

ESTUDO COMPARATIVO DO CORTE ABRASIVO DE UM BLOCO DE ALUMINA POLICRISTALINA 99,8%, UTILIZANDO EQUIPAMENTO DE USINAGEM COM SPINDLE RECLINÁVEL E MÁQUINA DE C ORTE COMERCIAL

Shalom Reges Parreira, shalom.parreira@estudante.ufscar.br¹

Luis Antonio de Oliveira Araujo, luis.araujo@ufscar.br¹

¹Universidade Federal de São Carlos (UFScar), Rodovia Washington Luis, km 235, São Carlos – SP.

Resumo. Este trabalho trata do estudo comparativo da qualidade da usinagem de um bloco de Alumina Policristalina 99,8%, utilizando um equipamento de usinagem com spindle reclinável e uma máquina de corte comercial DISCO DAD3350. Entende-se por qualidade da usinagem a dimensão média de trincas e lascas ocasionadas pelo corte abrasivo sobre o material. A metodologia aplicada dimensiona o tamanho das falhas por meio de inspeção dimensional em microscópio óptico. O material usinado consiste em blocos de Alumina Policristalina (Al_2O_3), com 99,8% de pureza, nas dimensões de $34 \times 34 \times 8,5$ mm. As peças foram retificadas nas maiores superfícies para eliminar imperfeições, reduzindo a rugosidade superficial. Os dados comparativos foram obtidos por meio de ensaio de corte abrasivo utilizando disco THERMOCARBON 2.25M-10C-54R7-3, com diâmetro externo de 57,15 mm, espessura de $0,254 \pm 0,010$ mm e grãos abrasivos de aproximadamente 54 μm . O equipamento de referência é uma máquina de corte DISCO DAD3350, que opera com spindle aerostático a 10.000 rpm, profundidade de usinagem de 1 mm e velocidades de avanço de 1 mm/s e 5 mm/s. Os mesmos parâmetros foram empregados no equipamento construído em 2018, que possui mesa com movimentação em coordenadas X, Y e Z e um spindle rolamentado reclinável, capaz de operar entre as posições horizontal e vertical. Também foi desenvolvido um flange específico para fixação do disco abrasivo. Os resultados obtidos demonstraram que, apesar das diferenças estruturais entre os equipamentos, ambos apresentaram desempenho compatível em termos de qualidade da usinagem.

Palavras chave: Alumina Policristalina. Corte abrasivo. Máquina de Corte. Flange

Abstract. This study presents a comparative analysis of the machining quality of a 99.8% polycrystalline alumina block, using a system with a tiltable spindle and a commercial cutting machine, DISCO DAD3350. Machining quality is defined as the average size of cracks and chipping caused by the abrasive cutting process. The adopted methodology measures the size of these defects through dimensional inspection under optical microscopy. The machined material consists of polycrystalline alumina (Al_2O_3) blocks, with 99.8% purity and dimensions of $34 \times 34 \times 8.5$ mm. The largest surfaces were ground beforehand to reduce surface roughness. Comparative data were obtained using a THERMOCARBON 2.25M-10C-54R7-3 abrasive blade, with an external diameter of 57.15 mm, a thickness of 0.254 ± 0.010 mm, and abrasive grains of approximately 54 μm . The reference equipment is the DISCO DAD3350 cutting machine, operating with an aerostatic spindle at 10,000 rpm, a cutting depth of 1 mm, and feed rates of 1 mm/s and 5 mm/s. The same cutting parameters and blade were applied in an experimental setup built in 2018, featuring a table with Cartesian movement in X, Y, and Z directions and a tiltable rolling-spindle capable of operating between horizontal and vertical orientations. A custom-designed flange was also developed to secure the abrasive blade. The results showed that, despite the structural differences between the machines, both exhibited comparable performance regarding machining quality.

Keywords: Polycrystalline Alumina. Abrasive Cutting. Dicing Blade. Flange.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem de materiais duros e frágeis, como cerâmicas e materiais cristalinos, como o Quartzo, tem larga aplicação na construção de sensores piezelétricos e sistemas micro eletromecânicos (MEMS). A necessidade de usar esses materiais de forma eficiente e econômica tornou-se ainda mais crítica à medida que a demanda por dispositivos piezelétricos acessíveis aumentou, como destacado por Sharma *et al.* (2022). A partir dos anos 2000, conforme apontado por Carazo (2016), o aumento expressivo no uso de microsensores em diversas áreas, como telefonia móvel,

monitoramento de saúde, automóveis e conversão de energia, foi impulsionado, em grande parte, pelos avanços nos processos de fabricação.

Historicamente, a usinagem de materiais cerâmicos e cristalinos foi, e ainda é, um desafio, devido à sua fragilidade e alta dureza. Encontrar os parâmetros de operação, ferramentas e qualidade dos equipamentos são fatores críticos. Nos estudos realizados por Bifano e Hosler (1993), o corte de materiais como o Quartzo foi realizado com técnicas abrasivas tradicionais, que apresentavam limitações significativas em termos de controle da qualidade superficial e da minimização de defeitos. Com o tempo, novas abordagens, como a micro usinagem abrasiva, a usinagem ultrassônica (Guzzo, Haslan e Mello, 2003) e o laser, foram introduzidas, proporcionando maior controle e precisão. No entanto, o acesso a algumas dessas técnicas, devido ao alto custo, tem se tornado, na maior parte das vezes, um limitante na pesquisa e desenvolvimento de novos sensores e aplicações de materiais piezelétricos e cerâmicas.

Tendo em vista o contexto, foi desenvolvido uma máquina de usinagem, capaz de desenvolver 3 operações de usinagem: o corte, a furação e fresamento, no mesmo equipamento, para usinagem de materiais duros e frágeis, com projeto intitulado: Construção de uma máquina de usinagem de precisão que combine as operações e corte abrasivo, fresamento e furação, aplicada na fabricação de geradores de energia piezelétricos. O equipamento foi nomeado de C3L.

Para este estudo o foco recaiu sobre o processo de corte abrasivo de um material duro e frágil, um bloco de cerâmica Alumina Policristalina (Al₂O₃).

A ferramenta utilizada para corte foi um disco abrasivo (*dicing blade*) composto por grãos de diamante e resina polimérica como matriz. O diamante é uma forma alotrópica do carbono (C), assim como o grafite, que é mais abundante em condições normais de temperatura e pressão. Sua formação exige altas temperaturas e pressões, resultando em uma estrutura cristalina cúbica composta exclusivamente por átomos de carbono (Callister, 2002). Nos processos de corte abrasivo, a alta rigidez das máquinas é essencial para minimizar os efeitos de vibrações e desbalanceamentos (Agudon e Bacquian, 2021).

De forma geral, os processos de usinagem são capazes de conferir forma a determinadas superfícies por meio da remoção de material. Por outro lado, a usinagem também é capaz de impregnar a superfície de falhas. No caso de materiais duros e frágeis, lascas e trincas. Essas falhas são potenciais fontes geradoras de defeitos no funcionamento da peça usinada. No caso de um sensor piezelétrico, por exemplo, uma lasca ou trinca é potencial fonte de fragilização do sensor durante o funcionamento. A qualidade da usinagem, neste estudo, foi avaliada por meio de um método de dimensionamento de lascas e trincas, utilizando imagens de microscopia óptica.

1.1 Objetivo

Este estudo teve como objetivo avaliar o processo de corte abrasivo (*dicing blade*) aplicado à Alumina Policristalina 99,8%, com foco na comparação dos resultados obtidos entre a máquina experimental C3L e a máquina comercial de DISCO HI TECH DAD 3350, conforme os dados apresentados por Araujo (2015).

A intenção dessa comparação é comprovar que a máquina C3L tem capacidade de alcançar resultados de usinagem com qualidade no mínimo iguais aos equipamentos comerciais.

2. MATERIAIS E MÉTODO

Nesta seção, são apresentados: o método de quantificação de falhas e os materiais utilizados na experimentação de usinagem abrasiva em blocos de Alumina Policristalina: flange do disco abrasivo, disco abrasivo, máquina C3L e bloco de Alumina Policristalina. Também serão apresentados os parâmetros de usinagem utilizados.

2.1 Método

A medição das imperfeições geradas das superfícies usinadas foi realizada utilizando um método de inspeção dimensional com microscopia ótica, conforme descrito por Araujo (2015). Para isso, foi utilizado um microscópio óptico para medir as trincas e lascas formadas durante o processo de corte. As medições de tamanho das falhas ocorreram em diferentes regiões das superfícies cortadas. Permitindo uma comparação entre os cortes realizados com a máquina de corte comercial DAD3350 e a máquina C3L. No método aplicado, o tamanho médio das falhas é utilizado como critério para avaliar a qualidade do processo de usinagem, no caso deste experimento, o corte com disco abrasivo. A Figura 1 exemplifica a seleção do trecho em estudo e a medição do defeito na borda do canal gerado pelo disco abrasivo.

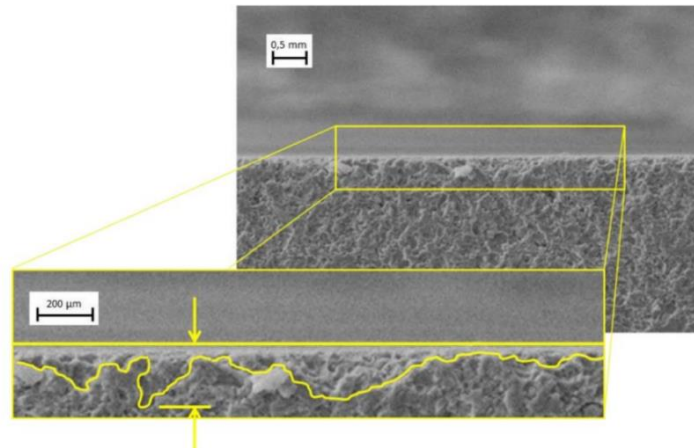


Figura 1. Método para avaliar as dimensões de lascas e trincas.

Os resultados de dois cortes realizados foram comparados com cortes similares (mesmos parâmetros de velocidade de corte, velocidade de rotação da ferramenta e profundidade) feitos previamente, por Araujo (2015), em outra máquina de corte, da empresa DISCO HI TECH, DAD3350. As falhas que foram quantificadas podem afetar a integridade do material usinado e comprometer a funcionalidade de um potencial dispositivo/produto. As diferenças observadas entre os equipamentos foram quantificadas e discutidas, com o objetivo de validar o uso do equipamento experimental para futuras aplicações em Quartzo Monocristalino. O experimento foi realizado utilizando o disco THERMOCARBON 2.25M-10C-54R7-3, com os parâmetros especificados na seção 2.3) Ferramenta, deste estudo. A Figura 8 ilustra em a) a trajetória planejada e em b) a usinagem realizada pelo disco abrasivo. Foram realizados 2 cortes, sendo o Corte 1, com $ap = 1$ mm em relação a face superior do bloco. $vf = 1$ mm/s, na direção Y e 10.000 rpm. Em seguida, a ferramenta foi deslocada na direção X em 2 mm, e o Corte 2 foi realizado, com $ap = 1$ mm, $vf = 5$ mm/s e 10.000 rpm.



Figura 8. Em a) Planejamento da trajetória do disco. Em b) usinagem realizada pelo disco.

2.2 Materiais

2.2.1 Flange

Um flange, para montagem e operação do disco abrasivo, foi projetado. O projeto da peça foi baseado fundamentalmente em dois critérios: a) Relação entre fixação (engaste) e exposição do disco (*blade exposure*), acima de 2 vezes. Ou seja, se o flange confere ao disco abrasivo uma exposição da aresta cortante de 3 mm no raio, o trecho pinçado pelo flange é de no mínimo 6 mm. Trata-se de uma métrica comercial, com a intenção de evitar vibrações e proteger a integridade do disco, o que, a princípio, são requisitos que asseguram boa qualidade de operação e consequentemente, qualidade ao corte. O projeto nomeou o flange em duas partes, como indicado na Fig. 2: Apoio (1), Contra_Apoio (2). O disco abrasivo também é citado na Fig. 2, como item 3.

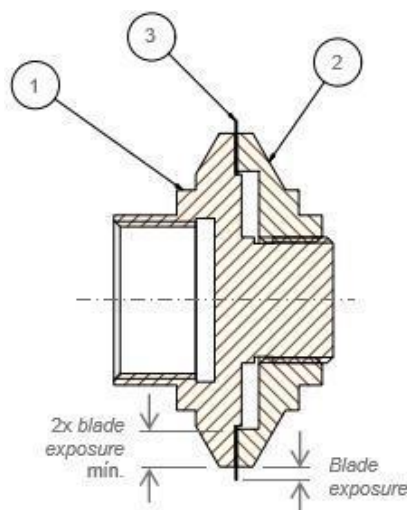


Figura 2. Projeto do flange.

O segundo critério foi b) o balanceamento estático da peça, como indicado na Fig. 3. O balanceamento estático foi realizado em um balanceador de mancais magnético, que reduz sensivelmente o atrito gerando uma condição de giro livre, condicionado aos efeitos da distribuição de massa da peça em balanceamento.

Os balanceamentos estático e dinâmico de uma peça rotativa, são características relevantes na operação, com potencial de geração de vibrações indesejadas. No entanto, para este estudo, foi realizado apenas o balanceamento estático, pois: 1) os flanges fabricados não precisaram de intervenção durante o processo de balanceamento estático. O que indica homogeneidade do material e qualidade na fabricação. 2) A massa do flange e do disco, cerca de 98g e 1g, respectivamente, foram consideradas pela equipe da pesquisa, relativamente pequenas para a rotação de operação do *spindle*, cerca de 10.000 rpm. Ou seja, tanto a massa do flange, quanto do disco, foram consideradas pequenas o suficiente para que o desbalanceamento dinâmico não se manifestasse expressivamente na rotação de operação. 3) De forma indireta, o batimento da face de montagem do disco também assumiu relevância no aspecto da vibração do disco.



Figura 3. Flange no balanceador magnético.

O flange foi fabricado em alumínio ABNT 6061, no torno CNC- **ROMI Centur 30D – SINUMERIK 828D** com o apoio da **Escola Senai de Araras**, utilizando recursos disponíveis de forma econômica e estratégica. O processo de fabricação priorizou precisão e funcionalidade, alinhando-se às exigências do equipamento experimental e contribuindo para a redução de custos operacionais. A Figura 4 traz os flanges fabricadas e balanceadas estaticamente.

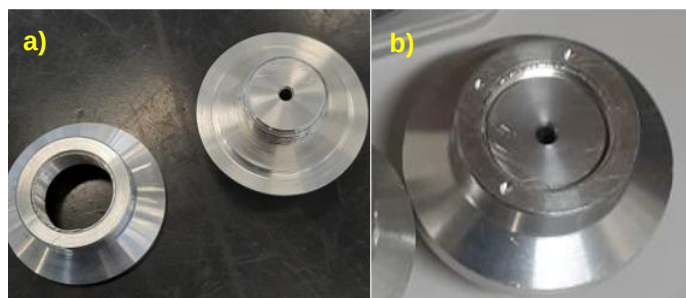


Figura 4. Em a) flange desmontada. Em b) flange montada sem o disco.

2.2.2 Ferramenta

A ferramenta utilizada neste estudo é o disco abrasivo THERMOCARBON 2.25M-10C-54R7-3, Figura 5, um modelo de alta precisão recomendado para o corte de materiais duros e frágeis como a Alumina Policristalina. O disco é composto por grãos de diamante com partículas de 54 μm , o que o torna altamente eficiente no corte de materiais de alta dureza. Suas especificações incluem:

- Diâmetro externo (De): 57,15 mm e Diâmetro interno (Di): 40,005 mm;
- Espessura (E): $254 \pm 10 \mu\text{m}$;
- Tamanho dos grãos abrasivos: 54 μm .

Os parâmetros definidos para comparação dos resultados foram:

- Velocidade de corte (vc): 1.797,19 m/min (10.000 rpm para o disco de diametro de 57,15 mm);
- Velocidade de avanço (vf): 1 e 5 mm/s;
- Profundidade de Usinagem (ap): 1 mm;



Figura 5. Disco de corte.

2.2.3 Alumina Policristalina

Para este estudo, a escolha do material se baseou em questões de facilidade de acesso à Alumina Policristalina. A máquina C3L havia sido testada no corte abrasivo apenas para validação do protótipo. Portanto, para avaliação de parâmetros, qualidade de corte, capacidade do equipamento e equiparação à ensaios anteriores em equipamentos comerciais, foi adotada uma cerâmica que trouxesse propriedades de dureza e fragilidade elevadas.

Dessa forma, foi adotado um material de fácil acesso à equipe de trabalho, comparativamente à materiais de maior dureza e fragilidade, como o Quartzo Monocristalino, que tem dureza 7 na escala Mohrs. Os blocos de Alumina Policristalina utilizados neste estudo possuem 99,8% de pureza e dimensões de 34 mm x 34 mm x 8,5 mm. Antes dos cortes, as superfícies dos blocos foram retificadas para garantir uma superfície de imperfeições minimizadas.

2.2.4 Máquina

A máquina utilizada para os cortes foi um equipamento experimental desenvolvido no Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Este projeto foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), sob o processo CNPq: 434480/2018-5. A máquina, denominada C3L, combina os processos de corte, fresamento e perfuração, sendo equipada com uma mesa que se move nas direções X, Y e Z, além de um eixo Theta para movimentação angular do *spindle* e, como consequência, da ferramenta montada para a operação. A Figura 6 é uma imagem do equipamento.

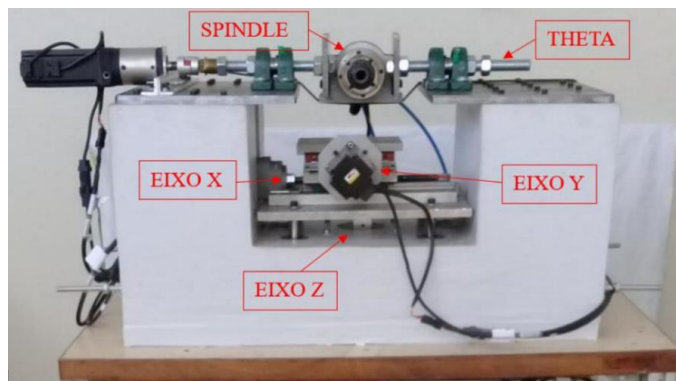


Figura 6. Máquina C3L (processo CNPq: 434480/2018-5).

O *spindle* utilizado é um modelo TECMAF TLO-80-2,2-20, com potência de 3CV, capaz de operar até 24.000 rpm. A máquina foi projetada para garantir alta precisão e estabilidade, com uma resolução teórica de posicionamento de 0,56 μm , utilizando um sistema de servo motor DELTA INC. A Figura 7 ilustra o disco abrasivo (*dicing blade*) montado em um flange, que por sua vez foi montada no *spindle* da máquina de usinagem C3L. A imagem também traz o bloco de cerâmica Alumina Policristalina montada em uma mesa X, Y e Z, por uma cinta fixadora.

É importante destacar que a máquina não tem um sistema de limpeza e refrigeração do disco abrasivo, operante. A refrigeração do corte foi realizada usando um dispenser de água do tipo *spray*.

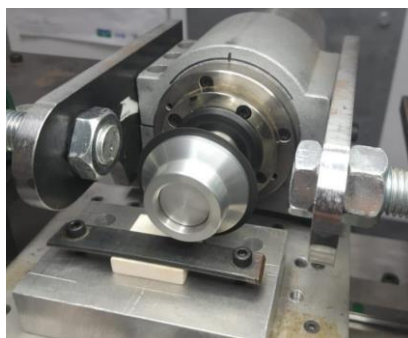


Figura 7. Máquina montada para o corte: Máquina, material, flange, ferramenta.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 9, se refere ao Corte 1 e foi feita a partir da composição de várias imagens de microscópio óptico, com aumento de 20x. A intenção é mostrar a aplicação do método de dimensionamento das lascas. Foram selecionados trechos equidistantes ao comprimento da peça de cerâmica e dentro de cada trecho, foi inspecionado e dimensionado o lascamento de cada borda, sendo a borda A, apontada do lado superior na Fig. 9 e a borda B, do lado inferior, a usinagem iniciou no lado esquerdo e terminou no lado direito da imagem. É importante destacar que a peça foi pintada para que fosse possível visualizar as lascas, devido a coloração branca natural da peça.

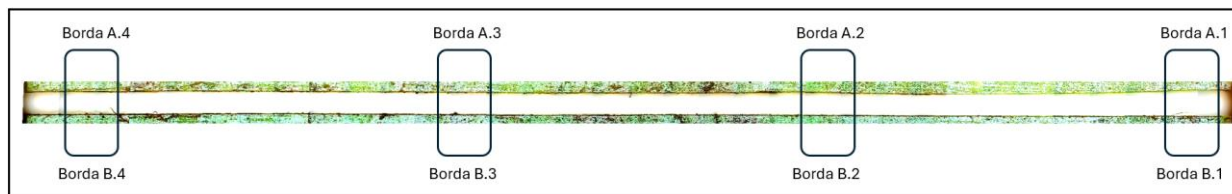


Figura 9. Corte 1, aplicação da metodologia. Seleção de trechos de medição de tamanho de lascas.

De acordo com a Tabela 1, nos trechos analisados do Corte 1: Borda A.1, A.2, A.3, A.4, B.1, B.2, B.3 e B.4, foram obtidas as seguintes dimensões de lascas:

Tabela 1. Medidas das médias das lascas dos Cortes 1 e 2 com desvio padrão

Corte 1 (vf = 1 mm/s, vc = 10 krpm e ap = 1 mm)		Corte 2 (vf = 5 mm/s, vc = 10 krpm e ap = 1 mm).	
Borda A.1 = 19,47 μm S = 2,49 μm	Borda B.1 = 12,89 μm S = 1,98 μm	Borda A.1 = 16,67 μm S = 4,05 μm	Borda B.1 = 17,14 μm S = 2,75 μm
Borda A.2 = 14,99 μm S = 1,86 μm	Borda B.2 = 16,98 μm S = 2,72 μm	Borda A.2 = 14,38 μm S = 2,78 μm	Borda B.2 = 12,71 μm S = 1,14 μm
Borda A.3 = 17,79 μm S = 2,95 μm	Borda B.3 = 15,23 μm S = 1,26 μm	Borda A.3 = 16,74 μm S = 4,20 μm	Borda B.3 = 13,81 μm S = 0,40 μm
Borda A.4 = 14,38 μm S = 1,41 μm	Borda B.4 = 13,33 μm S = 3,10 μm	Borda A.4 = 19,35 μm S = 1,63 μm	Borda B.4 = 17,22 μm S = 3,41 μm
S = 3,10 μm			

A Figura 10, se refere ao Corte 2 e foi feita a partir da composição de várias imagens de microscópio óptico, com aumento de 20x. A usinagem iniciou no lado esquerdo e terminou no lado direito da imagem.



Figura 10. Corte 2, aplicação da metodologia. Seleção de trechos de medição de tamanho de lascas.

Na Tabela 1 é possível observar as dimensões de lascas obtidas nos trechos analisados do Corte 2: Borda A.1, A.2, A.3, A.4, B.1, B.2, B.3 e B.4.

Também nas regiões indicadas, foi realizada a medição da largura do canal gerado pelo disco. Conforme os dados apresentados na Tabelas 3, a largura média do canal foi de 578,51 μm para velocidade de 1 mm/s e de 386,16 μm para velocidade de 5 m/s.

Tabela 3. Medidas da largura média do canal na velocidade de 1 mm/s e 5mm/s com desvio padrão

Velocidade 1 mm/s	Velocidade 5 mm/s
Largura 1 = 596,73 μm S = 2,94 μm	Largura 1 = 323,30 μm S = 2,19 μm
Largura 2 = 576,71 μm S = 2,83 μm	Largura 2 = 350,60 μm S = 1,46 μm
Largura 3 = 559,33 μm S = 10,02 μm	Largura 3 = 432,96 μm S = 1,60 μm
Largura 4 = 581,27 μm S = 5,21 μm	Largura 4 = 449,79 μm S = 5,71 μm
S = 14,83 μm	S = 55,87 μm

A medida indicada pelo fabricante indica que a largura do disco é de $254 \pm 10 \mu\text{m}$ e do canal feito a 1 mm/s de velocidade é aproximadamente 578,51 μm com desvio padrão $S = 14,83 \mu\text{m}$, ou seja, para o corte 1, a largura média do canal gerado pelo disco abrasivo é 2,3 vezes maior que a espessura do disco. A medida da largura média para o canal feito a 5 mm/s de velocidade é aproximadamente 386,16 μm com desvio padrão $S = 55,87 \mu\text{m}$, portanto, o canal é 1,5 maior que a espessura do disco.

Acredita-se que a largura do canal esteja relacionada a um erro de posição geométrica do conjunto *spindle*, flange e disco, em relação ao deslocamento da peça cerâmica durante o corte. A Figura 11 ilustra esta condição de forma gráfica. Em a), a posição do flange e disco sobre a peça durante o corte e em b) o desenho esquemático (valorizando a largura do

canal e espessura do disco) para desenvolvimento de uma estimativa de cálculo do ângulo existente entre esse conjunto e a peça, chamado de ângulo α .

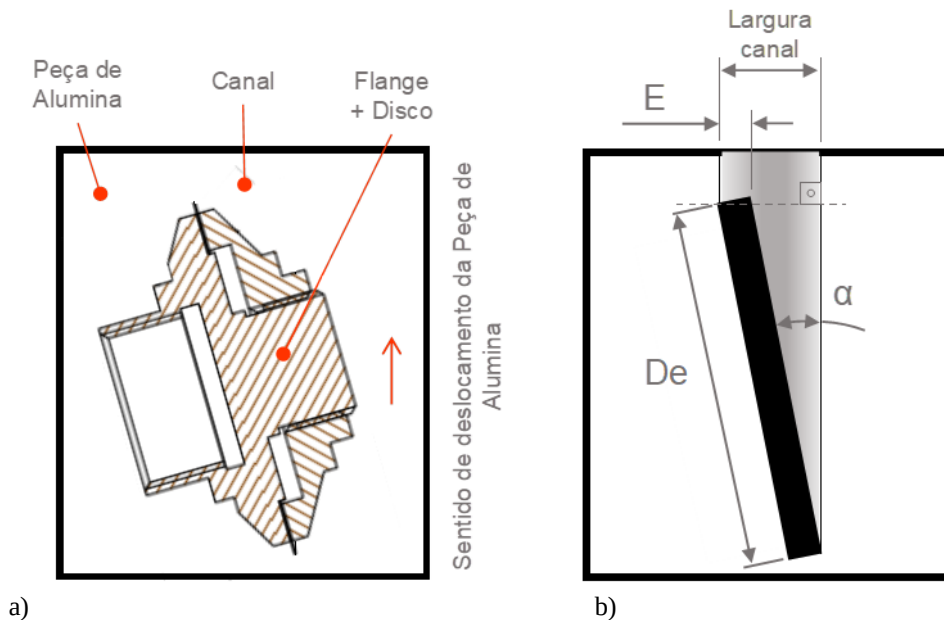


Figura 11. Em a) posição do flange e disco sobre a peça durante o corte. Em b) desenho esquemático para uma estimativa de cálculo do ângulo existente entre esse conjunto e a peça (ângulo α).

Assim, escrevendo uma relação que dependa da espessura do disco, tem-se (Eq. 1):

$$\sin(\alpha) \cong \frac{\text{Largura do canal} - E}{De} \cong \frac{0,57851 \text{ mm} - 0,254 \text{ mm}}{57 \text{ mm}} \cong 0,00569 \quad (1)$$

O ângulo α é (Eq. 2):

$$\text{Arcsen}(\alpha) = 0,33^\circ \quad (2)$$

Com base nos resultados obtidos, foi realizada uma comparação com os dados de Araujo (2015), que analisou cortes na mesma composição de Alumina Policristalina utilizando disco abrasivo nas mesmas condições de operação para vf, vc e ap, porém, em um equipamento comercial: DISCO HI TECH DAD3350.

Os valores obtidos indicaram que a usinagem abrasiva utilizando disco de corte (*dicing blade*) no equipamento experimental apresentou lascamentos médios de 15,82 μm com desvio padrão $S = 3,10 \mu\text{m}$, enquanto o equipamento comercial alcançou 20,5 μm .

A Figura 12, apresenta as regiões do corte com ampliação de 20x onde foram realizadas as medições do lascamento. Em a) a “Borda B.1” que apresentou lascamento médio de 19,40 μm . Em b) a “Borda A.1” que apresentou lascamento médio de 12,89 μm .

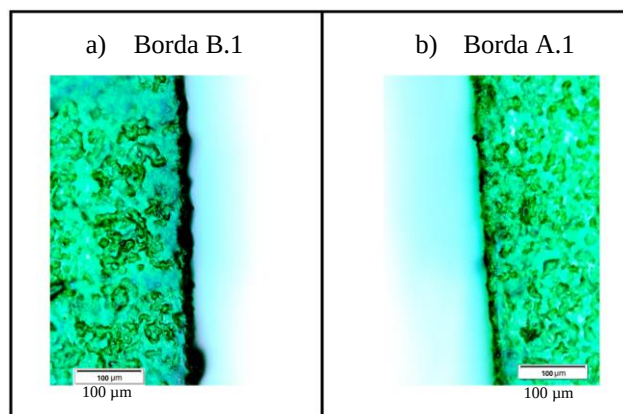


Figura 12. Imagens feitas com microscopia óptica com ampliação 20x. Em a) Borda B.1. Em b) borda A.1

Na Tabela 5, são apresentados os parâmetros utilizados, como rotação do *spindle*, diâmetro da ferramenta, profundidade de usinagem, velocidade de corte, velocidade de avanço e o tamanho médio dos grãos, além dos resultados médios das lascas geradas pelos dois métodos.

Tabela 5. Comparativo entre a máquina DISCO DAD3350 e o equipamento experimental C3L.

	Disco DAD3350	Equipamento experimental
Rotação do <i>spindle</i>	10000 rpm	10000 rpm
Diâmetro da ferramenta	57 mm	57 mm
Profundidade de usinagem	1 mm	1 mm
Velocidade de corte	1.797,16 m/min	1.797,16 m/min
Velocidade de avanço	1 mm/s	1 mm/s
Tamanho médio dos grãos	50 μ m	50 μ m
Tamanho médio das lascas	20,5 μ m	15,82 μ m

4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo comparar a qualidade do corte abrasivo, aplicado à Alumina Policristalina 99,8%, entre a máquina experimental C3L e a máquina comercial de DISCO HI TECH DAD 3350, conforme os dados apresentados por Araujo (2015).

Através dessa comparação foi possível comprovar que a máquina C3L tem capacidade de alcançar resultados de usinagem com qualidade no mínimo iguais aos equipamentos comerciais.

Os resultados foram promissores para o tamanho de lascas (*chipping*), haja vista que as dimensões obtidas, aplicando a mesma técnica de dimensionamento de lascas, obteve resultados menores na máquina C3L (vide Tabela 5).

Porém, os resultados geométricos, de largura de canal gerado pelo corte chamou a atenção, apresentando resultados de 1,5 a 2,3 maiores que a espessura do disco utilizado, indicando a existência de um erro entre o alinhamento do plano de corte do disco abrasivo e a peça de 0,33°.

Apesar disso, os resultados mostraram-se satisfatórios, sem a ocorrência de trincas e/ou grandes lascamentos. As dimensões médias de lascas são consideradas aceitáveis, pois são comparáveis aos obtidos com o disco abrasivo no equipamento comercial que é amplamente conhecido e consolidado.

A variação na largura do canal apontou uma **vulnerabilidade** no processo, demandando análises adicionais, como a checagem de forma e posição das partes móveis do equipamento, melhor avaliação do balanceamento do flange e das tolerâncias geométricas/dimensionais do flange.

Após as ações de melhoria, estudos futuros terão como objetivo conferir se a largura do canal é condizente à espessura do disco utilizado e se o lascamento se mantém próximo aos resultados em equipamento comercial.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPQ 2018-2022 (processo CNPQ: 434480/2018-5) para construção da Máquina C3L. Agradecimento à CAPES e ao PPGEMec / UFSCar. Também agradecemos ao Senai-SP, especialmente à Escola Senai de Araras, pelo apoio fundamental na construção do flange, que contribuiu de forma significativa para o desenvolvimento deste projeto.

6. REFERÊNCIAS

- Agudon, A.M.E. e Bacquian, B.C.S., 2021. “Backside chippings improvement through wafer dicing parameter optimization and understanding the anisotropic silicon properties”. *Journal of Engineering Research and Reports*, Vol. 20, n. 7, p. 144–152. 05 May 2025 <<https://journaljerr.com/index.php/JERR/article/view/482>>.
- Araujo, L.A.O., 2015. *Estudo do corte abrasivo de Quartzo para a fabricação de geradores piezoelétricos*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Bifano, T.G. e Hosler, J.B., 1993. “Precision grinding of ultra-thin quartz wafers”. 05 May 2025 <<https://doi.org/10.1115/1.2901658>>.
- Callister Jr, W.D., 2002. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 5ª edição, Livros Técnicos e Científicos.
- Carazo, A.V., 2016. “Piezoelectric transformers: an historical review”. 12 p. 05 May 2025 <<https://doi.org/10.3390/act5020012>>.
- Guzzo, P.L., Raslan, A.A. e De Mello, J.D.B., 2003. “Ultrasonic abrasion of quartz crystals”. *Wear*, Vol. 255, n. 1, p. 67–77. 05 May 2025 <[https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00094-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00094-2)>.
- Sharma, A., Verma, P. e Singh, R., 2022. “Machining of hard and brittle materials: a comprehensive review”. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 50, p. 1048–1052. 05 May 2025 <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.452>>.