

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM DE SILÍCIO POLICRISTALINO COM FIO DIAMANTADO ELETRODEPOSITADO

Pedro Córdula de Sousa¹, pcorduladesousa@gmail.com
Vinicius Haddad Andrade¹, vinicius_test@hotmail.com
Erick Cardoso Costa¹, erick.cardoso.costa@posgrad.ufsc.br
Fabio Antonio Xavier¹, f.xavier@ufsc.br

¹Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis - SC, Brasil

Resumo. A contínua e crescente demanda pelo uso de recursos renováveis para geração de energia resultou no aumento de estudos e pesquisas sobre o processo de fabricação de painéis solares, tanto na otimização de sua eficiência energética quanto no controle de produção para reduzir custos de manufatura. Os custos agregados pelo processo de corte representam cerca de 50% do custo total de fabricação, já a matéria-prima contribui em torno de 40% do custo total. Nesse contexto, pesquisas em processos de usinagem de silício policristalino são fundamentais para se obter um componente com maior qualidade com parâmetros de processo otimizados, o que permite reduzir os custos envolvidos. Dessa maneira, esse trabalho propõe uma análise computacional do processo de usinagem para otimizar os parâmetros de corte sobre a rugosidade R_a do silício policristalino. Para isso, tanto a ferramenta de corte quanto a cinemática do processo foram modeladas e simuladas. A modelagem do ferramental foi construída baseada em um fio diamantado comercial. Utilizando coordenada polar, abrasivos do tipo cônico, com uma distribuição randômica do ângulo de saída (γ) entre 55-75° e tamanho de grão entre 30-45 μm , foram fixados sobre um fio e camada de ligante, limitando-os a um diâmetro de 350 μm . Quanto a cinemática do processo, foram variadas as velocidades de avanço (v_f) e de corte (v_c). Na simulação foram considerados os regimes de remoção de material frágil e dúctil e as propriedades mecânicas do silício policristalino foram implementadas. A influência do processo de corte foi avaliada sob os resultados de rugosidade R_a do silício policristalino. Uma etapa experimental foi efetuada para validação da simulação proposta. Os resultados mostraram que sob aumento da v_f , mantendo a v_c constante, os valores de R_a aumentaram uma vez que há formação do cavaco devido a propagação de trincas. Por outro lado, para uma mesma v_f , o aumento da v_c induziu a remoção de material no regime dúctil o que torna a superfície menos rugosa, reduzindo os valores de R_a . O perfil de rugosidade foi simulado e foi possível observar a formação de estrias similar a ondulação seguindo uma equação senoidal, o que é tipicamente observada no corte com fio diamantado e é conhecida como marcas de serra. O modelo se mostrou satisfatório com a tendência de resultados observada na etapa experimental, possibilitando otimizar o processo de corte.

Palavras chave: usinagem de material frágil, rugosidade, fio diamantado, silício

1. INTRODUÇÃO

Em virtude das crescentes preocupações com as mudanças climáticas e com o meio ambiente, a busca por fontes de energia renováveis como alternativa às fontes convencionais tornou-se indispensável e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico. Nesse novo cenário, a busca por fontes renováveis que apresentem baixa emissão de gases de efeito estufa tem sido uma importante vertente discutida por pesquisadores, principalmente no que tange a viabilidade econômica envolvendo a manufatura dos elementos que compõem os sistemas de conversão de energia. Dentre as alternativas de fontes de energia renovável exploráveis, a energia solar é uma das opções viáveis mais promissoras, uma vez que há previsão de ser responsável por 60% da capacidade de geração de energia renovável em escala global (ITRPV, 2022).

No que concerne a energia solar baseada na tecnologia fotovoltaica, o material amplamente utilizado na produção de células solares é o silício cristalino, uma vez que suas propriedades semicondutoras e ópticas resultam em uma alta eficiência de capacidade para geração de energia elétrica quando exposto a luz solar, além de sua elevada abundância na crosta terrestre (compondo 27% dos minerais encontrados na superfície terrestre) (SUZUKI et al., 2017). Todavia, uma parcela significativa dos custos envolvidos em sua manufatura está no corte de lingotes de silício cristalino de alta pureza em finas lâminas com espessura na ordem de 100 μm , chamadas de *wafers*. Esse processo de corte, em termos gerais, é baseado na imposição do lingote de silício contra uma malha de múltiplos fios de aço com alimentação de uma suspensão abrasiva (*Wire Slurry Saw - WSS*), de modo que movimento concomitante de avanço do lingote e o movimento de corte

promovido pela malha de fios somado aos múltiplos contatos entre os abrasivos e o material produz o corte de centenas até milhares de *wafers* de silício em um único passe (COSTA et al., 2020; WU, 2016).

Uma outra vertente para a obtenção de *wafers* de silício é a utilização de fios com diamantes impregnados sobre a superfície de um fio de aço (*Diamond-Coated Wire Saw – DWS*), cujos ligantes podem ser eletrodepositado, resinóide ou brazado (COSTA et al., 2022a). Para esse caso, há a possibilidade de uso de fluido lubrificador durante a usinagem, além de aumentar a taxa de remoção de material em até 3x em relação à produção de *wafers* por WSS (WALLBURG et al., 2022). Entretanto, a utilização do DWS pode comprometer a eficiência e tempo de vida dos painéis solares devido aos danos na subsuperfície, como a nucleação e propagação de microtrincas que adentram a subsuperfície, elevados valores de rugosidade, formação de camadas amorfas devido a transformação de fase do material, tensão residual, dentre outros danos à integridade da superfície (COSTA et al., 2020).

Considerando os aspectos supracitados, o controle das condições de usinagem, principalmente as magnitudes da velocidade de avanço (v_f) e velocidade de corte (v_c), é fundamental para garantir a qualidade da integridade da superfície dos *wafers* de silício policristalino. Como alternativa as abordagens experimentais que se apresentam dispendiosas e dependem de máquinas-ferramentas e demais aparatos experimentais, o uso de ferramentas computacionais é uma opção viável e economicamente atrativa para a otimização de processos de usinagem. Dessa maneira, este trabalho apresenta um modelo numérico computacional da ferramenta de corte do processo DWS empregado para o corte de silício policristalino de pureza de grau solar, bem como uma rotina de simulação do processo de corte e análise da influência das condições de usinagem sobre a integridade da superfície. Ademais, as equações da mecânica da fratura foram implementadas no algoritmo da cinemática de corte de modo que as interações entre os abrasivos ativos no processo de remoção de material com o material de estudo atendessem os diferentes regimes de remoção de material (regimes dúctil e/ou frágil) que podem ocorrer durante a remoção de material na forma de cavaco e, conseqüentemente, formação da superfície do *wافر*.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Modelagem da ferramenta de corte

2.1.1. Ferramenta de corte industrial

A ferramenta de corte utilizada no processo em estudo consiste de um fio diamantado industrial (ver Fig. 1), cujo diâmetro externo nominal é de $\varnothing_{ext} = 350 \mu\text{m}$ com grãos de diamantes, com granulometria na faixa de 30-45 μm , impregnados em sua superfície fornecido pela *Saint-Gobain Abrasivos*. A ferramenta é composta por um fio de aço de diâmetro interno $\varnothing_{int} = 250 \mu\text{m}$, conforme a norma ASTM A228/A228M, com uma camada de revestimento de Níquel contendo grãos de diamante eletrodepositado e fixos sobre a superfície da alma do fio. A densidade de abrasivos (η) foi determinada via processamento de imagens por meio do *software* de processamento de imagens *open source* ImageJ®, obtido da distribuição disponível no site do *National Institute of Health*. O valor de densidade de abrasivos determinado para o fio diamantado utilizado nesse estudo foi de 60 abrasivos/ mm^2 .



Figura 1: Fio diamantado.

2.1.2. Modelagem da ferramenta de corte

A modelagem do fio diamantado foi realizada com base na distribuição randômica de grãos ao longo da superfície da alma do fio de aço, alojados em uma camada de material ligante – correlato a camada de Ni de um fio diamantado industrial. Baseado em trabalhos anteriores (CHUNG e LE, 2015), a superfície do fio foi discretizada em uma malha, cujas posições dos abrasivos podem ser identificadas por meio de coordenadas polares. A Fig. 2a ilustra o eixo de coordenadas polares definido a partir do centro da seção transversal de uma pseudo alma de fio de aço. Considerando a cinemática real do processo de corte com fio diamantado, apenas a região inferior do fio permanece ativa e em contato com a peça de trabalho durante o processo de corte. Dessa maneira, o modelo da ferramenta de corte considera apenas a metade do perímetro do fio diamantado que mantém contato efetivo para remoção de material ($P_{fio} = \pi \cdot r$).

A malha foi definida como uma matriz de posições nulas $M = np.zeros(m,n)$, de modo que n é o número de divisões na direção axial (ao longo da circunferência do fio) e m é o número de segmentos na direção longitudinal (ao longo do comprimento). Para que a probabilidade de existência de um abrasivo na posição $i \times j$ (em que i é o nó na direção de n ; e j na direção de m) seja igual nas duas direções, o tamanho de cada nó na malha deve ser o mesmo (CHUNG e LE, 2015), conforme descrito pela Eq. 1.

$$\frac{L}{m} = \frac{\pi * D}{n} \quad (1)$$

Dessa forma, L é o comprimento do fio na direção do movimento de corte dentro de um intervalo de tempo Δt (para este trabalho foi considerado $\Delta t = 0,01$ s) e D é o diâmetro externo nominal do fio diamantado. A probabilidade de existência de um abrasivo alojado em um nó da malha foi calculada pelo método de Monte Carlo. Assim, caso um abrasivo esteja presente em uma posição $i \times j$, a matriz terá seu elemento nulo substituído pelas coordenadas polares do abrasivo, identificadas pelo ângulo θ da posição do grão em relação ao eixo de coordenadas e pela distância G_{abr} do centro do eixo até a ponta do gume do abrasivo, conforme apresentado na Fig. 2b.

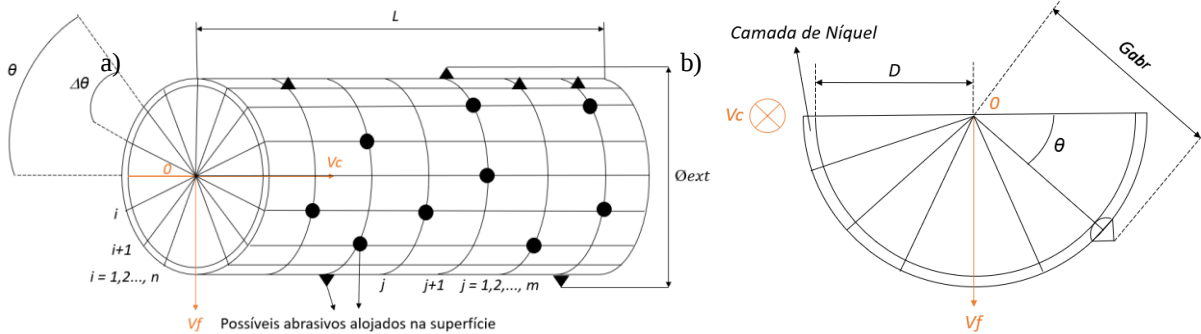


Figura 2: a) Modelo da malha do fio diamantado; b) Modelo do cálculo das coordenadas polares de um abrasivo com ênfase ao ângulo θ e distância G_{abr} a partir do ponto de origem. Fonte: Adaptado de Yin et al. (2021).

2.1.2. Modelo geométrico dos abrasivos na ferramenta de corte

O abrasivo é um elemento fundamental do sistema tribológico para que a remoção de material na forma de cavaco e, consequentemente, formação da superfície atendam as especificações desejadas para a peça final. Diferentes modelos de grãos são propostos na literatura, de modo que sejam possíveis formatos simplificados que envolvem as principais geometrias dos cristais: cúbicas, octaédricas e tetraédrica, que são comumente encontradas em abrasivos de diamante. Para o presente caso, o formato geométrico escolhido para a modelagem dos abrasivos foi dividido em duas principais partes (CHUNG e NHAT, 2013), conforme a Fig. 3: uma seção cônica, na qual o ângulo de saída (φ) é definido como metade do ângulo do gume; E uma semiesfera que está inserida dentro da camada de ligante da ferramenta, cujo raio varia entre 1/3 e 1/2 do tamanho do abrasivo. Dessa forma, o tamanho total do abrasivo foi denominado como d .

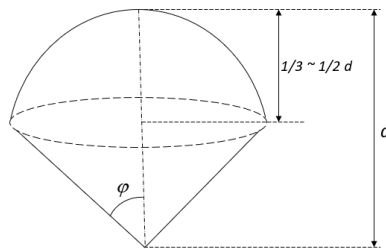


Figura 3: Modelo do formato geométrico do abrasivo. Fonte: Adaptado de Yin et al. (2021).

Tanto a distribuição do tamanho de abrasivos quanto da faixa de ângulos de saída (φ) seguem uma distribuição log-normal (ver Eq. 2), cujas variáveis dependem dos valores máximos e mínimos (subíndices max e min , respectivamente) e da média (subíndice med) do parâmetro em estudo. Por conseguinte, foi utilizada a regra probabilística 3σ para o cálculo do desvio padrão (σ) das distribuições, o que garante que 99,74% dos valores estão no intervalo determinado para cada variável (YIN et al., 2021). Desse modo, foi obtida a curva de distribuição dos tamanhos dos abrasivos de diamante no intervalo de 30 até 45 μm e o ângulo de saída na faixa de 55° a 75°.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\frac{(x-x_{med})^2}{2(\sigma x)^2}} \quad x = d, \varphi \quad (2)$$

2.2 Modelagem da Cinemática do Processo de Corte

2.2.1 Mecânica da fratura e propriedades mecânicas do silício

Quando os abrasivos do fio diamantado entram em contato com a amostra durante o processo de usinagem, dois principais regimes de remoção de material podem ocorrer (BIFANO et al., 1991; COSTA et al., 2022b; YIN et al., 2021): cisalhamento dúctil, de modo que o silício se comporta tal como um material dúctil sob imposição de esforços cisalhantes, resultando em uma superfície usinada livre de fraturas frágeis (como a presença de trincas médias, laterais e radiais), conforme a Fig. 4a; remoção puramente frágil, cuja a imposição de esforços normal e tangencial induz a um campo de tensões que excedem a resistência a ruptura do material, o que resulta na nucleação e propagação de trincas laterais e médias abaixo da região de deformação elastoplástica (p), ilustrado na Fig. 4b. As trincas laterais se propagam para a superfície do material, de forma que crateras são formadas à medida que a ferramenta interage com a peça, levando a formação de cavacos fragmentados cujas dimensões de largura e espessura são maiores que as teóricas. Ressalta-se que há um regime transiente entre os modos de remoção de material dúctil e frágil, todavia não será considerado no presente estudo, uma vez que os fenômenos envolvem transformações de fases cuja gênese é de magnitude molecular.

Para estabelecer tais considerações entre os regimes dúctil e frágil, foi implementada a transição de remoção de material dúctil-frágil durante o corte, sendo este parâmetro a espessura de cavaco não-deformado (h_{cu}). De modo geral, quando a profundidade de penetração do abrasivo (h_{abr}) sobre a peça for maior que o limite crítico ($h_{cu,crit}$), ocorre a formação das trincas e a remoção de material dá-se segundo o modo frágil. Por outro lado, para o caso da profundidade de penetração dos grãos ativos for menor que o limite crítico $h_{cu,crit}$, as forças de cisalhamento serão predominantes e haverá apenas a remoção de material no regime dúctil. Ademais, considerando o índice de Miller, os planos de escorregamento e clivagem concentram-se em diferentes planos cristalinos do silício o que resultam em valores de h_{cu} que variam de 0,2 a 0,9 μm (YIN et al., 2021). Neste trabalho, considerou-se o valor de h_{cu} do silício policristalino na ordem de 0,5 μm .

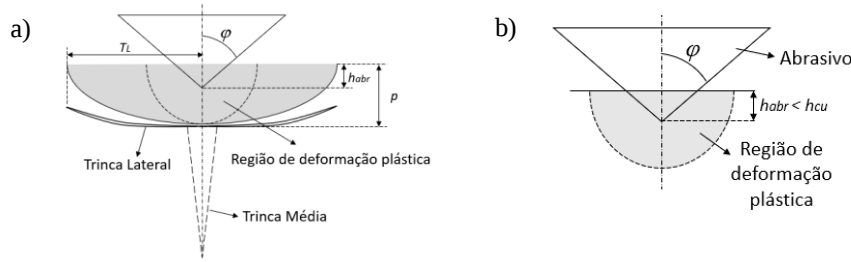


Figura 4: a) remoção de material frágil; b) remoção de material dúctil. Fonte: Adaptado de Yin et al. (2021).

Empregando as Equações 3 e 4, é possível estimar tanto o comprimento das trincas laterais quanto a profundidade da região elastoplástica, respectivamente, em função das propriedades mecânicas do silício policristalino, apresentado na Tabela 1. O fator α é uma constante adimensional que é independente do material. Outro parâmetro importante para os cálculos é a força normal (F_n) de imposição dos abrasivos sobre o material, conforme a Eq. 5.

Módulo Elástico E	Tenacidade Fratura Kc	Dureza H
170 GPa	0,75 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	7 GPa

Tabela 1: Propriedades mecânicas do silício policristalino. Fonte: Adaptado de Li et al. (2019).

$$T_L = \alpha * \left\{ (\cot\varphi)^{\frac{5}{6}} * \left[\frac{(E/H)^{\frac{3}{4}}}{Kc * H^{\frac{1}{4}}} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} * Fn^{\frac{5}{8}} \quad (3)$$

$$p = \alpha * (\cot\varphi)^{\frac{1}{3}} * \frac{\sqrt{E}}{H} * \sqrt{Fn} \quad (4)$$

$$Fn = \frac{1}{2} * \pi * (h_{abr} * \tan\varphi)^2 * H \quad (5)$$

2.2.2 Cinemática do processo de corte com fio diamantado

Para implementar a cinemática de corte com fio diamantado, dois vetores de velocidade foram utilizados para determinar o movimento do fio diamantado durante o corte, sendo estes: a velocidade de avanço (v_f) e a velocidade de corte (v_c). Uma vez que ambos os vetores são funções do tempo (t), um intervalo de tempo Δt foi considerado, de modo que o fio diamantado seja deslocado dentro de uma distância L na direção do vetor v_c em um intervalo espacial (ou passe) ΔS na direção do vetor de avanço (v_f). Para cada passe, o perfil da superfície da peça usinada é atualizado de acordo com o tipo de remoção de material predominante, seja dúctil ou frágil (ver Fig. 5). O cálculo para h_{abr} é definido como a coordenada polar do abrasivo G_{abr} subtraída pela metade do diâmetro externo ($\varnothing_{ext}$) e o perfil de corte é atualizado de acordo com as seguintes condições implementadas em uma lógica computacional: (i) Se $h_{abr} < 0$, o abrasivo não esteve

em contato com o material e o perfil de corte se mantém constante; (ii) Se $0 < h_{abr} < h_{cu}$, o abrasivo efetua a remoção de material no regime dúctil e o perfil de corte é atualizado como uma impressão idêntica da geometria triangular do grão (considerando um perfil bidimensional do cone) sobre o material; (iii) Se $h_{abr} > h_{cu}$, o abrasivo realiza a remoção de material no regime puramente frágil, o que induz a formação de trincas laterais e geração de crateras, afetando a região circunvizinha ao contato abrasivo-material.

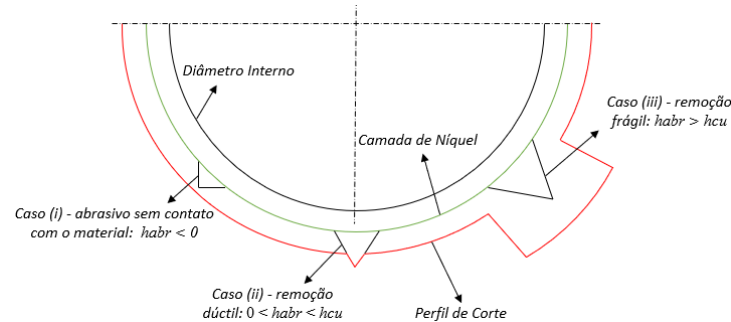


Figura 5. Representação da atualização do perfil de corte de acordo com o regime de remoção de material.

O processo de formação de cada perfil de corte se repete até o fio diamantado alcançar o curso de avanço total chamado de ΔZ , sendo neste trabalho definido como um comprimento total da peça de trabalho de 500 μm . Por fim, para cada passe o valor de maior penetração no material causado pelos múltiplos contatos com os abrasivos de diamante, seja no modo de remoção dúctil ou frágil, é armazenado para que o perfil de rugosidade seja gradativamente formado, visto que aquela posição permanecerá inalterada a medida que o processo de usinagem progride.

2.3 Rotina numérica

A lógica do algoritmo desenvolvido para simular o processo de corte com fio diamantado é mostrada na Fig. 6.

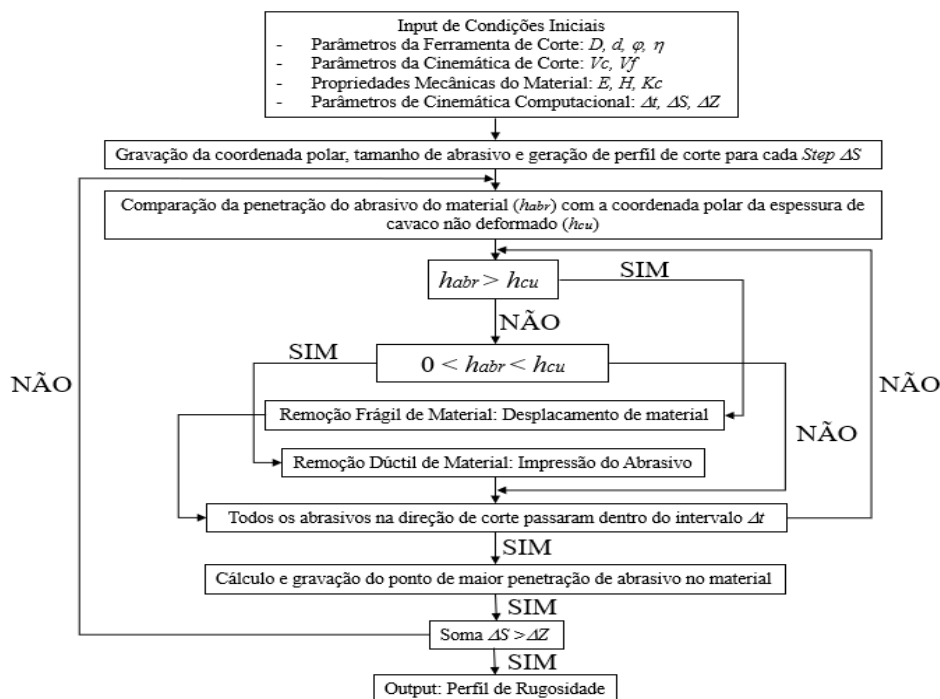


Figura 6: Algoritmo para rotina numérica da cinemática de corte.

Primeiramente, o usuário seleciona as propriedades mecânicas do material a ser estudado, as características da ferramenta de corte (fio diamantado) e as condições de cinemática de corte; Em seguida, há a geração aleatória da granulometria dos abrasivos, bem como o armazenamento de suas coordenadas polares e a geração do perfil de corte; Assim, é calculada a profundidade de penetração dos abrasivos sobre o material de modo que o valor de h_{abr} seja comparado com os critérios de regimes de remoção de material: se a remoção for no regime frágil, é formada uma cratera na peça baseada nas equações da mecânica da fratura; se for dúctil, a geometria de impressão do abrasivo permanece sobre o perfil do material usinado. Então, a posição de maior profundidade de penetração dos abrasivos sobre o material

é armazenada para a formação do perfil de rugosidade. Por fim, assim que a soma das distâncias de avanço de cada passe ultrapassar o curso de avanço total ($\Delta Z = 500 \mu\text{m}$), a simulação é encerrada, de modo que o *output* é o próprio perfil de rugosidade e o valor do parâmetro de rugosidade R_a .

2.4 Etapa experimental

A máquina-ferramenta utilizada na etapa experimental foi uma bancada de corte com fio diamantado contínuo baseada em um sistema de ultraprecisão a partir da tecnologia de mancais aerostáticos. A ferramenta de corte é fixada em um par de polias que estão fixas em mancais rotativos aerostáticos que induzem a um movimento de rotação a partir de um sistema motriz. A polia fixa é acionada por um motor trifásico ($P_{\text{max}} = 370 \text{ W}$) e age como força motriz para a imposição do parâmetro de v_c da ferramenta, enquanto que a polia auxiliar desliza sobre luvas aerostáticas lineares e induzem a um tensionamento interno do fio diamantado, neste caso de 210 N/mm^2 . Este sistema apresenta um movimento de corte contínuo, o que possibilita atingir v_c de até 26 m/s . Em relação ao sistema de avanço, a movimentação da amostra é realizada por meio de luvas aerostáticas controlada por um sistema eletromecânico, de modo que o valor mínimo de v_f permitido é de $0,08 \text{ mm/min}$, configurado em uma interface computacional.

Com a finalidade de realizar um movimento contínuo de corte e possibilitar atingir v_c nas magnitudes utilizadas industrialmente, o fio diamantado industrial foi soldado em *loop* com comprimento de aproximadamente 1 metro, de forma que a cinemática de corte seja similar à de uma serra-fita. Dessa forma, um processo de soldagem foi efetuado a partir da união das duas extremidades do fio por meio de uma soldagem de topo por resistência. As etapas de preparação, condições de soldagem e pós-processamento de tratamento térmico seguiram a descrição feita na referência (COSTA et al., 2022b).

Em relação ao material usinado, foram utilizados blocos de silício policristalino com pureza de grau solar com dimensões de $10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$. A fabricação dos corpos prova foi realizada via uma rota metalúrgica de refinamento, purificação e solidificação aplicado para obtenção de silício policristalino com $99,9999999\%$ de pureza. O material foi fornecido pelo Instituto de Pesquisas de São Paulo (IPT-SP). Tanto os parâmetros utilizados para a usinagem (ver a Tab. 2) quanto as análises de integridade superficial do silício policristalino após o corte foram realizadas em trabalhos anteriores (WERNER, 2021).

$v_c \text{ (m/s)}$	20	20,00	22,50	20,00	16,46	17,50	23,54	20,00	17,50	20,00	22,50	20,00
$v_f \text{ (mm/min)}$	2,21	1,50	2,00	1,50	0,79	1,50	1,00	1,50	2,00	1,50	1,00	1,50

Tabela 2: Parâmetros de usinagem utilizados na etapa experimental.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Modelagem da ferramenta de corte

Para a validação da modelagem da ferramenta, foram analisados os principais parâmetros que definem as características do fio diamantado como uma ferramenta de corte abrasiva, sendo estes: tamanho de grão (d), ângulo de saída dos grãos (ϕ) e densidade de grãos (η). Como o cálculo de existência de abrasivos em um determinado nó da malha (ou matriz) seguiu o método de Monte Carlo, foram feitos histogramas com um ajuste de curvas normal para visualizar a distribuição estatística e natureza randômica de cada propriedade.

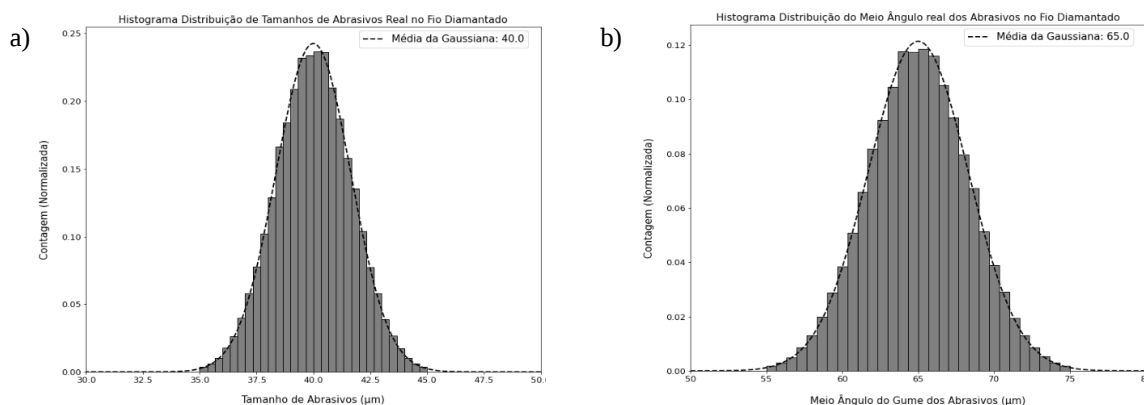


Figura 7a) Distribuição do tamanho de abrasivos; b) Distribuição do ângulo de saída dos abrasivos de geometria cônica. Fonte: autor.

De acordo com os resultados mostrados na Fig. 7, observou-se que os valores médios de ambos d e ϕ convergiram para os parâmetros do fio diamantado industrial, o que indica que a modelagem dos abrasivos e de seus alojamentos

aleatórios sobre a malha do fio atende as restrições impostas para o modelo. O cálculo do desvio padrão resultante da regra 3σ também mostrou-se convergente para essa abordagem propostas para a modelagem do fio diamantado.

Por conseguinte, com a finalidade de melhorar a visualização da ferramenta de corte modelada, a seção da malha do fio referente a um comprimento de 10 vezes ao tamanho do diâmetro do fio (2,5 mm) foi avaliada. Conforme a Fig. 8a., pode ser observado que os abrasivos foram alojados randomicamente sobre a superfície da seção alocados em nós predefinidos a partir da matriz polar construída. Além disso, a malha do fio foi planificada, o que permite observar a posição dos abrasivos com melhor exatidão, conforme mostrado na Fig. 8b. Dessa forma, a modelagem da ferramenta de corte para a análise do processo de corte de silício policristalino com fio diamantado atende as características impostas, conforme requisito da ferramenta industrial.

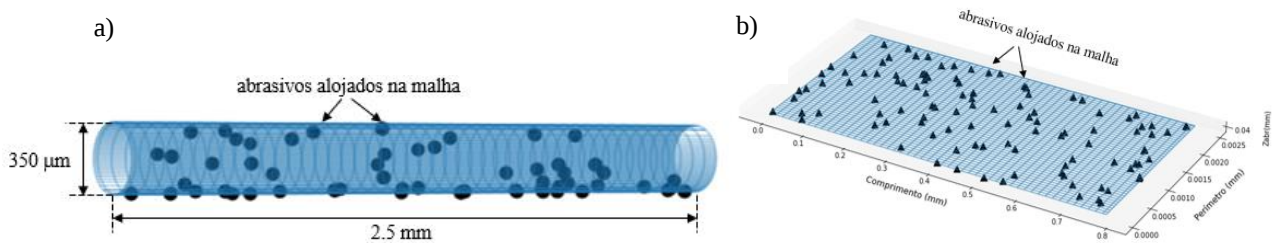


Figura 8: Fio diamantado modelado: a) malha do fio em formato cilíndrico; b) malha do fio em formato plano.

3.2. Perfil de corte dúctil-frágil e geração da superfície usinada

Baseado na cinemática de corte, o fio diamantado é imposto a um movimento de avanço restrito a passe predefinidos de modo que os abrasivos ativos entram em contato com o silício policristalino sob dois principais regimes de remoção de material: remoção dúctil ou frágil. Após todos os abrasivos avançarem na direção do vetor referente a v_c , dentro de um intervalo Δt e um comprimento L , o perfil de corte no material pode ser visualizado, conforme mostrado na Fig 9a.

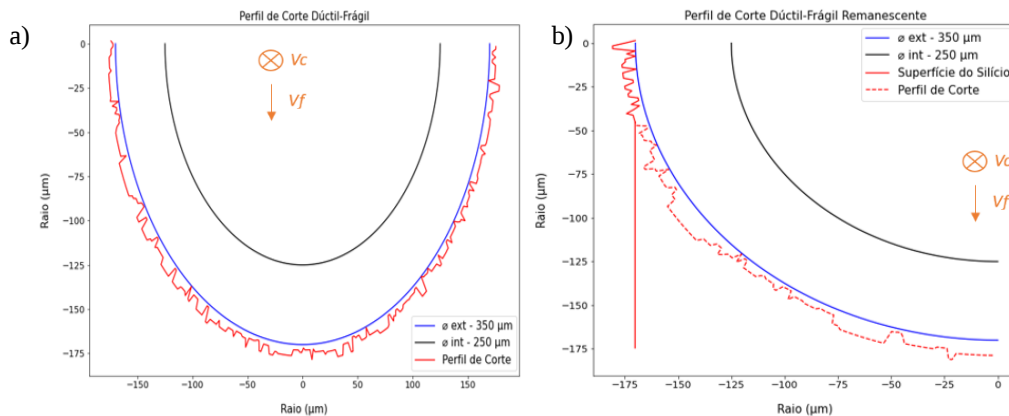


Figura 9: a) perfil de corte a cada passe; b) seleção do perfil de corte que influencia a superfície do silício policristalino durante o corte.

Entretanto, a medida que o fio diamantado se desloca na direção do vetor de v_f , há uma parcela dos abrasivos efetivos que contribuem apenas para remoção de volume de material colaborando com a produtividade do processo de corte, enquanto que apenas aqueles mais próximos a superfície irão de fato influenciar na formação do perfil de rugosidade (ver Fig 9b). De acordo com Li et al. (2019) e Chung e Le (2015), aproximadamente 10% dos abrasivos ativos afetam a formação da superfície usinada, de modo que estes encontram-se em um ângulo entre $0^\circ \leq \theta \leq 25^\circ$. Observa-se que grande parte do perfil de corte é atualizado pela formação de crateras, o que caracteriza a predominância da remoção de material no regime frágil como principal meio de formação da superfície usinada, convergindo aos resultados reportados por Li et al. (2020).

3.3. Cinemática do processo de corte e efeito das condições de contorno

Durante a simulação do processo de remoção de material e formação da superfície usinada, o perfil de corte será formado para cada passe do fio diamantado na direção do vetor v_c , no qual a maior penetração dos gumes cinemáticos sobre o material é armazenada antes que o próximo passe na direção do vetor v_f seja efetuado. Dessa forma, até que o fio diamantado percorra o comprimento de avanço total (ΔZ), esse processo irá entrar em um loop previsto na rotina de simulação de modo que irá repetir-se até finalizar o comprimento definido. A Fig. 10 ilustra os três principais estágios de

cinemática do processo e a formação da superfície usinada, sendo: (i) estágio em que não há contato entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho cujas propriedades mecânicas são do silício (Fig. 10a); (ii) o fio diamantado avança contra a peça sob v_f predefinida, o que induz à intersecções entre os abrasivos e a peça, possibilitando a impressão do formato do abrasivo ou formação de fraturas frágeis na região de contato (Fig. 10b); (iii) por fim, o fio diamantado adentra continuamente na peça, produzindo as intersecções entre abrasivo-peça, porém, o perfil antecessor é armazenado para que os pontos sejam utilizados para a construção do perfil de rugosidade (Fig. 10c).

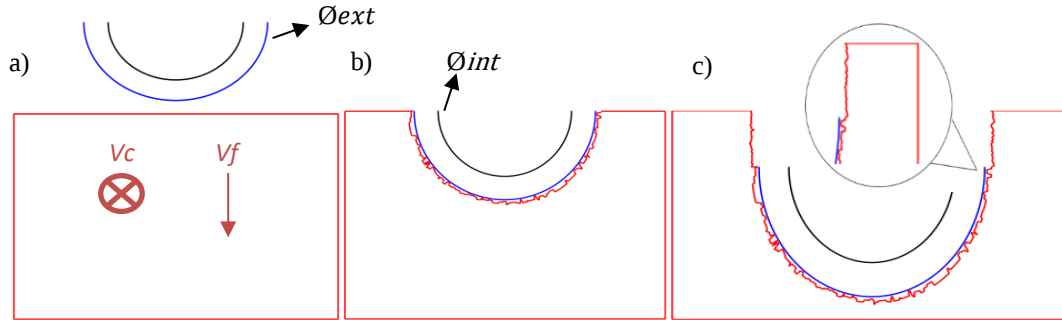


Figura 10: a) fio diamantado ainda sem contato com a peça; b) primeiro passe do fio em contato com a peça; c) fio se deslocando na direção de avanço e valores de profundidade de penetração máximos são armazenados em cada passe

3.4. Perfil de rugosidade e cálculo do parâmetro R_a

Após o fio diamantado percorrer todo o comprimento total de avanço (ΔZ), as posições de maior profundidade de penetração no silício policristalino de cada passe estarão armazenadas com respectivo vetor e, com isso, é possível não apenas ilustrar o perfil de rugosidade (Fig. 11), mas também obter os valores de parâmetros de rugosidade, tal como o valor de R_a na direção do vetor v_f . De acordo com o perfil de rugosidade obtido pelo método de simulação, observa-se um comportamento de estrias de forma ondulada, regida por uma equação senoidal, o que corrobora com os resultados obtidos experimentalmente. Essas estrias são comumente conhecidas como marcas de serra, sendo uma das principais características do processo de corte com fio diamantado (YU et al., 2012; COSTA et al., 2022a).

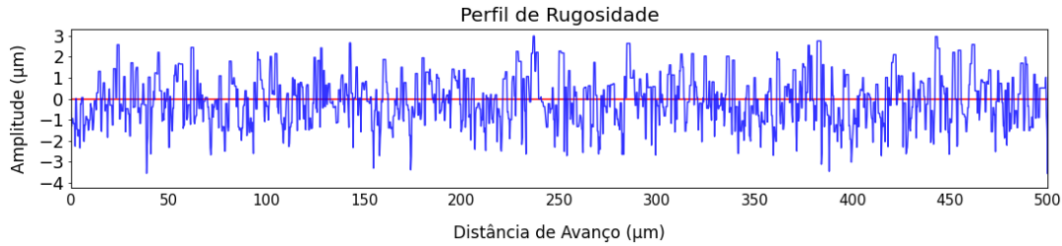


Figura 11: Perfil de rugosidade simulado obtido sob as condições de corte de $v_c = 20$ m/s; $v_f = 1,5$ mm/min.

O valor de R_a na direção de avanço pode ser obtido por meio da média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento ou da amplitude dos pontos do perfil de rugosidade, ou seja, os valores de protusão máxima no material em relação à linha média dentro do percurso de avanço total. Para o algoritmo de cálculo do R_a (Eq. 6), todos esses parâmetros necessários estão disponíveis após o fim da simulação.

$$Ra \approx \frac{1}{\Delta Z} * np.sum(np.abs(ProtMax - ProtMed)) \quad (6)$$

3.5. Validação da simulação por meio da etapa experimental

Foram realizadas simulações do processo de corte do silício policristalino com fio diamantado, bem como a geração do perfil de rugosidade e cálculo do parâmetro de rugosidade R_a para cada condição de corte efetuada na etapa experimental. Os valores de R_a simulados permaneceram dentro de uma faixa de 0,8 até 1,5 μm , enquanto os obtidos experimentalmente exibiram valores no intervalo de 0,5 a 1,1 μm , revelando a efetividade da rotina e modelo propostos. A Fig. 12 mostra a superfície de resposta obtida com os valores de R_a sob variação das condições de v_c e v_f .

Além disso, para a curva simulada foi utilizado o pacote *Scipy* para o cálculo do mínimo global e da equação que determina a superfície de resposta do valor de R_a . A Eq. 7 expressa o comportamento da superfície de resposta segundo uma equação polinomial de segundo grau, cujas variáveis envolvem os valores de v_c e v_f . Para os dados experimentais, utilizou-se os resultados obtidos em trabalhos anteriores do grupo para o ajuste de superfície (WERNER, 2021).

Para o mínimo global de cada superfície, obteve-se valores otimizados de R_a para a curva simulada de parâmetros $v_c = 22,11$ m/s e $v_f = 1,82$ mm/min. A otimização dos valores obtidos na etapa experimental foram obtidos valores com

magnitudes de $v_c = 23,54$ m/s e $v_f = 1,2$ mm/min. O erro referente às velocidades de corte e avanço foi calculado, com valores de 6,46% e 51%, respectivamente. É importante ressaltar que o modelo de remoção de material considerou a remoção de toda área envolvida pela formação das trincas laterais no corte frágil, o que pode ter causado uma tendência de valores maiores de R_a quando comparado aos valores experimentais.

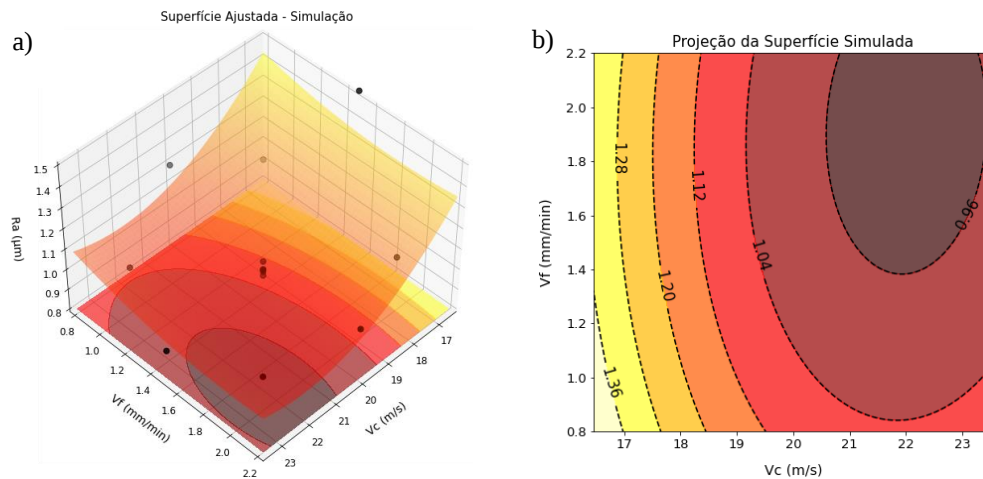


Figura 14: a) superfície de resposta do valor de R_a em função de v_c e v_f . b) projeção da superfície simulada.

$$R_a = 0,013v_c^2 + 0,09v_f^2 - 0,57v_c - 0,26v_f + 0,04v_cv_f + 7,5 \quad (7)$$

4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo modelar e simular o processo corte de silício policristalino com fio diamantado eletrodepositado a fim de analisar o efeito da variação dos parâmetros de v_c e v_f sobre o parâmetro de rugosidade R_a . Para tanto, a ferramenta de corte foi modelada, as equações da mecânica da fratura para remoção de material nos regime dúctil e frágil foram implementadas e as propriedades mecânicas do silício policristalino foram utilizadas. Baseado nos resultados obtidos, pode se concluir que:

- (i) O modelo da ferramenta de corte considera abrasivos com diferentes protrusões e distribuídos randomicamente o que resulta em elevada similaridade as características da ferramenta de corte utilizada industrialmente;
- (ii) A implementação das equações da mecânica da fratura na simulação possibilitou a geração de perfis de corte com remoção de material com a presença de ambos mecanismos dúctil e frágil, como também observados na etapa experimental;
- (iii) A influência das condições de corte (v_c e v_f) sobre os valores dos parâmetros de rugosidade R_a simulados seguem a tendência do observado experimentalmente;
- (iv) O erro entre o valor simulado e experimental para as condições de corte otimizadas foi de 6,46% para a v_c e 51% para a v_f .

5. REFERÊNCIAS

- Bifano, T. G.; Dow, T. A.; Scattergood, R. O. "Ductile-Regime Grinding: A New Technology for Machining Brittle Materials". *Journal of Engineering for Industry*, v. 113, n. 2, p. 184, 1991.
- Chung, C.; Le, V. "Depth of cut per abrasive in fixed diamond wire sawing". *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 80, p. 1337–1346, 2015.
- Chung, C.; Nhat, L. V. "Surface Generation of Diamond Coated Wire for Wire Sawing Process". *Proceeding of the 16th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies*, 2013.
- Costa, E. C.; Xavier, F. A.; Knoblauch, R.; Binder, C.; Weingaertner, W. L. "Effect of cutting parameters on surface integrity of monocrystalline silicon sawn with an endless diamond wire saw". *Solar Energy*, vol. 207, p. 640–650, 2020.
- Costa E.C.; Weingaertner, W.L.; Xavier, F.A. "Influence of single diamond wire sawing of photovoltaic monocrystalline silicon on the feed force, surface roughness and micro-crack depth". *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 143:106525, 2022a.
- Costa, E. C.; Santos, C. P.; Carvalho, V. O.; Xavier, F. A. "Study on surface integrity and ductile cutting of PV polycrystalline silicon and wear mechanisms of electroplated diamond wire". *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 122, p. 1539–1553, 2022b.
- International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) - Results 2021*. ITRPV, v. 13, n. April, p. 1–40, 2022.
- Suzuki, T.; Nishino, Y.; Yan, J. "Mechanisms of material removal and subsurface damage in fixed-abrasive diamond wire slicing of single-crystalline silicon". *Precision Engineering*, v. 50, p. 32–43, 2017.

Werner, M. O. “Determinação da transição frágil-dútil do silício policristalino no corte com fio diamantado”. Relatório de Iniciação Científica – PIBIC/CNPq, UFSC - Florianópolis, 2021.

Li, X.; Gao, Y.; Ge, P.; Zhang, L.; Bi, W. “The effect of cut depth and distribution for abrasives on wafer surface morphology in diamond wire sawing of PV polycrystalline silicon”. *Materials Science in Semiconductor Processing*, Volume 91, p. 316-326, 2019.

Li, X.; Gao, Y.; Yin, Y.; Wang, L.; Pu, T. “Experiment and theoretical prediction for surface roughness of PV polycrystalline silicon wafer in electroplated diamond wire sawing”. *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 49, p. 82-93, 2020.

Wallburg, F.; Kuna, M.; Budnitzki, M.; Schoenfelder, S. “A material removal coefficient for diamond wire sawing of silicon”. *Wear*, vol. 505, p. 1-7, 2022.

Wu, H. “Wire sawing Technologies: state-of-the-art review”. *Precision Engineering*, Vol. 43, pp. 1-9, 2016.

Yin, Y.; Gao, Y.; Wang, L.; Zhang, L.; Pu, T. “Analysis of crack-free surface generation of photovoltaic polysilicon wafer cut by diamond wire saw”. *Solar Energy*, vol. 216, p. 245-258, 2021.

Yu, X.; Wang, P.; Li, X.; Yang, D. “Thin Czochralski silicon solar cells based on diamond wire sawing technology”. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 98, p. 337-342, 2012.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

MODELING AND SIMULATION OF THE ELECTROPLATED DIAMOND WIRE SAWING OF POLYCRYSTALLINE SILICON

Pedro Córdula de Sousa¹, pcorduladesousa@gmail.com

Vinicius Haddad Andrade¹, vinicius_test@hotmail.com

Erick Cardoso Costa¹, erick.cardoso.costa@posgrad.ufsc.br

Fabio Antonio Xavier¹, f.xavier@ufsc.br

¹Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis - SC, Brasil

Abstract. The growing demand for the use of renewable resources for energy generation has resulted in the increase of research related to the manufacturing process of solar panels, both in optimizing their energy efficiency and in controlling production to reduce manufacturing costs. In this context, research on polycrystalline silicon machining processes is essential to obtain a higher quality component with optimized process parameters, which allows reducing and manufacturing costs involved. Thus, this work proposes a computational analysis of the machining process to optimize the cutting parameters on surface roughness of the polycrystalline silicon wafer. For this, both the cutting tool and the cutting kinematics were simulated. The modeling of the tool was based on a commercial diamond wire. Using polar coordinates, tapered abrasives with a random rake angle distribution (γ) between 55-75° and grain size between 30-45 μm , were fixed on a wire and bonding layer, limiting them to an outer diameter of 350 μm . As for the cutting kinematics, the feed rate (v_f) and wire cutting speed (v_c) were varied. In the simulation, the material removal mechanisms of brittle and ductile were considered and the mechanical properties of polycrystalline silicon were implemented. The influence of the cutting process was evaluated on the component roughness R_a results. An experimental step was carried out to validate the proposed simulation. The results show that under increasing v_f , keeping the same v_c , there was a rise of the R_a values due to the predominance of brittle cutting regime. On the other hand, for the same v_f , the increase in v_c induces material removal in the ductile regime, which makes the machined surface smoother, because the decrease of R_a values. The surface roughness profile was simulated and it was possible to observe the formation a lot of grooves and waviness following sinusoidal equation, which are typically observed when polycrystalline silicon cutting with diamond wire sawing, so-called as saw marks. The model proved to be satisfactory with the trend of results observed in the experimental stage, making it possible to optimize the cutting process.

Keywords: brittle material machining, surface roughness, diamond wire sawing, silicon

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.