

CORTE DE SILÍCIO MONOCRISTALINO COM SERRA DE FIO DIAMANTADO CONTÍNUO

Erick Cardoso Costa, erickcardosocosta@hotmail.com¹
Ricardo Delgado de Souza, ricardo.delgado@posgrad.ufsc.br¹
Ricardo Knoblauch, ricardo.knoblauch@posgrad.ufsc.br¹
Walter Lindolfo Weingaertner, wlw@emc.ufsc.br¹
Fabio Antonio Xavier, f.xavier@ufsc.com¹
Konrad Wegener, wegener@iwf.mavt.ethz.ch²

¹Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP, Bairro Trindade, 88040900, Florianópolis – SC, Brasil.

²Institute of Machine Tools and Manufacturing – IWF, Zurique, Suíça.

Resumo: A crescente demanda por recursos energéticos renováveis tem sido influenciada pelas recentes mudanças climáticas. Esta rápida expansão do mercado tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias que auxiliem a cadeia de produção e aumente a eficiência dos módulos de painéis fotovoltaicos. Porém, muitos fatores limitam a disseminação da tecnologia fotovoltaica principalmente no que diz respeito ao custo de matéria prima e de fabricação. Na cadeia de produção diversas são as abordagens que objetivam a otimização do processo. Dentre os processos da cadeia produtiva, o serramento com múltiplos fios é uma das etapas mais críticas. Devido às características e cinemática do processo há uma relativa dificuldade em monitorar e investigar a influência dos parâmetros variáveis de entrada no rendimento e na qualidade do corte. Este artigo apresenta a concepção e construção de uma bancada de ensaios de corte com fio diamantado que permite avaliar a influência da variação dos parâmetros de usinagem aplicados para o wafering. A máquina trabalha com um segmento de fio contínuo e mostrou-se eficiente no corte e permite avaliar o desgaste do fio ao longo da progressão do corte.

Palavras-chave: fio diamantado contínuo, desenvolvimento de máquina-ferramenta, desgaste de grão de diamante, wafering de silício, tecnologia fotovoltaica.

1. INTRODUÇÃO

A busca por recursos energéticos alternativos tornou-se indispensável e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico. O crescente interesse em fontes de energia renovável foi desencadeado pelo impacto ambiental devido a poluição, ao esgotamento de recursos fósseis e às mudanças climáticas (Satori *et al.*, 2015). Neste cenário, as tecnologias para gerar energia a partir de fontes renováveis com baixas emissões de gases de efeito estufa tornam-se cada vez mais atraentes. Dentre as opções disponíveis a geração de energia solar é considerada como uma das fontes de energia renovável mais promissora (Monteiro *et al.*, 2017).

Para a geração de energia solar a tecnologia fotovoltaica (PV) tem se mostrado como a principal deste grupo. Diversos fatores limitam a disseminação desta tecnologia, sendo as principais o custo de matéria prima que representam cerca de 30 à 40% do custo total da fabricação de células solares e o custo de usinagem de aproximadamente 50% do custo de fabricação (Booth, 2010). Para a fabricação das células solares pode-se utilizar como substrato: silício monocristalino/policristalino (mono-Si/poli-Si), silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), cobre, índio e gálio seleneto (CIS/SIGS) e células solares fotovoltaicas orgânicas (OPV). Para cada tipo de substrato o módulo solar apresentará diferentes desempenhos com relação a eficiência energética. Devido sua abundância na crosta terrestre (compondo aproximadamente 27% dos minerais encontrados) e as características semicondutoras do cristal de silício (monocristalino e policristalino) cerca de 80% das células solares do mundo são produzidas usando este como substrato (Yu *et al.*, 2012).

Para a produção das células solares, a primeira etapa é a produção do lingote que pode ser efetuado por diferentes rotas sendo as principais: fundição e Czochralski. Subsequente a esta primeira etapa, o lingote é submetido ao processo de serramento para a produção de finas fatias, denominadas de *wafers* que apresentam espessura na ordem de 100 à 180 μm . O processo de corte é realizado em uma máquina com uma teia de fios paralelos, denominada de serra de múltiplos fios (*Multi-Wire Sawing* – MWS), a qual vem sendo amplamente utilizada desde a década de 90 pela indústria

fotovoltaica e microeletrônica (circuito integrado – IC) (Klocke, 2009; Liu *et al.*, 2017; Möller, 2015). Este processo ocorre com a aspersão de uma lama abrasiva ou com fio de aço recoberto de abrasivos, normalmente diamante (Liu *et al.*, 2017). Um modelo esquemático da máquina de corte com múltiplos fios é mostrado na Figura 1. A máquina baseia-se na alimentação de um único fio de aço por um carretel contendo aproximadamente 5 km de fio sendo envolto em cilindros guias (que podem ser 2 ou mais, dependendo da quantidade de lingotes à serem processados) em sulcos paralelos (entre 500 à 700) formando uma malha. A tensão do fio é variada por meio de uma unidade de controle e a malha é movimentada pelo torque aplicado na unidade principal. O movimento do fio é caracterizado como recíprocante, ou seja, a determinada distância de fio percorrida este tem aceleração reduzida e seu sentido invertido (Wu, 2016).

Concomitante ao movimento do fio, o lingote de silício é empurrado contra a malha a uma taxa de avanço controlada e é submetido a desaceleração em função da inversão do sentido de corte promovido pelo fio. O movimento do fio abrasivo e do lingote somado a interação dos grãos abrasivos (que podem ser de SiC ou diamante) contidos na superfície do fio ou dispersos em lama promovem a remoção de material permitindo o corte de centenas ou milhares de *wafers* em um único passo. Além do processamento de cristal de silício para aplicações fotovoltaicas e microeletrônica, a tecnologia MWS também é empregada para manufatura de LED (*light-emitting diodes*) e outros materiais com comportamento frágil como carboneto de silício (SiC), safira (Al₂O₃), arsenieto de gálio (GaAs), vidro e germânio (Ge) (Klocke, 2009; Möller, 2004).

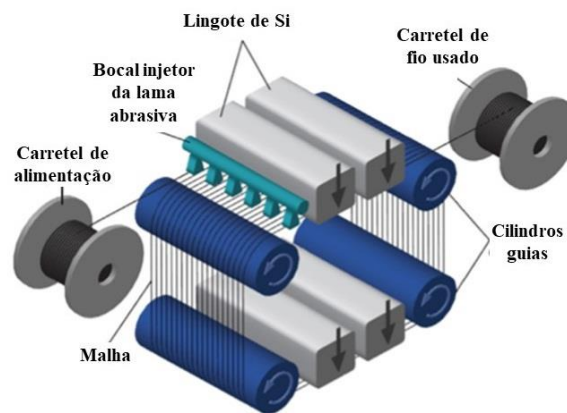


Figura 1 – Tecnologia de corte com múltiplos fios (MWS) (adaptado de Wu, 2016).

Os dois sistemas de corte com malha de fio: com lama abrasiva (*Wire Slurry Sawing* – WSS) ou com abrasivos fixos (*Diamond Wire Sawing* – DWS) são empregados industrialmente. Embora as máquinas sejam semelhantes, o corte ocorre de forma fundamentalmente distinta. Por um lado, conforme ilustrado na Figura 2a, no corte com lama abrasiva a remoção de material é obtida pelas interações entre as partículas abrasivas (SiC) contidas em um meio e o substrato de Si na qual a remoção de material é promovida pelo desgaste de três corpos (*three-body wear*), similar a lapidação. Por outro lado, no corte com fio de diamantado a remoção de material do substrato de silício ocorre por meio do desgaste de dois corpos (*two-body wear*) que envolve a interação direta dos grãos de diamante com o material, como mostrado esquematicamente na Figura 2b (Wu, 2016; Möller, 2004).

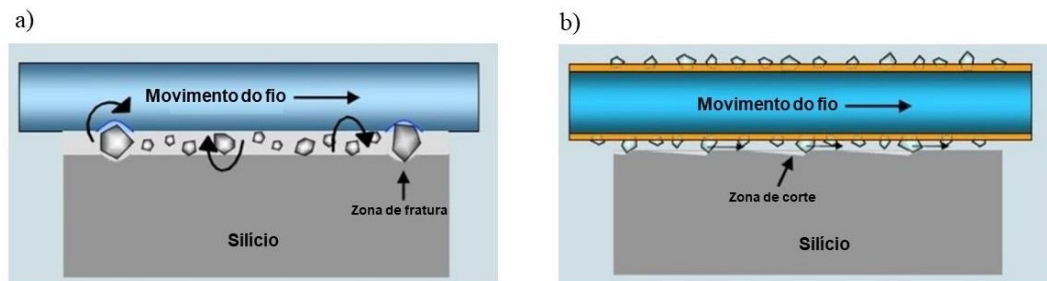


Figura 2 – Esquema de remoção de material no canal de corte: (a) lama abrasiva; (b) fio diamantado (adaptado de Wu, 2016).

A qualidade e o rendimento do corte com fio abrasivo depende da escolha dos parâmetros variáveis de entrada. Devido às características e cinemática do sistema de múltiplo corte somado ao comportamento frágil do silício, há uma relativa dificuldade para investigação da influência dos parâmetros variáveis de entrada do processo de *wafering* sobre as suas características e o resultado de trabalho e, consequentemente, isto dificulta o emprego de abordagens que objetivam a otimização (Bidiville *et al.*, 2015; Möller, 2015). Devido ao custo do substrato de silício e o custo de

usinagem serem expressivos na cadeia de produção das células solares, as indústrias da área fotovoltaica estão incentivando o desenvolvimento de P, D & I (Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação) direcionadas para esta tecnologia (Peguiron *et al.*, 2014). O conhecimento das características do processo de corte com fio diamantado e a influência dos parâmetros variáveis de entrada sobre o resultado de trabalho é um assunto importante a ser investigado, especialmente quando é necessária a redução dos custos de produção para tornar a indústria de energia solar mais viável.

Dado o exposto acima, o objetivo deste artigo é apresentar o desenvolvimento de uma bancada de ensaio de corte com fio diamantado contínuo para investigar o processo de *wafering*. O mesmo está dividido em duas macrofases: 1 – concepção e desenvolvimento da máquina; e 2 – avaliação da progressão do desgaste do fio diamantado.

2. CONCEPÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS COM FIO DIAMANTADO

A bancada de ensaios de corte com fio diamantado foi desenvolvida a partir da reconfiguração de uma máquina-ferramenta de ultraprecisão para usinagem com ferramenta de geometria definida construída no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) – UFSC no escopo do trabalho de doutorado de Stoeterau (1999). Esta máquina-ferramenta apresentou-se como ótima opção para configurá-la dada suas características: rigidez, não apresenta o efeito *stick-slip* e precisão de movimento promovida pela tecnologia de mancais aerostáticos. A partir disto, a primeira etapa para reconfiguração foi a elaboração de uma nova concepção da máquina de acordo com alguns requisitos de funcionalidade elencados que deveriam ser atendidos, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Requisitos de funcionalidade da máquina

REQUISITOS DE FUNCIONALIDADE	
1	Corte com velocidade do fio constante
2	Uso de pequeno comprimento de fio
3	Acompanhar a progressão do desgaste do fio
4	Possibilitar uso de diferentes fluidos de corte
5	Possibilitar visão do canal de corte
6	Controle da tensão do fio
7	Baixa quantidade de material removida no corte
8	Possibilitar a investigação do processo com parâmetros industrialmente utilizados

A Figura 3 mostra um modelo CAD (3a) e a máquina após a reconfiguração (3b). A máquina possui mancais (eixo A e A') e guias (eixo X e Y) aerostáticos que asseguram baixo atrito e precisão de movimento. Os eixos A e A' são rolamento rotatórios aerostáticos que realizam rotação a partir de um sistema motriz baseado em um motor elétrico permitindo o movimento de corte contínuo do fio diamantado que está envolto em duas polias. O eixo X é responsável pelo tensionamento do fio por meio de um pistão pneumático com pressão de ar controlada por uma válvula reguladora de pressão que permite mensurar a tensão do fio configurada para a condução experimental através de uma mola calibrada. O eixo Y executa o movimento de avanço da amostra contra o fio diamantado com velocidade de avanço (v_f) controlada através do deslocamento do carro porta-amostras sobre as guias aerostáticas verticais e é mantida em equilíbrio estático por meio da utilização de contra-peso. O eixo Z promove a variação da espessura da amostra a ser usinada.

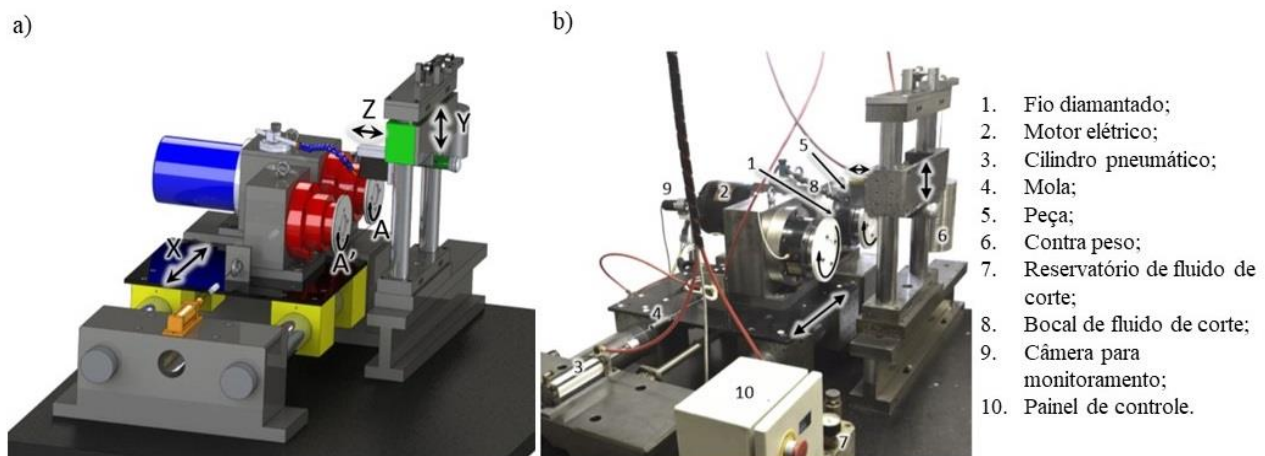


Figura 3 – Bancada de ensaios de corte com fio diamantado: (a) modelo CAD; (b) máquina reconfigurada.

As máquinas industriais realizam o corte com movimento recíprocante do fio diamantado, de forma que a superfície da peça cortada se apresenta com estrias decorrentes dos parâmetros de corte variados, tornando quase impraticável o estabelecimento de uma correlação entre parâmetros de corte e integridade da superfície usinada. No caso da bancada de ensaios desenvolvida, esta promove o movimento do fio contínuo (similar a uma serra-fita) com velocidade de corte (v_c) constante utilizando comprimento de aproximadamente 1m de fio. Nesta concepção torna-se possível investigações experimentais que objetivem avaliar a influência da variação dos parâmetros variáveis do processo sobre o desgaste do fio diamantado, integridade da superfície do *wafer* de silício (ou demais materiais de comportamento frágil), força normal de avanço, tensão e deflexão do fio.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A bancada de ensaios de corte com fio diamantado contínuo permite acompanhar a progressão do desgaste do fio para volumes de material usinado pré-estabelecidos. Por não haver disponíveis comercialmente fios contínuos, um dispositivo de soldagem de topo por resistência elétrica para a confecção dos fios contínuos foi desenvolvido por Knoblauch *et al.* (2017).

Para investigar as características do desgaste dos grãos de diamante foi utilizado fio diamantado com diâmetro externo nominal de $\phi_{ext} = 350 \mu m$, comercialmente disponíveis, com grãos de diamante eletrodepositados com revestimento de níquel, conforme Figura 4. As amostras ensaiadas foram de silício monocristalino (mono-Si) com dimensões de 50x50x7 mm. Os experimentos foram realizados em 3 diferentes condições de corte de acordo com a Tabela 2.

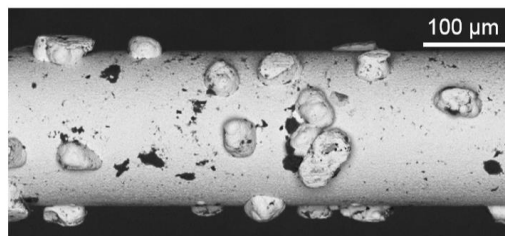


Figura 4 - MEV do fio diamantado.

Tabela 2 – Condições experimentais.

Condições	v_c (m/s)	Fluido lubrificadorrefrigerante	ϕ_{ext} do fio diamantado (μm)
1	26	Sem	350
2	20	Sem	
3	13	Sem	

A análise da progressão do desgaste do fio diamantado foi realizada em um grupo específico de grãos de diamante no comprimento amostral do fio de 2 mm por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A análise se deu em três estágios para cada fio utilizado: 1 – fio diamantado novo; 2 – após um percurso de corte $h = 350$ mm; e 3 um percurso de corte de $h = 700$ mm. Ao longo dos experimentos a força normal de avanço (F_n) foi pré-estabelecida. A Figura 5 ilustra o canal de usinagem enfatizando a altura h .

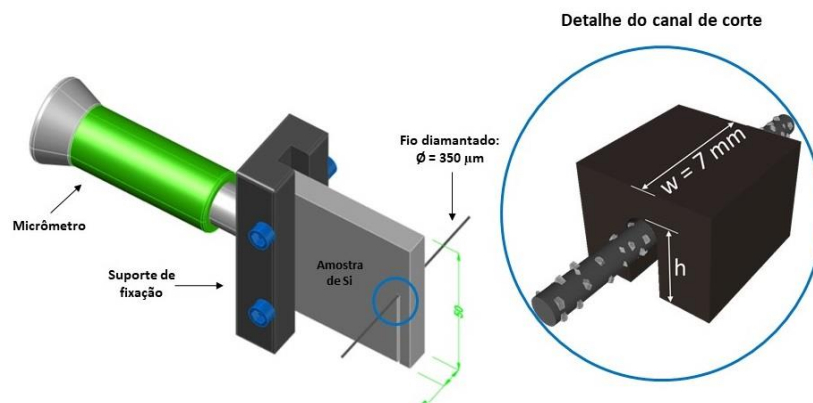


Figura 5 – Dimensões do corpo de prova de mono-Si enfatizando a altura h .

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A região de soldagem do fio diamantado permite encontrar os mesmos grupos de grãos de diamante para monitoramento do desgaste do fio, conforme Figura 6. A partir disto, avaliou-se a progressão do desgaste do fio em função do volume de material removido previamente estabelecido. Para o fio novo, os grãos encontram-se recobertos por uma camada de níquel. Na região de contato do grão ativo recoberto por níquel com o silício, a camada externa de níquel é removida e/ou deslocada para a lateral do respectivo grão no início do processo de corte e o diamante é exposto, caracterizando-se como dressamento, aumentando a eficiência de remoção de material devido ao contato direto dos gumes dos grãos cinemático com o silício. Na fase subsequente ocorre microdesgaste devido a redução da altura dos grãos de diamante e, conseqüentemente, o achatamento dos mesmos. A remoção do revestimento e redução da altura do grão dá-se de forma gradual, influenciada pela taxa de avanço e aumento da força normal (F_n) imposta durante o processo de usinagem. Observam-se também a fratura e/ou arrancamento dos grãos da superfície do fio, podendo ocorrer unitariamente ou em grupo de grãos que separam-se juntamente com o revestimento de níquel da superfície da alma do fio.

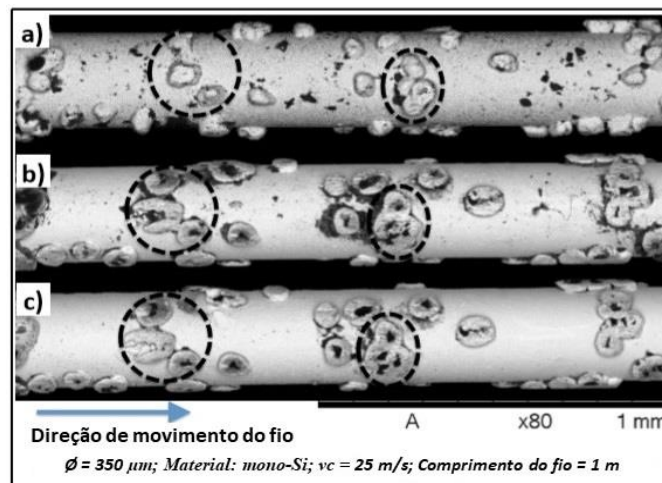


Figura 6 – Progressão do desgaste do fio diamantado analisado por MEV: (a) fio diamantado novo; (b) após um percurso de corte $h = 350$ mm; (c) após um percurso de corte $h = 700$ mm.

A velocidade de avanço (v_f) foi variada pela alteração da massa dos contra-pesos que mantinham o carro porta-amostras em equilíbrio estático. Este sistema altera a força de avanço (F_n) e a velocidade de avanço (v_f) é consequência da alteração desta força, portanto para avaliá-la o processo de usinagem foi gravado e posteriormente as imagens foram processadas para determinação dos tempos de processo. O valor médio da velocidade de avanço (v_f) para as respectivas condições de corte impostas no ensaio é apresentado na Figura 7 com a incerteza de medição correspondente (intervalo de confiança de 95%).

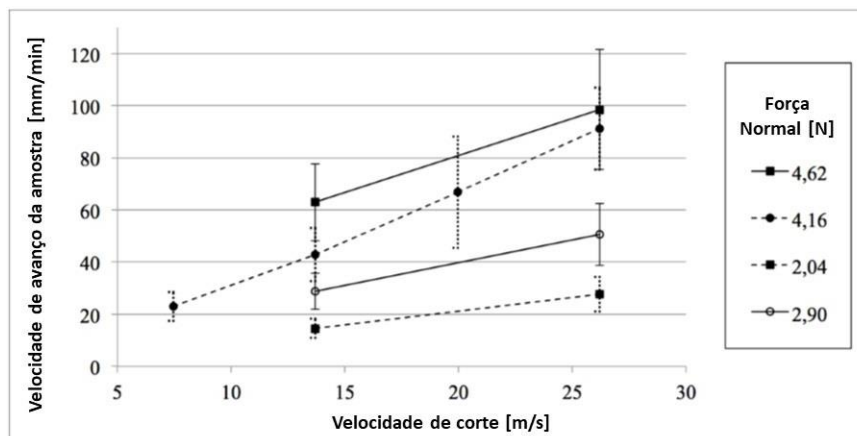


Figura 7 – Resultados da velocidade de avanço (v_f).

O gráfico da Figura 7 mostra que para uma força normal (F_n) constante a velocidade de avanço (v_f) aumenta proporcionalmente com o aumento da velocidade de corte (v_c) devido ao aumento da taxa de remoção de material, corroborando com as conclusões no trabalho de Ge *et al.* (2004). Os resultados apresentados seguem um

comportamento aproximadamente linear. Com base na interpolação dos resultados do conjunto de experimentos foi elaborado um mapa de contorno evidenciando a velocidade de avanço (v_f) em um gráfico (F_n) vs. (v_c) que fornece informações quanto a v_f aproximada ao aplicar um determinado conjunto de dados v_c e F_n , conforme Figura 8.

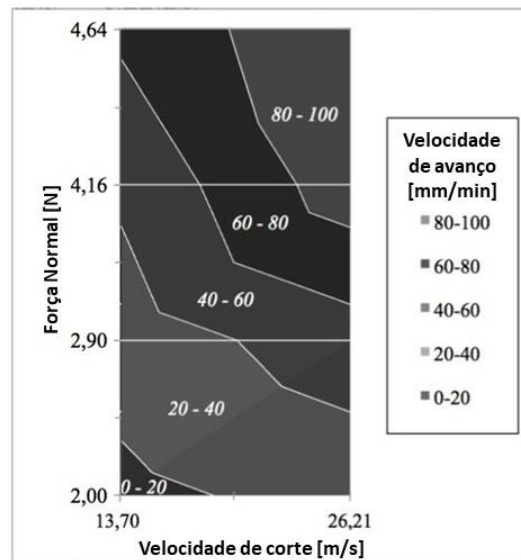


Figura 8 – Mapa de contorno de v_f em função da v_c e F_n .

5. CONCLUSÕES

A bancada de ensaios de corte com fio diamantado contínuo permite acompanhar o desgaste de um único grão ou grupo de grãos de diamante específicos durante o corte de amostras de silício. A bancada permite a avaliação da influência da variação dos parâmetros variáveis de entrada, como a tensão do fio, a força normal F_n e velocidade de corte (v_c). Em relação as demais bancadas de ensaios de corte com fio diamantado descritas na literatura, a presente bancada permite aumentar a velocidade de corte de $v_c \leq 7$ m/s para $v_c \leq 30$ m/s tornando possível avaliar parâmetros de corte empregados em máquinas de uso comercial que estão na ordem de $10 \text{ m/s} \leq v_c \leq 20 \text{ m/s}$.

A utilização de um sistema de avanço baseado em contra-peso mostrou-se eficaz para movimentar a peça. Porém a velocidade de avanço (v_f) é função da força normal (F_n) aplicada e isto dificulta uma análise mais aprofundada com relação a influência da mesma. Para aprimorar o estudo da influência da velocidade de avanço será implementado um sistema eletromecânico de avanço com o intuito de tornar o avanço um parâmetro de entrada e controlado permitindo comparar a influência entre os diferentes princípios dos sistemas sobre o processo e resultado de trabalho.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico e Científico (CNPq) pelo apoio e a *Saint-Gobain Abrasives* pelo fornecimento do fio diamantado.

7. REFERÊNCIAS

- BIDIVILLE, A.; WASMER, K.; VAN DER MEER, M.; BALLIF, C. "Wire-sawing processes: parametrical study and modeling". *Solar Energy Materials & Solar Cells* 132 (2015), p. 392-402.
- BOOTH, I. J. "Laser processing in industrial solar module manufacturing". *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, Vol. 5 (3), p. 183-191, 2010.
- GE, P. Q.; ZHANG, L.; GAO, W.; LIU, Z. C. "Development of endless diamond wire saw and sawing experiments". *Materials Science Forum* Vols 471-472 (2004), p. 481-484.
- KNOBLAUCH, R.; SILVEIRA, C. A.; CAMPOS, J. E. S.; WEINGÄERTNER, 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 (2017), p. 1-5.
- KLOCKE, F. "Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping". Editor Springer, 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* 57 (2017), p. 147-156.
- 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* 21 (2017), p. 1-11.
- MÖLLER, H. J. "Wafer Processing". *Handbook of Crystal Growth* (2015), p. 715-755.

- MÖLLER, H. J. "Basic mechanism and models of multi-wire sawing". *Advanced Engineering Materials* 7 (2004), p. 501-513.
- MÖLLER, H. J. "Wafering of Silicon". *Semiconductors and Semimetals* (2015), p. 1-47.
- PEGUIRON, J.; MUELLER, R.; ZANETTI, J.; HABEGGER, S.; BURRI, M.; SOPRA, F. M.; MEYER BURGUER. "Reducing wire wear by mechanical optimization". *Article PV Production Annual*, 2014.
- SATORI, S.; KURIYAMA, G. S. K.; ALVARENGA, T. H. P.; VIEIRA, B. S.; CAMPOS, L. M. S. "Os benefícios e desafios da geração de eletricidade no contexto da sustentabilidade". *Engema*, 2015.
- STOETERAU, R. L. "Desenvolvimento do protótipo de uma máquina-ferramenta comandada numericamente para usinagem de ultraprecisão com ferramenta de geometria definitiva". Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- WU, H. "Wire sawing Technologies: state-of-the-art review". *Precision Engineering* 43 (2016), p. 1-9.
- YU, X.; WANG, P.; LI, X.; YANG, D. "Thin Czochralski silicon solar cells based on diamond wire sawing technology". *Solar Energy Materials & Solar Cells* 98 (2012), p. 337-342.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

"Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho".

MONOCRYSTALLINE SILICON CUTTING WITH ENDLESS DIAMOND WIRE SAW

Erick Cardoso Costa, erickcardosocosta@hotmail.com¹
Ricardo Delgado de Souza, ricardo.delgado@posgrad.ufsc.br¹
Ricardo Knoblauch, ricardo.knoblauch@posgrad.ufsc.br¹
Walter Lindolfo Weingaertner, wlw@emc.ufsc.br¹
Fabio Antonio Xavier, f.xavier@ufsc.com¹
Konrad Wegener, wegener@iwf.mavt.ethz.ch²

¹Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP, Bairro Trindade, 88040900, Florianópolis – SC, Brasil.

²Institute of Machine Tools and Manufacturing – IWF, Zurique, Suíça.

Abstract. *The increasing demand for renewable energy generation has been influenced by recent climate change. This rapid market expansion has driven the development of technologies that support the production chain and increase the efficiency of photovoltaic modules. However, several factors restrain the expansion of photovoltaic technology, especially with regard to the cost of raw materials and manufacturing. There are several methods employed in the production chain to optimize it. Amongst all the processes of the production chain, the multi-wire sawing is one of the most critical stages. Due to the characteristics and kinematics of the process, monitoring and investigating the influence of input cutting parameters on the yield and sawn wafer quality is difficult to be performed. In this paper is presented the design and construction of an endless wire saw test rig that permits the evaluation of the input cutting parameters on the wafering process. The test rig employs an endless diamond wire, and the results showed that the cut was efficient and it was possible to analyze the wear of the wire after several cuts.*

Keywords: *endless diamond wire, machine design, diamond grain wear, silicon wafering, photovoltaic technology.*