

EFEITO DA RAZÃO ENTRE AS VELOCIDADES DE AVANÇO E CORTE NA USINAGEM DE SILÍCIO MONOCRISTALINO COM FIO DIAMANTADO

Erick Cardoso Costa¹
Fabio Antonio Xavier²

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

¹erick.cardoso.costa@posgrad.ufsc.br

²f.xavier@ufsc.br

Resumo. A manufatura de wafer de silício monocristalino utilizando fio diamantado é uma importante etapa da cadeia produtiva de células solares. No entanto, o processo ainda introduz danos a integridade da superfície, aumentando a taxa de quebra do wafer durante sua fabricação e reduzindo o tempo de vida da célula solar. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi investigar o efeito da variação da razão entre as velocidades de avanço e corte do processo de corte de silício monocristalino com fio diamantado. Para tanto, uma bancada experimental foi utilizada com um único laço de fio diamantado. As velocidades de corte e de avanço foram variadas e sua influência sobre a superfície e subsuperfície do silício monocristalino foi avaliada. Os resultados mostraram que a textura da superfície usinada é anisotrópica devido a orientação restrita dos grãos de diamante produzirem ranhuras com direção preferencial. O valor da razão r afeta diretamente a integridade da superfície. Aumentando o valor da razão r ambos valores médios da rugosidade S_a e profundidade de microtrincas aumentaram linearmente. Aplicando alta velocidade de corte e menor velocidade de avanço leva a menores valores da razão r , resultando em menor valor de rugosidade e a profundidade de microtrinca.

Palavras chave: usinagem de material frágil, integridade da superfície, fio diamantado, wafer de silício

1. INTRODUÇÃO

A manufatura de wafer de silício monocristalino utilizando fio diamantado é uma das mais importantes etapas da cadeia produtiva de células solares fotovoltaicas. Apesar de sua importância e quase que exclusiva utilização para este propósito, o processo de corte com múltiplos fios diamantados ainda agrega alto custo à cadeia de produção, acrescentando cerca de 50% ao custo de fabricação. Dessa forma, a indústria fotovoltaica tem buscado soluções tecnológicas com intuito de reduzir os custos, garantindo a alta qualidade da superfície e subsuperfície do wafer de silício monocristalino. No entanto, as particularidades do processo de corte e a alta fragilidade e dureza do silício tornam essa etapa de otimização dispendiosa. Na última década, pesquisadores têm dedicado esforços para entender os fenômenos que regem a formação da superfície, macro e microcinemática do processo de corte, empregando métodos de modelagem e simulação baseados em métodos estatísticos e analíticos (Ozturk et al., 2018), elementos finitos (Wallburg et al., 2020), mecânica da fratura com um único grão de diamante ou múltiplos grãos de diamante (Chung e Le, 2015; Liu et al., 2017), bem como abordagens experimentais desenvolvendo máquinas-ferramentas produzidas para propósitos específicos (Knoblauch et al., 2017).

Dentre os trabalhos, destacam-se o de Chung e Le (2015) que modelaram o perfil do fio diamantado usando coordenadas polares para estudar a profundidade de corte dos grãos de diamante. Os autores mostraram que a distribuição randômica da protrusão dos grãos leva a geração de diferentes modos de remoção de material que atuam simultaneamente na formação da superfície do wafer de silício. Costa et al. (2020a) evidenciaram que a variação da velocidade de corte (v_c) e velocidade de avanço (v_f) durante o corte de silício monocristalino com fio diamantado resulta na formação de uma superfície usinada composta por fraturas frágeis devido a fragilidade do silício e regiões que sofreram remoção de material no modo dúctil. Würzner et al. (2015) mostraram que a v_c tem efeito significativo sobre a superfície usinada do silício policristalino quando usinado com fio diamantado, relatando a presença de tensão residual sobre a superfície e valores de rugosidade não homogêneo sob variação de v_c .

Gao et al. (2019) reportaram que o aumento ou redução proporcional de v_c e v_f não apresentam efeito significativo sobre a qualidade da superfície usinada do silício monocristalino. Yin et al. (2020) relataram efeito similar para o silício policristalino usinado com fio diamantado. Os autores observaram um mínimo de variação do aspecto morfológico e rugosidade variando proporcionalmente v_c e v_f . No entanto, ambos autores empregaram condições de corte muito baixa ($v_c \leq 2$ m/s e $v_f \leq 15$ μ m/s), o que pode não representar todos fenômenos que ocorrem durante o processo como temperatura

e pressão na zona de contato abrasivo-silício. Costa et al. (2020b) estudaram o efeito da alta v_c e v_f durante o corte de silício monocristalino com fio diamantado eletrodepositado. Os autores mostraram que é gerada transformação de fase sobre a superfície usinada, sendo a banda de fase amorfa (a-Si) mais intensa quando aplicada $v_c \geq 10$ m/s.

Considerando as informações supracitadas e a importância da alta qualidade do *wafer* aplicado a célula solar fotovoltaica aliada a alta produtividade, o objetivo desse trabalho foi investigar com uma abordagem experimental o efeito da variação da razão entre as velocidades de avanço e de corte do processo de corte de silício monocristalino com fio diamantado. Para tanto, uma bancada experimental foi utilizada com um único laço de fio diamantado com o intuito de variar os parâmetros de v_c e v_f e avaliar sua influência sobre a superfície e subsuperfície do silício monocristalino em termos de textura da superfície usinada, parâmetro de rugosidade S_a e danos na subsuperfície mensurando a profundidade de microtrincas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Máquina-ferramenta, ferramenta de corte e corpo de prova

A máquina-ferramenta utilizada foi uma bancada experimental de corte com fio diamantado contínuo desenvolvida por Knoblauch et al. (2017). Esta bancada permite a utilização de um segmento contínuo (em *loop*) de fio diamantado de modo que o processo de corte seja similar ao observado em uma serra-fita, com v_c e v_f constantes em todo o processo de corte. Como ferramenta de corte, foram usados fios diamantados com diâmetro externo nominal de $\varnothing_{ext} = 350 \mu\text{m}$ (*Norton Saint-Gobain Abrasives Brasil*). Em máquinas-ferramentas industriais, alguns quilômetros de fio diamantado são utilizados para realização do corte de lingote em um único passe. Já para o presente trabalho, as extremidades de um segmento de 1 metro de fio diamantado foram unidas utilizando um equipamento de soldagem por resistência desenvolvido para este propósito (Souza, 2019).

Para a realização dos experimentos foram utilizados corpos de prova de silício monocristalino com dimensões de 25 mm x 50 mm x 7 mm. Os *wafers* foram cortados com espessura média de $(1 \pm 0,05)$ mm na orientação cristalográfica (100), de acordo com o índice de Miller, escolhida em virtude da sua ampla utilização para produção de células solares.

2.2. Procedimento experimental

A etapa experimental foi conduzida com a variação dos principais parâmetros de corte com fio diamantado: velocidade de corte (v_c) e velocidade de avanço (v_f). O parâmetro v_c foi variado nas magnitudes de 10, 15 e 20 m/s, e o parâmetro v_f nas magnitudes de 20, 30 e 40 mm/min. A tensão do fio diamantado foi mantida constante em 30 N para todos os ensaios. Os ensaios foram executados de acordo com um planejamento experimental fatorial 3^2 completo, efetuando-se 9 testes e totalizando 27 ensaios, considerando um teste e duas réplicas. Os demais parâmetros foram mantidos constantes e os ensaios foram executados sem fluido lubrificarrefrigerante. A Tabela 1 mostra de forma resumida as condições de corte empregadas na etapa experimental.

Tabela 1. Parâmetros de corte utilizados nos experimentos

Parâmetros de corte			
v_c (m/s)	10	15	20
v_f (mm/min)	20	30	40
T_{fio} (N)	30		
Fluido lubrificarrefrigerante	Sem		

Com o intuito de avaliar a influência da razão entre as velocidades de avanço e corte durante o processo de corte de silício monocristalino com fio diamantado, a Equação 1 foi aplicada para calcular o valor de razão r . Conforme relatado por Costa et al. (2020), durante o corte com fio diamantado ocorre um fenômeno de deflexão do fio, visto que a ferramenta de corte não é rígida. Dessa forma, a imposição do corpo de prova contra o fio diamantado produz um deslocamento do fio em relação ao seu estado inicial. Isso leva a uma taxa de remoção de material diferente da previamente estabelecida, uma vez que a v_f configurada assume um valor efetivo no contato fio diamantado-corpo de prova. Nesse sentido, é prudente determinar a velocidade de avanço efetiva ($v_{f,efet}$) considerando o comprimento do bloco de silício monocristalino de modo a definir o deslocamento percorrido pelo fio diamantado durante o corte em um intervalo de tempo (início até o final do processo de corte). Neste caso, a $v_{f,efet}$ assume valores diferentes daquele configurada na máquina-ferramenta (v_f).

Após determinar o valor de $v_{f,efet}$, a Equação 1 foi aplicada para calcular o valor da razão r . A Tabela 2 mostra os valores de $v_{f,efet}$, bem como os valores da razão r de acordo com as respectivas condições de corte configuradas inicialmente. Ressalta-se que os valores de $v_{f,efet}$ apresentados na Tabela 2 representam a média aritmética de três ensaios de corte.

$$r = \frac{v_f}{v_c} (\mu\text{m/m}) \quad (1)$$

Tabela 2. Valores de $v_{f,efet}$ e da razão r com respectivas condições de corte

Parâmetros de corte									
v_c (m/s)	10			15			20		
v_f (mm/min)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
$v_{f,efet}$ (mm/min)	11,63	12,85	16,81	12,94	20,26	22,61	14,85	18,24	23,65
Razão r ($\mu\text{m/m}$)	19,39	21,42	28,02	14,38	22,51	25,12	12,38	15,20	19,71

2.3. Análise da integridade da superfície

A topografia da superfície foi quantificada utilizando um interferômetro de luz branca da marca Zygo, modelo Newview 7300, com resolução lateral de 0,28 $\mu\text{m}/\text{ponto}$ e resolução vertical de 0,1 nm. O *softwareMetroPro* foi usado para adquirir as imagens tridimensionais da superfície. Foram efetuadas três medições em regiões distintas da mesma amostra, contendo uma área de 1 mm² para obter a média aritmética. Para o tratamento dos dados foi utilizado o *software MountainsMap Universal 7.1*. Com intuito de quantificar somente a rugosidade, as demais perturbações presentes na superfície, como forma e ondulação, forma subtraídas de acordo com a norma ISO 16610-61. O parâmetro de rugosidade S_a foi extraído, conforme a norma ISO 25178-2. Os valores de S_a representam a média aritmética da medição de três amostras sob a mesma condição de usinagem, com respectivo desvio padrão.

A subsuperfície foi analisada utilizando um método proposto por Tönshoff et al. (1997) e consolidado pela norma ASTM F 950-02. O preparo metalográfico consistiu de um embutimento a frio com resina acrílica e líquido auto polimerizante. Dentro de um molde com diâmetro de 1 pol, a amostra foi disposta sobre um suporte com intuito de expor a subsuperfície com um ângulo (α). Foram aplicadas lixas de 220 até 2000 mesh, seguido de um polimento com pasta abrasiva de diamante com granulometria de 0,25 μm . Por fim, as amostras foram atacadas com uma solução composta por $\text{HF} + \text{CrO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ durante 10 segundos. As subsuperfícies foram analisadas via MEV e a profundidade da microtrinca foi mensurada. O procedimento aqui empregado é detalhado pelos autores Costa et al. (2020b).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Textura da superfície usinada

A Figura 1 mostra a vista axonométrica da superfície do silício monocristalino obtido com os parâmetros de corte de $v_c = 15$ m/s, $v_f = 30$ mm/min e $T_{fio} = 30$ N. Apesar da obtenção da rugosidade via métodos sem contato representarem os valores e aspectos resultantes do processo de usinagem com maior precisão, quando comparado aos de contato mecânico, há uma característica gerada que é somente explicitada por meio da observação do perfil bidimensional quando analisadas nas orientações da direção de avanço e de corte. De acordo com as Figuras 1a e 1b, pode ser observado que a superfície usinada apresenta microsulcos formados na direção do movimento de corte do fio diamantado. Isso resulta em uma superfície com textura anisotrópica, de modo que a rugosidade baseado em um perfil resulta em diferentes valores.

O perfil extraído da direção de avanço mostrado na Figura 1c evidencia que a superfície possui ranhuras ao longo da direção de avanço. De acordo com Sopori et al. (2016), essas ranhuras são formadas em virtude da orientação restrita dos grãos de diamante sobre a alma do fio, que se prolongam na direção do movimento do fio diamantado. Huang et al. (2015) relatam que o perfil extraído destas ranhuras é, visualmente, com formato de canais em “U” que também atribuem uma leve ondulação ao perfil. Se for considerada a diferença de pico-a-vale da ranhura (ou canal “U”), possivelmente, esta acresce o valor aritmético da rugosidade (S_a) devido à dificuldade em extraí-la das demais perturbações da superfície tal como a ondulação. No entanto, esse comportamento da topografia da superfície é característico do processo de corte com fio diamantado.

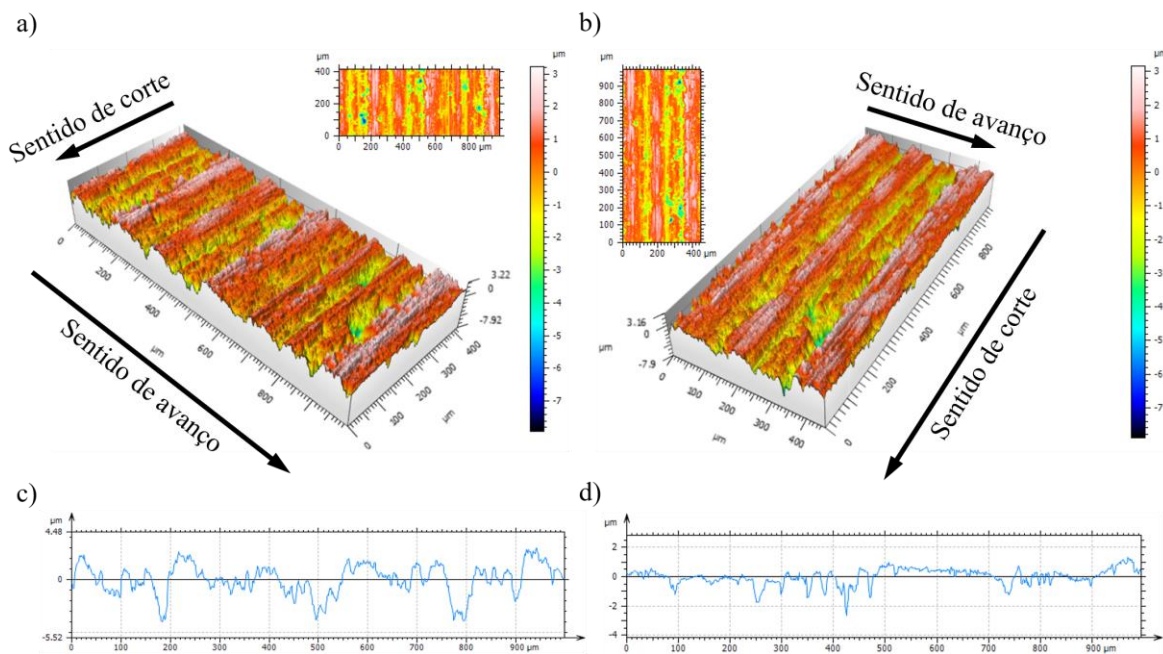


Figura 1. Textura da superfície do silício monocristalino: efeito do movimento de a) avanço; b) corte.

Na Figura 1d é mostrada a mesma superfície do silício monocristalino com ênfase nas ranhuras que se prolongam na direção do movimento de corte. Costa et al. (2020) reportaram que essa característica morfológica está associada à orientação restrita dos grãos abrasivos de diamante sobre a alma do fio, na qual a superfície apresentará ranhuras orientadas e paralelas entre si. É, principalmente, nessa direção que o volume de material removido por grão de diamante será fortemente influenciado pela frequência de engajamento do mesmo quando variadas as condições de corte, principalmente a velocidade de corte. O perfil extraído expõe maior quantidade de vales do que picos e isto ocorre devido à ranhura apresentar, na sua parte inferior, crateras e/ou *pittings*.

3.2. Análise da rugosidade

É notório que a rugosidade expressa quantitativamente uma parcela expressiva das características do aspecto morfológico gerado na superfície usinada e que a predominância frágil ou dútil é fortemente influenciada pelo mecanismo de remoção de material (Costa et al., 2020; Würzner et al., 2015). Sob as considerações de Gao et al. (2019) para o corte de silício monocristalino com fio diamantado, o parâmetro de rugosidade S_a foi analisado baseado na razão $r = v_f/v_c$ ($\mu\text{m}/\text{m}$). Conforme o gráfico da Figura 2, observa-se que o valor médio do parâmetro de rugosidade S_a exibe uma curva crescente linear com um coeficiente de correlação de Pearson de $R^2 = 0,9062$ com a progressão do valor da razão r . Este comportamento está associado às características morfológicas resultantes do mecanismo de remoção de material predominante.

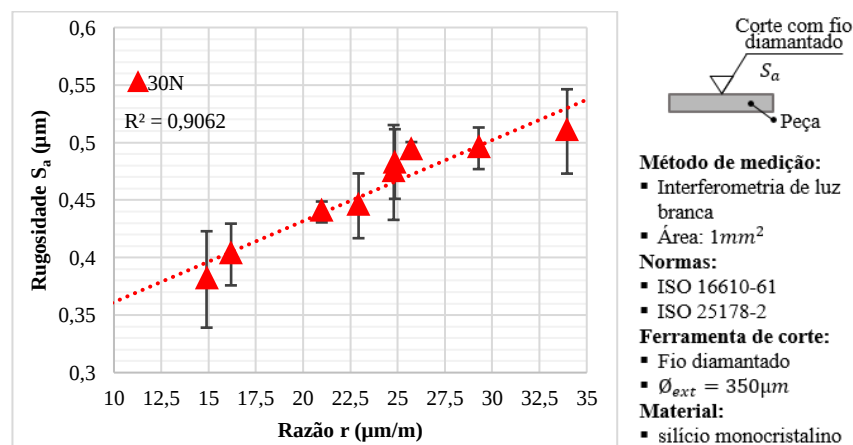


Figura 2. Efeito razão r sobre o parâmetro de rugosidade S_a .

Esta tendência crescente do parâmetro de rugosidade S_a é ocasionada devido à formação da superfície com predomínio de fraturas frágeis que é resultado dos maiores valores assumidos pela razão r , atribuído ao aumento da v_f juntamente com a redução da v_c . Do contrário, os menores valores da razão r , por causa da diminuição da v_f e aumento da v_c , facilitaram a formação da superfície com predominância de um regime dúctil para remoção de material, uma vez que há maior presença de ranhuras livres de danos.

3.3. Análise da profundidade de microtrinca

Dado que o modo de remoção de material é fortemente influenciado pelas condições de corte, a profundidade média das microtrincas foi analisada pela razão $r = v_f/v_c$ ($\mu\text{m}/\text{m}$). Apesar deste índice ser convencionalmente empregado nas análises da superfície, a razão r foi empregada a fim de verificar a influência dos parâmetros sobre os danos residuais na subsuperfície. Ressalta-se que os valores da v_f correspondem aos valores da $v_{f,\text{efet}}$.

Conforme mostrado no gráfico da Figura 3, verifica-se que os danos residuais na subsuperfície apresentam comportamento linear crescente com o aumento do valor da razão r . Conforme já relatado, a razão r assume maiores valores para a progressão da v_f (20→30→40 mm/min) e redução da v_c (20→15→10 m/s) que, em conjunto, proporcionam acréscimo da média da espessura de cavaco não-deformado (h_{cu}) dos gumes cinemáticos, o que favorece que as microtrincas atinjam maior profundidade da subsuperfície.

Nas condições com os maiores valores da razão r , por causa do aumento da v_f e redução da v_c as microtrincas alcançaram maior profundidade da subsuperfície. A imposição desta condição resulta na maior T_p dos grãos de diamante sobre a superfície do silício monocristalino, o que causa a formação de microtrincas com maior profundidade. Chung e Le (2015) citam que o aumento da v_f e redução da v_c , em conjunto, favorecem para que haja mais gumes cinemáticos removendo material no regime frágil. Portanto, nestas condições há maior propensão de ocorrência de microtrincas mais profundas, conforme observado no gráfico da Figura 3 quando a razão r assumiu os maiores valores.

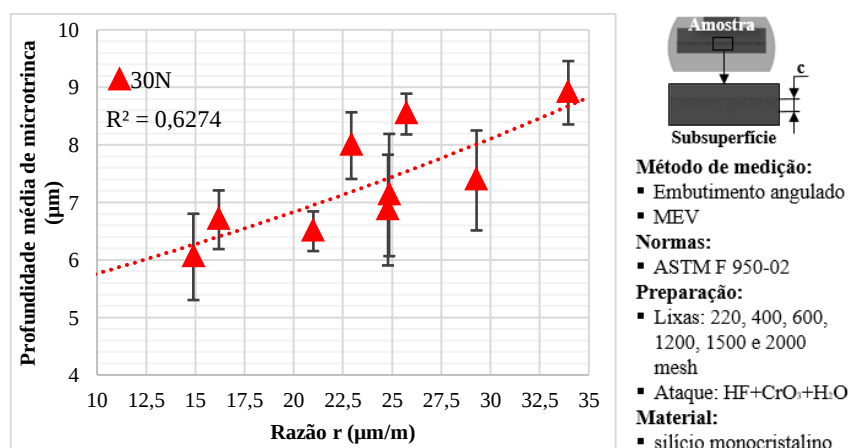


Figura 3. Efeito razão r sobre a profundidade de microtrinca.

Por outro lado, os menores valores assumidos pela razão r correspondem à redução da v_f e aumento da v_c , concomitantemente. Neste caso, conforme relatado por Chung e Le (2015), estas condições de corte promovem o aumento significativo da quantidade de gumes cinemáticos com a espessura de cavaco não-deformado (h_{cu}) menor que o limite crítico, ou seja, no regime dúctil. Atribuindo o regime dúctil como dominante no momento da remoção de material, o campo de tensão que se forma no âmbito do gume do grão de diamante apresenta um estado de compressão suficiente para evitar ou reduzir a nucleação e propagação de microtrincas, de modo que a mesma atinja uma menor profundidade da subsuperfície (Costa et al., 2020b). Portanto, para os menores valores da razão r , houve decréscimo da profundidade danificada por microtrincas.

O coeficiente de correlação de Pearson resultou em um valor de $R^2 = 0,6274$. Essa variabilidade dos dados é atribuída aos múltiplos contatos não-homogêneos entre os grãos de diamante e o silício que resultam em diferentes campos de tensão no âmbito do gume o que gera diferentes níveis de nucleação e propagação de microtrincas para a subsuperfície. Além disso, as microtrincas são levemente oblíquas de modo que a profundidade atingida de dano na subsuperfície varie para as diferentes condições de corte.

Por fim, comparando os gráficos das Figuras 2 e 3 pode ser observado que há uma íntima relação entre as características da superfície e subsuperfície, uma vez que o aumento da razão r resultou em altos valores de rugosidade e microtrincas atingindo maior profundidade. Costa et al. (2019) mostraram que a superfície representa uma boa parcela dos danos que estão presentes na subsuperfície, de modo que há um comportamento praticamente linear entre ambos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de corte de *wafer* de silício monocristalino utilizando fio diamantado é um dos mais importante da cadeia de produção de células solares. Dada sua importância, o presente trabalho objetivou avaliar a influência da variação da razão entre as velocidades de avanço e corte na usinagem de silício monocristalino com fio diamantado. De acordo com os resultados obtidos as seguintes conclusões foram feitas:

- A textura da superfície usinada apresenta ranhuras com uma direção preferencial, paralelo ao movimento de corte. A orientação restrita dos grãos de diamante resulta em uma trajetória definida, produzindo uma superfície com textura anisotrópica. Os perfis extraídos das direções de corte e avanço apresentam diferentes valores de rugosidade.
- Os valores médios de S_a apresentam crescimento linear sob a progressão da razão r . Esse comportamento está relacionado com a h_{cu} dos gumes cinemáticos, pois menores valores de r reduzem h_{cu} e, conseqüentemente, resulta em menores valores de rugosidade. Do contrário, quanto maior o valor da razão r leva para um aumento excessivo de h_{cu} , resultando em maior S_a .
- A profundidade de microtrincas na subsuperfície também apresentou aumento linear com o aumento da razão r . Esse comportamento é atribuído ao aumento de v_f e redução de v_c que levam a maior força normal por grão e, conseqüentemente, maior propensão a nucleação e propagação de microtrinca. Por outro lado, a redução da força normal por grão é alcançada reduzindo a v_f e aumentando a v_c , o que reduz o campo de tensão no âmbito dos gumes cinemáticos levando para menor profundidade de propagação de microtrinca.

De maneira geral, a mais alta qualidade da superfície do *wafer* de silício monocristalino pode ser obtida empregando menores valores da razão r aplicando a mais alta condição de v_c e menor v_f . Nessas condições são obtidos menores valores de rugosidade S_a e profundidade de microtrincas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e CNPq pelo apoio financeiro, a Norton Saint-Gobain Abrasives Brasil pelo fornecimento do fio diamantado e ao Laboratório de Materiais (LabMat - UFSC).

6. REFERÊNCIAS

- ASTM International. ASTM F 950-02: Standard test method for measuring the depth of crystal damage of a mechanically worked silicon slice surface by angle polishing and defect. West Conshohocken, v. 14, p. 1-5, 2002.
- Chung, C.; Le, V. N. Depth of cut per abrasive in fixed diamond wire sawing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 80, n. 5, p. 1337-1346, 2015.
- Costa, E. C.; Santos, C. P.; Xavier, F. A.; Weingaertner, W. L. Influence of diamond wire sawing parameters on subsurface microcracks formation in monocrystalline silicon wafer. *Proceeding of 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*. ABCM, Uberlândia - MG, Brazil, p. 1-8, 2019.
- Costa, E. C.; Santos, C. P.; Xavier, F. A.; Weingaertner, W. L. Experimental investigation of the sawn surface of monocrystalline silicon cut by endless diamond wire sawing. *Materials Research*, v. 23(4), p. 1-8, 2020a.
- 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*, v. 207, p. 640-650, 2020b.
- Gao, Y.; Ge, P.; Zhang, L.; Bi, W. Material removal and surface generation mechanism in diamond wire sawing of silicon crystal. *Materials Science in Semiconductor Processing*, v. 103, p. 1-11, 2019.
- Huang, H.; Zhang, Y.; Xu, X. Experimental investigation on the machining characteristic of single-crystal SiC sawing with the fixed diamond wire. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 81, n. 5, p. 955-965, 2015.
- ISO 16610-61:2015. Geometrical product specification (GPS) – Filtration – Part 61: linear areal filters – Gaussian filters.. Geneva: ISO; 2015.
- ISO 25178-2:2012. Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. Geneva: ISO; 2012.
- Knoblauch, R.; Costa, J. V. M. T.; Weingaertner, W. L.; Xavier, F. A.; Wegener, K. Endless diamond wire saw for monocrystalline silicon cutting. *Proceedings of 59th Ilmenau Scientific Colloquium*. Ilmenau, Germany, p. 1-12, 2017.
- Liu, T.; Ge, P.; Bi, W.; Gao, Y. Subsurface crack damage in silicon wafers induced by resin bonded diamond wire sawing. *Materials Science in Semiconductor Processing*, v. 57, p. 147-156, 2017.
- Ozturk, S.; Aydin, L.; Celik, E. A comprehensive study on slicing process optimization of silicon ingot for photovoltaic applications. *Solar Energy*, v. 161, p. 109-124, 2018.
- Sopori, B.; Devayajanam, S.; Basnyat, P. Surface characteristic and damage distributions of diamond wire sawn wafers for silicon solar cels. *AIMS Materials Science*, v. 3, n. 2, p. 669-685, 2016.

- Sousa, R. D. Development of a diamond wire welding device. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- Tönshoff, H. K.; Karpuschewski, B.; Hartmann, M.; Spengler, C. Grinding-and-slicing technique as an advanced technology for silicon wafer slicing. *Machining Science and Technology*, v. 1, n. 1, p. 33-47, 1997.
- Wallburg, F.; Kuna, M.; Budnitzki, M.; Schoenfelder, S. Experimental and numerical analysis of scratching induced damage during diamond wire sawing of silicon. *Wear*, v. 454-455, p. 1-13, 2020.
- Würzner, S.; Falke, A.; Buchwald, R.; Möller, H. J. Determination of the impact of the wire velocity on the surface damage of diamond wire sawn silicon wafers. *Energy Procedia*, v. 77, p. 881-890, 2015.
- Yin, Y.; Gao, Y.; Li, X.; Pu, T.; Wang, L. Experimental study on slicing photovoltaic polycrystalline silicon with diamond wire saw. *Materials Science in Semiconductor Processing*, v. 106, p. 1-11, 2020.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

EFFECT OF RATIO BETWEEN FEED RATE AND WIRE CUTTING SPEED IN DIAMOND WIRE SAWING OF MONOCRYSTALLINE SILICON

Erick Cardoso Costa¹
Fabio Antonio Xavier²

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

¹erick.cardoso.costa@posgrad.ufsc.br

²f.xavier@ufsc.br

Abstract. *The manufacturing of monocrystalline silicon wafer by diamond wire sawing is one of the main manufacturing process of solar cells. However, this process still introduce damage on surface integrity, since it lead to high breaking rate of silicon wafer and decrease the lifespan of solar cell. Therefore, this paper aims to investigate the effect of the variation of speeds ratio in monocrystalline silicon cut by diamond wire sawing. A test cutting rig was used employing a single diamond wire. The cutting parameters wire cutting speed and feed rate were varied and it influence on the surface and subsurface of monocrystalline silicon was evaluated. The results shown that the sawn surface have a anisotropic texture due to the restrict orientation of diamond grits produced grooves with preferential direction. The value of ratio r affected the surface integrity. Increasing the value of ratio r both average value of surface roughness S_a and microcrack depth rise linearly. Using higher wire cutting speed and lower feed rate lead to smaller value of ratio r , which result in lower surface roughness and shallower microcrack depth.*

Keywords: *machining of brittle materials, surface integrity, diamond wire, silicon wafer*

RESPONSIBILITY NOTICE

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