

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

**MATEUS OLIVEIRA MONTEIRO**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA MICRORRETIFICAÇÃO DE**  
**CANAIS EM QUARTZO -  $\alpha$**



São Carlos - SP  
2025

**MATEUS OLIVEIRA MONTEIRO**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA MICRORRETIFICAÇÃO DE  
CANAIS EM QUARTZO -  $\alpha$**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Orientador: Prof. Dr. Luis Antonio Oliveira Araujo.

São Carlos - SP

2025



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

---

### Folha de Aprovação

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Mateus Oliveira Monteiro, realizada em 06/06/2025.

#### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Luis Antonio Oliveira Araujo (UFSCar)

Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi (UFU)

Prof. Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura (UFSCar)

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



"Nesta longa estrada da vida, vou correndo e não posso parar."

Milionário & José Rico

## **Agradecimentos**

Aos meus familiares e amigos, em especial avós, pai, mãe, irmão e noiva, por todo apoio prestado. Em memória de Almindo de Oliveira, que sempre foi um exemplo de força e determinação.

Aos meus amigos que contribuíram com os estudos durante o mestrado Gabriel, Roberto, Shalom.

Ao professor Dr. Luis Antonio Oliveira Araujo, pela orientação do projeto.

Ao professor Prof. Dr.Ing. Carlos Eiji Hirata Ventura, pela contribuição no projeto.

À empresa KG Sorensen por confiar no projeto e apoiar com o fornecimento dos microrrebolos.

Aos técnicos do DEMec, pelo suporte e prestação de ajuda em diversos momentos.

Ao Instituto Federal de São Paulo campus Sertãozinho, principalmente ao Prof. Dr. Paulo Donato Frighetto e ao aluno Víctor Hugo C. Trindade, pelo suporte e prestação de ajuda em diversos momentos.

À CAPES, pelo apoio financeiro com a bolsa de estudos, e ao CNPQ, pelo apoio financeiro para disponibilização dos equipamentos e materiais necessários à pesquisa (Processos CNPQ: 434480/2018-5).

## Resumo

Os monocristais, como o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), apresentam propriedades mecânicas atrativas, como arranjo atômico regular, estabilidade dimensional em altas temperaturas e baixa massa, tornando-os relevantes em aplicações de sensores e ressonadores eletrônicos. Este trabalho foca no estudo da microrretificação do quartzo- $\alpha$  no plano AT, visando avaliar a viabilidade da aplicação desse processo em materiais duros e frágeis, comparando-o com o processo disco abrasivo. Foi utilizado um microrrebolo de 1,2 mm de diâmetro com abrasivos de 30  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio equivalente, analisando o efeito da variação dos parâmetros de usinagem, profundidade de corte, avanço por revolução e rotação da ferramenta, sobre a qualidade da superfície usinada. O volume removido por revolução (VRR), obtido com base no trabalho com disco abrasivo de Araújo (2015), serviu como referência para garantir comparabilidade tecnológica entre os processos, por meio do resultado do tamanho médio das falhas. Foram realizados 18 ensaios com microrrebolos do modelo KG Sorensen FG 1093FF, sob diferentes condições, buscando avaliar a formação de danos críticos (lascas) por meio de microscopia óptica, além da possível influência do entupimento dos bolsões (*pockets*) da ferramenta, que impacta no mecanismo de remoção do quartzo. Os resultados indicaram que, embora o microrrebolo seja mais sensível às variações de VRR, com falhas aumentando de forma mais acentuada, ele oferece vantagens significativas em contextos de usinagem de precisão, pois sua geometria permite usinagens com formas complexas, superando limitações do corte com disco abrasivo. O microrrebolo se mostrou especialmente eficaz no corte com profundidade de 0,1 mm e nos avanços 0,0001290; 0,000042 e 0,000025 mm/rev, onde não houve impacto significativo no mecanismo de remoção e no desempenho de corte. Conclui-se que, mesmo com desafios como: o desgaste acentuado do microrrebolo e um acúmulo de material nos *pockets*, o processo de microrretificação tem potencial para a fabricação de componentes miniaturizados, sendo promissor para aplicações onde a precisão e a complexidade geométrica são essenciais.

**Palavras-chave:** Quartzo; Microrretificação; Retificação; Abrasivo; Monocristal.

## *Abstract*

Single crystals, such as quartz ( $\text{SiO}_2$ ), exhibit attractive mechanical properties, including a regular atomic arrangement, dimensional stability at high temperatures, and low mass, making them relevant in applications such as sensors and electronic resonators. This study focuses on the microgrinding of  $\alpha$ -quartz on the AT-cut plane, aiming to evaluate the feasibility of applying this process to hard and brittle materials, in comparison to the abrasive disc process. A microgrinding tool with a 1.2 mm diameter and abrasive grit with an average equivalent diameter of 30  $\mu\text{m}$  was used to analyze the effect of varying machining parameters — depth of cut, feed per revolution, and tool rotation — on the quality of the machined surface. The volume removed per revolution (VRR), based on the abrasive disc work by Araújo (2015), served as a reference to ensure technological comparability between processes by assessing the average size of surface defects. A total of 18 experiments were conducted using KG Sorensen FG 1093FF microgrinding tools under different conditions, aiming to evaluate the formation of critical damage (chipping) through optical microscopy, in addition to investigating the potential influence of pocket clogging in the tool, which affects the quartz removal mechanism. The results indicated that although the microgrinding tool is more sensitive to variations in VRR, with a sharper increase in surface defects, it offers significant advantages in precision machining contexts. Its geometry allows for complex shape machining, overcoming the limitations of abrasive disc cutting. The microgrinding tool proved particularly effective at a cutting depth of 0.1 mm and feed rates of 0.0001290; 0.000042; and 0.000025 mm/rev, where no significant impact on the removal mechanism or cutting performance was observed. It is concluded that, despite challenges such as pronounced tool wear and material accumulation in the tool pockets, the microgrinding process holds potential for the manufacturing of miniaturized components and is promising for applications where precision and geometric complexity are essential.

**Keywords:** Quartz; Micro grinding; Grinding; Abrasive; Single crystal.

## Lista de Figuras

Figura 1 – Processo de usinagem abrasiva. ....	4
Figura 2 – Operações básicas da microrretificação .....	5
Figura 3 – Tamanhos dos abrasivos nos rebolos .....	6
Figura 4 – Representação dos mecanismos de remoção de material .....	8
Figura 5 – Formação da superfície material frágil.....	9
Figura 6 – Modelo de remoção dúctil em materiais frágeis.....	10
Figura 7 – Tetraedro silício-oxigênio .....	11
Figura 8 – Diagrama de fase do quartzo .....	12
Figura 9 – Planos cristalinos no cristal de quartzo .....	13
Figura 10 – Geometria molecular de um cristal de quartzo “esquerdo” e “direito”.....	14
Figura 11 – Diferentes cortes do monocristal de quartzo .....	14
Figura 12 – Mecanismo de lascamento e trincamento superficial.....	16
Figura 13 – Contato entre o diamante do rebolo e a superfície .....	17
Figura 14 – Método para avaliar as dimensões de lascas e trincas .....	18
Figura 15 – Fluxograma da metodologia da pesquisa .....	20
Figura 16 – Máquina C3L.....	22
Figura 17 – Máquina C3L pronta para uso .....	22
Figura 18 – Em a) imagem do modelo FG 3228F 1,8 mm. Em b) uma imagem de microscópio focando na distribuição dos abrasivos de diamantes. Em c) uma imagem focando no perfil abrasivo da ferramenta.....	23
Figura 19 – Microrrebolo KG Sorensen FG3228F .....	24

Figura 20 – Em a) imagem do modelo FG 1093EF 1,2 mm. Em b) uma imagem de microscópio focando na distribuição dos abrasivos de diamantes. Em c) uma imagem focando no perfil abrasivo da ferramenta.....	25
Figura 21 – Microrrebolo KG Sorensen FG 1093FF.....	25
Figura 22 – Em a) Planejamento de trajetória do microrrebolo 1. b) Usinagem realizada pelo microrrebolo 1.....	26
Figura 23 – Microrrebolo FG 3228F. ....	27
Figura 24 – Borda superior da Amostra 1.....	27
Figura 25 – Em a) Planejamento de trajetória do microrrebolo 2. b) Usinagem realizada pelo microrrebolo.....	29
Figura 26 – Em a) Microrrebolo após a usinagem. b) Microrrebolo após a usinagem vista no microscópio.....	29
Figura 27 – Microrrebolo FG 1093FF. ....	30
Figura 28 – Borda superior da Amostra 2.....	30
Figura 29 – <i>Wafer</i> de quartzo- $\alpha$ , plano AT.....	32
Figura 30 – <i>Wafer</i> quartzo- $\alpha$ , plano AT, colado no vidro de sacrifício.....	32
Figura 31 – Representação técnica da microrretificação dos canais com variação de parâmetros de corte.....	36
Figura 32 – Sistema de fixação do <i>wafer</i> de quartzo- $\alpha$ na bancada de usinagem.....	37
Figura 33 – <i>Wafer</i> de quartzo- $\alpha$ imerso em água durante o processo de usinagem com microrrebolo abrasivo .....	38
Figura 34 – Regiões de análise das lascas ao longo da trilha de usinagem .....	39
Figura 35 – Em a) Microscopia do canal com as maiores falhas. b) Microscopia do canal com as menores falhas.....	41

Figura 36 – Em a) Perfilometria do microrrebolo com pior resultado. b) Perfilometria do microrrebolo com melhor resultado. c) Perfilometria do microrrebolo novo.....	42
Figura 37 – Falhas <i>versus</i> Profundidade de corte - $f = 0,000129$ mm/rev & $n = 10\ 000$ rpm.	43
Figura 38 – Falhas <i>versus</i> Profundidade de corte - $f = 0,00129$ mm/rev & $n = 10\ 000$ rpm...	44
Figura 39 – Falhas <i>versus</i> Profundidade de corte - $f = 0,00645$ mm/rev & $n = 10\ 000$ rpm...	44
Figura 40 – Falhas <i>versus</i> Profundidade de corte - $f = 0,0000254$ mm/rev & $n = 20\ 000$ rpm .....	45
Figura 41 – Falhas <i>versus</i> Profundidade de corte - $f = 0,000254$ mm/rev & $n = 20\ 000$ rpm.	45
Figura 42 – Falhas <i>versus</i> Profundidade de corte - $f = 0,00127$ mm/rev & $n = 20\ 000$ rpm...	46
Figura 43 – Falhas <i>versus</i> Avanço - $z = 0,1$ mm & $n = 10\ 000$ rpm.....	47
Figura 44 – Falhas <i>versus</i> Avanço - $z = 0,35$ mm & $n = 10\ 000$ rpm.....	47
Figura 45 – Falhas <i>versus</i> Avanço - $z = 0,1$ mm & $n = 15\ 000$ rpm.....	48
Figura 46 – Falhas <i>versus</i> Avanço - $z = 0,35$ mm & $n = 15\ 000$ rpm.....	48
Figura 47 – Falhas <i>versus</i> Avanço - $z = 0,1$ mm & $n = 20\ 000$ rpm.....	49
Figura 48 – Falhas <i>versus</i> Avanço - $z = 0,35$ mm & $n = 20\ 000$ rpm.....	49
Figura 49 – Falhas <i>versus</i> Borda - $n = 10\ 000$ rpm.....	50
Figura 50 – Falhas <i>versus</i> Borda - $n = 15\ 000$ rpm.....	51
Figura 51 – Falhas <i>versus</i> Borda - $n = 20\ 000$ rpm.....	52
Figura 52 – Falha <i>versus</i> Volume Removido por revolução ( $\text{mm}^3/\text{rev}$ ) .....	53

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Medidas da profundidade das lascas da Amostra 1. ....	28
Tabela 2 – Medidas da largura do canal da Amostra 1 .....	28
Tabela 3 – Medida da profundidade das lascas da Amostra 2. ....	31
Tabela 4 – Medidas da largura do canal da Amostra 2.....	31
Tabela 5 – Parâmetros usados no DISCO - Rotação: 10 000 rpm (Vel. de corte = 29 924 mm/s) .....	33
Tabela 6 – Parâmetros usados KG Sorensen FG 1093FF - Rotação: 10 000 rpm (Vel. de corte = 628 mm/s).....	34
Tabela 7 – Parâmetros usados no DISCO - Rotação: 30 000 rpm (Vel. de corte = 89 771 mm/s) .....	34
Tabela 8 – Parâmetros usados KG Sorensen FG 1093FF - Rotação: 15 000 rpm (Vel. de corte = 942 mm/s).....	35
Tabela 9 – Parâmetros usados no DISCO - Rotação: 50000 rpm (Vel. de corte = 149618 mm/s) .....	35
Tabela 10 – Parâmetros usados KG Sorensen FG 1093FF - Rotação: 20 000 rpm (Vel. de corte = 1 256 mm/s).....	36

## **Lista de Siglas**

VRR	Volume Removido por Revolução
FRF	Função de Resposta em Frequência

## Lista de Símbolos

$z$	Profundidade de corte [mm]
$f$	Avanço por rotação [mm/rev]
$n$	Velocidade de rotação [rpm]
$R^2$	Coefficientes de determinação

# Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. PROCESSO DE MICRORRETIFICAÇÃO.....	3
2.1.1. Quatro Operações Básicas de Microrretificação.....	4
2.1.2. Rebolos.....	5
2.1.3. Mecanismos Fundamentais de Remoção.....	7
2.2. QUARTZO.....	11
2.2.1. Fases do quartzo.....	12
2.2.2. Planos do quartzo.....	13
2.2.3. Quartzo- $\alpha$ Plano AT.....	14
2.2.4. Quartzo- $\alpha$ Plano AT Sintético.....	15
2.3. FALHAS NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	15
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1. MÉTODOS.....	20
3.2. MÁQUINA-FERRAMENTA.....	21
3.3. SELEÇÃO DE MICRORREBOLO.....	23
3.3.1. <i>Wafer</i> de quartzo- $\alpha$ .....	26
3.3.2. Microrrebolo KG Sorensen FG 3228F.....	26
3.3.3. Microrrebolo KG Sorensen FG 1093FF.....	28

3.3.4. Definição do microrrebolo .....	31
3.4. WAFER DE QUARTZO- $\alpha$ (PLANO AT) .....	32
3.5. SELEÇÃO DE PARÂMETROS PARA OS TESTES .....	33
3.6. PLANO DE USINAGEM DOS CANAIS .....	36
3.7. MONTAGEM DO EXPERIMENTO DE MICRORRETIFICAÇÃO .....	37
3.8. MÉTODO DE MEDIÇÃO DAS LASCAS .....	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	40
4.1. ANÁLISE DOS LIMITES DE DESEMPENHO .....	40
4.2. EFEITO DA PROFUNDIDADE DE CORTE NAS FALHAS .....	43
4.3. EFEITO DO AVANÇO NAS FALHAS .....	46
4.4. EFEITO DA BORDA NAS FALHAS .....	50
4.5. VIABILIDADE TECNOLÓGICA .....	52
5. CONCLUSÃO .....	54
REFERÊNCIAS .....	56

# 1. INTRODUÇÃO

A usinagem de materiais duros e frágeis é um tema comum na indústria e nas pesquisas, pois vários desses materiais tem aplicações na microeletrônica. A descoberta do efeito piezoresistência no Silício e Germânio, por Smith em 1954, levou ao desenvolvimento de sensores de pressão, acelerômetros e giroscópios comerciais de Si feitos por micro usinagem (Madou, 2011). Mas a partir dos anos 2000, diferentes materiais, composições e designs começaram a ganhar espaço, e segundo Carazo (2016), o aumento significativo na aplicação de micro sensores em diversos setores, como celulares, monitoramento médico, veículos e transformação de energia, é impulsionado principalmente pelo desenvolvimento de processos de fabricação mais confiáveis, que possuem papel fundamental no desenvolvimento de novos microcomponentes e na expansão das aplicações desses dispositivos.

Os monocristais são materiais atrativos devido às características mecânicas. Comparando com os aços, eles possuem uma disposição atômica regular, estabilidade dimensional em altas temperaturas e baixo peso. Os desafios relacionados a esse tipo de material estão no processo de usinagem. Trata-se de um material anisotrópico, com alta dureza superficial e fragilidade, exigindo condições e parâmetros de corte específicos. Os cristais piezoelétricos são representados principalmente pelo quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), que atualmente tem duas aplicações principais: ressonadores para eletrônicos e sensores, carga ou inerciais (Bifano; Hosler, 1993).

O monocristal de quartzo é tradicionalmente usinado por abrasão (disco ou cinta/fio) ou usinagem ultrassônica, como descrito por Kirsch, *et al.* (2017) e Sharma, *et al.* (2022).

Segundo Aurich, *et al.* (2019), existe uma demanda por investigação dos mecanismos abrasivos em processos de remoção de material em pequena escala. A microrretificação plana tangencial, e a microrretificação plana frontal estão ganhando destaque com a miniaturização de produtos. Os produtos, anteriormente fabricados por um processo abrasivo em macro escala, passam para a microescala.

## 1.1. OBJETIVOS

Este estudo tem como propósito a avaliação do processo de microrretificação aplicado ao quartzo- $\alpha$ , especificamente no plano AT, com especial atenção para a influência dos defeitos resultantes desse procedimento. Acredita-se que essa análise seja crucial para o

desenvolvimento de geradores cristalinos em dimensões tanto macrométricas quanto micrométricas. O quartzo, devido à sua dureza superficial e fragilidade, demanda considerações seletivas no que diz respeito ao tipo de processo de usinagem e aos parâmetros a serem adotados. Essas considerações podem influenciar significativamente o acabamento superficial, o custo de produção e a vida útil do produto resultante. A escolha do processo abrasivo de microrretificação foi motivada pela carência de estudos desse processo de usinagem envolvendo materiais duros e frágeis, e a usinagem de peças com geometrias não lineares não seriam possíveis de serem feitas pelo método do disco de corte abrasivo (*dicing saw*) devido à sua geometria. Os objetivos específicos do trabalho são:

- Contribuir com estudos de microrretificação de materiais duros e frágeis, utilizando o quartzo como material de referência;
- Comparar as influências da variação dos seguintes parâmetros de usinagem: rotação (rpm), velocidade de avanço e profundidade de corte;
- Analisar a microrretificação plana tangencial, e a microrretificação plana frontal, de quartzo, avaliando com a melhor combinação dos parâmetros de usinagem.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. PROCESSO DE MICRORRETIFICAÇÃO

O processo de microrretificação é bastante similar ao da retificação. Pois assim como as operações de retificação, geralmente estão relacionadas à usinagem de materiais duros com tolerâncias rigorosas e acabamento de superfície superior (Alberdi *et al.*, 2011).

Embora o processo de retificação demande uma quantidade elevada de energia para remover uma quantidade específica de material relativamente pequena em comparação com outros processos de corte, o processo não pode ser substituído devido à ótima qualidade que se alcança na peça usinada (Aurich *et al.*, 2013).

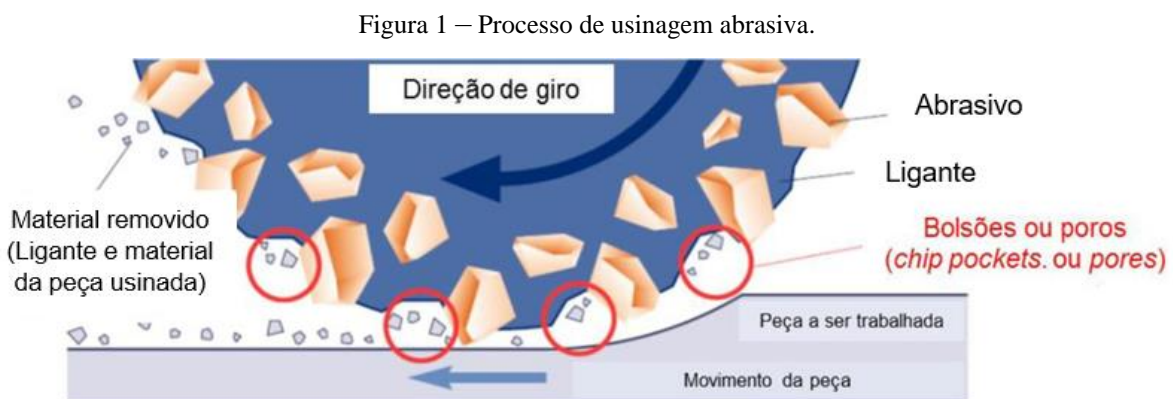
Porém, de acordo com Kirsch *et al.* (2014), para uma avaliação da sustentabilidade de um processo, especialmente no caso da retificação, toda a cadeia de processos deve ser considerada. Ao considerar apenas o processo, a retificação parece ser menos sustentável do que os processos de corte devido às maiores energias específicas envolvidas. E conforme mencionado por Aurich; Carrella; Kirsch (2013), as propriedades e o ciclo de vida completo do produto também deve ser considerado, uma vez que produtos usinados por processos abrasivos podem alcançar uma sustentabilidade aprimorada por meio de parâmetros de processo adaptados que reduzem o atrito e as perdas de energia.

Segundo Aurich *et al.* (2013), a retificação abrange uma ampla variedade de operações possíveis para atingir, por exemplo, um acabamento de superfície elevado, além de poder ser aplicada em diversos materiais. Para cada operação, o desempenho do processo e o impacto na sustentabilidade do processo e do produto podem ser diferentes. Nesse processo, as principais variáveis que influenciam o desempenho do processo, bem como a sustentabilidade da retificação, são o tipo de processo, os parâmetros do processo, o rebolo de retificação e a lubrificação e refrigeração.

A retificação é o método mais comumente utilizado entre os processos abrasivos e, portanto, é de grande importância para a fabricação sustentável. Ferramentas de retificação típicas possuem muitas arestas de corte geometricamente indefinidas com ângulos de saída efetivos tipicamente negativos. Elas são compostas por um corpo de ferramenta, o material abrasivo e um material de ligação (Kirsch *et al.*, 2014).

Os ângulos negativos e o grande número de abrasivos em contato resultam em alto atrito entre o rebolo e a peça de trabalho. O resultado desse atrito pode ser altas temperaturas do processo e possivelmente defeitos de qualidade na superfície. Por exemplo, a queima da peça é um defeito de qualidade típico devido ao dano termicamente induzido na camada superficial. O atrito também é a principal razão para as energias específicas relativamente altas na retificação (Aurich *et al.*, 2013).

A Figura 1 é ilustrado o mecanismo de remoção de material em um processo abrasivo com rebolo que foram citadas acima. Observa-se a interação entre os abrasivos e a peça a ser trabalhada, destacando o sentido de rotação da ferramenta e o movimento da peça. Os abrasivos realizam a remoção do material, que se acumula nos bolsões ou poros (chamados *chip pockets*), cuja função é armazenar os cavacos e permitir o escoamento, evitando entupimentos. O ligante serve para manter os grãos fixos na ferramenta. A eficiência do processo está relacionada à integridade desses elementos e ao escoamento adequado dos resíduos.



Fonte: Adaptada de Araújo, 2015.

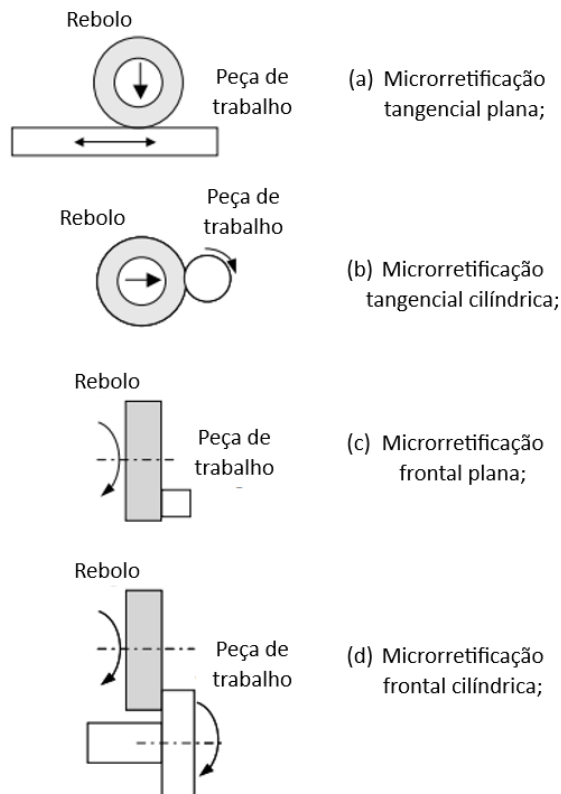
### 2.1.1. Quatro Operações Básicas de Microrretificação

As operações básicas de microrretificação podem ser classificadas em quatro tipos básicos, como ilustrado na Figura 2, conforme a geometria da superfície usinada e a forma de atuação do rebolo abrasivo reto: microrretificação tangencial plana, microrretificação tangencial cilíndrica, microrretificação frontal plana e microrretificação frontal cilíndrica,

Na retificação tangencial, a usinagem ocorre pela periferia do rebolo. Quando aplicada a superfícies planas, trata-se microrretificação tangencial plana; já quando aplicada a corpos de revolução, é denominada microrretificação tangencial cilíndrica. Por outro lado, na retificação frontal, o processo de corte se dá pela face plana do rebolo. A retificação frontal de superfícies

planas (não rotacionais) é comumente empregada em superfícies amplas e estacionárias, enquanto a retificação frontal de superfícies rotacionais pode ser realizada em retificadoras cilíndricas, sendo, portanto, também conhecida como retificação cilíndrica frontal (Marinescu *et al.*, 2006).

Figura 2 – Operações básicas da microrretificação



Fonte: Adaptado de Marinescu *et al.*, 2006.

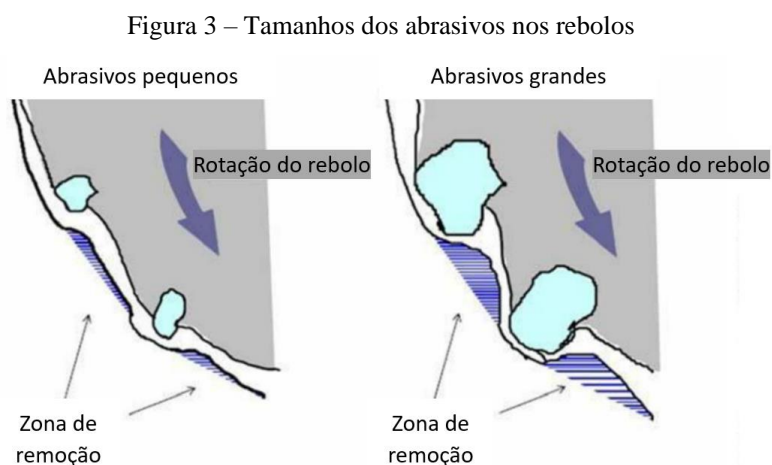
Ainda de acordo com Marinescu *et al.* (2006), além dessas operações básicas, a literatura técnica descreve uma grande variedade de processos de retificação, que abrangem desde geração de perfis complexos, até fendas (*slitting*) e canais (*grooving*).

### 2.1.2. Rebolos

Os rebolos pertencem à categoria das ferramentas abrasivas ligadas, compostas por grãos abrasivos que realizam o corte e uma matriz de liga responsável por mantê-los coesos. Essa matriz pode ser resinoide, vitrificada, metálica ou polimérica, e sua porosidade influencia tanto a remoção de cavacos quanto o transporte de fluido refrigerante. As propriedades dos rebolos variam de acordo com o tipo de abrasivo (como óxido de alumínio ou carbetto de

silício), o tamanho do grão, o tipo de ligação e a proporção de vazios na estrutura (Malkin; Guo, 2008).

Conforme Aurich; Carrella; Walk (2015), em geral, tamanhos pequenos de abrasivos e concentrações mais baixas resultam em melhores qualidades e precisões de superfície, como pode ser visto na Figura 3. No entanto, com o aumento da taxa de remoção de material, a rugosidade da superfície e o comprimento das trincas na superfície inferior, assim como o comprimento das trincas na borda, aumentam mais rapidamente ao utilizar tamanhos pequenos de abrasivos combinados a concentrações mais baixas. Além disso, o uso de ferramentas com abrasivos menores e baixa concentração leva a um desgaste mais rápido da ferramenta devido às maiores tensões nos abrasivos. Como consequência do desgaste da ferramenta, a rugosidade da superfície, o comprimento das trincas na superfície inferior e o comprimento das trincas na borda aumentam, enquanto a vida da ferramenta é reduzida. Por fim, devido ao desgaste da ferramenta, a precisão da forma da estrutura se deteriora.



Fonte: Adaptado de Araújo, 2015.

Rebolos superabrasivos, como os de diamante e CBN (nitreto cúbico de boro), são projetados para aplicações que exigem alta precisão e durabilidade. Ao contrário dos rebolos convencionais, possuem uma fina camada abrasiva aplicada sobre um suporte metálico ou plástico, o que reduz o uso de materiais de alto custo. A ampla variedade de ligas, abrasivos e formatos disponíveis no mercado permite atender às mais diversas exigências de usinagem, especialmente em setores como o aeroespacial e o automotivo (Malkin; Guo, 2008).

No caso da microrretificação, os microrrebolos utilizados são semelhantes as novas ferramentas que vem sendo estudadas chamadas de *Micro Pencil Grinding Tools* (MPGTs),

sendo compostas pelos mesmos itens presente em uma ferramenta de retificação: um corpo de ferramenta, o abrasivo e o ligante.

No seu estudo Aurich (2015) conclui que, consegue fabricar ferramentas do tipo *Micro Pencil Grinding Tools* (MPGTs) com diâmetros de 4  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$ . Foram investigadas as influências das propriedades das ferramentas de retificação e dos parâmetros do processo na qualidade da superfície e na precisão das microestruturas. Pôde-se constatar que tamanhos menores de abrasivos e concentrações menores de abrasivos melhoram a qualidade da estrutura. No entanto, também resultam em um maior desgaste da ferramenta. Como era de se esperar, um avanço menor e uma velocidade de corte mais alta levam a uma melhor qualidade de superfície. Ao reduzir o diâmetro das ferramentas para 4  $\mu\text{m}$ , ocorreram grandes trincas nas bordas. Esse efeito aparentemente é resultado da baixa velocidade de corte.

Já Kirsch *et al.* (2017), concluíram que ao considerar ferramentas de retificação micro lápis, que a camada abrasiva que cobre o corpo de metal, a que possui as propriedades mais importantes. O estudo de caso revelou que tamanhos de abrasivos maiores são preferíveis devido a uma menor rugosidade de superfície inferior alcançável na ranhura usinada, assim como uma taxa de avanço mais alta e um comportamento do processo mais estável. Este resultado surpreendente precisa ser mais pesquisado. Ou seja, os parâmetros do processo, assim como a gama de tamanhos de abrasivos, devem ser aumentados, e uma análise aprofundada do desgaste da ferramenta é necessária para esclarecer os mecanismos de remoção de material. Os estudos sobre o revestimento eletrolítico das ferramentas revelaram que o aumento do tamanho de grão é limitado. A uniformidade da distribuição dos abrasivos diminui com o aumento do tamanho de grão e, ao mesmo tempo, tamanhos de abrasivos maiores exigem tempos de revestimento mais longos. O tempo de revestimento, no entanto, é limitado pela vida útil da solução de revestimento.

### **2.1.3. Mecanismos Fundamentais de Remoção**

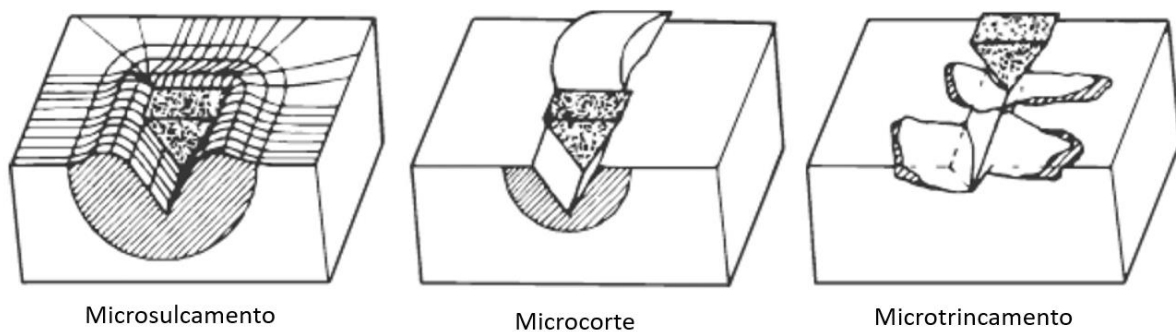
Os mecanismos de remoção de material durante a retificação são determinados, principalmente, pelas propriedades mecânicas da peça usinada, em especial sua ductilidade ou fragilidade. De modo geral, existem três mecanismos básicos de interação entre os grãos abrasivos e a superfície da peça: microsulcamento, microcorte e microfratura.

O microsulcamento (ou *micro plowing*) ocorre quando há deformação plástica ou elastoplástica contínua do material, o qual é deslocado lateralmente para as bordas do sulco gerado, com perda de material desprezível (Marinescu *et al.*, 2006). Esse comportamento é comum em materiais dúcteis e, embora não ocorra remoção efetiva de material, pode levar à iniciação de falhas quando diversos abrasivos atuam simultaneamente ou de forma repetida.

O microcorte (ou *micro cutting*), por sua vez, está relacionado à formação de cavacos, sendo caracterizado pela remoção volumétrica de material, onde o volume do cavaco é aproximadamente igual ao volume do traço gerado. Esse mecanismo representa uma ação de corte eficiente e ocorre predominantemente quando as condições de corte e a geometria dos grãos favorecem a penetração e cisalhamento do material (Hutchings, 1992).

Já a microfratura (ou *micro cracking*) ocorre em materiais frágeis, como cerâmicas, vidro ou silício, nos quais o processo de remoção se dá pela formação e propagação de trincas. Nesses casos, os fragmentos removidos podem ser significativamente maiores que o traço gerado individualmente, o que caracteriza um processo dominado pela fratura frágil (Marinescu *et al.*, 2006).

Figura 4 – Representação dos mecanismos de remoção de material



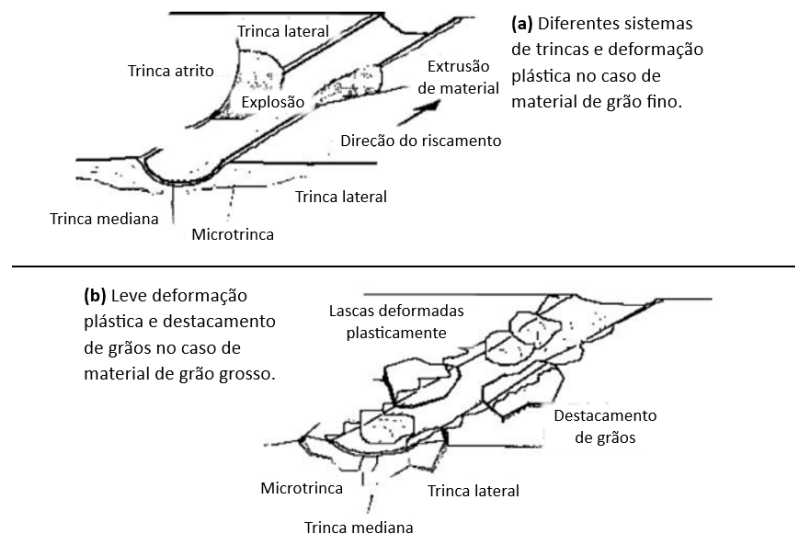
Fonte: Adaptado de Zum Gahr, 1987.

Dessa forma, como apresentado na Figura 4, os mecanismos de remoção variam conforme o tipo de material da peça, a geometria dos abrasivos e os parâmetros do processo. Assim, a análise detalhada desses mecanismos é fundamental para a compreensão e otimização do processo de retificação, sobretudo em aplicações de microusinagem.

Os mecanismos de remoção de material durante a microusinagem com rebolo diamantado variam conforme a microestrutura do material da peça. Em materiais de grãos pequenos, a interação inicial entre o abrasivo e o material promove uma deformação plástica

pura, formando uma zona de entrada cujo comprimento depende do raio de ponta do abrasivo. A partir de uma profundidade crítica, surgem deformações permanentes e sistemas de trincas, incluindo trincas radiais, em forma de “V” e laterais, que podem resultar na fratura e remoção de partículas da superfície. Essas trincas são induzidas pelo aumento da tensão cisalhante causada pela força tangencial (Marinescu *et al.*, 2006). A Figura 5a é ilustrado a formação da superfície nesse tipo de material.

Figura 5 – Formação da superfície material frágil

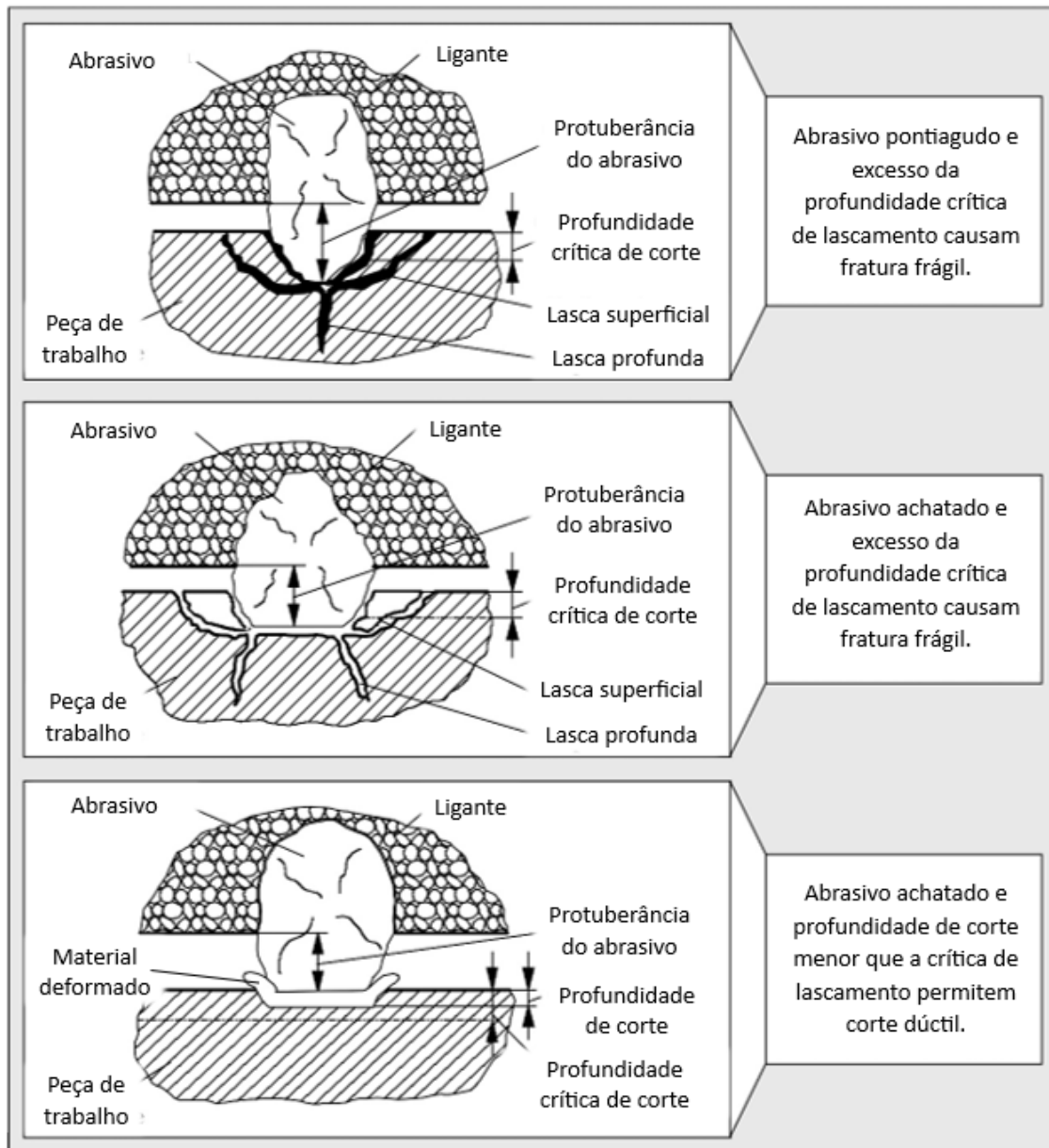


Fonte: Adaptada de Roth, 1995.

Para materiais de grãos grande, conforme demonstrado na Figura 5b, o mecanismo predominante é a fratura intergranular. Abrasivos com geometria aguda penetram e dividem plasticamente os grãos, enquanto abrasivos achatados provocam deformações plásticas mais intensas, resultando na extrusão de material em forma de flocos fortemente deformados. À medida que a profundidade de penetração aumenta, a tensão atinge os limites de resistência da interface entre os grãos, provocando a fratura e destacamento de placas inteiras da superfície (Marinescu *et al.*, 2006).

Durante o processo de retificação de vidros ópticos e outros materiais frágeis, é fundamental garantir uma formação dúctil da superfície, a fim de evitar o surgimento de sistemas extensivos de trincas superficiais. Para isso, testes de riscamento mostraram que a espessura a ser cortada por grão abrasivo deve ser inferior à profundidade crítica de corte, permitindo a obtenção de superfícies quase isentas de trincas (Marinescu *et al.*, 2006). Esse comportamento está ilustrado na Figura 6 e representa um modelo de remoção dúctil em materiais frágeis.

Figura 6 – Modelo de remoção dúctil em materiais frágeis.



Fonte: Adaptado de Marinescu *et al.* (2006).

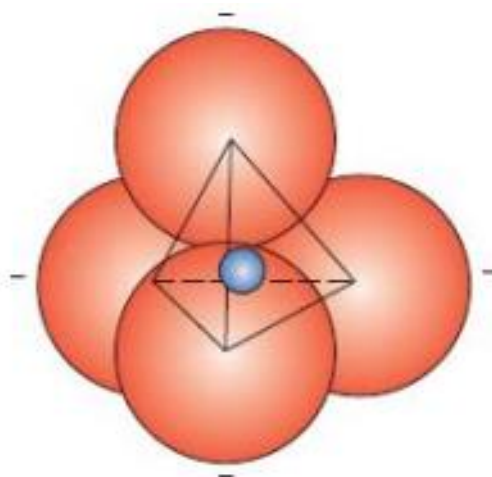
Particularmente no caso do silício monocristalino, muito utilizado em microtecnologia, o desafio é preservar sua estrutura cristalina perfeita e livre de danos subsuperficiais após o processo de usinagem. A implementação da remoção dúctil nesse contexto contribui para melhorar a qualidade superficial e a integridade estrutural do substrato, além de reduzir os custos ao minimizar etapas de polimento e ataque químico subsequentes. A remoção dúctil baseia-se na predominância de tensões de cisalhamento, que causam deformações plásticas sem a formação de trincas, diferentemente da remoção frágil, que está associada à geração e propagação de microtrincas devido às tensões de tração induzidas pelos grãos abrasivos (Lawn, 1993; Cook; Pharr, 1990).

## 2.2. QUARTZO

A sílica ( $\text{SiO}_2$ ), o mineral mais abundante na crosta terrestre, apresenta onze polimorfos cristalinos, cuja formação depende das condições de temperatura e pressão durante a cristalização. Dentre esses polimorfos, dois são conhecidos como quartzo: o  $\alpha$ -quartzo, estável abaixo de  $573\text{ }^\circ\text{C}$ , e o quartzo-  $\beta$ , que se torna estável em temperaturas superiores a esse valor. O quartzo-  $\alpha$ , também denominado simplesmente como “quartzo”, é caracterizado por sua estrutura cristalina não simétrica, a qual é responsável por sua resposta piezoelétrica — isto é, a capacidade de acoplamento entre estímulos elétricos e mecânicos (Newnham, 2004).

Devido à anisotropia cristalina do quartzo, é possível obter diversos substratos a partir de diferentes planos de corte do cristal, o que confere propriedades específicas aos dispositivos fabricados. A escolha do plano de corte influencia parâmetros como frequência ressonante, coeficiente de temperatura da frequência (TCF), estabilidade, entre outros (Vittoz, 2010). Por exemplo, o corte AT é amplamente utilizado em osciladores de cristal com baixa sensibilidade térmica, enquanto o corte Z é preferido em aplicações como ressonadores de relógios (Friedt; Carry, 2007). Embora seja uma ruptura marcante em relação às classificações minerais convencionais, os minerais de sílica são agrupados aqui com os silicatos em vez dos óxidos. Isso é feito porque, estruturalmente, eles apresentam uma semelhança próxima com os silicatos. Além disso, suas propriedades físicas: dureza, densidade, brilho, cor; assemelham-se mais às dos silicatos do que às dos óxidos (Dana; Hurlbut, 1944). Os minerais de sílica, conforme a Figura 7, possuem nas suas estruturas os mesmos tetraedros de silício-oxigênio encontrados nos silicatos.

Figura 7 – Tetraedro silício-oxigênio



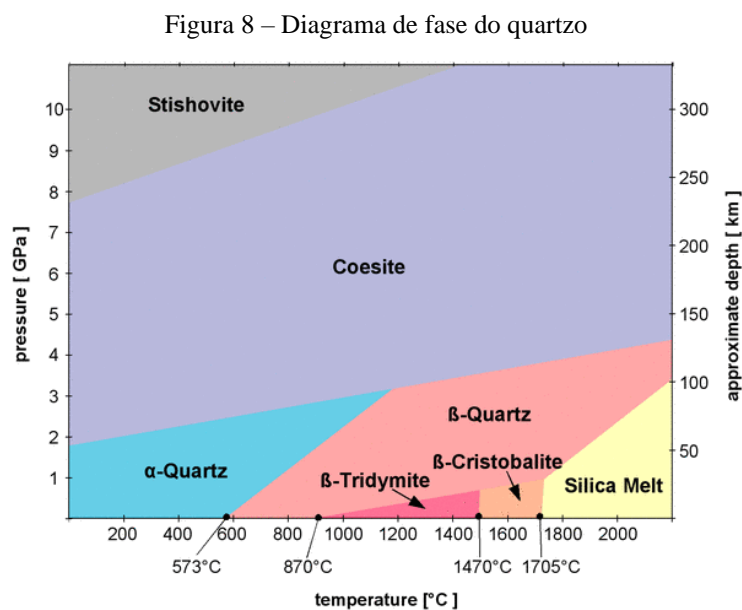
Fonte: Callister; Rethwisch, 2018.

Quimicamente, o silicato mais simples é o dióxido de silício, ou sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Estruturalmente, esse material forma uma rede tridimensional que é gerada quando os átomos de oxigênio localizados nos vértices de cada tetraedro são compartilhados por tetraedros adjacentes. Dessa forma, o material é eletricamente neutro, e todos os átomos têm estruturas eletrônicas estáveis. Sob essas circunstâncias, a razão entre o número de átomos de silício e o número de átomos de O é de 1:2, como indicado pela fórmula química (Callister; Rethwisch, 2018).

Segundo Callister; Rethwisch, (2018), se esses tetraedros forem arranjados de maneira regular e ordenada, será formada uma estrutura cristalina, com isso existem três formas cristalinas polimórficas principais para a sílica: quartzo, cristobalita e tridimita. Além disso, suas estruturas são relativamente complexas e comparativamente abertas; isto é, os átomos não estão densamente compactados uns aos outros. Como consequência, essas sílicas cristalinas apresentam massas específicas relativamente baixas; por exemplo, à temperatura ambiente, o quartzo tem uma massa específica de apenas  $2,65 \text{ g/cm}^3$ .

### 2.2.1. Fases do quartzo

Por meio de estudos térmicos, foi demonstrado que existem várias formas polimórficas de sílica. A mais comum delas é o quartzo, que existe em duas modificações, dependendo da temperatura de formação. Na Figura 8, apresenta-se o diagrama de fases do quartzo.



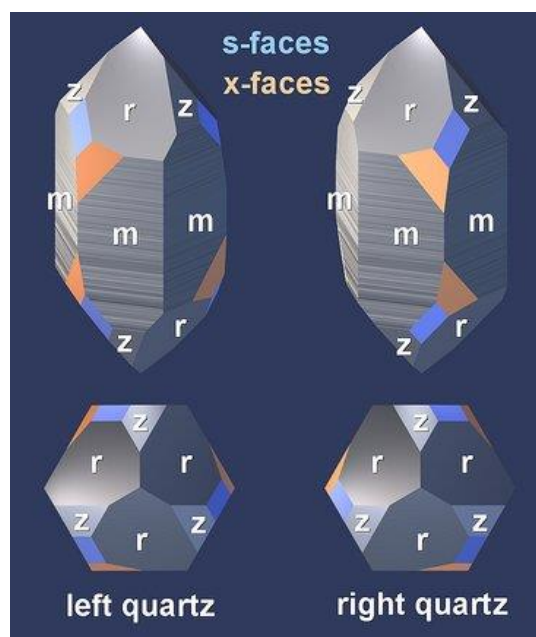
Fonte: The Quartz Page, 2014.

O quartzo- $\alpha$ , de baixa temperatura, se forma abaixo de 573 °C, enquanto quartzo- $\beta$ , de alta temperatura, se forma entre 573 °C e 870 °C. Entre 870 °C e 1470°C, a tridimita é a forma estável, e acima de 1470 °C, a cristobalita é estável. Quando o quartzo- $\beta$  esfria, ele inverte para o quartzo- $\alpha$  a 573 °C, e assim nenhum quartzo- $\beta$  existe e temperaturas comuns. A inversão da tridimita e da cristobalita, no entanto, para formas de baixa temperatura é extremamente lenta, e esses minerais podem existir indefinidamente como formas instáveis. No entanto, ao esfriar, a tridimita passa por dois pontos de inversão, um a 163 °C, o outro a 117 °C. A tridimita em temperaturas ambiente é, portanto, um paramorfo após a tridimita de alta temperatura, e muitas das propriedades das duas modificações são diferentes. A cristobalita, ao esfriar, também inverte para uma forma de baixa temperatura, com propriedades cristalográficas e físicas diferentes da forma de alta temperatura (Dana; Hurlbut, 1944).

### 2.2.2. Planos do quartzo

Cristais ideais de quartzo possuem planos (faces) e direções, podendo ser esquerdos ou direitos, determinados pela posição de certas faces cristalinas. Na Figura 9 é mostrado faces “S” (coloridas de azul) e faces “X” (coloridas de laranja) em quartzo tanto canhoto quanto destro, e sua posição relativa em relação a faces M, R e Z. O quartzo esquerdo ou direito são imagens espelhadas um do outro.

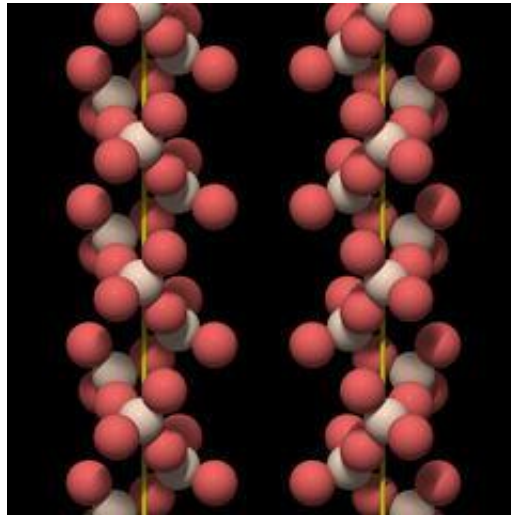
Figura 9 – Planos cristalinos no cristal de quartzo



Fonte: The Quartz Page, 2023.

Essa lateralidade pode ser determinada verificando se o arranjo descrito pelos tetraedros percorre uma direção horária ou anti-horária. Essa relação também pode ser encontrada na estrutura cristalina e pode ser demonstrada colocando duas hélices de lateralidade oposta lado a lado. A Figura 10, é ilustrado formas destra e canhota da hélice tripla espelhadas um do outro (Ford; Dana, 1932).

Figura 10 – Geometria molecular de um cristal de quartzo “esquerdo” e “direito”.

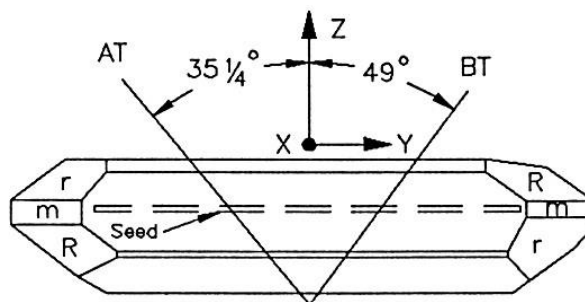


Fonte: The Quartz Page, 2023.

### 2.2.3. Quartzo- $\alpha$ Plano AT

O quartzo AT é um tipo específico de corte cristalino amplamente utilizado na fabricação de dispositivos ressonadores devido à sua excelente estabilidade térmica e propriedades piezoelétricas. O termo AT refere-se ao plano específico de corte realizado a um ângulo aproximado de  $35^{\circ}15'$  em relação ao eixo Z do cristal de quartzo  $\alpha$ , como mostrado na Figura 10, o que permite que os dispositivos mantenham uma frequência de ressonância relativamente constante em uma ampla faixa de temperaturas (Jauch Quartz GmbH, 2021).

Figura 11 – Diferentes cortes do monocristal de quartzo



Fonte: IQD Frequency Products, 2024.

Esse tipo de corte é especialmente relevante em aplicações como osciladores de alta precisão, relógios, equipamentos eletrônicos e sistemas MEMS, pois apresenta um baixo coeficiente de temperatura de frequência, reduzindo variações indesejadas causadas por mudanças térmicas, além disso, o cristal AT possui propriedades anisotrópicas que influenciam diretamente sua resposta eletromecânica, garantindo desempenho eficiente em frequências de operação elevadas (Xu *et al.*, 2025).

#### **2.2.4. Quartzo- $\alpha$ Plano AT Sintético**

O quartzo monocristalino sintético, especialmente na forma de corte AT (AT-cut), é amplamente utilizado em aplicações piezoelétricas devido à sua elevada pureza, precisão dimensional e estabilidade térmica. A produção desse material é realizada por meio de métodos controlados de crescimento cristalino, como o crescimento hidrotérmico e a epitaxia em fase vapor, os quais permitem a obtenção de cristais com orientações e propriedades específicas (Yoshimura, 2023).

Ainda segundo Yoshimura (2023) o método hidrotérmico, amplamente difundido, baseia-se na dissolução de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) em soluções alcalinas sob altas temperaturas e pressões, promovendo o crescimento de cristais sobre sementes com orientação definida. Esse processo permite a produção de cristais de quartzo de alta qualidade, com dimensões significativas, adequadas para a fabricação de dispositivos como ressonadores e osciladores. Avanços recentes no dimensionamento de autoclaves têm possibilitado o crescimento de cristais ainda maiores, otimizando o desempenho em aplicações industriais.

Outra abordagem relevante é a epitaxia em fase vapor catalisada, que viabiliza o crescimento de filmes cristalinos de quartzo com cortes específicos, como o AT, sobre substratos compatíveis. Essa técnica oferece vantagens significativas quanto ao controle da qualidade estrutural e das propriedades piezoelétricas dos filmes formados (Takahashi *et al.*, 2005).

### **2.3. FALHAS NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO**

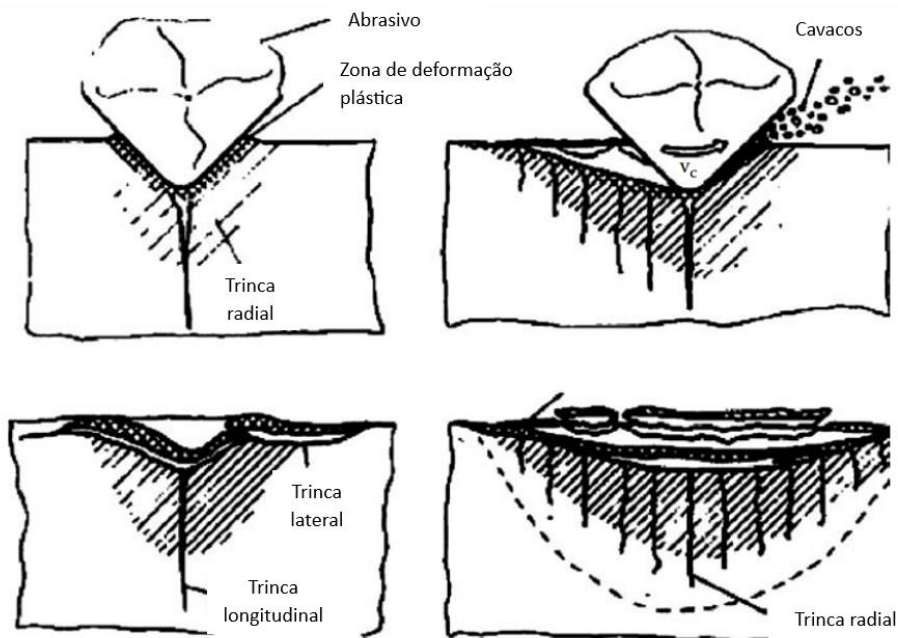
De acordo com Marinescu *et al.* (2006), o silício monocristalino é o material de substrato mais utilizado na tecnologia de microssistemas. Para que suas propriedades físicas sejam totalmente exploradas, é necessário um alto grau de pureza, homogeneidade e perfeição

cristalina, e os processos de usinagem de *wafer* gera danos na subsuperfície e em sua estrutura monocristalina. Portanto, esses danos precisam ser removidos por processos de polimento e ataque químico antes da fabricação das estruturas eletrônicas na superfície frontal do *wafer*. A implementação controlada da remoção dúctil do material durante a retificação representa uma alternativa para melhorar a qualidade da superfície e da subsuperfície, além de aumentar a eficiência econômica de toda a cadeia de produção de *wafer*.

De acordo com Marinescu, *et al.* (2006), as taxas de remoção de material na retificação de cerâmicas variam amplamente, dependendo da aplicação. Com os avanços recentes no entendimento da mecânica da retificação de cerâmicas, é possível alcançar taxas de remoção de material comparáveis às da retificação de metais. No entanto, a prática atual alcança apenas cerca de um décimo dessas taxas de remoção de material.

Um modelo de formação de cavacos é baseado na pressão superficial de Hertz de dois corpos em contato, onde as tensões e deformações produzem microtrincas, que causam a desintegração, resultando em erosão de material (Marinescu, *et al.*, 2001). A seguir, Figura 12 representa e explica o fenômeno descrito anteriormente.

Figura 12 – Mecanismo de lascamento e trincamento superficial

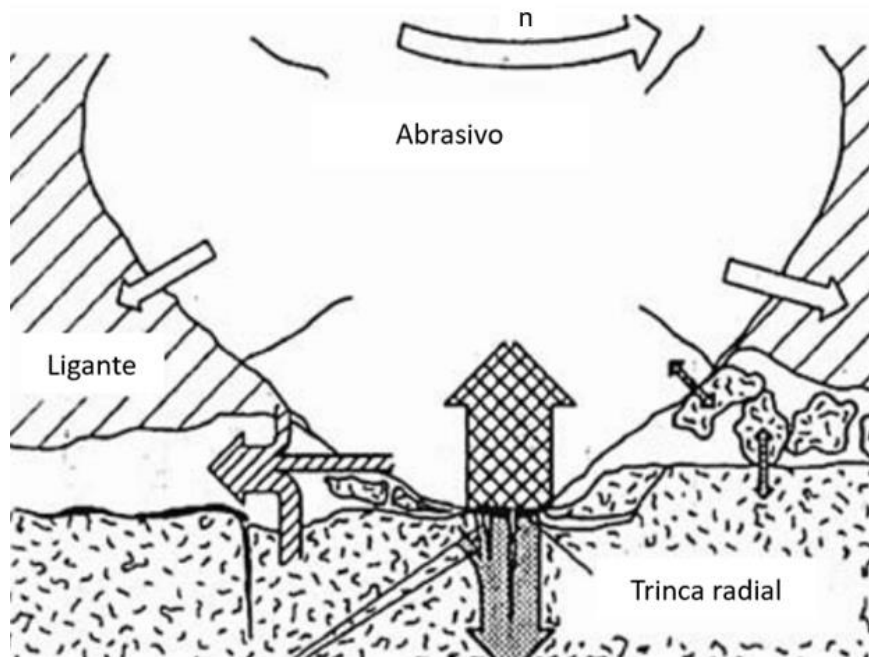


Fonte: Adaptado de Marinescu, *et al.*, 2006.

Cristais monocristalinos são mais frágeis que materiais metálicos e apresentam pouca deformação plástica sob carga até a fratura. Por esse motivo, seria de se esperar que o

mecanismo de usinagem abrasiva cristais monocristalinos envolvesse principalmente a fratura frágil. A observação microscópica de superfícies de um cristal de alta densidade retificadas com diamante mostra áreas fraturadas consistentes com um mecanismo de fratura frágil. No entanto, também é observada evidência de fluxo plástico com estrias ao longo da direção de retificação. Isso sugere que tanto o fluxo quanto a fratura desempenham um papel importante no processo de retificação para cerâmicas (Bifano, 1988).

Figura 13 – Contato entre o diamante do rebolo e a superfície



Fonte: Adaptado de Marinescu *et al.*, 2006.

O mecanismo de remoção de material com arestas de corte abrasivas na superfície do rebolo é praticamente o mesmo que com ferramentas de corte. No entanto, o tamanho dos cavacos removidos na retificação é menor do que no caso do corte, proporcionando melhor acabamento superficial e precisão de usinagem. A espessura dos cavacos na retificação é inferior a 0,1 mm, enquanto no corte é maior que 0,1 mm (Marinescu *et al.*, 2006).

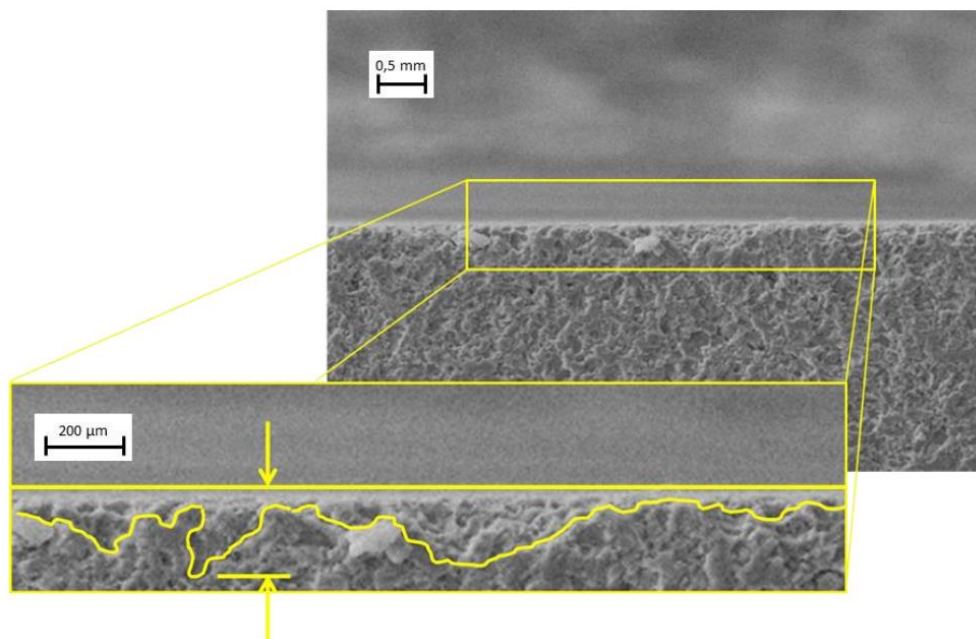
De acordo com Qian *et al.* (2023), a usinagem de materiais duros e frágeis utilizando métodos comuns de processamento, seria o desbaste, o acabamento e o polimento. Porém atualmente, o foco principal é a redução de danos superficiais e subsuperficiais durante a etapa de desbaste para melhorar a eficiência do processamento e reduzir custos. Além disso, o estudo examina a distribuição da tensão na usinagem de materiais duros e frágeis por abrasão, considerando fatores como velocidade do rebolo e a temperatura de retificação. A pesquisa destaca a viabilidade da retificação em alta velocidade, enfatizando a eficiência do

processamento, obtendo como resultado a redução da rugosidade da superfície e a limitação da formação de trincas, isso minimiza a necessidade de polimento, economizando tempo e custos.

Segundo Araújo (2015), as falhas em processos de corte podem ser de dois tipos: geométricas e estruturais. As falhas do tipo geométricas, são aquelas relacionadas a erros de forma e direcional, já as falhas estruturais, como trincas e lascas. Destaca-se que a origem dessas falhas pode ser semelhante e enumera diversas condições geradoras, como deformações na ferramenta de corte, falta de dressagem, tamanho dos abrasivos, entre outros. Além disso, existem as falhas operacionais e de engenharia na definição do equipamento e na operação de configuração do equipamento. Em decorrência dessas falhas, tem-se como resultados as trincas (*crack*) são comuns em materiais frágeis, mas consideradas inaceitáveis no produto final, já as lascas (*chip*), são aceitáveis em determinado grau, dependendo da aplicação do produto final, podendo ocorrer nas quinas superior e inferior do canal de corte, denominadas *top side chipping* e *backside chipping*.

Um método específico foi desenvolvido e aplicado na quantificação de defeitos por Araujo (2015), a partir do processo de corte abrasivo. A proposta consiste em mensurar as lascas formadas ao longo da trilha de usinagem, utilizando imagens obtidas por microscopia óptica com ampliação padronizada. Para garantir uma análise sistemática e comparativa, a superfície usinada foi segmentada em regiões distintas, pode-se ver esse método na Figura 14.

Figura 14 – Método para avaliar as dimensões de lascas e trincas



Fonte: Araújo, 2015.

Cada uma dessas regiões deve ser avaliada em dois lados opostos da trilha, permitindo a observação de possíveis assimetrias no desempenho da ferramenta durante o avanço. Em cada lado, realiza-se múltiplas medições da extensão das maiores lascas, possibilitando a obtenção de dados estatísticos representativos da condição superficial.

Com base nas medições coletadas, calcula-se a média aritmética geral de cada condição de usinagem, utilizada como parâmetro comparativo entre os diferentes testes. Adicionalmente, as médias individuais por região e lado pode serem analisadas com o intuito de identificar tendências locais ou efeitos ao longo do tempo, como o entupimento da ferramenta ou a degradação progressiva da ação de corte.

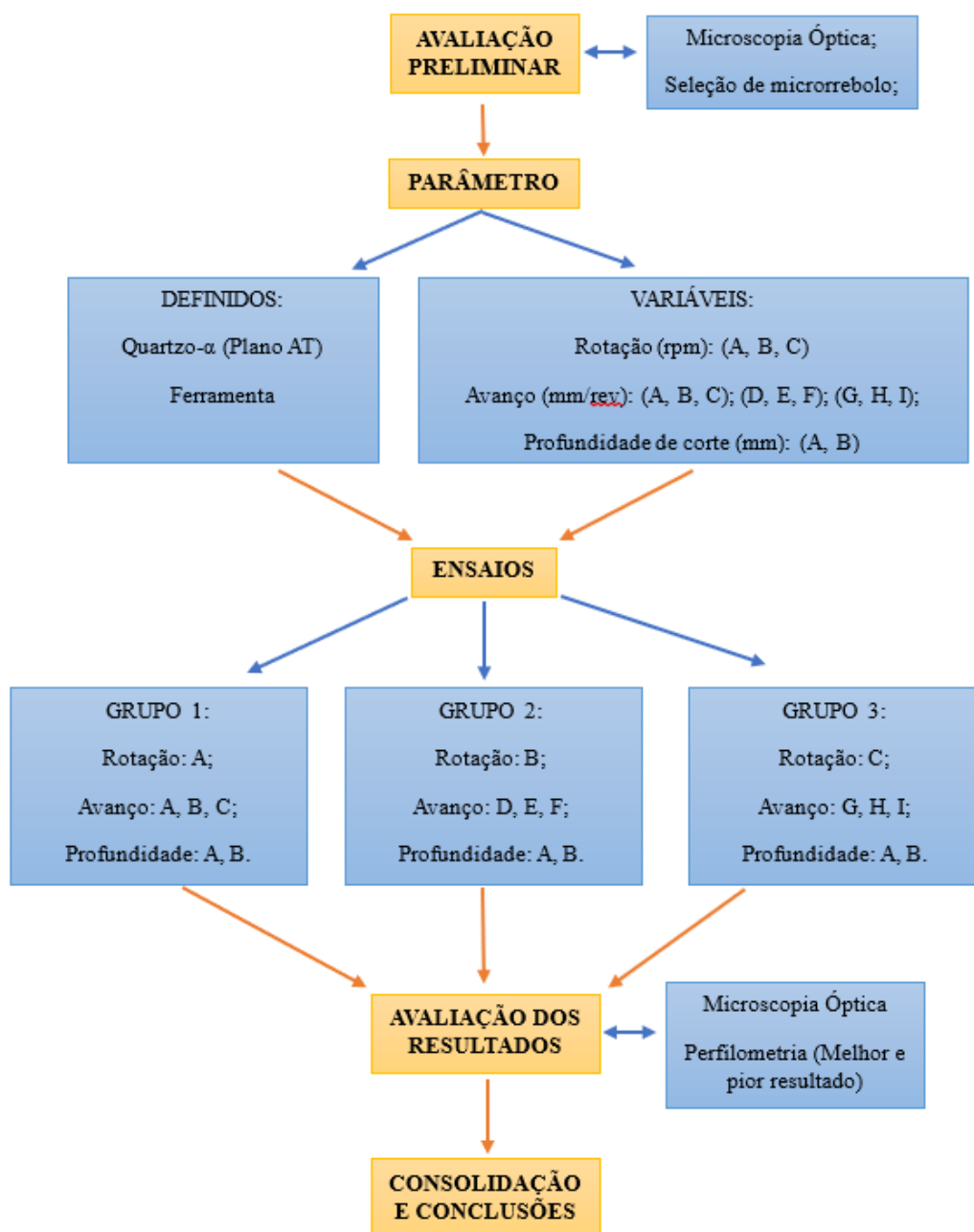
### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados o material e métodos aplicados nesta experimentação de microrretificação aplicado em quartzo- $\alpha$ , especificamente no plano AT.

#### 3.1. MÉTODOS

A metodologia representada na Figura 15 é ilustrado o procedimento adotado para a avaliação do acabamento superficial neste estudo.

Figura 15 – Fluxograma da metodologia da pesquisa



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 15 está descrito o procedimento de definição desses parâmetros, com o objetivo de permitir uma comparação tecnológica com o processo de corte abrasivo utilizando disco. Além disso, a avaliação da qualidade superficial será realizada com base no método de quantificação de defeitos desenvolvido e aplicado por Araujo (2015) o qual se mostrou eficaz na caracterização dos danos superficiais em materiais frágeis submetidos à usinagem abrasiva.

A análise baseia-se na variação de três parâmetros principais durante o processo: rotação da ferramenta (velocidade de corte), avanço da ferramenta sobre a peça e profundidade de corte. A ferramenta utilizada no processo de microrretificação, semelhante ao processo convencional de retificação, produz canais na superfície da peça de quartzo. A análise se concentrará na dimensão média das lascas e trincas geradas, como critério de avaliação da qualidade superficial.

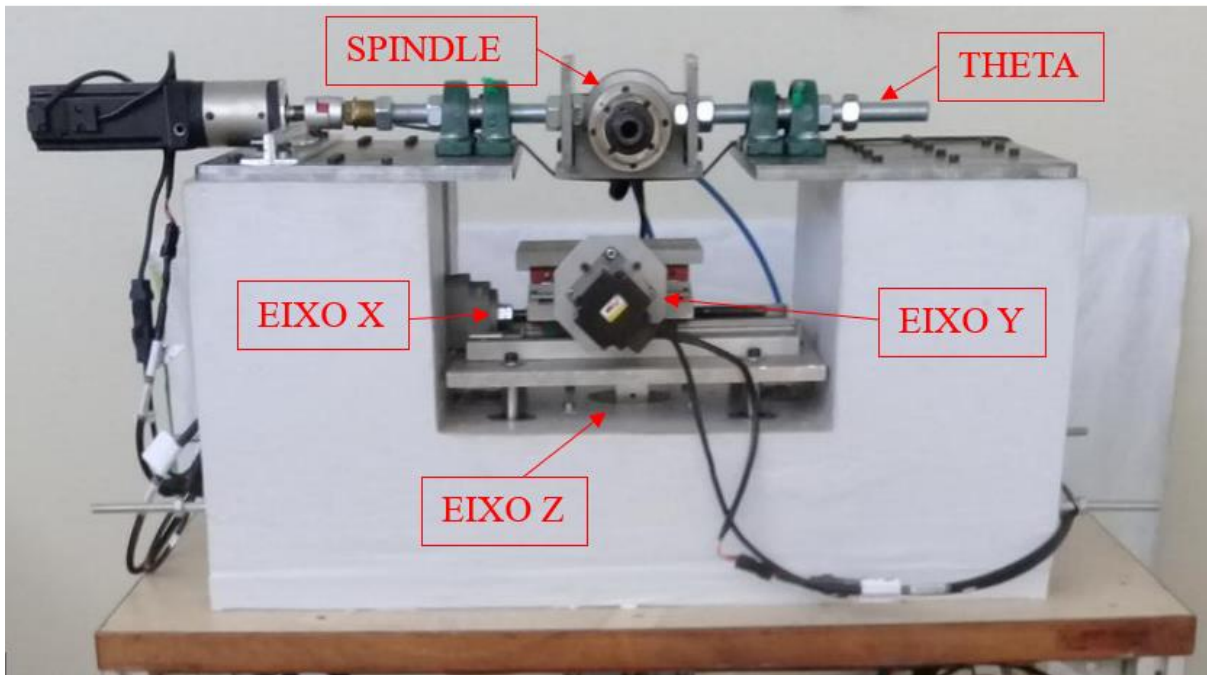
Além disso a rotação da ferramenta foi adotada como parâmetro fixo para o controle da velocidade de corte. Como o microrrebolo foi substituído por um novo antes do início de cada teste, assumiu-se que o diâmetro da ferramenta permaneceu constante ao longo dos ensaios, o que deixa a velocidade de corte constante.

Como etapa preliminar, foram definidos os valores dos parâmetros variáveis para a realização de cortes retos na peça de quartzo. Para cada combinação de parâmetros, será utilizado um microrrebolo novo, de modo a garantir a repetibilidade dos testes e evitar interferências causadas pelo desgaste da ferramenta.

### 3.2. MÁQUINA-FERRAMENTA

A máquina aplicada neste processo foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), financiada por meio do fundo de pesquisa Universal CNPQ 2018-2022 (processo CNPQ: 434480/2018-5). O equipamento, denominado como C3L versão 01, é uma combinação de três processos diferentes em um único sistema: corte, fresamento e perfuração (Figura 16). A máquina consiste em uma mesa X, Y, Z, e um Theta no fuso, exatamente no Ponto Central da Ferramenta (TCP). O *spindle* opera a, no máximo, 24 000 rpm (TECMAF, modelo TLO-80-2,2-20, potência: 3CV). A resolução teórica geral de posicionamento da mesa X, Y, Z é de 0,00056 mm, usando um sistema de servo motor DELTA INC.

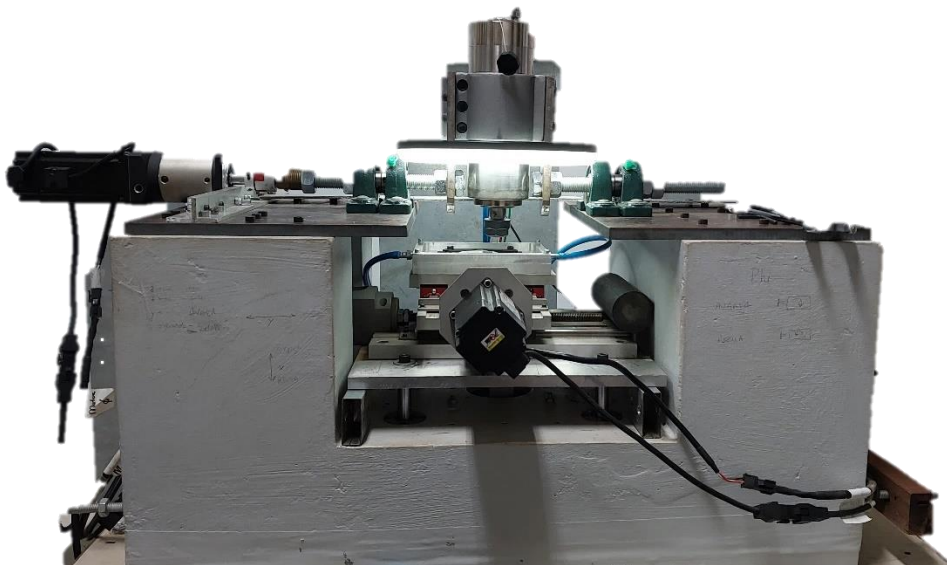
Figura 16 – Máquina C3L



Fonte: Relatório de pesquisa Universal do CNPQ 2018-2022.

Para este trabalho foi desenvolvida uma cuba que permite a usinagem do quartzo em ambiente submerso, proporcionando melhor refrigeração da peça e limpeza da ferramenta. Esse dispositivo foi instalado sobre a mesa da máquina e conta com uma bomba de circulação, que promove o movimento contínuo da água. A montagem do sistema pode ser visualizada na Figura 17.

Figura 17 – Máquina C3L pronta para uso



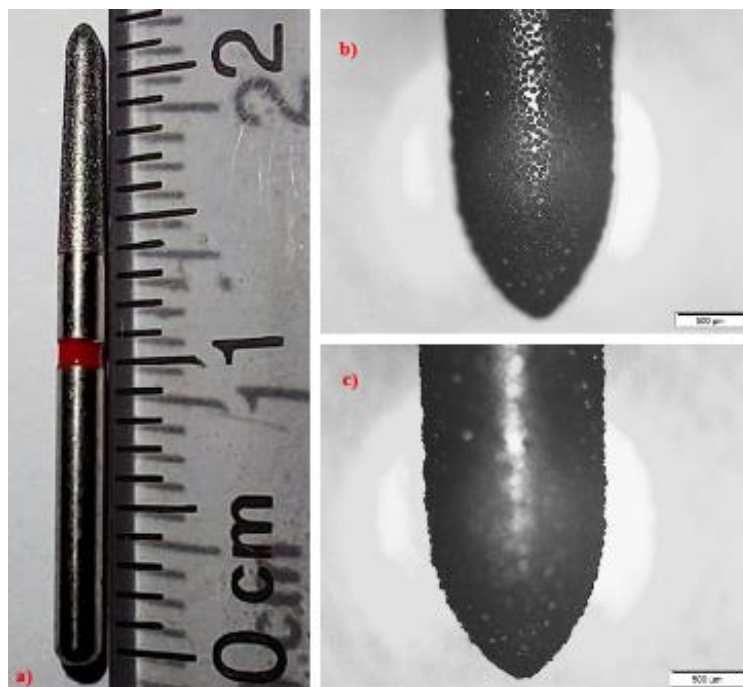
Fonte: Autoria própria.

A presença da bomba de circulação é essencial para manter um fluxo constante de fluido refrigerante durante a usinagem. Esse fluxo contínuo contribui significativamente para a dissipação do calor gerado no contato entre a ferramenta e a peça, evitando o superaquecimento tanto do quartzo quanto do microrrebolo. Além disso, o movimento da água facilita a remoção dos detritos gerados no corte, reduzindo o risco de recorte (re-cutting) de partículas soltas, o que poderia comprometer a qualidade superficial da peça e acelerar o desgaste da ferramenta. Dessa forma, o sistema submerso com recirculação contribui para maior estabilidade do processo, melhora o acabamento superficial e prolonga a vida útil da ferramenta abrasiva.

### 3.3. SELEÇÃO DE MICRORREBOLO

A fim de obter melhores resultados, foi feita uma seleção de microrrebolo, com as que possuem uma melhor especificação para o propósito da pesquisa. As ferramentas aplicadas serão apresentadas a seguir.

Figura 18 – Em a) imagem do modelo FG 3228F 1,8 mm. Em b) uma imagem de microscópio focando na distribuição dos abrasivos de diamantes. Em c) uma imagem focando no perfil abrasivo da ferramenta



Fonte: Autoria própria.

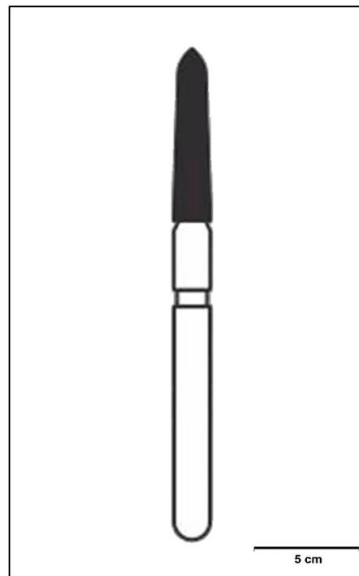
Na Figura 18a é mostrada uma vista geral da aparência da ferramenta. As Figuras 18b e 18c foram feitas utilizando um microscópio óptico com aumento de 4x, existente no

Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) na UFSCar. A ideia era caracterizar a ferramenta de acordo com o tamanho do grão do abrasivo. As medições pelo microscópio ótico resultaram em uma faixa de tamanho de grão 50  $\mu\text{m}$ . Os parâmetros definidos foram:

- Rotação da Ferramenta: 18 000 rpm (Vel. de corte = 1130,4 mm/s);
- Avanço da Ferramenta sobre a peça: 0,0005 mm/revolução;
- Profundidade de Corte (DC): 1,0 mm;

A primeira ferramenta utilizada foi um micro rebolo abrasivo, fabricado pela a KG Sorensen, no Brasil, modelo: FG 3228F Diamantada com o diâmetro da haste de 1,8mm, diâmetro médio na região a ser usada de 1,2 mm, ela possui formato Cônico de Topo Ogival, como mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Microrrebolo KG Sorensen FG3228F

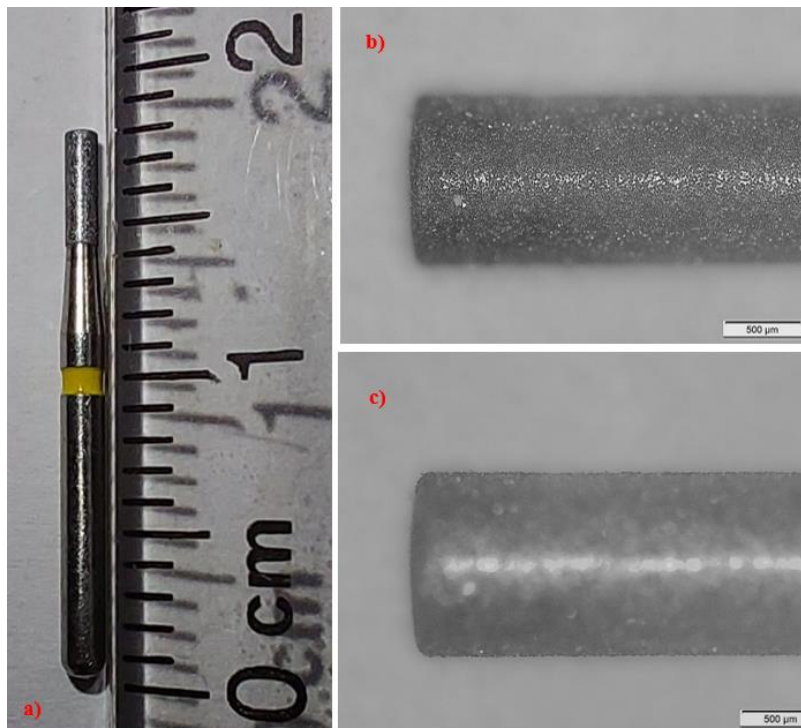


Fonte: KG SORENSEN, 2024.

A Figura 20a apresenta uma vista geral da aparência da outra ferramenta abrasiva. Já as Figuras 20b e 20c foram obtidas por meio do microscópio ótico. O objetivo dessa análise foi caracterizar a ferramenta quanto ao tamanho dos grãos abrasivos. As medições realizadas indicaram que os grãos apresentam tamanho médio em torno de 30  $\mu\text{m}$ , o que é compatível com a especificação nominal do microrrebolo utilizado. Com base nessas observações e nas informações fornecidas pelo fabricante, os parâmetros definidos foram:

- Rotação da Ferramenta: 18 000 rpm (Vel. de corte = 1130,4 mm/s);
- Avanço da Ferramenta sobre a peça: 0,0005 mm/revolução;
- Profundidade de Corte (DC): 0,3 mm;

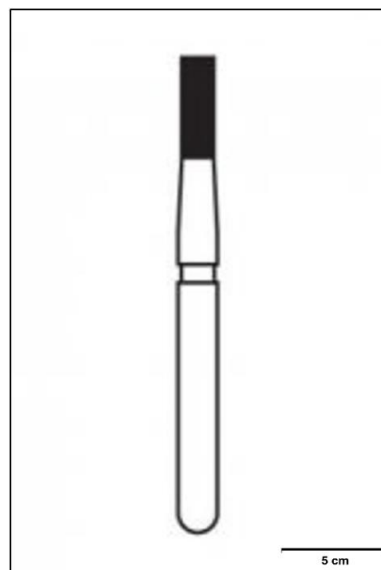
Figura 20 – Em a) imagem do modelo FG 1093EF 1,2 mm. Em b) uma imagem de microscópio focando na distribuição dos abrasivos de diamantes. Em c) uma imagem focando no perfil abrasivo da ferramenta



Fonte: Autoria própria.

A segunda ferramenta utilizada foi um micro rebolo abrasivo, fabricado pela a KG Sorensen, no Brasil, modelo: FG 1093FF Diamantada com o diâmetro da haste de 1,8mm e o diâmetro da parte abrasiva de 1,2mm, ela possui formato Cilíndrica de topo plano.

Figura 21 – Microrrebolo KG Sorensen FG 1093FF



Fonte: KG SORENSEN, 2024.

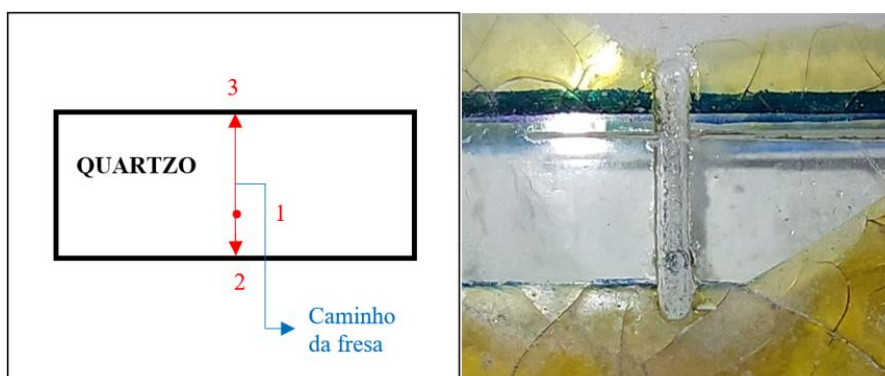
### 3.3.1. Wafer de quartzo- $\alpha$

A peça a ser usinada foi um *wafer* de 0,5mm de quartzo- $\alpha$ , plano X, monocristalino sintético adquirido na *Wafer University Inc.* A peça de quartzo fixada na mesa da máquina pronta para ser usinada para isso foi utilizado Cimento Termoplástico de quartzo, modelo Lakeside n° 70, e o vidro, que desempenha o papel de uma superfície que mantenha a peça na posição durante a usinagem.

### 3.3.2. Microrrebolo KG Sorensen FG 3228F

O primeiro teste com a ferramenta FG 3228F, os parâmetros usados foram os descritos na metodologia deste trabalho, amostra 1. Na Figura 22a é mostrado o caminho percorrido pela ferramenta, onde ela fez a entrada (1), com um microrretificação frontal com 1mm de profundidade após isso o microrrebolo se desloca para a posição 2, saindo do quartzo, e após isso ela avança até a posição 3, executando também uma microrretificação tangencial. Já a Figura 22b foi feita por uma câmera sem ampliação, e mostra a peça de quartzo após a usinagem.

Figura 22 – Em a) Planejamento de trajetória do microrrebolo 1. b) Usinagem realizada pelo microrrebolo 1.



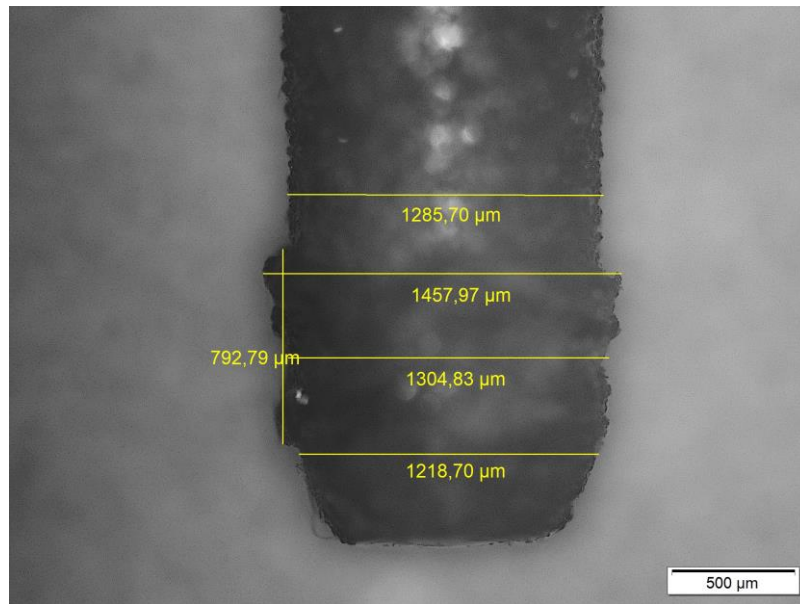
Fonte: Autoria própria.

Após o experimento, observou-se que a ferramenta abrasiva foi impregnada por uma mistura de quartzo removido e o cimento de quartzo termoplástico usado para fixar a amostra à superfície de usinagem.

Na Figura 23, utilizou-se o microscópio ótico, e após um aumento focado no cimento impregnado na ferramenta, observou as lascas de quartzo encrostadas na ferramenta. Outro fato

constatado foi que a ferramenta abrasiva perdeu a ponta junto com os abrasivos. Esse comportamento ocorreu devido ao formato pontiagudo da ferramenta resulta à condição de velocidade de corte nula no momento do contato inicial com a peça. Além disso, é possível que o perfil pontiagudo observado não corresponda ao corpo metálico da ferramenta propriamente dito, mas sim à camada de adesivo utilizada para fixação dos grãos abrasivos.

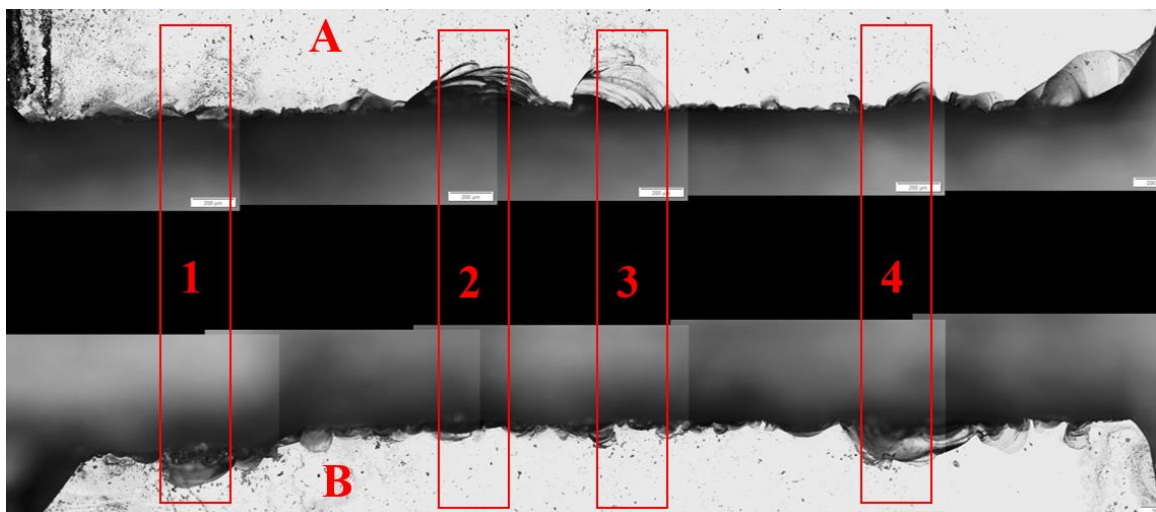
Figura 23 – Microrrebolo FG 3228F.



Fonte: Autoria própria

A Figura 24, foi feita a partir de uma colagem de imagens feita no microscópio ótico, nela consegue-se observar a presença de lascamentos que foram dimensionados conforme a metodologia.

Figura 24 – Borda superior da Amostra 1.



Fonte: Autoria própria.

Nas regiões mostradas, coletou-se as medidas das lascas, conforme a Tabela 1, ao todo, as lascas tiveram profundidade média de 136  $\mu\text{m}$ .

Tabela 1 – Medidas da profundidade das lascas da Amostra 1.

Borda A.1	44,78 $\mu\text{m}$	Borda B.1	141,28 $\mu\text{m}$
Borda A.2	175,47 $\mu\text{m}$	Borda B.2	55,92 $\mu\text{m}$
Borda A.3	277,56 $\mu\text{m}$	Borda B.1	105,71 $\mu\text{m}$
Borda A.4	102,14 $\mu\text{m}$	Borda B.1	188,34 $\mu\text{m}$

Fonte: Autoria própria

Também nas regiões mostradas, coletou-se a medida da largura do canal feito pelo microrrebolo e, conforme a Tabela 2, ao todo, a largura média do canal feito foi de 1403,7  $\mu\text{m}$ .

Tabela 2 – Medidas da largura do canal da Amostra 1

Largura 1	1478,70 $\mu\text{m}$
Largura 2	1378,21 $\mu\text{m}$
Largura 3	1376,62 $\mu\text{m}$
Largura.4	1381,40 $\mu\text{m}$

Fonte: Autoria própria

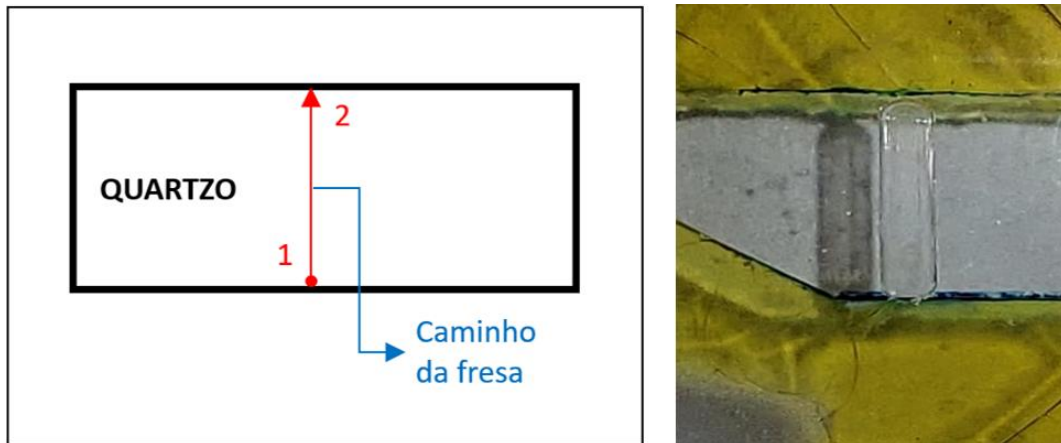
De acordo com a Figura 24 com as medidas obtidas pelo software do próprio microscópio, tem-se que o diâmetro do microrrebolo na região de trabalho, profundidade de 1 mm, mede aproximadamente 1285,7  $\mu\text{m}$ . Ou seja, o microrrebolo é cerca de 8 % (118  $\mu\text{m}$ ) menor do que o canal usinado.

### 3.3.3. Microrrebolo KG Sorensen FG 1093FF

O outro teste realizado com a ferramenta FG 1093FF, os parâmetros usados foram os descritos, amostra 2. Na Figura 25a, é mostrado o caminho percorrido pelo microrrebolo, onde

ele fez a entrada (1), através de uma microrretificação frontal com 0,35mm de profundidade, após isso o microrrebolo se desloca para a posição 2, sem sair do quartzo. Essa mudança no trajeto da ferramenta foi para evitar o contato da ferramenta com o cimento e conseqüentemente, ter um resultado melhor. Já a Figura 25b é mostrado a peça de quartzo após a usinagem.

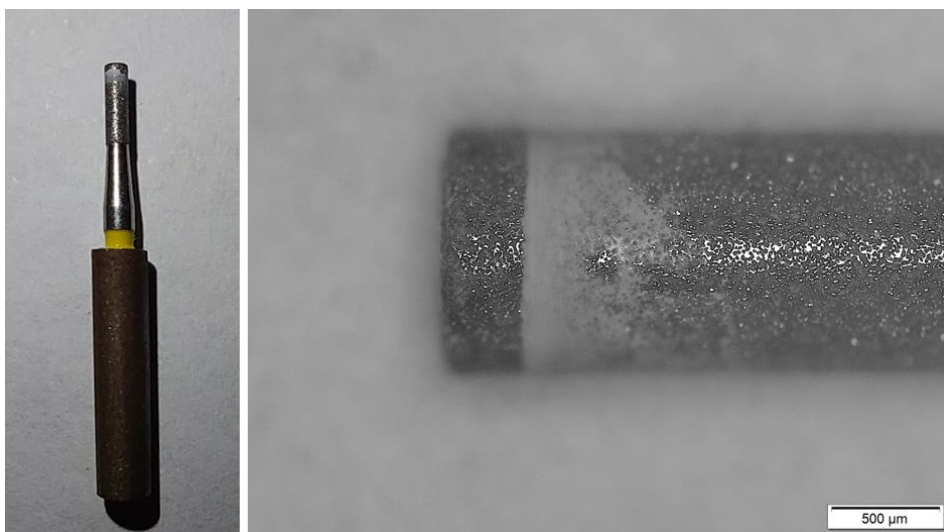
Figura 25 – Em a) Planejamento de trajetória do microrrebolo 2. b) Usinagem realizada pelo microrrebolo.



Fonte: Autoria própria

Após a usinagem, observou-se que a segunda ferramenta abrasiva (Figura 26) teve poucas impregnações da mistura de quartzo removido e o cimento termoplástico usado para fixar a amostra à superfície de usinagem. E após uma ampliação pode-se observar que na região onde a ferramenta trabalhou quase não teve impregnações, a maior parte ficou na parte acima da região utilizada na usinagem.

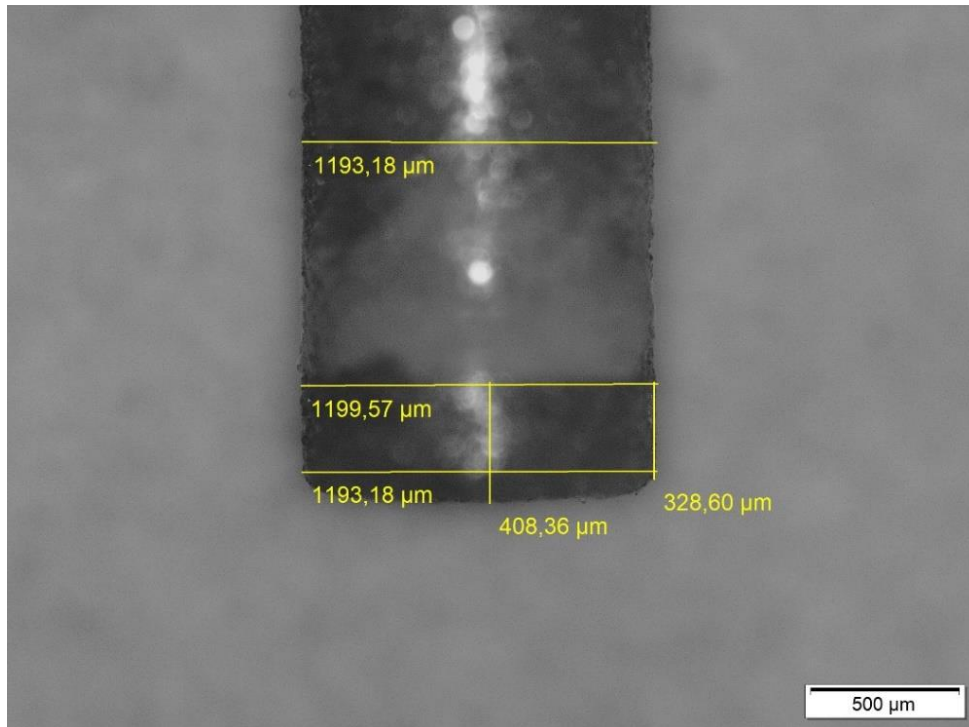
Figura 26 – Em a) Microrrebolo após a usinagem. b) Microrrebolo após a usinagem vista no microscópio.



Fonte: Autoria própria

A ferramenta manteve suas dimensões, sua forma cilíndrica e os abrasivos após a usinagem, conforme pode ser visto na Figura 27.

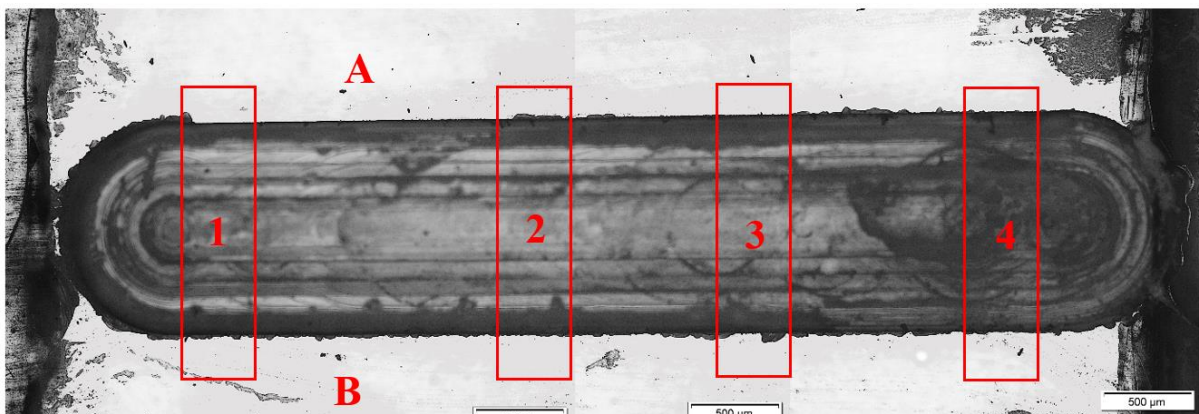
Figura 27 – Microrrebolo FG 1093FF.



Fonte: Autoria própria

A Figura 28, foi feita a partir de uma colagem de imagens feita no microscópio óptico, nela consegue-se observar a presença de lascamentos que foram dimensionados conforme a metodologia.

Figura 28 – Borda superior da Amostra 2.



Fonte: Autoria própria

Nas regiões mostradas, coletou-se as medidas das lascas, conforme a Tabela 3, ao todo, as lascas tiveram profundidade média de 21,07 µm.

Tabela 3 – Medida da profundidade das lascas da Amostra 2.

Borda A.1	20,74 $\mu\text{m}$	Borda B.1	19,14 $\mu\text{m}$
Borda A.2	27,66 $\mu\text{m}$	Borda B.2	15,95 $\mu\text{m}$
Borda A.3	10,63 $\mu\text{m}$	Borda B.3	40,41 $\mu\text{m}$
Borda A.4	14,88 $\mu\text{m}$	Borda B.4	19,14 $\mu\text{m}$

Fonte: Autoria própria

Também nas regiões mostradas, coletou-se a medida da largura do canal feito pelo microrrebolo e, conforme a Tabela 4, a largura média do canal feito foi de 1244,23  $\mu\text{m}$ .

Tabela 4 – Medidas da largura do canal da Amostra 2.

Largura 1	1225,11 $\mu\text{m}$
Largura 2	1266,55 $\mu\text{m}$
Largura 3	1237,84 $\mu\text{m}$
Largura.4	1247,41 $\mu\text{m}$

Fonte: Autoria própria

De acordo com a Figura 28, com as medidas do microscópio, tem-se que o diâmetro do microrrebolo na região que ela que trabalhou, profundidade de 0,35 mm, mede aproximadamente 1200  $\mu\text{m}$ . Ou seja, o microrrebolo é cerca de 3,55 % (44,23  $\mu\text{m}$ ) menor do que o canal usinado.

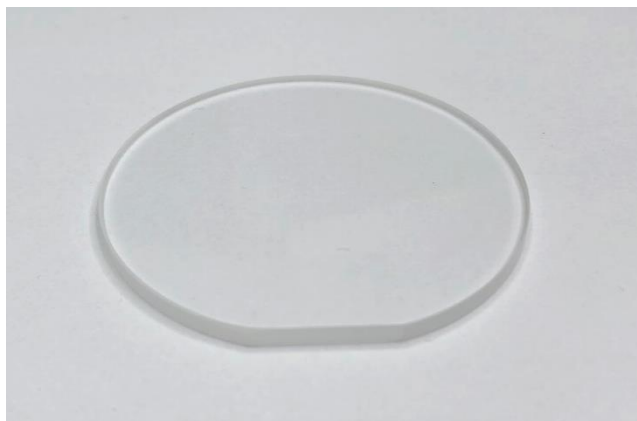
### 3.3.4. Definição do microrrebolo

De acordo com os testes feitos, o microrrebolo escolhido foi o KG Sorensen 1093FF que teve um desempenho superior ao KG Sorensen 3228F. Os resultados melhores foram obtidos por ter reduzido o tamanho do abrasivo, ao menor avanço e a menor profundidade de corte. Aliado a isso o microrrebolo 3228F teve mais contato com o cimento, por conta da maior profundidade de corte e por ter entrado em contato direto com o cimento quando saiu da peça, provavelmente teve seu desempenho afetado por conta dos *pockets* da ferramenta serem preenchidos com cimento e *chips* de quartzo fazendo com que a ferramenta perdesse seu desempenho de corte, gerando um maior lascamento das bordas superiores do canal.

### 3.4. WAFER DE QUARTZO- $\alpha$ (PLANO AT)

A peça a ser usinada foi um *wafer* de quartzo- $\alpha$  monocristalino sintético, com diâmetro de 50mm e espessura de 2,5 mm e orientação cristalina AT, adquirido da empresa *Wafer University Inc.*, conforme ilustrado na Figura 29.

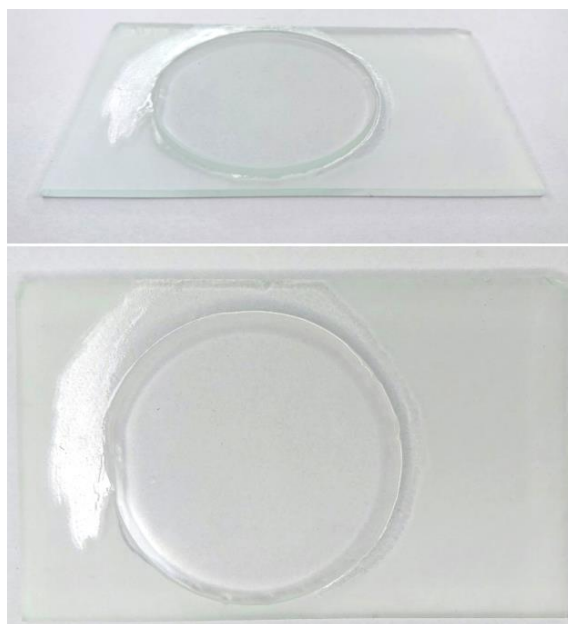
Figura 29 – *Wafer* de quartzo- $\alpha$ , plano AT.



Fonte: Autoria própria

Para facilitar a fixação do *wafer* na mesa da máquina, ele foi colado sobre um suporte retangular de vidro, que atuou como superfície de sacrifício, conforme mostrado na Figura 30. A adesão foi realizada utilizando a cola Super Bonder LOCTITE Original. O uso da superfície de sacrifício teve como finalidade garantir a estabilidade da peça durante o processo de usinagem.

Figura 30 – *Wafer* quartzo- $\alpha$ , plano AT, colado no vidro de sacrifício



Fonte: Autoria própria

### 3.5. SELEÇÃO DE PARÂMETROS PARA OS TESTES

Os parâmetros adotados neste estudo foram definidos com base em uma comparação com o trabalho de Araujo (2015), e com base neste estudo, foi calculado o volume removido por revolução (VRR) pelo disco atuando sobre o quartzo. A partir desse valor de VRR, foi possível determinar o avanço necessário, considerando a profundidade de corte e a rotação do *spindle* previamente estabelecidas, de modo a reproduzir o mesmo VRR obtido no processo com disco.

Essa abordagem permitiu uma comparação da viabilidade tecnológica entre os processos analisados. Apesar das diferenças mecânicas entre os métodos, ambos têm como objetivo a remoção de material, cada um apresentando suas próprias vantagens e limitações.

A Tabela 5 apresenta os parâmetros utilizados para o cálculo do VRR nos ensaios realizados com o disco abrasivo operando a uma rotação de 10 000 rpm, resultando em uma velocidade de corte aproximada de 29 924 mm/s.

Tabela 5 – Parâmetros usados no DISCO - Rotação: 10 000 rpm (Vel. de corte = 29 924 mm/s)

<b>Prof. de corte (mm)</b>	<b>Vel. de avanço (mm/s)</b>	<b>Menor Falha (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Avanço (mm/rev)</b>	<b>Taxa remoção de material (<math>\text{mm}^3/\text{s}</math>)</b>	<b>Volume removido por revolução (<math>\text{mm}^3/\text{rev}</math>)</b>
0,1	0,1	29	0,000600	0,0025	0,000015
0,1	1	32	0,00600	0,0254	0,000152
0,1	5	41	0,03000	0,1270	0,000762
0,35	0,1	28	0,00060	0,0089	0,000053
0,35	1	46	0,00600	0,0889	0,000533
0,35	5	37	0,03000	0,4445	0,002667

Fonte: Araujo (2015).

A Tabela 6 apresenta os parâmetros estabelecidos para os ensaios realizados com o microrrebolo operando a uma rotação de 10 000 rpm, correspondente a uma velocidade de corte aproximada de 628 mm/s. Embora essa velocidade de corte seja significativamente inferior à observada no processo com o disco abrasivo, foi possível manter o volume removido por revolução VRR por meio da redução do avanço por revolução.

Tabela 6 – Parâmetros usados KG Sorensen FG 1093FF - Rotação: 10 000 rpm (Vel. de corte = 628 mm/s)

<b>Prof. de corte (mm)</b>	<b>Vel. de avanço (mm/s)</b>	<b>Falhas (µm)</b>	<b>Avanço (mm/rev)</b>	<b>Taxa remoção de material (mm<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Volume removido por revolução (mm<sup>3</sup>/rev)</b>
0,1	0,0215	4,16	0,000129	0,0026	0,000015
0,1	0,215	30,59	0,001290	0,0258	0,000155
0,1	1,075	9,39	0,006450	0,1290	0,000774
0,35	0,0215	36,12	0,000129	0,0090	0,000054
0,35	0,215	43,39	0,001290	0,0903	0,000542
0,35	1,075	32,32	0,006450	0,4515	0,002709

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 7 apresenta os parâmetros experimentais aplicados aos testes com o disco abrasivo operando a 30 000 rpm, com velocidade de corte estimada em 89 771 mm/s, os quais serviram de base para o cálculo do VRR.

Tabela 7 – Parâmetros usados no DISCO - Rotação: 30 000 rpm (Vel. de corte = 89 771 mm/s)

<b>Prof. de corte (mm)</b>	<b>Vel. de avanço (mm/s)</b>	<b>Menor Falha (µm)</b>	<b>Avanço (mm/rev)</b>	<b>Taxa remoção de material (mm<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Volume removido por revolução (mm<sup>3</sup>/rev)</b>
0,1	0,1	23	0,00020	0,0025	0,000005
0,1	1	27	0,00200	0,0254	0,000051
0,1	5	33	0,01000	0,1270	0,000254
0,35	0,1	26	0,00020	0,0089	0,000018
0,35	1	35	0,00200	0,0889	0,000178
0,35	5	34	0,01000	0,4445	0,000889

Fonte: Araujo (2015).

A Tabela 8 apresenta os parâmetros utilizados nos ensaios com o microrrebolo, operando a 15 000 rpm, correspondente a uma velocidade de corte aproximada de 942 mm/s. Apesar da menor velocidade de corte em relação ao disco abrasivo, o VRR foi mantido mediante o ajuste do avanço por revolução.

Tabela 8 – Parâmetros usados KG Sorensen FG 1093FF - Rotação: 15 000 rpm (Vel. de corte = 942 mm/s)

<b>Prof. de corte (mm)</b>	<b>Vel. de avanço (mm/s)</b>	<b>Falhas (µm)</b>	<b>Avanço (mm/rev)</b>	<b>Taxa remoção de material (mm<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Volume removido por revolução (mm<sup>3</sup>/rev)</b>
0,1	0,0105995	4,27	0,000042	0,0013	0,000005
0,1	0,105995	46,57	0,000424	0,0127	0,000051
0,1	0,529975	3,60	0,002120	0,0636	0,000254
0,35	0,0105995	41,59	0,000042	0,0045	0,000018
0,35	0,105995	140,60	0,000424	0,0445	0,000178
0,35	0,529975	87,28	0,002120	0,2226	0,000890

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 9 estão reunidos os parâmetros empregados nos ensaios com o disco abrasivo a 50 000 rpm, utilizados para determinar o VRR. Essa condição operacional resultou em uma velocidade de corte próxima de 149 618 mm/s.

Tabela 9 – Parâmetros usados no DISCO - Rotação: 50000 rpm (Vel. de corte = 149618 mm/s)

<b>Prof. de corte (mm)</b>	<b>Vel. de avanço (mm/s)</b>	<b>Menor Falha (µm)</b>	<b>Avanço (mm/rev)</b>	<b>Taxa remoção de material (mm<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Volume removido por revolução (mm<sup>3</sup>/rev)</b>
0,1	0,1	23	0,00012	0,0025	0,000003
0,1	1	20	0,00120	0,0254	0,000030
0,1	5	31	0,00600	0,1270	0,000152
0,35	0,1	20	0,00012	0,0089	0,000011
0,35	1	27	0,00120	0,0889	0,000107
0,35	5	30	0,00600	0,4445	0,000533

Fonte: Autoria própria

A Tabela 10 apresenta os parâmetros adotados nos ensaios com o microrrebolo, operando a uma rotação de 20 000 rpm, o que equivale a uma velocidade de corte de aproximadamente 1 256 mm/s. Apesar de essa velocidade ser consideravelmente inferior à utilizada com o disco abrasivo, foi possível manter o VRR por meio da redução do avanço por revolução.

Tabela 10 – Parâmetros usados KG Sorensen FG 1093FF - Rotação: 20 000 rpm (Vel. de corte = 1 256 mm/s)

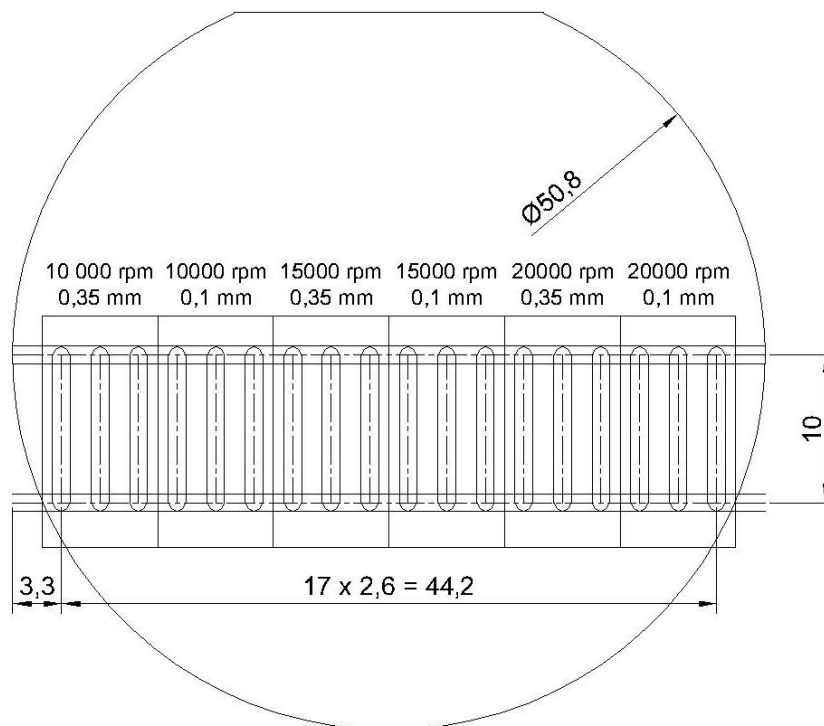
Prof. de corte (mm)	Vel. de avanço (mm/s)	Falhas ( $\mu\text{m}$ )	Avanço (mm/rev)	Taxa remoção de material ( $\text{mm}^3/\text{s}$ )	Volume removido por revolução ( $\text{mm}^3/\text{rev}$ )
0,1	0,00847315	4,70	0,000025	0,0010	0,000003
0,1	0,0847315	16,71	0,000254	0,0102	0,000031
0,1	0,4236575	26,81	0,001271	0,0508	0,000153
0,35	0,00847315	28,44	0,000025	0,0036	0,000011
0,35	0,0847315	31,92	0,000254	0,0356	0,000107
0,35	0,4236575	28,92	0,001271	0,1779	0,000534

Fonte: Autoria própria

### 3.6. PLANO DE USINAGEM DOS CANAIS

A peça utilizada nos ensaios foi um *wafer* de quartzo- $\alpha$  com espessura de 2,5 mm e diâmetro de 50,8 mm. A usinagem consistiu na realização de 18 canais paralelos, distribuídos uniformemente ao longo de uma faixa de 44,2 mm de comprimento, com espaçamento de 2,6 mm entre centros.

Figura 31 – Representação técnica da microrretificação dos canais com variação de parâmetros de corte



Fonte: Autoria própria

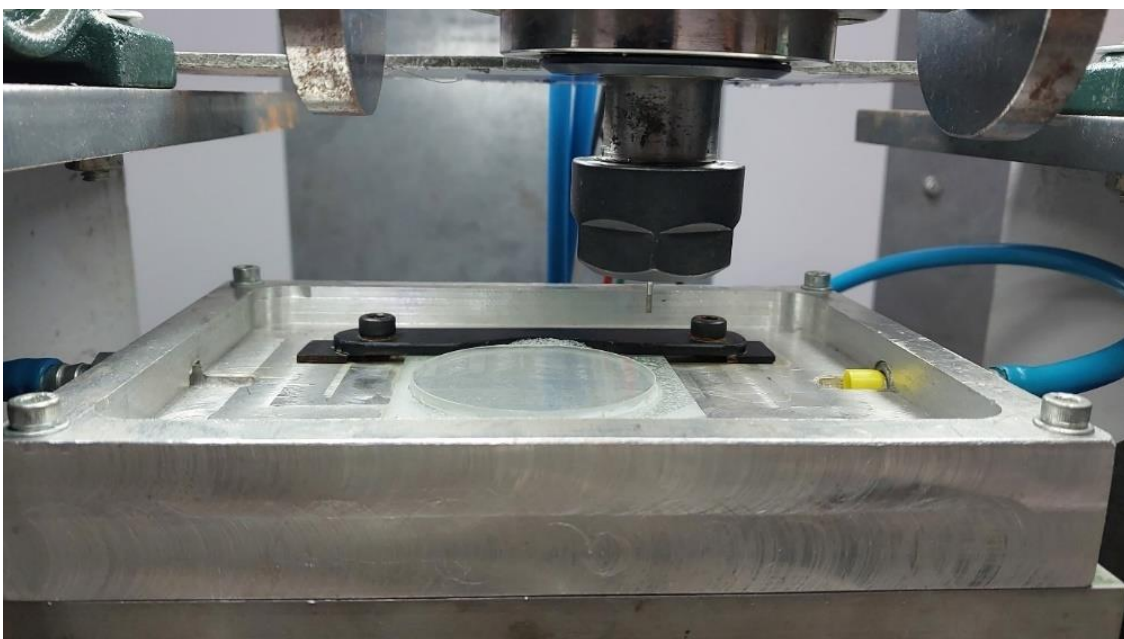
Conforme indicado no esquema técnico da Figura 31, a largura de cada canal foi definida a partir da geometria da ferramenta, sendo que a sobreposição dos cortes foi evitada para assegurar a individualização dos efeitos de cada condição de usinagem, e a região usinada apresenta 10 mm de comprimento.

Cada canal foi usinado em uma única passada, com profundidades de corte alternando entre 0,1 mm e 0,35 mm, conforme as condições de teste. Os experimentos foram realizados sob diferentes velocidades angulares do *spindle* (10 000 rpm, 15 000 rpm e 20 000 rpm), o que resultou em variações na frequência de rotação e nos parâmetros de avanço. Os avanços por revolução foram ajustados para garantir a manutenção do volume removido por revolução (VRR) conforme os critérios estabelecidos na comparação com o processo de desbaste por disco abrasivo.

### 3.7. MONTAGEM DO EXPERIMENTO DE MICRORRETIFICAÇÃO

Para a realização dos ensaios de microusinagem, utilizou-se a máquina C3L, já descrita anteriormente, equipada com um microrrebolo abrasivo montado em um sistema de alta rotação, conforme ilustrado na Figura 32. A usinagem do *wafer* de quartzo- $\alpha$  com espessura de 2,5 mm, já descrito acima, posicionado em uma base metálica usinada em alumínio, usada para manter a peça submersa. A fixação da peça foi realizada por meio de um sistema de prensa mecânica com dois parafusos e uma ponte metálica, garantindo estabilidade durante o processo.

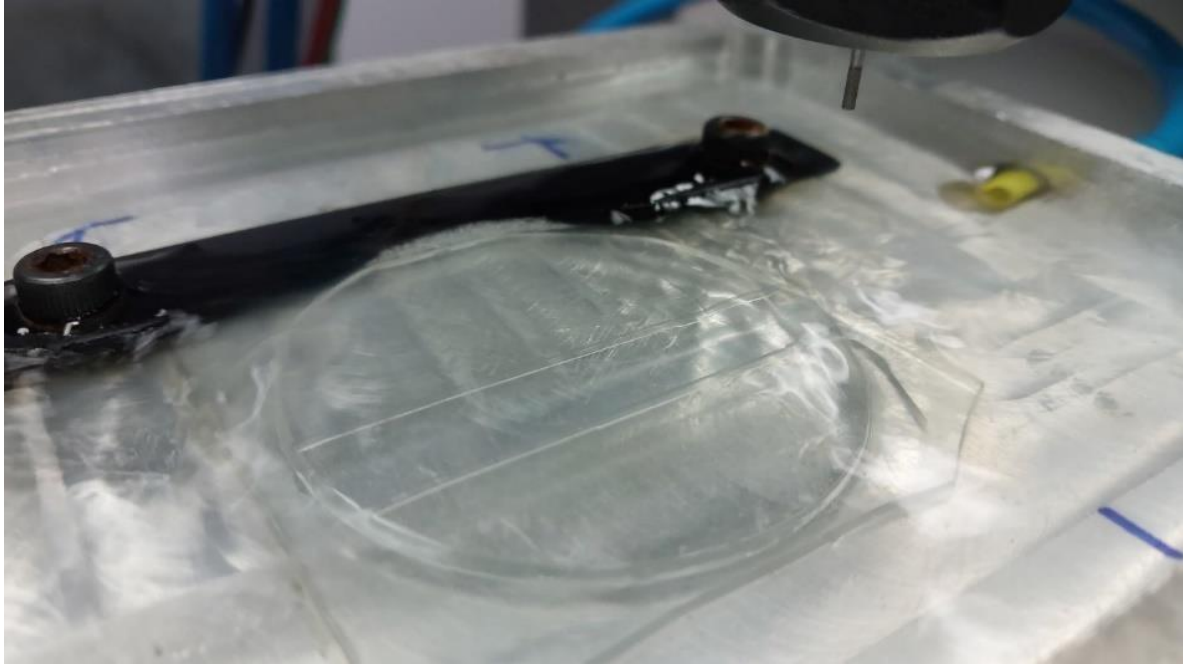
Figura 32 – Sistema de fixação do *wafer* de quartzo- $\alpha$  na bancada de usinagem



Fonte: Autoria própria

Já a Figura 33 é mostrado o momento anterior ao contato da ferramenta com o material, com o microrrebolo em posição e o *wafer* imerso em água, utilizada como fluido refrigerante e lubrificante durante o processo. A circulação da água tem por finalidade minimizar o aquecimento da peça e da ferramenta, além de auxiliar na remoção de partículas geradas.

Figura 33 – *Wafer* de quartzo- $\alpha$  imerso em água durante o processo de usinagem com microrrebolo abrasivo



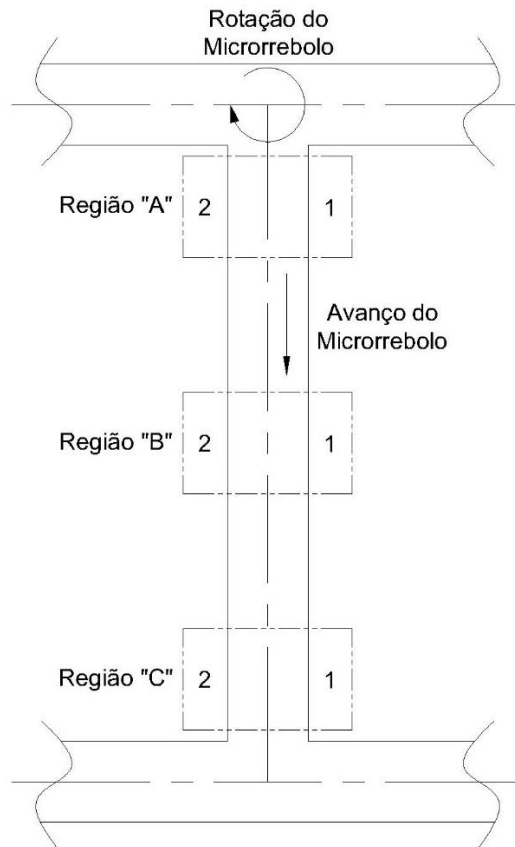
Fonte: Autoria própria

### 3.8. MÉTODO DE MEDIÇÃO DAS LASCAS

A caracterização da superfície usinada foi realizada por meio de microscopia óptica, com o objetivo de mensurar as lascas geradas durante o processo de microusinagem com rebolo diamantado. Para uma análise sistemática e comparativa, a superfície do *wafer* foi dividida em três regiões ao longo da trilha de usinagem, denominadas Região "A", Região "B" e Região "C", conforme ilustrado na Figura 34. Essas regiões correspondem, respectivamente, ao início, ao meio e ao final do percurso de avanço do microrrebolo.

Cada uma das três regiões foi analisada em dois lados distintos da trilha — Lado 1 (corte discordante) e Lado 2 (corte concordante) — permitindo a avaliação simétrica do comportamento da ferramenta abrasiva. Em cada lado de cada região foram realizadas cinco medições da extensão das lascas visíveis, totalizando dez medições por região e, conseqüentemente, trinta medições para cada teste.

Figura 34 – Regiões de análise das lascas ao longo da trilha de usinagem



Fonte: Autoria própria

A partir desses dados, foi calculada a média aritmética geral de cada teste, a qual serviu como critério comparativo para a identificação do melhor e do pior desempenho entre os parâmetros avaliados. Além da média global, as medições de cada região e lado também foram analisadas separadamente, com o intuito de verificar variações ao longo do percurso da ferramenta. Essa abordagem permite identificar possíveis efeitos como o entupimento dos *pockets* do microrrebolo ou a degradação progressiva de sua capacidade abrasiva, aspectos críticos para a estabilidade do processo de usinagem e a qualidade final da superfície do *wafer*.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados 18 testes experimentais, utilizando-se, em cada um deles, um microrrebolo novo do modelo KG Sorensen FG 1093FF, operando sob diferentes condições de usinagem previamente descritas nesta dissertação. Os principais parâmetros variáveis considerados nos testes foram: profundidade de corte, velocidade de avanço e rotação.

Após a execução de cada teste, foram realizadas medições das falhas (lascas “*chips*”) formadas na superfície usinada, por meio de microscopia óptica. Adicionalmente, buscou-se analisar a influência do entupimento dos canais de escoamento de cavacos (*pockets*) do microrrebolo ao longo do percurso de corte, verificando se havia relação entre o acúmulo de material e a piora na qualidade superficial.

Os resultados obtidos são apresentados a seguir, acompanhados de análises que discutem o impacto das variáveis de processo sobre a formação de lascas, a eficiência da remoção de material e o desempenho geral do microrrebolo em termos de desgaste e entupimento.

### 4.1. ANÁLISE DOS LIMITES DE DESEMPENHO

Dentre os 18 testes realizados, os valores extremos de desempenho foram desconsiderados por apresentarem alta dispersão, sendo eles a menor falha de 3,60  $\mu\text{m}$  e 140,60  $\mu\text{m}$ . Assim, foram considerados 16 testes válidos, com base na quantidade de lascas (falhas) geradas na superfície usinada. A análise foi conduzida a partir do menor e do maior valor médio obtido entre os testes observados.

O melhor resultado, que pode ser visto na Figura 35b, em termos de qualidade superficial, foi obtido com os seguintes parâmetros: rotação de 10 000 rpm, correspondente a uma velocidade de corte de 628 mm/s, profundidade de corte de 0,1 mm e velocidade de avanço de 0,0215 mm/s. Nessa condição, foi registrada uma média de 4,16  $\mu\text{m}$  de falha, com um avanço por revolução de 0,000129 mm/rev, taxa de remoção de material de 0,0026 mm<sup>3</sup>/s e volume removido por revolução (VRR) de 0,000015 mm<sup>3</sup>/rev. Esses valores indicam uma condição de usinagem com baixa agressividade, favorecendo a integridade superficial do material usinado.

Por outro lado, o pior desempenho que pode ser visto na Figura 35a foi observado com o microrrebolo operando a uma rotação de 15 000 rpm (velocidade de corte de 942 mm/s), com profundidade de corte de 0,35 mm e velocidade de avanço de 0,529975 mm/s. Essa combinação resultou em uma falha média de 87,28  $\mu\text{m}$ , representando o maior valor entre todos os testes. O avanço por revolução foi de 0,002120 mm/rev, a taxa de remoção de material atingiu 0,2226  $\text{mm}^3/\text{s}$  e o volume removido por revolução foi de 0,000890  $\text{mm}^3/\text{rev}$ . Embora esses parâmetros tenham possibilitado uma maior taxa de remoção, a integridade da superfície foi significativamente comprometida, evidenciando a limitação do processo em condições mais agressivas.

Figura 35 – Em a) Microscopia do canal com as maiores falhas. b) Microscopia do canal com as menores falhas.



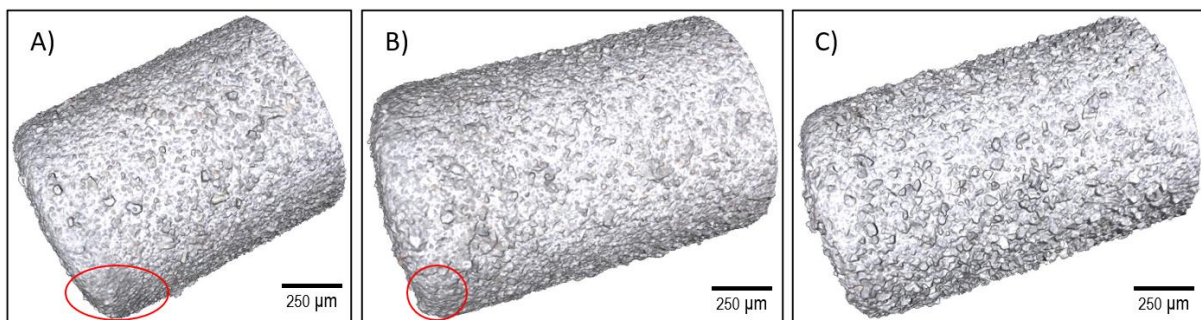
Fonte: Autoria própria

A comparação entre os dois casos evidencia o impacto direto das variáveis de corte na formação de falhas e na eficiência da remoção de material. O aumento do avanço e da

profundidade de corte, embora eleve o VRR e a produtividade, compromete substancialmente a qualidade superficial, especialmente em materiais frágeis como o quartzo- $\alpha$ . Portanto, para aplicações em que a integridade superficial é prioritária, recomenda-se a adoção de parâmetros mais conservadores, como os empregados no melhor resultado aqui apresentado.

Para a caracterização tridimensional da topografia das ferramentas abrasivas, foi utilizado o microscópio óptico com variação de foco Alicona InfiniteFocus SL. Este equipamento permite a obtenção de imagens tridimensionais de alta resolução por meio da tecnologia de varredura vertical por foco (Focus Variation), sendo especialmente eficaz para medições em superfícies com geometria complexa e texturas rugosas, como as encontradas em ferramentas abrasivas.

Figura 36 – Em a) Perfilometria do microrrebolo com pior resultado. b) Perfilometria do microrrebolo com melhor resultado. c) Perfilometria do microrrebolo novo.



Fonte: Autoria própria

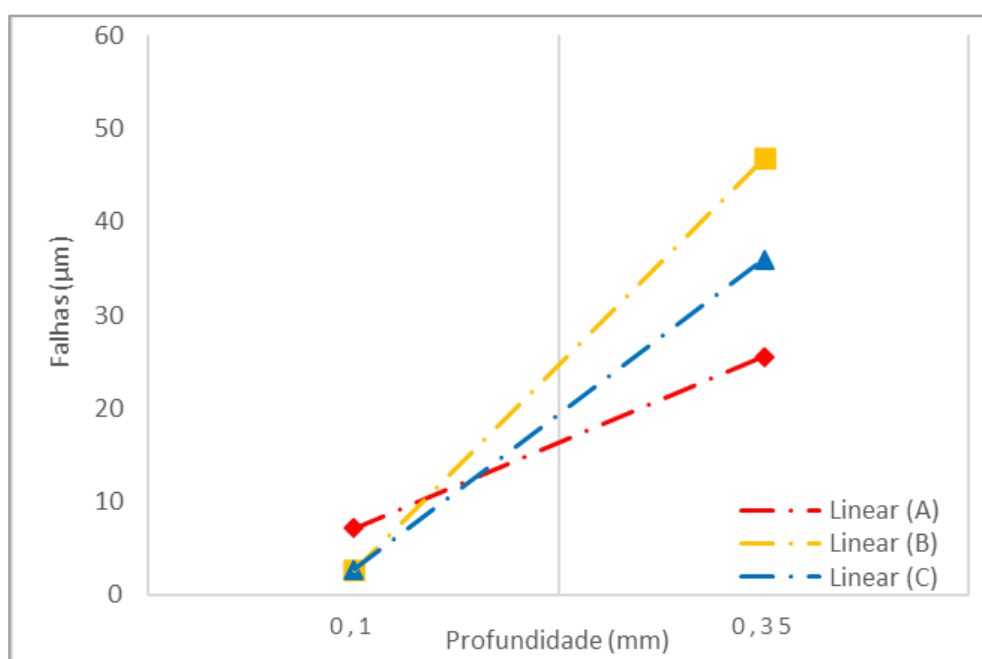
Na Figura 36a, os parâmetros operacionais aplicados resultaram na maior média de falhas observadas entre os ensaios realizados. Nessa imagem, pode-se identificar um desgaste considerável dos abrasivos na região destacada, quando comparada à ferramenta nova ilustrada na Figura 36c. Tal desgaste pode ser atribuído à maior agressividade do processo, em função de parâmetros como maior profundidade de corte e avanço, os quais intensificam a carga mecânica sobre os grãos, favorecendo sua fratura ou desintegração parcial.

Por outro lado, na Figura 36b, os parâmetros utilizados resultaram na menor média de falhas. Embora seja possível observar um leve desgaste na região indicada, os abrasivos permanecem íntegros em comparação com a ferramenta nova (Figura 36c). Isso indica que as condições de usinagem menos severas preservaram melhor a integridade da ferramenta abrasiva, contribuindo para uma microrretificação mais estável e com menor geração de defeitos superficiais.

## 4.2. EFEITO DA PROFUNDIDADE DE CORTE NAS FALHAS

Abaixo serão apresentados os gráficos da extensão média das falhas (lascas) em função da profundidade de corte ( $z$ ), sob diferentes condições de avanço por rotação ( $f$ ) e rotação ( $n$ ). Cada gráfico mostra a evolução das falhas em três regiões distintas da trilha de usinagem: Região A (início), Região B (meio) e Região C (final), permitindo observar a tendência de degradação ao longo do avanço da ferramenta.

Figura 37 – Falhas *versus* Profundidade de corte -  $f = 0,000129$  mm/rev &  $n = 10\ 000$  rpm

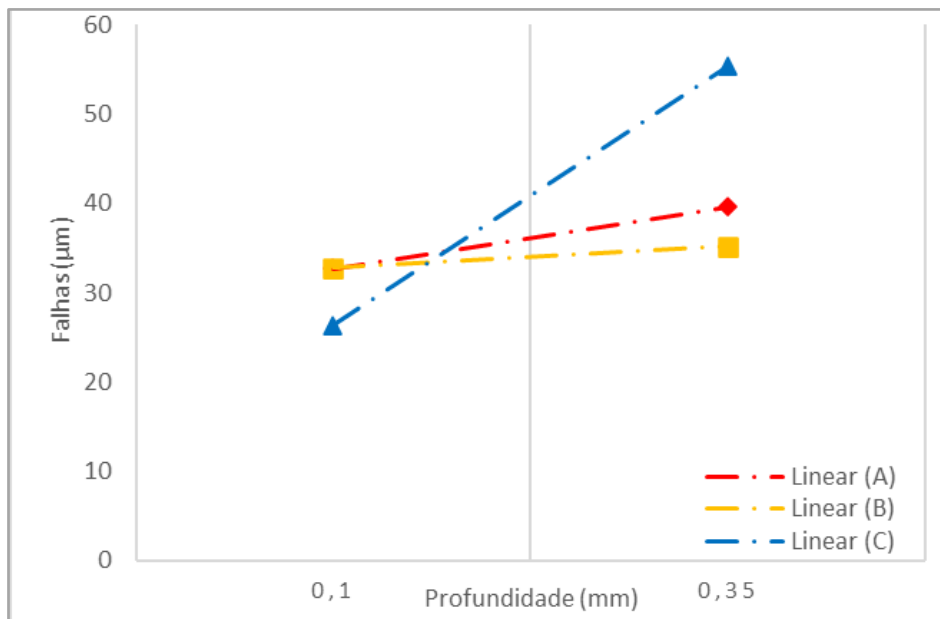


Fonte: Autoria própria

Na Figura 37 observa-se que o aumento da profundidade de corte provoca aumento significativo no tamanho das falhas. Esse agravamento da condição superficial, sugere um possível entupimento dos *pockets* do microrrebolo, que possivelmente foi ocasionado pela baixa rotação com um baixo avanço.

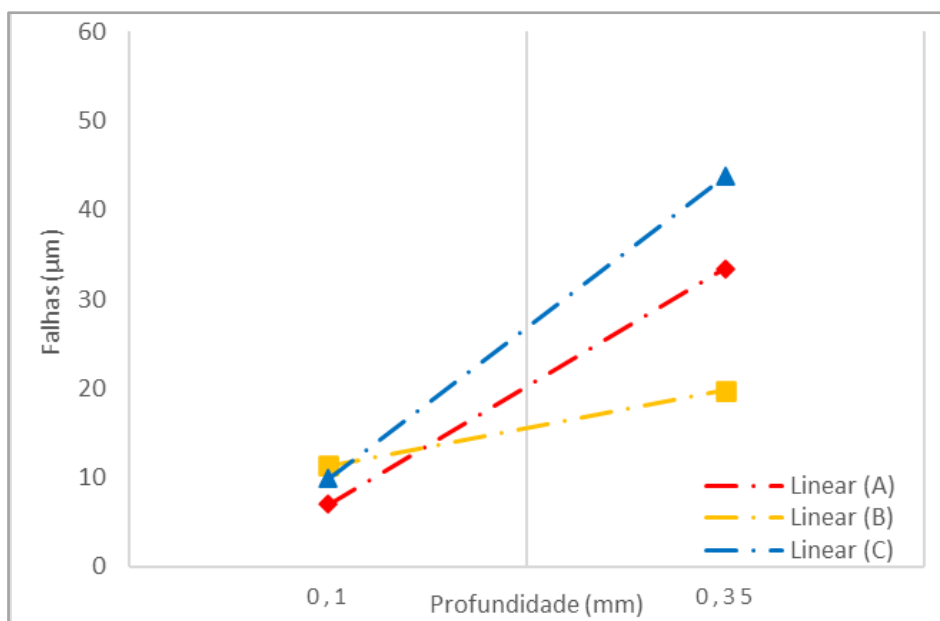
Na Figura 38, com um avanço mais elevado, o efeito da profundidade sobre as falhas torna-se menos pronunciado. As três regiões apresentam variação moderada, com destaque para a Região C, que sofre maior deterioração. Essa condição sugere que, embora o avanço mais agressivo reduza o tempo de contato, a Região C continua acumulando maior desgaste.

Figura 38 – Falhas *versus* Profundidade de corte -  $f = 0,00129$  mm/rev &  $n = 10\ 000$  rpm



Fonte: Autoria própria

Figura 39 – Falhas *versus* Profundidade de corte -  $f = 0,00645$  mm/rev &  $n = 10\ 000$  rpm

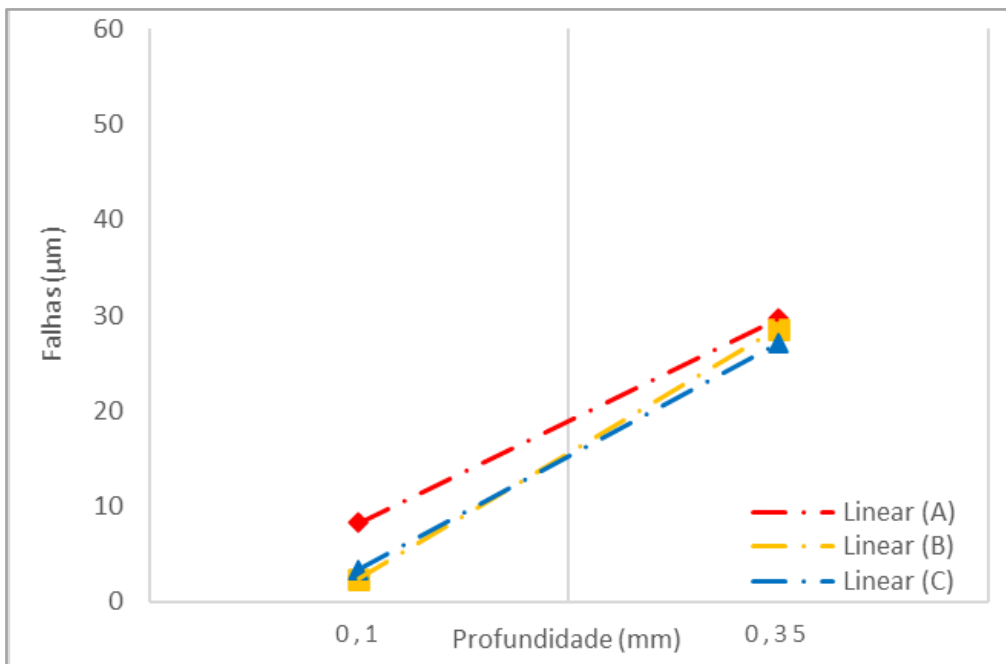


Fonte: Autoria própria

A Figura 39, revela um crescimento mais acentuado das falhas nas Regiões A e C com a maior profundidade, sendo a Região C a mais crítica. O comportamento reforça a hipótese de que o acúmulo de material e o desgaste progressivo são mais severos ao final do corte.

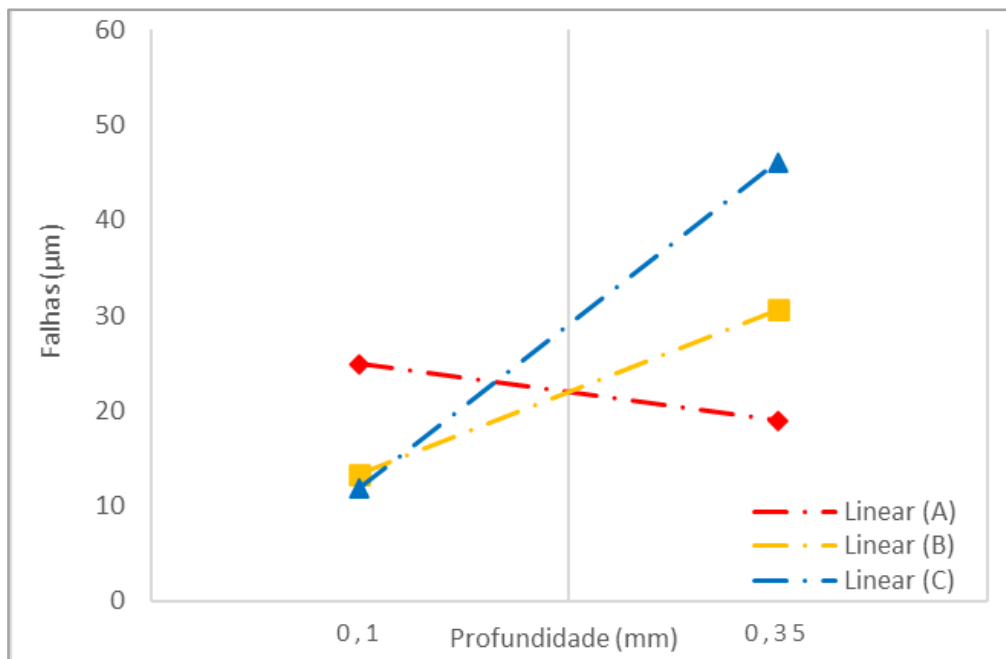
A Figura 40, sob condição de avanço ultrabaixo e rotação elevada, todas as regiões demonstram crescimento quase linear e similar na extensão das falhas com o aumento da profundidade.

Figura 40 – Falhas *versus* Profundidade de corte -  $f = 0,0000254 \text{ mm/rev}$  &  $n = 20\ 000 \text{ rpm}$



Fonte: Autoria própria

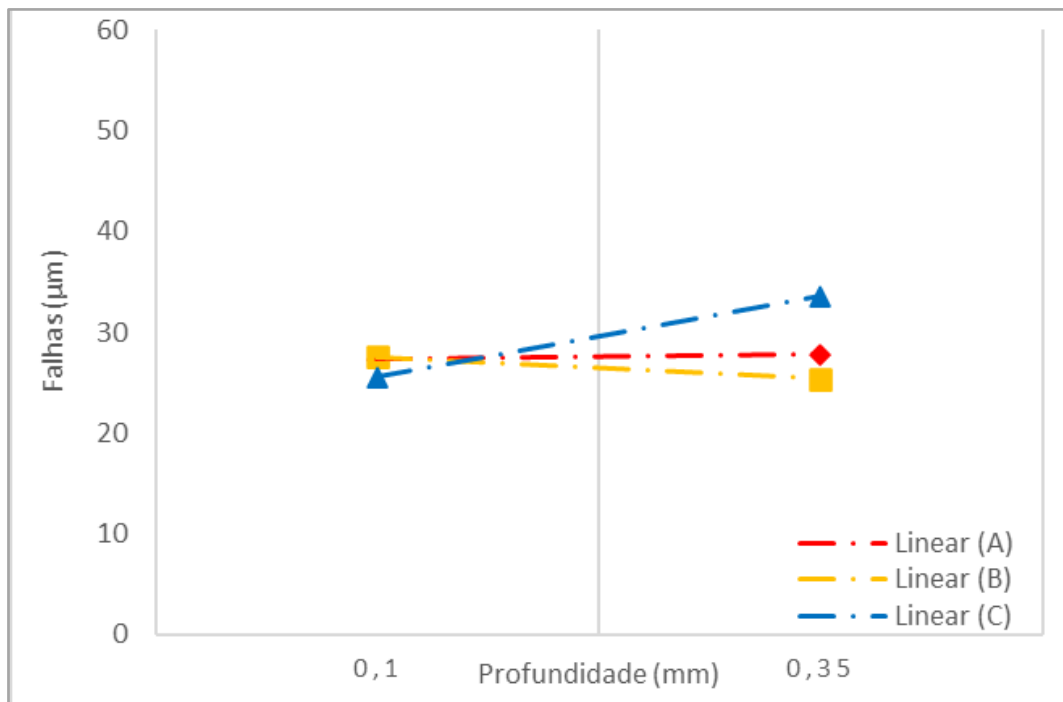
Figura 41 – Falhas *versus* Profundidade de corte -  $f = 0,000254 \text{ mm/rev}$  &  $n = 20\ 000 \text{ rpm}$



Fonte: Autoria própria

A Figura 41, a Região C exibe um comportamento mais agressivo, com aumento expressivo das falhas em conjunto com o aumento da profundidade. A Região A apresenta comportamento inverso, a diminuição do tamanho das falhas com o aumento da profundidade, possivelmente pode ter ocorrido devido ao impacto inicial do microrrebolo na peça.

Figura 42 – Falhas *versus* Profundidade de corte -  $f = 0,00127 \text{ mm/rev}$  &  $n = 20\ 000 \text{ rpm}$



Fonte: Autoria própria

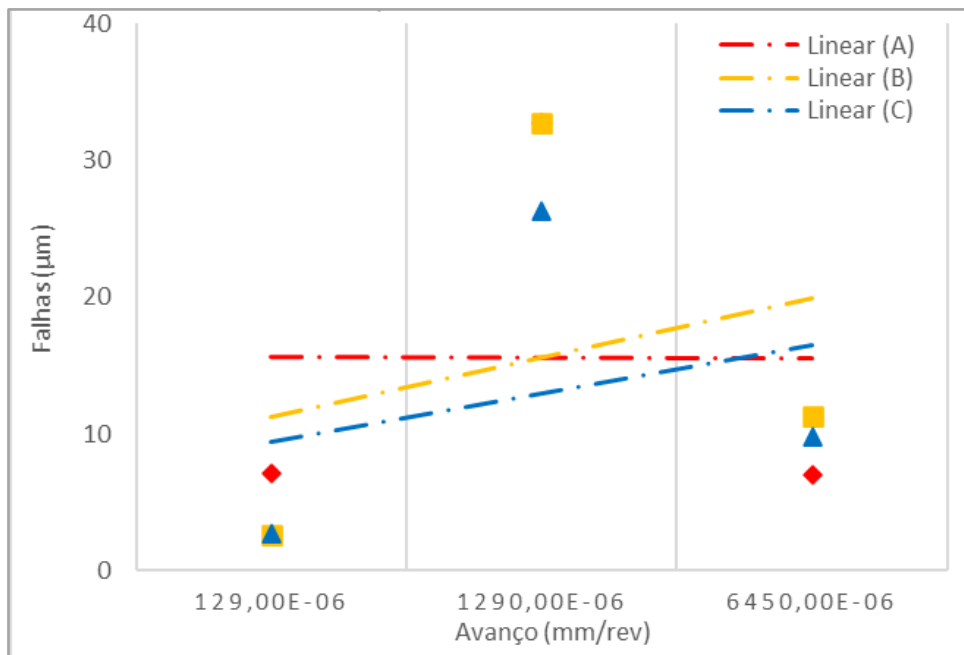
A Figura 42, combinando alto avanço e alta rotação, o gráfico mostra valores próximos entre as três regiões e as duas profundidades, com leve destaque para a Região C. A diferença sutil entre as regiões pode indicar que a velocidade do processo foi suficiente para evitar entupimentos significativos, promovendo fratura mais uniforme.

### 4.3. EFEITO DO AVANÇO NAS FALHAS

As figuras abaixo apresentam os gráficos da extensão média das falhas (lascas) em função do avanço por rotação ( $f$ ), considerando profundidades de corte ( $z = 0,10 \text{ mm}$  e  $z = 0,35 \text{ mm}$ ) e diferentes velocidades de rotação ( $n$ ). Assim como na seção anterior, as medições foram segmentadas pelas regiões A, B e C da trilha de corte, permitindo analisar a evolução das falhas conforme o desgaste da ferramenta ao longo do percurso.

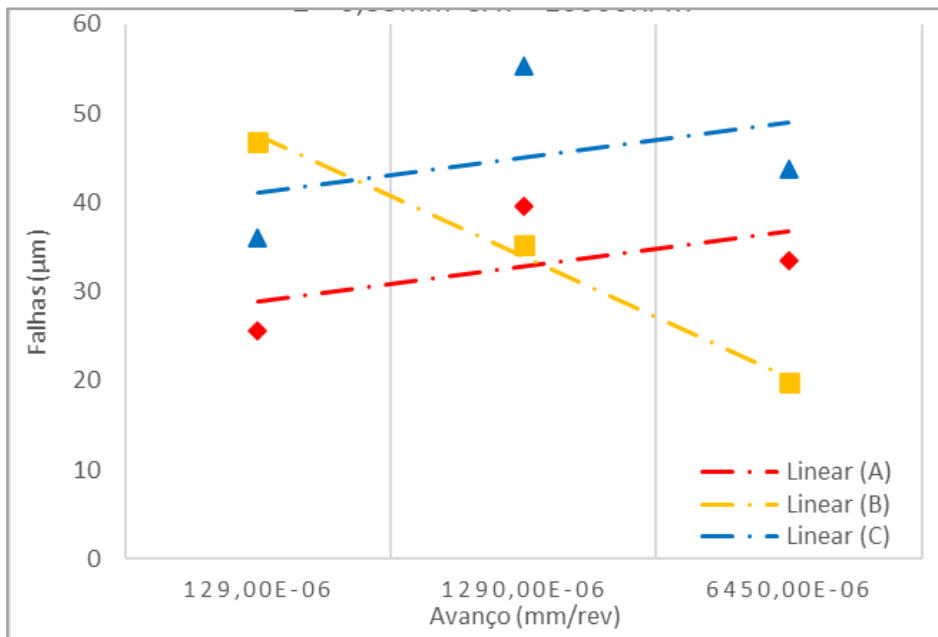
Na Figura 43 pode-se observar que a tendência geral é de crescimento moderado das falhas com o avanço, sendo mais acentuada na Região C. Esse crescimento moderado pode ser devido à baixa rotação aliada à profundidade reduzida resulta em menor agressividade.

Figura 43 – Falhas versus Avanço -  $z = 0,1 \text{ mm}$  &  $n = 10\,000 \text{ rpm}$



Fonte: Autoria própria

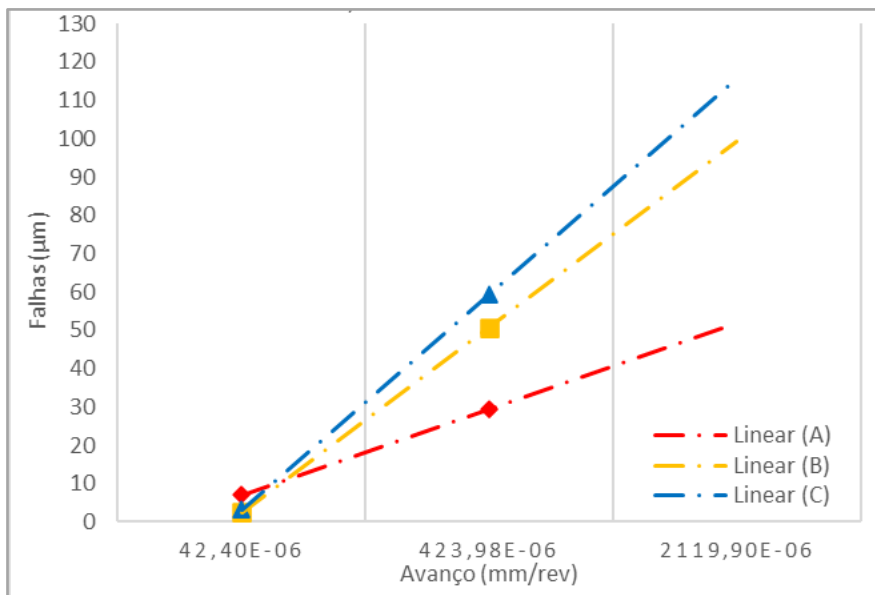
Figura 44 – Falhas versus Avanço -  $z = 0,35 \text{ mm}$  &  $n = 10\,000 \text{ rpm}$



Fonte: Autoria própria

A Figura 44 apresenta uma condição de menor rotação e maior profundidade, as falhas tendem a ser mais expressivas e distribuídas de forma irregular. A Região C mantém os maiores valores, enquanto a Região B apresenta decréscimo, possivelmente devido à ação intermitente da abrasão ou à estabilização momentânea no meio do percurso. A menor rotação favorece o acúmulo de material nos canais da ferramenta.

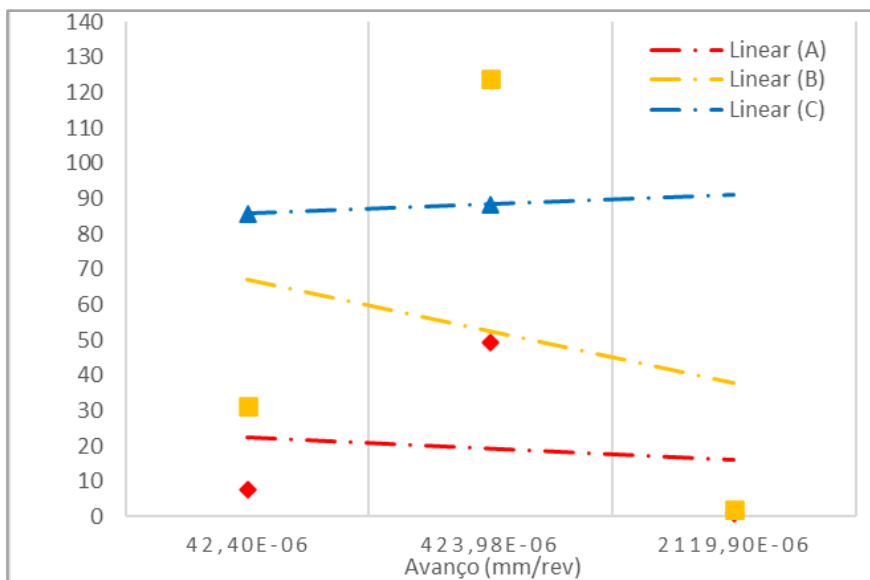
Figura 45 – Falhas versus Avanço -  $z = 0,1 \text{ mm}$  &  $n = 15\ 000 \text{ rpm}$



Fonte: Autoria própria

Na Figura 45, observa-se novamente um padrão claro de crescimento das falhas com o avanço, com maior intensidade na Região C. Esse padrão reforça a questão de um possível entupimento dos *pockets* ao longo da trilha, o comportamento linear aconteceu devido ao descarte do teste que obteve a menor falha.

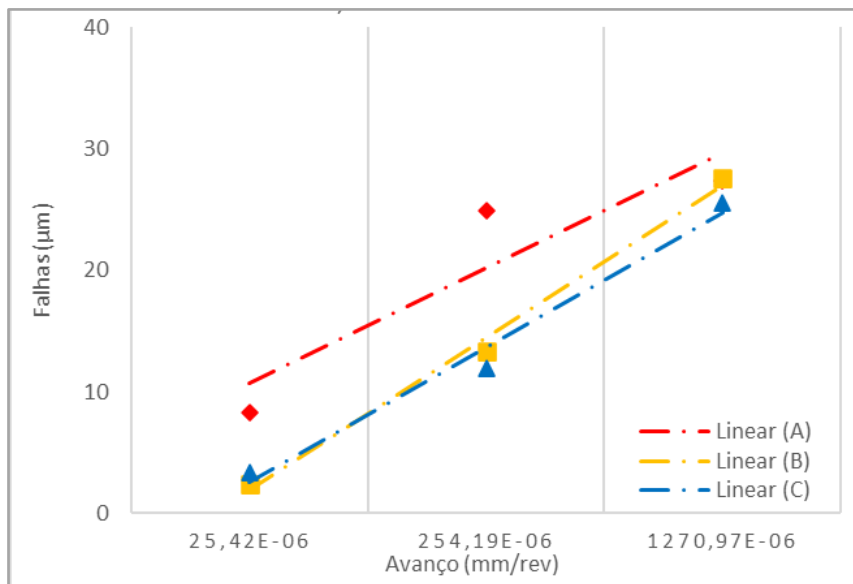
Figura 46 – Falhas versus Avanço -  $z = 0,35 \text{ mm}$  &  $n = 15\ 000 \text{ rpm}$



Fonte: Autoria própria

A Figura 46 apresenta valores absolutos das falhas são mais altos que nas condições anteriores, especialmente nas Regiões B e C. O avanço maior tende a reduzir o tempo de contato por rotação, porém, a profundidade maior amplifica os esforços, gerando falha maior.

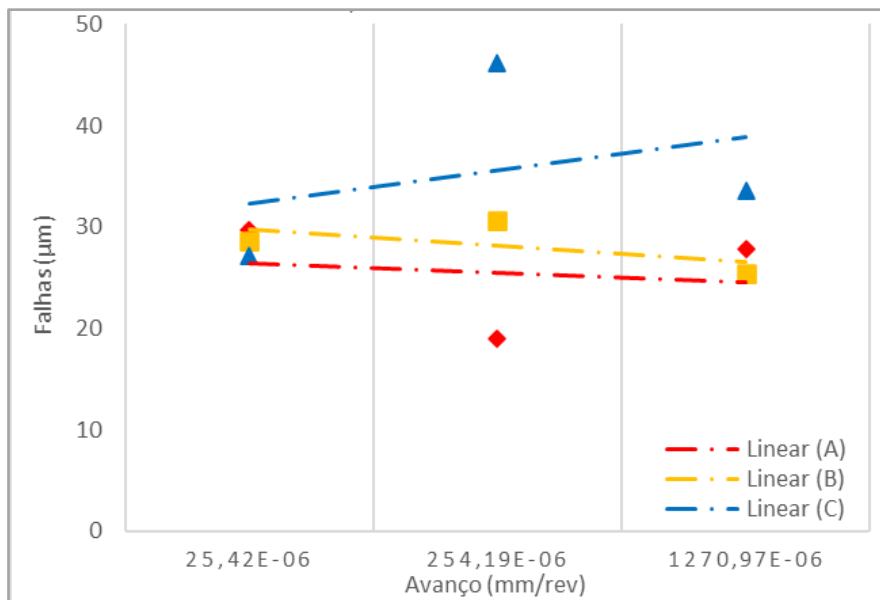
Figura 47 – Falhas versus Avanço -  $z = 0,1 \text{ mm}$  &  $n = 20\ 000 \text{ rpm}$



Fonte: Autoria própria

A Figura 47, com profundidade menor e a rotação alta mostra que, a influência do avanço torna-se mais perceptível. A Região A apresenta aumento acentuado das falhas, destacando-se das demais. Este comportamento indica que, mesmo sob menor carga de corte, a repetição do contato promove maior desgaste na extremidade da trilha.

Figura 48 – Falhas versus Avanço -  $z = 0,35 \text{ mm}$  &  $n = 20\ 000 \text{ rpm}$



Fonte: Autoria própria

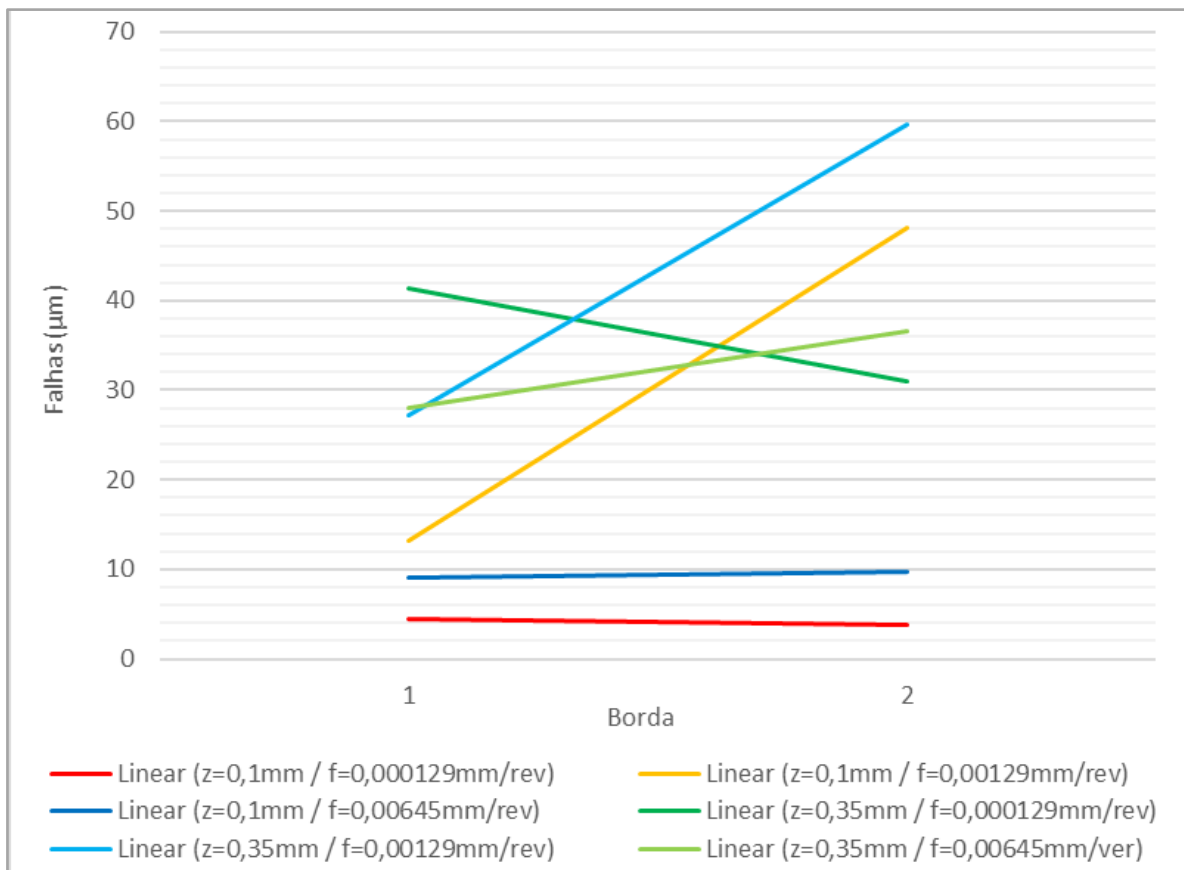
Na Figura 48, observa-se uma tendência ascendente das falhas na região C e decrescente nas regiões A e B com o aumento do avanço. A Região C, localizada ao final da

trilha de corte, apresenta valores mais elevados, indicando acúmulo progressivo de desgaste e possível entupimento dos canais de escoamento.

#### 4.4. EFEITO DA BORDA NAS FALHAS

As figuras abaixo apresentam os gráficos da média das falhas observadas nas bordas 1 (discordante) e 2 (concordante) da trilha de usinagem, sob diferentes condições de rotação ( $n$ ), profundidade de corte ( $z$ ) e avanço por rotação ( $f$ ). A borda 1 representa o lado inicial da ferramenta abrasiva, enquanto a borda 2 representa o lado oposto, onde o microrrebolo encerra o contato com a superfície do *wafer*.

Figura 49 – Falhas *versus* Borda -  $n = 10\ 000$  rpm



Fonte: Autoria própria

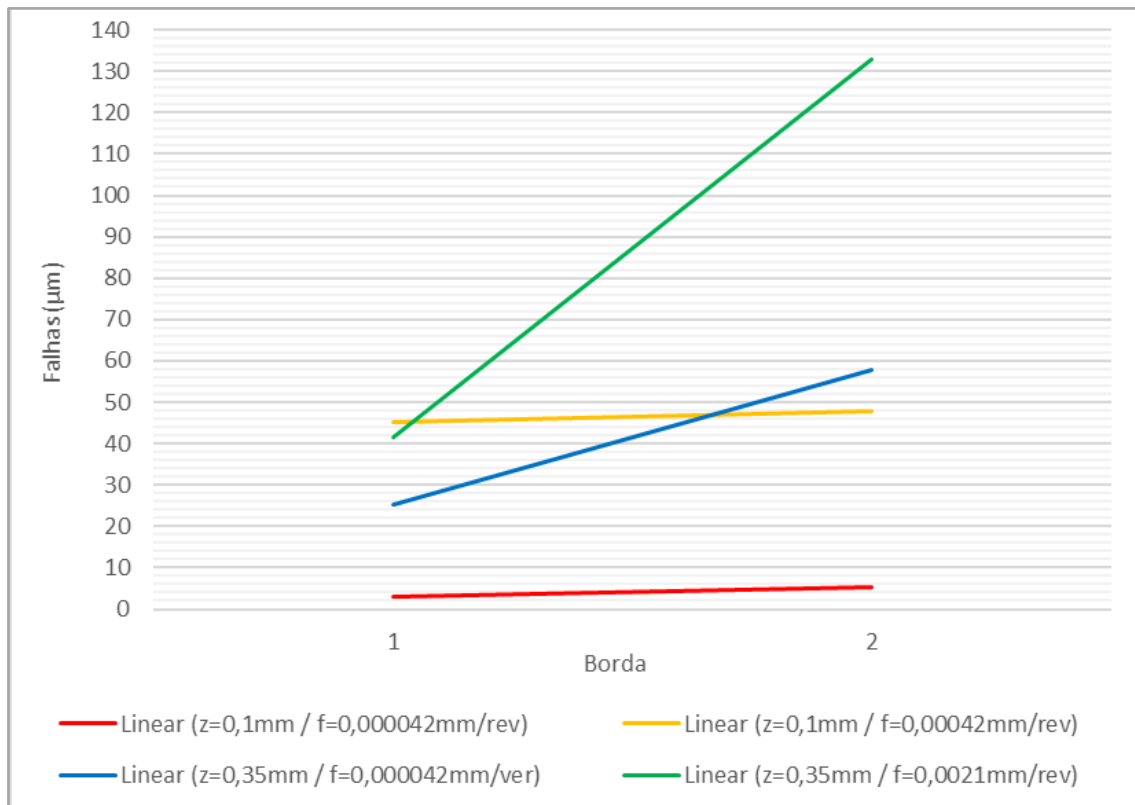
A Figura 49 mostra a condição de menor rotação (10 000 rpm), observou-se falhas maiores na borda 2, especialmente no teste com profundidade de corte de 0,35 mm e avanço de 0,00129 mm/rev (linha azul-claro), que atingiu cerca de 60 µm. Esse comportamento está

relacionado à menor eficiência na evacuação de cavacos em baixas rotações, o que favorece o acúmulo de detritos e, conseqüentemente, o aumento de falhas na região final do corte.

Em contrapartida, a condição menos severa, linha vermelha ( $Z = 0,1$  mm e  $f = 0,000129$  mm/rev) apresentou falhas praticamente constantes entre as bordas, indicando maior estabilidade no processo e menor desgaste da ferramenta.

Na figura 50, o padrão de aumento das falhas na borda 2 permanece evidente, principalmente nas condições mais severas. A linha verde, correspondente à profundidade de corte de 0,35 mm e avanço de 0,0021mm/rev, apresentou crescimento expressivo das falhas, ultrapassando 130  $\mu$ m.

Figura 50 – Falhas versus Borda - n = 15 000 rpm

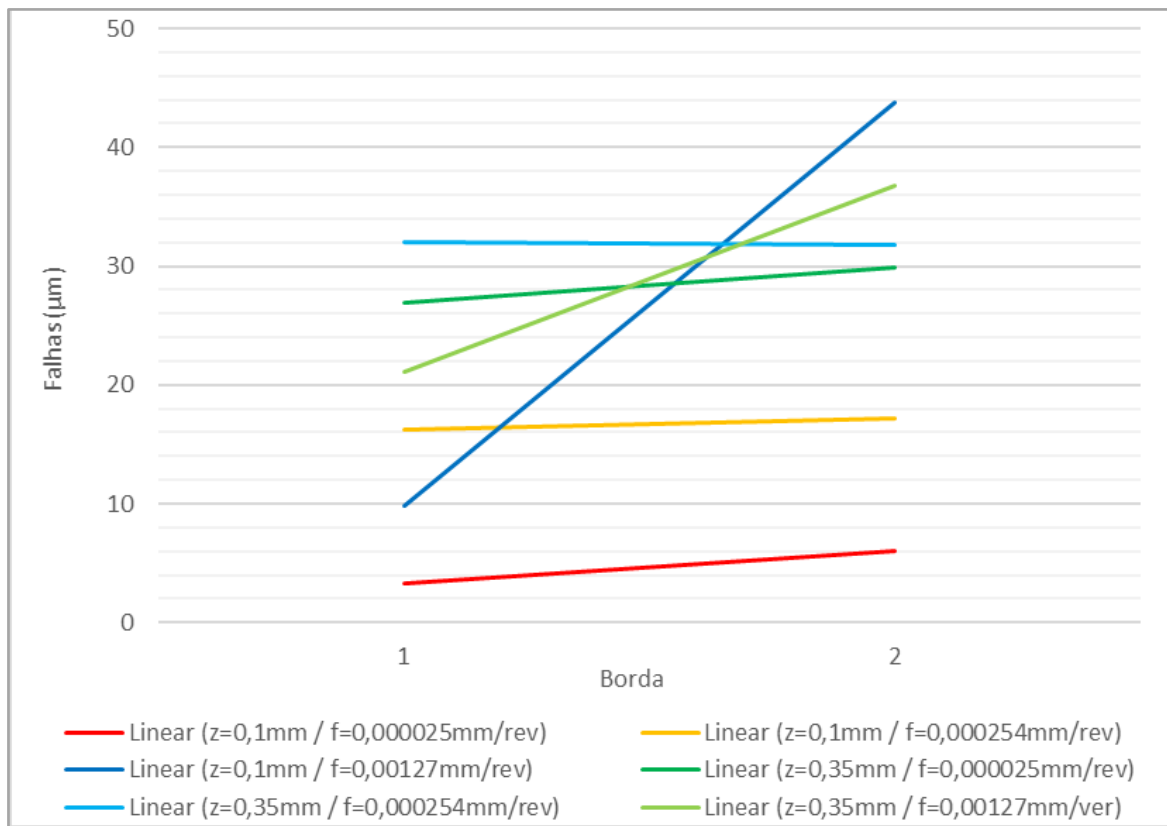


Fonte: Autoria própria

Já as condições com menor profundidade ( $Z = 0,1$  mm) exibiram pouca variação entre as bordas, indicando menor influência dos parâmetros sobre o desgaste lateral.

A Figura 51 apresenta a rotação mais elevada, as falhas continuam se concentrando na borda 2, com destaque para a condição ( $Z = 0,1$  mm e  $f = 0,00127$  mm/rev), cuja profundidade média de falha ultrapassa 40  $\mu$ m, mesmo com a profundidade menor.

Figura 51 – Falhas versus Borda - n = 20 000 rpm



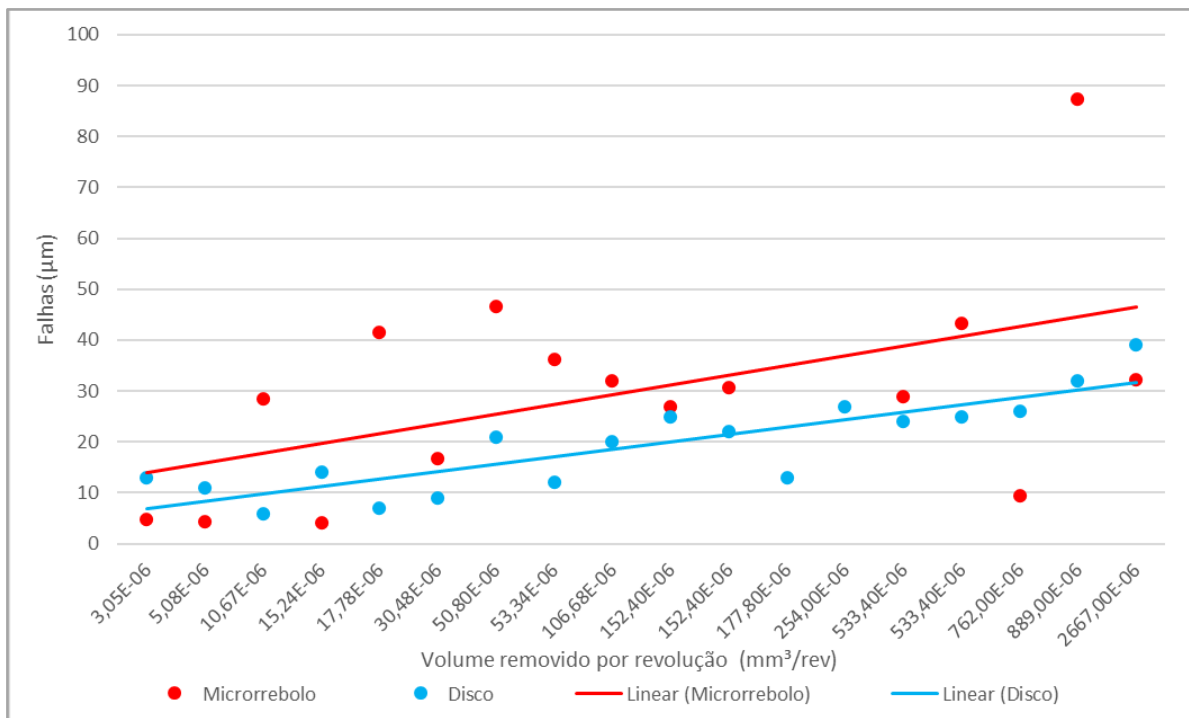
Fonte: Autoria própria

Por outro lado, nas condições menos severas ( $Z = 0,1$  mm com  $f = 0,000025$  mm/ver e  $f = 0,000254$  mm/rev), a diferença entre as bordas é discreta, indicando maior estabilidade do processo. A intensificação das falhas na borda de saída sugere que o aumento da carga de corte gera acúmulo de detritos e desgaste localizado, favorecendo o entupimento dos canais abrasivos e o comprometimento da qualidade superficial.

#### 4.5. VIABILIDADE TECNOLÓGICA

A Figura 52 apresenta a correlação entre o volume de material removido por revolução ( $\text{mm}^3/\text{rev}$ ) e a média das falhas superficiais ( $\mu\text{m}$ ) geradas após a usinagem com duas ferramentas abrasivas distintas: microrrebolo (em vermelho) e disco abrasivo convencional (em azul). As linhas de tendência linear indicam os comportamentos médios de cada processo, com respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), sendo 0,727 para o disco abrasivo e 0,2594 para o microrrebolo.

Figura 52 – Falha *versus* Volume Removido por revolução (mm<sup>3</sup>/rev)



Fonte: Autoria própria

Observa-se que o microrrebolo apresenta uma tendência de crescimento mais acentuada das falhas à medida que o volume removido por revolução aumenta. O baixo valor de R<sup>2</sup> (0,2594) evidencia, resultados mais dispersos e uma forte correlação entre o aumento da carga de corte e a geração de danos superficiais, sugerindo que o processo com microrrebolo é mais sensível às variações de remoção de material, provavelmente devido à sua menor capacidade de dissipação de calor e evacuação de cavacos. Esse comportamento está associado ao entupimento progressivo dos canais abrasivos, intensificando o desgaste por abrasão e atrito nas regiões finais da trilha.

Em contrapartida, o disco abrasivo apresenta uma relação menos dispersa entre as variáveis, com menor inclinação da reta e um R<sup>2</sup> próximo a 1 (0,727). Isso indica uma menor influência direta do volume removido sobre as falhas, o que pode ser atribuído à sua maior área de contato e eficiência no transporte de cavacos, proporcionando estabilidade dimensional e térmica mesmo em condições mais agressivas. A dispersão dos pontos também sugere que outros fatores, como variações no padrão de abrasividade ou no comportamento do fluido de corte, podem estar influenciando os resultados no caso do disco.

## 5. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o objetivo proposto neste trabalho foi alcançado, a saber, a avaliação do processo de microrretificação aplicado ao quartzo- $\alpha$ , especificamente no plano AT, com especial atenção para os defeitos gerados durante o processo.

Os testes experimentais, para definição do microrrebolo a ser utilizado, demonstraram que o microrrebolo KG Sorensen 1093FF apresentou desempenho superior ao KG Sorensen 3228F. Esse desempenho mais satisfatório deve-se, principalmente, à menor granulometria dos abrasivos. Outros fatores colaboraram para isso, o menor avanço e à menor profundidade de corte adotados. Além do microrrebolo 3228F apresentou maior contato com o cimento, especialmente nas saídas da peça, o que possivelmente comprometeu seu desempenho devido ao entupimento dos *pockets* da ferramenta com resíduos de cimento e fragmentos de quartzo, levando ao aumento do lascamento da superfície usinada. Posteriormente a fim de melhorar os resultados obtidos, foi desenvolvido um dispositivo que permitiu que essa usinagem fosse feita submersa na água, melhorando principalmente a refrigeração e limpeza do microrebolo

Observou-se que com a profundidade maior as falhas aumentaram, conforme esperado. A profundidade de corte de 0,1 mm, em 83 % dos testes, gera maior incidência de falhas na Região A, próxima a entrada do microrrebolo. Enquanto a profundidade de 0,35 mm, em 67 % dos testes, tende a apresentar falhas maiores na Região C, próxima a saída do microrrebolo, possivelmente devido à menor eficiência na limpeza da ferramenta e maior entupimento dos *pockets*.

O aumento do avanço, por sua vez, apresentou tendência de intensificação das falhas, evidenciada nas Figuras 43, 45 e 47, que mostraram curvas de crescimento mais acentuadas. Em 88% das curvas foram crescentes com o aumento do avanço e a profundidade de 0,1 mm. Por outro lado, a profundidade de 0,35 mm o avanço não apresentou uma tendência expressiva de intensificação das falhas, pois metade das curvas apresentam comportamento decrescente menos acentuado dos tamanhos das falhas, e metade das curvas mostram um crescimento das falhas mais acentuado.

As análises também revelaram que a Borda 2 geralmente apresentou maior quantidade de falhas em comparação com a Borda 1. No entanto, na Figura 49 para o menor avanço ( $f = 0,000129$  mm/rev.), observou-se o oposto, possivelmente devido à maior eficiência na

limpeza da ferramenta e menor entupimento dos *pockets*, a ferramenta conseguiu manter um bom mecanismo de remoção.

Ao se avaliar os dados em função do VRR, verificou-se que o microrrebolo tende a apresentar maiores médias de falhas, excetuando-se as condições de baixo avanço e profundidade reduzida, nas quais o processo foi caracterizado como microrretificação frontal. Além disso, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) mostraram maior dispersão nos resultados obtidos com microrrebolo, indicando maior variabilidade no processo. Outro fator importante foi o *spindle* aerostático usado com os experimentos do disco abrasivo, teoricamente apresenta uma maior estabilidade durante a operação, superior ao *spindle* com rolamentos que equipa a máquina C3L usada na microrretificação,

Do ponto de vista tecnológico, o microrrebolo, apesar de mais sensível às variações de VRR e com um tamanho médio de falhas maior que o disco, apresenta vantagens relevantes na usinagem de precisão e miniaturização, especialmente em materiais duros e frágeis. Sua geometria permite usinagens com formas complexas, superando limitações de métodos convencionais (disco e fio abrasivo). Assim, destaca-se como uma alternativa promissora e versátil para aplicações em microescala e usinagem com precisão.

Por fim, nos 3 testes com as menores falhas, aproximadamente 4  $\mu\text{m}$ , foi observado praticamente uma microrretificação frontal plana e uma remoção dúctil, isso deve a combinação de um grão abrasivo menos pontiagudo e uma profundidade de corte menor que a profundidade crítica de lascamento, como visto na revisão do trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ALBERDI, R. *et al.* Strategies for optimal use of fluids in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 6, p. 491-499, 2011.
- ARAÚJO, L. A. O.. **Estudo do corte abrasivo de quartzo para a fabricação de geradores piezelétricos**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- AURICH, J. C.; CARRELLA, Marina; KIRSCH, Benjamin. Product-oriented sustainability aspects of abrasive processes. In: **International Manufacturing Science and Engineering Conference**. American Society of Mechanical Engineers, 2013. p. V001T01A062.
- AURICH, J. C.; CARRELLA, M.; WALK, M.. Micro grinding with ultra small micro pencil grinding tools using an integrated machine tool. **CIRP Annals**, v. 64, n. 1, p. 325-328, 2015.
- AURICH, J. C. *et al.* Abrasive processes for micro parts and structures. **CIRP Annals**, v. 68, n. 2, p. 653-676, 2019.
- AURICH, J. C. *et al.* Sustainability of abrasive processes. **CIRP Annals**, v. 62, n. 2, p. 653-672, 2013.
- BIFANO, T. G. **Ductile-regime grinding of brittle materials**. North Carolina State University, 1988.
- BIFANO, T. G.; HOSLER, J. B. **Precision grinding of ultra-thin quartz wafers**. 1993.
- CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais : uma introdução**. Tradução: Sergio Murilo Stamile Soares. 9. ed. John Wiley & Sons, 2018.
- COOK, R. F.; PHARR, G. M. **Direct observation and analysis of indentation cracking in glasses and ceramics**. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 73, n. 4, p. 787–817, 1990.
- CRYSTALS - MACROSCOPIC STRUCTURE. **The Quartz Page**, 2023. Disponível em: <[http://www.quartzpage.de/gen\\_struct.html](http://www.quartzpage.de/gen_struct.html)>. Acesso em: 24/11/2023.
- DANA, J. D.; HURLBUT, C. S. **Dana's Manual of Mineralogy. Revised by Cornelius S. Hurlbut**. New York; Chapman & Hall: London, 1944.
- FORD, W. E.; DANA, E. S. **A Textbook of Mineralogy: With an Extended Treatise on Crystallography and Phys. Mineralogy**. Wiley, 1932.
- FRIEDT, J. M.; CARRY, É. **Introduction to the quartz tuning fork**. *American Journal of Physics*, v. 75, n. 5, p. 415–422, 2007. DOI: [10.1119/1.2711826](https://doi.org/10.1119/1.2711826).
- HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. London: Edward Arnold, 1992.

IQD FREQUENCY PRODUCTS. **AT-Cut Crystals**. 2024. Disponível em: <https://www.iqdfrequencyproducts.com/en/news?d=at-cut-crystals>. Acesso em: 6 maio 2025.

JAUCH QUARTZ GmbH. **It's all about the angle: the AT-cut for quartz crystals**. Disponível em: <https://www.jauch.com/blog/en/its-all-about-the-angle-the-at-cut-for-quartz-crystals/>. Acesso em: 6 maio 2025.

KIRSCH, B.; *et al.* Application of ultra-small micro grinding and micro milling tools: possibilities and limitations. **Micromachines**, v. 8, n. 9, p. 261, 2017.

KIRSCH, B.; *et al.* Comparison of the embodied energy of a grinding wheel and an end mill. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 74-79, 2014.

KG SORENSEN. *Catálogo KG SORENSEN*. [S.l.]: KG Sorensen, 2024. Disponível em: <https://kgsorensen.com.br/wp-content/uploads/2024/08/Catalogo-KG-SORENSEN.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2025.

LAWN, B. **Fracture of brittle solids**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

MADOU, M. J. **Manufacturing techniques for microfabrication and nanotechnology**. CRC press, 2011.

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

MARINESCU, I. D. *et al.* **Handbook of machining with grinding wheels**. Crc Press, 2006.

MARINESCU, I., TOENSHOFF, H., and INASAKI, I. **Handbook of Ceramic Grinding and Polishing**. Noyes Publications, William Andrew Publishing, Norwick, NY, 2001.

NEWNHAM, R. **Properties of materials: anisotropy, symmetry, structure**. Oxford: OUP Oxford, 2004.

QIAN, H. *et al.* Review on research and development of abrasive scratching of hard brittle materials and its underlying mechanisms. **Crystals**, v. 13, n. 3, p. 428, 2023.

ROTH, A. **Mechanisms of material removal in grinding of brittle materials**. Aachen: Shaker Verlag, 1995.

SHARMA, A. *et al.* Machining of hard and brittle materials: A comprehensive review. **Materials Today: Proceedings**, v. 50, p. 1048-1052, 2022.

TAKAHASHI, Naoyuki *et al.* Growth of crystalline quartz films with AT-cut plane by means of catalyst-enhanced vapor-phase epitaxy under atmospheric pressure. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 66, n. 7, p. 1145-1149, 2005.

THE SILICA GROUP. **The Quartz Page**, 2014. Disponível em: [http://www.quartzpage.de/gen\\_mod.html#alpha](http://www.quartzpage.de/gen_mod.html#alpha). Acesso em: 24/11/2023.

VAZQUEZ CARAZO, A. **Piezoelectric transformers: An historical review.** In: Actuators. MDPI, 2016. p. 12.

VITTOZ, E. A. **Low-power crystal and MEMS oscillators.** Dordrecht: Springer, 2010.

XU, Fangmeng *et al.* Design strategy and micromachining technology of AT-cut high-frequency quartz resonators: A review. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 193, p. 109465, 2025.

YOSHIMURA, Jun-Ichi. Production and Applications of Synthetic Quartz. In: **Recent Advances in Mineralogy.** IntechOpen, 2023.

ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials.** Amsterdam: Elsevier, 1987.