

ANÁLISE DA ESPESSURA DOS VIDROS E DA INTERFACE MOLDURA-VIDRO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BIFACIAIS COM USO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Bruno do Nascimento e Silva – brunonascimento@isi-er.com.br

Maria de Fátima Alves de Matos

André Luiz de Oliveira Lira

Caio Graco Lopes Alves

Dimas Alves Ferreira

Alan Rodrigues de Sousa

Samira de Azevedo Santos Emiliavaca

Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis (ISI-ER)

Resumo. A usina de testes localizada na Fotovoltaica-UFSC em Florianópolis/SC (27° S, 48° O), conta com uma potência instalada de aproximadamente 100 kWp, sendo projetada inicialmente para avaliar e demonstrar o potencial de maximização da vida operacional e da geração de energia (MWh) por potência instalada (MWp) de módulos bifaciais vidro//vidro. Entretanto, este projeto de pesquisa foi surpreendido com quebras nos vidros dos módulos fotovoltaicos bifaciais bem acima do esperado. Aproximadamente 50% dos módulos instalados apresentaram falhas nos vidros após somente nove meses de operação da usina. Este estudo surgiu como uma das linhas de pesquisa destinadas a buscar uma melhor compreensão da origem dessas falhas. A análise foi dividida em duas etapas investigativas para investigar pontos de concentração de tensões ao longo da interface formada entre o vidro e a moldura de alumínio. Com o uso de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), foi analisada a espessura dos vidros e a interface ao longo de todo o perfil do módulo, identificando locais onde a espessura do vidro é menor que a especificação do fabricante, além de defeitos de fabricação na interface formada entre os vidros e a moldura de alumínio. Este estudo, embora preliminar, destaca a necessidade de pesquisas mais abrangentes para compreender as causas das trincas observadas em grandes usinas e sugere análises adicionais para uma compreensão mais completa do problema.

Palavras-chave: módulos bifaciais, painéis solares fotovoltaicos, quebra de vidro

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a crescente adoção de painéis solares fotovoltaicos (PV) como fonte de energia limpa e renovável tem marcado um avanço significativo na transição para uma sociedade mais sustentável e ecologicamente consciente. Segundo a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2023), em 2022 a capacidade global instalada de geração de energia fotovoltaica atingiu 295 GW, o que representa um aumento acumulado de 9,6% em relação a 2021, totalizando 3.372 GW, marcando assim um crescimento recorde. No contexto brasileiro, a capacidade instalada ultrapassou 32 GW, com o ano de 2023 registrando a maior expansão anual do setor, de acordo com Ministério de Minas e Energia (MME, 2023).

Ao discutir o crescimento do setor de energia solar fotovoltaica nos últimos anos, é imprescindível destacar a importância dos módulos bifaciais nessa expansão. Esses módulos possuem a característica de produzir energia em ambas as faces, tirando proveito da irradiação solar refletida pelo solo, o albedo, possibilitando uma maior geração de energia (MWh) por potência instalada (MWp) (Langels e Gannedahl, 2018; Gu *et al.*, 2021; Muehleisen *et al.*, 2021; Matarneh, Al-Rawajfeh e Gomaa, 2022).

O Relatório Internacional de Tecnologia para Fotovoltaica de 2022 (VDMA, 2023) apresenta diversas tendências relevantes na indústria fotovoltaica. Um dos destaques deste relatório é a tendência de crescimento na participação de mercado dos módulos bifaciais, em resposta a uma demanda por maior eficiência e capacidade de geração em sistemas fotovoltaicos de grande escala. Os módulos bifaciais já detêm uma significativa participação de mercado, alcançando 70% em 2023, com previsão de atingir impressionantes 90% até 2033. Outro destaque importante está relacionado ao aumento de área para que os módulos integrem células fotovoltaicas maiores, de 210 milímetros (G12), por exemplo. Módulos com áreas superiores a 2,5 m² estão ganhando participação no mercado, detendo atualmente cerca de 55% de mercado e com uma expectativa de atingir aproximadamente 90% até 2033. Por fim, o relatório destaca uma tendência de redução na espessura dos vidros usados em módulos fotovoltaicos, especialmente nos módulos bifaciais. Embora a maioria do mercado atualmente empregue vidros com espessura entre 2 e 3 milímetros, o relatório aponta para um crescimento na adoção de módulos com vidros de menos de 2 milímetros de espessura em ambas as faces. Essa

mudança é uma resposta às demandas por redução de peso resultante do aumento de área e da utilização de uma estrutura vidro//vidro dos módulos fotovoltaicos bifaciais de maior potência (Parra e Whittemore, 2023).

No entanto, é importante salientar que a tendência de crescimento no uso de módulos bifaciais vidro//vidro, aumento de área e redução da espessura dos vidros podem introduzir um desafio significativo para a integridade desses dispositivos. Módulos mais extensos e com vidros mais finos podem tornar-se mais suscetíveis a falhas, tanto do vidro como das células, em casos de flexão ou torção (Jaubert, 2023; Parra e Whittemore, 2023).

Um projeto de pesquisa recente, realizado em colaboração entre a Fotovoltaica-UFSC, o Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis (ISI-ER) e a Universidade Estadual Paulista (UNESP), com financiamento da CTG Brasil por meio do Programa de P&D da ANEEL, foi concebido com o propósito inicial de investigar o desempenho de módulos bifaciais em diversas condições climáticas e níveis de albedo. Para este estudo, uma usina de 100 kWp foi projetada, fazendo uso de módulos bifaciais de vidro//vidro de grande área (mais de 3 m²) e com espessura de 2 milímetros em ambos os vidros. Logo após a fase de comissionamento, foram identificadas quebras nos vidros, tanto na parte frontal quanto na traseira desses módulos, com 50% dos módulos instalados apresentando falhas nove meses após o comissionamento da usina (Braga *et al.*, 2023). Nenhum evento de rajadas de ventos ou temperaturas elevadas foi observado durante o período de testes, e até o momento, as rachaduras no vidro não afetaram a segurança ou o desempenho do sistema (Braga *et al.*, 2023). Os impactos causados por essas falhas nos vidros continuam sendo investigados neste projeto de pesquisa. No entanto, a preocupação com a confiabilidade a longo prazo dos módulos com trincas nos vidros permanece.

O presente estudo surgiu como uma das linhas de pesquisa destinadas a buscar uma melhor compreensão das falhas nos vidros observadas na usina de testes citada anteriormente. Essas investigações visam aprofundar nosso conhecimento sobre as possíveis causas dessas falhas, apresentando uma análise abrangente do perfil da espessura dos vidros nos módulos fotovoltaicos bifaciais vidro//vidro utilizados na usina de testes, além de analisar a interface formada entre os vidros e a moldura de alumínio destes módulos, oferecendo informações valiosas para a auxiliar na melhoria da confiabilidade e segurança dos módulos bifaciais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A usina de testes, localizada na Fotovoltaica-UFSC em Florianópolis/SC (27° S, 48° O), possui uma potência instalada de aproximadamente 100 kWp, divididos em cinco sistemas rastreados e um sistema fixo. Inicialmente projetada para avaliar e demonstrar o potencial de maximização da vida operacional e da geração de energia (MWh) por potência instalada (MWp) de usinas solares fotovoltaicas, este projeto de pesquisa foi surpreendido com trincas nos vidros bem acima do esperado, tanto na parte frontal quanto na traseira dos módulos fotovoltaicos bifaciais de grande área. Aproximadamente, 50% dos módulos instalados apresentaram falhas nos vidros após somente nove meses de operação da usina.

Para investigar o problema, foi selecionado um módulo aleatório do mesmo lote dos módulos utilizados na usina de teste. As principais características do módulo testado, conforme o seu *datasheet*, são apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1 - Dados do módulo ensaiado.

POTÊNCIA	ÁREA	TIPO DE MÓDULO	VIDRO FRONTAL	VIDRO TRASEIRO
645 Wp	3,1 m ²	Bifacial	2 mm - fortalecido termicamente	2 mm - fortalecido termicamente

Este estudo foi dividido em duas etapas investigativas. Primeiramente, o objetivo era compreender se as trincas com origem nas laterais dos módulos, mais especificamente na interface entre os vidros e a moldura de alumínio, eram iniciadas por algum ponto de concentração de tensões ao longo desta interface. Para esta análise, os módulos foram posicionados em uma superfície plana, para limitar a influência das cargas de torção da estrutura no espaçamento entre o vidro e a moldura de alumínio, em seguida, uma folha de papel A4 com espessura aproximada de 0,074 milímetro foi posicionada entre a moldura de alumínio e a placa de vidro superior. Ao movimentar a folha na extensão do módulo foi observado que a folha encontrava pontos de resistência, indicando variações na espessura desta interface ao longo da extensão do módulo, como pode ser observado na Fig. 1.



Figura 1 - Verificação da variação no espaçamento entre a moldura e o vidro.

Em seguida, foi realizado um ensaio destrutivo para quantificar a variação no espaçamento na interface formada entre a moldura e o vidro. Para realização do ensaio destrutivo, foi utilizada uma máquina ferramenta de corte com jato de água modelo Flow Série Mach 3. Foram selecionados 57 corpos de prova ao longo de todo o perímetro externo do módulo fotovoltaico, os corpos de prova foram classificados em função da sua posição no módulo: superior (S), inferior (I), lado esquerdo (ES e EI) e lado direito (DS e DI), enquanto os números representam a distância em milímetros para a extremidade utilizada como referência. As amostras “S” tem sua referência iniciada do lado esquerdo do módulo e as amostras “I” tem sua referência iniciada do lado direito do módulo. As amostras “ES” e “DS” tem sua referência na parte superior do módulo, enquanto as amostras “EI” e “DI” tem sua referência na parte inferior do módulo. Por exemplo, a amostra “S35” foi retirada da parte superior do módulo, 35 milímetros a contar do lado esquerdo desta face. Já a amostra “ES385” foi retirada da parte esquerda do módulo, 385 milímetros a contar da parte superior, conforme pode ser observado na Fig. 2.

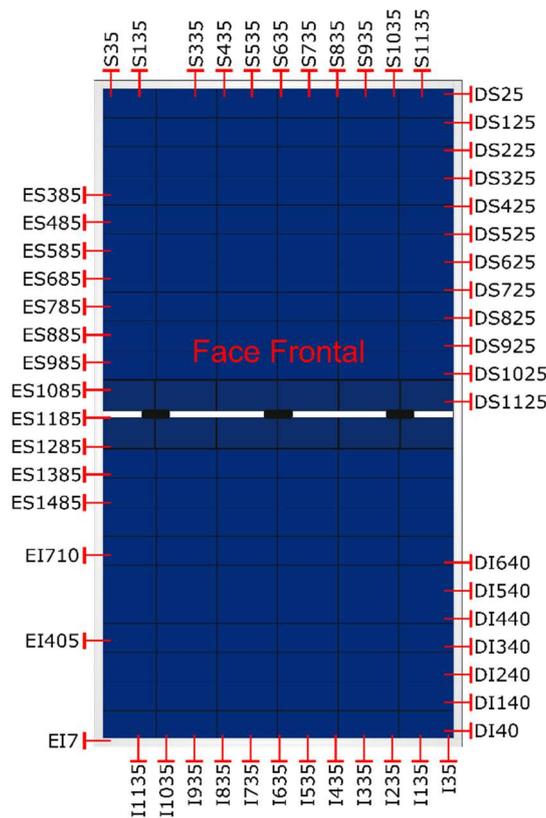


Figura 2 - Esquema de corte e nomenclatura adotada para os corpos de prova.

O corte dos corpos de prova foi realizado partindo da face externa da moldura de alumínio se estendendo por 25 milímetros em direção ao centro do módulo, visando preservar a interface formada entre a moldura e as chapas de vidro superior e inferior. O processo de corte pode ser visto na Fig. 3, com as setas vermelhas indicando os corpos de prova cortados e prontos para remoção, e os corpos de prova separados de acordo com sua posição no módulo pode ser observado na Fig. 4.



Figura 3 - Processo de corte dos corpos de prova.



Figura 4 - 57 corpos de prova classificados por fileiras correspondendo sua posição no módulo, de cima para baixo: parte superior, parte esquerda, parte direita e parte inferior.

Com os corpos de prova separados e classificados, o objetivo passou a ser validar a hipótese de variações na espessura da interface entre a moldura e as placas de vidro superior e inferior, observadas com o teste realizado com uma folha de papel A4. Para tanto, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) TESCAN Vega 3, visto que com um MEV, é possível realizar medições de comprimento extremamente precisas. A Fig. 5, detalha a seção transversal da moldura do módulo ensaiado. Para verificação de descontinuidades ao longo da extensão da interface, foram realizadas imagens de cada um dos 57 corpos de prova com posterior determinação do comprimento de 6 pontos principais, detalhados a seguir.

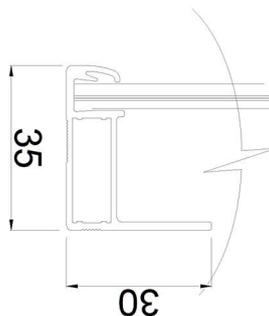


Figura 5 - Seção transversal da interface vidros//moldura.

Foram avaliados os seguintes critérios nos corpos de prova analisados (Fig. 6):

- Espessura entre o 1º anteparo de alumínio (interno) e o vidro superior ou vazios no preenchimento de PU;
- Espessura entre o 2º anteparo de alumínio (externo) e o vidro superior ou vazios no preenchimento de PU;
- Espessura do vidro superior;
- Espessura do vidro inferior;
- Espessura do preenchimento de PU inferior;
- Espessura entre o 2º anteparo de alumínio (externo) e a base inferior da moldura.

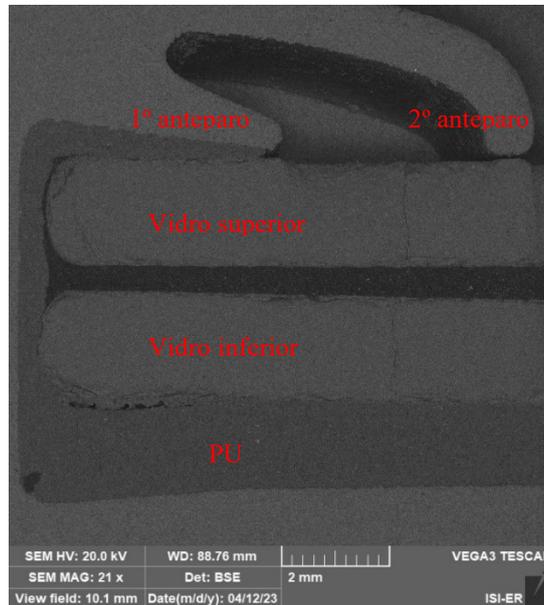
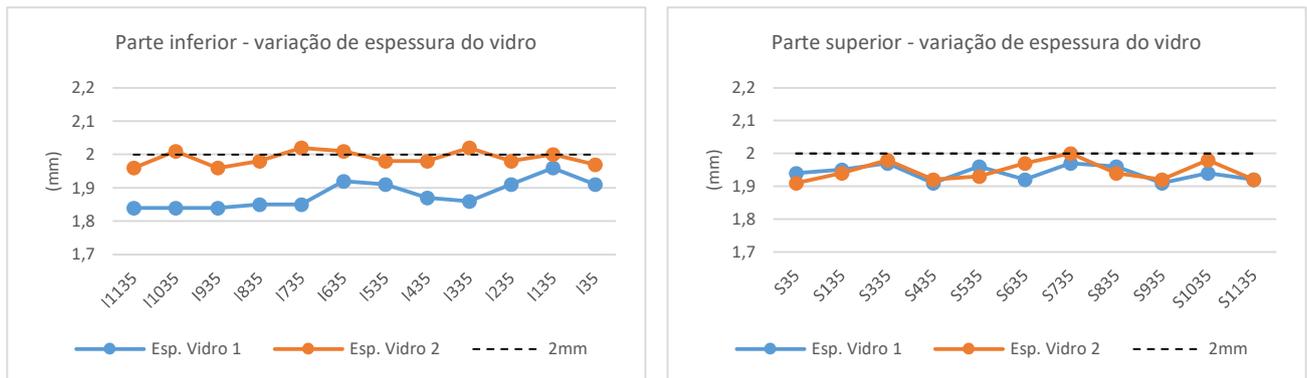


Figura 6 - Pontos de medição na interface vidros//moldura.

3. RESULTADOS

Os valores das cotas medidos com o MEV são apresentados por meio de gráficos de linhas, proporcionando uma representação visual da variação das espessuras ao longo dos perfis superior, inferior e laterais esquerdo e direito do módulo fotovoltaico. As linhas pretas tracejadas na Fig. 7 representam os 2 milímetros de espessura dos vidros frontal e traseiro informados pelo fabricante.

É importante ressaltar que as medidas foram realizadas ao longo dos perfis externos do módulo, não sendo observada, neste estudo, a variação das espessuras das placas de vidro ao longo da seção transversal do módulo.



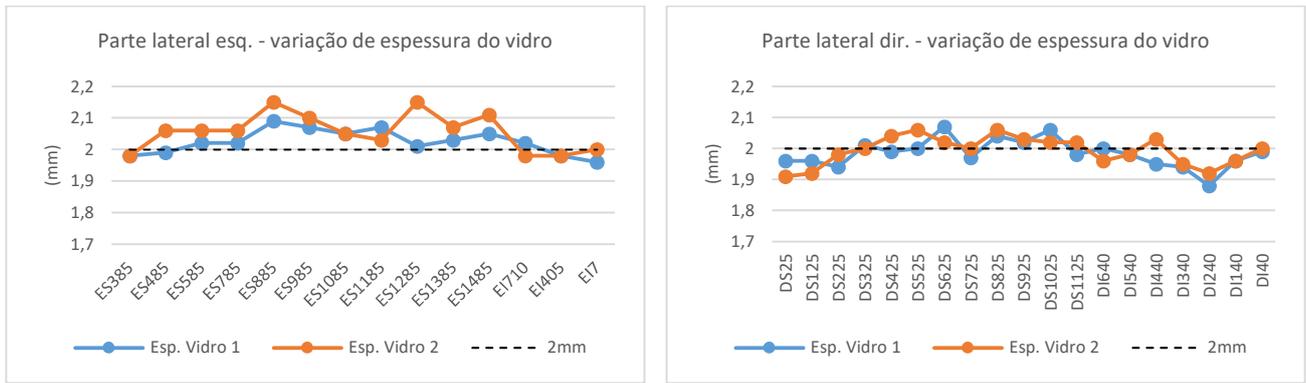


Figura 7 - Gráficos com as espessuras do vidro frontal e traseiro ao longo dos quatro perfis externos do módulo bifacial.

Na Fig. 7, é possível observar a variação na espessura dos vidros nos quatro perfis analisados. No vidro frontal, a maior variação foi encontrada no perfil inferior do módulo, com três amostras apresentando 1,84 milímetros de espessura, representando uma redução de 8% em relação às especificações do fabricante. Quanto ao vidro traseiro, manteve-se muito próximo às especificações do fabricante, destacando-se por apresentar 2,15 milímetros em duas amostras do perfil esquerdo do módulo ensaiado.

Outro ponto observado nas medições foi a presença de "vazios" entre o vidro superior e os dois anteparos de alumínio, sendo esses anteparos responsáveis por posicionar os vidros dentro da moldura do módulo. Essas estruturas podem ser visualizadas acima do vidro superior na Fig. 6, em que o primeiro anteparo representa a estrutura interna e o segundo, a estrutura externa.

Na Fig. 8, são apresentadas as variações de espessura dos "vazios" observados nos anteparos de alumínio, por meio de microscopia eletrônica, em relação aos 57 corpos de prova do módulo fotovoltaico analisado.

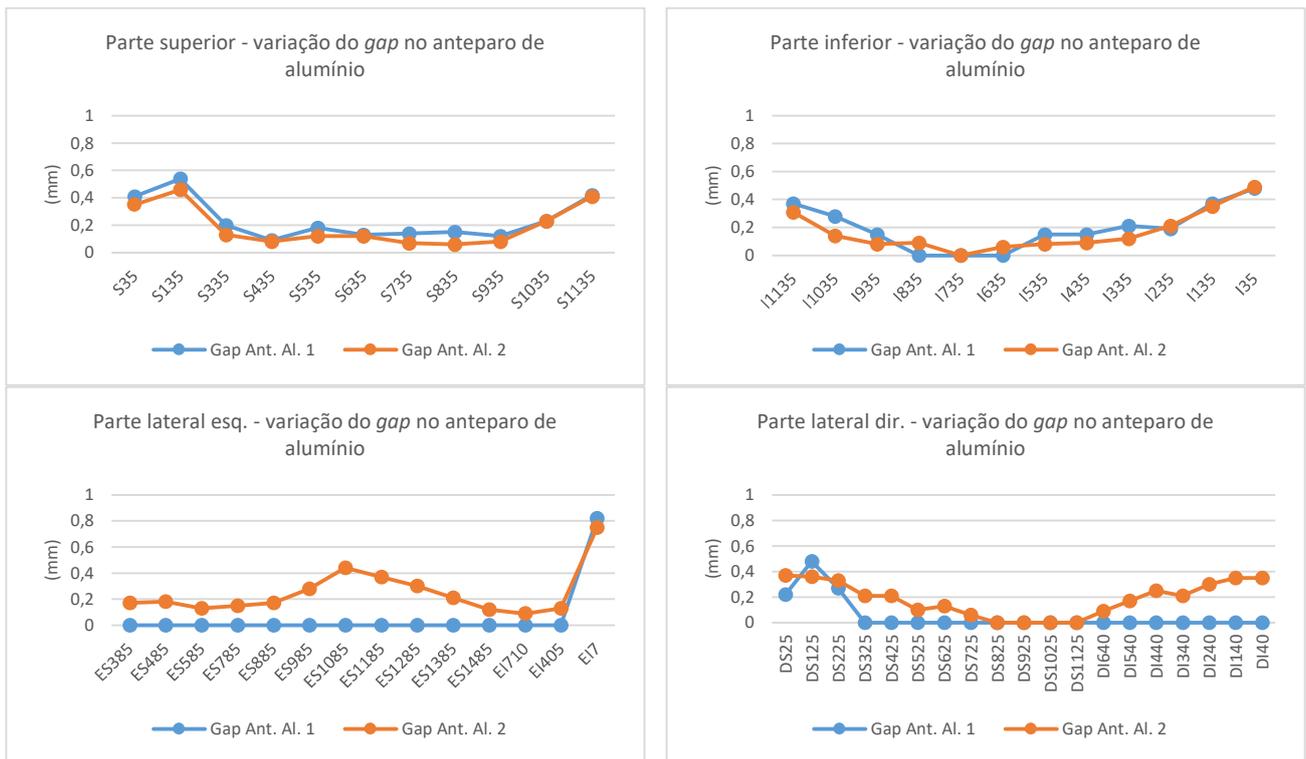


Figura 8 - Gráficos com as variações de espessura dos "vazios" ao longo dos quatro perfis externos do módulo bifacial.

O maior espaçamento observado foi no perfil inferior esquerdo do módulo (Fig. 9c), com uma região apresentando 0,82 milímetros de “vazio” entre o primeiro anteparo de alumínio e o vidro superior, no entanto, ao longo de todo o perfil lateral do módulo é possível observar um certo grau de espaçamentos nesta interface. Este espaçamento tem maior incidência nas extremidades do módulo, com as partes centrais dos quatro perfis apresentando valores menores de espaçamento na interface. Ainda é possível observar nas imagens da microscopia, que parte dos vazios na interface são causados por falta de preenchimento de PU (Fig. 9c) ou extrusão de PU em excesso entre os dois anteparos de alumínio, ocasionando num levantamento do segundo anteparo de alumínio (Fig. 9b), ambos os casos podem ser comparados com uma deposição adequada da PU, conforme demonstrado na Fig. 9a.

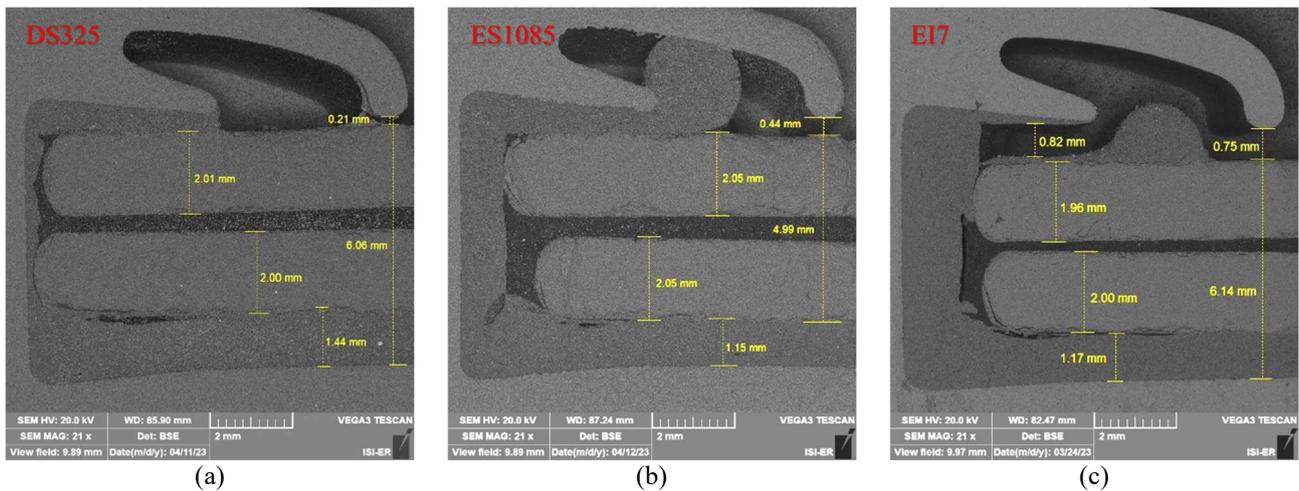


Figura 9 - Comparação entre uma (a) amostra sem “vazios” na interface, uma (b) amostra com extrusão da PU e uma (c) amostra com deslocamento da PU.

4. CONCLUSÕES

Na busca por redução peso dos módulos de grade área, a indústria de módulos fotovoltaicos migrou para utilização de vidros com 2 milímetros de espessura (Mittag, Eitner e Neff, 2017). Um problema introduzido com esta mudança, tem relação direta com o tratamento térmico utilizado nestes vidros de menor espessura. Enquanto nos vidros com 3 milímetros o processo de tratamento térmico é a têmpera, que busca fortalecer o vidro criando tensões internas para aumentar sua resistência mecânica, à medida que o vidro se torna mais fino, se dificulta criar o gradiente de temperatura necessário para realizar a têmpera. Portanto, o vidro de 2 milímetros utilizado em módulos de vidro//vidro de grande área é apenas fortalecido termicamente, onde o estresse compressivo na superfície é menor do que o do vidro totalmente temperado (Hieslmair, Samara e Jovanovic, 2023). Nos vidros tratados por meio de têmpera a resistência a flexão gira em torno de 120 N/mm², enquanto nos vidros fortalecidos termicamente a resistência a flexão gira em torno de 70 N/mm² (Weber *et al.*, 2023), uma redução de aproximadamente 42%.

Ao analisar as variações na espessura dos vidros do módulo ensaiado, observou-se uma sutil variação na espessura em algumas regiões do vidro frontal, especialmente no perfil inferior do módulo, onde três amostras apresentaram 1,84 milímetros, representando uma diminuição de 8% em relação às especificações do fabricante. Por outro lado, o vidro traseiro manteve-se próximo às especificações do fabricante, destacando-se por apresentar 2,15 milímetros em duas amostras do perfil esquerdo do módulo. Essa análise permite identificar pontos críticos que podem influenciar na integridade dos módulos bifaciais, especialmente em regiões com uma espessura de vidro abaixo das especificações do fabricante.

Além disso, a investigação na interface formada entre o vidro superior e os anteparos de alumínio da moldura revelou a presença de espaçamentos, com destaque para o perfil inferior esquerdo do módulo, apresentando 0,82 milímetros de "vazio" entre o primeiro anteparo de alumínio e o vidro superior. Esses espaçamentos são mais evidentes nas extremidades do módulo, com variações ao longo do perfil lateral. A identificação de falta de preenchimento de PU e extrusão da PU nesta interface, podem comprometer a integridade estrutural dos módulos, especialmente em condições de deflexão ou torção, criando pontos de concentração de tensões.

Este estudo, embora limitado a uma análise preliminar para investigar a causa das trincas observadas na usina de testes localizada na Fotovoltaica-UFSC em Florianópolis/SC (27° S, 48° O), tem o potencial de auxiliar em outras frentes de pesquisa. Segundo a PV Magazine, um número alarmante de usinas está reportando quebras de vidros sem um motivo aparente (Weber *et al.*, 2023), indicando a necessidade de estudos futuros mais abrangentes para compreender as causas das trincas observadas em usinas. Por limitações técnicas, foi analisado somente um módulo fotovoltaico, para uma melhor compreensão do problema, é recomendado que futuros estudos realizem a análise de uma maior amostragem, incluindo módulos de diversos fabricantes, visando constatar se os defeitos de fabricação observados na interface formada entre o vidro e a moldura de alumínio foram pontuais. Outro ponto de sugestão para estudos futuros, é a análise do perfil transversal de espessura de vidro, no estudo atual foi analisado somente os perfis laterais de espessura dos vidros frontal e traseiro.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao ISI-ER pelo apoio com a disponibilização dos equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho e à CTG Brasil pelo custeio da bolsa de pesquisa e aporte financeiro atual no âmbito do projeto ANEEL PD-10381-0620/2020.

REFERÊNCIAS

- Braga, M., Pinto, G. X. A., Pires, A. M., Zamboni, A. H., Nascimento, L. R.; Rütther, R., 2023. Case Study - Glass cracks on large-format bifacial glass/glass modules with 2 mm heat-strengthened glass. Disponível em: <https://scorecard.pvel.com/mechanical-stress-sequence/>. Acessado em: 5 nov. 2023.
- Gu, W., Li, S., Liu, X., Chen, Z., Zhang, X., Ma, T., 2021. Experimental investigation of the bifacial photovoltaic module under real conditions. *Renewable Energy*, vol. 173, p. 1111–1122. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.024>.
- Hieslmair, H., Samara, F., Jovanovic, M., 2023. Stress concentrators. DNV. Disponível em: <https://www.dnv.com/article/stress-concentrators-246984>. Acessado em: 26 nov. 2023.
- IRENA, 2023. Renewable Capacity Statistics 2023. Abu Dhabi. Disponível em: www.irena.org/Publications. Acessado em: 24 out. 2023.
- Jaubert, J., 2023. The Risk of Breakage in Thinner, Not Fully Tempered Glass. 2023 NREL Photovoltaic Reliability Workshop.
- Langels, H., Gannedahl, F., 2018. BiFacial PV Systems - A technological and financial comparison between BiFacial and standard PV panels.
- Matarneh, G. A., Al-Rawajfeh, M. A., Gomaa, M. R., 2022. Comparison review between monofacial and bifacial solar modules. *Technology audit and production reserves*, vol. 6, no 1(68). <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.268955>.
- Mittag, M., Eitner, U., Neff, T., 2017. TPedge: Progress on Cost-Efficient and Durable Edge-Sealed PV Modules. 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition, p. 48–54. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20172017-1CO.1.4>.
- MME, 2023. Brasil bate recorde de expansão da energia solar em 2023 — Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-bate-recorde-de-expansao-da-energia-solar-em-2023>. Acessado em: 24 out. 2023.
- Muehleisen, W., Loeschning, J., Feichtner, M., Burgers, A. R., Bende, E. E., Zamini, S., Yerasimou, Y., Kosel, J., Hirschl, C., Georghiou, G. E., 2021. Energy yield measurement of an elevated PV system on a white flat roof and a performance comparison of monofacial and bifacial modules. *Renewable Energy*, vol. 170. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.015>.
- Parra, V., Whittemore, J., 2023. Bigger modules, bigger headaches. *pv magazine International*. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/2023/04/06/bigger-modules-bigger-headaches/>. Acessado em: 26 out. 2023.
- VDMA, 2023. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) - Results 2022. Germany. Disponível em: <https://www.vdma.org/international-technology-roadmap-photovoltaic>. Acessado em: 23 out. 2023.
- Weber, T., Boruha, M., Agada, R., Pyles, J., Lu, M., Xuereb, S., 2023. Glass Breakage - A Growing Phenomenon in Large-scale PV. *PV magazine webinar* - 20.11.2023. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/webinars/glass-breakage-a-growing-phenomenon-in-large-scale-pv/>. Acessado em: 26 nov. 2023.

ANALYSIS OF GLASS THICKNESS AND FRAME-GLASS INTERFACE IN BIFACIAL PHOTOVOLTAIC MODULES USING SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

Abstract. *The test plant located at Fotovoltaica-UFSC in Florianópolis/SC (27° S, 48° W) has an installed capacity of approximately 100 kWp and was initially designed to evaluate and demonstrate the potential for maximizing the operational life and energy generation (MWh) per installed power (MWp) of glass/glass bifacial modules. However, this research project was surprised by glass breakage in the bifacial photovoltaic modules well above the expected. Approximately 50% of the installed modules showed glass failures after only nine months of plant operation. This study emerged as one of the research lines aimed at seeking a better understanding of the origin of these failures. The analysis was divided into two investigative stages to investigate stress concentration points along the interface formed between the glass and the aluminum frame. Using a scanning electron microscope (SEM), the glass thickness and the interface along the entire module profile were analyzed, identifying areas where the glass thickness is less than the manufacturer's specification, as well as manufacturing defects in the interface formed between the glass and the aluminum frame. This study, although preliminary, highlights the need for more comprehensive research to understand the causes of the cracks observed in large plants and suggests additional analyses for a more complete understanding of the problem.*

Keywords: *bifacial modules, photovoltaic solar panels, glass breakage.*