



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

MARCELO ALEM FOLONI

MECANISMOS DE REMOÇÃO EM ALUMINA SINTERIZADA POR LAPIDAÇÃO
PLANA COM CINEMÁTICA CICLOIDAL

BAURU

2025



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”



MARCELO ALEM FOLONI

**MECANISMOS DE REMOÇÃO EM ALUMINA SINTERIZADA POR LAPIDAÇÃO
PLANA COM CINEMÁTICA CICLOIDAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Valle França

Coorientador: Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi

BAURU

2025

F668m

Foloni, Marcelo Alem

Mecanismos de remoção em alumina sinterizada por lapidação plana com cinemática cicloidal / Marcelo Alem Foloni. -- Bauru, 2025
73 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Thiago Valle França

Coorientador: Arthur Alves Fiocchi

1. Processos de fabricação. 2. Lapidação plana. 3. Mecanismos de remoção. 4. Cerâmica avançada. 5. Processos sustentáveis. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARCELO ALEM FOLONI,
DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 30 dias do mês de julho do ano de 2025, às 14h, no(a) Via sistemas de videoconferência e outras ferramentas para comunicação a distância, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARCELO ALEM FOLONI, intitulada **MECANISMOS DE REMOÇÃO EM ALUMINA SINTERIZADA POR LAPIDAÇÃO PLANA COM CINEMÁTICA CICLOIDAL**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. ARTHUR ALVES FIOCCHI (Co-orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de Uberlândia, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia - Unesp/Câmpus de Bauru, Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo / USP - São Carlos. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: __ **APROVADO** __ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ARTHUR ALVES FIOCCHI

Documento assinado digitalmente
gov.br **ARTHUR ALVES FIOCCHI**
Data: 31/07/2025 09:19:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS pelas concatenações e arranjo no espaço, tempo e humanos que permitiu conquistar esta etapa.

Aos meus PAIS, Antônio de Pádua Foloni e Mônica Alexandrina Alem, pela minha vida. Em especial a minha Mãe pelo suporte que sem o qual teria desistido já na graduação. Grato pelo incentivo e por sempre acreditarem no meu potencial. Agradeço, também, a minha Irmã Miriam Alem Foloni pelas conversas que me renovaram o fôlego pra continuar. E a toda família.

A minha namorada e parceira Karina Garcia Menconi, por estar ao meu lado em parte desta jornada me apoiando no processo.

Ao meu ORIENTADOR Thiago Valle França, obrigado por sua contribuição ao longo de todo o desenvolvimento desse trabalho, pelo apoio acadêmico e pessoal. Agradeço o empenho, a dedicação, a confiança e a amizade.

Ao meu COORIENTADOR Arthur Alves Fiocchi, obrigado por estar presente na minha formação nos últimos 6 anos, e que pelo início de uma amizade se tornou propulsão para sair da inércia e restaurar a vida dos estudos. Agradeço a dedicação, o apoio incondicional, a confiança e a paciência. Serei eternamente grato pela amizade e por ter me ajudado a conquistar mais essa vitória.

Aos PROFESSORES DA FACULDADE ENGENHARIA DE BAURU, especialmente Prof. José Claudio Lopes, Prof. Carlos Eduardo Bianchi, ambos pelas conversas que tivemos que permitiu aproximar e conciliar as faces humana e acadêmica me acolhendo e auxiliando em momento delicado. Ao Prof. Paulo Noronha Lisboa Filho pela gentileza e sempre estar solícito e confiando, o que permitiu muitas horas de acesso ao laboratório de nanotecnologia no Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Unesp de Bauru, e pela conversa ampliada e esclarecida sobre o trabalho acadêmico. Ao Prof. Cesar Renato Foschini, pela disciplina ministrada que contribuiu com a formação. Ao Prof. Délon Modolo através de quem, tudo se iniciou e permitiu acesso à instituição que tenho apreço.

Aos FUNCIONÁRIOS DA FACULDADE ENGENHARIA DE BAURU, Hamilton José de Mello, Hélio Aparecido de Souza, Ulisses Frazão de Oliveira Tibúrcio, Cristiano Angélico, e José Marcelo Felix da Silva.

Aos FUNCIONÁRIOS DA SEÇÃO DA PÓS GRADUAÇÃO, Thiago Rossi, Lucilene Messias, Luís Fernando Corrêa da Silva e Nádia Correa Ostti, Coordenadora: Alessandra Contador.

Aos meus COLEGAS, Guilherme Ribeiro Capelin, Jean Valdir Uchoa Teixeira, Henry Hwang que muito contribuíram para a execução deste trabalho.

Ao AMIGO, Thiago Ferreira Querino, exemplar raro no altruísmo que foi fundamental como humano prestativo em seus intensos e gratuitos esforços participando profundamente dedicado nos ensaios, pós ensaios, e também no congresso COBEF 2025.

Aos PROFESSORES Rafael Liberatti Iavaronne, Carlos Eduardo Bianchi e Arthur Alves Fiocchi agradeço a participação como membros da banca avaliadora de qualificação e contribuições no melhoramento deste trabalho.

Aos PROFESSORES Luiz Eduardo Ângelo Sanchez, Alessandro Roger Rodrigues e Arthur Alves Fiocchi agradeço a participação como membros da banca avaliadora de defesa e contribuições no melhoramento deste trabalho.

CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela Bolsa de Estudos concedida sob número do processo: 88887.825434/2023-00.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelos Auxílios à Pesquisa (processos número 2011/22486-7 e 2008/50233-3), tornando financeiramente possível a realização desta pesquisa. Agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a consumação de mais uma importante etapa em minha vida.

À FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelos Auxílios à Pesquisa (processos número APQ-01759-17, APQ-00403-24), tornando financeiramente possível a realização desta pesquisa. Agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a consumação de mais uma importante etapa em minha vida.

À Financiadora de Estudos e Projetos FINEP pelo fomento sob número (2209/22 e 2127/22).

À parceria entre Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial, Universidade Federal de Uberlândia e iniciativa privada, Embrapii-UFU-Teksul, respectivamente pelo fomento firmado sob (SEI 23117.049683/2023-96).

À iniciativa estatal que fomentou por meio das ementas parlamentares (FEMEC.EXTEN.0055 e FEMEC.EXTEN.0094).

“Nomeamos caos, o incognoscível arranjo universal do espaço e tempo que concatena as relações humanas e que dão origens às experiências de vida.”

(Do Autor)

RESUMO

Dureza e fragilidade conferem as cerâmicas avançadas sinterizadas desafios de usinagem, tipicamente realizada por processos abrasivos. Amplamente empregada na indústria, a lapidação plana com cinemática cicloidal concilia correção de forma e acabamento de materiais de difícil usinagem. Usualmente, a lapidação emprega um veículo com característica lubrificante como meio para transportar os abrasivos. Alguns óleos e aditivos são nocivos, geram insalubridade no ambiente de trabalho e poluem o meio ambiente quando não são descartados corretamente, aumentando o custo de produção. Por outro lado, há demanda por peças e componentes cerâmicos para indústrias mecânica, eletrônica e fotônica que requerem processos sustentáveis para remover material sem introduzir defeitos microestruturais, área essa contemplada pela usinagem abrasiva de precisão e ultraprecisão. Dentro deste contexto, esta pesquisa investigou os mecanismos de remoção em alumina sinterizada por lapidação plana com cinemática cicloidal com lapidador de alumínio (5052F) e abrasivo de diamante monocristalino ($\varnothing = 54 \mu\text{m}$) sob duas pressões de lapidação (20 e 25 kPa) e água destilada como veículo e fluido de corte. O lapidador foi previamente texturizado para induzir o ancoramento de abrasivos para acentuar o mecanismo de abrasão dois corpos. Os resultados revelaram predomínio do modo frágil de remoção por abrasão três corpos, com presença em menor quantidade de microranhuramento, microsulcamento e microcorte, promovidos preferencialmente por abrasão dois corpos. Embora o mecanismo de remoção seja predominantemente frágil, envolvendo a nucleação e propagação de trincas inter e transgranulares, não foram encontrados danos remanescentes na microestrutura policristalina que comprometam a aplicação mecânica. O aumento da pressão de lapidação melhora o acabamento (menor rugosidade, $R_a = 0,894 \pm 0,166 \mu\text{m}$) e aumenta a taxa de remoção de material (até 3 vezes superior para a pressão 25 kPa) de maneira determinística. Os resíduos não são nocivos ao meio ambiente e não contaminam as peças, que devido ao uso de água destilada, deixam o processo facilitando a etapa de limpeza sem utilização de solventes e reduzindo o custo de produção.

Palavras-chave: cerâmica avançada; mecanismo de remoção; transição dúctil-frágil; lapidação plana cicloidal; processo sustentável.

ABSTRACT

Hardness and brittleness confer on advanced sintered ceramics machining challenges, typically performed by abrasive processes. Widely used in industry, flat lapping with cycloidal kinematics reconciles shape correction and finishing of materials that are difficult to machine. Traditionally, lapping employs a vehicle with a lubricating characteristic as a method to transport the abrasives. Some oils and additives are harmful to the environment when they are not disposed of correctly, increasing the cost of production. On the other hand, there is a demand for ceramic parts and components for the mechanical, electronic and photonic industries that require sustainable processes to remove material without introducing microstructural defects, an area covered by precision and ultra-precision abrasive machining. Within this context, this research investigated the mechanisms of removal of sintered alumina in flat lapping with cycloidal kinematics with aluminum lapping (5052F) and single-crystalline diamond abrasive ($\varnothing = 54 \mu\text{m}$) under two lapping pressures (20 e 25 kPa) and distilled water as a vehicle. The lapping plate has been previously textured to promote the embedded of abrasives to accentuate the two-body abrasion mechanism. Although the removal mechanism was predominantly brittle, involving nucleation and propagation of intergranular and transgranular cracks, with less quantity of microscratching, microploughing and microcutting, no residual damage was observed in the polycrystalline microstructure that would compromise mechanical performance. The best surface finish was achieved at 25 kPa pressure, with $R_a = 0.894 \pm 0.166 \mu\text{m}$ and $R_{ku} = 13.866 \pm 7.964$, indicating plateau-like surfaces and deterministically elevated material removal rates (MRR) up to three times higher at 25 kPa compared to 20 kPa. The residues were non-toxic, environmentally benign, and did not contaminate components, which exited the process virtually clean. This eliminates the need for solvent-based cleaning and reducing production costs.

Keywords: advanced ceramic; removal mechanism; ductile-fragile transition; flat lapping cycloidal; sustainable process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Peças de cerâmica avanças em diversas áreas de aplicações.	22
Figura 2 - Secção transversal do processo abrasão dois e três corpos em detalhes à esquerda, e imagem de ensaio de micro indentação em corte transversal (superior direita) e seguido abaixo de sua representação esquemática.....	28
Figura 3 - (a) modo dúctil: 1 abrasivo (direção e sentido), 2 cavaco modo dúctil, 3 região plástica, 4 espessura removida. (b) 1 abrasivo (direção e sentido), 5 cavaco modo frágil, 6 microtrincas, 5 a 10µm profundidade dos danos subsuperficiais.	29
Figura 4 - Modo dúctil com três mecanismos de remoção (da esquerda para direita) e modo frágil com propagação de trincas (último à direita).	30
Figura 5 - Esquema das etapas dos micro mecanismos em modo dúctil e frágil (a) e ilustração por imagens de microscopia eletrônica por varredura (b) (c).....	31
Figura 6 - Lapidorretilificadora com lapidador em sua base e lixa acoplada por sistema a vacuo, imagem realizada após processo de texturização.	32
Figura 7 - Lapidador durante processo de torneamento (a) e lapidador torneado (c), lapidador durante processo de texturização (b) e lapidador texturizado (d).....	34
Figura 8 - Desenho técnico, vista superior com cota do diâmetro e frontal com espessura ambos em (mm) à esquerda e fotos da amostra de peça alumina sinterizada sem lapidação à direita.....	35
Figura 9 - Desenho do porta-peças em vista superior (a) e perspectiva isométrica (b), fabricação por manufatura aditiva do porta-peças (c), porta-peças de termoplástico ABS (cor preta) com dispositivo mecânico complacente e três amostras de alumina (cor branca.....	35
Figura 10 - Tipos de trajetórias produzidas pela Dualap ZL 700 da Stähli LäppTechnik GmbH, e indicação da classe de trajetória deste trabalho por seta azul na vertical.	36
Figura 11 - Representação do cabeçote da lapidorretificadora e das etapas de texturização do lapidador de alumínio e lapidação de discos de alumina sinterizada.....	37
Figura 12 - Desenho esquemático da seção transversal em corte na lapidação plana com cinemática cicloidial e lapidador de alumínio e mecanismos de abrasão dois e três corpos da alumina sinterizada.	37
Figura 13 - Perfilometria e parâmetros de rugosidades do lapidador sem texturização (a) e com texturização (b).....	40
Figura 14 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da alumina policristalina A1000-SG da Almatiss sinterizada a 1 600 °C por duas horas em atmosfera oxidante.	41

Figura 15 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de alumina policristalina lapidadas por 30 minutos com 1 g diamante monocristalino com diâmetro médio de 54 μm , rotação do porta-peça (Np) e do lapidador (NI) de 100 rpm e água destilada como veículo e fluido de corte de lapidação.....	42
Figura 16 - (a, b, c, d) Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e (e, f) perfilometria de microscopia confocal (PMC) após 30 minutos em função da pressão de lapidação. PMC com objetiva 100x, campo claro, (e) luz azul e (f) luz branca.	45
Figura 17 - Área da amostra de alumina sinterizada sem lapidação em imagem topográfica com graduação de picos e vales em cores e parâmetros de rugosidade superficial.	46
Figura 18 - Segmento destacado da amostra de alumina sinterizada sem lapidação (a), perfilometria do segmento destacado (b), parâmetros de rugosidade da perfilometria (c), e parâmetros de distribuição espacial (d).....	47
Figura 19 - Área da amostra 1 de alumina sinterizada lapidada a 20 kPa em imagem topográfica com graduação de picos e vales em cores e parâmetros de rugosidade superficial.	47
Figura 20 - Segmento destacado da amostra 1 de alumina sinterizada lapidada a 20 kPa (a), perfilometria do segmento destacado (b), parâmetros de rugosidade da perfilometria (c), e parâmetros de distribuição espacial (d).....	48
Figura 21 - Área da amostra 3 de alumina sinterizada lapidada a 25 kPa em imagem topográfica com graduação de picos e vales em cores e parâmetros de rugosidade superficial.	49
Figura 22 - Segmento destacado da amostra 3 de alumina sinterizada lapidada a 25 kPa (a), perfilometria do segmento destacado (b), parâmetros de rugosidade da perfilometria (c), e parâmetros de distribuição espacial (d).....	49
Figura 23 - Área da amostra 3 de alumina sinterizada lapidada a 25 kPa em imagem topográfica com graduação de picos e vales em cores e parâmetros de rugosidade superficial.	50
Figura 24 - Segmento destacado da amostra 3 de alumina sinterizada lapidada a 25 kPa (a), perfilometria do segmento destacado (b), parâmetros de rugosidade da perfilometria (c), e parâmetros de distribuição espacial (d).....	51
Figura 25 - Perfis e parâmetros de rugosidade: (a) alumina sinterizada, (b e c) alumina lapidada por 30 minutos com 1 g diamante monocristalino com diâmetro médio de 54 μm , rotação do porta-peça (Np) e do lapidador (NI) de 100 rpm e água destilada como veículo de lapidação.....	53

Figura 26 - Valores da rugosidade média aritmética para cada pressão em função do tempo de lapidação.....	54
Figura 27 - Valores da rugosidade média quadrática para cada pressão em função do tempo de lapidação.....	55
Figura 28 - Valores da rugosidade total para cada pressão em função do tempo de lapidação.	56
Figura 29 - Valores da rugosidade skewness para cada pressão em função do tempo de lapidação.....	56
Figura 30 - Valores da rugosidade kurtosis para cada pressão em função do tempo de lapidação.....	57
Figura 31 - Valores da rugosidade total para cada pressão em função do tempo de lapidação.	58
Figura 32 - Valores da rugosidade altura máxima de pico para cada pressão em função do tempo de lapidação.	58
Figura 33 - Valores da rugosidade máxima profundidade de vales para cada pressão em função do tempo de lapidação.	59
Figura 34 - Variação da espessura de cada amostra por tempo de lapidação.	61
Figura 35 - Taxa de remoção de material (TRM) em g/minuto em função do tempo e pressão de lapidação.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros experimentais de lapidação adotados por autores em diferentes décadas.	26
Tabela 2 - Propriedades e processos de fabricação das amostras de alumina sinterizada.	34
Tabela 3 - Procedimento experimental da lapidação plana com cinemática cicloidal com lapidador maleável em alumina sinterizada.	38
Tabela 4 - Resumo dos parâmetros de rugosidade para diferentes pressões e capacidade do processo por pressão.	60
Tabela 5 - Medições das variações de espessura para cada nível de pressão e variação total..	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNC	Controle numérico computadorizado
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
EA	Emissão Acústica
EVA	Etileno vinil acetato
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
FEB	Faculdade de Engenharia de Bauru
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LUA	Laboratório de Usinagem por Abrasão
NBR	Normas Brasileiras
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
PVD	Deposição física à vapor
PMC	Perfilometria confocal
TRM	Taxa de Remoção de Material
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UNESP	Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

LISTA DE SÍMBOLO

Al_2O_3	Óxido de alumínio	(-)
$[\text{Al}_2(\text{OH})_3]$	Hidróxido de alumínio	(-)
b	Constante de microidentação	(-)
dc	Profundidade crítica de corte	(μm)
E	Módulo de elasticidade	(N/m^2)
e	Espessura	(mm)
g	Grama	(g)
H	Dureza	(Pa)
k	Constante empírica	(-)
K_c	Tenacidade à fratura	($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)
kHz	Frequência elétrica	(kHz)
kPa	KiloPascal	(10^3N/m^2)
min	Minuto	(min)
mL	Mililitros	(mL)
mm	Milímetro	(mm)
mm/min	Milímetro por minuto	(mm/min)
MPa	Mega Pascal	(N/mm^2)
N	Newton	(N)
Nl	Rotação do lapidador	(rpm)
Nli	Rotação do porta-lixo	(rpm)
Np	Rotação do porta-peças	(rpm)
p	Pressão de lapidação	(N/m^2)
P	Potência de corte	(W)
ρ	Densidade	(g/cm^3)
Ra	Rugosidade média aritmética	(μm)
Rku	Rugosidade de <i>kurtosis</i>	(-)
Rp	Rugosidade altura máxima de pico	(μm)
Rq	Rugosidade média quadrática	(μm)
rpm	Rotação por minuto	(rpm)
Rsk	Rugosidade de assimetria <i>skewness</i>	(-)

Rt	Rugosidade da altura total do perfil	(μm)
Rv	Rugosidade do vale mais profundo	(μm)
Rz	Rugosidade total	(μm)
s	Segundos	(s)
Sa	Rugosidade média aritmética superficial	(μm)
Sku	Rugosidade kurtosis	(-)
Sp	Rugosidade máximo pico	(μm)
Sq	Rugosidade média quadrática superficial	(μm)
Ssk	Rugosidade assimétrica superficial	(-)
St	Rugosidade total superficial	(μm)
Sv	Rugosidade vale superficial	(μm)
Sz	Rugosidade altura máxima superficial	(μm)
t	Tempo	(t)
TRM	Taxa de remoção de material	(g/min)
V	Volume de material removido	(m^3)
μ	Coefficiente de atrito	(-)
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius	($^{\circ}\text{C}$)
%	Porcentagem	(%)
μm	Micrometro	(μm)
$\varnothing$	Diâmetro	(mm)
W	Unidade de potência elétrica	(W)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivo geral.....	19
1.1.1 Objetivos específicos.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Cerâmica.....	21
2.1.1 Cerâmica avançada.....	21
2.1.1.1 Alumina.....	23
2.2 Lapidação	23
2.2.1 Aplicações.....	24
2.2.2 Caracterização	24
2.2.3 Parâmetros	25
2.3 Mecanismos de remoção	27
3 MATERIAL E MÉTODO	32
3.1 Máquina-ferramenta.....	32
3.2 Ferramenta de corte.....	33
3.3 Peças de trabalho	34
3.4 Porta peças	35
3.5 Ensaios experimentais.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5 CONCLUSÕES	64
SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS	66
REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a fabricação é caracterizada pela sua complexidade, pluralidade de disciplinas e crescente demanda de novas ferramentas e técnicas para a solução de difíceis problemas, assim, o principal desafio tecnológico da usinagem cerâmica é promover a remoção de material sem introduzir defeitos críticos que comprometerão o desempenho do componente (Fiocchi, 2014; França, 2005). O êxito da cerâmica na maior parte das aplicações não depende somente do projeto da peça e das propriedades do material, mas também da qualidade do produto em relação à usinagem, em termos de tensões residuais, acabamento superficial e em relação aos defeitos (Fujita, 2007).

As mesmas propriedades que fazem da cerâmica avançada um material desejado em diferentes aplicações industriais, também causam desafios significativos ao seu processamento, fazendo com que seja classificada como material de difícil usinagem (Bharathi *et al.*, 2021; Rakshit e Das, 2019) e que requer máquinas-ferramentas extremamente rígidas para suportar os esforços de corte e amortecer as vibrações (Brinksmeier *et al.*, 2010).

A usinagem é uma etapa muito importante na fabricação de componentes cerâmicos, já que tem a função de garantir com que a precisão dimensional e a qualidade superficial especificada em projeto sejam atingidas após a etapa de sinterização (Pawar *et al.*, 2015; Zhong, 2003). No entanto, para que isso ocorra, as cerâmicas devem ser usinadas sem geração de trincas e com danos subsuperficiais mínimos, o que pode tornar inviável o uso de métodos tradicionais de usinagem, geralmente associados a mecanismos de remoção frágil (Alao, 2024).

Durante a usinagem de materiais frágeis, os mecanismos de remoção podem ser divididos em dois grupos: frágil e dúctil. Em mecanismos frágeis, a remoção do material se dá através da propagação e intersecção de trincas, enquanto os mecanismos dúcteis produzem deformação plástica do material na forma de cavacos severamente cisalhados (Bifano *et al.*, 1991).

Esses dois mecanismos de remoção podem estar presentes na lapidação de materiais frágeis. A lapidação é considerada um processo de usinagem de precisão onde partículas abrasivas são misturadas com um fluido para formar uma lama. A ferramenta de corte é o lapidador e a lama abrasiva é aplicada na sua superfície superior, que está em contato com a superfície da peça a ser usinada. Os principais parâmetros do processo estão relacionados com o conteúdo da lama abrasiva, a carga aplicada na superfície da peça, a velocidade relativa e o padrão de movimento entre a peça e o lapidador, além das propriedades dos materiais e o tempo de lapidação e de aplicação - condições de uso da peça. (Chang *et al.*, 2000).

A condição do abrasivo na interface peça/lapidador define o regime de abrasão durante o processo, sendo que a abrasão dois corpos ocorre quando os abrasivos estão ancorados na superfície do lapidador, ou seja, deslizando sobre a superfície da peça, enquanto a abrasão três corpos ocorre quando os abrasivos ficam livres, podendo rolar ao longo da interface das superfícies da peça e do lapidador. O tipo de abrasão pode variar de acordo com a ductilidade e acabamento do lapidador, além da carga/pressão do processo. Ambos os tipos de abrasão podem gerar simultaneamente mecanismos de remoção frágil e/ou dúctil (Chang *et al.*, 2000; Touge e Matsuo, 1996; Fiocchi, 2014; Pyun *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2015).

A taxa de remoção de material (TRM), que define a produtividade do processo, aumenta com o incremento da carga aplicada e da velocidade do lapidador, mas diminui ao longo do tempo de processamento. Essa tendência, pode ser observada para os dois tipos de abrasão, com a abrasão dois corpos gerando maiores valores de TRM do que a abrasão três corpos. No entanto, a rugosidade das peças é menor para o mecanismo de abrasão três corpos (Kim *et al.*, 2015).

Muitas técnicas em processos abrasivos para obtenção de remoção dúctil em materiais frágeis foram desenvolvidas e estudadas ao longo do tempo, no entanto, a lapidação plana cicloidal possui pouco estudos relacionando os principais parâmetros do processo com o mecanismo de remoção em alumina sinterizada. Além disso, há demanda por otimização dos parâmetros de lapidação plana cicloidal para a alumina visando processo sustentável, com vistas a minimizar a introdução de defeitos.

Deste modo, este trabalho tem como objetivo principal analisar a influência da pressão na lapidação plana com cinemática cicloidal e lapidador de alumínio no mecanismo de remoção em alumina sinterizada. Assim, apontando direções que favoreçam o mecanismo de remoção dúctil, gerando superfície de alta qualidade por meio de processo ecologicamente correto (Verde), eficiente, determinístico e que minimize a indução de defeitos microestruturais que podem comprometer a aplicação da peça em condições estáticas e dinâmicas.

1.1 Objetivo geral

Descrever os mecanismos de remoção na alumina sinterizada por lapidação plana cicloidal com abrasivos de diamante, lapidador de alumínio e uso reduzido de água destilada como fluido de lapidação.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos compreendem a avaliação de dois níveis de pressão de lapidação sob os efeitos nos mecanismos de remoção, nos parâmetros de rugosidade, variação de espessura e na taxa de remoção de material com vistas a aplicação na fabricação de selos mecânicos e mancais hidrodinâmicos por meio de processo abrasivo sustentável com emprego de 25 mL de água destilada por 30 minutos de lapidação, sem uso de óleo ou fluido de corte em abundância, entregando peças limpas e acabadas que não demandam longa etapa subsequente de limpeza e descontaminação, resolvendo uma dor demandada por usuários da lapidação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que sustentam o presente trabalho, abordando os principais conceitos envolvidos no estudo. Dentre eles, destacam-se a lapidação plana com cinemática cicloidal aplicada à cerâmica avançada, os processos de abrasão de dois e três corpos, bem como os mecanismos de remoção.

2.1 Cerâmica

O termo cerâmica vem da palavra grega "Keramikos", que basicamente significa materiais queimados. Os produtos de cerâmica são feitos de argila por modelagem e aquecimento. A cerâmica tem uma longa história humana em todas as culturas, que remonta a milhares de anos. As cerâmicas são normalmente sólidos inorgânicos e não metálicos (preparados a partir de materiais em pó), tendo relativos pontos de fusão e que requerem alta temperatura para seu processamento e aplicações. Geralmente são compostos de diferentes elementos ou uma combinação deles, entre elementos metálicos e não metálicos que podem ser óxidos, carbonetos, boretos, silicetos. Suas ligações são totalmente iônicas ou a combinação de covalente e iônica (Ayode Otitoju *et al.*, 2020; Fantozzi, 2017).

Para (Boch e Niepce, 2007), definir o que significa o termo "cerâmica" não é simples, pois, não existe uma definição única com a qual todos concordem; existem, de fato, várias definições, dependendo do ponto de vista adotado. Podemos, portanto, considerar os pontos de vista de um historiador, de um cientista (físico, químico, etc.), de um engenheiro ou de um fabricante.

Ainda segundo os mesmos autores, (Boch e Niepce, 2007), materiais cerâmicos são materiais sintéticos, essencialmente compostos por fases inorgânicas iônica-covalente, não totalmente amorfa e, geralmente, consolidada pela sinterização a altas temperaturas de um compactado pulvorento moldado no formato do objeto desejado, o pó de partida sendo frequentemente preparado de rochas trituradas. Os pesquisadores também defendem que não é imperativo definir um limiar para a temperatura de sinterização.

2.1.1 Cerâmica avançada

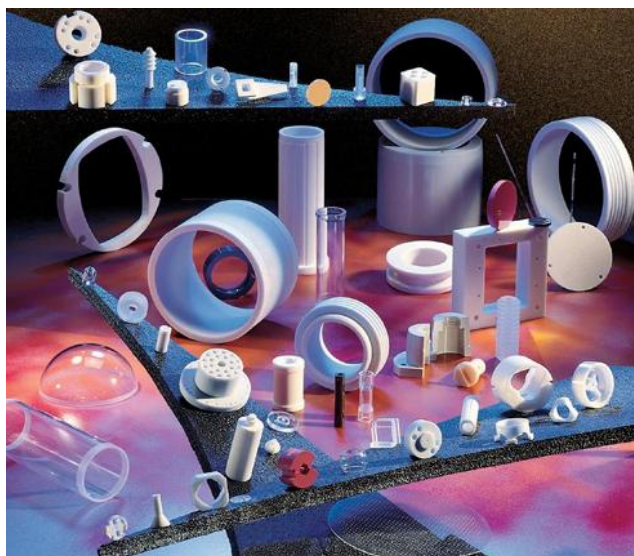
Existem dois tipos de cerâmicas reconhecidas como tradicional e avançada (Ayode Otitoju *et al.*, 2020).

As limitadas propriedades mecânicas da cerâmica tradicional restringem seriamente o desenvolvimento de materiais cerâmicos. Portanto, métodos para melhorar as propriedades mecânicas e funcionais dos materiais cerâmicos, aperfeiçoando suas propriedades inerentes e expandir seu escopo de aplicação, tornaram-se uma busca de longo prazo dos cientistas de materiais (Li *et al.*, 2024).

A cerâmica avançada também pode ser chamada de cerâmica de alto desempenho, cerâmica de alta tecnologia, cerâmica de engenharia, cerâmica fina e cerâmica técnica. São basicamente materiais cristalinos de composição rigorosamente controlada e fabricados com padrão detalhado a partir de matérias-primas de alta pureza e/ou características que conferem atributos precisamente especificados. A cerâmica, em comparação com outros materiais, apresenta várias propriedades interessantes, incluindo isolamento térmico, menor massa, alta área de superfície específica e resistência ao choque térmico (Ayode Otitoju *et al.*, 2020).

São classificados, de acordo com suas funções e aplicações, em: eletroeletrônicos, magnéticos, ópticos, químicos, térmicos, mecânicos, biológicos e nucleares. Os produtos deste segmento são de uso intenso e a cada dia tendem a se ampliar. Dentre outros, ressaltam-se componentes para naves espaciais, satélites, usinas nucleares, implantes ortopédicos e odontológicos, aparelhos de som e de vídeo, suporte de catalisadores para automóveis, sensores (umidade, gases e outros), ferramentas de corte, brinquedos e acendedor de fogão, motores cerâmicos, (Zanotto e Migliore, 1991; Chevalier *et al.*, 2007), selos mecânicos, válvulas misturadoras, bicos de pulverização, pistas e elementos rolantes de rolamentos, trefilas e lentes são exemplos de produtos mostrados na Figura 1.

Figura 1 - Peças de cerâmica avançadas em diversas áreas de aplicações.



Fonte: Inasaki, 2013.

2.1.1.1 Alumina

Os materiais à base de alumina são materiais indispensáveis para a indústria moderna (Sun *et al.*, 2025). A produção mundial de óxido de alumínio (Al_2O_3) ou alumina, está principalmente relacionada à extração do minério bauxita, submetido ao processo Bayer com três etapas (extração, acumulação e calcinação), sendo sua meta a produção de hidróxido de alumínio [$\text{Al}(\text{OH})_3$] e alumina (Al_2O_3) (Al-Moameri *et al.*, 2020; Kar *et al.*, 2020). Os materiais à base de alumina possuem excepcionais propriedades, alta resistência mecânica, resistência à corrosão, inércia química e excelente estabilidade térmica. São usados em uma ampla gama de aplicações como manufatura avançada, aeroespacial, automotiva, eletrônica, fornos industriais e biomédicas. Nesta última área, a sua biocompatibilidade e porosidade favorecem seu uso em sistemas de liberação controlada de fármacos e próteses ortopédicas (Abyzov, 2019; Pourmadadi *et al.*, 2022).

Além disso, as cerâmicas de alumina são usadas para componentes em ambientes agressivos, incluindo turbinas a gás e componentes automotivos, devido ao seu alto ponto de fusão (acima de 2000 °C) e resistência a choques térmicos (Sun *et al.*, 2025).

2.2 Lapidação

O processo de lapidação é uma técnica de usinagem por abrasão utilizada para melhorar a planeza, a rugosidade e controle dimensional de peças (Deng J. *et al.*, 2021). O processo envolve grãos abrasivos soltos e misturados em uma suspensão líquida (veículo) para formar uma lama que sob pressão, atritam na interface da peça contra um lapidador devido ao movimento rotacional (Marinescu, 2007; Chang *et al.*, 2000). A lapidação pode também empregar abrasivos fixos, promovendo remoção da camada de danos superficiais depois da retificação e controlando o dano subsuperficial reduzindo tempo e custo de usinagem (Bin L. *et al.*, 2022).

Por (Deng J. *et al.*, 2021) a interação entre lapidador (com seus tipos e durezas) e abrasivos (com seus tamanhos) empregados no processo de lapidação tem influência nas variações de espessuras, na taxa de remoção de material e no acabamento superficial. Frequentemente, o lapidador é de ferro fundido, mas outros materiais, como aço inoxidável, cobre, estanho ou até mesmo polímeros podem ser usados (Deng J. *et al.*, 2021; Zhao T. *et al.*, 2025).

2.2.1 Aplicações

A lapidação tem sido empregada como uma das tecnologias de acabamento mais amplamente utilizadas para obter superfícies de alta qualidade não apenas em materiais dúcteis, como metais, mas também em materiais duros e frágeis como cerâmicas e vidros (Marinescu *et al.*, 2015). Motivada pelos exigentes requisitos de desempenho dos produtos, a necessidade de superfícies ultralisas com alta integridade superficial usinada tem se tornado cada vez mais evidente para diversos produtos de alto valor, incluindo lentes optoeletrônicas, *wafers* de circuitos eletrônicos integrados e células solares fotovoltaicas (Li *et al.*, 2017; Hao e Dragos, 2016)

Wafers de silício aplicados na área eletrônica são “fatiados” com fio impregnados com diamante este procedimento causa grandes danos na superfície dos *wafers* com formas onduladas, sendo necessária sua remoção. Portanto a lapidação confere alto acabamento sem danos superficiais, necessário para aplicação destes *wafers*. O processo também confere a geometria requerida eliminando variações de espessuras além de minimizar o tempo de polimento (Savaz, 2017).

Exemplos típicos da vasta gama de componentes processados incluem peças de bomba (superfícies de vedação, fundições de corpo, válvulas rotativas, impulsores), equipamentos de transmissão (espaçadores, engrenagens, calços, pratos de embreagem), componentes internos que variam de pequenas arruelas de vedação a superfícies de cabeçote de cilindro em motores de combustão, ferramentas de corte (pontas de ferramentas, lâminas), hidráulica e pneumática (placas de válvula, vedantes, corpos de cilindro, fundições, placas deslizantes), peças aeroespaciais (placas de bloqueio, componentes de giroscópio, vedantes), equipamentos de inspeção (blocos de teste, bigornas de micrômetro, superfícies ópticas, placas de superfície), estampagem e forjamento (espaçadores, martelos de tipo, *bosses* e uma variedade de outras formas complexas) (Marinescu, 2007).

2.2.2 Caracterização

As seguintes características do lapidamento devem ser enfatizadas: Processo relativamente fácil de ser realizado. Dificilmente há restrições quanto ao material e ao tamanho da peça de trabalho assim quase todos os materiais sólidos, como metais e materiais não metálicos, podem ser processados. Superfícies usinadas não têm marcas direcionais (aleatorização) da usinagem devido à movimentos cicloidais entre peça e ferramenta.

Superfícies lapidadas apresentam propriedades que são independentes da direção. Como o processamento avança com a micro-ação dos abrasivos, a eficiência do processamento é geralmente baixa. A eficiência do processamento é tão baixa que é possível aproximar-se gradualmente do nível de precisão desejado, o que proporciona uma grande vantagem para o processamento de alta precisão. As peças de trabalho são acopladas sem tensão, portanto, os custos com dispositivos são muito baixos. Não é necessária uma máquina de processamento altamente sofisticada. Os tempos de troca são muito curtos. Durante o lapidamento, as temperaturas e forças de usinagem são baixas. Assim, não há distorção por calor ou tensão no caso de superfícies lapidadas. Apenas geometrias simples podem ser lapidadas. O controle da lama é complicado devido a alguns problemas, como respingos e acúmulo de cavacos na lama. Há um alto consumo de grãos durante o lapidamento (Marinescu, 2015).

2.2.3 Parâmetros

Na lapidação existem vários parâmetros como: velocidade ou rotação (lapidador e peça), sentido de rotação, pressão do processo, cinemática da lapidação, tipo de lapidação - plana (simples ou dupla face) e outras, abrasivos (tipo, tamanho e estrutura), fluido transportador (se lubrificante e/ou refrigerante), razão (fluido e abrasivo), taxa de aplicação do fluido, tempo de lapidação, material do lapidador (com ou sem texturização) e composição da peça lapidada. A seguir são apresentados as definições dos principais parâmetros de lapidação por alguns autores.

Para (Marinescu, 2007) o processo de lapidação é um resultado da interação entre atrito rotacional, velocidade, carga, adição de grãos abrasivos e fluido. Segundo (Savaz, 2017) a lapidação tem cinco principais parâmetros que afetam a qualidade superficial, velocidade relativa e sentidos de rotação, tempo de lapidação, pressão de lapidação, razão (volumétrica ou mássica) do fluido e abrasivo com uniformidade na mistura, tamanho do abrasivo. Por (Chang, 2000) os principais parâmetros do processo de lapidação estão no conteúdo da lama (*slurry*) por exemplo: material abrasivo, tamanho médio do abrasivo, fluido transportador com propriedades físicas e químicas, uniformidade da mistura e razão de mistura, a carga na superfície da peça, velocidade relativa e sentido de rotação entre lapidador e peças, e propriedades do lapidador e peças.

Dentre os parâmetros mencionados, a pressão aplicada durante o processo de lapidação é um dos fatores mais críticos para determinar a eficiência, a qualidade do acabamento superficial e a uniformidade do desgaste tanto da peça quanto da ferramenta. Pressões mais altas tendem a

aumentar a taxa de remoção de material, mas também podem causar aumento da rugosidade superficial, surgimento de riscos profundos e desgaste acelerado da ferramenta, prejudicando o acabamento e a vida útil do equipamento; por outro lado, pressões muito baixas podem resultar em remoção insuficiente de material e baixa eficiência do processo (Ablyaz, *et al.*, 2020; Abu, *et al.*, 2018; Deng, J., *et al.*, 2021)

O ancoramento dos abrasivos e pressão foi observado por (Deng, J., *et al.*, 2021) a medida que a pressão normal de lapidação aumenta, a força entre o abrasivo, o substrato e a placa de lapidação também aumentam a profundidade do abrasivo único embutido na superfície da placa de lapidação avança gradualmente.

Ainda sobre a pressão é evidente sua importância evidente também na equação de Preston (1), como uma das variáveis de lapidação que influenciam num trabalho de precisão. São eles: Volume de material removido (V), k : constante empírica, relativa ao material e condições da lapidação, velocidade relativa lapidador/peça (v), pressão aplicada (p) e ao tempo de lapidação (t), conforme a seguir:

$$\text{Equação: } V = k \cdot v \cdot p \cdot t \quad (1)$$

Em compilação ao que foi mencionado, os principais parâmetros de lapidação são organizados e apresentados, na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Parâmetros experimentais de lapidação adotados por autores em diferentes décadas.

		Autor, Ano			
		Touge e Matsuo, 1996	Gatzen, 1997	Kim, 2015	Savaz, 2017
Parâmetros	Velocidade	90 rpm (lapidador) 60 rpm (peça)	não informado	10 e 50 rpm (lapidador)	25, 50, 70 rpm
	Pressão	42,7 e 90,5 kPa	520 kPa	19,61 e 58,84 kPa	20,25,30,35 e 50 kPa
	Abrasivo	0,5 e 2,0 μm (diamante)	0,5 e 3 μm (diamante) mono e policristalino	3 μm (diamante ¹) 25 μm (alumina ²) ¹ Abrasão 3 corpos ² Abrasão 2 corpos	3 μm (alumina)
	Fluido	não informado	70 % água destilada 20 % Etilenoglicol 10 % etanol	¹ Trietanolamina (dispersante)	90,5 % água deionizada
	Tempo	3 minutos	não informado	1 a 5 minutos	60 minutos

Fonte: Autor Adaptado de (Touge e Matsuo, 1996; Gatzen, 1997; Kim, *et al.*, 2015; Savaz, 2017).

Na lapidação a máquina ferramenta através de um sistema planetário produz movimento complexo entre lapidador e a peça descrevendo trajetórias de modo aleatório (Marinescu 2007). Para (Sanchez *et al.*, 2011) uma das características marcantes da lapidação é sua rotação relativa entre lapidador e peça por resultar em complexas e densas trajetórias de remoção. A cinemática no processo de lapidação refere-se aos tipos e modos de movimento relativos entre a peça, a ferramenta (lapidador) e, em alguns casos, anéis condicionadores, sendo todos determinantes para a uniformidade, eficiência e qualidade do acabamento superficial. Combinações de diferentes configurações cinemáticas, como movimentos de oscilação, rotação simples ou combinada, e trajetórias controladas de abrasivos, influenciam diretamente a distribuição do desbaste, a taxa de remoção de material e a regularidade do perfil superficial da peça (Liu, *et al.*, 2024; Barylski e Piotrowski, 2018).

A escolha dos parâmetros cinemáticos, como velocidades ou rotações relativas, razão de rotação entre anéis e lapidador, e padrões geométricos dos abrasivos, permite otimizar a densidade e a distribuição das trajetórias, reduzindo variações de espessura e rugosidade (Barylski e Piotrowski, 2018; Yuan, J *et al.*, 2015; Zhu, J. *et al.*, 2024).

2.3 Mecanismos de remoção

Desbaste abrasivo pode ser definido como um processo no qual um corpo rígido com aresta de corte (abrasivo) desliza por uma superfície de outro corpo (peça) com menor dureza sob uma carga, penetrando e removendo material promovendo ranhuras ou sulcos no corpo de menor dureza (Gates J., 1998).

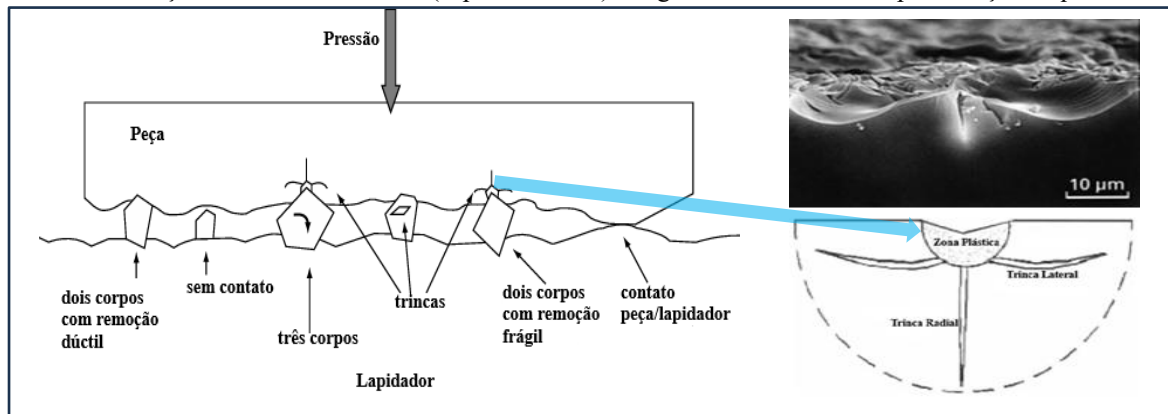
No processo de lapidação, os mecanismos de remoção de material podem ser classificados como abrasão de dois corpos ou de três corpos, e a diferença fundamental está na interação entre abrasivo, peça e ferramenta. Na abrasão de dois corpos, os abrasivos estão fixos (ancorados) na superfície da ferramenta ou do disco de lapidação, de modo que o contato ocorre diretamente entre o abrasivo e a peça, proporcionando maior controle, taxas de remoção mais altas, melhor acabamento superficial e menor dano subsuperficial, especialmente em materiais duros e frágeis como safira ou cerâmica avançada. (Gagliardi, J., 2013; Kim, *et al.*, 2015; Chen, J., e Peng, Y., 2023).

Por outro lado na abrasão de três corpos, os abrasivos estão soltos em uma pasta ou suspensão (fluido abrasivo) entre a ferramenta e a peça, rolando ou deslizando livremente, o que resulta em remoção menos controlada, maior rugosidade e mais danos subsuperficiais devido à formação de trincas e pits (“marcas/identações”) por fratura frágil (Kim, *et al.*, 2015;

Chang *et al.*, 2000; Buijs, 1993)

Desenho esquemático de abrasão dois e três corpos e imagem MEV de remoção frágil por ensaio de indentação em corte transversal são apresentados na figura 2 a seguir:

Figura 2 - Secção transversal do processo abrasão dois e três corpos em detalhes à esquerda, e imagem de ensaio de micro indentação em corte transversal (superior direita) e seguido abaixo de sua representação esquemática.



Fonte: Autor adaptado de (Marinescu, 2007; Slikkerveer *et al.*, 2000).

No processo de lapidação plana, a remoção de material envolve a interação entre partículas abrasivas e a superfície da peça podendo ocorrer em dois, modos ou regimes, principais: dúctil (plástico) e frágil (quebradiço), resultados estes, que dependem das propriedades do material e das condições de lapidação (Evans, *et al.*, 2003; Chang, *et al.*, 2000).

A principal premissa estabelece que a remoção de material em cerâmicas frágeis pode ocorrer por meio de um mecanismo dúctil-frágil, desde que sejam respeitadas certas condições. Para isso, o processo que inicia na superfície do material ($h = 0$) deve atingir uma profundidade de corte menor que um valor crítico, chamado de espessura crítica (h_c). Quando a profundidade de corte se mantém menor que esse limite crítico, a energia necessária para propagar trincas supera a energia exigida para a deformação plástica. Nessa condição, o material é removido predominantemente por deformação plástica, caracterizando o chamado modo dúctil de usinagem, mesmo em materiais considerados frágeis. Por outro lado se a profundidade de corte excede a espessura crítica, a remoção transita de dúctil transita para modo frágil, promovendo trincas na peça de trabalho (Antwi *et al.*, 2018; Fang e Cheng, 2000).

Uma representação esquemática dos modos de remoções e suas respectivas imagens seguem abaixo na figura 3:

Figura 3 - (a) modo dúctil: 1 abrasivo (direção e sentido), 2 cavaco modo dúctil, 3 região plástica, 4 espessura removida. (b) 1 abrasivo (direção e sentido), 5 cavaco modo frágil, 6 microtrincas, 5 a 10 μm profundidade dos danos subsuperficiais.



Fonte: Antwi *et al.*, 2018.

Na Figura 3(a) quando a penetração do abrasivo é menor que a profundidade crítica de corte, o material é removido por deformação plástica (modo dúctil); acima desse valor, predominam fraturas com propagações de trincas e lascamentos (modo frágil) conforme Figura 3(b).

A profundidade crítica de corte proposta que não deve ser ultrapassada do modo dúctil em materiais quebradiços foi investigada mais a fundo por (Bifano *et al.*, 1991). A equação clássica para a espessura crítica de corte (d_c ou h_c) que pode ser expressa como:

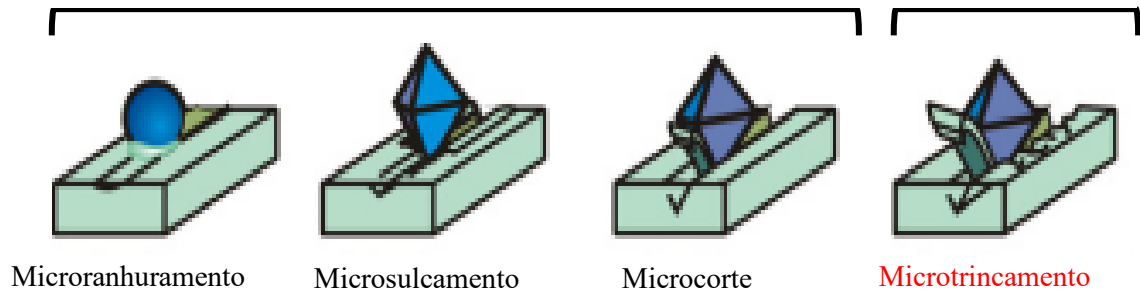
$$\text{Equação: } d_c = b \cdot \left(\frac{E}{H} \right) \cdot \left(\frac{K_c}{H} \right)^2 \quad (2)$$

onde; d_c ou h_c é a profundidade crítica de indentação, E é o módulo de elasticidade, K_c é a energia de fratura do material ou a tenacidade à fratura, e H é a dureza. H sendo a dureza, e b uma constante, cujo valor advém da correlação entre o d_c medido a partir de testes de microindentação baseados em 10 % de fratura superficial.

O atrito ocorre na fase inicial da interação entre a abrasão e a peça de trabalho em uma região muito pequena, incluindo apenas a deformação elástica na peça de trabalho. Enquanto a fase de microsulcamento começa com o aumento da penetração do abrasivo na peça, onde estão presentes ambos os regimes, elástico e plástico. Com o contínuo aumento da tensão de cisalhamento no material o processo passa para chamada fase de corte e posteriormente para ruptura na forma de remoção de lascas. Toda transição do processo depende do incremento de penetração e da interação do abrasivo com o material da peça. Os três tipos de remoções dúcteis podem ser aplicados para todos os materiais (Tahsin e Chen, 2012). Na figura 4 é apresentado

esquemáticamente estas variações dos mecanismos de remoção dúcteis e frágil.

Figura 4 - Modo dúctil com três mecanismos de remoção (da esquerda para direita) e modo frágil com propagação de trincas (último à direita).



Fonte: Autor adaptado Brinksmeier (2010).

No micro ranhuramento quando o abrasivo desliza na superfície da peça, parte do material que segue à frente é deslocado para as laterais gerando pequenas elevações de borda. Todavia, a profundidade do abrasivo e também o tamanho de grão provocam a transição dúctil-frágil, ou seja, a medida que o tamanho e profundidade do grão aumentam, o tamanho do defeito crítico também aumenta proporcionalmente, levando assim à tendência para fratura frágil e consequente subtração de material (Subhash e Klecka, 2007).

Microsulcamento consiste em o abrasivo provocar deformações plásticas pelo seu deslizamento, deslocando material para as laterais e, promovendo maiores elevações de bordas. Nas peças os danos devido ao engajamento dos grãos na lapidação aumenta com o uso de abrasivos de mais duros e com bordas afiadas. A razão é a ancoragem temporária dos grãos duros, afiados e, na maioria das vezes (Marinescu, 2007; Mulhearn e Samuels, 1962)

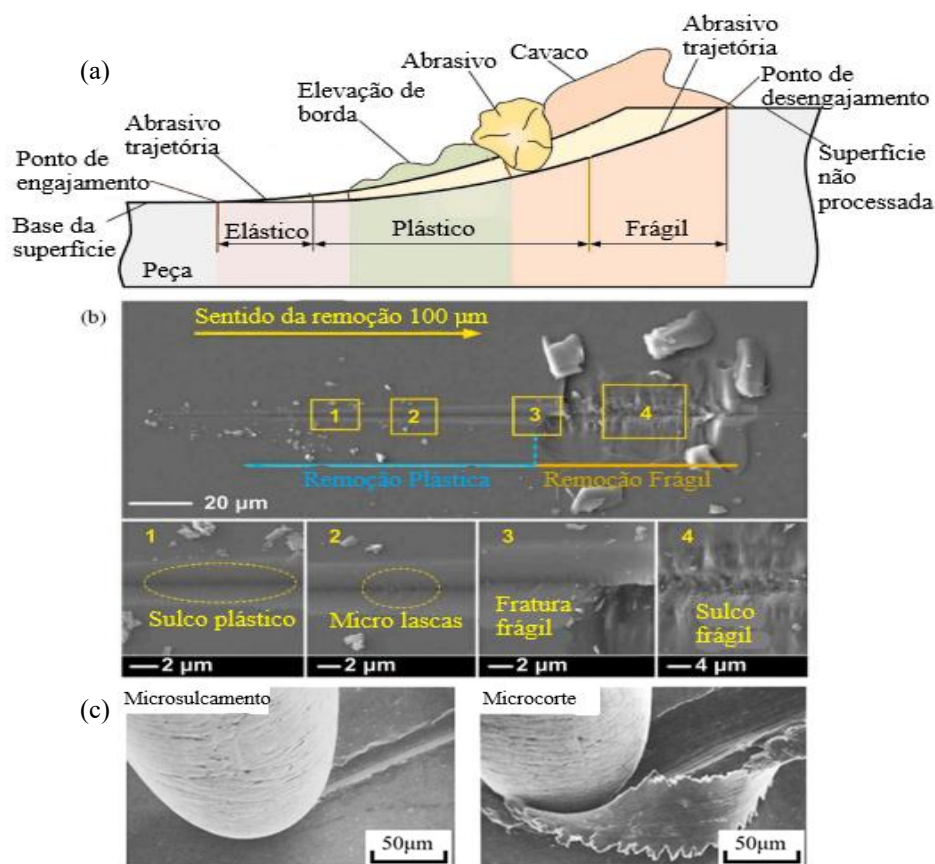
O microcorte, por sua vez é caracterizado pela formação de cavaco com volume muito próximo ao do sulco gerado. O micro-corte no processo de lapidação é fundamental para a eficiência e qualidade do acabamento de materiais duros e frágeis, abrasivos diamantados aglomerados em pastilhas fixas, que apresentam excelente capacidade de micro-corte, resultando em maior taxa de remoção de material e estabilidade do processo, além de reduzir danos superficiais. (Fiocchi, 2014; Wang, *et al.*, 2021).

Os mecanismos de remoção e formação de microtrincas no processo de lapidação ocorrem quando altos níveis de tensão são impostos a superfícies de materiais frágeis principalmente devido aos fatores como pressão aplicada e tamanho das partículas abrasivas. Nessa interação surgem as trincas e o destacamento de fragmentos maiores que a dimensão do próprio evento. O microtrincamento ocorre quando altos níveis de tensão são impostos a superfícies de materiais frágeis. Nessa interação ocorre o destacamento de fragmentos maiores

que a dimensão do próprio evento. Isso se deve a formação e a propagação de trincas durante o processo. Esse mecanismo é típico de condições frágeis de desgaste (Sedriks e Mulhearn, 1963; Zum G, 1987; Nannan, 2020; Peng e Chen 2023).

Os modos de remoção, e segundo cada tipo, apresentam diversas etapas conforme o engajamento e características do abrasivo e as condições do processo. As etapas dos micro mecanismos em modo dúctil e frágil são apresentados no esquema ilustrado por imagens de microscopia eletrônica por varredura, conforme a figura 5:

Figura 5 - Esquema das etapas dos micro mecanismos em modo dúctil e frágil (a) e ilustração por imagens de microscopia eletrônica por varredura (b) (c).



Fonte: Autor adaptado (Li, C. *et al.*, 2022; Kovalchenko e Milman, 2014).

Com auxílio da Figura 5(a) a trajetória do abrasivo engajado inicia com efeito elástico na superfície da peça conforme sua profundidade aumenta ocorre a transição para fase plástica com elevações de bordas típicas do micro ranhuramento e micro sulcamento. Posteriormente, entre as fases plástica e frágil tem-se o micro corte decorrente do cisalhamento do material. Os efeitos de micro sulcamento e micro corte são representados na Figura 5(c).

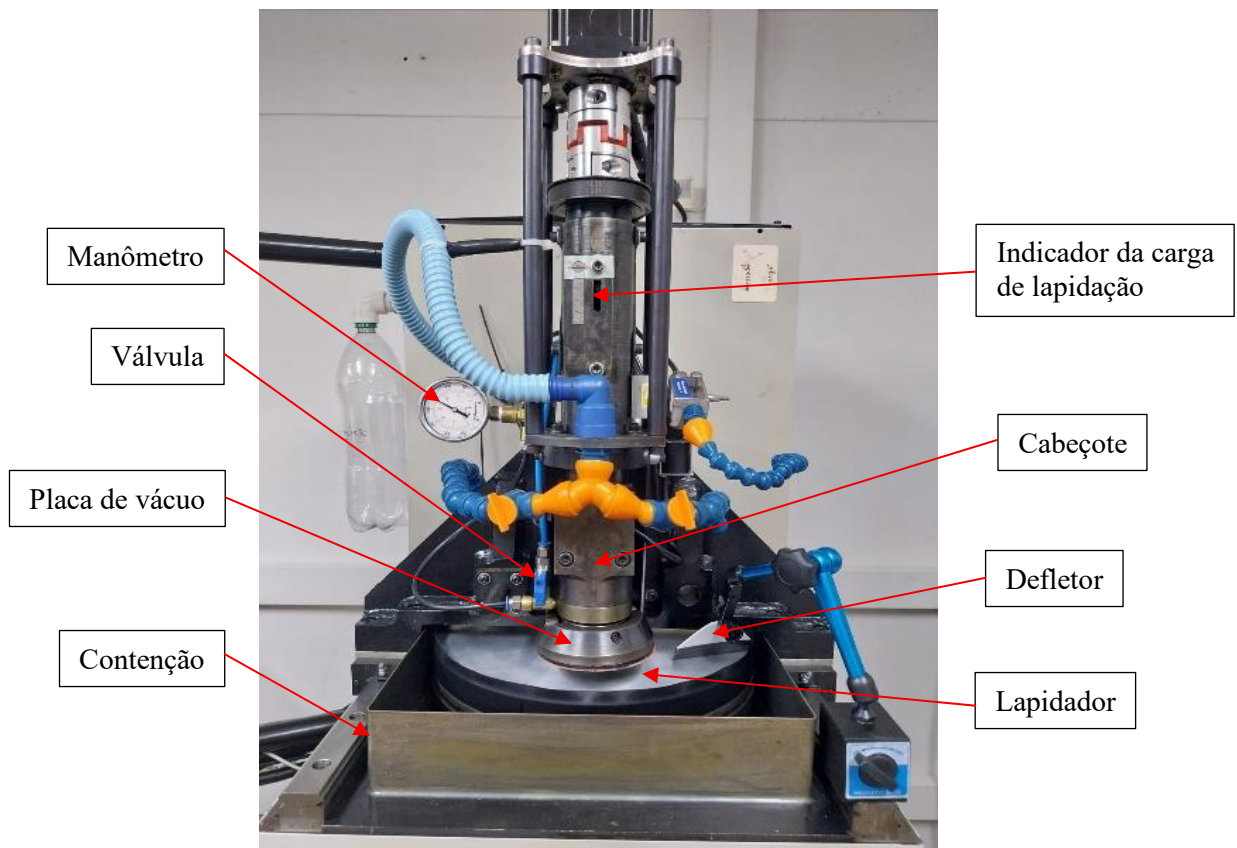
3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 Máquina-ferramenta

Quanto ao uso da máquina-ferramenta, lapidorretificadora Fiocchi (Fiocchi, 2010; Fiocchi, 2014; Fiocchi *et al.*, 2015; Fiocchi *et al.*, 2016) empregada nesta pesquisa. Possui configuração de lapidadora CNC, estrutura de aço ABNT 1020, guias lineares de esferas recirculantes, fusos de esferas recirculantes, monitoramento embarcado da potência de usinagem e dressagem, destaca-se sua capacidade de usinar peças cerâmicas precisas mesmo sem possuir elevada rigidez estrutural.

A lapidorretificadora foi empregada em ensaios exploratórios de lapidação de alumina sinterizada para avaliar o mecanismo de transição dúctil-frágil com foco na futura otimização do processo abrasivo para remoção predominantemente em modo dúctil. Na Figura 6 segue imagem da máquina-ferramenta utilizada nos experimentos.

Figura 6 - Lapidorretificadora com lapidador em sua base e lixa acoplada por sistema a vacuo, imagem realizada após processo de texturização.



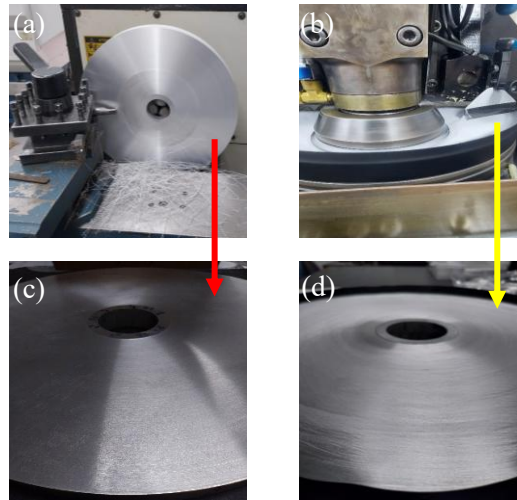
Fonte: Autor

3.2 Ferramenta de corte

O material do lapidador escolhido foi o alumínio comercial 5052F com diâmetro de 340 mm e espessura de 25,4 mm, com o objetivo de promover o ancoramento mecânico dos abrasivos com vistas a abrasão dois corpos e mecanismo de remoção dúctil por microcorte. O alumínio possui dureza e maleabilidade adequadas para deformar plasticamente e ancorar os abrasivos sob carga de compressão. Os abrasivos utilizados foram grãos de diamante monocristalino com diâmetro médio ($\varnothing_{\text{médio}} = 54 \mu\text{m}$).

As superfícies planas do lapidador foram previamente faceadas no torno para correção dos desvios de planeza e rugosidade bem como para remover macros defeitos (processo realizado no Laboratório de Usinagem a Abrasão -LUA, campus UNESP-Bauru). O lapidador foi montado no flange base da lapidorretificadora e em cima de um disco de EVA de 5 mm para compensar desvios geométricos neste acoplamento mecânico e minimizar vibração. Na borda do lapidador foi fixada uma barreira de contenção para restringir o veículo, abrasivos e cavacos, evitando, conseqüentemente, que eles fossem expulsos com a rotação do lapidador. A lama gerada no processo foi, portanto, contida e constantemente redirecionada da borda do lapidador/contenção para a interface peça-lapidador por meio de um anteparo/defletor. O processo foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa, o lapidador foi texturizado na lapidorretificadora utilizando uma lixa de SiC de #100 colada a um disco plano de vidro que, por sua vez, foi acoplado ao cabeçote por meio da placa de vácuo autocompensadora (Fiocchi, 2014; Fiocchi *et al.*, 2016) realizado no laboratório de metrologia do campus UFU-Uberlândia. Para a texturização, a rotação do lapidador (Nl) e do porta-lixas (Nli) foram iguais a 100 rpm, a carga de lixamento de 50 N, o tempo de condicionamento de 30 s e 10 mL de água destilada como fluido de corte aplicada homogeneamente sobre o lapidador antes da texturização. O condicionamento objetivou alterar a textura do lapidador, adicionando riscos/sulcos em direções aleatórias com geometrias adequadas para suscitar o alojamento e o ancoramento mecânico dos abrasivos por deformação plástica do lapidador sob carga de compressão da lapidação, favorecendo, portanto, a abrasão dois corpos. Nas imagens a seguir são apresentadas os processo de torneamento e texturização do lapidador conforme a Figura 7.

Figura 7 - Lapidador durante processo de torneamento (a) e lapidador torneado (c), lapidador durante processo de texturização (b) e lapidador texturizado (d).



Fonte: Autor.

3.3 Peças de trabalho

As amostras (peças de trabalho) de alumina sinterizada utilizadas neste estudo, suas propriedades e processo de fabricação, são apresentadas na Tabela 2.

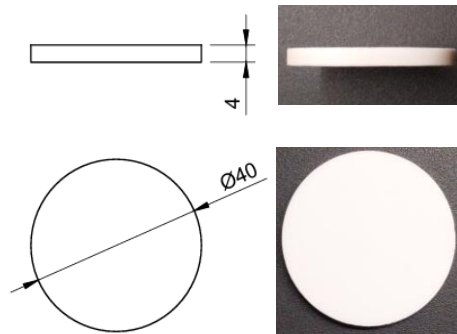
Tabela 2 - Propriedades e processos de fabricação das amostras de alumina sinterizada.

Material	Marca Modelo	Pureza	Dimensões da partícula	Densidade	Compactação	Sinterização
Al ₂ O ₃ em pó	Almatis A1000-SG	99,8 %	Diâmetro médio 0,4 µm Área superficial 7,7 mm ² /g	ρ_{real} 3,99 g/cm ³	80 MPa Prensagem Uniaxial de Simples ação	1600 °C por 2 horas

Fonte: Autor adaptado de Bukvic (2015).

O resultado do processo de fabricação das amostras mencionadas é representado na Figura 8 a seguir.

Figura 8 - Desenho técnico, vista superior com cota do diâmetro e frontal com espessura ambos em (mm) à esquerda e fotos da amostra de peça alumina sinterizada sem lapidação à direita.



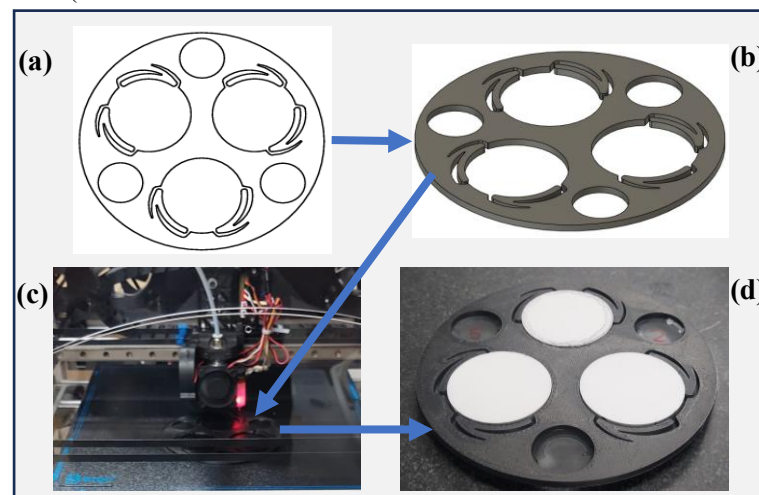
Fonte: Autor.

Todas as amostras utilizadas nos ensaios experimentais do trabalho possuem as seguintes dimensões: Diâmetro médio, $\varnothing_{\text{médio}} = 40 \pm 0,2 \text{ mm}$ e Espessura, $e_{\text{média}} = 4 \pm 0,1 \text{ mm}$.

3.4 Porta peças

Nos ensaios subsequentes de lapidação, três amostras de alumina foram previamente fixadas em um dispositivo mecânico complacente de termoplástico ABS especialmente projetado e fabricado por manufatura aditiva. Este, por sua vez, foi colado a um disco de vidro e preso na placa de vácuo da lapidorretificadora antes de cada ensaio de lapidação. O dispositivo possui diâmetro de 120 mm, espessura de 3,0 mm e capacidade para alojar até três peças com diâmetro de $40 \pm 0,5 \text{ mm}$. A rotação do porta-peça (N_p) e N_l foram de 100 rpm na lapidação.

Figura 9 - Desenho do porta-peças em vista superior (a) e perspectiva isométrica (b), fabricação por manufatura aditiva do porta-peças (c), porta-peças de termoplástico ABS (cor preta) com dispositivo mecânico complacente e três amostras de alumina (cor branca).



Fonte: Autor

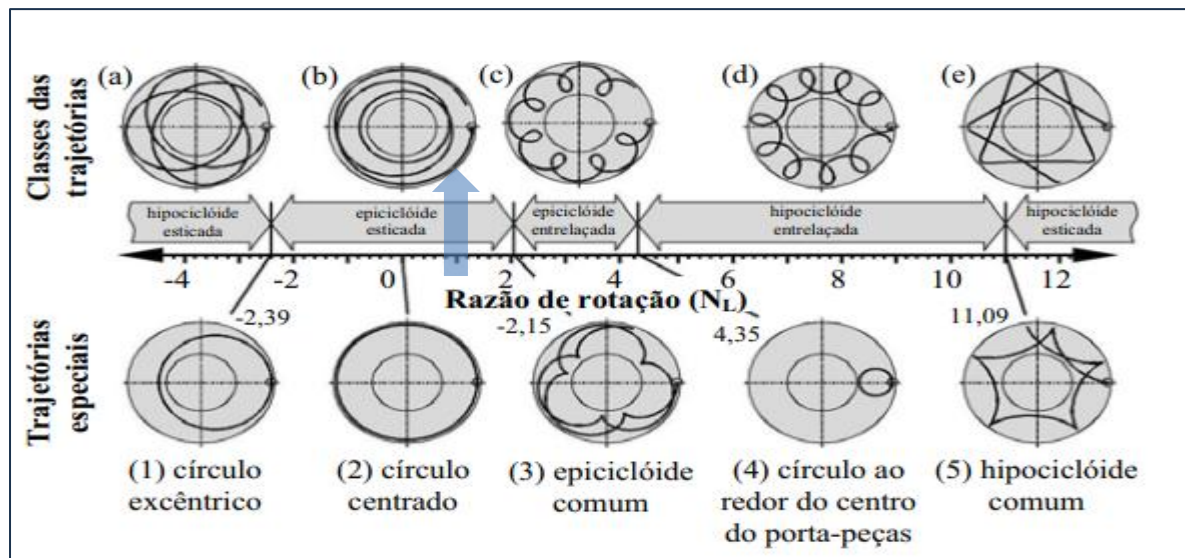
3.5 Ensaios experimentais

Para iniciar os ensaios foi necessário a prévia texturização do lapidador. Esta etapa e todos ensaios experimentais tiveram suas trajetórias cicloidais classificadas utilizando a razão de rotações entre o porta peças/lixa e lapidador, descrita pela equação 3:

$$\text{Equação: } N = \frac{N_{\text{peças/lixa}}}{N_{\text{lapidador}}} = \frac{100 \text{ rpm}}{100 \text{ rpm}} = 1 \quad (3)$$

Com a razão de rotações, a classe de trajetória foi determinada na figura 10 a seguir:

Figura 10 - Tipos de trajetórias produzidas pela Dualap ZL 700 da Stähli Läpptechnik GmbH, e indicação da classe de trajetória, utilizada em todo o trabalho, pela seta azul na vertical.

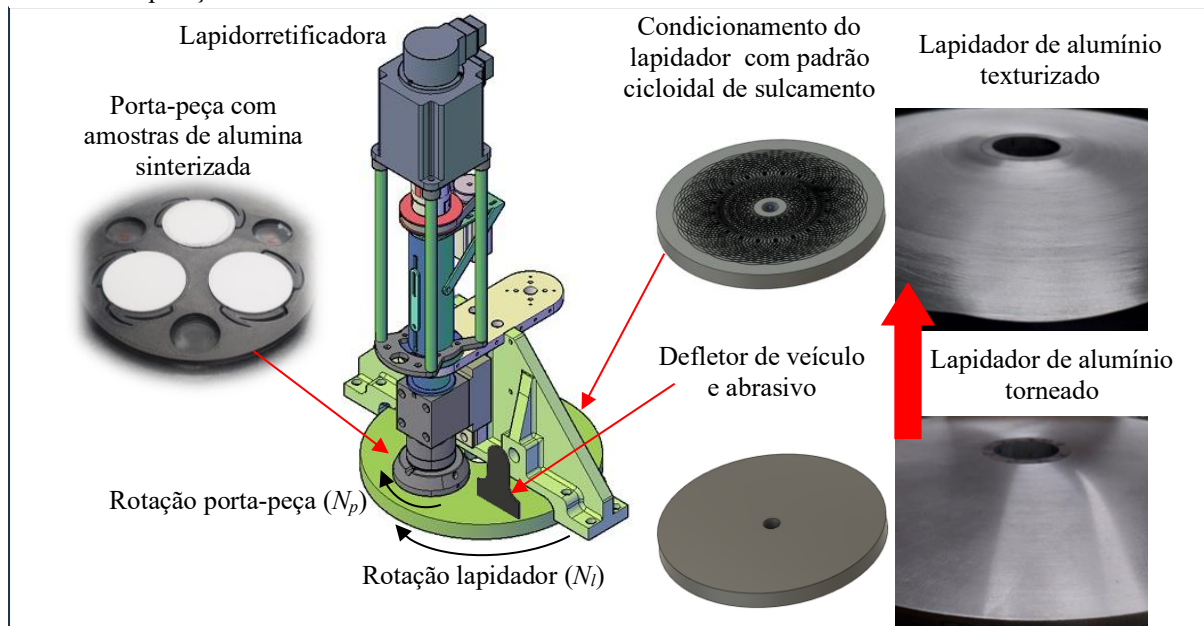


Fonte: Autor adaptado (Uhlmann *et al.*, 1999).

Portanto nos experimentos ocorreram lapidações planas de cinemática planetária com trajetórias epicyclóides.

Findada a etapa, o trabalho avançou para início de seus experimentos. Nos ensaios experimentais do trabalho uma peça foi considerada de sacrifício e participou de todos eles, outras duas para cada condição de lapidação, nomeadas de amostras 1 a 4. A etapa de condicionamento/texturização do lapidador e a lapidação das amostras de alumina estão esquematicamente ilustradas na Fig. 11.

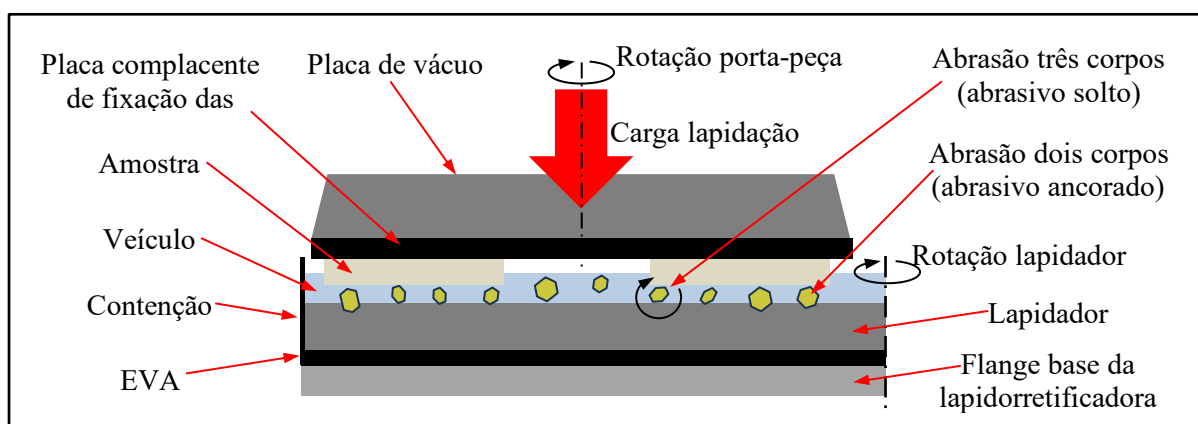
Figura 11 - Representação do cabeçote da lapidorretificadora e das etapas de texturização do lapidador de alumínio e lapidação de discos de alumina sinterizada.



Fonte: Autor.

Duas condições de lapidação foram avaliadas, variando-se a pressão e o tempo de lapidação. A texturização do lapidador aconteceu uma única vez, antes do primeiro ensaio. Três amostras de alumina foram lapidadas em cada condição por 30 minutos. O desenho esquemático da seção transversal da lapidação é apresentado na Fig. 12.

Figura 12 - Desenho esquemático da seção transversal em corte na lapidação plana com cinemática cicloidial e lapidador de alumínio e mecanismos de abrasão dois e três corpos da alumina sinterizada.



Fonte: Autor.

A lapidação foi interrompida em intervalos regulares de dez minutos cada para medição de cinco pontos de rugosidade, espessura e massa para determinação da taxa de remoção de material (TRM) em grama/minuto, realizados no laboratório de metrologia do campus UFU-

Uberlândia. Antes e após o processo abrasivo, as amostras foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) realizadas no campus UFU-Uberlândia, e perfilometria por microscopia confocal (PMC) realizadas no campus UNESP- Bauru.

A rugosidade do lapidador foi medida antes e após a texturização, mas não foi medida ao final da lapidação evitando, assim, que os abrasivos ancorados no lapidador danificassem o apalpador e a sapata do rugosímetro de contato. Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros de lapidação e os parâmetros avaliados nas amostras lapidadas. Findada a texturização do lapidador, decorreu-se sua lavagem com água destilada e aspiração para remoção dos resíduos.

A preparação para lapidação continuou com a adição de 1 g de abrasivo de diamante monocristalino com diâmetro médio equivalente de 54 μm e 25 mL de água destilada com o lapidador parado. As três amostras foram fixadas na placa de vácuo. Considerando que a lapidorretificadora possui controle numérico computadorizado (CNC), a aplicação de carga de lapidação e a retirada da carga por meio do avanço do cabeçote de fixação das amostras foi padronizada. Lapidador e porta-peças foram previamente acionados com 100 rpm e as amostras foram aproximadas e comprimidas contra o lapidador com avanço de 50 mm/min até a pressão de lapidação almejada. Decorrido o tempo estabelecido de lapidação, a retirada da carga e afastamento das amostras também seguiu o avanço de 50 mm/min com lapidador e porta-peças rotacionando. Somente após o afastamento completo foram desligados os acionamentos. Considerando a rotação do lapidador, a barreira de contenção na periferia do lapidador e a presença do defletor, os abrasivos e o veículo de lapidação foram homogeneamente distribuídos sobre o rebolo. A lama de lapidação, restrita sobre o lapidador, foi constantemente direcionada a interface peças-lapidador.

Tabela 3 - Procedimento experimental da lapidação plana com cinemática cicloidal com lapidador maleável em alumina sinterizada.

Ensaio		Parâmetros de entrada		Parâmetros de saída
		Constantes	Variáveis	
1	• <i>Amostra 1</i> (A1) • <i>Amostra 2</i> (A2)	• $N_l = N_p = 100$ rpm • 1 g diamante monocristalino (54 μm) • 25 g água destilada • Tempo de lapidação (30 minutos)	$P_1 = 20$ kPa	• Rugosidade (R_a, R_q, R_z, R_{sk}, R_{ku}, R_t, R_p, R_v) • Microscopia eletrônica de varredura (MEV) • Perfilometria por microscopia confocal (PMC) • Espessura (e) • Massa da alumina (m_a) • Potência elétrica do lapidador (P_l)
	• <i>Amostra 3</i> (A3) • <i>Amostra 4</i> (A4)		$P_2 = 25$ kPa	

Fonte: Autor.

Para medição das massas das aluminas e abrasivo utilizou-se uma balança analítica Shimadzu, modelo ATX 224R, com resolução 0,0001 g. Para medição das rugosidades das amostras e lapidador, rugosímetro Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+, dotado de apalpador de diamante de raio de 2 μm . Foram medidos os parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_z , R_{sk} , R_{ku} , R_t , R_p , e R_v com cut-off de 0,8 mm, filtro Gaussiano e comprimento de amostragem de 4 mm, de acordo com a ISO 4288 (2008). Para medição das espessuras das amostras, micrômetro externo digital Insize, modelo 3109, com resolução 0,001 mm e faixa nominal de 0 a 25 mm.

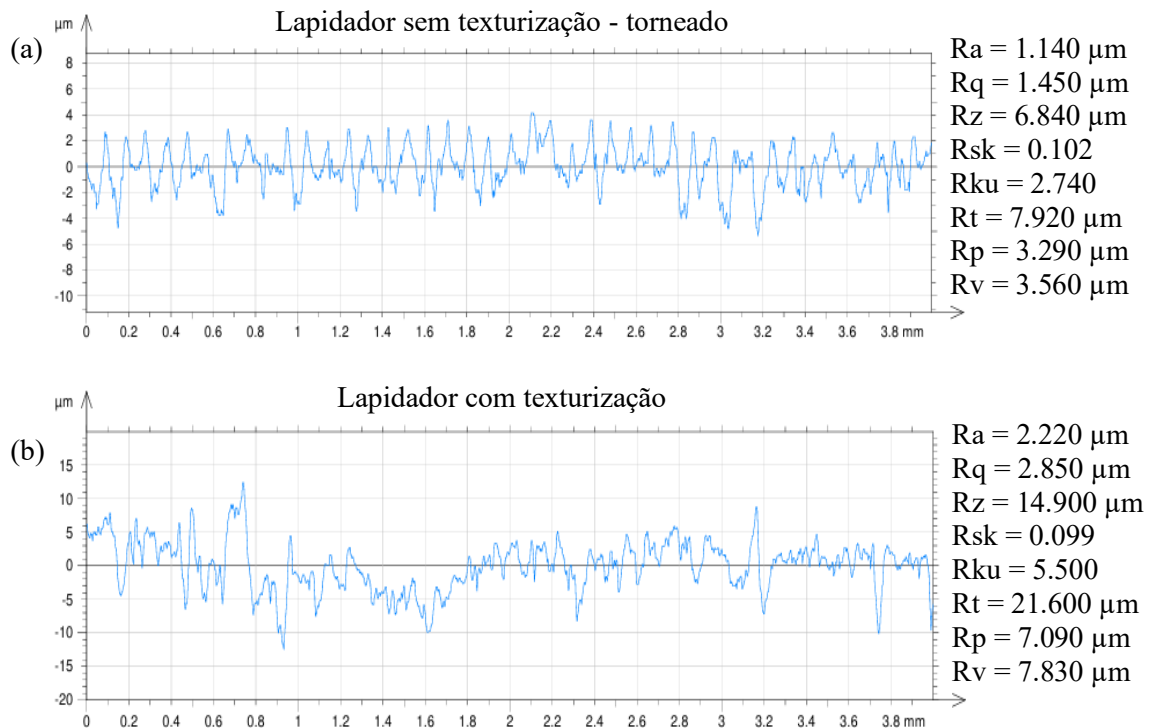
As amostras foram limpas em cuba ultrassônica Schuster, modelo L100, com potência de 100 W e frequência de 50 kHz durante 5 minutos com álcool isopropílico antes das medições de rugosidade, perfilometria por microscopia confocal (PMC), medição mássica, espessura e deposições de ouro via deposição física à vapor (PVD) para MEV. MEV das amostras de alumina foram realizadas nos microscópios Zeiss, modelo EVO MA10, e Tescan, modelo VEGA 3 com os parâmetros de aquisição identificados nas imagens. PMC de campo claro com luz branca e luz azul foi realizada com o Leica, modelo DCM 3D, com objetivas de 10x, 20x e 100x com auxílio dos softwares LeicaSCAN DCM3D 3.2.3 e TalyMap Gold versão 5.0.3.4995.

A potência elétrica média consumida pelo motor de indução trifásico durante os 30 minutos de lapidação para acionar o lapidador foi medida por meio do multimedidor trifásico de grandezas elétricas Ciber, modelo CVM NGR-96, com taxa de aquisição de 1 amostra/minuto. Todos os ensaios foram realizados a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa abaixo de 65 %, em consonância com a ABNT NBR 10085, realizados no laboratório de metrologia do campus UFU-Uberlândia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A texturização do lapidador promoveu alterações em seu perfil de rugosidade para torná-lo mais suscetível ao ancoramento do abrasivos. A seguir na Figura 13 são apresentados os perfis do lapidador sem texturização (torneado) e após o processo de texturização.

Figura 13 - Perfilometria e parâmetros de rugosidades do lapidador sem texturização (a) e com texturização (b).



Fonte: Autor.

Selecionar parâmetros de textura de superfície apropriados para as funcionalidades desejadas é essencial para que um componente atinja o desempenho necessário. Nesses casos, a utilização apenas da rugosidade média aritmética - Ra como critério de qualidade torna-se insuficiente (Iavarone, 2024). Portanto em termos gerais ao comparar os valores dos parâmetros de rugosidade (Ra, Rq, Rz, Rt, Rp e Rv) antes e depois, fica evidente que o processo de texturização do lapidador produziu nesses valores alterações quantitativas de fator multiplicativo aproximadamente duas vezes, exemplos: Ra = 1,14 μm, Rq = 1,48 μm (sem texturização) e Ra = 2,22 μm, Rq = 2,85 μm (com texturização).

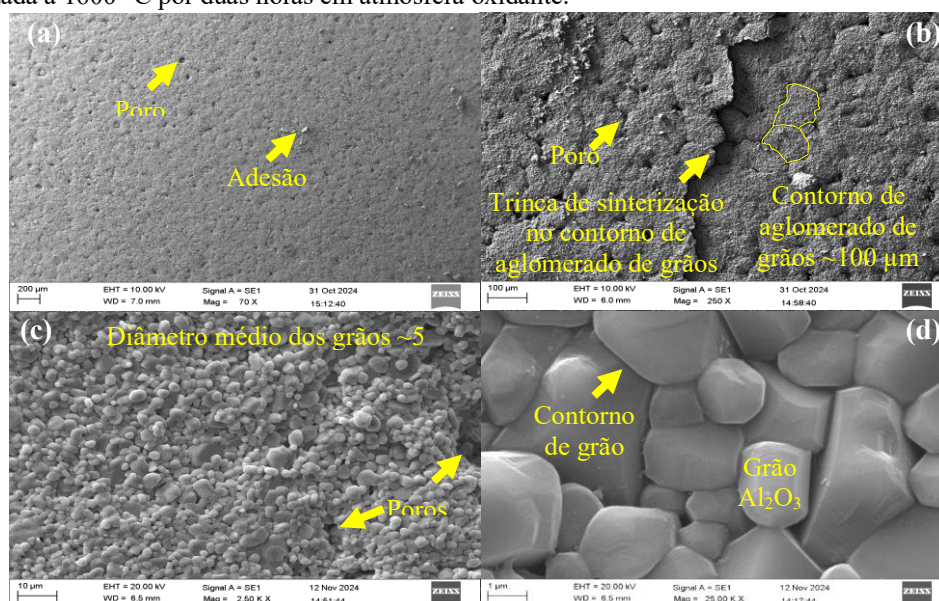
Os vales são importantes para o escoamento e a retenção da lubrificação (Iavarone, 2024). O efeito deste procedimento aumentou a profundidade média dos maiores vales (Rv) em 3,23 unidades, quase o dobro do valor antes da texturização, resultando em condições mais adequadas ao ancoramento do abrasivo no lapidador. Adicionalmente, a média dos maiores

picos Rp, e a somatória das médias Rv e Rp dada por Rt, tiveram incremento na ordem de 3,86 e 11,86 unidades respectivamente. Vales mais profundos sucedidos por picos com maiores elevações culminaram em mais “obstáculos” à rolagem dos abrasivos facilitando seu ancoramento no lapidador.

Imagens de MEV em diferentes ampliações, representativas das amostras de alumina sinterizada, são apresentadas na Fig. 14. A microestrutura básica das amostras de alumina policristalina consistiu em aglomerados de grãos com dimensões e geometrias planas heterogêneas, com dimensão média próxima a 100 µm, poros fechados de aproximadamente 25 µm homogeneamente distribuídos nos contornos dos aglomerados de grãos e contornos de grãos, estes com largura aproximada de 5 µm e geometria predominante equiaxial.

A densidade de poros superficiais e subsuperficiais foi considerada elevada e comprometeu o acabamento superficial. A elevada densidade de poros e aglomerados de grãos foi atribuída à técnica de compactação do pó cerâmico. A prensagem uniaxial de simples ação a 80 MPa não foi capaz de remover a porosidade inter e intraaglomerado, assim como manteve a assinatura geométrica dos aglomerados de compactação na microestrutura sinterizada, com densificação de sinterização comprometida. Soma-se também aos defeitos de compactação, o gradiente de densidade no compactado verde, o qual favoreceu a formação de trincas nas bordas do compactado de algumas amostras, tipicamente induzidas nos contornos dos aglomerados durante a desmoldagem da amostra verde, conforme apontado na Fig. 14b. Prensagem isostática a frio pode ser empregada para aumentar a compactação e reduzir os defeitos.

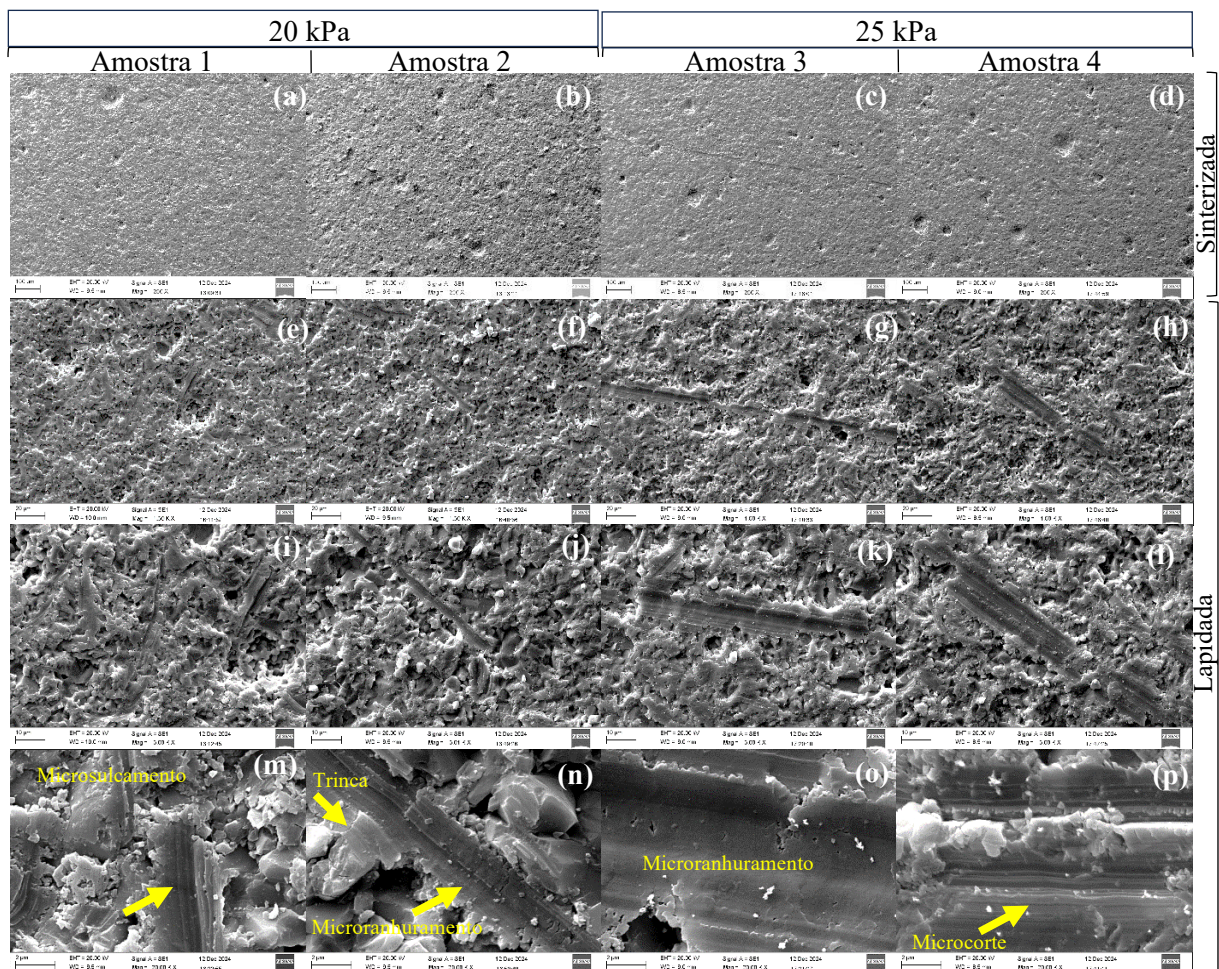
Figura 14 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da alumina policristalina A1000-SG da Almatís sinterizada a 1600 °C por duas horas em atmosfera oxidante.



Fonte: Autor.

Na Figura 15 são apresentadas imagens de MEV em quatro ampliações distintas das quatro amostras lapidadas por trinta minutos em função das pressões de lapidação. Os resultados revelam predomínio do mecanismo frágil de remoção por abrasão três corpos, com presença em menor quantidade de deformações plásticas em decorrência dos mecanismos de microranhuramento (micro-grooving), microsulcamento (micro-ploughing) e microcorte (micro-cutting), sendo o microranhuramento o mais presente.

Figura 15 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de alumina policristalina lapidadas por 30 minutos com 1 g diamante monocristalino com diâmetro médio de 54 μm , rotação do porta-peça (Np) e do lapidador (NI) de 100 rpm e água destilada como veículo e fluido de corte de lapidação.



Fonte: Autor.

Estes três mecanismos são característicos de abrasão dois corpos, comprovando que ocorreu ancoramento dos abrasivos, mesmo que temporário, no lapidador. O ancoramento temporário é sugerido pelo comprimento dos riscos que, tipicamente, ficaram abaixo de 150 μm e/ou não são retilíneos, sugerindo movimentação do abrasivo. O aumento da força normal

do abrasivo promoveu aumento da deformação plástica da alumina e, portanto, aumentou a penetração do abrasivo. O mesmo foi inferido por Chandrasekar e Bhushan (1993) a profundidade e o grau das camadas deformadas da superfície e a quantidade de remoção de material aumentaram com maior força normal ou pressão de contato.

Este incremento da penetração ou engajamento do abrasivo promoveu a mudança de mecanismos; menores forças normais favoreceram o microranhuramento, enquanto o aumento da força levou ao microsulcamento e, posteriormente, ao microcorte. Conforme Deng et. al., (2021) à medida que a pressão aumentava acontecia a transição rolagem e arranhões para sulcamento e microcorte devido a maior profundidade do abrasivo.

O aumento da força normal promoveu o incremento da penetração do abrasivo na alumina e a nucleação e propagação de trincas inter e transgranulares, com propagação das trincas acentuada na fase de descarregamento do esforço mecânico com a saída do abrasivo. Por Chandrasekar e Bhushan (1993) o modo de remoção predominante depende principalmente da carga do abrasivo e se a carga excede o limite para fratura.

O aumento da pressão de lapidação promoveu maiores deformações plásticas na alumina, resultando em marcas mais largas e profundas na microestrutura policristalina. Deng (2021) devido ao aumento da força entre a peça e a placa de lapidação, a força sobre o abrasivo também aumentava, resultando em mais arranhões na superfície da peça e, conseqüentemente, um aumento no Ra.

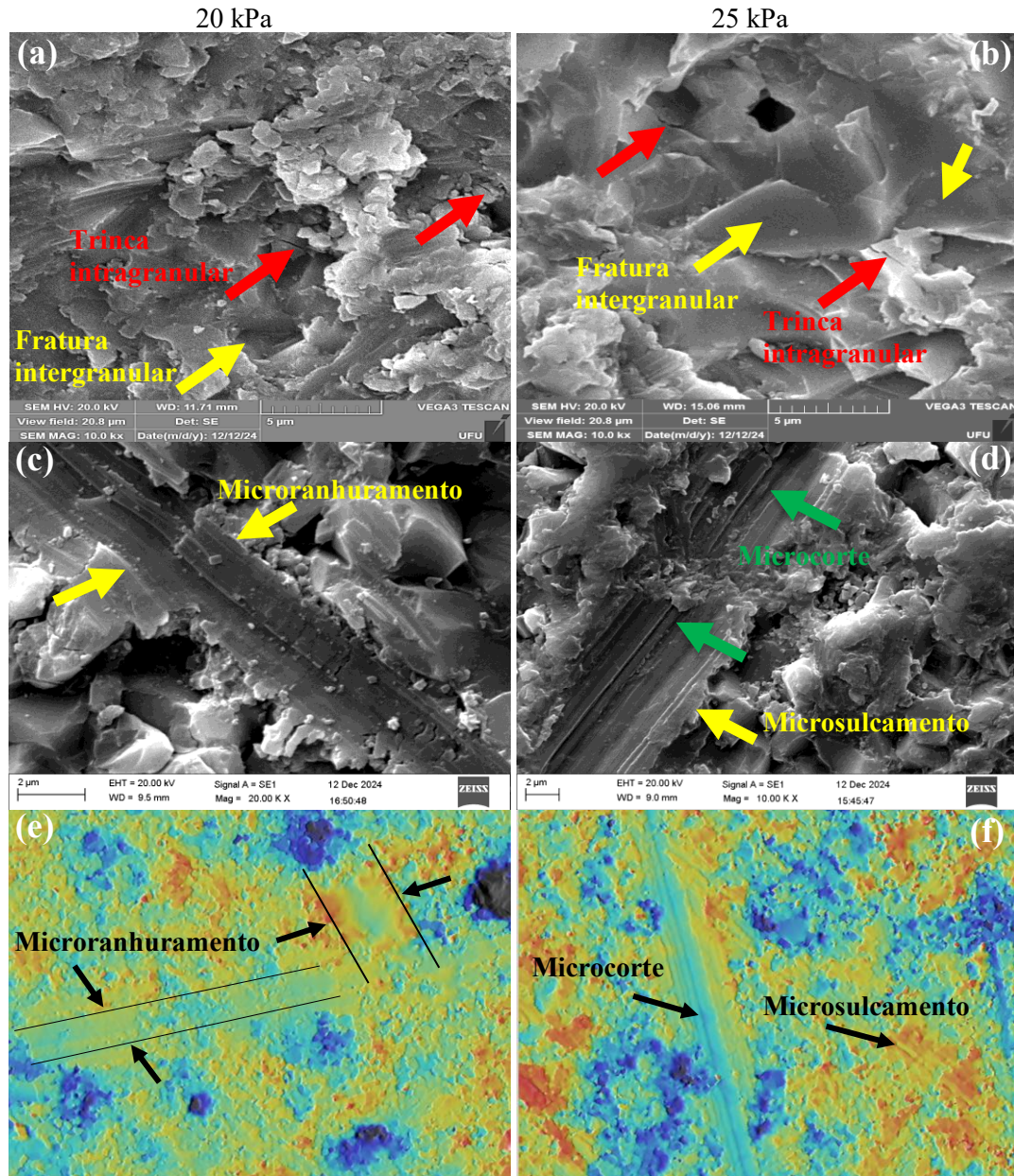
A natureza da lapidação com cinemática planetária com pressão de lapidação aparente constante (carga de lapidação constante sem alteração da área aparente da amostra) proporciona constante abrasão da superfície em direções aleatórias e acabamento isotrópico (independe da direção e sentido da medição da rugosidade). Sucessivas deformações plásticas localizadas introduziram discordâncias na estrutura cristalina que aumentaram a resistência mecânica localizada e aumentaram a fragilidade do material e predomínio do modo frágil de remoção.

Os mecanismos de microranhuramento e microsulcamento não necessariamente removeram material na forma de cavaco na primeira ocasião. O incremento das deformações localizadas ocasionadas por esses mecanismos levou ao fenômeno de microtrincamento (nucleação e propagação de trincas) e, conseqüentemente, a formação de cavacos. Esse fenômeno é também denominado de pulverização de material, típico da usinagem abrasiva de materiais de elevada dureza e baixa tenacidade, como a alumina. O microranhuramento deformou os grãos da microestrutura da alumina devido ao estado de tensão envolvido, formando ranhuras com desprezível elevação das bordas. Em contrapartida, o microsulcamento envolveu maiores deformações plásticas da microestrutura, com proeminente elevação das

bordas por escoamento de material do centro para as bordas. O tamanho de abrasivo $\text{Ø}54\text{ }\mu\text{m}$ adotado neste trabalho influenciou também este efeito, segundo (Zhou, 2023) o efeito sulcamento é produzido principalmente por abrasivos mais “largos”. Por, (Pandiyan, *et al.*, 2020) arestas de corte arredondadas não formam cavacos, mas podem esfregar ou fazer um sulco causado pela elevação do fluxo lateral do material da peça de trabalho.

O microcorte, todavia, aconteceu quando a geometria favorável do abrasivo engajado no corte foi associada a profundidade de corte que ultrapassou o valor mínimo ou crítico para formação de cavaco, gerando menor deformação da microestrutura e o cisalhamento total em forma de cavacos micrométricos. Conforme (Pandiyan, *et al.*, 2020) grãos abrasivos com geometria favorável ao corte podem gerar cavaco no modo de cisalhamento. O fundo do canal do microcorte foi caracterizado por riscos paralelos, sem a formação de trincas residuais na superfície recém-criada. Para corroborar os mecanismos de remoção dúcteis e frágeis identificados nas imagens de MEV da Fig. 15, apresenta-se na Fig. 16 novas imagens de MEV e PMC em função das pressões de lapidação, com destaque para mecanismos frágeis com fratura inter e intragranular, e exemplos de mecanismos dúcteis de microsulcamento e microcorte.

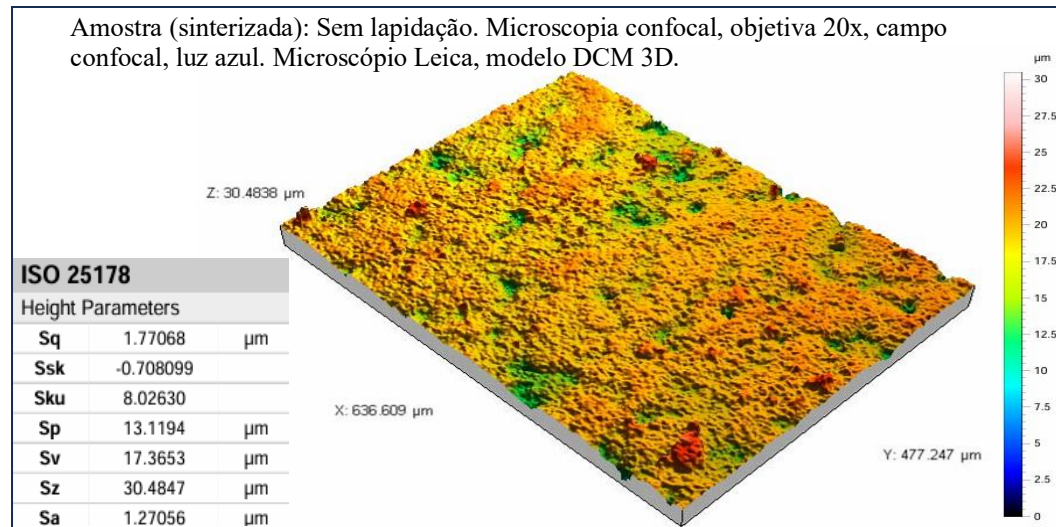
Figura 16 - (a, b, c, d) Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e (e, f) perfilometria de microscopia confocal (PMC) após 30 minutos em função da pressão de lapidação. PMC com objetiva 100x, campo claro, (e) luz azul e (f) luz branca.



Fonte: Autor.

Após perfilometria confocal as imagens aquisitadas foram submetidas à análises topográficas e metrológicas no software TalyMap Gold, versão 5.0.3.4995 através de caracterização 2D e 3D dos recursos disponíveis no programa, realizados no laboratório de metrologia do campus UNESP-Bauru. A primeira amostra caracterizada foi peça sem lapidação conforme a Figura 17 a seguir.

Figura 17 - Área da amostra de alumina sinterizada sem lapidação em imagem topográfica com graduação de picos e vales em cores e parâmetros de rugosidade superficial.

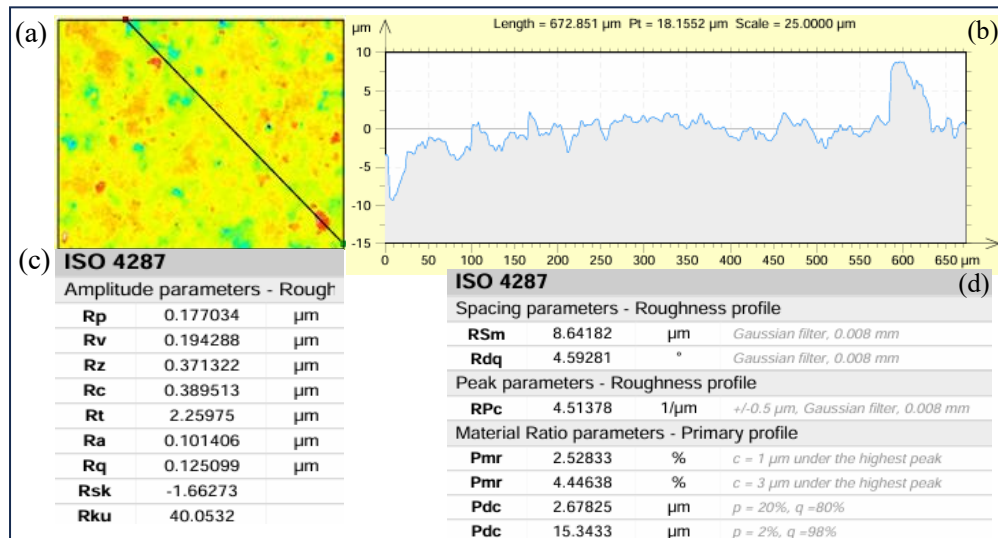


Fonte: Autor.

Na imagem da Figura 17 da alumina sinterizada sem lapidação é notável o quão porosa se apresenta a superfície da amostra, a densidade de vales adicionada aos expressivos picos fazem das aluminas peças com muitas irregularidades que impediram menores valores de Ra serem alcançados.

A seguir na figura 18(a) foram selecionados por um segmento de reta, peculiares pico e vale que caracterizam as amostras sem lapidação. No segmento destacado é possível obter a perfilometria da rugosidade pela Figura 18(b) e seus parâmetros na Figura 18(c) (d).

Figura 18 - Segmento destacado da amostra de alumina sinterizada sem lapidação (a), perfilometria do segmento destacado (b), parâmetros de rugosidade da perfilometria (c), e parâmetros de distribuição espacial (d).

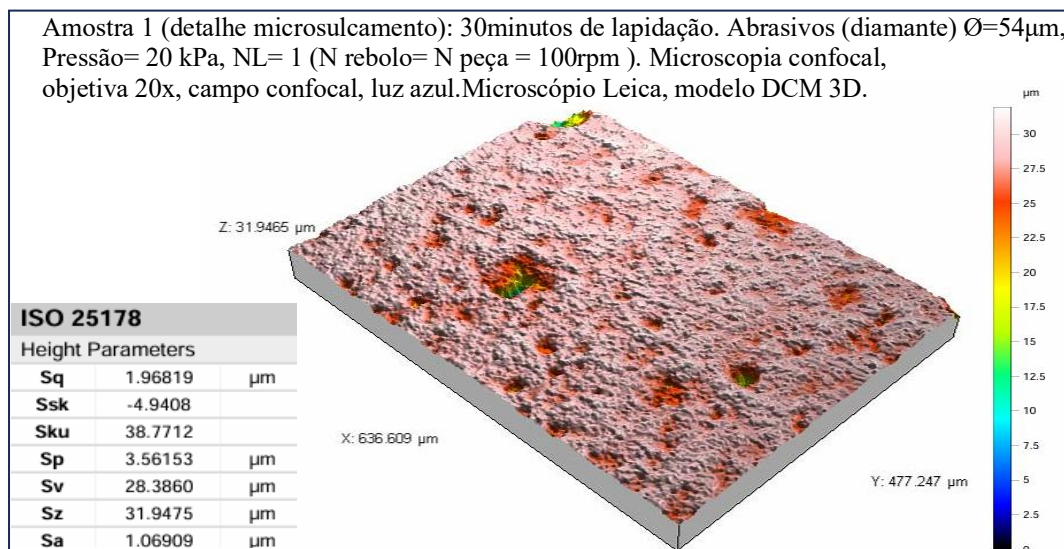


Fonte: Autor.

A superfície da amostra de alumina, ainda sem lapidação, apresenta características típicas de um corpo sinterizado com porosidade aberta e topografia irregular. Os altos valores de Rt (2,26 μm) e Rku (40,05), adicionados ao Rsk negativo (-1,66), indicam a presença de vales profundos e agudos.

Recursos do software TalyMap Gold, foram aplicados na topografia para auxiliar a análise de uma determinada superfície da amostra 1 que apresentou deformações no regime dúctil com presença de mecanismo de microsulcamento, a superfície mencionada é apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Área da amostra 1 de alumina sinterizada lapidada a 20 kPa em imagem topográfica com graduação de picos e vales em cores e parâmetros de rugosidade superficial.

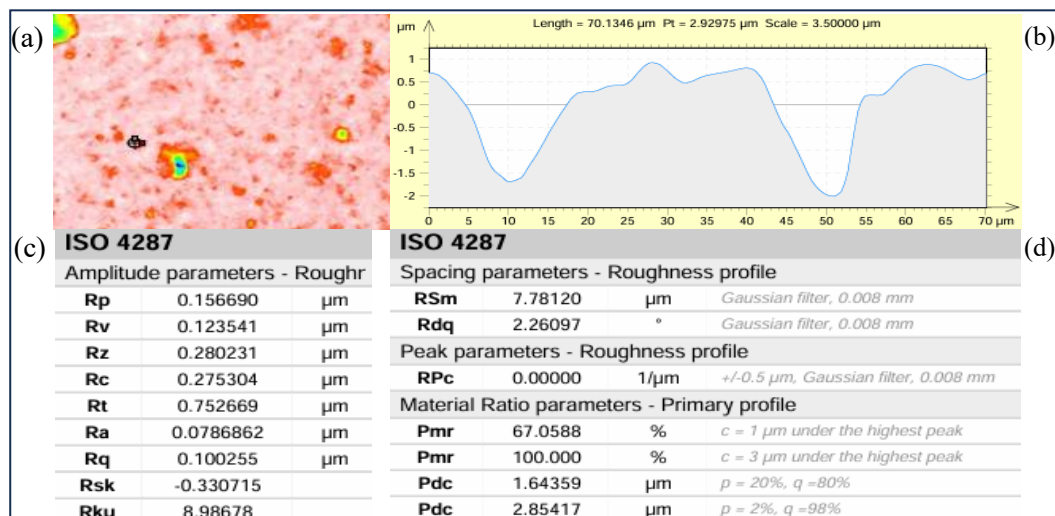


Fonte: Autor.

Os valores de assimetria S_{sk} (-4,94) e S_{ku} (38,77) são indício de remoção em modo frágil observados pela alta densidade de “poros” decorrentes de fraturas intergranulares. Isto prejudicou a rugosidade média S_a da superfície que atingiu valor de (1,069 μm).

A seguir na figura 20(a) foi selecionado uma região que apresenta característica da deformação plástica na amostra. Na seleção destacada é possível obter a perfilometria da rugosidade pela Figura 20(b) e seus parâmetros na Figura 20(c) (d).

Figura 20 - Segmento destacado da amostra 1 de alumina sinterizada lapidada a 20 kPa (a), perfilometria do segmento destacado (b), parâmetros de rugosidade da perfilometria (c), e parâmetros de distribuição espacial (d).

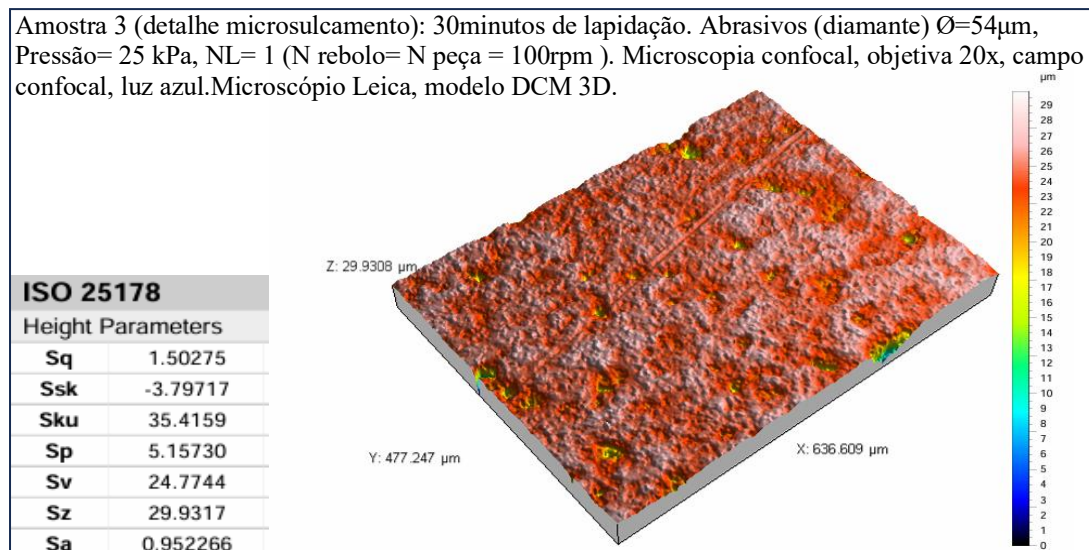


Fonte: Autor.

A superfície da alumina apresentou melhoria significativa após a lapidação. A redução de R_t de 2,26 μm (sem lapidação) para 0,75 μm evidência o efeito da pressão sob a superfície. Os valores de R_{sk} (-0,33) e R_{ku} (8,99), embora ainda indiquem certo predomínio de vales e presença de picos, estão muito mais equilibrados em relação à condição inicial.

Na topografia da superfície da amostra 3, uma determinada região apresentou deformação no regime dúctil com presença de mecanismo de microsulcamento denotada por um sulco de aparência linear que atravessa longitudinalmente a área analisada, a seguir o fenômeno é apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Área da amostra 3 de alumina sinterizada lapidada a 25 kPa em imagem topográfica com graduação de picos e vales em cores e parâmetros de rugosidade superficial.

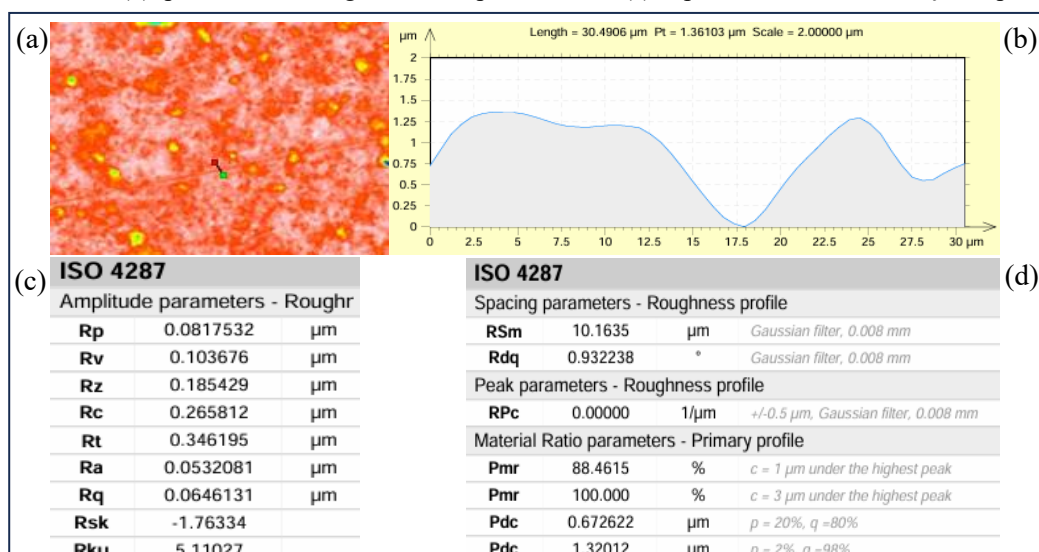


Fonte: Autor.

O parâmetro de assimetria Ssk (-3,797) mostra predominância de vales na área superficial sendo o parâmetro Sv (24,774 μm) máxima profundidade de vale em relação ao plano médio superfície. O valor de kurtosis Sku (35,4) é potencial indicativo para aplicações de superfícies destinadas a reter fluidos.

A seguir na figura 22(a), parte do microsulcamento foi selecionado por um segmento de reta. No segmento destacado é possível obter a perfilometria da rugosidade pela Figura 22(b) e seus parâmetros na Figura 22(c)(d).

Figura 22 - Segmento destacado da amostra 3 de alumina sinterizada lapidada a 25 kPa (a), perfilometria do segmento destacado (b), parâmetros de rugosidade da perfilometria (c), e parâmetros de distribuição espacial(d).

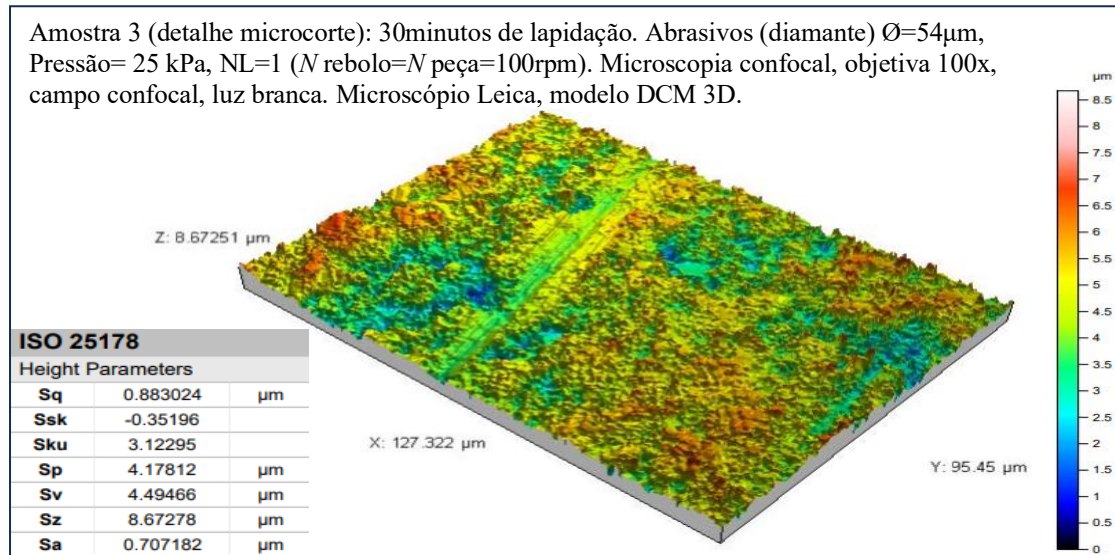


Fonte: Autor.

Na figura 22(b) é possível determinar a profundidade do microsulcamento que foi de aproximadamente 1,25 μm considerando as elevações de bordas adjacentes ao vale referenciado no nível zero. Os valores de Ra e Rz para pressão de 25 kPa reduziram mais em comparação a amostra 1 que foi lapidada à pressão de 20 kPa.

Em outra região da superfície da amostra 3 foram identificados, mecanismos que percorrem transversalmente a área da superfície com um largo sulco de deformação plástica e remoção dúctil denotando a presença de mecanismos de microsulcamento e microcorte respectivamente. A seguir esses fenômenos são apresentados na Figura 23.

Figura 23 - Área da amostra 3 de alumina sinterizada lapidada a 25 kPa em imagem topográfica com graduação de picos e vales em cores e parâmetros de rugosidade superficial.

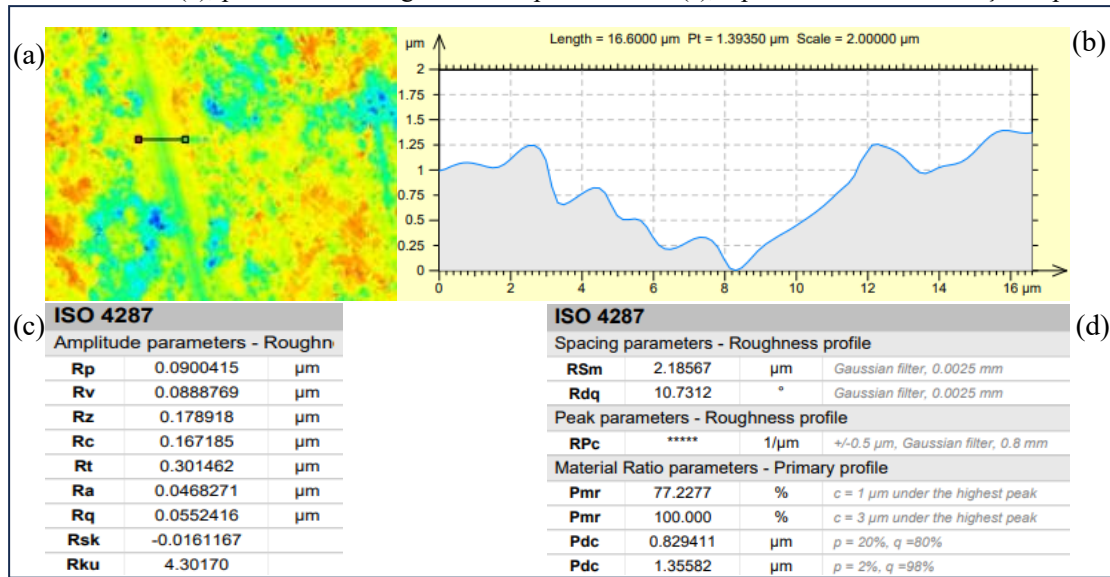


Fonte: Autor.

A condição de lapidação sob pressão de 25 kPa, promoveu nesta área analisada, reduzidos valores de rugosidade média Sa (0,707 μm) e rugosidade média quadrática Sq (0,883 μm) sendo estes os menores entre as anteriores. A assimetria apresentou parâmetro Ssk distribuição pouco negativa (-0,351) acompanhada de *kurtosis* com valor (3,122) ambos os resultados são menos acentuados que amostras lapidadas apresentadas anteriormente.

A seguir na figura 24(a) um segmento da faixa que contém o microcorte é destacado para obter a perfilometria da rugosidade 24(b) e seus parâmetros 24(c)(d) nesta região da peça.

Figura 24 - Segmento destacado da amostra 3 de alumina sinterizada lapidada a 25 kPa (a), perfilometria do segmento destacado (b), parâmetros de rugosidade da perfilometria (c), e parâmetros de distribuição espacial (d).



Fonte: Autor.

Observa-se sucessivas deformações plásticas até que o abrasivo engajado alcançasse profundidade suficiente para remover material por cisalhamento. Esse processo parece culminar na região correspondente quando o abrasivo atingiu o vale mais profundo referenciado no nível zero da perfilometria. A remoção dúctil deste fenômeno pode ser visualizada auxiliariamente pela figura 16(d) pela imagem MEV.

Quanto ao uso da água destilada, destacam-se quatro papéis fundamentais que justificaram sua escolha: (1) como veículo de lapidação é responsável por transportar os abrasivos, e sua menor viscosidade se comparada aos típicos óleos de lapidação diminui o efeito de sustentação do mancal hidrodinâmico que atua em lapidador não ranhurado, aumentando o engajamento dos abrasivos na peça e no lapidador (diminuição da espessura da interface peça/lapidador); (2) como fluido de corte, além da função de transporte de cavacos, tem maior ação refrigerante do que os óleos, todavia com deficiência na ação lubrificante que, nesta pesquisa, foi desejada para promover maior ação abrasiva; (3) nas cerâmicas de alumina promove uma característica de corrosão na ponta de uma trinca que acentua o processo de propagação de trinca, essencial à parcela de remoção frágil; e (4) sustentabilidade, por não demandar óleos ou solventes como veículos de lapidação e solventes na etapa de descontaminação das peças que geram insalubridade no ambiente de trabalho e poluem o meio ambiente (elevado impacto ambiental) quando não são descartados corretamente, aumentando o custo de produção.

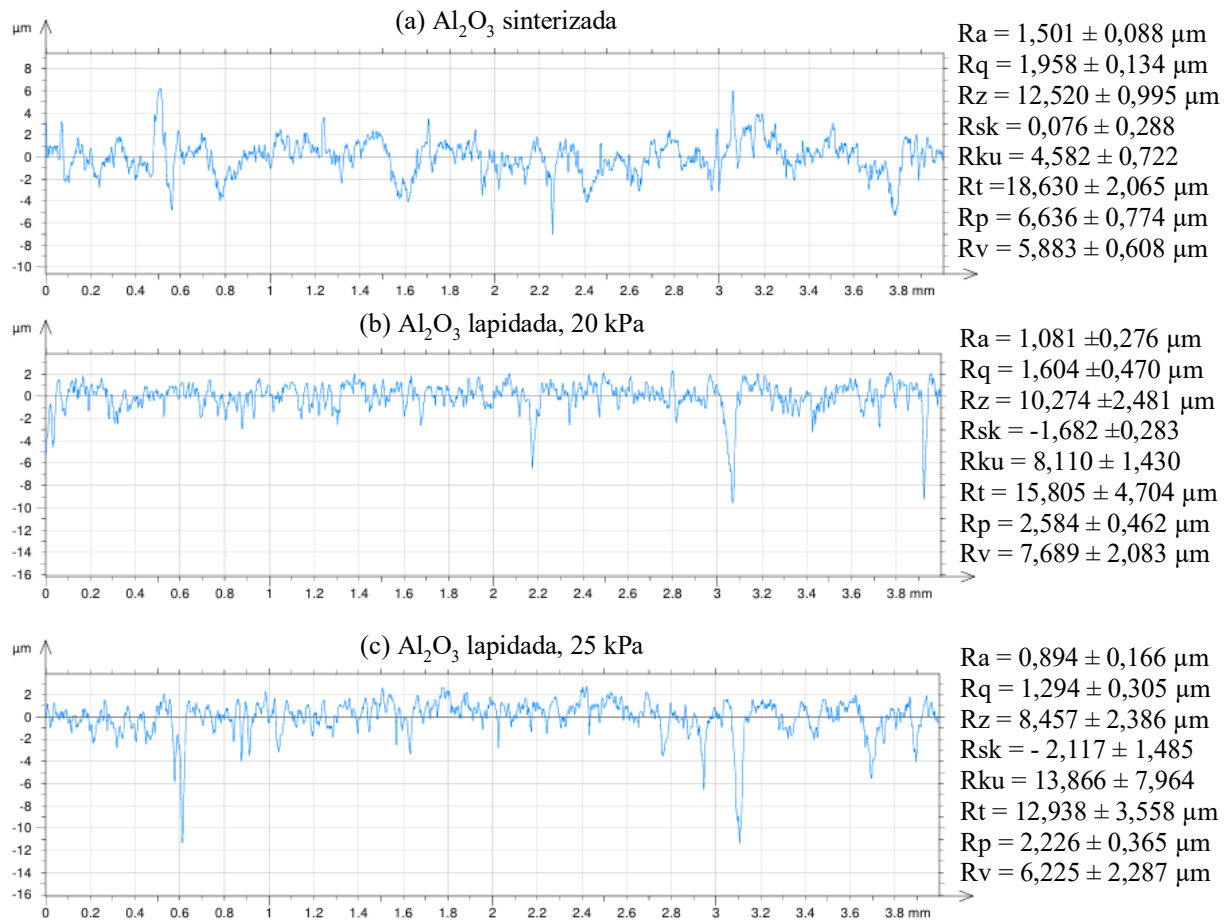
As potências elétricas médias de lapidação foram de 160 W e 205 W para as pressões

de 20 kPa e 25 kPa, respectivamente. Embora não tenha sido monitorado a emissão acústica (EA), as duas condições de lapidação produziram som audível típico de abrasão três corpos, sendo a energia acústica aparentemente maior com a maior pressão. Este som é caracterizado em parte pela energia acústica liberada pela quebra das fortes ligações químicas da alumina. Esta possui uma estrutura cristalina composta por ligações químicas iônicas e covalentes.

As ligações iônicas conectam os íons de alumínio (Al^{3+}) e oxigênio (O^{2-}) como resultado da atração eletrostática entre íons de cargas opostas. Entre os átomos de alumínio e oxigênio se formam ligações covalentes. Embora a ligação iônica seja predominante, há também um caráter covalente significativo devido ao compartilhamento de elétrons entre os átomos. Essas ligações conferem à alumina suas propriedades características, como alta dureza, baixa tenacidade ao impacto, ponto de fusão elevado, resistência à corrosão, inércia química e isolamento elétrico.

Na Figura 25 são apresentados os perfis e parâmetros de rugosidade das cerâmicas sinterizada (Fig. 25a) e após 30 minutos de lapidação com pressões de 20 kPa (Fig. 25b) e 25 kPa (Fig. 25c). Os perfis de rugosidade foram selecionados considerando a máxima coincidência possível com os valores finais (R_a , R_q , R_z , R_{sk} , R_{ku} , R_t , R_v , R_p) uma vez que estes parâmetros de rugosidade finais são médias e os perfis não são. Este critério visa transmitir os perfis mais adequados aos resultados de alcançados nas peças em cada nível de pressão.

Figura 25 - Perfis e parâmetros de rugosidade: (a) alumina sinterizada, (b e c) alumina lapidada por 30 minutos com 1 g diamante monocristalino com diâmetro médio de 54 μm , rotação do porta-peça (N_p) e do lapidador (N_l) de 100 rpm e água destilada como veículo de lapidação



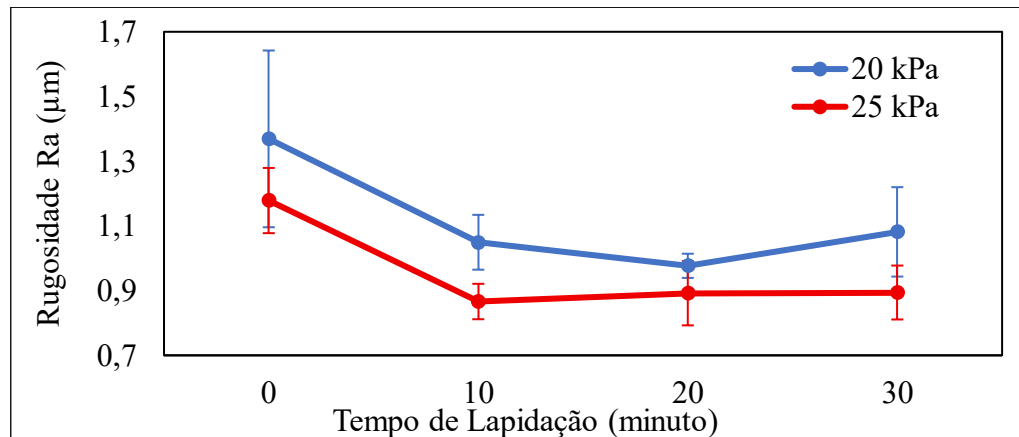
Fonte: Autor

O incremento da pressão melhorou a qualidade da superfície. A rugosidade apresentou decréscimo com o aumento da pressão de ensaio, com exceção do R_{ku} , conforme a Fig. 25b e Fig. 25c. O aumento do R_{ku} e a redução do R_{sk} com valores negativos demonstra a eficiência do processo na geração de platôs com predomínio de vales e remoção dos picos, condição favorável em superfícies de deslizamento para reter lubrificante, como requerido na fabricação de selos mecânicos, mancais e superfícies de deslizamento, por exemplo.

A seguir são apresentados os gráficos das médias (média entre as duas peças de cada pressão) nas rugosidades (R_a , R_q , R_z , R_{sk} , R_{ku} , R_t , R_v , R_p) e seus desvios padrões centralizados.

A rugosidade média aritmética R_a é a primeira a ter sua análise feita através da figura 26 a seguir.

Figura 26 - Valores da rugosidade média aritmética para cada pressão em função do tempo de lapidação.



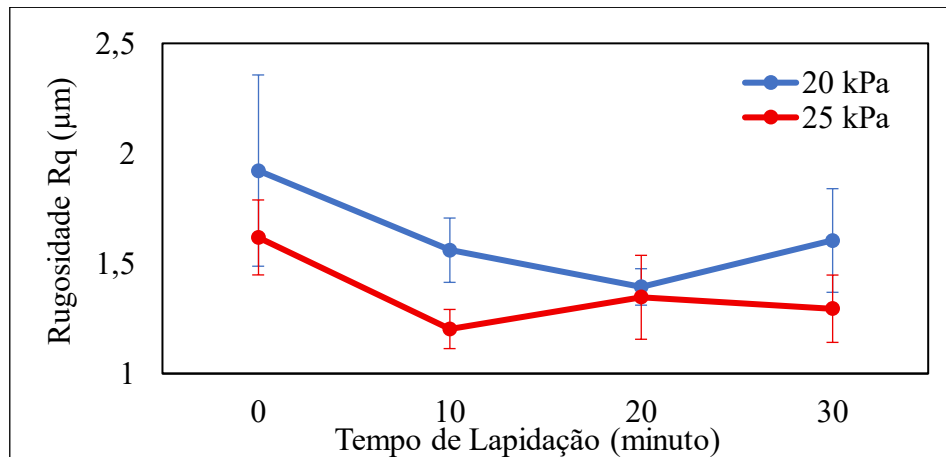
Fonte: Autor.

Na pressão de 20 kPa, o parâmetro de rugosidade Ra alcançou sua capacidade no valor de 0,976 µm com 20 minutos de lapidação todavia com uma inflexão terminou a lapidação com valor 1,081 µm. Já na pressão de 25 kPa, o parâmetro de rugosidade Ra alcançou sua capacidade no valor de 0,866 µm com 10 minutos de lapidação e manteve-se praticamente constante quando ao final atingiu 0,894 µm.

No terço inicial dos gráficos, as taxas de variação do parâmetro Ra foram praticamente idênticas nas duas pressões, o que se evidencia pelo paralelismo das retas com elevada inclinação para ambas. As condições iniciais das peças, ainda sem lapidação e com elevada rugosidade superficial, favoreceram a redução do Ra no início da lapidação. Assim, o processo demonstrou sua maior eficácia na melhoria da rugosidade média aritmética durante os primeiros dez minutos de lapidação, correspondendo a uma redução percentual de 23,3 % e 26,4 % para as pressões de 20 kPa e 25 kPa, respectivamente. A pressão de 25 kPa apresentou menor Ra entre as duas devido a apresentar maior densidade de abrasão dois corpos, revelada pelas deformações plásticas e remoções ductéis evidenciadas pelas imagens MEV da Figura 15 (k, l, o, p).

Por Iavarone (2024) parâmetro de rugosidade média quadrática Rq é mais suscetível a picos e vales e tende a ser maior que Ra. Segue Figura 27 para análise gráfico Rq.

Figura 27 - Valores da rugosidade média quadrática para cada pressão em função do tempo de lapidação.

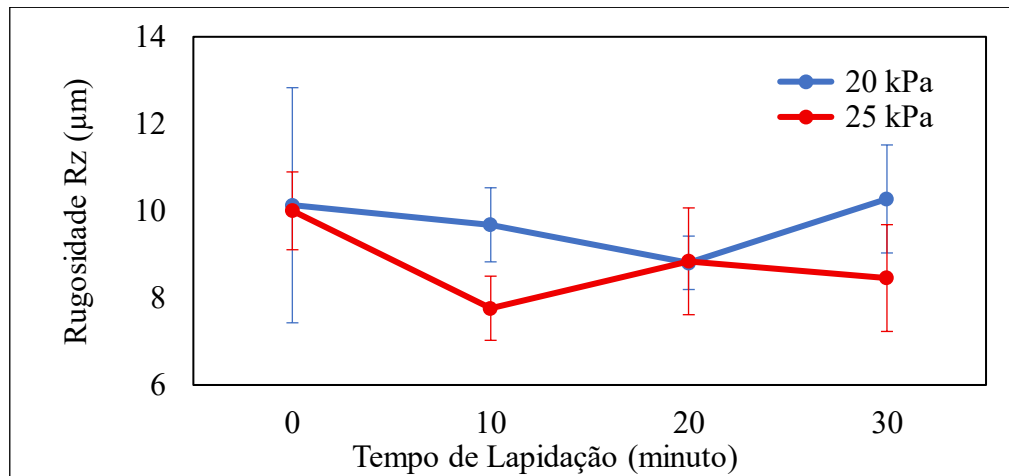


Fonte: Autor.

Este parâmetro eleva ao quadrado os valores de Ra e extrai a raiz dos mesmos. Por essa razão, os valores de picos e vales tendem ao aumento por serem mais suscetíveis no parâmetro Rq em comparação ao Ra. Para a pressão de 20 kPa, o gráfico apresenta um declive moderado até aproximadamente 20 minutos de lapidação, ponto em que se observa o menor valor de Rq para essa condição, sendo este a otimização do processo para este parâmetro. A partir desse momento, ocorre uma inflexão que eleva novamente a rugosidade quadrática média. O predomínio do mecanismo de abrasão a três corpos, nessa pressão, dificulta o controle da rugosidade, limitando reduções adicionais no Rq. Em contrapartida, na pressão de 25 kPa, a inclinação inicial foi um pouco mais acentuada nos primeiros 10 minutos, devido maior quantidade de abrasivos ancorados no lapidador, atingindo a otimização do processo neste momento da lapidação.

O parâmetro rugosidade total Rz é definido como a soma das maiores alturas de pico do perfil e das maiores profundidades dos vales do perfil no comprimento de avaliação Iavarone (2024). Segue Figura 28 para análise gráfico Rz.

Figura 28 - Valores da rugosidade total para cada pressão em função do tempo de lapidação.

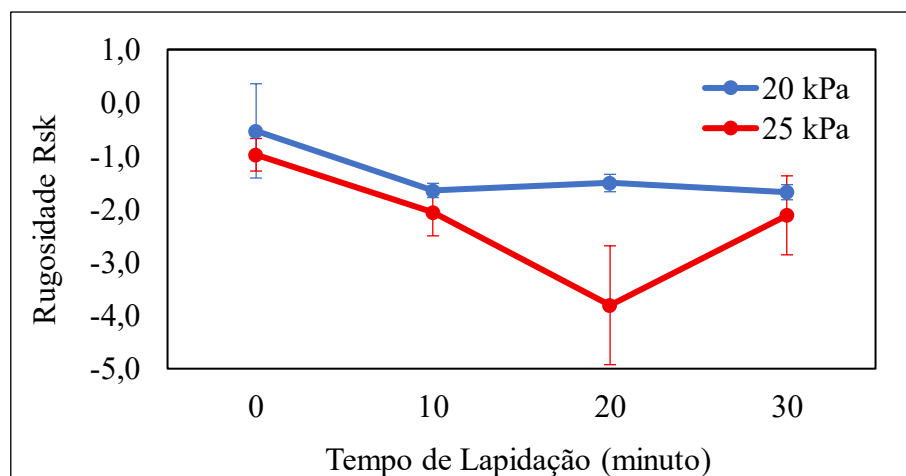


Fonte: Autor.

A condição mais severa de pressão apresentou gráfico com oscilações dos valores Rz onde elevado decaimento foi apresentado nos dez primeiros minutos da lapidação, alcançado ponto de menor valor neste tempo de lapidação, devido à menor interferência da lama no processo, adicionado da maior abrasão dos corpos ocorrida para esta pressão. Já na menor pressão foi evidenciada menor decaimento dos valores até 20 minutos do processo.

O parâmetro rugosidade *skewness* Rsk é relacionado ao grau de simetria de uma distribuição em relação à sua linha média (Iavarone, 2024). Segue Figura 29 para análise gráfico Rsk.

Figura 29 - Valores da rugosidade skewness para cada pressão em função do tempo de lapidação.



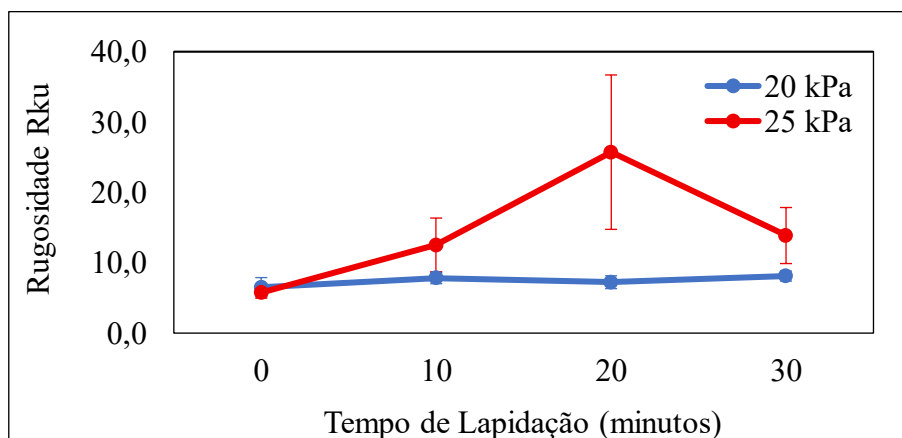
Fonte: Autor.

Na pressão de 25 kPa foi observado uma maior assimetria negativa devido a maior carga

introduzida ter promovido vales mais profundos. Com 20 minutos de lapidação ocorreu a máxima acentuação destes valores sendo a pressão de 25 kPa, cerca de 2,5 vezes superior à pressão de 20 kPa neste tempo. Reiterando a característica do processo para aplicações que retenham fluidos. Na pressão 20 kPa a variação suave de R_{sk} sugere um perfil menos assimétrico, com remoção tanto de picos quanto de vales, resultando em uma superfície moderadamente equilibrada isto é evidenciado pela constância do gráfico entre os tempos de 10 a 30 minutos. Para pressão 25 kPa a grande negatividade de R_{sk} em 20 min ($3,8 \mu\text{m}$) indica vales mais profundos, resultantes de abrasão mais controlada devido ancoramento dos abrasivos que remove os picos e mantém vales funcionais.

Para avaliar o fator de achatamento do perfil (*kurtosis*) segue a Figura 30.

Figura 30 - Valores da rugosidade kurtosis para cada pressão em função do tempo de lapidação.

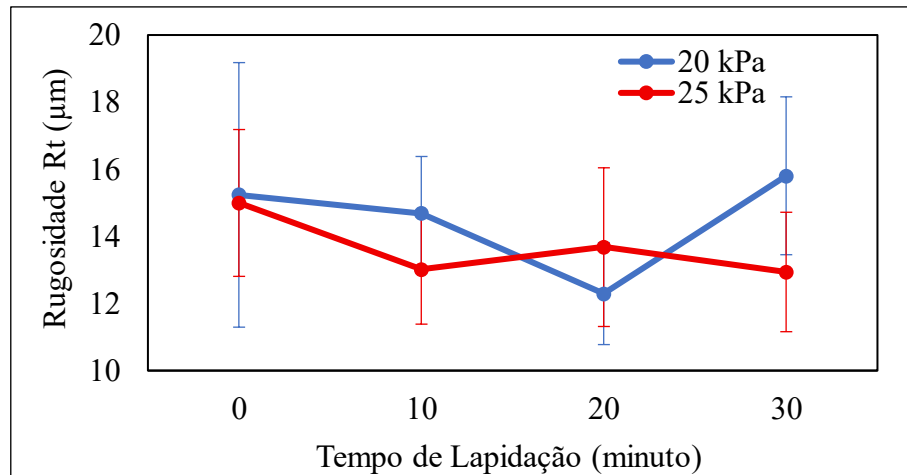


Fonte: Autor.

Por Iavarone (2024) o parâmetro R_{ku} caracteriza a distribuição de altura do perfil. Uma superfície gaussiana tem um valor de curtose de 3. Uma superfície distribuída centralmente tem um valor de curtose maior que 3, enquanto a curtose de uma distribuição bem espalhada é menor que 3. Para a pressão de 20 kPa a rugosidade curtose foi quase totalmente constante com valores próximos de 7. Na pressão de 25 kPa o seu ápice foi com valor de 25,7 em 20 minutos e depois reduzindo para 13,8 no final da lapidação. A maior pressão demonstrou ser mais eficaz em remover picos (“achatamento”) da rugosidade, como visto nos gráficos de perfis da rugosidade da figura 19(c).

Para avaliar a máxima variação entre picos e vales tem-se a rugosidade total, segue a Figura 31.

Figura 31 - Valores da rugosidade total para cada pressão em função do tempo de lapidação.

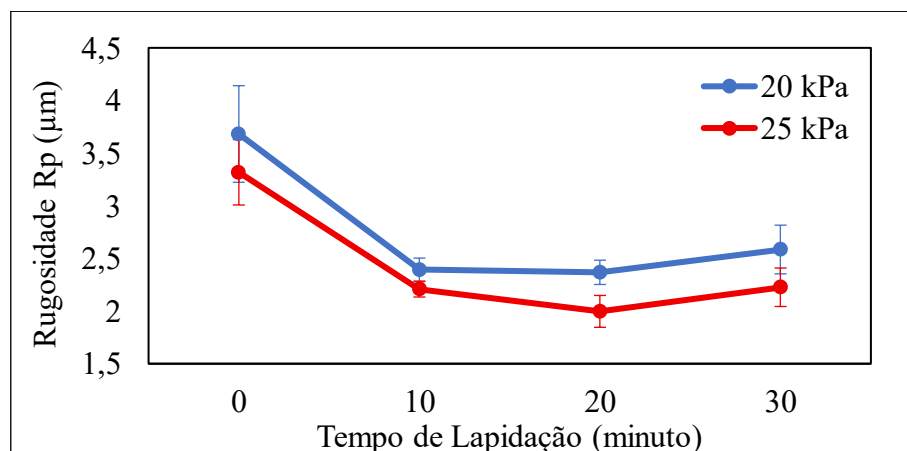


Fonte: Autor.

Este parâmetro indica a máxima variação possível de altura na superfície, sendo particularmente útil para componentes sujeitos a altas tensões, onde qualquer grande distância pico a vale pode ser suscetível a nucleação e propagação de trincas (Iavarone, 2024). Um aspecto observado na pressão de 20 kPa é acentuada inclinação nos últimos 10 minutos de lapidação, o aumento de R_t aos 30 minutos sugere reexposição de vales profundos, como ocorre quando abrasivos soltos voltam gerar remoções frágeis. Na pressão de 25 kPa o menor valor de R_t ao final da lapidação indica que o processo removeu parte das elevações dos picos, reduzindo distanciamento entre picos e vales, resultado típico do maior controle da abrasão dois corpos.

Para avaliar rugosidade altura máxima de pico R_p , segue o gráfico na figura 32.

Figura 32 - Valores da rugosidade altura máxima de pico para cada pressão em função do tempo de lapidação.



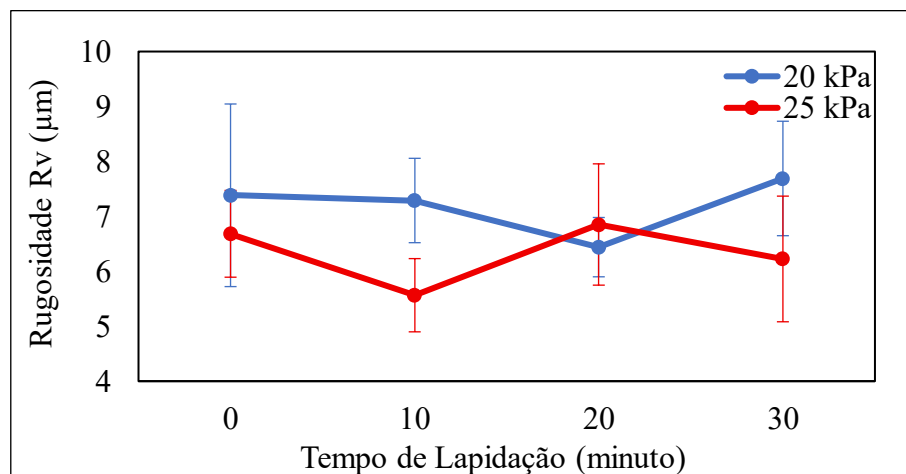
Fonte: Autor.

Os picos são importantes quando se consideram as propriedades de atrito e desgaste,

pois a interação entre as superfícies concentra-se em torno deles (Iavaronne, 2024). Para as duas condições de pressão os valores de maiores picos em cada intervalo de medição tiveram considerável redução, todavia, para ambas as pressões estes resultados, foram na ordem de 50% em comparação de R_p , inicial e final. Para pressão de 20 kPa com mais abrasivos soltos ocorreu ancoragem temporária que permitiu redução dos picos. Na pressão 25 kPa com maior presença de abrasivos fixos no lapidador o valor final de R_p foi um pouco menor.

Para avaliar rugosidade máxima profundidade de vale R_v , segue o gráfico na figura 33.

Figura 33 - Valores da rugosidade máxima profundidade de vales para cada pressão em função do tempo de lapidação.



Fonte: Autor.

Os vales são importantes para o escoamento e a retenção da lubrificação. No entanto, a nucleação e propagação de trincas e a corrosão começam nos vales, portanto sua caracterização e controle são essenciais para garantir as propriedades funcionais do componente (Iavaronne, 2024). A condição de 20 kPa apresentou valores relativamente constantes de R_v , com leve aumento ao final, indicando a permanência ou reexposição de vales profundos, característica comum quando há predominância de abrasão por três corpos com ancoragem parcial dos abrasivos. Em contrapartida, sob 25 kPa, observou-se oscilações dos valores R_v , contudo apresentou vales menos pronunciados ao final em relação a menor pressão.

Para efeito de comparação, na Tabela 4 seguem compilados os valores dos gráficos de parâmetros de rugosidade e adicionalmente é apresentada a capacidade das pressões avaliadas.

Tabela 4 - Resumo dos parâmetros de rugosidade para diferentes pressões e capacidade do processo por pressão.

		Rugosidade Inicial e Final		Capacidade das pressões avaliadas	
		Tempo (minuto)		Valor (μm)	Tempo (minuto)
Parâmetro	Pressão	0	30		
Ra (μm)	20 kPa	1,369	1,081	0,976	20
	25 kPa	1,178	0,894	0,866	10
Rq (μm)	20 kPa	1,922	1,604	1,393	20
	25 kPa	1,618	1,294	1,202	10
Rz (μm)	20 kPa	10,129	10,274	8,842	20
	25 kPa	10,001	8,457	7,763	10
Rsk	20 kPa	-0,529	-1,682	-1,682	10
	25 kPa	-0,978	-2,117	-3,808	20
Rku	20 kPa	6,515	8,11	7,234	20
	25 kPa	5,763	13,866	25,715	20
Rt (μm)	20 kPa	15,235	15,808	12,294	20
	25 kPa	14,995	12,938	12,938	30
Rp (μm)	20 kPa	3,681	2,584	2,367	10
	25 kPa	3,318	2,226	1,997	20
Rv (μm)	20 kPa	7,383	7,689	7,689	30
	25 kPa	6,682	6,225	6,852	20

Fonte: Autor

Lapidação é um importante processo como etapa final para correção de planeza definida pela variação de espessura em peças de *wafers* sendo fundamental para garantir controle dimensional e desempenho das aplicações destes componentes (Marinescu, 1999; Lee, J. *et al.*, 2009; Lee, H. E Jeng, H., 2015; *apud* Lee *et al.* 2016). A variação total de espessura é fortemente impactada por parâmetros do processo de lapidação como tempo, pressão, velocidade e características do lapidador e abrasivo. Portanto controle desses parâmetros é determinante para minimizar defeitos e garantir uniformidade no desbaste superficial (Mahamad Sahab, *et al.*, 2013 e Lee *et al.*, 2016). As medidas das variações de espessura obtidas nos ensaios experimentais para cada condição de pressão serão apresentados conforme a tabela e gráfico, a seguir.

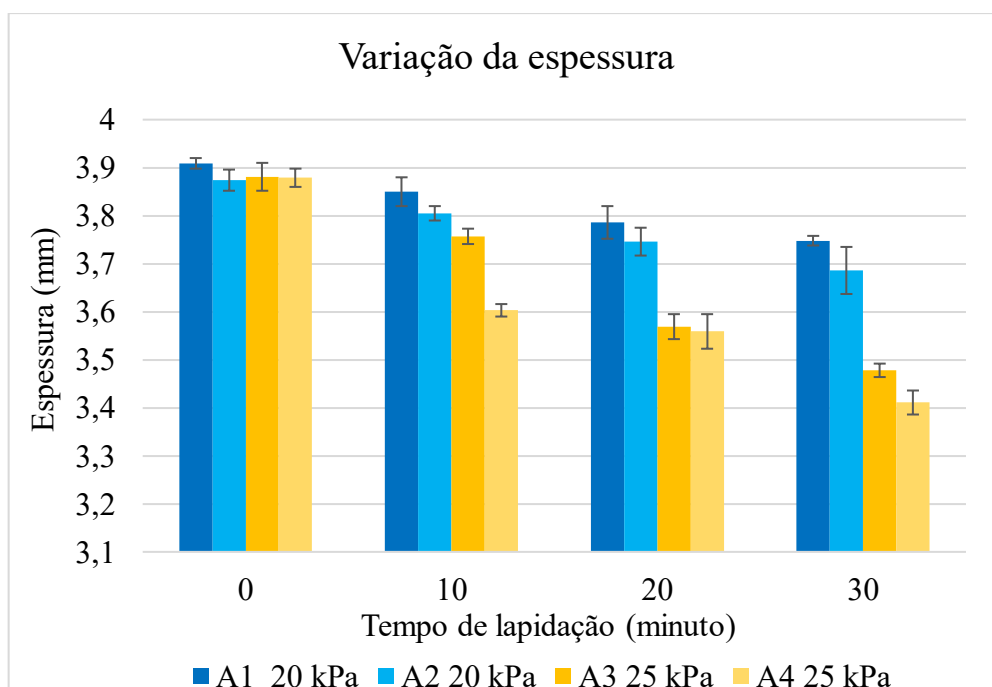
Tabela 5 - Medições das variações de espessura para cada nível de pressão e variação total.

		20 kPa				25 kPa			
		Amostra 1 (A1)	Desvio Padrão	Amostra 2 (A2)	Desvio Padrão	Amostra 3 (A3)	Desvio Padrão	Amostra 4 (A4)	Desvio Padrão
		espessura (mm)				espessura (mm)			
Tempo (min)	0	3,909	0,011	3,874	0,022	3,881	0,029	3,879	0,019
	10	3,85	0,030	3,805	0,015	3,757	0,016	3,603	0,013
	20	3,786	0,034	3,746	0,029	3,569	0,026	3,559	0,036
	30	3,748	0,010	3,686	0,049	3,478	0,014	3,411	0,025
		0,161 Variação Total		0,188 Variação Total		0,403 Variação Total		0,468 Variação Total	

Fonte: Autor.

Na tabela para além dos valores das variações de espessura medidos durante os ensaios experimentais é apresentado também a variação total que exprime a subtração entre a espessura inicial (0 minuto) e a final (30 minuto), valores estes que permite avaliar a magnitude imposta por cada pressão neste parâmetro de saída.

Figura 34 – Gráfico da variação da espessura de cada amostra por tempo de lapidação.



Fonte: Autor.

As sucessivas variações de espessura de cada amostra na pressão de 20 kPa reduziram gradativamente com valores entre 1 a 1,8 % durante todo o tempo de lapidação, isto ocorreu

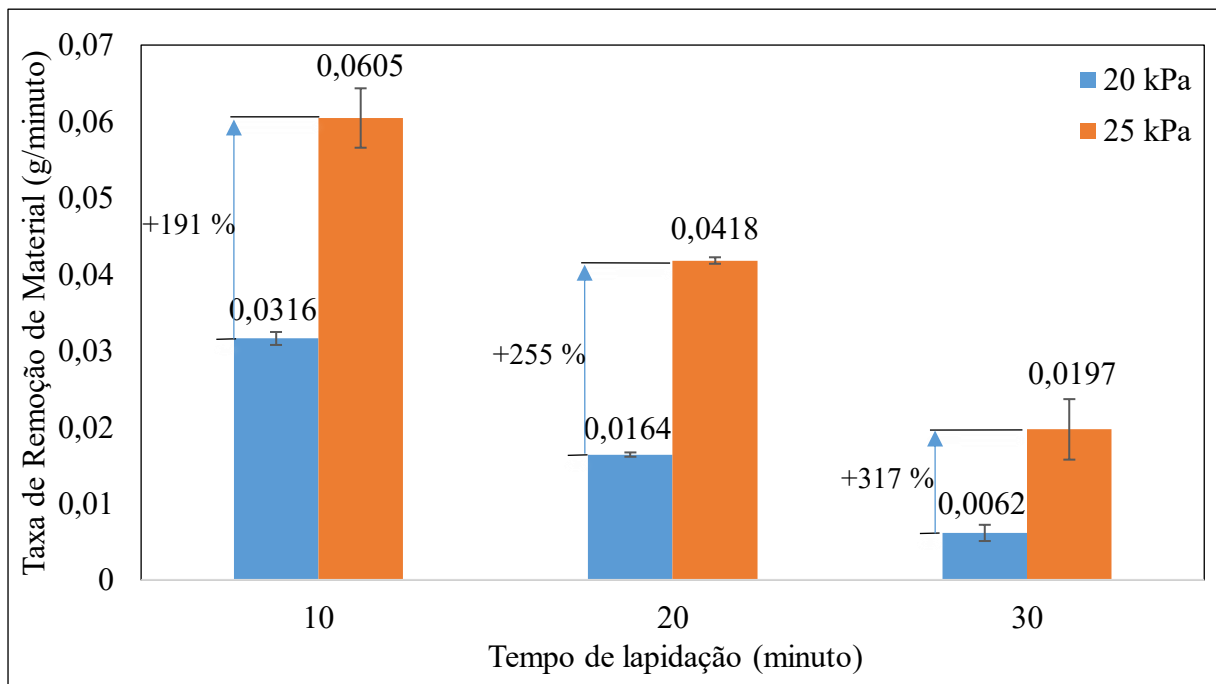
pela imposição de menor carga ao processo onde as remoções foram mais brandas o que resultou em variações totais das espessuras de cada amostra serem muito inferiores quando comparadas às obtidas pelas amostras na maior pressão, vide variação total na tabela 5. Para a pressão de 25 kPa, as sucessivas reduções de espessura para cada amostra não foram graduais, com destaque para redução de 8 % da amostra 4 nos decorrida nos primeiros 10 minutos, o que em termos dimensionais significou 0,276 mm. A condição mais severa de pressão alcançou reduções média de espessura final 2,5 vezes superior a alcançada pela menor pressão.

Foram aquisitadas as taxas de remoção de material (TRM) em função do tempo e pressão de lapidação são apresentadas na Figura 35. A pressão de 25 kPa apresentou TRM superiores a pressão de 20 kPa e ambas decresceram durante os 30 minutos de lapidação avaliados. Estes resultados estão de acordo com Kim *et al.* (2015).

Justifica-se o decaimento da eficiência do processo pelo fato de os abrasivos terem sido adicionados somente no início e a lama ficar contida sobre o lapidador, aumentando gradativamente a concentração de cavacos de alumina e de cavacos do lapidador que também se desgasta (porém menos que a alumina pelo efeito de ancoramento dos abrasivos), além do desgaste dos abrasivos que, por serem de diamante monocristalino, são menos suscetíveis a fraturar e formar novas arestas de corte (menor friabilidade) do que os abrasivos policristalinos. Esta mesma constatação foi evidenciada por Cheng *et al.*, (2021) arestas de corte afiadas possuem alta capacidade de microcorte, porém, ela decai quando as arestas de corte tornam-se “cegas” sendo um desafio exigente manter uma alta taxa de remoção de material inicial por um período prolongado de processamento.

Destaca-se que a ação de ancoramento dos abrasivos foi eficiente em minimizar o desgaste do lapidador. Não foi detectada a formação de canal no lapidador mesmo após uma hora e trinta minutos de ensaios.

Figura 35 - Taxa de remoção de material (TRM) em g/minuto em função do tempo e pressão de lapidação.



Fonte: Autor.

A pesquisa demonstrou que foi possível alcançar resultados determinísticos, eficientes, sustentáveis e de precisão com tecnologias nacionais. Dessa forma, contribuindo para o desenvolvimento do ecossistema de inovação brasileiro por meio da ciência e tecnologia aplicadas as demandas estratégicas de manufatura de materiais avançados.

5 CONCLUSÕES

Quanto as amostras de aluminas policristalinas sem lapidação, conclui-se que suas microestruturas foram compostas de aglomerados de grãos e de grãos homogêneos, com porosidade elevada homogeneamente distribuída que compromete negativamente alcançar menores valores de rugosidade.

A lapidação de aluminas policristalinas com disco lapidador de alumínio foi capaz de fornecer R_a de 0,894 μm para maior pressão com emprego de apenas 25 mL de água destilada como veículo de lapidação e fluido de corte e partículas de diamante monocristalino de 54 μm de diâmetro médio em 30 minutos de lapidação.

Quanto aos mecanismos de remoção, houve predomínio do modo frágil por abrasão três corpos em ambas condições de pressão, que promoveu microfraturas inter e transgranulares, com presença em menor quantidade de micro ranhuramento, micro sulcamento e micro corte, promovidos preferencialmente por abrasão dois corpos.

O aumento da pressão de lapidação promoveu maiores deformações plásticas na alumina, resultando em trilhas de remoção mais largas na microestrutura policristalina.

No que tange o acabamento, menores valores dos parâmetros de rugosidade foram produzidos com o incremento da pressão de lapidação, com exceção do parâmetro R_{ku} , sugerindo que os mecanismos de remoção em modo dúctil melhoram o acabamento para aplicações específicas.

Para a pressão de 25 kPa, o aumento do R_{ku} e a redução do R_{sk} , inclusive este com valores negativos, demonstra a eficiência do processo de lapidação nas condições estudadas para entregar superfícies caracterizadas por platôs com predomínio de vales e remoção dos picos, condição favorável para aplicações em superfícies de deslizamento para reter lubrificante.

A maior pressão de lapidação resultou na maior taxa de remoção de material (TRM), sem, contudo, comprometer o acabamento, sendo praticamente o triplo da obtida com a menor pressão avaliada. Ao longo do período de lapidação, a TRM decaiu em função da perda da capacidade de corte pelo desgaste do abrasivo e contaminação da lama com cavacos de alumina e alumínio. O diamante monocristalino é menos suscetível a fratura e formação de novas arestas de corte.

Quanto ao uso da água destilada como veículo de lapidação e fluido de corte, os resultados foram favoráveis ao processo de remoção da alumina e a sustentabilidade, eliminando a necessidade de óleos e solventes que facilitam a limpeza e reduzem o custo

operacional.

A lapidorretificadora Fiocchi foi capaz de usinar peças cerâmicas precisas mesmo sem possuir elevada rigidez estrutural, associando soluções de projeto de engenharia que demonstram a viabilidade para alcançar resultados determinísticos, eficientes, sustentáveis e de precisão com tecnologias nacionais que fomentam a inovação.

SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, por fim, investigar outros materiais maleáveis para o lapidador e condições de texturização do lapidador que promovam a ancoragem mecânica dos abrasivos. Investigar, também, as influências de: (a) outras pressões de lapidação, (b) diferentes tipos e diâmetros de abrasivos, (c) veículos ecológicos e biodegradáveis e (d) a relação de rotação entre porta-peça e lapidador que promoverão diferentes padrões de trajetórias cicloidais com vistas a aumentar o microcorte e reduzir a introdução de defeitos críticos na superfície e subsuperfície, melhorando o desempenho do produto.

REFERÊNCIAS

ABLYAZ, T.; GASHEV, Y.; MURATOV, K. Precision processing of ceramics by the raster machine. **MATEC Web of Conferences**, n. 329, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202032903012>.

ABU, A. *et al.* Pressure variation of developed lapping tool on surface roughness. **Conference Series: Materials Science and Engineering**, n. 290, Kuala Lumpur, Malaysia, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/290/1/012014>.

ABYZOV, A. M. Aluminum oxide and alumina ceramics: Review. Part 3. Russian Manufacturers of Alumina Ceramics. **Refractories and Industrial Ceramics**, v. 60, n.5, p. 183-191, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11148-020-00398-z#citeas>.

ALAO, A-R. Review of ductile machining and ductile-brittle transition characterization mechanisms in precision/ultraprecision turning, milling and grinding of brittle materials. **Precision Engineering**, vol. 88, p 279-299, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2024.02.012>.

ANTWI, E. K.; LIU, K.; WANG, H. A review on ductile mode cutting of brittle materials. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 13, n. 2, p. 251-263, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11465-018-0504-z>.

BARYLSKI, A.; PIOTROWSKI, N. Non-conventional approach in single-sided lapping process: kinematic analysis and parameters optimization. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 100, n. 1, p. 589-598, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S00170-018-2644-Z>.

BHARATHI, V. *et al.* A review on the challenges in machining of ceramics. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 1451-1458, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.019>.

BIFANO, T. G.; DOW, T. A.; SCATTERGOOD, R. O. Ductile-regime grinding: A new technology for machining brittle materials. **Journal of Engineering for Industry**, v. 113, n. 2, p. 184-189, 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2899676>.

BIN, L. *et al.* Theoretical and experimental investigation on surface generation and subsurface damage in fixed abrasive lapping of optical glass. **International journal of mechanical sciences**, v. 215, n. 106941, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106941>.

BOCH P.; NIEPCE J-C. **Ceramic Materials: Processes, Properties, and Applications**. Publishing Company: John Wiley & Sons, 2007. 512 p. ISBN 9781905209231.

BRINKSMEIER E. *et al.* Ultra-precision grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 59, Issue 2, p. 652-671, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850610001885>.

BUIJS, M.; KORPEL-VAN HOUTEN, K. Three-body abrasion of brittle materials as studied by lapping. **Wear**, v. 166, n. 2, p. 237-245, 1993. Disponível em : [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(93\)90267-P](https://doi.org/10.1016/0043-1648(93)90267-P).

CHANDRASEKAR, S.; FARRIS, T. N.; BHUSHAN, B. Ceramics for magnetic recording applications. **Friction and wear of ceramics**, publisher: CRC Press, p. 448, 1993.

CHANG, Y. P.; HASHIMURA, M.; DORNFELD, D. A. An investigation of material removal mechanisms in lapping with grain size transition. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 122, n. 3, p. 413-419, 1 jan. 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.1286471>.

CHEN, J.; PENG, Y. Super hard and brittle material removal mechanism in fixed abrasive lapping: Theory and modeling. **Tribology International**, v. 184, n. 108493, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108493>.

CHEN, J. *et al.* A novel agglomerated diamond abrasive with excellent micro-cutting and self-sharpening capabilities in fixed abrasive lapping processes. **Wear**, v. 464, n. 203531, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203531>.

CHEVALIER, J.; GREMILLARD, L.; DEVILLE, S. Low-temperature degradation of zirconia and implications for biomedical implants. **Annual Review of Materials Research**, v. 37, n. 1, p. 1-32, ago. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.37.052506.084250>.

DENG, J. *et al.* Optimisation of lapping process parameters for single-crystal 4H-SiC using orthogonal experiments and grey relational analysis. **Micromachines**, v. 12, n. 910, p 1-27. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/mi12080910>.

EVANS, C. *et al.* Material removal mechanisms in lapping and polishing. **CIRP Annals**, vol 52, p.611-633, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60207-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60207-8).

FANG, F. Z.; CHEN, L. J. Ultra-precision cutting for ZKN7 glass. **CIRP Annals**, v. 49, n. 1, p. 17-20, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62887-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62887-X).

FANTOZZI, G. Welcome to Ceramics: A New Open Access Scientific Journal on Ceramics Science and Engineering. **Ceramics**, v. 1, n. 1, p. 1-2, 20 out. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ceramics1010001>.

FIOCCHI, Arthur Alves. **Avanços no desenvolvimento de um processo de acabamento para peças planas submetidas à cinemática de lapidação sobre um rebolo dressado com grau de recobrimento**. 2010. 143 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2010. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/59f09ccd-dd7b-4239-b2961010a9a20b89>.

FIOCCHI, Arthur Alves. **Ciência e tecnologia da manufatura de ultraprecisão de cerâmicas avançadas: lapidorrificação Ud de superfícies planas de zircônia tetragonal policristalina estabilizada com ítria**. 2014. 336 f Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18146/tde-30032015-094410/>.

FIOCCHI, A. A.; FORTULAN, C. A.; SANCHEZ, L. E. A. Ultra-precision face grinding with constant pressure, lapping kinematics, and SiC grinding wheels dressed with overlap factor. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 79, n. 9–12, p. 1531–1543, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-6933-5>.

FIOCCHI, A. A., *et al.* The ultra-precision Ud-lap grinding of flat advanced ceramics. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 231, p. 336–356, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013615301588>.

FRANÇA, Thiago Valle. **Estudo da predição da circularidade e rugosidade de peças retificadas utilizando as redes neurais artificiais**. 2005. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2005. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/6624cd37-caaa-4e89-bf84-18bee3a10d3d>.

FUJITA, Humberto. **Retificação da alumina com rebolo diamantado usando diferentes métodos de lubri-refrigeração**. 2007. 100 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências de Bauru, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/a80f209b-15a6-4ec7-a1fe-84a2f173a6ee>.

GAGLIARDI, J. A. Case for 2-body material removal in prime LED sapphire substrate lapping and polishing. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 15, p. 348-354, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2012.11.005>.

GATES, J. D. Two-body and three-body abrasion: a critical discussion. **Wear**, v. 214, n. 1, p. 139-146, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00188-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00188-9).

HAO, N. L.; DRAGOS, A. Textured grinding wheels: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 109, p. 8-35, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089069551630075X>.

HASOON AL-MOAMERI, H. *et al.* A review on the biomedical applications of

alumina. **Journal of Engineering and Sustainable Development**, v. 24, n. 05, p. 28-36, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.31272/jeasd.24.5.5>.

IAVARONE, Rafael Liberatti. **Efeito da aplicação de fluidos de corte com inibidores voláteis de corrosão no desempenho da retificação do aço ABNT 4340 endurecido**. 2024. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/10553f19-d1b9-4ee4-99cb-4a038db97d1d>.

KAR, S. *et al.* Grinding of hard and brittle ceramic coatings: Force analysis. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 40, n. 4, p. 1453-1461, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.12.058>.

KIM, H-M. *et al.* Comparison between sapphire lapping processes using 2-body and 3-body modes as a function of diamond abrasive size. **Wear**, v. 332-333, p. 794-799, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.029>.

KOENIG, Wilfried; SINHOFF, Volker. Ductile grinding of ultraprecise aspherical optical lenses. **Lens and Optical Systems Design**, v. 1780, p. 778-788, 1993. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/12.142836>.

KOVALCHENKO, A. M.; MILMAN, Yu V. On the cracks self-healing mechanism at ductile mode cutting of silicon. **Tribology International**, v. 80, p. 166-171, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X14002618>. Acesso em: 12 abr. 2025

LEE, E-S. *et al.* A study on the characteristic of parameters by the response surface method in final wafer polishing. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 10, n. 3, p. 25-30, 2009. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12541-009-0043-y>.

LEE, H.; JEONG, H. Analysis of removal mechanism on oxide CMP using mixed abrasive slurry. **International Journal of Precision Engineering Manufacturing**. v. 16, No. 3, p. 603-607, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12541-015-0081-6>.

LEE, T. *et al.* Effect of platen shape on evolution of total thickness variation in single-sided lapping of sapphire wafer. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 3, n. 3, p. 225-229, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-016-0029-z>.

LI, C. *et al.* Understand anisotropy dependence of damage evolution and material removal during nanoscratch of MgF₂ single crystals. **International Journal of Extreme Manufacturing**, v. 5, n. 1, 2022. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-7990/ac9eed/meta>.

LI, L. *et al.* Research on the generation mechanism of surface and subsurface damage in loose abrasive lapping of RB-SiC ceramics. **Optics Express**, v. 32, n. 21, p. 37556, 2 out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1364/oe.539765>.

LI N.H. *et al.*, Analytical modeling of grinding-induced subsurface damage in monocrystalline silicon, **Materials & Design**, Volume 130, Pages 250-262, 2017. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.05.068>.

LIU, N. *et al.* Kinematics and trajectory analysis of swinging fixed abrasive plane lapping: Effect of swinging mode on the lapping uniformity. **Precision Engineering**, v. 86, p. 331-341, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2023.12.014>.

NANNAN, Z. *et al.* Research of subsurface damage depth of lithium niobate crystal by fixed-abrasive lapping. **Integrated ferroelectrics**, v. 209, n. 1, p. 181-187, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10584587.2020.1728828>.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding technology: theory and application of machining with abrasives**. Industrial Press Inc., 2008.

MAHAMAD SAHAB, A. R *et al.* Effect of double sided process parameters in lapping silicon wafer. **Applied Mechanics and Materials**, vol. 393, p. 259–265, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.393.259>.

MARINESCU, I.D.; TONSHOFF, H. K.; INASAKI, I. **Handbook of ceramic grinding e polishing**, editora: William Andrew, p. 94-189, 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815514244500056>.

MARINESCU, I.D. **Handbook of advanced ceramics machining**. publisher: CRC press, 2007.

MARINESCU, I.D.; DOI, T; UHLMANN, E. **Handbook of ceramics grinding and polishing**. Ed. 2ª, publisher: William Andrew, 2015.

MULHEARN, T. O.; SAMUELS, L. E. The abrasion of metals: a model of the process. **Wear**, v. 5, n. 6, p. 478-498, 1962. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043164862900649>

ÖPÖZ, T. T.; CHEN, X. Experimental investigation of material removal mechanism in single grit grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 63, p. 32-40, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.07.010>.

OTITOJU, A. T. *et al.* Advanced ceramic components: Materials, fabrication, and applications. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 85, p. 34-65, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.02.002>.

PANDIYAN, V. *et al.* Modelling and monitoring of abrasive finishing processes using artificial intelligence techniques: A review. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 57, p 114-135, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.013>

PAWAR, P.; BALLAV, R.; KUMAR, A. An overview of machining process of alumina and alumina ceramic composites. **Manufacturing Science and Technology**, v. 3, n. 1, p. 10-15, 2015. Disponível em: DOI: 10.13189/mst.2015.030102.

PYUN, H-J. *et al.* Fabrication of high performance copper-resin lapping plate for sapphire: A combined 2-body and 3-body diamond abrasive wear on sapphire. **Tribology International**, v. 120, p. 203-209, abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.037>.

POURMADADI, M. *et al.* Curcumin delivery and co-delivery based on nanomaterials as an effective approach for cancer therapy. **Journal of drug delivery science and technology**, v. 78, n. 103982, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1773224722008930>.

RAKSHIT, R.; DAS, A. K. A review on cutting of industrial ceramic materials. **Precision Engineering**, v. 59, p. 90-109, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.05.009>

SANCHEZ, L.E.A.; JUN, N.Z.X.; FIOCCHI, A.A. Surface finishing of flat pieces when submitted to lapping kinematics on abrasive disc dressed under several overlap factors, **Precision Engineering**, Volume 35, Issue 2, Pages 355-363, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.09.012>.

SAVAZ O. *et al.*, Determination of lapping parameters for silicon wafer using an artificial neural network. **Journal of Materials Science: Materials Electronics**, vol. 29, p. 260– 270, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10854-017-7912-4>.

SEDRIKS, A. J.; MULHEARN, T. O. Mechanics of cutting and rubbing in simulated abrasive processes. **Wear**, v. 6, n. 6, p. 457-466, 1963. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(62\)90064-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(62)90064-9).

SLIKKERVEER, P. J.; BOUTEN, P. C. P.; DE HAAS, F. C. M. High quality mechanical etching of brittle materials by powder blasting. **Sensors and actuators A: Physical**, v. 85, n. 1-3, p. 296-303, 2000. Disponível em : [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(00\)00343-5](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(00)00343-5).

SUBHASH, G.; KLECKA, M. Ductile to brittle transition depth during single-grit scratching on alumina ceramics. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 90, n. 11, p. 3704-3707, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.01970.x>.

SUN, Yufei *et al.* Recent Advancements in Alumina-Based High-Temperature Insulating Materials: Properties, Applications, and Future Perspectives. **High-Temperature Materials**, v. 2, n. 1, p. 10001, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.70322/htm.2025.10001>.

TOUGE, M.; MATSUO, T. Removal Rate and Surface Roughness in High-Precision Lapping of Mn-Zn Ferrite. **CIRP Annals**, v. 45, n. 1, p. 307-310, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)63069-8](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)63069-8).

UHLMANN, E.; ARDELT, T.; SPUR G. Influence of Kinematics on the Face Grinding Process on Lapping. **Machines CIRP Annals**, Volume 48, Issue 1, 1999, Pages 281-284, ISSN 0007-8506, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63184-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63184-9)

ZANOTTO, E.D.; MIGLIORE, A.R. Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: uma introdução. **Cerâmica**. v.37, n.247, p.7-17, 1991

ZHAO, T., *et al.* Experimental study on the influence of lapping plate materials on the quality of both sides cylindrical rollers machining. **Scientific Reports** vol.15, número do artigo: 1858, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85260-3>.

ZHONG, Z. W. Ductile or partial ductile mode machining of brittle materials. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 21, p. 579-585, 2003.

ZHOU, T. *et al.* A Study on the material removal characteristics and damage mechanism of lapping for pressureless sintered silicon carbide (SSiC) microlens cavity. **Micromachines**, v. 14, n. 6, p. 1162, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/mi14061162>.

ZHU, J. *et al.* Simulation and experimental research on the abrasive trajectories of plane lapping based on rotary swing drive. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 238, n. 12, p. 1750-1760, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/09544054231210023>.

ZUM GAHR, K.H. **Microstructure and wear of materials**. Book. Elsevier, 1987.

WANG, Z. *et al.* Friction and wear characteristics of agglomerated diamond abrasives and lapping performance of fixed agglomerated diamond pads. **Wear**, v. 470, p. 203598, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203598>.

YUAN, J. *et al.* Kinematics and trajectory of both-sides cylindrical lapping process in planetary motion type. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 92, p. 60-71, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.IJMACHTOOLS.2015.02.004>.