilizadas duas imagens tridimensionais (com 2 mm de comprimento e 2 mm de largura) para os diferentes volumes de material removido do inserto. Delas, foram retirados 16 perfis da superfície de corte do rebolo dressado, 14 para o volume de 15 mm³, 12 para o de 30 mm³, 10 para o de 120 mm³, 7 para o de 900 mm³, 7 para o de 1250 mm³ e 11 para o de 1750 mm³. Para cada simulação, foi realizada uma passada com cada trecho de rebolo e, depois da utilização de todos os perfis, os mesmos trechos foram repetidos na mesma ordem até que se completassem os 80 passes de retificação.

Para remover 15, 30 e 120 mm³ da superfície de folga do inserto, foi necessário colocar apenas um inserto para ser retificado na máquina, enquanto que para retirada de 900, 1250 e 1750 mm³, utilizou-se mais de um inserto para remover as respectivas quantidades de material, visto que a retificadora apresenta uma tolerância inferior à dimensão da peça a ser retificada.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a execução de testes de retificação, de modo a se obter resultados para comprovação do modelo e perfis reais da topografia do rebolo, foram utilizados insertos de metal duro, classe ISO K10 (WC-5%Co), de formato quadrado, com dimensões 12,7 mm x 12,7 mm x 4,7 mm. Os ensaios foram realizados com aplicação de óleo mineral integral em uma retificadora CNC com quatro eixos para preparação de insertos de corte Agathon DOM Plus, com rotação máxima de 3400 rpm e potência máxima de 16 kW. O rebolo utilizado possui formato copo, com diâmetro externo de 350 mm, camada abrasiva com 10 mm de largura e aproximadamente 5 mm de espessura. Ele apresenta grãos abrasivos de diamante com tamanho D46, ligante resinoide e concentração C100 (= 0,88 g/cm³). Antes da retificação de cada inserto, o rebolo foi condicionado com rolo dressador de óxido de alumínio e granulometria 180#, também de formato copo, com diâmetro externo de 150 mm e camada abrasiva com largura de 12,5 mm. Nesse procedimento foi aplicada uma velocidade de corte do dressador $v_{cd} = 10$ m/s e velocidade axial do dressador $v_{fad} = 5$ μ m/s, sendo o percurso total de dressagem $l_d = 15$ μ m.

Figura 12 – Retificadora plana transversal de mergulho



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os insertos tiveram sua rugosidade máxima R_z medida no microscópio confocal Alicona Infinite Focus SL, conectado a um computador pessoal, no qual está instalado o *software* Alicona Metrology Measurement. A avaliação foi realizada a partir da medição de 1000 perfis do último lado acabado, direcionados perpendicularmente às marcas de retificação. Assim, para análise dos resultados relacionados a cada inserto, foram calculados os valores médios desses perfis. Para obter os valores de rugosidade R_z , também foi considerado um *cut-off* de $800 \mu\text{m}$, que corresponde a um R_a de $0,1 \mu\text{m}$ a $2 \mu\text{m}$ (conforme indicado pela norma ABNT ISO 4288:2008).

Para se avaliar a evolução da rugosidade dos insertos de maneira mais próxima à realidade, o desgaste da superfície de corte do rebolo foi considerado. Assim, para cada quantidade de material removido pelo rebolo, a retificação era interrompida e a camada abrasiva, assim como a rugosidade do último lado retificado do inserto, analisada. Os volumes de remoção de material investigados foram 0 (recém-dressado), 15, 30, 120, 900, 1250 e 1750 mm^3 . Para análise do rebolo, foram obtidos os valores de S_{pk} (altura reduzida de pico, que fornece um indicativo da protrusão de grão) e S_{mr1} (percentual de material associado aos picos, que fornece um indicativo do número de arestas ativas) a partir da curva de Abbott-Firestone.

Para a verificação do volume real de material removido de cada inserto, foi utilizado um micrômetro externo digital com resolução de $1 \mu\text{m}$ para medição das dimensões antes e após o processo. Além disso, cinco valores de S_{pk} e S_{mr1} foram obtidos de cada imagem tridimensional da topografia do rebolo, tendo sido realizadas duas imagens para cada volume de material removido.

Para as simulações realizadas com a topografia real do rebolo, utilizou-se um trecho do rebolo para cada passe de retificação, diferentemente do que foi feito para os rebolos modelados, com os quais foram executados incrementos de avanço até que o ligante alcançasse a superfície do inserto, sendo, em seguida, repetido o procedimento. Salienta-se ainda que, para a simulação com os trechos reais do rebolo, os incrementos de avanços não foram os mesmos, devido à dificuldade em se adotar um ponto de referência, sendo a geometria de cada trecho do rebolo diferente.

5. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados da simulação da rugosidade R_z em função do aumento do número de passes ou incrementos de retificação na direção axial, com o intuito de se compreender a influência da superfície inicial do inserto, da distribuição utilizada para posicionamento dos grãos e da protrusão máxima dos grãos do rebolo sobre este parâmetro. É importante salientar que a distribuição foi utilizada para o posicionamento dos grãos em relação à sua protrusão.

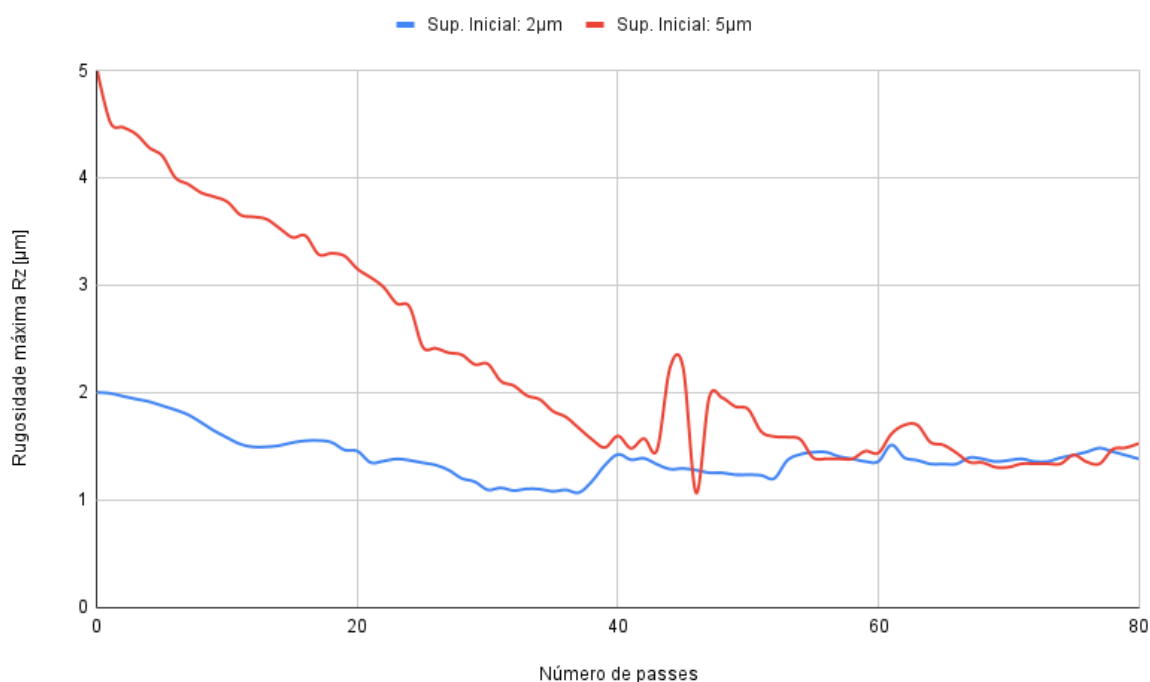
Adicionalmente, de maneira a se levar em conta o desgaste do rebolo, experimentos para a obtenção dos resultados de rugosidade máxima R_z para diferentes volumes de material removido (0, 15, 30, 120, 900, 1250 e 1750 mm³) foram executados. As topografias do rebolo referentes aos respectivos volumes foram extraídas por meio de microscópio confocal com o intuito de utilizá-las na modelagem gráfica para obtenção de R_z .

5.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM REBOLOS MODELADOS GRAFICAMENTE

Analisando-se a rugosidade R_z obtida na simulação de retificação de um inserto com a utilização de um rebolo constituído por grãos de formato esférico, distribuídos aleatoriamente em todas as direções do plano cartesiano, com 3 μm de protrusão máxima e rugosidade inicial do inserto com 2 μm (curva azul) e com 5 μm (curva vermelha) (Figura 13), percebe-se que a curva azul não apresenta um decaimento tão acentuado quando comparado com a curva em vermelho. Para o inserto com menor rugosidade inicial, a rugosidade R_z diminui constantemente e no 37º passe alcança seu menor valor, igual a 1,07 μm , resultando em uma variação de rugosidade de 0,93 μm . Em seguida, no entanto, volta a crescer. Em relação ao inserto com maior rugosidade inicial, observa-se um decréscimo de rugosidade mais acentuado, mas com algumas oscilações. Em uma dessas flutuações, é possível observar um ponto de menor R_z (igual a 1,06 μm), que ocorreu no 46º passe, levando a uma variação de 3,93 μm em relação à rugosidade inicial. A rugosidade

mínima alcançada e o nível de estabilização das curvas foram similares nos dois casos. As flutuações ocorrem devido a penetrações de certos grãos na superfície do inserto, que elevam a rugosidade, ou à combinação de partes irregulares da superfície com menores protruções, o que causa sua redução.

Figura 13 – Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para diferentes condições iniciais do inserto (distribuição aleatória de grãos em todas as direções, protrução máxima de $3 \mu\text{m}$)

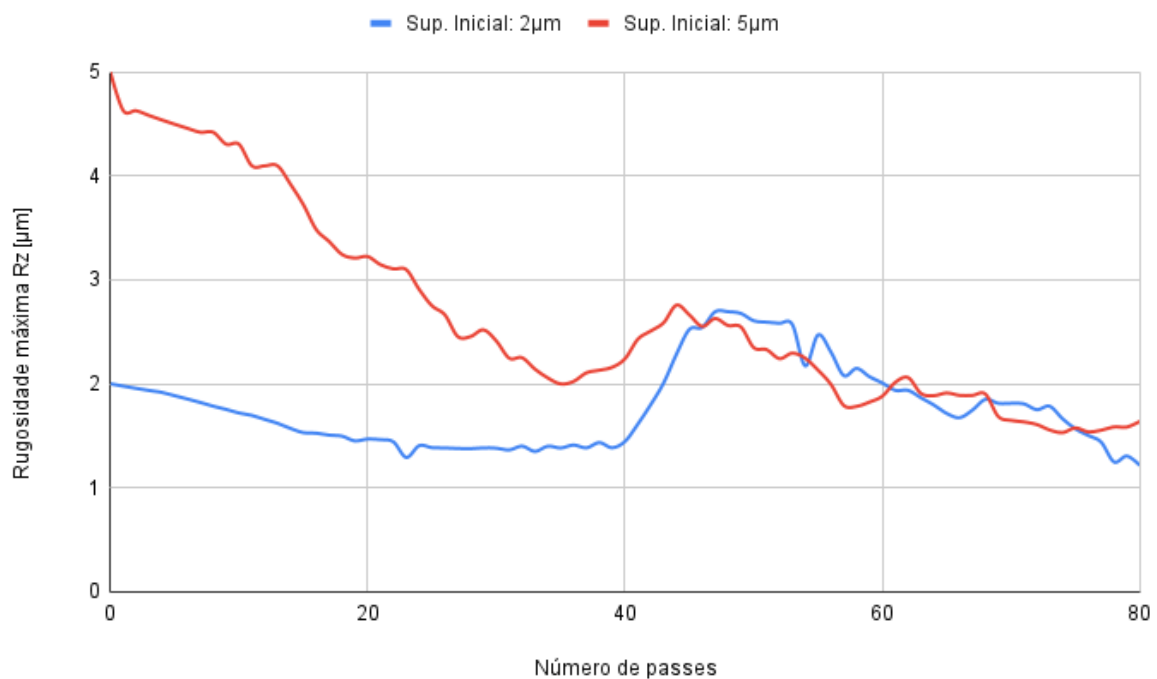


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 14 apresenta a rugosidade máxima obtida a partir de um rebolo com maior protrução de grão ($5 \mu\text{m}$), grãos distribuídos aleatoriamente em todas as direções e insertos com diferentes rugosidades iniciais ($2 \mu\text{m}$ e $5 \mu\text{m}$). Inicialmente, observa-se o mesmo decaimento das curvas apresentadas na Figura 13, entretanto, na Figura 14, nota-se um novo aumento da rugosidade R_z a partir aproximadamente do 47º passe, o qual pode estar associado à maior penetração dos grãos na superfície após uma primeira redução da rugosidade inicial, devido à maior protrução de grão testada. Para o modelo com o inserto de maior rugosidade inicial, obteve-se uma variação de $3,47 \mu\text{m}$, enquanto para o modelo com menor

rugosidade inicial, a variação foi de $0,78 \mu\text{m}$. Verifica-se ainda que não houve estabilização até o 80° passe, embora as curvas passem a ter comportamento similar e permaneçam em queda.

Figura 14 – Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para diferentes condições iniciais do inserto (distribuição aleatória de grãos em todas as direções, protrusão máxima de $5 \mu\text{m}$)

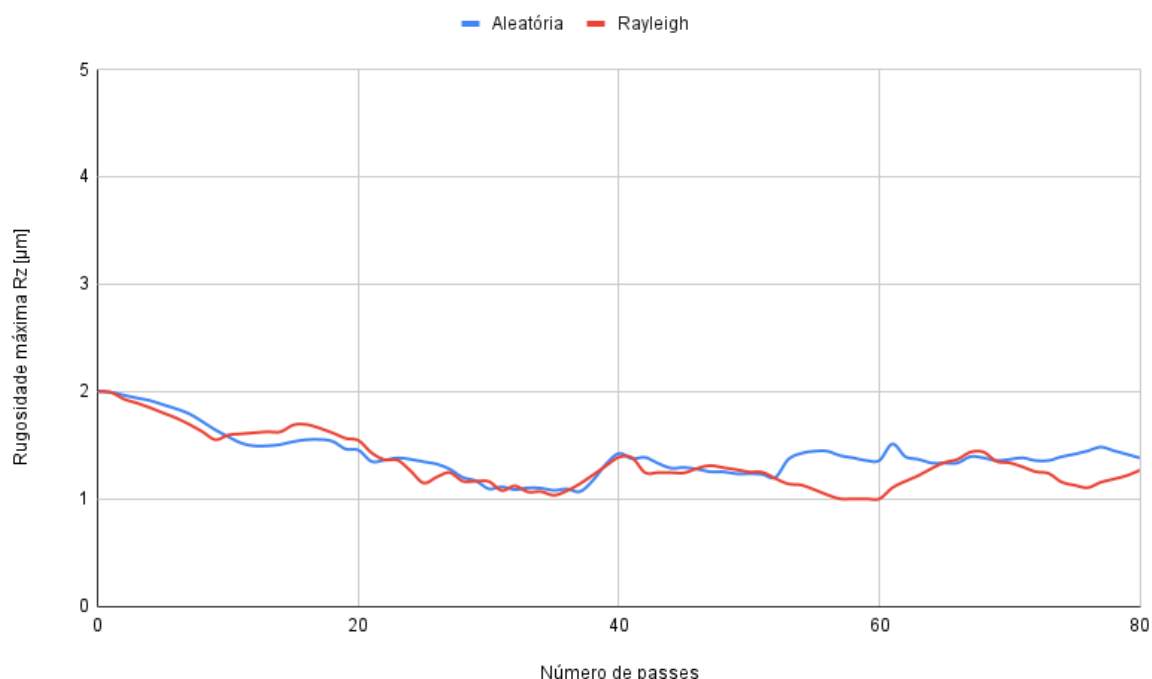


Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando-se os resultados relacionados a uma distribuição determinística e outra estocástica em relação à protrusão de grão em um rebolo com protrusão máxima de $3 \mu\text{m}$ para simular o processo de retificação em um inserto com rugosidade inicial de $2 \mu\text{m}$ (Figura 15), observa-se um comportamento bastante similar até aproximadamente o 52° passe, a partir do qual as curvas diferem em função de oscilações. A curva correspondente à distribuição de Rayleigh, embora tenha apresentado maior flutuação, alcança um menor valor mínimo, de $0,99 \mu\text{m}$, diferentemente da curva obtida com a distribuição aleatória, que foi mais estável, mas apresentou um valor mínimo de rugosidade de $1,34 \mu\text{m}$. A variação de rugosidade (valor inicial – valor mínimo) com a aplicação da distribuição de Rayleigh

foi de $1 \mu\text{m}$, enquanto para distribuição aleatória foi de $0,93 \mu\text{m}$.

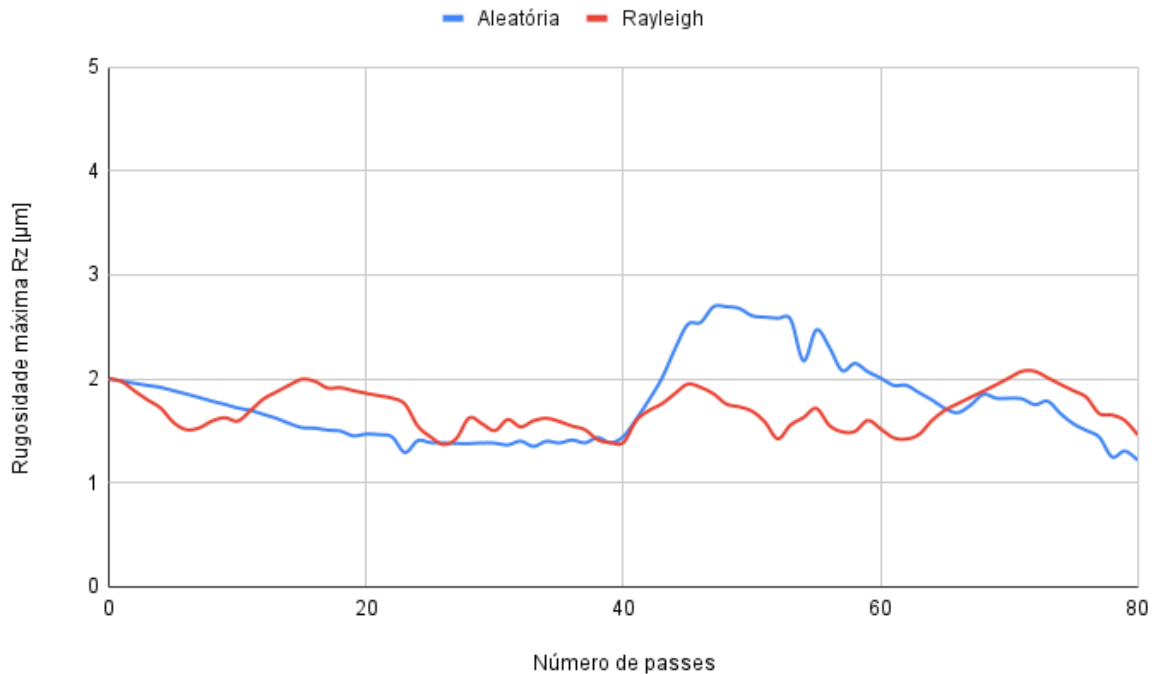
Figura 15 – Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para diferentes distribuições de prostrusão de grão (prostrusão máxima de $3 \mu\text{m}$, rugosidade inicial de $2 \mu\text{m}$)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 16 apresenta a rugosidade máxima obtida nas mesmas condições anteriores, mas com um rebolo de maior prostrusão de grão ($5 \mu\text{m}$). A curva referente à distribuição de Rayleigh oscilou durante os ciclos de retificação, no entanto, a rugosidade máxima se manteve mais estável quando comparada à curva relacionada à distribuição aleatória. De modo geral, em comparação à Figura 15, uma menor prostrusão levou a menores valores de R_z . A redução do valor a partir da rugosidade inicial foi de $0,68 \mu\text{m}$ para a curva obtida com uso da distribuição de Rayleigh e de $1,40 \mu\text{m}$ para a curva gerada com a aplicação da distribuição aleatória.

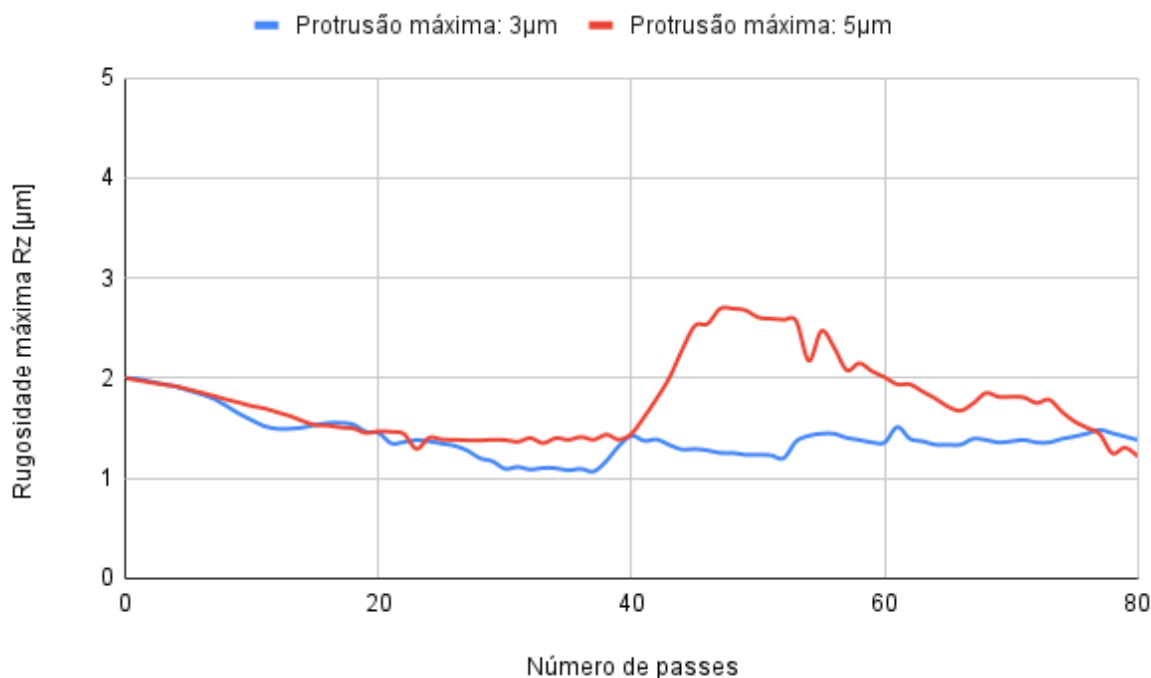
Figura 16 – Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para diferentes distribuições de prostrusão de grão (prostrusão máxima de $5 \mu\text{m}$, rugosidade inicial de $2 \mu\text{m}$)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para um inserto com rugosidade inicial de $2 \mu\text{m}$ e grãos posicionados em relação à sua prostrusão por uma distribuição aleatória, com diferentes valores de prostrusão máxima ($3 \mu\text{m}$ e $5 \mu\text{m}$), mostra-se, novamente, que quanto maior a prostrusão dos grãos, maior a rugosidade R_z , principalmente após se atingir inicialmente uma rugosidade mínima (Figura 17). Verifica-se que a rugosidade máxima produzida pelo rebolo com maior prostrusão elevou o R_z para $2,69 \mu\text{m}$, embora tenha se iniciado uma nova trajetória de queda, resultando, após os 80 passes, em melhora da rugosidade. Para o rebolo de menor prostrusão, a variação de R_z foi de $0,93 \mu\text{m}$, enquanto para o outro foi de $1,48 \mu\text{m}$.

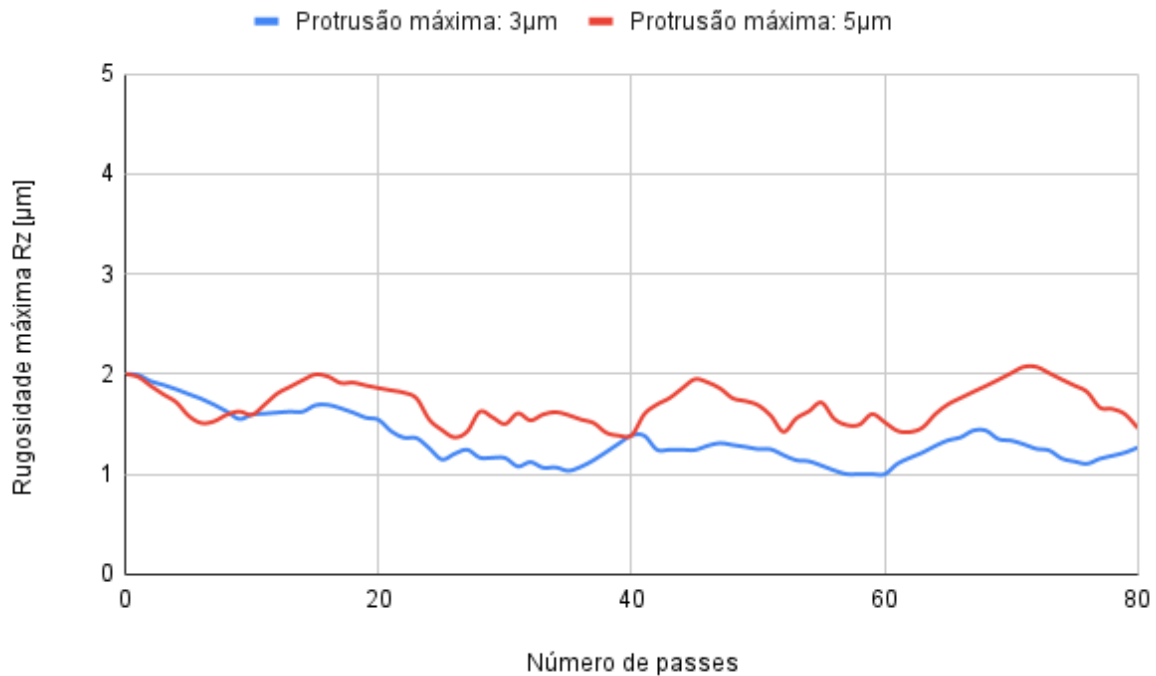
Figura 17 – Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para diferentes protruções máximas de grão (distribuição aleatória, rugosidade inicial de $2 \mu\text{m}$)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A rugosidade máxima obtida a partir de um rebolo com os grãos posicionados conforme a distribuição de Rayleigh também mostrou que o aumento da protrusão elevou a rugosidade durante a execução dos passes (Figura 18). Comparando-se os gráficos das Figuras 17 e 18, percebe-se que a utilização da distribuição de Rayleigh para o posicionamento dos grãos do rebolo em relação à protrusão se mostrou mais eficiente, já que produz oscilações de menor amplitude, principalmente no caso do rebolo com maior protrusão máxima. Após os 80 passes, obteve-se uma variação de rugosidade de $1,00 \mu\text{m}$ para o rebolo de menor protrusão e de $0,70 \mu\text{m}$ para o de maior protrusão.

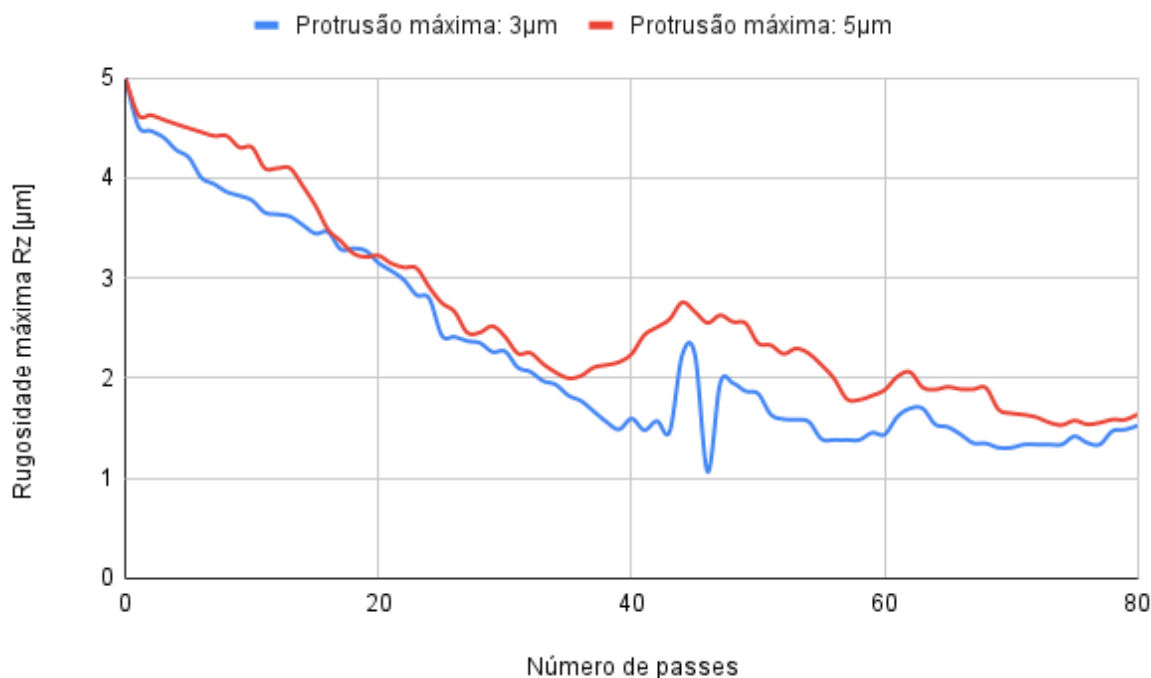
Figura 18 – Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para diferentes protruções máximas de grão (distribuição de Rayleigh, rugosidade inicial de $2 \mu\text{m}$)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 19 mostra a rugosidade máxima obtida a partir de um rebolo com os grãos posicionados de acordo com a distribuição aleatória e em um inserto com rugosidade inicial maior ($5 \mu\text{m}$). Observou-se maior variação de R_z e menores rugosidades para o processo com aplicação de um rebolo com menor protrusão máxima de grão, além de uma tendência de estabilização após os 80 passes e menor efeito das oscilações ao longo do processo. A variação de R_z para o rebolo com protrusão de $3 \mu\text{m}$ foi de $3,93 \mu\text{m}$, enquanto para protrusão de $5 \mu\text{m}$ foi $3,46 \mu\text{m}$.

Figura 19 – Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para diferentes protruções máximas de grão (distribuição aleatória, rugosidade inicial de $5 \mu\text{m}$)



Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo geral, pode-se concluir que a utilização de um rebolo com os grãos posicionados para fora do ligante a partir da distribuição de Rayleigh e com menor protrução máxima de grão se mostrou mais eficiente para a obtenção de uma superfície retificada menos rugosa. Ademais, embora os resultados finais sejam similares, nota-se que superfícies com rugosidade inicial maior são mais sensíveis à redução da rugosidade. Cabe lembrar, no entanto, que, com base na hipótese de que a camada abrasiva possui as mesmas características ao longo do processo, assim que a superfície do inserto atinge o ligante, a retificação se “inicia” novamente, e a curva de rugosidade tende a oscilar. Isso justifica a dispersão dos resultados registrados na literatura (Cruz, Sordi e Ventura, 2020), já que não se sabe exatamente em que ponto o processo é interrompido, devido à inércia do sistema e à impossibilidade de se calcular o tempo exato de retificação.

5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM APLICAÇÃO DE PERFIS REAIS DO REBOLO

Testes de retificação foram realizados com o intuito de se obter a topografia do rebolo para diferentes volumes de material removido na superfície de folga do inserto. Imagens tridimensionais destas topografias foram obtidas por microscópio confocal e os perfis foram extraídos por *software CAD*. Da mesma forma que na etapa anterior, as superfícies iniciais dos insertos utilizados para simular a aplicação dos diferentes perfis foram modeladas com rugosidades máximas de $2 \mu\text{m}$. Com isso, pôde-se obter as curvas de rugosidade máxima R_z em função do número de passes de retificação a partir de uma situação conhecida.

No início dos testes (Vol 0), o rebolo foi dressado com o intuito de se obter uma camada abrasiva uniforme. A Tabela 2 apresenta os valores de S_{pk} (rugosidade reduzida de pico em determinada área, representativa da protrusão de grão) e S_{mr1} (percentual de material associado aos picos em determinada área, representativo do número de arestas ativas) para os diferentes volumes de material, de maneira a se caracterizar a topografia real do rebolo nas diferentes condições e possibilitar a análise dos resultados da simulação.

Tabela 2 – Valores médios de S_{pk} e S_{mr1} para diferentes volumes de material removido e seus respectivos desvios-padrão

Volume planejado [mm³]	Volume removido [mm³]	S_{pk} [μm]	σ (S_{pk})	S_{mr1} [%]	σ (S_{mr1})
0	0	4,109	1,707	9,278	0,989
15	18,34	7,677	1,697	11,579	0,578
30	34,19	8,205	1,958	10,889	0,773
120	124,91	7,222	0,580	10,944	1,090
900	1029,66	5,031	0,954	9,972	1,335
1250	1348,79	3,729	0,635	10,134	1,035
1750	1611,64	3,814	0,642	9,188	0,802

Fonte: Elaborado pelo autor.

Entende-se que no Vol 0 (rebolo recém-dressado), os grãos não tinham elevada afiação e poucos participaram do processo de corte (menor S_{pk} e menor

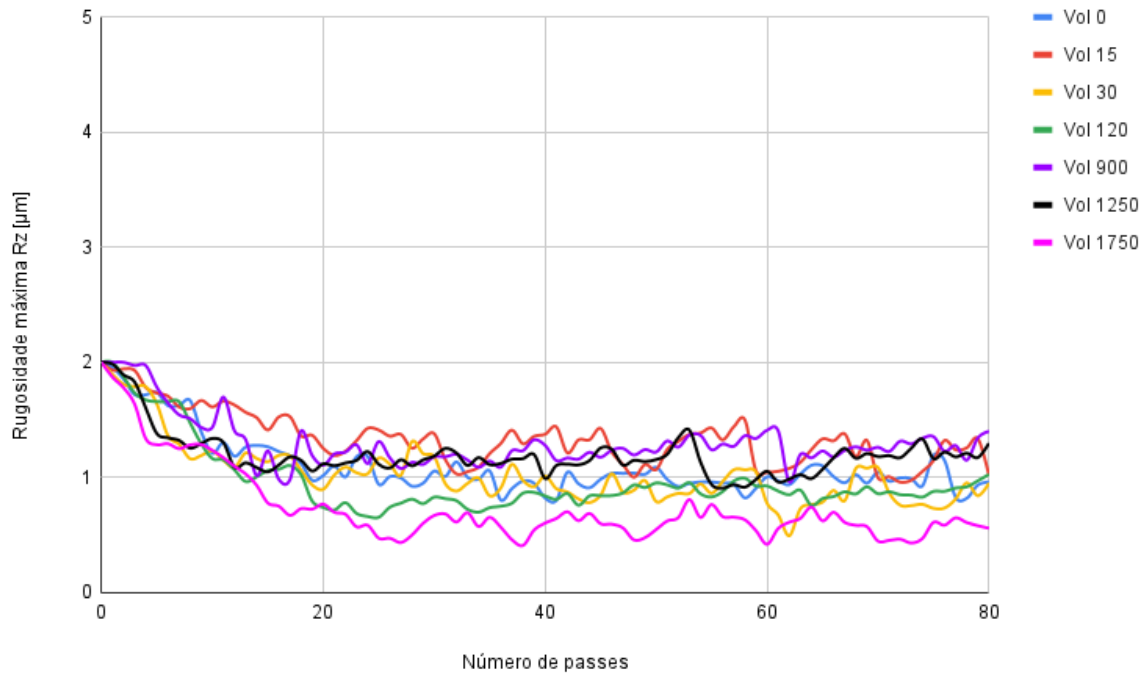
S_{mr1} , segundo a curva de Abbott-Firestone) em comparação ao rebolo no Vol 15. A menor protrusão justifica então o fato da curva de rugosidade máxima R_z para o Vol 0 ter se estabilizado em um patamar menor do que a curva referente ao Vol 15 (Figura 20). Para o Vol 30, observa-se que a protrusão dos grãos é maior e menos grãos participaram do processo, o que deveria ter causado aumento da rugosidade em comparação ao Vol 15, mas não foi verificado, provavelmente devido à elevada dispersão dos resultados e menor diferença média entre as duas situações. Comparando-se o Vol 120 e o Vol 30, nota-se, porém, que as pequenas diferenças entre as protrusões de grão e os números de arestas ativas correspondem à oscilação das curvas em torno de um mesmo valor médio aproximado, conforme mostra a Figura 20.

Embora, em média, a protrusão de grão tenha diminuído e o número de arestas ativas, aumentado, resultados similares foram observados para o Vol 900 e para o Vol 1250. Além disso, nota-se que essas condições levaram a patamares de rugosidade maiores em relação ao Vol 120, ao contrário do que era esperado. Uma análise correta, no entanto, deve considerar o crescimento da dispersão nestes últimos casos, que deve ter causado tais distorções na rugosidade obtida, conforme observado pela maior amplitude de oscilação das curvas na Figura 20.

Por fim, mesmo com uma protrusão de grão e quantidade de arestas ativas similares àquelas verificadas para o Vol 1250, o Vol 1750 apresentou um patamar de rugosidade claramente inferior, o que pode ter sido provocado, em comparação aos dois casos anteriores, pelo número superior de perfis extraídos do rebolo e aplicados na simulação.

Deve-se destacar que a compreensão do processo de retificação não pode ser limitada apenas à geometria dos grãos e sua protrusão máxima, à rugosidade inicial da peça de trabalho e à cinemática do processo, mas deve considerar o processo de desgaste da camada abrasiva de forma mais detalhada, sendo que os grãos podem sofrer ruptura ou achatamento, alterando, assim, a rugosidade da peça.

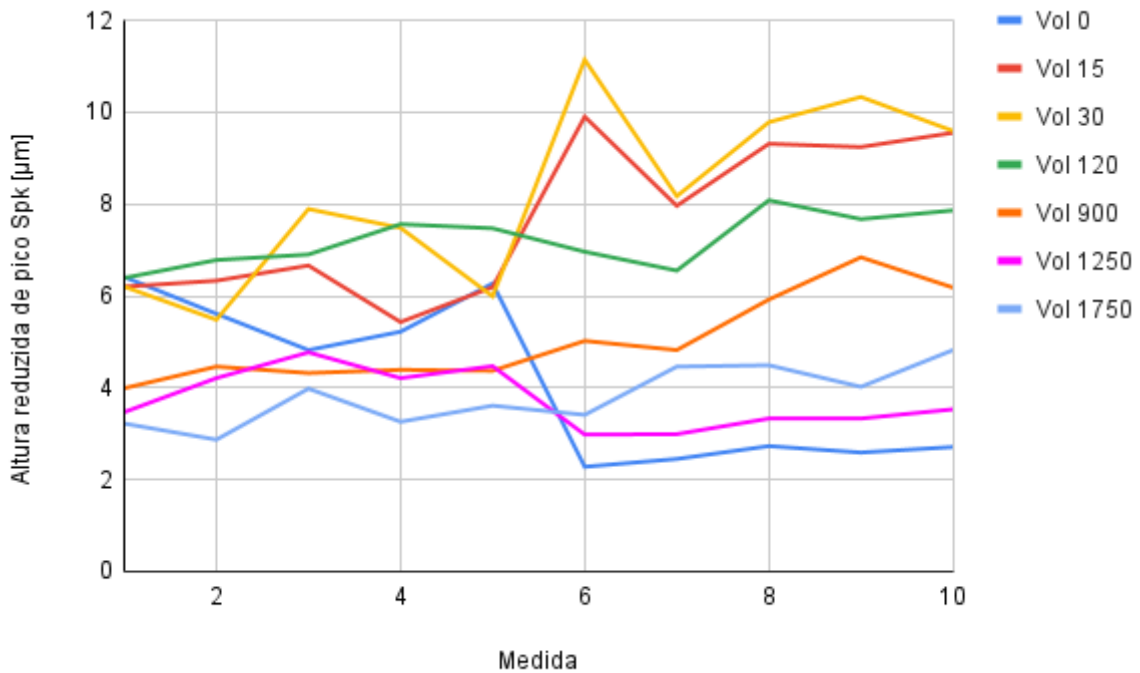
Figura 20 – Variação da rugosidade máxima R_z com o número de passagens do rebolo na direção axial para perfis reais do rebolo obtidos após a retificação de diferentes volumes de material e rugosidade inicial do inserto de $2 \mu\text{m}$



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 21, que apresenta todos os valores de S_{pk} (indicativo da proeminência do grão) medidos na camada abrasiva do rebolo para diferentes volumes de material removido demonstra a elevada dispersão deste parâmetro em uma pequena região do rebolo e reforça a dificuldade de se modelar o processo de forma adequada e obter valores de rugosidade sempre coerentes.

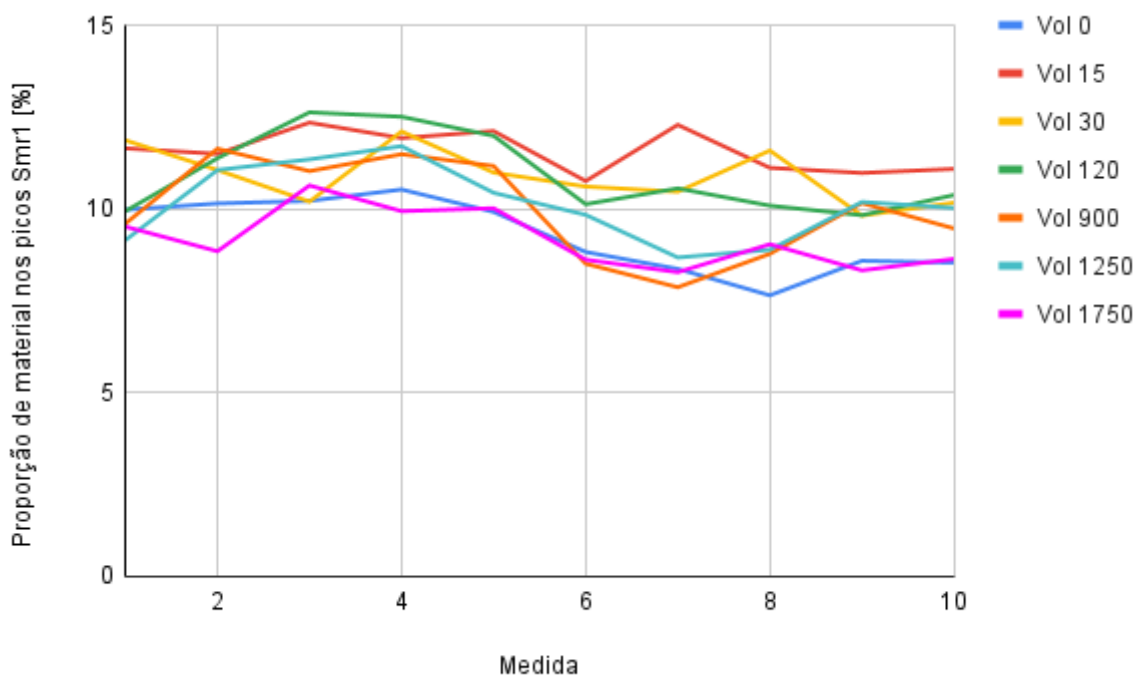
Figura 21 – Valores da altura reduzida de pico S_{pk} medidos na camada abrasiva do rebolo após a retificação de diferentes volumes de material



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 22 mostra as medições da proporção de material relativa aos picos na camada abrasiva do rebolo para diferentes volumes de material removido. De modo geral, notam-se apenas pequenas oscilações deste parâmetro, o qual parece possuir, em comparação à protrusão de grão, menor relevância para determinação da rugosidade do inserto retificado.

Figura 22 – Valores da proporção de material nos picos S_{mr1} medidos na camada abrasiva do rebolo após a retificação de diferentes volumes de material



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao se avaliar o processo como um todo, é possível verificar a complexidade associada ao desgaste do rebolo. Para um mesmo volume de remoção de material, podem existir grãos com maiores ou menores protrusões, que participam mais ou menos do processo e têm sua geometria alterada por ruptura, que pode gerar novas arestas, ou desgaste progressivo, que leva ao achatamento do grão. Isso leva a oscilações de rugosidade durante o processo, a qual, no entanto, tende a ser reduzida em comparação à situação inicial do inserto, devido à remoção contínua de pequenas quantidades de material por grão.

5.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO COM OS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE

Os testes de retificação foram também realizados com o intuito de se obter as rugosidades R_z dos insertos de fato retificados para cada volume de material removido (Tabela 3) e compará-las às rugosidades simuladas. Em relação à rugosidade máxima R_z , deve-se destacar que o *blank* parte de uma rugosidade inicial diferente do inserto modelado para a simulação e a alteração da camada abrasiva com o desgaste do rebolo e a remoção de material durante o processo de corte são fenômenos complexos. Assim, entende-se que os valores úteis para comparação correspondem à variação de rugosidade ΔR_z . Erros negativos indicam que os valores simulados são menores que os obtidos experimentalmente.

Tabela 3 – Valores experimentais e simulados de rugosidade para cada volume de material removido e seus respectivos erros

Volume Planejado [mm³]	R_{zexp} [μm]	ΔR_{zexp} [μm]	R_{zsim} [μm]	ΔR_{zsim} [μm]	Erro (%)
Condição Inicial	3,540	-	2,000	-	-
15	2,130	1,410	1,237	0,763	-45,89
30	2,280	1,160	0,882	1,118	-3,62
120	2,410	1,130	0,861	1,139	0,79
900	2,760	0,780	1,223	0,777	-0,38
1250	2,790	0,750	1,136	0,864	15,20
1750	2,550	0,990	0,587	1,413	42,73

Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando-se os valores da variação de rugosidade simulada àqueles obtidos experimentalmente, tem-se como hipótese que os erros encontrados (com variação em módulo entre 0,38% e 45,89%) podem estar associados ao tipo de desgaste que ocorre nos grãos abrasivos, às diferenças na superfície do inserto inicial e à ocorrência de deformação plástica por sulcamento e formação de trincas, fatores que não podem ser previstos pela simulação.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pelos modelos gráficos desenvolvidos e pelos experimentos de retificação de insertos de metal duro, foram tiradas as seguintes conclusões:

- A distribuição de Rayleigh para o posicionamento dos grãos em relação à protrusão se mostrou mais eficiente para a redução da rugosidade R_z quando comparada à distribuição aleatória.
- Menores protrusões de grão no modelo implicam em menores valores de R_z .
- Insertos com menores rugosidades iniciais levam a menores valores de R_z ao final do processo de retificação simulado.
- A dispersão das medidas de protrusão de grão e número de arestas ativas dificulta a obtenção de conclusões sobre o efeito do perfil do rebolo na rugosidade.
- Ao se comparar o ΔR_z experimental com o simulado, foram calculados erros entre 0,38% a 45,89%, que podem estar associados ao processo de desgaste da camada abrasiva, que não pode ser controlado através da simulação em *CAD*.
- Ainda há limitações para aplicação do modelo proposto, mas por meio dele foi possível uma maior compreensão do processo de retificação e avaliação das dificuldades envolvidas na modelagem da camada abrasiva durante o processo, a qual não tem natureza regular e homogênea.

7. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aproximar a parametrização da superfície de folga do inserto de casos reais, tendo em vista a distribuição de picos e vales.
- Verificar a influência de grãos com outras geometrias, orientações e tamanhos sobre a rugosidade.
- Analisar o efeito sobre a rugosidade da distribuição utilizada para o posicionamento dos grãos em relação ao plano da camada abrasiva.

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. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 183, n. 2-3, p. 165-168, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.038>

ABNT. ABNT NBR ISO 4288:2008 Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. 2008.

AGARWAL, S.; KHARE, S. K.; PANDEY, V. P.; PATEL, M. An analytical chip thickness model for performance assessment in silicon carbide grinding. **Procedia Manufacturing**, v. 10, p. 298-306, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.060>

AGARWAL, S.; RAO, P. V. Modeling and prediction of surface roughness in ceramic grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 12, p. 1065-1076, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.08.009>

BAIDAKOVA, N. V.; ORLOVA, T. N. Influence of abrasive grain geometrical characteristics on the grinding quality. **Procedia Engineering**, v. 206, p. 194-199, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.459>

BERGS, T.; MÜLLER, U.; VITS, F.; BARTH, S. Tribological conditions in grinding of polycrystalline diamond. **Diamond and Related Materials**, v. 108, p. 107930, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.107930>

BIERMANN, D.; WÜRZ, E. A study of grinding silicon nitride and cemented carbide materials with diamond grinding wheels. **Production Engineering**, v. 3, n. 4, p. 411-416, 2009. <https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11740-009-0183-z>

CARREIRA, L. A. de S. **Avaliação da eficiência energética no processo de retificação de metal duro**. 2022. 57 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/15772>

CHAKRABARTI, S.; PAUL, S. Numerical modelling of surface topography in superabrasive grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 39, n. 1, p. 29-38, 2008. <https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00170-007-1201-y>

CHENG, K. (Ed.). Machining dynamics: fundamentals, applications and practices. **Springer Science & Business Media**, 2008.

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do Pó: Técnica e Produtos**. 3^a ed., 1992.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica Vol. II**. 2^a ed., 1986.

CÎRSTOIU, A. C. Surface roughness evaluation in turning based on Abbott–Firestone curve. **The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics**, v. 38, p. 163-169, 2010.

CRUZ, D. C. **Avaliação da integridade superficial de insertos retificados da liga WC-Co para ferramentas de corte**. 2021. 112 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/14417>

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**, v. 108, n. 1, p. 323-330, 2020. <https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00170-020-05382-y>

DENKENA, B.; BIERMANN, D. Cutting edge geometries. **CIRP annals**, v. 63, n. 2, p. 631-653, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.009>

DENKENA, B.; KRÖDEL, A.; HARMES, J.; KEMPF, F.; GRIEMSMANN, T.; HOFF, C.; HERMSDORF, J.; KAIERLE, S. Additive manufacturing of metal-bonded grinding tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 5, p. 2387-2395, 2020. <https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00170-020-05199-9>

DENKENA, B.; DITTRICH, M.-A.; LIU, Y.; THEUER, M. Automatic regeneration of cemented carbide tools for a resource efficient tool production. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 259-265, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.119>

DENKENA, B.; KÖHLER, J.; SCHINDLER, A. Behavior of the magnetic abrasive tool for cutting edge preparation of cemented carbide end mills. **Production Engineering**, v. 8, n. 5, p. 627-633, 2014d.

<https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11740-014-0569-4>

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.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.07.003>

DENKENA, B.; GROVE, T.; DITTRICH, M.-A.; SUNTHARAKUMARAN, V. Porous metal bonds increase the resource efficiency for profile grinding II. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 114-119, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.049>

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, 2014a.

<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.08.007>

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, 2014b.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.013>

DENKENA, B.; KÖHLER, J.; VENTURA, C. E. H. Optimierte Herstellung von Schneidkanten-Mikrogeometrien. **VDI Z-Integrierte Produktion-Special**, n. 1, p. 34, 2012.

DING, W.; DAI, C.; YU, T.; XU, J.; FU, Y. Grinding performance of textured monolayer CBN wheels: undeformed chip thickness nonuniformity modeling and ground surface topography prediction. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 122, p. 66-80, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.05.006>

DITTRICH, M.-A.; DENKENA, B.; WICHMANN, M. Parametric grinding wheel model for material removal simulation of tool grinding processes. **Procedia CIRP**, v. 102, p. 381-386, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.09.065>

EDWARDS, R.; EDWARDS, R. **Cutting tools**. London: Institute of materials, 1993.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. Editora Blucher, 2018.

HECKER, R. L.; LIANG, S. Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 8, p. 755-761, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00055-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00055-5)

HEGEMAN, J. B. J. W.; DE HOSSON, J. Th. M.; DE WITH, G. Grinding of WC-Co hardmetals. **Wear**, v. 248, n. 1-2, p. 187-196, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00561-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00561-5)

JIANG, J.; GE, P.; HONG, J. Study on micro-interacting mechanism modeling in grinding process and ground surface roughness prediction. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, n. 5, p. 1035-1052, 2013. <https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00170-012-4546-9>

JIANG, J. L.; GE, P. Q.; BI, W. B.; ZHANG, L.; WANG, D. X.; ZHANG, Y. 2D/3D ground surface topography modeling considering dressing and wear effects in grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 74, p. 29-40, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.07.002>

JIA, K.; FISCHER, T. E.; GALLOIS, B. Microstructure, hardness and toughness of nanostructured and conventional WC-Co composites. **Nanostructured materials**, v. 10, n. 5, p. 875-891, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0965-9773\(98\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S0965-9773(98)00123-8)

KHARE, S. K.; AGARWAL, S. Predictive modeling of surface roughness in grinding. **Procedia CIRP**, v. 31, p. 375-380, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.04.092>

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. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.209>

KLOCKE, Fritz; KUCHLE, Aaron. **Manufacturing processes**. Berlin: Springer, 2009.

KOPAC, J.; KRAJNIK, P. High-performance grinding—a review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 175, n. 1-3, p. 278-284, 2006.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.010>

LIU, Y.; WARKENTIN, A.; BAUER, R.; GONG, Y. Investigation of different grain shapes and dressing to predict surface roughness in grinding using kinematic simulations. **Precision Engineering**, v. 37, n. 3, p. 758-764, 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.02.009>

MACHADO, Á. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. Editora Blucher, 2015.

MALKIN, S.; GUO, C. Theory and applications of machining with abrasives.

University of Massachusetts, 1989.

PAN, Y.; ZHOU, P.; YAN, Y.; AGRAWAL, A.; WANG, Y.; GUO, D.; GOEL, S. New insights into the methods for predicting ground surface roughness in the age of digitalisation. **Precision Engineering**, v. 67, p. 393-418, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.11.001>

PIVOTTO, L. B. **Aplicação de insertos de metal duro com diferentes acabamentos no torneamento da liga Ti-15Mo**. 2020. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020. <https://doi.org/10.11606/D.18.2020.tde-25092020-110400>

RODRIGUES, A. G. **Caracterização do desgaste do rebolo na retificação de insertos de metal duro**. 2021. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/14269>

SHAO, Y.; LI, B.; LIANG, S. Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding of ceramics. **Machining Science and Technology**, v. 19, n. 2, p. 325-338, 2015.

DOI: 10.1080/10910344.2015.1018535

TÖNSHOFF, H. K.; DENKENA, B. Basics of cutting and abrasive processes. **Berlin: Springer-Verlag**, 2013. 399 p.

TÖNSHOFF, H.K.; SPINTIG, W. Prozesssicheres Bohren gehärteter Stähle [Process reliable drilling of hardened steels]. *Werkstatt und Betrieb* 7:390–392 (1993).

VENTURA, C. E. H.; DENKENA, B. Preparação de arestas de ferramentas de cerâmica mista por retificação e sua aplicação no torneamento de aço endurecido.

In: **8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. 2015. p. 18-22.

WHITEHOUSE, D. J. **Handbook of surface and nanometrology**. Taylor & Francis, 2002.

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

747-754, 2018. <https://doi-org.ez31.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00170-018-2362-6>

WU, C.; LI, B.; LIU, Y.; LIANG, S. Y. Surface roughness modeling for grinding of silicon carbide ceramics considering co-existence of brittleness and

ductility. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 133, p. 167-177, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.07.061>

WU, C. J.; LI, B. Z.; YANG, J. G.; LIANG, S. Y. Experimental investigations of machining characteristics of SiC in high speed plunge grinding. **Journal of Ceramic Processing Research**, 2016; 17(3): 223-231. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00050-

WU, J.; CHENG, J.; GAO, C.; YU, T.; GUO, Z. Research on predicting model of surface roughness in small-scale grinding of brittle materials considering grinding tool topography. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 166, p. 105263, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105263>

ZHANG, Quanli et al. 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, p. 105048, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105048>

ZHANG, Y.; FANG, C.; HUANG, G.; XU, X. Modeling and simulation of the distribution of undeformed chip thicknesses in surface grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 127, p. 14-27, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.01.002>

ZHANG, Z.; YAO, P.; WANG, J.; HUANG, C.; CAI, R.; ZHU, H. Analytical modeling of surface roughness in precision grinding of particle reinforced metal matrix composites considering nanomechanical response of material. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 157, p. 243-253, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.04.047>