

ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DO SILÍCIO MONOCRISTALINO OBTIDA PELO CORTE COM FIO DIAMANTADO CONTÍNUO

Erick Cardoso Costa, erick.cardoso.costa@posgrad.ufsc.br¹
Caroline Piesanti dos Santos, caroline.piesanti@grad.ufsc.br¹
Ricardo Knoblauch, ricardo.knoblauch@posgrad.ufsc.br¹
Fabio Antonio Xavier, f.xavier@ufsc.br¹
Walter Lindolfo Weingaertner, w.l.weingaertner@ufsc.br¹

Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis/SC

Resumo. Na produção de células solares, o corte de wafers de cristal de silício com fio diamantado é uma das etapas mais críticas da cadeia produtiva devido ao comportamento frágil e duro deste material e à complexidade do processo de usinagem empregado. Em consequência disto, a melhoria do resultado da usinagem requer elevado conhecimento da macro e micromecânica do processo de corte, bem como entender a influência dos parâmetros de entrada. Neste contexto, este trabalho visa avaliar as características de remoção de material, morfologia e rugosidade da superfície, correlacionando-as aos parâmetros velocidade de corte e velocidade de avanço empregados no processo de corte de silício monocristalino com fio diamantado contínuo. Os resultados mostraram que a morfologia da superfície usinada apresenta tanto fraturas frágeis na forma de crateras quanto ranhuras livres de danos. Os espectros Raman expuseram que houve remoção de material nos regimes frágil e dúctil por meio das fases cristalinas residuais. Já a rugosidade apresentou comportamento crescente com aumento da velocidade de avanço em virtude da progressão da taxa de remoção de material, proporcionando maior espessura de cavaco não deformado e induzindo a formação de fraturas frágeis na superfície. Sob variação da velocidade de corte, a rugosidade apresentou comportamento decrescente proporcionado pela formação de ranhuras livres de danos em virtude da menor espessura de cavaco não deformado resultante da maior frequência de engajamento dos gumes cinemáticos.

Palavras chave: silício monocristalino, fio diamantado contínuo, transição frágil-dúctil, integridade da superfície, indústria fotovoltaica

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia solar por meio da tecnologia fotovoltaica se tornou uma das principais fontes de energia renovável por causa do aumento significativo da sua eficiência energética e a baixa emissão de gases de efeito estufa (MONTEIRO et al., 2017). No entanto, diversos fatores limitam sua disseminação, sendo os principais: custos de matéria prima (≈ 30 a 40% do custo total da fabricação das células solares) e usinagem ($\approx 50\%$ do custo de fabricação) (PEGUIRON et al., 2014). Para fabricação das células solares, o cristal de silício (c-Si) é o substrato dominante neste mercado, representando cerca de 80% das células solares já produzidas no mundo. Isto decorre principalmente da sua abundância na crosta terrestre ($\approx 27\%$ dos minerais encontrados) e suas características semicondutoras (YU et al., 2012).

Apesar das vantagens apresentadas pelo c-Si, sua baixa resistência à fratura dificulta o emprego de processos de usinagem. O processo de usinagem atualmente empregado na indústria fotovoltaica é conhecido como serramento por múltiplos fios (*Multi-wire sawing* – MWS), que utiliza uma máquina-ferramenta contendo uma malha de fios abrasivos paralelos e equidistantes, dispostos sobre um conjunto de cilindros ranhurados (Fig. 1). Esta etapa é empregada após a produção do lingote de c-Si. Basicamente, o lingote com diâmetro de até 300mm é submetido ao processo de corte para obtenção de fatias finas com espessura na ordem de 100 a $180\mu\text{m}$, denominadas *wafers* (MÖLLER, 2015).

No entanto, o processo MWS introduz danos à integridade da superfície, tais como microlascamento, transformação de fase, rugosidade da superfície usinada e microtrincas. Em virtude disto, é requerido um elevado controle do processo e controle de qualidade durante esta etapa, pois a qualidade e o rendimento do corte dependem da escolha dos parâmetros de entrada. Apesar deste processo ser bastante difundido no setor industrial, a cinemática do sistema de corte múltiplo somada à fragilidade do c-Si e ao movimento recíprocante do fio faz com que haja uma relativa dificuldade para se investigar a influência dos parâmetros de entrada sobre o resultado de usinagem, dificultando, portanto, o emprego de abordagens voltadas à otimização do processo (BIDIVILLE et al., 2015; MÖLLER, 2015).

O processo MWS pode ser efetuado com a aspersão de uma suspensão abrasiva ou com fio de aço recoberto de abrasivos (LIU et al., 2017). No primeiro processo, no corte com suspensão abrasiva, a remoção de material é obtida pelas interações entre as partículas abrasivas (SiC), contidas em um meio líquido, e a superfície do cristal de silício, na qual a

remoção de material ocorre pelo desgaste de três corpos, similar à lapidação. No segundo, no corte com fio diamantado, a remoção de material ocorre por meio do desgaste entre dois corpos, que envolve a interação direta dos grãos abrasivos com o material (WU, 2016; MÖLLER, 2015).

Apesar do amplo uso de ambos os processos de MWS, o uso do processo com fio diamantado tem se mostrado promissor, uma vez que este aumenta a produtividade concomitante à significativa melhoria da qualidade da superfície usinada do *wafer* de c-Si e possibilita a reciclagem de cavaco do c-Si com menor custo. Todavia, o conhecimento do processo ainda é predominantemente de natureza empírica, uma vez que a cinemática do processo de corte com reversão da velocidade de corte e a concepção da máquina-ferramenta industrial dificultam o emprego de métodos experimentais que visem correlacionar os parâmetros de entrada sobre o resultado da usinagem (KLOCKE, 2009).

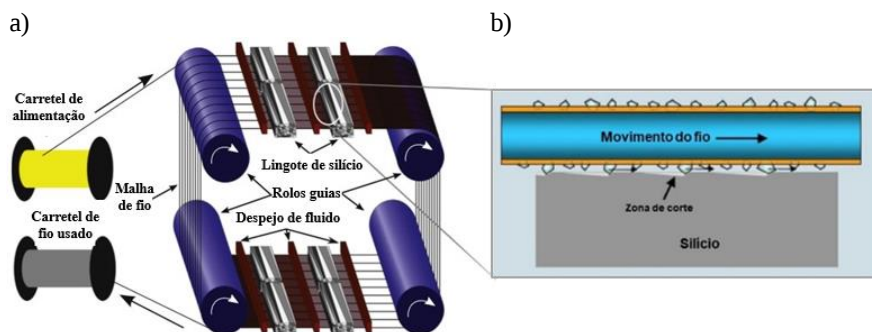


Figura 1 – MWS: a) esquema da máquina-ferramenta; e b) remoção de material com fio diamantado (adaptado de BIDIVILLE et al., 2015; WU, 2016).

O conhecimento das particularidades do processo de corte com fio diamantado e da influência dos parâmetros de entrada sobre o resultado da usinagem é um assunto de grande importância, especialmente a fim de se reduzirem os custos de usinagem, aumentar a qualidade do *wafer* e a produtividade, tornando assim a energia solar mais viável (COSTA et al., 2018).

Dado o exposto acima, o presente artigo objetiva avaliar a integridade da superfície do silício monocristalino resultante do corte com fio diamantado contínuo sob variação dos parâmetros velocidade de corte (v_c) e velocidade de avanço (v_f) em termos de morfologia e rugosidade da superfície pelo parâmetro R_a , bem como identificar e avaliar os diferentes mecanismos de remoção de material no corte do silício monocristalino com fio diamantado contínuo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A máquina-ferramenta utilizada foi uma bancada experimental de corte com fio diamantado contínuo reconfigurada por Knoblauch et al. (2017a) a partir de um sistema de usinagem de ultraprecisão desenvolvido por Stoeterau (1999). Como ferramenta de corte, foram usados fios diamantados com diâmetro externo nominal de $\varnothing_{ext} = 350 \mu m$ (Norton Saint-Gobain Abrasives Brasil). Em máquinas-ferramentas industriais, alguns quilômetros de fio diamantado são utilizados para realização de um único passe. Já para o presente trabalho, as extremidades de um segmento de 1m de fio diamantado foram unidas utilizando um equipamento de soldagem por resistência desenvolvido para este propósito por Knoblauch et al. (2017b). A utilização de um segmento contínuo (em *loop*) de fio diamantado permite a realização do corte de forma similar a uma serra-fita, com v_c e v_f constantes em todo o corte.

Para a realização dos experimentos, foram utilizados corpos de prova de silício monocristalino com dimensões de 25mm x 50mm x 7mm. 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.

Foram variados os parâmetros v_c , nas magnitudes de 10, 15 e 20 m/s, e v_f , nas magnitudes de 20, 30 e 40 mm/min. A tensão do fio diamantado foi mantida constante em 30N para todos os ensaios. Os ensaios foram executados segundo 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 lubrificante.

Para avaliar a morfologia da superfície dos *wafers* cortados, foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com o equipamento da marca HITACHI, modelo TM3030. O mecanismo de remoção de material foi confirmado por meio da técnica de espectroscopia Raman empregando um equipamento da marca Renishaw, modelo 2000, com laser de argônio de comprimento de onda de 514,5nm. O laser foi incidido sobre regiões que expuseram remoção frágil e remoção dúctil a fim de identificar a estrutura cristalina residual presente na superfície. Os intervalos analisados foram de 200 a 700 cm^{-1} com 3 acumulações de 10s cada.

A topografia da superfície foi quantificada em um perfilômetro da marca Taylor Hobson, modelo FTS i120 com apalpador de diamante com raio de 2 μm e ângulo de conicidade de 90°. Foram empregados comprimento de amostragem (l_n) de 4 mm e *cut-off* de 0,8 mm conforme a norma ISO 4288/1998. As superfícies dos *wafers* foram mensuradas ao

longo da direção de avanço e o tratamento dos dados foi efetuado no *software MountainsMap Universal 7.1* para extração do parâmetro de rugosidade da superfície R_a de acordo com a norma ISO 4287/1997.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A morfologia da superfície do silício monocristalino obtida pelo corte com fio diamantado contínuo é mostrada na Figura 2a. Observa-se que na superfície há regiões que sofreram remoção de material no regime frágil e dúctil, que se distribuem em fraturas frágeis na forma de crateras e ranhuras livres de danos, respectivamente. A formação das crateras, conforme Liu et al. (2017), é atribuída à natureza frágil do silício monocristalino; e sua formação, segundo Möller (2015), é traduzida pela teoria da mecânica da fratura. De acordo com Klocke (2009), a aparição destas crateras está atrelada à média da espessura de cavaco não deformado (h_{cu}) proveniente da penetração dos gumes cinemáticos.

Segundo Bifano et al. (1991), há um limiar entre a deformação plástica e o início de formação de trincas para materiais com tal comportamento e o aumento de penetração do gume favorece a extrapolação do limite crítico ($h_{cu,crit}$). Isto promove a formação de cavaco por meio da propagação de trinca, levando à aparição de crateras por causa da sobreposição volumétrica, o que resulta em cavacos com espessura e largura maiores do que a teórica.

Já as regiões livres de danos apresentam ranhuras paralelas e orientadas que seguem a direção do movimento de corte, conhecidas como marcas de serra, conforme Yu (2012). Segundo Wu (2016), estas ranhuras são a principal característica do corte com fio diamantado e são produzidas pela orientação restrita dos grãos abrasivos de diamante contidos na alma do fio, que imprimem seu formato sobre a superfície do *wafer*. Estas regiões condizem com a remoção de material no regime dúctil, na qual a h_{cu} é menor que $h_{cu,crit}$, promovendo, durante a formação do cavaco no âmbito do gume, deformação plástica antes de atingir o limite de resistência à fratura.

Ressalta-se que a predominância de regimes de remoção de material depende diretamente das condições de usinagem empregadas. Desta forma, sob aumento de v_f em 20→30→40 mm/min, houve formação da superfície do *wafer* com maior predominância de fraturas frágeis na forma de microlascamentos, crateras e *pittings*. Contudo, sob variação de v_c em 10→15→20 m/s, houve mais aparição de ranhuras livres de danos, resultando em um aspecto morfológico condizente com remoção de material no regime dúctil.

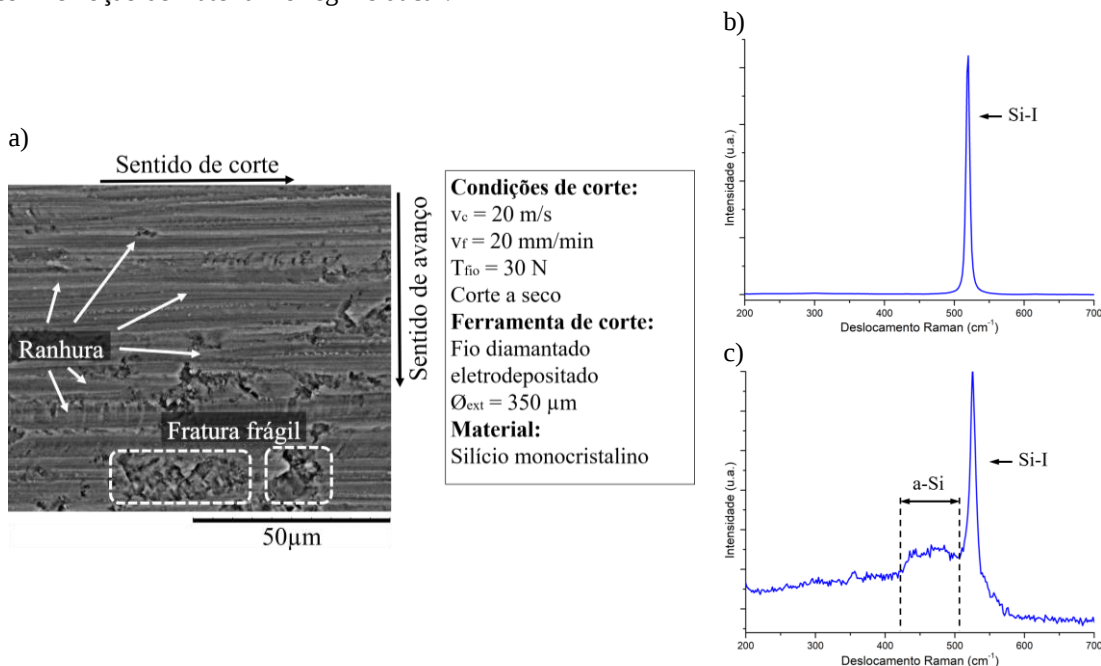


Figura 2 – Silício monocristalino: a) morfologia da superfície; espectros Raman: b) fratura frágil e c) ranhura.

Para comprovar as hipóteses dos mecanismos de remoção de material, a estrutura cristalina residual presente na superfície foi identificada e correlacionada aos parâmetros de corte empregados. O laser foi incidido sobre as crateras e obteve-se o espectro com pico em 521 cm^{-1} referente à fase Si-I, conforme Figura 2b. De acordo com Suzuki et al. (2017), a presença exclusiva do espectro de fase Si-I condiz com o mecanismo de remoção frágil, pois, quando $h_{cu} \geq h_{cu,crit}$, o material é removido por meio de propagação de trinca e o cristal de silício puro, que possui estrutura cúbica de diamante (Si-I), é exposto.

Em seguida, o laser foi incidido sobre as ranhuras livres de danos com característica de remoção dúctil. O resultado é apresentado na Figura 2c. Observa-se que há presença de uma banda com pico em 475 cm^{-1} , referente à fase amorfa a-Si, e o espectro Si-I com pico em 525 cm^{-1} , com menor intensidade. Esta fase é consequência da metalização da zona que sofreu contato com o gume do diamante, induzindo a amorfização da superfície após a formação do cavaco (YU, 2012).

De acordo com Bidiville et al. (2009), a presença da fase a-Si é resultado do comportamento do silício monocristalino tal como um material dúctil quando submetido a uma pressão de contato entre o diamante e o silício que produz a transformação de fase do silício e, em conjunto com $h_{cu} \leq h_{cu,crit}$, conduz a um fluxo plástico do silício monocristalino durante a formação do cavaco. Sob tais condições de contorno, haverá tendência de redução de danos frágeis presentes na superfície, sendo, neste caso, exposto como ranhuras livres de danos. Dessa forma, o aumento de v_c e a redução de v_f favorecem a melhoria da superfície usinada. Para as condições de corte aqui investigadas, a melhoria da superfície do *wafer* foi obtida com as magnitudes de $v_c = 20$ m/s e $v_f = 20$ mm/min.

A Figura 3 apresenta o comportamento do parâmetro de rugosidade R_a sob variação da v_f e v_c . De acordo com o gráfico, os valores de R_a exibem comportamento crescente com a progressão de v_f . Segundo Klocke (2009), este comportamento é atribuído à maior taxa de remoção de material resultante da progressão da v_f . Em consequência disto, os gumes cinemáticos geram um valor médio de h_{cu} maior, o que causa o aumento da formação da superfície por propagação de trincas e propicia a presença de crateras mais profundas e extensas, alterando a rugosidade da superfície. Isso ocorre gradualmente com a progressão da v_f em 20→30→40 mm/min, pois o aumento deste parâmetro promove maior imposição do corpo de prova de silício monocristalino contra o fio diamantado, o que, por sua vez, resulta em maior penetração dos gumes cinemáticos na superfície do *wafer* e gera o aumento de R_a .

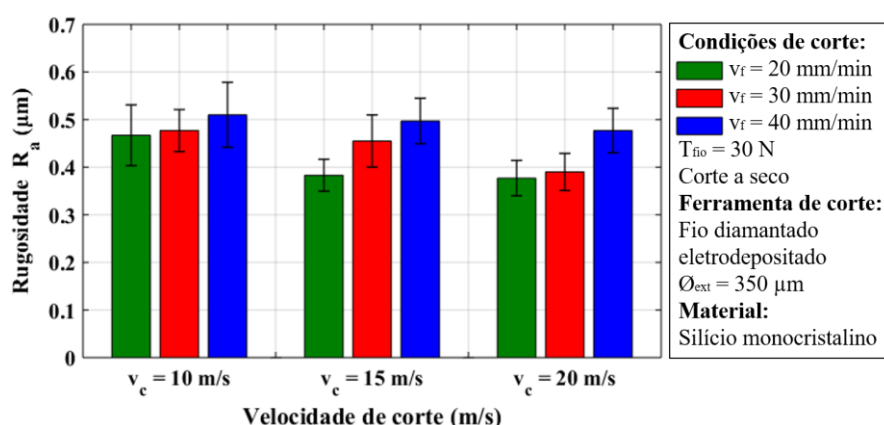


Figura 3 – Rugosidade R_a do silício monocristalino sob variação da v_f e da v_c .

Tabela 1. ANOVA para o resultado da rugosidade R_a .

Fator	Efeito médio (μm)	Percentual (%)	Valor-p
v_f	+ 0,086	+ 21,0%	0,00570
v_c	− 0,070	− 14,5%	0,02398

Já o resultado da rugosidade R_a para progressão da v_c exibe comportamento decrescente. Este resultado da rugosidade está associado à significativa redução da média de h_{cu} que, em conjunto com a transição de Si-I→Si-II, promove comportamento do silício monocristalino tal como um material dúctil no âmbito do gume de diamante, propiciando remoção de material no regime dúctil. Além disto, visto que a rugosidade expressa uma parcela do aspecto morfológico da superfície usinada, a progressão de v_c promoveu redução dos danos frágeis na superfície. Para este caso, o aumento de v_c em 10→15→20 m/s, conforme Bifano et al. (1991), reduz a média de h_{cu} devido à maior frequência de engajamento dos grãos abrasivos, o que permitiu que mais gumes cinemáticos removessem material no regime dúctil. Isto favoreceu a redução dos danos na forma de crateras e conduziu à melhora da superfície usinada.

A análise de variância (ANOVA) inferida para o planejamento fatorial completo 3^2 para o resultado da rugosidade R_a é mostrada na Tabela 1. Observa-se que ambos os parâmetros de velocidade de avanço (v_f) (valor-p = 0,00570) e de velocidade de corte (v_c) (valor-p = 0,02398) exibiram efeito significativo sobre a rugosidade R_a para um nível de confiança de $\alpha = 0,05$. Para a progressão da v_f de 20 para 40 mm/min, R_a aumentou em até 21,0%. Já para o aumento de 10 para 20 m/s da v_c , a rugosidade R_a apresentou uma redução de até 14,5%.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho consistiu em analisar a superfície usinada do silício monocristalino sob variação dos parâmetros de v_f e de v_c no corte com fio diamantado contínuo. Verificou-se que a superfície usinada apresentou um aspecto morfológico com distribuições de regiões que sofreram remoção de material tanto no regime frágil quanto no regime dúctil. A predominância destes mecanismos sobre a superfície está intimamente atrelada à média da espessura de cavaco não-deformado (h_{cu}) proveniente da penetração dos gumes cinemáticos, em função dos parâmetros de corte empregados. Estes

mecanismos de remoção de material foram verificados com o auxílio das respostas dos espectros Raman, que expuseram a presença da fase Si-I referente ao cristal puro condizendo com o regime frágil e uma banda de fase a-Si que corresponde à amorfização da superfície, sugerindo que, no contato diamante-silício, a formação do cavaco se deu tal como um material dúctil.

Observou-se também que o comportamento da rugosidade, em termos do parâmetro R_a , está diretamente associado ao aspecto morfológico, pois o parâmetro R_a sofreu influência do mecanismo de remoção de material dominante na superfície gerada. Ambos parâmetros de corte aqui investigados, velocidade de avanço (v_f) e a velocidade de corte (v_c), apresentaram efeito significativo sobre a rugosidade. Sob a perspectiva da progressão do parâmetro da v_f , os valores de R_a apresentaram curva crescente, com aumento de até 21,0% da rugosidade. Isto decorre principalmente em virtude do aumento de fraturas frágeis na forma de microlascamentos, crateras e *pittings* formadas na superfície usinada, que promovem o aumento da rugosidade. Já para a progressão da v_c , a rugosidade R_a apresentou comportamento decrescente, exibindo redução de até 14,5% da rugosidade. Atribui-se esta redução de R_a a menor média da espessura de cavaco não-deformado (h_{cu}) provinda da maior frequência de engajamento dos grãos de diamantes para o aumento da v_c , o que resultou na aparição de ranhuras livres de danos e promoveu menor rugosidade.

De acordo com os experimentos e análises efetuadas, foi observado um significativo efeito da variação dos parâmetros de corte com fio diamantado sobre a superfície do silício monocristalino. Todavia, em virtude da elevada fragilidade deste material, um efeito crítico em forma de microtrincas que adentram a subsuperfície do componente pode reduzir a vida útil de um *wafer*. Para avaliar este efeito, pesquisas futuras serão executadas a fim de qualificar e quantificar a relação entre a superfície e subsuperfície do silício monocristalino no corte com fio diamantado contínuo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio, a *Norton Saint-Gobain Abrasives Brasil* pelo fornecimento do fio diamantado e a *Swiss Federal Institute of Technology Zurich – ETH* pelo fornecimento das amostras de silício monocristalino.

6. REFERÊNCIAS

- Bidiville, A.; Wasmer, K.; Van DER Meer, M.; Ballif, C. “Wire-sawing processes: parametrical study and modeling”. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 132, pp. 392-402, 2015.
- Bidiville, A.; Wasmer, K.; Kraft, R.; Ballif, C. “Diamond wire-sawn silicon wafers – from the lab to the cell production”. *24th EU PVSEC*, Vol. 1, Hamburg, Alemanha, pp.1-6, 2009.
- Bifano, T. G.; Dow, T. A.; Scattergood, R. O. “Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials”. *Journal of Engineering for Industry*, v. 113, n.2, p. 184-189, 1991.
- Costa, E. C.; Souza, R. D.; Knoblauch, R.; Weingaertner, W. L.; Xavier, F. A.; Wegener, K. “Corte de silício monocristalino com serra de fio diamantado contínuo”. *Anais do 10º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Salvador – BA, Brasil, pp. 1-7, 2018.
- Knoblauch, R.; Costa, J. V. M. T.; Weingaertner, W. L.; Xavier, F. A. Wegener, K. “Endless diamond wire saw for monocrystalline silicon cutting”. *Anais do 59º Ilmenau Scientific Colloquium*, TU Ilmenau, pp.1-12, 2017a.
- Knoblauch, R.; Silveira, C. A.; Campos, J. E. S.; Weingaertner, W. L.; Xavier, F. A.; Wegener, K. “Test rig for welding diamond wires into a loop”. *5th Int. Conf. Adv. Civil, Struct. Mech. Eng. - ACSM*, Zurich, pp. 1-5, 2017b.
- Klocke, F. “Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping”. Editor Springer, pp. 452, 2009.
- 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*, Vol. 57, pp. 147-156, 2017.
- Monteiro, N. S. C.; Monteiro, R. A. B.; Mariano, J. D.; Junior, J. U.; Romano, C. A. “Brazil Market outlook for photovoltaic solar energy: a survey study”. *British Journal of Applied Science & Technology*, pp. 1-11, 2017.
- Möller, H. J. “Wafering of Silicon”. *Semiconductors and Semimetals*, pp. 1-47, 2015.
- Peguiron, J.; Mueller, R.; Zanetti, J.; Habegger, S.; Burri, M.; Sopra, F. M. “Reducing wire wear by mechanical optimization”. *Article PV Production Annual*, pp.1-14, 2014.
- Stoeterau, R. L. “Desenvolvimento do protótipo de uma máquina-ferramenta comandada numericamente para usinagem de ultraprecisão com ferramenta de geometria definida”. Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- 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*, Vol. 50, pp. 32-43, 2017.
- Wu, H. “Wire sawing Technologies: state-of-the-art review”. *Precision Engineering*, Vol. 43, pp. 1-9, 2016.
- 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, pp. 337-342, 2012.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

SURFACE ANALYSIS OF MONOCRYSTALLINE SILICON CUT BY AN ENDLESS DIAMOND WIRE SAW

Erick Cardoso Costa, erick.cardoso.costa@posgrad.ufsc.br¹

Caroline Piesanti dos Santos, caroline.piesanti@grad.ufsc.br¹

Ricardo Knoblauch, ricardo.knoblauch@posgrad.ufsc.br¹

Fabio Antonio Xavier, f.xavier@ufsc.br¹

Walter Lindolfo Weingaertner, w.l.weingaertner@ufsc.br¹

Precision Engineering Laboratory – LMP, Department of Mechanical Engineering, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis/SC

Abstract. In production of solar cells, silicon crystal wafers cutting (wafering) with diamond wire is one of the most critical stages of the production chain due to its brittle-hard behavior and machining process employed complexity. Therefore, wafering output improvement requires a deep understanding of macro and micromechanic of the cutting process, as well as knowing input parameters influence. In this context, this work aims to investigate material removal modes, surface morphology and roughness, besides correlating them with cutting speed and feed speed parameters employed to cut monocrystalline silicon with endless diamond wire saw. Results showed that morphology of the sawn surface exhibits both fragile fractures in form of craters and damage-free grooves. Based on recognition of different crystalline residual phases, Raman spectra indicated that material has been removed in brittle and ductile regimes. Surface profile analyses showed that its roughness increases with feed speed, caused by progression of material removal rate, which increases undeformed chip thickness and induces formation of fragile fractures on the surface. Under variation of cutting speed, surface profile roughness decreased with it, since damage-free grooves formation occurred because of smaller undeformed chip thickness, which follows from kinematic cutting edges higher frequency of engagement.

Keywords: monocrystalline silicon, endless diamond-coated wire, brittle-ductile transition, surface integrity, photovoltaic industry

RESPONSIBILITY NOTICE

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